



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

ALESSANDRO DE ARAÚJO BEZERRA

**MODELAGEM NUMÉRICA COMPUTACIONAL APLICADA À CALIBRAÇÃO
ATRAVÉS DE NOVAS EQUAÇÕES PARA O USO DO MÉTODO ITERATIVO DO
GRADIENTE HIDRÁULICO/CONCENTRAÇÃO ALTERNATIVO (MIGHA) EM
REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

FORTALEZA

2018

ALESSANDRO DE ARAÚJO BEZERRA

MODELAGEM NUMÉRICA COMPUTACIONAL APLICADA À CALIBRAÇÃO
ATRAVÉS DE NOVAS EQUAÇÕES PARA O USO DO MÉTODO ITERATIVO DO
GRADIENTE HIDRÁULICO/CONCENTRAÇÃO ALTERNATIVO (MIGHA) EM REDES
DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Marco Aurélio Holanda de Castro, Ph.D.

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

B469m Bezerra, Alessandro de Araújo.

Modelagem numérica computacional aplicada à calibração através de novas equações para o uso do método iterativo do gradiente hidráulico/concentração alternativo (MIGHA) em redes de distribuição de água / Alessandro de Araújo Bezerra. – 2018.

974 f. : il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2018.

Orientação: Prof. Dr. Marco Aurélio Holanda de Castro.

1. Calibração. 2. C de Hazen-Williams. 3. fator de atrito. 4. vazão. 5. coeficiente de decaimento do cloro.
I. Título.

CDD 627

ALESSANDRO DE ARAÚJO BEZERRA

MODELAGEM NUMÉRICA COMPUTACIONAL APLICADA À CALIBRAÇÃO
ATRAVÉS DE NOVAS EQUAÇÕES PARA O USO DO MÉTODO ITERATIVO DO
GRADIENTE HIDRÁULICO/CONCENTRAÇÃO ALTERNATIVO (MIGHA) EM REDES
DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Aprovada em 06/03/2018

BANCA EXAMINADORA

Prof. Marco Aurélio Holanda de Castro, Ph.D. (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. John Kenedy de Araújo (Membro)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Iran Eduardo Lima Neto, Ph.D. (Membro)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Paulo Sergio Franco Barbosa (Membro)
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

Prof. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo (Membro)
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

À minha família.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por estar sempre presente na minha vida, proporcionando oportunidades de aprendizado, de saberes, de trabalho e amizades imprescindíveis ao longo do caminho.

À minha esposa Renata Shirley de Andrade Araújo, por todo amor, carinho e apoio, não só durante o doutorado, mas por todos os anos em que estamos juntos, me ajudando a conquistar todos os meus (nossos) sonhos.

Ao meu filho Arthur de Andrade Araújo Bezerra, que trouxe muitos momentos de felicidade e alegria.

À minha mãe, Stela Maria de Araújo, por toda dedicação e educação, que me permitiu crescer e tornar-me uma pessoa de bem e, conseqüentemente, o profissional que sou hoje.

Aos meus sogros, Francisco Pacífico Valdivino e Maria Odete de Andrade Valdivino, pelo apoio e incentivo.

Às minhas irmãs, Natália de Araújo Loiola e Roberta de Andrade Valdivino por estarem presentes durante toda essa trajetória de aulas e de trabalhos.

Ao meu professor, amigo e orientador, Marco Aurélio Holanda de Castro, pelo conhecimento que ajudou a construir, pela confiança nos meus projetos e conselhos que ajudaram no crescimento intelectual e profissional.

Aos professores John Kenedy de Araújo e Iran Eduardo Lima Neto pelo auxílio no acompanhamento do meu desenvolvimento acadêmico/profissional, incluindo este trabalho.

Aos professores Paulo Sergio Franco Barbosa e José Roberto Gonçalves de Azevedo pelo tempo e pelas contribuições ao examinar este trabalho, cuja presença já o engrandecem.

Aos professores do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental – DEHA pelo conhecimento transmitido ao longo das disciplinas.

Aos colaboradores do DEHA Shirley, Erivelton e Edineuza pelo auxílio institucional.

Aos colegas do Departamento de Recursos Hídricos, Geotecnia e Saneamento Ambiental – DRHGSA da Universidade Federal do Piauí – UFPI pelo apoio.

À direção do Centro de Tecnologia da UFPI, pelo incentivo e apoio.

"Nesta vida pode-se aprender três coisas de uma criança: Estar sempre alegre; nunca ficar inativo; e, chorar com força por tudo aquilo que se quer." (Paulo Leminski)

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de novas equações para o uso do Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo (MIGHA), em redes de distribuição de água, baseadas na proporcionalidade entre os elementos calibrados e o gradiente hidráulico, findando a calibração do coeficiente C de Hazen-Williams, a calibração do fator de atrito de Darcy-Weisbach seguido do cálculo da rugosidade absoluta, a calibração da vazão e cálculo dos consumos nodais, tanto para a perda de energia ao longo do escoamento calculada pela equação de Hazen-Williams quanto pela fórmula universal, ou cálculo de perdas ao longo da rede e, por fim, a calibração da constante de decaimento total do cloro ao longo da tubulação e posterior cálculo do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação. Um software, denominado UFC10, foi desenvolvido possibilitando a calibração dos parâmetros de uma rede de distribuição através das metodologias propostas neste trabalho usando, como simulador hidráulico e de qualidade de água, o Epanet. Foram realizadas várias calibrações, sendo 348 do C de Hazen-Williams, 348 do fator de atrito, 348 da vazão com a equação de Hazen-Williams e 348 da vazão com a fórmula universal, para cálculo do consumo dos nós, todas as calibrações divididas em 4 redes de distribuição. Também foram realizadas 82 calibrações da vazão para análise das perdas físicas de água na rede e, por fim, 194 calibrações da constante de decaimento total do cloro. Para todos os casos foram testados a influência do número de dados observados, o tipo dos dados observados, pressão ou vazão, a localização dos dados observados e os valores iniciais dos parâmetros a ser encontrados. Para este último teste, uma sub-rotina computacional foi desenvolvida com a finalidade de buscar o melhor valor inicial. Foi encontrado que quanto mais o parâmetro inicial escolhido estiver próximo do real, melhores serão os resultados encontrados, no entanto, valores com certa distância também geram bons resultados, mas, valores incoerentes geram resultados diferentes da realidade. A sub-rotina computacional desenvolvida não chegou ao melhor resultado em nenhum caso, mas se mostrou uma boa ferramenta. Os resultados também mostraram que o uso de vazões como dados de entrada não é adequado no processo MIGHA de calibração do C ou do fator de atrito, em que se deve utilizar pressões, mas funciona bem na calibração da vazão. Quanto à disposição dos nós com dados observados, estes devem estar centralizados e, se possível, distantes uns dos outros. Ao ser comparado a outro método, o MIGHA apresentou bons resultados, mas não os melhores.

Palavras-chave: Calibração, C de Hazen-Williams, fator de atrito, vazão, coeficiente de decaimento do cloro.

ABSTRACT

The main objective of this work is the development of new equations for the use of the Alternative Hydraulic Gradient Iterative Method, in water distribution networks, based on the proportionality between the calibrated elements and the hydraulic gradient, for the calibration of the coefficient C of Hazen-Williams, the calibration of the Darcy-Weisbach friction factor followed by the calculation of the absolute roughness, the calibration of the flow and calculation of the nodal consumptions, for head loss along the flow calculated by the Hazen-Williams equation and by the universal formula, or water loss calculation along the network, and finally the calibration of the total chlorine decay constant along the pipe and subsequent calculation of the chlorine decay coefficient on the pipe walls. A software, called UFC10, was developed allowing the calibration of the parameters of a distribution network through the methodologies proposed in this work using Epanet as a hydraulic and water quality simulator. It was done 348 Hazen-Williams C calibrations, 348 friction factor calibrations, 348 flow calibrations were performed using the Hazen-Williams equation and 348 flow calibrations based on the universal formula for calculating the consumption of the nodes, all calibrations divided into 4 distribution networks. Also, 82 calibrations of the flow were performed to analyze the physical losses of water in the network, and finally, 194 calibrations of the total chlorine decay constant. The influence of the number of observed data, the type of data observed, pressure or flow, the location of the observed data and the initial values of the parameters to be found were tested for all cases. For this last test, a computational subroutine was developed with the purpose of seeking the best initial value. It was found that the more the initial parameter chosen is close to the real one, better results were found, however, values with a certain distance also generate good results, but, incoherent values generate very different results from reality. The developed computational subroutine did not reach the best result, but it proved to be a good tool. The results also showed that the use of flow rates as input data in the MIGHA calibration process of the C or the friction factor is not adequate, pressures must be used, however, it was good for flow calibrations. As for the arrangement of nodes with observed data, these must be centralized and thus distant from one another. When compared to another method, MIGHA was a good one, but not the best.

Keywords: Calibration, Hazen-Williams C , friction factor, flow rate, chlorine decay coefficient.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----------|--|-----|
| Figura 1 | – População urbana atendida por sistemas de abastecimento de água no Brasil ... | 40 |
| Figura 2 | – População total atendida por sistemas de abastecimento de água no Brasil | 40 |
| Figura 3 | – Componentes de um sistema de abastecimento de água | 42 |
| Figura 4 | – Exemplo de rede dupla | 46 |
| Figura 5 | – Exemplo de rede ramificada | 47 |
| Figura 6 | – Exemplo de rede malhada | 47 |
| Figura 7 | – Representação de nós e trechos de uma rede de distribuição | 48 |
| Figura 8 | – Variação do consumo diário de água | 50 |
| Figura 9 | – Variação do consumo horário de água | 51 |
| Figura 10 | – Variação do coeficiente C de Hazen-Williams com o número de Reynolds, rugosidade relativa e diâmetros, sendo: a) 82,6 mm; b) 305 mm; e c) 1.219 mm. | 55 |
| Figura 11 | – Definição do tipo de escoamento quanto à turbulência | 56 |
| Figura 12 | – Diagrama de Moody | 61 |
| Figura 13 | – Fluxograma do processo MIGHA proposto para a calibração da rugosidade C de Hazen-Williams | 82 |
| Figura 14 | – Fluxograma do processo MIGHA proposto para a calibração do fator de atrito e cálculo da rugosidade absoluta de Darcy-Weisbach | 84 |
| Figura 15 | – Fluxograma do processo MIGHA proposto para a calibração da vazão e cálculo do consumo nodal | 88 |
| Figura 16 | – Fluxograma do processo MIGHA proposto para a calibração da constante de decaimento total de cloro e cálculo da constante de decaimento do cloro nas paredes da tubulação | 91 |
| Figura 17 | – Exemplo de rede traçada com o uso do UFC2 | 93 |
| Figura 18 | – Menu do software UFC10 – AutoCAD | 93 |
| Figura 19 | – Exemplo de arquivo “Dados.u10” do UFC10 | 94 |
| Figura 20 | – Menu do software UFC10 – Visual Basic | 97 |
| Figura 21 | – Fluxograma do procedimento de funcionamento do programa UFC10, externo ao AutoCAD | 98 |
| Figura 22 | – Rede calculada (esquerda) e rede observada (direita) com 5 pressões indicadas | 99 |
| Figura 23 | – Procedimento da sub-rotina computacional para busca do C inicial | 100 |
| Figura 24 | – Procedimento da sub-rotina computacional para busca do ϵ inicial | 101 |
| Figura 25 | – Procedimento da sub-rotina computacional para busca do consumo nodal inicial. | 103 |
| Figura 26 | – Procedimento da sub-rotina computacional para busca do <i>KW</i> inicial | 104 |
| Figura 27 | – Rede Porto (2006) | 106 |
| Figura 28 | – Rede Walski (1983) – Gambale (2000) | 108 |
| Figura 29 | – Rede C-Town: Battle of Calibration (2012) | 110 |
| Figura 30 | – Curvas de bomba utilizadas na rede C-Town | 111 |
| Figura 31 | – Rede MIGHA | 113 |
| Figura 32 | – Traçado da rede MIGHA no UFC2 | 114 |
| Figura 33 | – Rede Porto (2006) Ramificada | 114 |
| Figura 34 | – Nós com pressões observadas e concentrações de cloro observadas e trechos com vazões observadas consideradas na rede C-Town | 119 |
| Figura 35 | – Nós com pressões observadas e concentrações de cloro observadas e trechos com vazões observadas consideradas na rede MIGHA | 120 |
| Figura 36 | – Rede Porto (2006) com perdas | 123 |

| | |
|--|-----|
| Figura 37 – Rede Walski (1983) – Gambale (2000) com perdas..... | 124 |
| Figura 38 – Inserção de pressão conhecida | 127 |
| Figura 39 – Caixa de diálogo para inserção de pressão conhecida..... | 128 |
| Figura 40 – Pressão conhecida inserida no nó..... | 128 |
| Figura 41 – Inserção de vazão conhecida | 129 |
| Figura 42 – Caixa de diálogo para inserção de vazão conhecida | 129 |
| Figura 43 – Vazão conhecida inserida no trecho | 129 |
| Figura 44 – Inserção de concentração de cloro conhecida | 130 |
| Figura 45 – Caixa de diálogo para inserção de concentração de cloro conhecida | 130 |
| Figura 46 – Caixa de diálogo para inserção de concentração de cloro conhecida | 130 |
| Figura 47 – Seleção de elemento UFC10 para edição..... | 131 |
| Figura 48 – Início do UFC10 – Visual Basic..... | 132 |
| Figura 49 – Possibilidades para o campo “Parâmetro a ser calibrado” | 133 |
| Figura 50 – Possibilidades para o teste de parâmetros iniciais usando a sub-rotina computacional | 133 |
| Figura 51 – Aba dos nós para calibração da rugosidade | 134 |
| Figura 52 – Aba dos nós para calibração da constante K..... | 134 |
| Figura 53 – Aba de parâmetros medidos | 135 |
| Figura 54 – Exemplo de uma rede calibrada com o UFC10..... | 136 |
| Figura 55 – Comparação entre os consumos nodais da rede Porto (2006) com perdas e os consumos encontrados para calibração da vazão com dados de vazão em todos os trechos..... | 261 |
| Figura 56 – Comparação entre os consumos nodais da rede Porto (2006) com perdas e os consumos encontrados para calibração da vazão com dados de pressão em todos os nós..... | 263 |
| Figura 57 – Comparação entre os consumos nodais da rede Walski (1983) – Gambale (2000) com perdas e os consumos encontrados para calibração da vazão com dados de vazão em todos os trechos..... | 267 |
| Figura 58 – Comparação entre os consumos nodais da rede Walski (1983) – Gambale (2000) com perdas e os consumos encontrados para calibração da vazão com dados de pressão em todos os nós | 269 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-----------|---|-----|
| Tabela 1 | – Características dos materiais mais comuns das tubulações de redes de distribuição..... | 53 |
| Tabela 2 | – Coeficientes de rugosidade C de Hazen-Williams para vários materiais | 54 |
| Tabela 3 | – Seleção do diâmetro para a vazão máxima pelo método de Araújo e Bezerra (2016)..... | 61 |
| Tabela 4 | – Rugosidades absolutas para tubulações de alguns materiais | 62 |
| Tabela 5 | – Gabarito referente aos trechos para perdas de carga calculadas por Darcy-Weisbach – Rede Porto (2006)..... | 106 |
| Tabela 6 | – Gabarito referente aos trechos para perdas de carga calculadas por Hazen-Williams – Rede Porto (2006) | 106 |
| Tabela 7 | – Gabarito referente aos nós para perdas de carga calculadas por Darcy-Weisbach – Rede Porto (2006)..... | 107 |
| Tabela 8 | – Gabarito referente aos nós para perdas de carga calculadas por Hazen-Williams – Rede Porto (2006)..... | 107 |
| Tabela 9 | – Gabarito referente aos trechos para perdas de carga calculadas por Darcy-Weisbach – Rede Walski (1983) – Gambale (2000) | 108 |
| Tabela 10 | – Gabarito referente aos trechos para perdas de carga calculadas por Hazen-Williams – Rede Walski (1983) – Gambale (2000)..... | 108 |
| Tabela 11 | – Gabarito referente aos nós para perdas de carga calculadas por Darcy-Weisbach – Rede Walski (1983) – Gambale (2000)..... | 109 |
| Tabela 12 | – Gabarito referente aos nós para perdas de carga calculadas por Hazen-Williams – Rede Walski (1983) – Gambale (2000)..... | 109 |
| Tabela 13 | – Características dos reservatórios de nível variável da rede C-Town | 110 |
| Tabela 14 | – Características das válvulas existentes na rede C-Town..... | 110 |
| Tabela 15 | – Características das bombas presentes na rede C-Town..... | 111 |
| Tabela 16 | – Operações automáticas de operação de bombas e válvula na rede C-Town... | 112 |
| Tabela 17 | – Gabarito referente aos trechos – Rede Porto (2006) Ramificada | 115 |
| Tabela 18 | – Gabarito referente aos nós – Rede Porto (2006) Ramificada | 115 |
| Tabela 19 | – Resumo da quantidade de calibrações realizadas para cada situação | 116 |
| Tabela 20 | – Trechos e nós contendo dados observados em cada simulação da rede Porto (2006)..... | 118 |
| Tabela 21 | – Trechos e nós contendo dados observados em cada simulação da rede Walski | |

| | | |
|-----------|---|-----|
| | (1983) – Gambale (2000)..... | 118 |
| Tabela 22 | – Nós contendo dados observados em cada simulação da rede Porto (2006) Ramificada | 122 |
| Tabela 23 | – Gabarito referente aos trechos para a Rede Porto (2006) com perdas de água | 122 |
| Tabela 24 | – Gabarito referente aos nós para a Rede Porto (2006) com perdas de água..... | 123 |
| Tabela 25 | – Gabarito referente aos trechos para a Rede Walski (1983) – Gambale (2000) com perdas de água..... | 124 |
| Tabela 26 | – Gabarito referente aos nós para a Rede Walski (1983) – Gambale (2000) com perdas de água..... | 125 |
| Tabela 27 | – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades C calculadas e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do C para C inicial de 150 m0,367/s na rede Porto (2006) | 139 |
| Tabela 28 | – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades C calculadas e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração do C para C inicial de 150 m0,367/s na rede Porto (2006)..... | 140 |
| Tabela 29 | – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades C calculadas e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do C para C inicial de 75 m0,367/s na rede Porto (2006) | 142 |
| Tabela 30 | – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades C calculadas e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração do C para C inicial de 75 m0,367/s na rede Porto (2006)..... | 142 |
| Tabela 31 | – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades C calculadas e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do C para C inicial de 5 m0,367/s na rede Porto (2006) | 144 |
| Tabela 32 | – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades C calculadas e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração do C para C inicial de 5 m0,367/s na rede Porto (2006)..... | 144 |
| Tabela 33 | – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades C calculadas e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do C para C inicial calculado através da sub- | |

| | | |
|-----------|---|-----|
| | rotina computacional na rede Porto (2006)..... | 146 |
| Tabela 34 | – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades C calculadas e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração do C para C inicial calculado através da sub-rotina computacional na rede Porto (2006) . | 147 |
| Tabela 35 | – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do C para C inicial de 150 m0,367/s na rede Porto (2006) | 148 |
| Tabela 36 | – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração do C para C inicial de 150 m0,367/s na rede Porto (2006) | 148 |
| Tabela 37 | – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do C para C inicial de 75 m0,367/s na rede Porto (2006) | 149 |
| Tabela 38 | – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração do C para C inicial de 75 m0,367/s na rede Porto (2006) | 150 |
| Tabela 39 | – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do C para C inicial de 5 m0,367/s na rede Porto (2006) | 150 |
| Tabela 40 | – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração do C para C inicial de 5 m0,367/s na rede Porto (2006) | 151 |
| Tabela 41 | – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do C para C inicial da sub-rotina computacional na rede Porto (2006)..... | 151 |
| Tabela 42 | – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração do C para C inicial da sub-rotina computacional na rede Porto (2006) | 152 |
| Tabela 43 | – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades C calculadas e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do C para C inicial de 150 m0,367/s na rede Walski (1983) – Gambale (2000)..... | 154 |
| Tabela 44 | – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades C calculadas e | |

| | | |
|-----------|---|-----|
| | gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração do C para C inicial de 150 m0,367/s na rede Walski (1983) – Gambale (2000)..... | 155 |
| Tabela 45 | – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades C calculadas e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do C para C inicial de 75 m0,367/s na rede Walski (1983)-Gambale (2000) | 156 |
| Tabela 46 | – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades C calculadas e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração do C para C inicial de 75 m0,367/s na rede Walski (1983)-Gambale (2000) | 157 |
| Tabela 47 | – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades C calculadas e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do C para C inicial de 5 m0,367/s na rede Walski (1983)-Gambale (2000) | 159 |
| Tabela 48 | – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades C calculadas e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração do C para C inicial de 5 m0,367/s na rede Walski (1983)-Gambale (2000) | 159 |
| Tabela 49 | – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades C calculadas e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do C para C inicial calculado através da sub-rotina computacional na rede Walski (1983)-Gambale (2000)..... | 161 |
| Tabela 50 | – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades C calculadas e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração do C para C inicial calculado através da sub-rotina computacional na rede Walski (1983)-Gambale (2000) | 162 |
| Tabela 51 | – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do C para C inicial de 150 m0,367/s na rede Walski (1983)-Gambale (2000) | 163 |
| Tabela 52 | – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração do C para C inicial de 150 m0,367/s na rede Walski (1983)-Gambale (2000) | 164 |
| Tabela 53 | – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do C para C inicial de 75 m0,367/s na rede Walski (1983)-Gambale | |

| | | |
|-----------|---|-----|
| | (2000)..... | 165 |
| Tabela 54 | – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração do C para C inicial de 75 m0,367/s na rede Walski (1983)-Gambale (2000) | 165 |
| Tabela 55 | – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do C para C inicial de 5 m0,367/s na rede Walski (1983)-Gambale (2000)..... | 166 |
| Tabela 56 | – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração do C para C inicial de 5 m0,367/s na rede Walski (1983)-Gambale (2000) | 166 |
| Tabela 57 | – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do C para C inicial da sub-rotina computacional na rede Walski (1983)-Gambale (2000) | 167 |
| Tabela 58 | – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração do C para C inicial da sub-rotina computacional na rede Walski (1983)-Gambale (2000) | 168 |
| Tabela 59 | – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada – Calibração do C na rede C-Town..... | 170 |
| Tabela 60 | – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada – Calibração do C na rede MIGHA | 173 |
| Tabela 61 | – Resumo dos resultados da calibração do C de Hazen-Williams na rede Porto (2006) com C inicial de 150 m0,367/s..... | 174 |
| Tabela 62 | – Resumo dos resultados da calibração do C de Hazen-Williams na rede Porto (2006) com C inicial de 75 m0,367/s..... | 174 |
| Tabela 63 | – Resumo dos resultados da calibração do C de Hazen-Williams na rede Porto (2006) com C inicial de 5 m0,367/s..... | 175 |
| Tabela 64 | – Resumo dos resultados da calibração do C de Hazen-Williams na rede Porto (2006) com C inicial calculado através da sub-rotina computacional | 175 |
| Tabela 65 | – Resumo dos resultados da calibração do C de Hazen-Williams na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com C inicial de 150 m0,367/s..... | 176 |
| Tabela 66 | – Resumo dos resultados da calibração do C de Hazen-Williams na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com C inicial de 75 m0,367/s..... | 176 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| Tabela 67 | – Resumo dos resultados da calibração do C de Hazen-Williams na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com C inicial de 5 m0,367/s..... | 177 |
| Tabela 68 | – Resumo dos resultados da calibração do C de Hazen-Williams na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com C inicial calculado através da sub-rotina computacional..... | 177 |
| Tabela 69 | – Resumo dos resultados da calibração do C de Hazen-Williams na rede C-Town com C inicial de 100 m0,367/s | 178 |
| Tabela 70 | – Resumo dos resultados da calibração do C de Hazen-Williams na rede MIGHA com C inicial de 150 m0,367/s | 178 |
| Tabela 71 | – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades absolutas calculadas e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do fator de atrito para ϵ inicial de 0,006 mm na rede Porto (2006) | 179 |
| Tabela 72 | – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades absolutas calculadas e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração do fator de atrito para ϵ inicial de 0,006 mm na rede Porto (2006) | 181 |
| Tabela 73 | – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades absolutas calculadas e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do fator de atrito para ϵ inicial de 0,6 mm na rede Porto (2006) | 182 |
| Tabela 74 | – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades absolutas calculadas e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração do fator de atrito para ϵ inicial de 0,6 mm na rede Porto (2006) | 183 |
| Tabela 75 | – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades absolutas calculadas e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do fator de atrito para ϵ inicial de 6 mm na rede Porto (2006) | 184 |
| Tabela 76 | – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades absolutas calculadas e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração do fator de atrito para ϵ inicial de 6 mm na rede Porto (2006) | 185 |
| Tabela 77 | – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades absolutas calculadas e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do fator de atrito para ϵ inicial calculado através da sub-rotina computacional na rede Porto (2006) | 186 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| Tabela 78 | – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades absolutas calculadas e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração do fator de atrito para ε inicial calculado através da sub-rotina computacional na rede Porto (2006) | 187 |
| Tabela 79 | – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do fator de atrito para ε inicial de 0,006 mm na rede Porto (2006) | 188 |
| Tabela 80 | – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração do fator de atrito para ε inicial de 0,006 mm na rede Porto (2006)..... | 188 |
| Tabela 81 | – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do fator de atrito para ε inicial de 0,6 mm na rede Porto (2006) | 189 |
| Tabela 82 | – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração do fator de atrito para ε inicial de 0,6 mm na rede Porto (2006) | 190 |
| Tabela 83 | – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do fator de atrito para ε inicial de 6 mm na rede Porto (2006)... | 190 |
| Tabela 84 | – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração do fator de atrito para ε inicial de 6 mm na rede Porto (2006) | 191 |
| Tabela 85 | – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do fator de atrito para ε inicial da sub-rotina computacional na rede Porto (2006) | 191 |
| Tabela 86 | – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração do fator de atrito para ε inicial da sub-rotina computacional na rede Porto (2006) | 192 |
| Tabela 87 | – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades calculadas e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do fator de atrito para ε inicial de 0,006 mm: | |

| | | |
|-----------|--|-----|
| | rede Walski (1983)-Gambale (2000)..... | 194 |
| Tabela 88 | – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades calculadas e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração do fator de atrito para ε inicial de 0,006 mm: rede Walski (1983)-Gambale (2000)..... | 195 |
| Tabela 89 | – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades calculadas e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do fator de atrito para ε inicial de 0,6 mm: rede Walski (1983)-Gambale (2000)..... | 196 |
| Tabela 90 | – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades calculadas e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração do fator de atrito para ε inicial de 0,6 mm: rede Walski (1983)-Gambale (2000)..... | 197 |
| Tabela 91 | – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades calculadas e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do fator de atrito para ε inicial de 6 mm: rede Walski (1983)-Gambale (2000) | 199 |
| Tabela 92 | – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades calculadas e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração do fator de atrito para ε inicial de 6 mm: rede Walski (1983)-Gambale (2000)..... | 199 |
| Tabela 93 | – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades calculadas e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do fator de atrito para ε inicial calculado através da sub-rotina computacional na rede Walski (1983)-Gambale (2000) | 200 |
| Tabela 94 | – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades calculadas e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração do fator de atrito para ε inicial calculado através da sub-rotina computacional na rede Walski (1983)-Gambale (2000) | 202 |
| Tabela 95 | – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do fator de atrito para ε inicial de 0,006 mm na rede Walski (1983)-Gambale (2000) | 203 |
| Tabela 96 | – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração do fator de atrito para ε inicial de 0,006 mm | |

| | | |
|------------|--|-----|
| | na rede Walski (1983)-Gambale (2000)..... | 204 |
| Tabela 97 | – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do fator de atrito para ε inicial de 0,6 mm na rede Walski (1983)-Gambale (2000) | 204 |
| Tabela 98 | – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração do fator de atrito para ε inicial de 0,6 mm na rede Walski (1983)-Gambale (2000)..... | 205 |
| Tabela 99 | – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do fator de atrito para ε inicial de 6 mm na rede Walski (1983)-Gambale (2000) | 206 |
| Tabela 100 | – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração do fator de atrito para ε inicial de 6 mm na rede Walski (1983)-Gambale (2000)..... | 206 |
| Tabela 101 | – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do fator de atrito para ε inicial da sub-rotina computacional na rede Walski (1983)-Gambale (2000)..... | 207 |
| Tabela 102 | – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração do fator de atrito para ε inicial da sub-rotina computacional na rede Walski (1983)-Gambale (2000) | 207 |
| Tabela 103 | – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada – Calibração do fator de atrito para ε inicial de 0,06 mm na rede C-Town | 210 |
| Tabela 104 | – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada – Calibração do fator de atrito para ε inicial de 0,06 mm na rede MIGHA..... | 212 |
| Tabela 105 | – Resumo dos resultados da calibração do fator de atrito na rede Porto (2006) com rugosidade absoluta inicial de 0,006 mm..... | 213 |
| Tabela 106 | – Resumo dos resultados da calibração do fator de atrito na rede Porto (2006) com rugosidade absoluta inicial de 0,6 mm..... | 213 |
| Tabela 107 | – Resumo dos resultados da calibração do fator de atrito na rede Porto (2006) com rugosidade absoluta inicial de 6 mm..... | 214 |
| Tabela 108 | – Resumo dos resultados da calibração fator de atrito na rede Porto (2006) com rugosidade absoluta inicial calculada através da sub-rotina computacional... | 214 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 109 – Resumo dos resultados da calibração do fator de atrito na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com rugosidade absoluta inicial de 0,006 mm..... | 215 |
| Tabela 110 – Resumo dos resultados da calibração do fator de atrito na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com rugosidade absoluta inicial de 0,6 mm..... | 215 |
| Tabela 111 – Resumo dos resultados da calibração do fator de atrito na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com rugosidade absoluta inicial de 6 mm..... | 216 |
| Tabela 112 – Resumo dos resultados da calibração do fator de atrito na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com rugosidade absoluta inicial calculada através da sub-rotina computacional..... | 216 |
| Tabela 113 – Resumo dos resultados da calibração do fator de atrito na rede C-Town com rugosidade absoluta inicial de 0,06 mm..... | 217 |
| Tabela 114 – Resumo dos resultados da calibração do fator de atrito na rede MIGHA com rugosidade absoluta inicial de 0,06 mm..... | 217 |
| Tabela 115 – Diferenças médias entre as pressões, consumos e vazões calculados e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração da vazão para consumo inicial de 2 L/s na rede Porto (2006) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo) | 219 |
| Tabela 116 – Diferenças médias entre as pressões, consumos e vazões calculados e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração da vazão para consumo inicial de 2 L/s na rede Porto (2006) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo) | 220 |
| Tabela 117 – Diferenças médias entre as pressões, consumos e vazões calculados e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração da vazão para consumo inicial de 5,7 L/s na rede Porto (2006) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo) | 221 |
| Tabela 118 – Diferenças médias entre as pressões, consumos e vazões calculados e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração da vazão para consumo inicial de 5,7 L/s na rede Porto (2006) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo) | 222 |
| Tabela 119 – Diferenças médias entre as pressões, consumos e vazões calculados e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração da vazão para consumo inicial de 10 L/s na rede Porto | |

| | | |
|--------------|--|-----|
| | (2006) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo) | 224 |
| Tabela 120 – | Diferenças médias entre as pressões, consumos e vazões calculados e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração da vazão para consumo inicial de 10 L/s na rede Porto (2006) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo) | 225 |
| Tabela 121 – | Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração da vazão para consumo inicial de 2 L/s na rede Porto (2006) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo) | 226 |
| Tabela 122 – | Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração da vazão para consumo inicial de 2 L/s na rede Porto (2006) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo) | 227 |
| Tabela 123 – | Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração da vazão para consumo inicial de 5,7 L/s na rede Porto (2006) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo) | 228 |
| Tabela 124 – | Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração da vazão para consumo inicial de 5,7 L/s na rede Porto (2006) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo) | 229 |
| Tabela 125 – | Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração da vazão para consumo inicial de 10 L/s na rede Porto (2006) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo) | 230 |
| Tabela 126 – | Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração da vazão para consumo inicial de 10 L/s na rede Porto (2006) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo) | 231 |
| Tabela 127 – | Diferenças médias entre as pressões, consumos e vazões calculados e gabarito | |

| | | |
|--------------|--|-----|
| | considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração da vazão para consumo inicial de 5 L/s na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo)..... | 232 |
| Tabela 128 – | Diferenças médias entre as pressões, consumos e vazões calculados e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração da vazão para consumo inicial de 5 L/s na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo) | 233 |
| Tabela 129 – | Diferenças médias entre as pressões, consumos e vazões calculados e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração da vazão para consumo inicial de 29 L/s na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo)..... | 235 |
| Tabela 130 – | Diferenças médias entre as pressões, consumos e vazões calculados e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração da vazão para consumo inicial de 29 L/s na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo) | 236 |
| Tabela 131 – | Diferenças médias entre as pressões, consumos e vazões calculados e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração da vazão para consumo inicial de 70 L/s na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo)..... | 237 |
| Tabela 132 – | Diferenças médias entre as pressões, consumos e vazões calculados e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração da vazão para consumo inicial de 70 L/s na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo) | 238 |
| Tabela 133 – | Diferenças médias entre as pressões, consumos e vazões calculados e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração da vazão para consumo inicial calculado com uso da sub-rotina computacional na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo)..... | 239 |
| Tabela 134 – | Diferenças médias entre as pressões, consumos e vazões calculados e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração da vazão para consumo | |

| | | |
|--------------|---|-----|
| | inicial calculado com uso da sub-rotina computacional na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo) | 240 |
| Tabela 135 – | Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração da vazão para consumo inicial de 5 L/s na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo) | 242 |
| Tabela 136 – | Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração da vazão para consumo inicial de 5 L/s na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo) | 243 |
| Tabela 137 – | Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração da vazão para consumo inicial de 29 L/s na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo) | 244 |
| Tabela 138 – | Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração da vazão para consumo inicial de 29 L/s na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo) | 245 |
| Tabela 139 – | Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração da vazão para consumo inicial de 70 L/s na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo) | 246 |
| Tabela 140 – | Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração da vazão para consumo inicial de 70 L/s na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo) | 247 |
| Tabela 141 – | Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração da vazão para consumo inicial calculado com uso da sub-rotina computacional desenvolvida na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com | |

| | | |
|--------------|--|-----|
| | gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo)..... | 248 |
| Tabela 142 – | Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração da vazão para consumo inicial calculado com uso da sub-rotina computacional desenvolvida na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo) | 249 |
| Tabela 143 – | Número de iterações atingido e função objetivo alcançada – Calibração da vazão para consumo inicial de 1 L/s na rede C-Town com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo)..... | 250 |
| Tabela 144 – | Número de iterações atingido e função objetivo alcançada – Calibração da vazão para consumo inicial de 0,1 L/s na rede MIGHA com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo) | 254 |
| Tabela 145 – | Resumo dos resultados da calibração da vazão na rede Porto (2006) com consumo nodal inicial de 2 L/s | 254 |
| Tabela 146 – | Resumo dos resultados da calibração da vazão na rede Porto (2006) com consumo nodal inicial de 5,7 L/s | 255 |
| Tabela 147 – | Resumo dos resultados da calibração da vazão na rede Porto (2006) com consumo nodal inicial de 10 L/s | 255 |
| Tabela 148 – | Resumo dos resultados da calibração da vazão na rede Porto (2006) com consumo nodal inicial calculado através da sub-rotina computacional | 256 |
| Tabela 149 – | Resumo dos resultados da calibração da vazão na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com consumo nodal inicial de 5 L/s | 256 |
| Tabela 150 – | Resumo dos resultados da calibração da vazão na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com consumo nodal inicial de 29 L/s | 257 |
| Tabela 151 – | Resumo dos resultados da calibração da vazão na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com consumo nodal inicial de 70 L/s | 257 |
| Tabela 152 – | Resumo dos resultados da calibração da vazão na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com consumo nodal inicial calculado através da sub-rotina computacional | 258 |
| Tabela 153 – | Resumo dos resultados da calibração da vazão na rede C-Town com consumo nodal inicial de 1 L/s..... | 258 |
| Tabela 154 – | Resumo dos resultados da calibração da vazão na rede MIGHA com consumo nodal inicial de 0,1 L/s..... | 259 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 155 – Diferenças médias entre as pressões e vazões, além dos consumos totais calculados e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração da vazão com cálculo de perdas na rede Porto (2006) | 262 |
| Tabela 156 – Diferenças médias entre as pressões e vazões, além dos consumos totais calculados e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração da vazão com cálculo de perdas na rede Porto (2006)..... | 264 |
| Tabela 157 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração da vazão e cálculo de perdas de água na rede Porto (2006) | 265 |
| Tabela 158 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração da vazão e cálculo de perdas de água na rede Porto (2006) | 265 |
| Tabela 159 – Diferenças médias entre as pressões e vazões, além dos consumos totais calculados e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração da vazão com cálculo de perdas na rede Walski (1983) – Gambale (2000)..... | 268 |
| Tabela 160 – Diferenças médias entre as pressões e vazões, além dos consumos totais calculados e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração da vazão com cálculo de perdas na rede Walski (1983) – Gambale (2000)..... | 271 |
| Tabela 161 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração da vazão e cálculo de perdas de água na rede Walski (1983) – Gambale (2000) | 272 |
| Tabela 162 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração da vazão e cálculo de perdas de água na rede Walski (1983) – Gambale (2000)..... | 272 |
| Tabela 163 – Resumo dos resultados da calibração da vazão com cálculo de perdas de água na rede Porto (2006) com consumo nodal inicial de 5,7 L/s | 273 |
| Tabela 164 – Resumo dos resultados da calibração da vazão com cálculo de perdas de água na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com consumo nodal inicial de 29 L/s | 273 |
| Tabela 165 – Diferenças médias entre as concentrações de cloro e os coeficientes <i>KW</i> calculados e gabarito – Calibração da constante <i>K</i> de decaimento total do cloro | |

| | | |
|--------------|--|-----|
| | e cálculo do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação para KW inicial de -0,1 m/dia na rede Porto (2006)..... | 275 |
| Tabela 166 – | Diferenças médias entre as concentrações de cloro e os coeficientes KW calculados e gabarito – Calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação para KW inicial de -0,7 m/dia na rede Porto (2006)..... | 277 |
| Tabela 167 – | Diferenças médias entre as concentrações de cloro e os coeficientes KW calculados e gabarito – Calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação para KW inicial de -10 m/dia na rede Porto (2006)..... | 278 |
| Tabela 168 – | Diferenças médias entre as concentrações de cloro e os coeficientes KW calculados e gabarito – Calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação para KW inicial calculado através da sub-rotina computacional na rede Porto (2006)..... | 279 |
| Tabela 169 – | Número de iterações atingido e função objetivo alcançada – Calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação para KW inicial de -0,1 m/dia na rede Porto (2006)..... | 280 |
| Tabela 170 – | Número de iterações atingido e função objetivo alcançada – Calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação para KW inicial de -0,7 m/dia na rede Porto (2006)..... | 280 |
| Tabela 171 – | Número de iterações atingido e função objetivo alcançada – Calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação para KW inicial de -10 m/dia na rede Porto (2006)..... | 281 |
| Tabela 172 – | Número de iterações atingido e função objetivo alcançada – Calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação para KW inicial calculado através da sub-rotina computacional na rede Porto (2006)..... | 282 |
| Tabela 173 – | Diferenças médias entre as concentrações de cloro e os coeficientes KW calculados e gabarito – Calibração da constante K de decaimento total do cloro | |

| | | |
|--------------|--|-----|
| | e cálculo do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação para KW inicial de -0,1 m/dia na rede Walski (1983) – Gambale (2000) | 284 |
| Tabela 174 – | Diferenças médias entre as concentrações de cloro e os coeficientes KW calculados e gabarito – Calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação para KW inicial de -0,7 m/dia na rede Walski (1983) – Gambale (2000) | 285 |
| Tabela 175 – | Diferenças médias entre as concentrações de cloro e os coeficientes KW calculados e gabarito – Calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação para KW inicial de -10 m/dia na rede Walski (1983) – Gambale (2000) | 286 |
| Tabela 176 – | Diferenças médias entre as concentrações de cloro e os coeficientes KW calculados e gabarito – Calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação para KW inicial calculado através da sub-rotina computacional na rede Walski (1983) – Gambale (2000)..... | 287 |
| Tabela 177 – | Número de iterações atingido e função objetivo alcançada – Calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação para KW inicial de -0,1 m/dia na rede Walski (1983) – Gambale (2000) | 288 |
| Tabela 178 – | Número de iterações atingido e função objetivo alcançada – Calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação para KW inicial de -0,7 m/dia na rede Walski (1983) – Gambale (2000) | 288 |
| Tabela 179 – | Número de iterações atingido e função objetivo alcançada – Calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação para KW inicial de -10 m/dia na rede Walski (1983) – Gambale (2000) | 289 |
| Tabela 180 – | Número de iterações atingido e função objetivo alcançada – Calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação para KW inicial calculado através da sub-rotina computacional na rede Walski (1983) – Gambale (2000) | 290 |
| Tabela 181 – | Número de iterações atingido e função objetivo alcançada – Calibração da | |

| | | |
|--------------|--|-----|
| | constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação para KW inicial de -0,7 m/dia na rede Walski (1983) – Gambale (2000) | 291 |
| Tabela 182 – | Número de iterações atingido e função objetivo alcançada – Calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação para KW inicial de -0,7 m/dia na rede MIGHA | 293 |
| Tabela 183 – | Diferenças médias entre as concentrações de cloro e os coeficientes KW calculados e gabarito – Calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação para KW inicial de -0,7 m/dia na rede Porto (2006) Ramificada | 295 |
| Tabela 184 – | Número de iterações atingido e função objetivo alcançada – Calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação para KW inicial de -0,7 m/dia na rede Porto (2006) Ramificada | 296 |
| Tabela 185 – | Resumo dos resultados da calibração da constante de decaimento total do cloro na rede Porto (2006) com KW inicial de -0,1 m/dia | 296 |
| Tabela 186 – | Resumo dos resultados da calibração da constante de decaimento total do cloro na rede Porto (2006) com KW inicial de -0,7 m/dia | 297 |
| Tabela 187 – | Resumo dos resultados da calibração da constante de decaimento total do cloro na rede Porto (2006) com KW inicial de -10 m/dia | 297 |
| Tabela 188 – | Resumo dos resultados da calibração da constante de decaimento total do cloro na rede Porto (2006) com KW inicial calculado através da sub-rotina computacional | 297 |
| Tabela 189 – | Resumo dos resultados da calibração da constante de decaimento total do cloro na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com KW inicial de -0,1 m/dia..... | 298 |
| Tabela 190 – | Resumo dos resultados da calibração da constante de decaimento total do cloro na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com KW inicial de -0,7 m/dia..... | 298 |
| Tabela 191 – | Resumo dos resultados da calibração da constante de decaimento total do cloro na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com KW inicial de -10 m/dia..... | 298 |
| Tabela 192 – | Resumo dos resultados da calibração da constante de decaimento total do cloro na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com KW inicial calculado através da sub-rotina computacional..... | 299 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 193 – Resumo dos resultados da calibração da constante de decaimento total do cloro na rede C-Town com KW inicial de -0,7 m/dia | 299 |
| Tabela 194 – Resumo dos resultados da calibração da constante de decaimento total do cloro na rede MIGHA com KW inicial de -0,7 m/dia | 300 |
| Tabela 195 – Resumo dos resultados da calibração da constante de decaimento total do cloro na rede Porto (2006) Ramificada com KW inicial de -0,7 m/dia..... | 300 |
| Tabela 196 – Comparação entre as pressões encontradas com calibrações realizadas com uso de Algoritmos Genéticos e obtidas através do MIGHA – Calibração do C.... | 301 |
| Tabela 197 – Comparação entre os coeficientes de rugosidades C encontrados com calibrações realizadas com uso de Algoritmos Genéticos e obtidas através do MIGHA - Calibração do C..... | 301 |
| Tabela 198 – Comparação entre as pressões encontradas com calibrações realizadas com uso de Algoritmos Genéticos e obtidas através do MIGHA – Calibração do f..... | 302 |
| Tabela 199 – Comparação entre as rugosidades absolutas encontradas com calibrações realizadas com uso de Algoritmos Genéticos e obtidas através do MIGHA - Calibração do f..... | 302 |

LISTA DE VARIÁVEIS

| Variável | Dimensão | Denominação |
|---------------|-------------------|---|
| Q_d | L^3T^{-1} | Vazão de distribuição |
| P | adimensional | População de projeto |
| q | L^3T^{-1} | Consumo <i>per capita</i> bruto de água |
| k1 | adimensional | Coefficiente do dia de maior consumo |
| k2 | adimensional | Coefficiente da hora de maior consumo |
| ΔH | L | Perda de carga |
| ∇H | adimensional | Gradiente hidráulico |
| L | L | Extensão de um trecho da tubulação |
| Q | L^3T^{-1} | Vazão no trecho |
| C | $L^{0,367}T^{-1}$ | Coefficiente de rugosidade de Hazen-Williams |
| D | L | Diâmetro do trecho |
| f | adimensional | Fator de atrito |
| g | LT^{-2} | Aceleração da gravidade |
| Rey | adimensional | Número de Reynolds |
| ν | L^2T^{-1} | Viscosidade cinemática do fluido |
| μ | $ML^{-1}T^{-1}$ | Viscosidade dinâmica do fluido |
| ε | L | Rugosidade absoluta |
| ρ | ML^{-3} | Massa específica do fluido |
| V | LT^{-1} | Velocidade média longitudinal ao longo do escoamento |
| γ | $ML^{-2}T^{-2}$ | Peso específico do fluido |
| C_C | ML^{-3} | Concentração de cloro |
| t | T | Tempo |
| x | L | Eixo representando a distância longitudinal ao longo da tubulação |
| D_{is} | L^2T^{-1} | Coefficiente de dispersão |
| K | T^{-1} | Constante de decaimento total do cloro |
| D_M | L^2T^{-1} | Coefficiente de difusão molecular do cloro |
| C_{Cj} | ML^{-3} | Concentração de cloro no nó de jusante |
| C_{CM} | ML^{-3} | Concentração de cloro no nó de montante |
| K_B | T^{-1} | Constante de decaimento do cloro no seio do líquido |

| | | |
|---|-------------------|--|
| K_W | LT^{-1} | Constante de decaimento do cloro nas paredes da tubulação |
| K_f | LT^{-1} | Coefficiente de transferência de massa entre o fluxo de água e a parede da tubulação |
| R_H | L | Raio hidráulico do conduto |
| P_C | L | Pressão calculada em metros de coluna d'água |
| P_O | L | Pressão observada em metros de coluna d'água |
| Q_C | L^3T^{-1} | Vazão calculada |
| Q_O | L^3T^{-1} | Vazão observada |
| H_C | L | Carga hidráulica calculada |
| H_O | L | Carga hidráulica observada |
| n_D | adimensional | Número de nós com demandas conhecidas |
| n_P | adimensional | Número de nós com pressões conhecidas |
| n_Q | adimensional | Número de nós com vazões conhecidas |
| σ | L | Desvio padrão entre as cargas hidráulicas |
| P_{MAX} | L | Máximo valor de pressão observada |
| P_{MIN} | L | Mínimo valor de pressão observada |
| f_{obj} | adimensional | Função objetivo |
| n | $TL^{-0,333}$ | Coefficiente de rugosidade de Manning |
| $X_1, X_2, X_3,$ $X_4, R, F_A,$ F_B, Y_1, Y_2 | adimensionais | Coefficientes específicos para o cálculo do fator de atrito em escoamento transicional |
| V_{ol} | L^3 | Volume do reservatório |
| k_v | L^3T^{-1} | Coefficiente de reação no volume do escoamento |
| C_R | ML^{-3} | Concentração de cloro dentro do reservatório |
| F_1 | $L^{1,367}T^{-2}$ | Coefficiente para o cálculo de K_W com Hazen-Williams |
| F_2 | LT^{-1} | Coefficiente para o cálculo de K_W com Darcy-Weisbach |
| F_3 | $L^{1,333}T^{-2}$ | Coefficiente para o cálculo de K_W com Manning |
| Sh | adimensional | Número de Sherwood |
| Sc | adimensional | Número de Schmidt |
| α, β, ξ | adimensionais | Parâmetros de peso |
| G_O | L^3T^{-1} | Vazão observada nas fontes de água |
| G_C | L^3T^{-1} | Vazão calculada nas fontes de água |
| n_G | adimensional | Número de fontes de vazão na rede com dados conhecidos |

| | | |
|-----------------------|--------------|--|
| n_T | adimensional | Número total de trechos |
| ∇H_O | adimensional | Gradiente hidráulico observado |
| ∇H_C | adimensional | Gradiente hidráulico calculado |
| n_H | adimensional | Número de pontos com carga hidráulica conhecida |
| SQER | adimensional | Soma dos quadrados dos erros relativos |
| dx | L | Dimensão x infinitesimal da célula do aquífero |
| dy | L | Dimensão y infinitesimal da célula do aquífero |
| T | LT^{-1} | Transmissividade |
| δ | adimensional | Comprimento de passo do MIGH |
| Δx | L | Dimensão x da célula do aquífero |
| Δy | L | Dimensão y da célula do aquífero |
| θ | adimensional | Ângulo formado entre os vetores dos gradientes hidráulicos observado e calculado |
| Q_{con} | L^3T^{-1} | Vazão consumida em um nó da rede. |
| Q_{ent} | L^3T^{-1} | Vazão de entrada em um nó da rede através dos trechos adjacentes a ele |
| Q_{sai} | L^3T^{-1} | Vazão de saída do nó através dos trechos adjacentes a esse nó na rede |
| $\nabla_{ln} C_C$ | L^{-1} | Gradiente logarítmico de concentração do cloro |
| $\nabla_{ln} C_{C_O}$ | L^{-1} | Gradiente logarítmico de concentração do cloro observado |
| $\nabla_{ln} C_{C_C}$ | L^{-1} | Gradiente logarítmico de concentração do cloro calculado |
| D_v | adimensional | Distância percentual do vazamento em relação a um nó |
| $Con1_C$ | L^3T^{-1} | Consumo do nó 1 de um trecho calculado após a calibração |
| $Con1_G$ | L^3T^{-1} | Consumo gabarito do nó 1 de um trecho |
| $Con2_C$ | L^3T^{-1} | Consumo do nó 2 de um trecho calculado após a calibração |
| $Con2_G$ | L^3T^{-1} | Consumo gabarito do nó 2 de um trecho |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|---|------------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 37 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 39 |
| 2.1 | Sistemas de abastecimento de água | 39 |
| 2.2 | Redes de distribuição de água | 44 |
| 2.2.1 | <i>Características das redes de distribuição</i> | 45 |
| 2.2.2 | <i>Parâmetros iniciais para o cálculo de redes de distribuição</i> | 48 |
| 2.2.3 | <i>Hidráulica das redes de distribuição de água</i> | 52 |
| 2.2.4 | <i>Transporte de cloro nas redes de distribuição de água</i> | 63 |
| 2.2.5 | <i>Perdas de água nas redes de distribuição</i> | 66 |
| 2.3 | Simulação de redes de distribuição de água através do software EPANET | 68 |
| 2.4 | Calibração em redes de distribuição | 72 |
| 2.5 | Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo - MIGHA | 76 |
| 3 | METODOLOGIA | 81 |
| 3.1 | Equações e procedimentos numéricos propostos | 81 |
| 3.1.1 | <i>Calibração do coeficiente C de Hazen-Williams</i> | 82 |
| 3.1.2 | <i>Calibração do fator de atrito f e cálculo da rugosidade absoluta ϵ de Darcy-Weisbach</i> | 84 |
| 3.1.3 | <i>Calibração da vazão e cálculo dos consumos nodais</i> | 86 |
| 3.1.4 | <i>Calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo da constante Kw de decaimento do cloro nas paredes da tubulação</i> | 88 |
| 3.2 | Software desenvolvido – UFC10 | 92 |
| 3.2.1 | <i>Recursos utilizados do UFC2</i> | 92 |
| 3.2.2 | <i>Aplicativo UFC10 interno ao AutoCAD – AutoLISP e VBA</i> | 93 |
| 3.2.3 | <i>Aplicativo UFC10 externo ao AutoCAD – Visual Basic</i> | 95 |
| 3.3 | Sub-rotinas computacionais para o cálculo de parâmetros iniciais | 99 |
| 3.3.1 | <i>Testar rugosidades iniciais (C de Hazen-Williams)</i> | 99 |
| 3.3.2 | <i>Testar rugosidades iniciais (ϵ de Darcy-Weisbach)</i> | 101 |
| 3.3.3 | <i>Testar demandas iniciais</i> | 102 |
| 3.3.4 | <i>Testar KW iniciais</i> | 103 |
| 3.4 | Redes de distribuição calibradas | 104 |
| 3.4.1 | <i>Rede Porto (2006)</i> | 105 |
| 3.4.2 | <i>Rede Walski (1983) – Gambale (2000)</i> | 107 |
| 3.4.3 | <i>Rede C-Town: Battle of Calibration (2012)</i> | 109 |
| 3.4.4 | <i>Rede MIGHA</i> | 113 |

| | | |
|---------|--|------------|
| 3.4.5 | Rede Porto (2006) Ramificada..... | 114 |
| 3.5 | Calibrações realizadas | 115 |
| 3.6 | Comparação entre a metodologia proposta e Algoritmos Genéticos | 125 |
| 4 | RESULTADOS | 127 |
| 4.1 | Software desenvolvido – UFC10 | 127 |
| 4.1.1 | Aplicativo UFC10 interno ao AutoCAD..... | 127 |
| 4.1.2 | Aplicativo UFC10 externo ao AutoCAD – Visual Basic..... | 131 |
| 4.2 | Calibrações realizadas | 136 |
| 4.2.1 | Calibração do coeficiente C de Hazen-Williams..... | 137 |
| 4.2.1.1 | <i>Rede Porto (2006)</i> | <i>138</i> |
| 4.2.1.2 | <i>Rede Walski (1983) – Gambale (2000)</i> | <i>152</i> |
| 4.2.1.3 | <i>Rede C-Town: Battle of Calibration (2012)</i> | <i>168</i> |
| 4.2.1.4 | <i>Rede MIGHA</i> | <i>171</i> |
| 4.2.1.5 | <i>Resumo dos resultados da calibração do coeficiente C de Hazen-Williams.....</i> | <i>173</i> |
| 4.2.2 | Calibração do fator de atrito f e cálculo da rugosidade absoluta ϵ de Darcy-Weisbach | 179 |
| 4.2.2.1 | <i>Rede Porto (2006)</i> | <i>179</i> |
| 4.2.2.2 | <i>Rede Walski (1983) – Gambale (2000)</i> | <i>192</i> |
| 4.2.2.3 | <i>Rede C-Town: Battle of Calibration (2012)</i> | <i>208</i> |
| 4.2.2.4 | <i>Rede MIGHA</i> | <i>210</i> |
| 4.2.2.5 | <i>Resumo dos resultados da calibração do fator de atrito f e cálculo da rugosidade absoluta ϵ de Darcy-Weisbach</i> | <i>213</i> |
| 4.2.3 | Calibração da vazão e cálculo dos consumos nodais..... | 218 |
| 4.2.3.1 | <i>Rede Porto (2006)</i> | <i>218</i> |
| 4.2.3.2 | <i>Rede Walski (1983) – Gambale (2000)</i> | <i>231</i> |
| 4.2.3.3 | <i>Rede C-Town: Battle of Calibration (2012)</i> | <i>249</i> |
| 4.2.3.4 | <i>Rede MIGHA</i> | <i>251</i> |
| 4.2.3.5 | <i>Resumo dos resultados da calibração da vazão e cálculo dos consumos nodais....</i> | <i>254</i> |
| 4.2.4 | Calibração da Vazão e cálculo de perdas de água..... | 259 |
| 4.2.4.1 | <i>Rede Porto (2006)</i> | <i>259</i> |
| 4.2.4.2 | <i>Rede Walski (1983) – Gambale (2000)</i> | <i>265</i> |
| 4.2.4.3 | <i>Resumo dos resultados da calibração vazão e cálculo de perdas de água.....</i> | <i>273</i> |
| 4.2.5 | Calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente Kw de decaimento do cloro nas paredes da tubulação..... | 274 |
| 4.2.5.1 | <i>Rede Porto (2006)</i> | <i>274</i> |
| 4.2.5.2 | <i>Rede Walski (1983) – Gambale (2000)</i> | <i>282</i> |
| 4.2.5.3 | <i>Rede C-Town: Battle of Calibration (2012)</i> | <i>290</i> |
| 4.2.5.4 | <i>Rede MIGHA</i> | <i>292</i> |

| | | |
|---------|---|------------|
| 4.2.5.5 | <i>Rede Porto (2006) Ramificada.....</i> | 293 |
| 4.2.5.6 | <i>Resumo dos resultados da calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente KW de decaimento do cloro nas paredes da tubulação.....</i> | 296 |
| 4.3 | Comparação entre a metodologia proposta e Algoritmos Genéticos | 300 |
| 5 | CONCLUSÕES | 304 |
| 6 | RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 310 |
| | REFERÊNCIAS..... | 311 |
| | APÊNDICES..... | 320 |

1 INTRODUÇÃO

A água é e sempre foi extremamente importante para a vida humana. Dessa forma, as populações antigas buscavam viver o mais próximo possível desse tão importante recurso. Desprovidos de tecnologia avançada, este elemento precisava ser buscado em rios, córregos ou riachos para satisfazer as necessidades dos habitantes.

Já nos tempos atuais, dispõe-se de redes de distribuição de água. Estes elementos de um sistema de abastecimento tornam possível a distribuição de água em todas as residências onde vivem os consumidores deste recurso. As redes de distribuição de água são compostas de tubulações, conexões e outras peças acessórias com a finalidade de distribuir água ao consumidor final.

As redes de distribuição funcionam através de energia fornecida por reservatórios elevados ou por bombas hidráulicas. Dessa forma, a energia é perdida ao longo do escoamento, chegando, a cada nó da rede, com pressões mínimas recomendadas por normas técnicas específicas e suficientes para abastecer as residências. No entanto, uma vez dimensionada, projetada e implantada, as pressões e vazões atuantes na rede em funcionamento não coincidem com os valores dimensionados através dos simuladores hidráulicos e, além disso, não permanecem os mesmos ao longo dos anos, não só pela variação no consumo, mas também, pelo desgaste das tubulações.

As redes de distribuição são compostas por tubos e conexões que podem ser de vários materiais, como PVC, PEAD, ferro fundido e outros. Alguns destes materiais são muito lisos e apresentam rugosidades absolutas extremamente pequenas. Assim, na fabricação destes tubos, essas rugosidades não se apresentam de forma constante ao longo do tubo, além disso, cada tubo fabricado apresenta rugosidades diferentes, uma vez que a perfeita reprodução das rugosidades das tubulações é muito difícil. Isso explica o motivo de as pressões de funcionamento da rede não coincidir com as pressões previstas no simulador hidráulico.

Ao iniciar o funcionamento da rede, o atrito entre a água e as tubulações danifica os condutos, por este motivo existem limites máximos de velocidade. Com o limite máximo de velocidade atendido, o desgaste do conduto ocorre de forma lenta, no entanto, com o passar dos anos, esse desgaste se torna grande o suficiente para alterar de forma considerável a rugosidade das paredes das tubulações e, conseqüentemente, gerar variações nas pressões e vazões. Isso pode ocasionar o não atendimento adequado ao usuário do sistema pela rede de distribuição, atendimento este, previsto na simulação hidráulica da rede.

Assim, para que se possa simular, computacionalmente, de forma adequada uma rede de distribuição, seja esta uma rede recém implantada ou uma rede antiga, é necessário que haja a calibração dos coeficientes da rede de distribuição. A calibração de uma rede de distribuição visa à adequação de um modelo computacional para que este possa simular a rede estudada com base em dados observados da rede real.

Um modelo computacional atualizado com dados advindos de uma calibração é extremamente importante pois, além de tornar possível a visualização dos valores reais presentes em campo, como vazões ou pressões, permite a previsão de crescimento futuro através de novas instalações com simulações mais próximas da realidade.

Os métodos implícitos ou de otimização, que buscam a minimização de uma função objetivo, são muito utilizados nos processos de calibração. Entre estes métodos está o Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo (MIGHA) que foi desenvolvido para calibração da transmissividade no escoamento subterrâneo por Schuster e Araújo (2004) e, posteriormente, adaptado para redes de distribuição de água, por Rocha, Castro e Araújo (2009), para a calibração do coeficiente C de Hazen-Williams.

O principal objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de novas equações para a calibração de elementos hidráulicos e de qualidade de água para redes de distribuição de água com base na proporcionalidade destes parâmetros com o gradiente hidráulico. As equações desenvolvidas servem para a calibração do C de Hazen-Williams (através de uma nova equação desenvolvida), do fator de atrito de Darcy-Weisbach, da vazão (através das duas equações já citadas para a perda de carga unitária) e da constante de decaimento total do cloro ao longo da tubulação. Para validar as equações, as mesmas foram ser aplicadas em 5 redes de distribuição.

Outro importante objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um software que utilize as metodologias propostas para realizar, de forma simples para o usuário, a calibração de redes de distribuição de água.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sistemas de abastecimento de água

Como a água é um elemento fundamental à vida humana, desde a antiguidade busca-se soluções para transportá-la para o local onde reside a população usuária desse tão valioso recurso. Para Wolkmer e Pimmel (2013), a água é um patrimônio estratégico, sendo mais do que um recurso imprescindível ao desenvolvimento econômico e social, é um elemento vital para a conservação dos ecossistemas e da vida de todos os seres em nosso planeta.

Embora, na atualidade, haja uma tendência para a cobrança pelo uso da água (MOURA E ARAÚJO, 2014; AQUINO *ET. AL*, 2013; BARBOSA, TEIXEIRA E GONDIM, 2007), em 330 A.C., Platão afirmou que, apesar de a água ser a coisa mais útil do mundo, não tem valor (AZEVEDO NETTO, 1984). Ainda, Wolkmer e Pimmel (2013) questionam que, se a água é um direito humano, patrimônio da sociedade e um componente essencial da natureza, deve-se superar a visão mercantil da água e deixar que a gestão da água seja comunitária, tendo o Estado um papel de avançar até uma sociedade mais justa, onde todos possam viver bem.

Heller (2015) também concorda que o uso da água não é só uma necessidade, mas um direito humano. Para o autor, garantir esse direito é fornecer água com disponibilidade, acessibilidade, qualidade e segurança, cumprindo os requisitos de aceitabilidade, dignidade e privacidade. Além disso, para Vargas e Heller (2016), garantir o acesso a água e saneamento tem fortes efeitos positivos a longo e curto prazos no crescimento econômico dos países e nas condições das populações mais pobres.

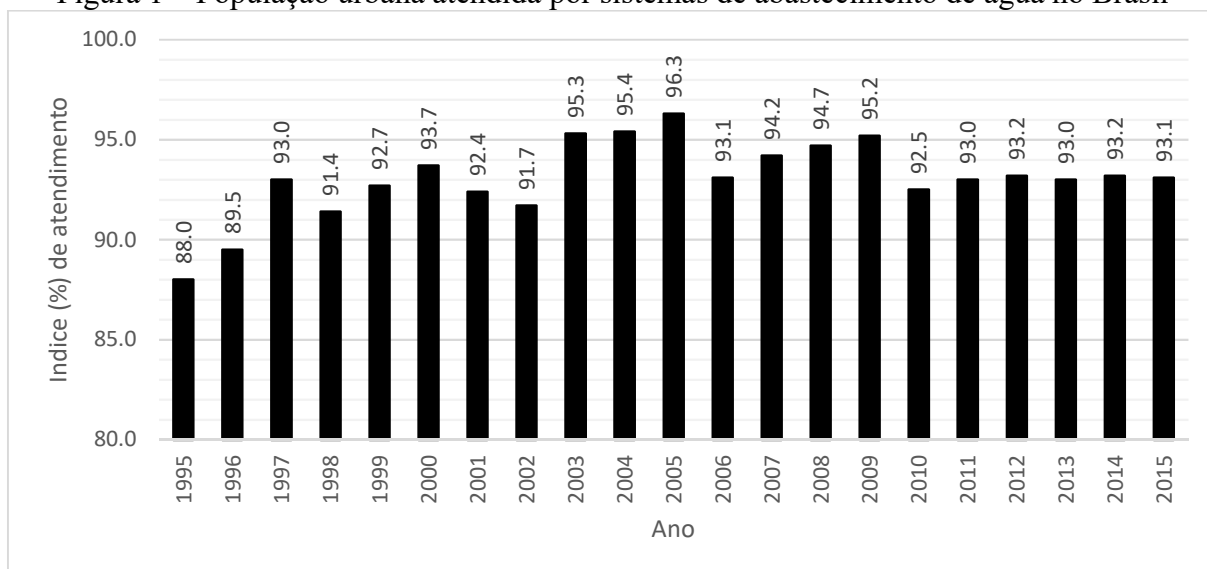
Apesar de sua importância para a vida humana e de ser direito de cada cidadão, a água potável não chega à residência de todos os brasileiros através do sistema público, assim, muitas pessoas possuem poços em suas residências, compram água de carros pipas ou, geralmente no caso dos mais pobres, recebem água da chuva através de cisternas ou buscam em mananciais próximos de casa.

O grande investimento brasileiro para garantir esse direito ocorreu, segundo Alem Sobrinho e Martins (2006), nas décadas de 1970 e 1980, através da implementação do Plano Nacional do Saneamento – PLANASA. Os autores ainda afirmam que a execução desse plano garantiu à população urbana do país um nível de atendimento de água de cerca de 90%.

O fato pode ser comprovado através dos dados de 1995 à 2015 divulgados pelo Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento (SNIS) em seus Diagnósticos dos Serviços

de Água e Esgoto. Na Figura 1 são apresentados os índices percentuais das médias nacionais de atendimento urbano por sistemas de abastecimento de água.

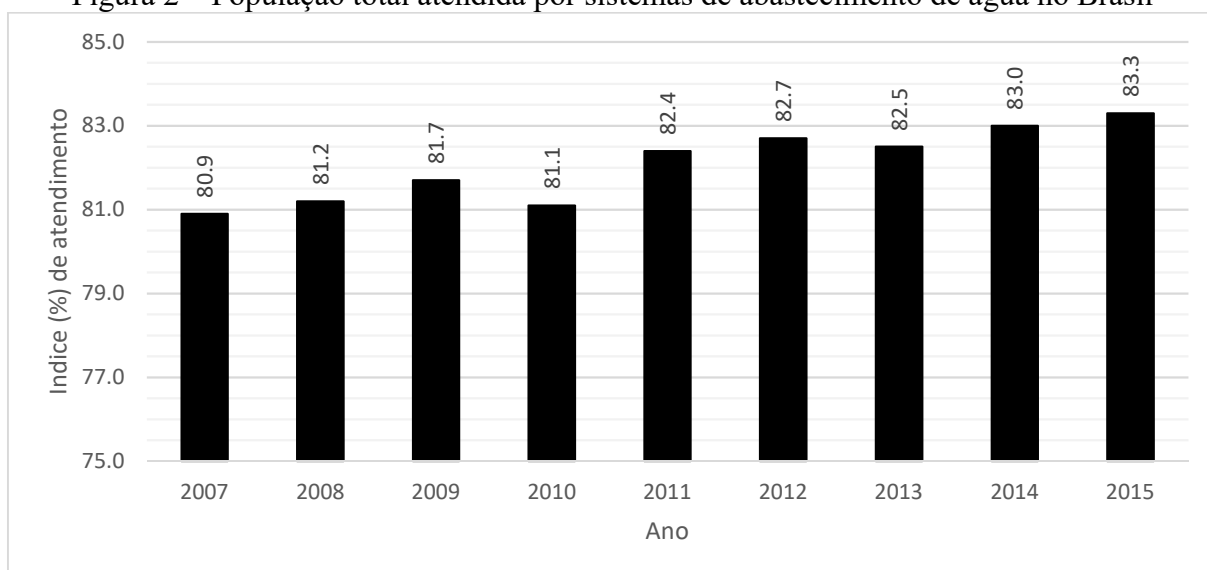
Figura 1 – População urbana atendida por sistemas de abastecimento de água no Brasil



Fonte: Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento (SNIS, 1998 à 2017)

No entanto, considerando o atendimento total por sistema de abastecimento de água, ou seja, população urbana e rural, e o levantamento realizado pelo SNIS, de 2007 à 2015, conclui-se que o índice de atendimento fica em torno de 80%, como pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 – População total atendida por sistemas de abastecimento de água no Brasil



Fonte: Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento (SNIS, 2009 à 2017)

De acordo com dados do censo demográfico de 2010 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a população rural do Brasil equivalia a 15,6% da população nacional. Além disso, apenas 27,8% dos domicílios rurais são abastecidos pela rede geral (IBGE, 2010). Para Gomes e Heller (2016), nas áreas rurais brasileiras o acesso à água potável é ainda incipiente e o país segue sem uma política nacional de saneamento rural. Para os autores, mesmo nas comunidades atendidas por sistemas de abastecimento de água é marcante a ausência de controle e vigilância da qualidade da água distribuída.

Em se tratando apenas dos sistemas de distribuição de água dos centros urbanos mais desenvolvidos, Alem Sobrinho e Martins (2006) atentam que suas maiores deficiências se devem à deterioração dos sistemas mais antigos, principalmente devido à problemas relacionados às redes de distribuição, que sofrem, constantemente, com rompimentos e vazamentos de água, além da necessidade de ampliação, devido ao crescimento urbano de novas áreas. Assim, estima-se que nos grandes centros urbanos os maiores investimentos devem ser voltados para a recuperação da parte mais antiga do sistema.

Para menores sistema urbanos ou pequenos aglomerados humanos, os citados autores acreditam que os esforços, através de subsídios estaduais ou nacionais, além de organizações internacionais, devem ser feitos no sentido de propiciar um serviço adequado de abastecimento de água, para evitar riscos na saúde pública das regiões.

Para que este serviço seja fornecido de forma adequada deve ocorrer através de um completo e eficiente sistema de abastecimento de água. Um bom exemplo da importância e da mudança na vida da população devido à implantação de um sistema de abastecimento de água é o apresentado em Oliveira (2007), onde a autora conta a história da cidade de Pedro Afonso em Tocantins.

Em seu trabalho é descrito a importância do porto da cidade na margem do rio antes da implantação do sistema de abastecimento, onde as pessoas tomavam banho, lavavam louças e roupas e faziam outras atividades de higiene como uma forma de atividade social pública. Além disso, os mais pobres buscavam água em latas, enquanto os moradores com melhores condições financeiras pagavam para que a água fosse transportada por jegues conduzidos por seus guias. Após 1968, ano da implantação do sistema de distribuição de água na cidade, para obter água era necessário apenas abrir uma torneira, assim, atividades, antes públicas, tornaram-se individuais e privadas, diminuindo o contato entre os moradores locais.

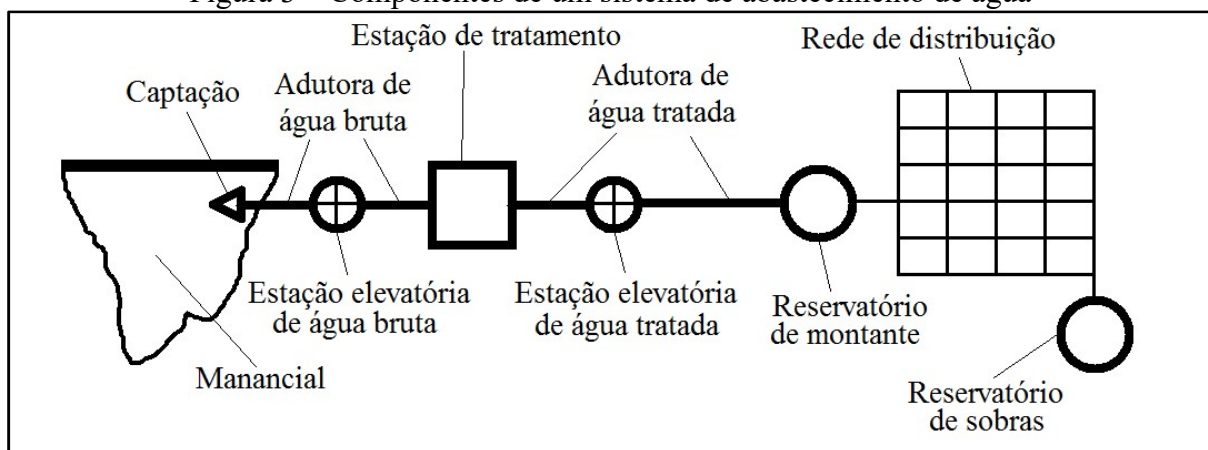
A autora ainda ressalta a saúde pública como outro benefício na vida do ribeirinho local, pois, a água, agora tratada, apresentava melhor qualidade que a retirada diretamente do rio.

A simples existência de um sistema de abastecimento de água não garante um eficiente fornecimento do serviço. Heller e Pádua (2010a) apresentam o caso do município de Pintadas na Bahia. Um diagnóstico realizado em 2004 mostrou que o município apresentava sistema de abastecimento de água, no entanto, a água fornecida pelo sistema não apresentava boa qualidade, por isso, a população se recusava a utilizar a água para beber.

Para Heller e Pádua (2010a), os sistemas de abastecimento de água devem fornecer água com qualidade, regularidade e de forma acessível para as populações, respeitando os interesses dos outros usuários dos mananciais utilizados, considerando, também, tanto a população atual como as gerações futuras. Já Gomes e Formiga (2001) consideram que os sistemas de abastecimento de água compreendem o conjunto de obras e equipamentos destinados a suprir as necessidades de consumos doméstico, público e industrial de uma comunidade e, esses sistemas, devem fornecer água em qualidade e quantidade, indistintamente, às populações com o menor dispêndio possível.

Os sistemas de abastecimento de água apresentam os componentes mostrados na Figura 3 e definidos a seguir.

Figura 3 – Componentes de um sistema de abastecimento de água



Fonte: Elaborado pelo autor

- Manancial: Tsutiya (2006) o define como o corpo hídrico de onde é retirada a água para o abastecimento, podendo ser superficial ou subterrâneo. Heller e Pádua (2010a) consideram, também, a água da chuva como um tipo de manancial. O manancial deve fornecer vazão de água suficiente para atender a demanda e possuir qualidade adequada;

- Captação: conjunto de peças e acessórios que apresentam a função de retirar a água do manancial, disponibilizando-a para o restante do sistema;
- Adutora: tem a função de transportar a água entre as unidades do sistema. É comum dividi-la em adutora de água bruta e adutora de água tratada, dependendo se sua localização está antes ou depois da estação de tratamento;
- Estação elevatória: é o conjunto de obras, equipamentos, peças e acessórios destinados a recalcar a água de um nível mais baixo para um nível mais alto do sistema. Dependendo da qualidade da água a ser recalçada, pode ser chamada de estação elevatória de água bruta ou estação elevatória de água tratada;
- Estação de tratamento: é a unidade do sistema composta por obras, peças, equipamentos, acessórios, produtos químicos e outros elementos necessários a tornar a qualidade da água captada adequada ao consumo da população. Após passar pela estação de tratamento a água deixa de ser chamada de água bruta para ser chamada de água tratada;
- Reservatório: para Tsutiya (2006), é o elemento do sistema que tem a função de regularizar as variações entre as vazões de adução e de distribuição, além de condicionar as pressões da rede de distribuição. Heller e Pádua (2010a) denominam os reservatórios em função da sua posição, chamando-os de reservatório de montante e reservatório de jusante. Já Porto (2006) chama este último de reservatório de sobras, uma vez que tem a função de armazenar as sobras de vazão da rede nos horários de menor demanda e complementar a injeção de água na rede nos horários de pico de consumo de água pela população;
- Rede de distribuição: de forma resumida, é composta por tubulações, conexões e outras peças com a finalidade de distribuir água para os consumidores em quantidade, qualidade e pressão adequadas. As redes de distribuição podem ser de vários tamanhos e formatos, dependendo da região a ser implantada.

2.2 Redes de distribuição de água

Na atualidade, muitos são os estudos sobre redes de distribuição de água em regime transiente (MONTTOYA E MONTTOYA, 2012; WAGNER, NEUPAUER E CICHOWITZ, 2015; ABDULSHAHEED, MUSTAPHA E GHAVAMIAN, 2017). Considerando as variações nos consumos nodais e no nível de água dos reservatórios, os sistemas realmente deveriam ser considerados sob o citado regime. Apesar disso, a grande maioria dos projetos e operações em redes de distribuição de água são realizados tendo como premissa que o sistema funciona em regime permanente, considerando fixos os consumos nodais e níveis de água nos reservatórios, como nos trabalhos Sarbu (2014) e Araújo e Bezerra (2016).

Há muito tempo se sabe da importância das redes de distribuição. Como pode ser visto em Garcez e Azevedo Netto (1947), a rede de distribuição de água é o elemento do sistema de abastecimento de maior importância econômica, atingindo de 60% a 70% do custo total do sistema e, em pequenas localidades, podendo chegar a 90%. Tsutiya (2006) estima seu custo entre 50% e 75%. Já Heller e Pádua (2010b) consideram que seu custo é responsável por mais de 50% do custo de implantação do sistema.

Para Gomes e Formiga (2001), as redes de distribuição são os componentes responsáveis por levar a água ao usuário final, nos sistemas de abastecimento de água, de comunidades urbanas e rurais. Uma definição similar, porém mais antiga, foi proposta por Dacach (1967), para ele, uma rede de distribuição é um elemento que se constitui de tubulações que distribuem água, atendendo aos diversos pontos de consumo. Uma forma mais completa pode ser vista em Tsutiya (2006) e Heller e Pádua (2010b), que definem rede de distribuição de água como a parte do sistema de abastecimento formada por tubulações e órgãos acessórios instalados em logradouros públicos com o objetivo de fornecer água potável em quantidade, qualidade, pressões adequadas e de forma contínua aos consumidores, sejam esses residenciais, comerciais, industriais ou de serviço.

Rao e Salomons (2007) explicam que cada rede de distribuição de água compreende uma configuração única de tubos interconectados, tanques de armazenamento, estações de bombeamento e câmaras de válvulas, que está sujeita a exigências muito variáveis que não podem ser previstas com grande grau de certeza.

Portanto, seu projeto, operação e manutenção devem sempre ser realizados com extremo cuidado e responsabilidade. Entretanto, de acordo com Tsutiya (2006), nos sistemas públicos de abastecimento de água, as redes de distribuição e as ligações prediais são as partes que, normalmente, não estão sob constante vigilância. Heller e Pádua (2010b) concordam que

uma rede de distribuição mal projetada ou mal operada é permanente fonte de problemas. Um problema comum que acontece em redes de distribuição mal administradas é o abastecimento intermitente da água. Para Cabrera-Béjar e Tzatchkov (2012), o fornecimento intermitente, que muitas vezes ocorre em países em desenvolvimento, apresenta como consequências indesejáveis mais frequentes a distribuição desigual de água, contaminação, perdas, custos adicionais para os consumidores e fornecedores de água, mau funcionamento das redes e inconvenientes dos usuários.

Apesar do exposto, normalmente, as redes de distribuição de água são dimensionadas e operadas considerando que estas funcionam de forma contínua, ou seja, 24 horas por dia, em regime permanente e uniforme.

2.2.1 Características das redes de distribuição

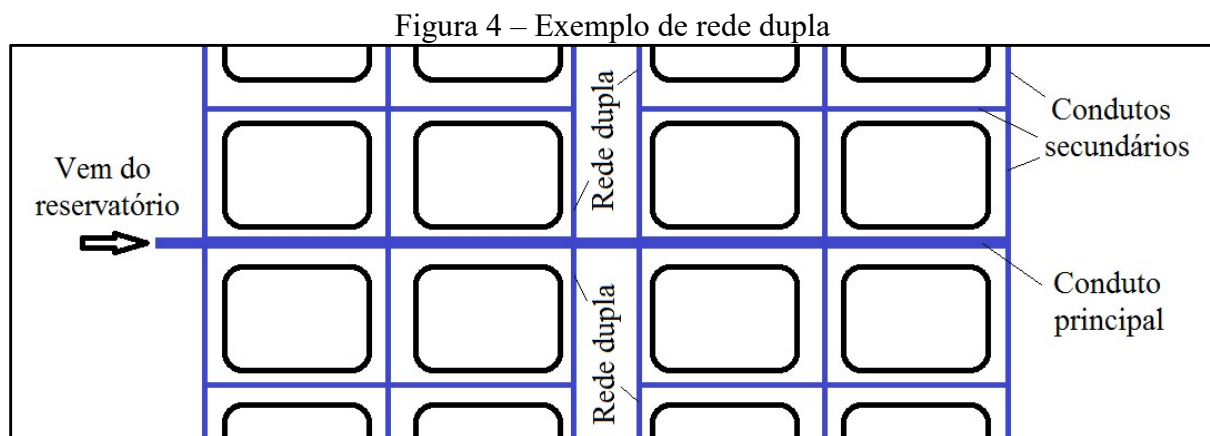
As tubulações das redes de distribuição podem ser divididas em dois tipos:

- Condutos ou tubulações principais: também chamados de condutos mestres ou tubulações tronco são responsáveis por fornecer água aos condutos secundários e são abastecidos pelos reservatórios da rede de distribuição ou pela adutora responsável por transportar água à rede. Estes condutos costumam ter maiores diâmetros;
- Condutos ou tubulações secundárias: recebem água dos condutos principais e são responsáveis por distribuir a água presente na rede para os consumidores finais através das ligações prediais. Estes condutos costumam apresentar menores diâmetros.

Dacach (1967) divide as redes em única e dupla. A rede única é a mais comum existente, sendo esta, a rede de água potável que distribui água para a população a fim de ser utilizada para diversos usos como beber, cozinhar e outros. Já a rede dupla, além de apresentar a rede de distribuição de água potável, apresenta outra rede de distribuição, totalmente isolada da primeira, contendo água impotável, para ser utilizada à demais usos, entre eles combate a incêndios, lavagem de ruas e irrigação de hortas e jardins. O autor comenta a importância de manter o isolamento entre as redes pois, uma vez conectadas, podem causar graves problemas à saúde pública.

Também é comum o uso do termo rede dupla ao considerar condutos das redes que passam por uma via de grande largura ou de tráfego intenso, mas, nesse caso, as tubulações são

conectadas entre si, geralmente de água potável, com o objetivo de facilitar a distribuição de água aos prédios. Um exemplo disso é apresentado na Figura 4 em que se vê a rede dupla instalada na via central, mais larga que as outras, ligada à tubulação tronco.



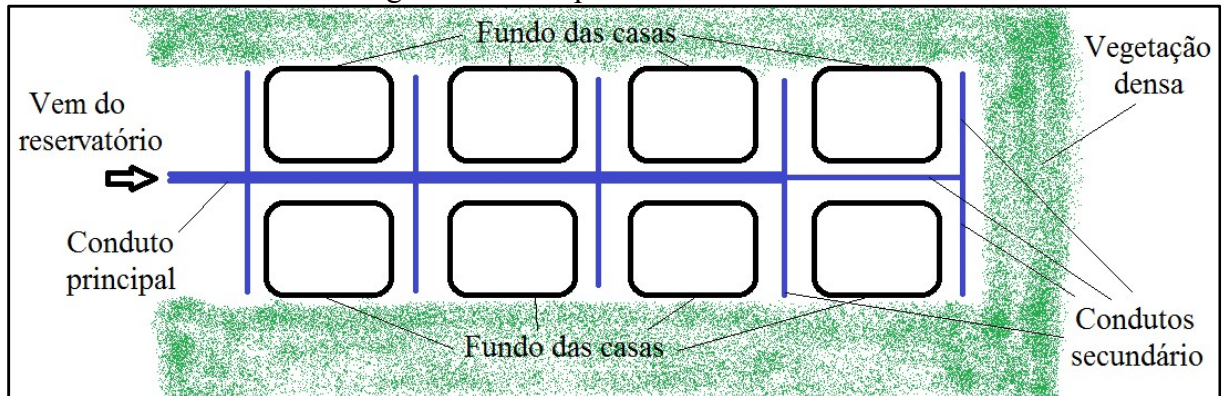
Fonte: Elaborado pelo autor

Quanto aos tipos de traçado das redes de distribuição de água, estas podem ser divididas em redes ramificadas (Figura 5) e redes malhadas (Figura 6).

- Rede ramificada: a principal característica deste tipo de traçado é que os sentidos dos escoamentos em todas as tubulações da rede são conhecidos. Dessa forma, normalmente, existe um conduto principal que alimenta os condutos secundários, e estes não se conectam entre si. Assim, se um defeito na tubulação interromper o escoamento em algum ponto da rede, o escoamento será paralisado em todos os pontos que se localizarem a jusante do ponto a ser recuperado. Por esse motivo, para Tsutiya (2006), este tipo de traçado deve ser evitado, devendo ser realizado apenas quando houver condições topográficas que o forcem a ser executado;
- Redes malhadas: neste tipo de traçado os condutos principais podem se conectar entre si, abastecendo os condutos secundários que também se conectam entre si. Esse formato de condutos conectados entre si nas duas extremidades é chamado de anel ou malha. A grande vantagem desse tipo de traçado é que se houver um defeito na tubulação que tenda a interromper o fluxo de água por um lado, o mesmo ainda pode ocorrer pelo outro lado da tubulação, ocorrendo uma inversão no sentido do fluxo de água, podendo diminuir vazões e pressões, mas não cessam o escoamento por completo a jusante da paralização. Heller e Pádua (2010b) explicam que este tipo de

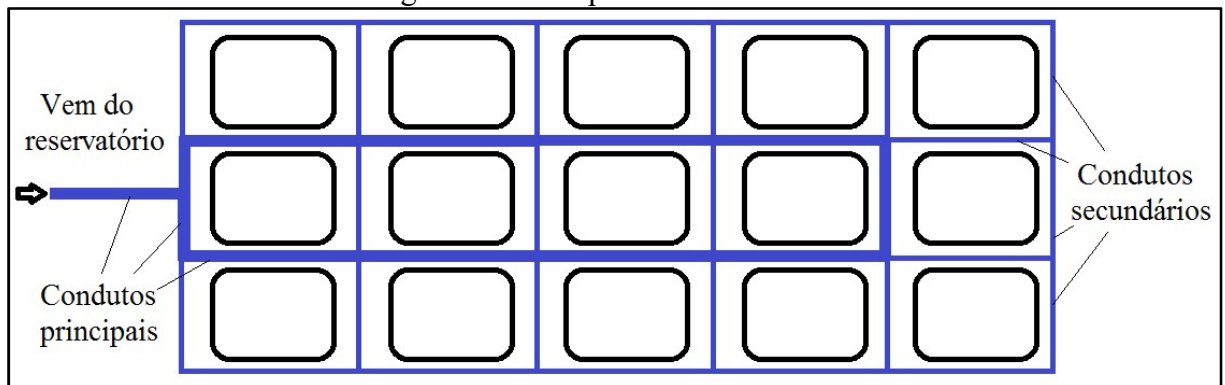
traçado apresenta, não só vantagens hidráulicas como, também, vantagens para a qualidade da água que, ao permitir o permanente fluxo de água nos dois sentidos das tubulações, evita a existência de água estagnada em extremidades mortas ou pontas secas.

Figura 5 – Exemplo de rede ramificada



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 6 – Exemplo de rede malhada



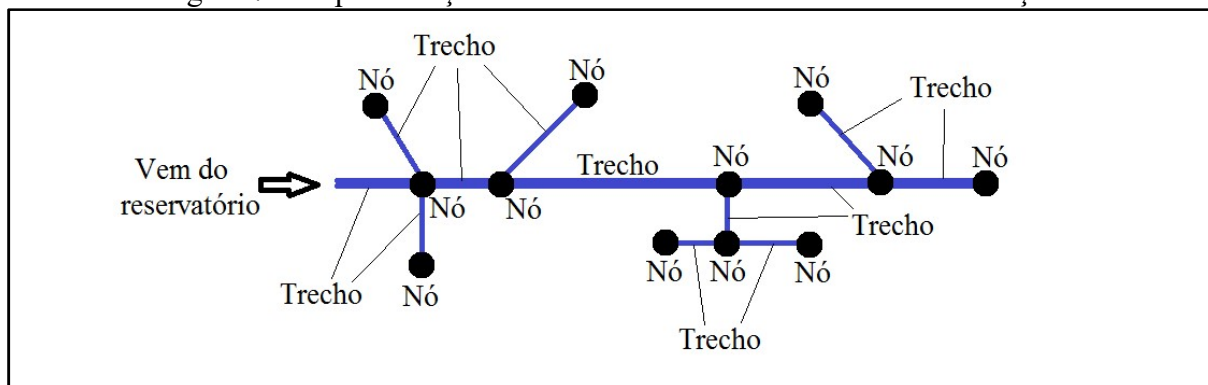
Fonte: Elaborado pelo autor

Porto (2006) apresenta elementos importantes de uma rede de distribuição para que seja possível realizar a análise hidráulica da mesma. Estes elementos são o nó e o trecho, definidos a seguir e ilustrados na Figura 7.

- Nó: é um ponto de uma rede de distribuição em que ocorre mudança de vazão, mudança de diâmetro, mudança de material ou ramificações. É comum considerar mudança de direção como nó. Pontos em que não ocorrem nenhuma dessas variações mas possui altitude crítica, também deve apresentar um nó, para melhor representar a topografia da rede. São nos nós em que se trabalha com características como pressão, carga hidráulica, cota topográfica, consumo e concentração de cloro;

- Trecho: é o conjunto de tubulações, com mesmas características, encontrado entre dois nós. São nos trechos em que se apresenta características como material, diâmetro, rugosidade, coeficientes de reação do cloro, vazão, velocidade do fluxo e gradiente hidráulico.

Figura 7 – Representação de nós e trechos de uma rede de distribuição



Fonte: Elaborado pelo autor

Ainda, ao longo das redes de distribuição, além de tubulações e conexões, devem existir alguns órgãos acessórios. Tsutiya (2006) e Heller e Pádua (2010b) listam alguns que podem aparecer:

- Bombas ou boosters;
- Hidrantes;
- Registros para manobra e descarga;
- Válvulas redutoras de pressão;
- Válvulas de controle de vazão.

2.2.2 Parâmetros iniciais para o cálculo de redes de distribuição

Para que se possa realizar a análise hidráulica de uma rede de distribuição é necessário conhecer alguns parâmetros iniciais. Cada região, ou seja, cada rede de distribuição, apresenta seus parâmetros, com características próprias, a ser considerados no cálculo da distribuição de água. Entre os parâmetros estão: horizonte de projeto, população de projeto, consumo *per capita* de água, coeficiente do dia de maior consumo e coeficiente da hora de maior consumo.

Horizonte de projeto é o ano final previsto para que o sistema projetado seja capaz de atender à demanda populacional de água. É comum considerar 20 ou 30 anos para adotar um horizonte de projeto.

A população de projeto é muito importante para o sistema de abastecimento de água pois, além de a população local ser a beneficiária da implantação do sistema de abastecimento, é o principal parâmetro no cálculo da vazão a ser distribuída pela rede. A população de projeto é uma projeção futura da população atual da área a ser abastecida.

A população atual pode ser obtida através de levantamento cadastral, geralmente realizado em pequenas localidades, ou através da coleta dos dados em instituições, como prefeituras ou IBGE, normalmente realizado para grandes populações.

De posse da população atual, a população de projeto, ou população futura, pode ser obtida através de métodos de projeção matemática visando à quantidade de habitantes no horizonte de projeto, entre eles estão o método de crescimento geométrico ou curvas exponenciais ou logarítmicas.

O consumo *per capita* de água é definido como a quantidade média de água que um habitante consome, por dia, para atender todas as suas necessidades, sejam elas domésticas, comerciais, industriais ou públicas. O consumo *per capita* pode ser dividido em bruto ou líquido. O primeiro considera, além do consumo de um habitante, as perdas ao longo do sistema de abastecimento de água referente a uma pessoa, já o último não soma as perdas ao consumo, ou seja, é o consumo médio efetivo de água de um habitante.

Silva, Silva e Chichorro (2008) afirmaram que a média nacional de consumo bruto de água por habitante é de 150 L/hab.dia. Em seu estudo, sobre o consumo *per capita* bruto médio de Cuiabá/MT, os autores encontraram 175 L/hab.dia e afirmaram, ainda, que não há interferência de fatores climáticos nos valores de consumo *per capita* mensal na região.

Silva *et al.* (2008), em seu trabalho sobre o mesmo município, encontraram que o consumo *per capita* de água varia muito devido à renda do usuário do serviço. Os autores dividiram as classes de renda em 5 e encontraram, da faixa de renda mais baixa à faixa mais alta, os valores, em L/hab.dia, 116, 132, 172, 272 e 266.

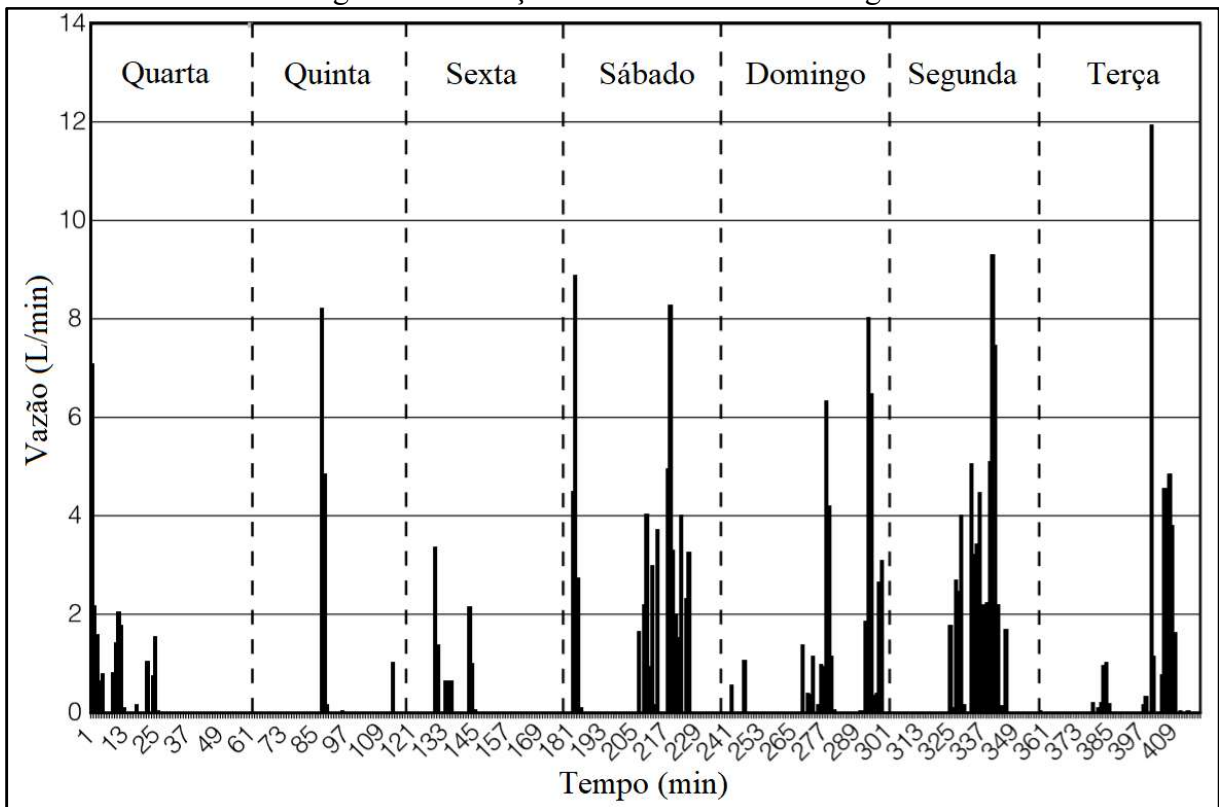
Feil e Haetinger (2014) fizeram um estudo sobre a cidade de Lajeado/RS e acharam um consumo *per capita* médio de água de 143,25 L/hab.dia entre os anos 2000 e 2007. Os autores também encontraram que, do total do consumo *per capita*, 84% são para fins residenciais, 13% para fins comerciais, 1% para fins industriais e 2% para uso no setor público. Para eles, na cidade de Lajeado/RS, influenciaram no consumo, com forte grau de correlação,

a umidade relativa do ar, com correlação regular, a temperatura média anual e, com fraca correlação, a precipitação pluviométrica.

O coeficiente do dia de maior consumo corresponde à relação entre o maior consumo diário de um ano e o consumo diário médio daquele mesmo ano. O uso deste coeficiente serve para garantir que quando houver um dia em que a população necessite de maior quantidade de água que o normal, este dia seja atendido sem que haja paralização no sistema de abastecimento. De acordo com a NBR 12.218/2017 (ABNT, 2017), o valor de 1,2 é recomendado para este coeficiente, quando não há medições para o mesmo na região em que será utilizado.

Como exemplo da variação do consumo de água ao longo dos dias, na Figura 8 é mostrada a variação do consumo de água em uma única residência ao longo de uma semana, medido sempre de 7 às 8 horas da manhã.

Figura 8 – Variação do consumo diário de água



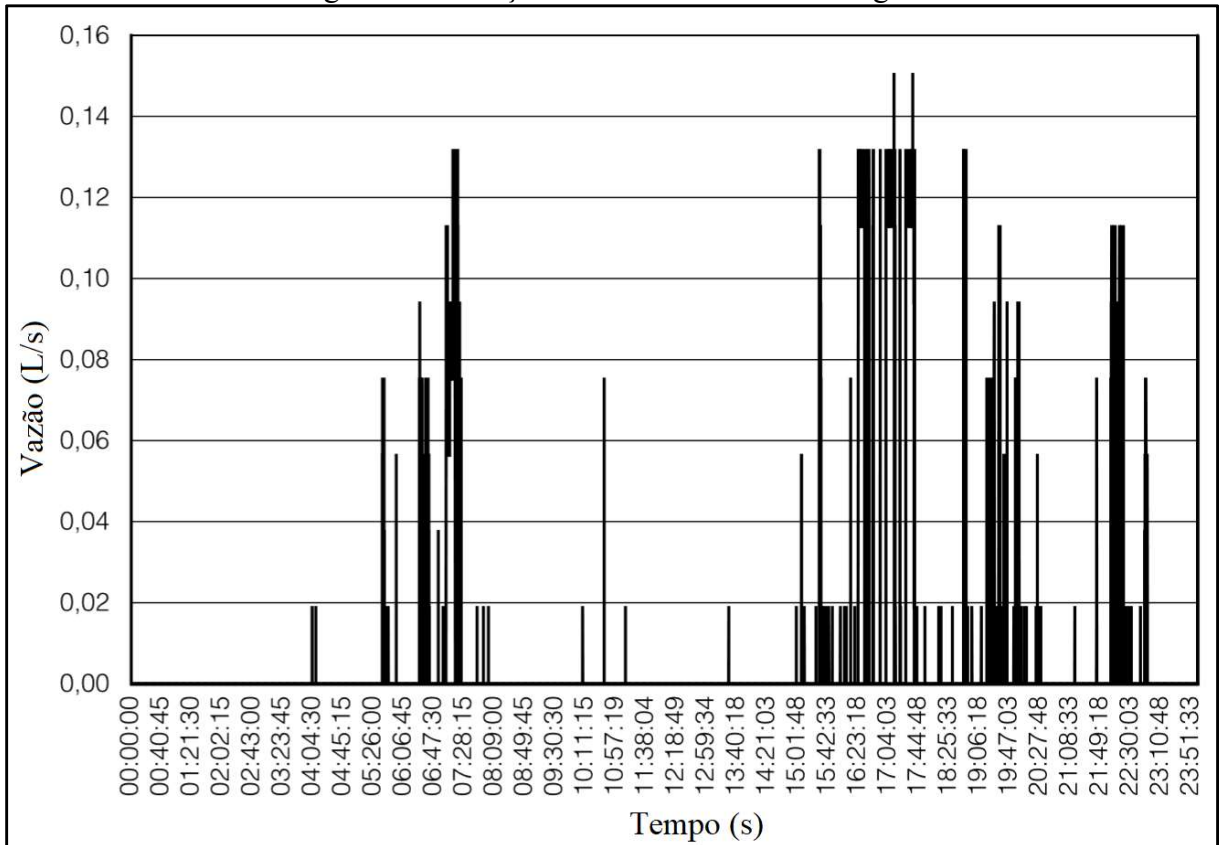
Fonte: Modificada de Yamanaka, Tzatchkov e Ortiz (2008).

O coeficiente da hora de maior consumo corresponde à relação entre o maior consumo horário ao longo do dia de maior consumo e o consumo horário médio do dia de maior consumo. O uso deste coeficiente serve para garantir que no dia de maior consumo, quando houver uma hora a qual o consumo seja o maior do dia, este seja atendido sem que haja

paralisação no sistema de abastecimento. Conforme a NBR 12.218/2017, o valor de 1,5 é recomendado para este coeficiente, quando não há medições na região em que será utilizado.

Como exemplo da variação do consumo de água ao longo do dia, na Figura 9 é apresentada a variação do consumo de água em uma única residência ao longo de 24 horas de um único dia.

Figura 9 – Variação do consumo horário de água



Fonte: Modificada de Yamanaka, Tzatchkov e Ortiz (2008).

Assim, de posse dos parâmetros iniciais, a vazão a ser consumida, ou seja, a vazão a ser distribuída ao longo da rede de distribuição pode ser calculada através da Equação 1.

$$Q_d = \frac{P \cdot q \cdot k_1 \cdot k_2}{86.400} \quad (1)$$

Em que Q_d , em L/s, é a vazão de distribuição, P , em habitantes, é a população de projeto, q , em L/hab.dia, é o consumo *per capita* bruto de água, k_1 , adimensional, é o coeficiente do dia de maior consumo e k_2 , adimensional, é o coeficiente da hora de maior consumo.

2.2.3 Hidráulica das redes de distribuição de água

Pela extensão das redes de distribuição, a energia fornecida, devido a existência de um reservatório elevado ou de uma bomba hidráulica, é dissipada ao longo do percurso da água na rede por causa do atrito. Essa perda de energia ou perda de carga pode ser dividida em distribuída e localizada.

As redes de distribuição de água apresentam tubulações, conexões e outros órgãos acessórios. A perda de carga distribuída ocorre ao longo dos condutos, devido ao atrito existente entre o fluxo de água e as paredes contínuas das tubulações. Já as perdas de carga localizadas ocorrem devido ao atrito e às turbulências criadas entre o fluxo de água e alguma peça específica da rede, como conexões ou válvulas.

Porto (2006) explica que no cálculo de redes de distribuição de água as perdas de carga localizadas costumam ser desprezadas, já que as grandes extensões das redes geram perdas distribuídas bem maiores que as perdas localizadas. O autor afirma que, em geral, em sistemas hidráulicos nos quais as perdas de carga localizadas são menores que 5% das perdas de carga distribuídas, elas podem ser desprezadas.

Para calcular as perdas de carga em uma rede de distribuição de água é necessário conhecer o material das tubulações a ser instaladas, assim como seus diâmetros e rugosidades. As tubulações mais utilizadas nas redes de distribuição da atualidade são as de policloreto de vinila (PVC), polímero reforçado com fibra de vidro (PRFV) ou ferro fundido revestido com cimento (FoFo).

Para Araújo e Bezerra (2016), é de conhecimento geral, entre pesquisadores e projetistas, que a utilização do PVC para diâmetros até 500 mm, em redes de distribuição de água, é prioridade, sendo aceita por critérios técnicos e, principalmente, econômicos. Assim, a grande questão dos projetistas é escolher entre o ferro fundido revestido com cimento, que, apesar de mais caro, é mais resistente e tem maior confiabilidade por parte dos projetistas e construtores devido ao fato de estar a mais tempo no mercado, e o PRFV, que, apesar de mais barato que o FoFo, tem menor resistência e está disponível a menos tempo no mercado, principalmente no Brasil, o que gera maior desconfiança por parte dos engenheiros projetistas e construtores.

Na Tabela 1 são apresentados, para os materiais mais utilizados em redes de distribuição de água no Brasil, os seus respectivos diâmetros comerciais e rugosidades consideradas.

Tabela 1 – Características dos materiais mais comuns das tubulações de redes de distribuição

| Material | Diâmetros Nominais (mm) | Rugosidade absoluta de Darcy-Weisbach (mm) | Coefficiente de rugosidade de Hazen-Williams (m ^{0,367} /s) |
|----------|--|--|--|
| PVC | 50; 60; 75; 100; 150; 200; 250; 300; 350; 400; 500 | 0,06 | 150 |
| PRFV | 200; 250; 300; 350; 400; 450; 500; 600; 700; 800; 900; 1.000; 1.100; 1.200; 1.300; 1.400; 1.500; 1.600 | 0,03 | 150 |
| FoFo | 80; 100; 150; 200; 250; 300; 350; 400; 450; 500; 600; 700; 800; 900; 1.000; 1.200 | 0,1 | 130 |

Fontes: Porto (2006); Tigre; Petrofisa; Saint-Gobain canalização.

A perda de carga ao longo de um trecho de uma tubulação é encontrada a partir do cálculo do gradiente hidráulico (perda de carga unitária) e pode ser encontrada através da Equação 2.

$$\Delta H = \nabla H \cdot L \quad (2)$$

Em que $\Delta H(m)$ é a perda de carga, ∇H , adimensional, é o gradiente hidráulico e $L(m)$ é a extensão de um trecho da tubulação.

Entre as fórmulas mais utilizadas para o cálculo do gradiente hidráulico ao longo de tubulações de redes de distribuição estão a fórmula de Hazen-Williams e a equação universal da perda de carga ou fórmula de Darcy-Weisbach.

Bastante utilizada em redes de distribuição de água, devido a sua praticidade, a fórmula de Hazen-Williams, apresentada na Equação 3, foi desenvolvida empiricamente através de um estudo estatístico e representa a rugosidade da tubulação através de um único coeficiente.

$$\nabla H = \frac{10,674 \cdot Q^{1,852}}{C^{1,852} \cdot D^{4,871}} \quad (3)$$

Em que $Q(m^3/s)$ é a vazão no trecho, $C(m^{0,367}/s)$ é o coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams e $D(m)$ é o diâmetro do trecho.

Azevedo Netto (1998) considera que a fórmula de Hazen-Williams pode ser aplicada satisfatoriamente para qualquer tipo de conduto e de material, sendo sua faixa de

diâmetros de 50 mm à 3.500 mm e velocidades limitadas à 3 m/s. Além disso, para o autor, foram obtidos valores bem determinados do coeficiente de rugosidade C , podendo-se, até, estimar o envelhecimento dos tubos.

Já Porto (2006) compreende que a equação tem algumas restrições, como abranger apenas a faixa do escoamento turbulento de transição, por não considerar efeitos de viscosidade, poder ser aplicada apenas à água a 20 °C e, ainda, ter como limite mínimo de diâmetro 100 mm. Além de limitar bastante o uso da equação em redes de distribuição, uma vez que a grande maioria dos diâmetros utilizados nas redes são menores que 100 mm, o autor ainda conclui que o coeficiente de rugosidade C , além de ser afetado pelo grau de turbulência, depende do diâmetro do trecho, o que não é encontrado nas tabelas que definem esse coeficiente, já que é apresentado que o mesmo depende apenas dos materiais das tubulações em que serão considerados.

Assim, ambos os autores relatam a importância da escolha adequada do coeficiente de rugosidade C de Hazen-Williams. Na Tabela 2 aparecem os coeficientes C para vários materiais, novos e usados.

Tabela 2 – Coeficientes de rugosidade C de Hazen-Williams para vários materiais

| Material | Coeficiente C de Hazen Williams ($m^{0,367}/s$) | |
|--|---|--------|
| | Novos | Usados |
| Aço com juntas lock-bar | 130 | 90 |
| Aço galvanizado | 125 | 100 |
| Aço rebitado | 110 | 85 |
| Aço soldado | 130 | 90 |
| Aço soldado com revestimento especial | 130 | 115 |
| Cobre | 130 | 130 |
| Concreto | 130 | 110 |
| Ferro fundido | 130 | 90 |
| Ferro fundido revestido com cimento | 130 | 105 |
| Madeira | 120 | 110 |
| Vidro | 140 | 140 |
| PVC | 150 | 130 |

Fontes: Porto (2006), Azevedo Netto (1998).

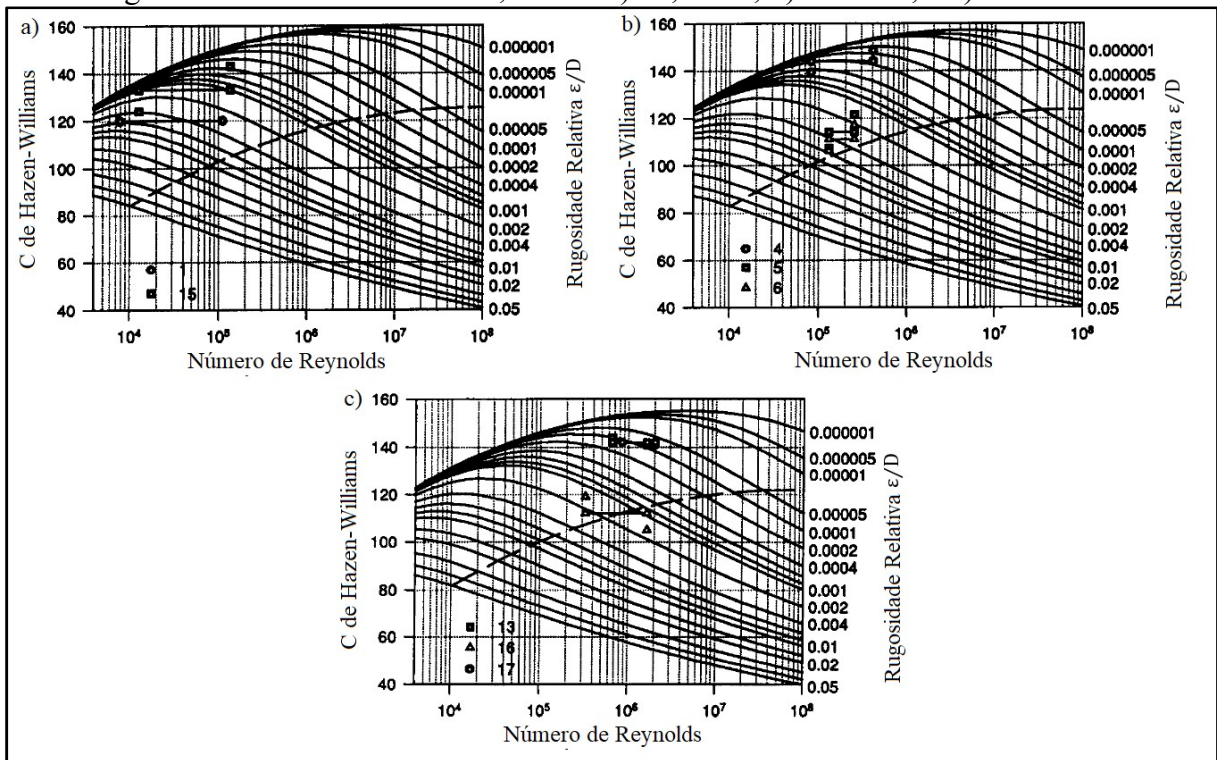
Liou (1998) afirma que o coeficiente C de Hazen-Williams não deve ser considerado como uma constante que depende apenas do material, independente do campo de aplicabilidade, mas como uma função que depende fortemente do número de Reynolds, da rugosidade relativa (ϵ/D) e do diâmetro isoladamente, de acordo com a Equação 4. Na figura 10 pode ser vista a variação do coeficiente de rugosidade C de Hazen-Williams com o número

de Reynolds, rugosidade relativa e com o diâmetro, isoladamente, uma vez que os gráficos foram criados pelo citado autor, através do uso da Equação 4, sendo, a) diâmetro de 82,6 mm, b) diâmetro de 305 mm e c) diâmetro de 1.219 mm.

$$C = \frac{14,07}{f^{0,54} \text{Rey}^{0,08} D^{0,01} \nu^{0,08}} \quad (4)$$

Em que f , adimensional, é o fator de atrito, Rey , adimensional, é o número de Reynolds e ν (m^2/s) é a viscosidade cinemática do fluido.

Figura 10 – Variação do coeficiente C de Hazen-Williams com o número de Reynolds, rugosidade relativa e diâmetros, sendo: a) 82,6 mm; b) 305 mm; e c) 1.219 mm.



Fonte: Modificada de Liou (1998).

Em Christensen, Locher e Swamee (2000), Swamee comenta que a equação de Hazen-Williams não é apenas imprecisa, mas conceitualmente incorreta. Ele explica que na equação de Hazen-Williams é considerado que a variação de pressão depende da aceleração da gravidade, no entanto, com o uso da fórmula universal da perda de carga, tal consideração não existe. Para o autor, é irônico que, apesar de suas limitações, a equação de Hazen-Williams é a equação de resistência mais popular entre os usuários para escoamentos hidráulicos e, a equação de Darcy-Weisbach, que envolve conceitos físicos de resistência, como rugosidade absoluta e

viscosidade, além de grande faixa de aplicação, teve seu uso confinado, em maior parte, a acadêmicos.

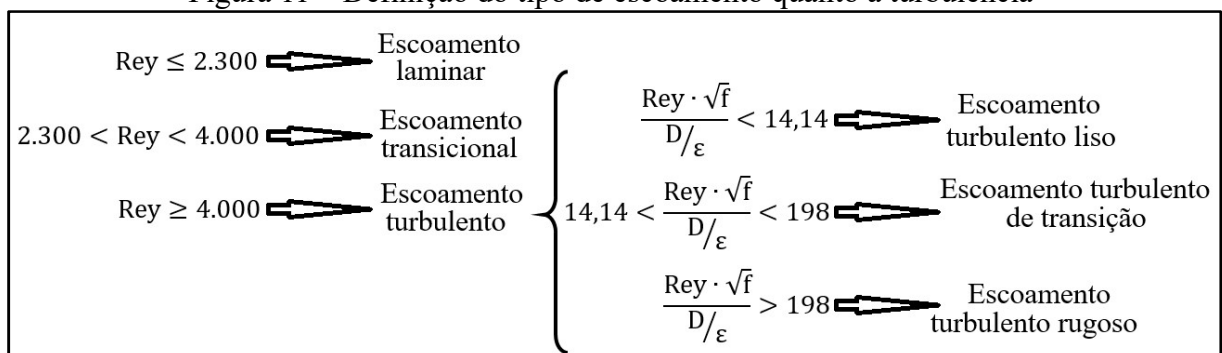
A fórmula universal da perda de carga ou equação de Darcy-Weisbach, que é mostrada na Equação 5, é a equação considerada mais precisa para o cálculo do gradiente hidráulico e, conseqüentemente, da perda de carga em um trecho de tubulação. Além disso, a NBR 12.218/2017 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2017) também apresenta, além da fórmula de Hazen-Williams, esta equação para o cálculo da perda de carga distribuída ao longo de uma rede de distribuição.

$$\nabla H = 0,81057 \cdot \frac{f}{g} \cdot \frac{Q^2}{D^5} \quad (5)$$

Em que $g(m/s^2)$ é a aceleração da gravidade. O fator de atrito f é o componente que representa a transformação da energia hidráulica em calor devido às tensões cisalhantes entre o fluido e as paredes da tubulação e os efeitos de turbulência do escoamento, podendo ser causadas por efeito da viscosidade dinâmica (μ) do fluido ou da rugosidade absoluta (ε) da tubulação. Pode ser calculado através de várias equações, variando, principalmente, devido à turbulência do escoamento envolvido. Quanto à turbulência, o escoamento pode ser dividido em: laminar, transicional e turbulento. Além disso, o escoamento turbulento pode ser dividido em hidraulicamente liso, hidraulicamente rugoso e hidraulicamente de transição.

O número de Reynolds é o principal elemento utilizado para definir o tipo de escoamento quanto à sua turbulência, que pode ser definido de acordo com o apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Definição do tipo de escoamento quanto à turbulência



Fonte: Porto (2006)

No escoamento laminar, a resistência presente no fator de atrito é causada exclusivamente pela viscosidade do fluido, assim, este tipo de escoamento depende apenas do número de Reynolds, apresentado na Equação 6 a seguir.

$$\text{Rey} = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (6)$$

Em que $\rho(\text{kg/m}^3)$ é a massa específica do fluido, $V(\text{m/s})$ é a velocidade média longitudinal ao longo do escoamento e $\mu(\text{N.s/m}^2)$ é a viscosidade dinâmica do fluido.

Assim, por ser independente da rugosidade e apresentar um baixo valor de número de Reynolds, o gradiente hidráulico em escoamentos laminares pode ser calculado através da fórmula de Hagen-Poiseuille apresentada na Equação 7.

$$\nabla H = \frac{32 \cdot \mu \cdot V}{\gamma \cdot D^2} \quad (7)$$

Em que $\gamma(\text{N/m}^3)$ é o peso específico do fluido. Substituindo a última equação na fórmula universal da perda de carga, tem-se a Equação 8 que deve ser utilizada para o cálculo do fator de atrito em escoamentos laminares.

$$f = \frac{64}{\text{Rey}} \quad (8)$$

Porto (2006) explica que o escoamento transicional é instável, limitada a uma faixa estreita de baixos números de Reynolds, sem interesse prático, uma vez que, ao se trabalhar com a água, elemento que apresenta baixa viscosidade dinâmica, a maioria dos escoamentos nas tubulações são turbulentos.

No escoamento turbulento hidraulicamente liso, apesar de o número de Reynolds estar fora da faixa do escoamento laminar, o efeito da viscosidade ainda é o único a influir na resistência do escoamento. Assim, as equações consideradas para esse tipo de escoamento também são dependentes, apenas, do número de Reynolds. Entre as equações utilizadas para o cálculo do fator de atrito em escoamentos turbulentos hidraulicamente lisos estão a fórmula de Blasius, apresentada na Equação 9, além de outras expressões presentes em Porto (2006), como

as Equações 10 e 11, resultantes de trabalhos com dados experimentais e a Equação 12, desenvolvida teoricamente.

$$f = \frac{0,316}{Re^{0,25}} \quad (9)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log(Re\sqrt{f}) - 0,8 \quad (10)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log\left(\frac{Re\sqrt{f}}{2,51}\right) \quad (11)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2,035 \log(Re\sqrt{f}) - 0,913 \quad (12)$$

Para o escoamento turbulento hidraulicamente rugoso, a viscosidade do fluido não tem grande influência na resistência do fluxo de água, sendo, assim, desprezada. O elemento que representa resistência ao longo do escoamento é a rugosidade das paredes da tubulação. Assim, as Equações 13 e 14, advinda de dados experimentais e a Equação 15, desenvolvida teoricamente, são utilizadas para o cálculo do fator de atrito de escoamentos turbulentos hidraulicamente rugosos.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log\left(\frac{D}{2\varepsilon}\right) + 1,74 \quad (13)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log\left(\frac{3,71D}{\varepsilon}\right) \quad (14)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2,04 \log\left(\frac{D}{2\varepsilon}\right) + 1,67 \quad (15)$$

Em que ε (m) é a rugosidade absoluta das paredes da tubulação.

A última faixa é a do escoamento turbulento hidraulicamente de transição. Colebrook e White (1937) comentam que, na faixa hidraulicamente de transição do escoamento

turbulento, as leis de resistência são necessariamente mais complicadas, já que tanto a viscosidade dinâmica do fluido quanto a rugosidade absoluta da tubulação estão envolvidas.

Colebrook e White desenvolveram a fórmula mais utilizada para o cálculo do fator de atrito para este tipo de escoamento. Além disso, os pesquisadores também contribuíram para o desenvolvimento das equações experimentais para o cálculo do fator de atrito dos escoamentos turbulentos hidraulicamente lisos e rugosos. Dessa forma, para o cálculo do fator de atrito de um escoamento turbulento é comum estabelecer que foi utilizado a equação de Colebrook e White, independente da faixa do escoamento turbulento.

A Equação 16 apresenta a Equação de Colebrook e White para o cálculo do fator de atrito em escoamentos turbulentos hidraulicamente de transição.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3,71D} + \frac{2,51}{\text{Rey}\sqrt{f}} \right) \quad (16)$$

A faixa dos escoamentos turbulentos hidraulicamente de transição são as que mais aparecem nos escoamentos reais em tubos comerciais, fazendo com que a Equação 16 seja a mais recomendada para o cálculo do fator de atrito.

Sonnad e Goudar (2007) reformularam, de forma explícita, a equação de Colebrook e White, sendo possível, assim, encontrar o fator de atrito com o uso da equação mais aceita, não havendo necessidade de iterações, através da Equação 17.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 0,8686 \ln \left\{ \frac{0,4587\text{Rey}}{\left[0,124\text{Rey} \left(\frac{\varepsilon}{D} \right) + \ln(0,4587\text{Rey}) \right]^{\frac{0,124\text{Rey} \left(\frac{\varepsilon}{D} \right) + \ln(0,4587\text{Rey})}{0,124\text{Rey} \left(\frac{\varepsilon}{D} \right) + \ln(0,4587\text{Rey}) + 1}}} \right\} \quad (17)$$

Vários outros autores também desenvolveram fórmulas para o cálculo do fator de atrito com o intuito de atender, não só a faixa do escoamento turbulento hidraulicamente de transição, mas também, parte das outras faixas em que os escoamentos reais em condutos forçados aparecem. Entre eles, Camargo (2001) apresenta a Equação 18, de Sousa-Cunha-Marques criada em 1999, a Equação 19, de Haaland criada em 1983, a Equação 20, de Barr criada em 1972, a Equação 21, de Swamee-Jain criada em 1976 e a Equação 22, de Churchill criada em 1973.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{\varepsilon}{3,7D} - \frac{5,16}{Rey} \log \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} - \frac{5,09}{Rey^{0,87}} \right) \right] \quad (18)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1,8 \log \left[\left(\frac{\varepsilon}{3,7D} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{Rey} \right] \quad (19)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,15}{Rey^{0,892}} \right) \quad (20)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Rey^{0,9}} \right) \quad (21)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{\varepsilon}{3,7D} + \left(\frac{7}{Rey} \right)^{0,9} \right] \quad (22)$$

Abrangendo todas as faixas do escoamento, laminar e turbulento, Porto (2006) apresenta a Equação 23, de Swamee, que também pode ser utilizada para o cálculo do fator de atrito. Esta equação, segundo o mesmo autor, foi utilizada para elaborar o diagrama de Moody (Figura 12), também usado, mas de forma gráfica, para encontrar o fator de atrito de um escoamento.

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{Rey} \right)^8 + 9,5 \left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Rey^{0,9}} \right) - \left(\frac{2.500}{Rey} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125} \quad (23)$$

Considerando, apenas, redes de distribuição com material em PVC, ou seja, rugosidade absoluta $\varepsilon = 0,06$ mm e diâmetros variando entre 50 mm e 500 mm, Araújo e Bezerra (2016) desenvolveram a Equação 24 a seguir, em que o fator de atrito depende apenas, além de material em PVC e diâmetro pré-definidos através do uso da Tabela 3, da vazão do trecho em L/s.

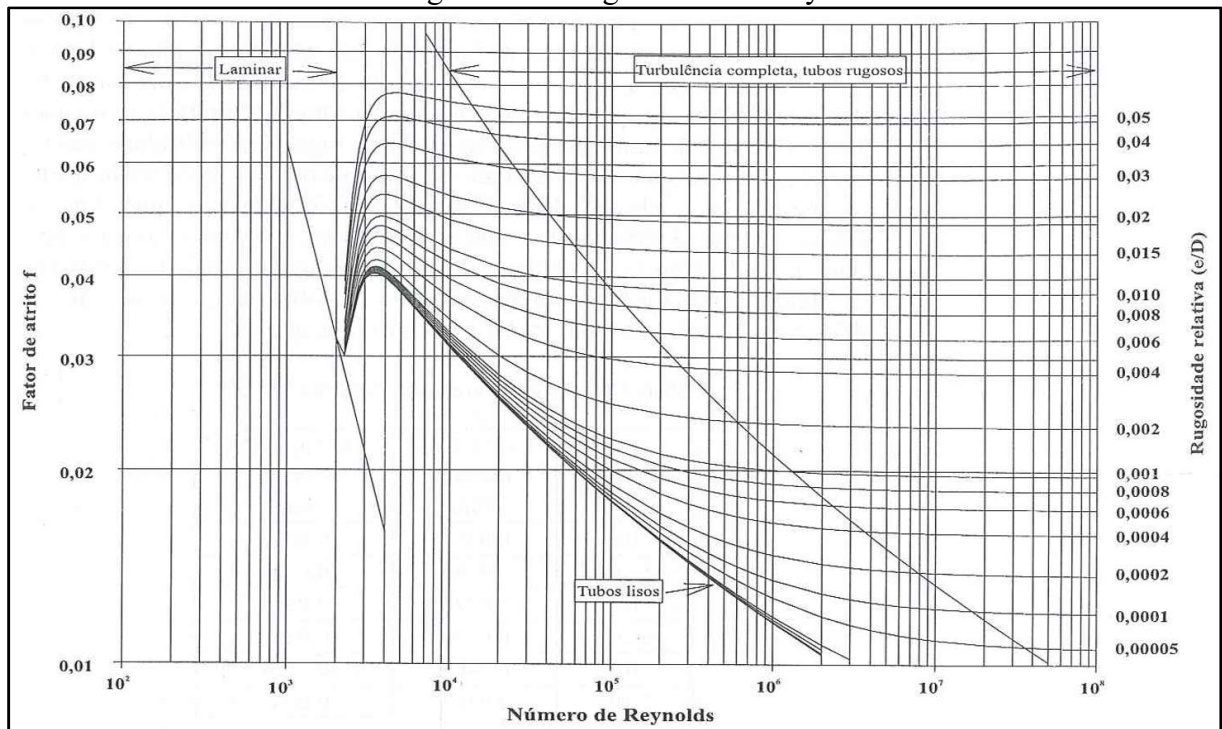
$$f = 0,026811Q^{-0,115995} \quad (24)$$

Tabela 3 – Seleção do diâmetro para a vazão máxima pelo método de Araújo e Bezerra (2016)

| Material | DN (mm) | DI (mm) | Qmax (L/s) | Vmin (m/s) | Vmax (m/s) | J min (m/m) | J max (m/m) |
|--------------|------------|------------|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|
| PVC PBA CL12 | 50 | 54,6 | 2,192 | - | 0,936 | - | 0,0198 |
| PVC PBA CL12 | 60 | 68,2 | 2,809 | 0,600 | 0,769 | 0,0066 | 0,0104 |
| PVC PBA CL12 | 75 | 77,2 | 4,712 | 0,600 | 1,007 | 0,0056 | 0,0148 |
| PVC PBA CL12 | 100 | 100,0 | 11,527 | 0,600 | 1,468 | 0,0041 | 0,0218 |
| PVC DEFoFo | 150 | 156,4 | 22,168 | 0,600 | 1,154 | 0,0024 | 0,0080 |
| PVC DEFoFo | 200 | 204,2 | 44,865 | 0,677 | 1,370 | 0,0021 | 0,0080 |
| PVC DEFoFo | 250 | 252 | 78,128 | 0,900 | 1,566 | 0,0028 | 0,0080 |
| PVC DEFoFo | 300 | 299,8 | 123,417 | 1,107 | 1,748 | 0,0034 | 0,0080 |
| PVC DEFoFo | 350 | 347,6 | 182,080 | 1,301 | 1,919 | 0,0038 | 0,0080 |
| PVC DEFoFo | 400 | 394,6 | 254,021 | 1,489 | 2,077 | 0,0042 | 0,0080 |
| PVC DEFoFo | 500 | 489,4 | 446,719 | 1,350 | 2,375 | 0,0027 | 0,0080 |

Fonte: Araújo e Bezerra (2016).

Figura 12 – Diagrama de Moody



Fonte: Porto (2006)

Como a maior parte das equações para o cálculo do fator de atrito dependem da rugosidade absoluta da tubulação, na Tabela 4 pode ser visto os valores de rugosidade para vários materiais.

Tabela 4 – Rugosidades absolutas para tubulações de alguns materiais

| Material | Rugosidade absoluta (mm) |
|--|---------------------------------|
| Aço comercial | 0,045 |
| Aço laminado | 0,04 a 0,10 |
| Aço soldado | 0,05 a 0,10 |
| Aço galvanizado com costura | 0,15 a 0,20 |
| Aço galvanizado sem costura | 0,06 a 0,15 |
| Ferro fundido | 0,25 a 0,50 |
| Ferro fundido velho | 3 a 5 |
| Ferro fundido revestido com cimento | 0,10 |
| Cobre | 0,0015 a 0,010 |
| PVC | 0,0015 a 0,010 |

Fonte: Adaptado de Porto (2006).

De acordo com Todini e Pilati (1987), a estrutura hidráulica de uma rede de distribuição de água é dada em duas etapas. A primeira consiste na definição e caracterização da rede, ou seja, seu traçado e propriedades físicas, além de consumos nodais. Já a segunda etapa se caracteriza pela análise do fluxo de água pela rede de distribuição.

Na NBR 12.218/2017 é recomendado que a análise do funcionamento global da rede deve ser realizada por simulações hidráulicas, que garantam desvios numéricos máximos de vazão e de carga piezométrica de 0,1 L/s e 0,5 kPa, respectivamente.

Para Sarbu (2014), entre os métodos iterativos mais populares de análise hídrica de redes estão os métodos de Hardy-Cross, de Newton-Raphson e da Teoria Linear. Spiliotis e Tsakiris (2011), além de Todini e Pilati (1987), também incluem nesse contexto os métodos de Gradiente Hidráulico. Os últimos autores consideram que o método de Hardy-Cross é, na verdade, um método de Gradiente Hidráulico.

No Brasil, dentre os métodos citados, com certeza o mais popular é o método de Hardy-Cross, criado em 1936, que, de acordo com Todini e Pilati (1987), foi o primeiro a sistematizar o problema de análise de redes de distribuição.

Este método foi citado, no Brasil, inicialmente, no trabalho de Garcez e Azevedo Netto (1947), como simples e suficientemente preciso, sendo logo reconhecido como o método ideal para a solução do problema constituído pelos encanamentos complexos. Posteriormente, Martins e Azevedo Netto (1951) apresentaram a estrutura do método, inclusive com seu equacionamento, aplicação e exemplo prático. Daí, é o principal método para cálculo de redes malhadas que aparece em livros, como em Tsutiya (2006) e Heller e Pádua (2010b), além de em trabalhos científicos, como no caso de Araújo e Bezerra (2016).

2.2.4 Transporte de cloro nas redes de distribuição de água

De acordo com Libânio (2008), no início do século XX, o cloro e seus compostos passaram a ser empregados como desinfetantes nas estações de tratamento de água em algumas grandes cidades dos Estados Unidos e Canadá. Com o objetivo de garantir o residual de cloro nas redes de distribuição e diminuir os odores na água, algumas cidades passaram a usar a cloramina, composto de cloro e amônia. Durante a 2ª Guerra Mundial, a indisponibilidade de amônia tornou o uso do produto restrito.

Segundo o mesmo autor, o uso de cloro em sistemas de abastecimento de água possui como principal função a desinfecção. No entanto, o produto também tem sido usado para controle de sabor e odor, prevenção de crescimento de algas, remoção de ferro e manganês, remoção de cor e controle do desenvolvimento de biofilmes em tubulações.

Richter e Azevedo Netto (1991) explicam que o cloro, tanto líquido quanto gasoso, na ausência de umidade, não ataca os metais ferrosos, no entanto, quando em soluções aquosas, é altamente corrosivo. Nesses casos, resistem à essa substância alguns materiais como PVC e polietileno. Para Yeh et al. (2008), além de barato, o cloro é um desinfetante forte e de utilização conhecida.

Entre os compostos de cloro utilizados na desinfecção de sistemas de abastecimento de água estão o cloro gasoso, o hipoclorito de cálcio e o hipoclorito de sódio. O primeiro é utilizado na maior parte dos grandes sistemas, já os dois últimos nos pequenos sistemas, sendo o hipoclorito de cálcio, sólido, e o hipoclorito de sódio, líquido.

Biswas, Lu e Clark (1993) informam que a desinfecção é realizada rotineiramente, antes que a água tratada saia da estação de tratamento, para manter um residual de cloro no sistema de distribuição visando a prevenção da degradação microbiológica da qualidade da água.

Libânio (2008) cita ainda a importância de se deixar cloro residual nos reservatórios e redes de distribuição de água que, apesar de favorecer o desenvolvimento de subprodutos cancerígenos, tais quais os trihalometanos (THM), os riscos biológicos à saúde humana, através da disseminação de doenças de transmissão hídrica, são significativamente maiores que os causados pelos THM.

A portaria nº 2.914 de 2011 do Ministério da Saúde estabelece, como padrão de potabilidade da água, a obrigatoriedade da manutenção de, no mínimo, 0,2 mg/L de cloro residual livre em toda a extensão do sistema de distribuição, ou seja, reservatório e rede de

distribuição. Como limite máximo, a mesma portaria estabelece 2 mg/L de residual livre de cloro em qualquer ponto do sistema de abastecimento.

Tzatchkov, Aldama e Arreguin (2002) apresentam a Equação 25 que representa o processo reação-dispersão-advecção em um escoamento através de uma tubulação de seção plena para uma substância não conservativa, como é o caso do cloro.

$$\frac{\partial C_C}{\partial t} + V \frac{\partial C_C}{\partial x} = D_{is} \frac{\partial^2 C_C}{\partial x^2} - K C_C \quad (25)$$

Em que C_C (g/m³) é a concentração de cloro, t (s) é o tempo, x (m) é o eixo representando a distância longitudinal ao longo da tubulação, D_{is} (m²/s) é o coeficiente de dispersão e K (s⁻¹) é a constante de decaimento total do cloro, que considera a reação de uma substância com o volume de água e a parede do tubo.

De acordo com Tzatchkov, Aldama e Arreguín (2000), a aplicação de um modelo de transporte de substâncias em redes de distribuição de água potável tem duas partes, a primeira é a aplicação de um modelo hidráulico, para proporcionar parâmetros como velocidades, e a segunda representada pela aplicação numérica da Equação 25.

Para a aplicação da citada equação, o coeficiente de dispersão pode ser encontrado, para um escoamento laminar, através da expressão encontrada por Taylor (1953), que desenvolveu a fórmula para o sistema de unidades c.g.s., mostrada na Equação 26 para o sistema internacional de unidades.

$$D_{is} = \frac{D^2 V^2}{192 D_M} \quad (26)$$

Em que D_M (m²/s) é o coeficiente de difusão molecular do elemento inserido no fluido. Para o escoamento turbulento, o coeficiente de dispersão pode ser calculado através da Equação 27 proposta por Taylor (1954).

$$D_{is} = 10,06 \frac{VD}{2} \sqrt{\frac{f}{8}} \quad (27)$$

Apesar de o coeficiente de dispersão ser conhecido desde a década de 1950, alguns modelos desprezam o efeito da dispersão em tubulações (ROSSMAN, 2000), considerando,

apenas a reação-convecção através da Equação 28 ou, para regime permanente, através da Equação 29.

$$\frac{\partial C_C}{\partial t} + V \frac{\partial C_C}{\partial x} = -KC_C \quad (28)$$

$$V \frac{\partial C_C}{\partial x} = -KC_C \quad (29)$$

A Equação 29 é dotada de solução analítica (Equação 30), equação esta que rege o comportamento do cloro nos trechos de uma rede de distribuição.

$$C_{C_j} = C_{C_M} \cdot e^{-K \frac{L}{V}} \quad (30)$$

Em que C_{C_j} (mg/L) é a concentração de cloro no nó de jusante e C_{C_M} (mg/L) é a concentração de cloro no nó de montante do trecho.

De acordo Tzatchkov (1996), considerando apenas a reação que ocorre entre o cloro e o volume de água existente na tubulação, considera-se válida a Equação 31.

$$\frac{dC_C}{dt} = -K_B C_C \quad (31)$$

Em que K_B (s⁻¹) é a constante de decaimento do cloro no seio do líquido.

Para Rossman (2000), a reação entre o cloro e a parede da tubulação pode ser expressa pela Equação 32.

$$\frac{dC_C}{dt} = \frac{4K_W K_f C_C}{D(K_W + K_f)} \quad (32)$$

Em que K_W (m/s) é a constante de decaimento do cloro nas paredes da tubulação e K_f (m/s) é o coeficiente de transferência de massa entre o fluxo de água e a parede da tubulação.

Rossman, Clark e Grayman (1994) apresentam uma relação entre os coeficientes K , K_f , K_W e K_B através da Equação 33.

$$K = K_B + \frac{K_W K_f}{R_H(K_W + K_f)} \quad (33)$$

Em que $R_H(m)$ é o raio hidráulico do conduto.

2.2.5 Perdas de água nas redes de distribuição

As perdas decorrentes de vazamentos em redes de distribuição são chamadas de perdas físicas ou reais. Soares et al. (2004) consideram que não existem sistemas estanques, ou seja, toda rede de distribuição de água já implantada apresenta alguma parcela de perda de água.

Morais, Cavalcante e Almeida (2010) explicam que, além dos danos financeiros e ambientais, as perdas de água na distribuição geram sérios problemas para a operação do sistema de abastecimento. Quando o problema se torna crítico em um determinado setor, a pressão da água nas redes cai para níveis abaixo do estabelecido pelas normas e legislações, levando à insatisfação dos clientes por não receberem água na pressão adequada para a sua utilização.

Soares et al. (2004) informam que a quantificação dos vazamentos distribuídos ao longo da rede pode ser feita por meio da inclusão de modelos pressão \times vazamento nas análises hidráulicas. No entanto, para Mutikanga, Sharma e Vairavamoorthy (2013), a quantidade de água perdida em uma rede de distribuição pode ser quantificada realizando, apenas, um balanço hídrico no sistema.

A falta de monitoramento referente às perdas de água em redes de distribuição está entre as principais causas do seu acontecimento. Para Moraes, Cavalcante e Almeida (2010), alguns dos motivos que levam às perdas físicas no sistema são erros de medição, imprecisão dos medidores de vazão e o uso de métodos inadequados de medição. Mutikanga, Sharma e Vairavamoorthy (2013) explicam que o monitoramento das perdas em redes de distribuição deve ser realizado através de medições de vazão e pressão em zonas pré-determinadas da rede, em horários que abrangem, tanto o pico de vazão, durante o dia, quanto, principalmente, o pico de pressão, durante a noite.

Para Abdulshaheed, Mustapha e Ghavamian (2017), a detecção do vazamento em uma tubulação é a grande prioridade para muitas companhias e governos. Após detectados, os vazamentos podem ser classificados em função do motivo pelo qual existe o vazamento, ou seja, podem ser vazamentos por rupturas ou por fadiga do conduto.

Os citados autores explicam que a fuga devido à ruptura ocorre instantaneamente devido a um aumento no fluxo sobre a capacidade máxima do tubo ou devido a uma tensão excessiva na parede do conduto. Quanto à fadiga, Morais, Cavalcante e Almeida (2010) explicam que uma infraestrutura antiga, comum aos sistemas de abastecimento de água brasileiros, propicia um processo acelerado de deterioração, o que tem como consequência maiores problemas de manutenção, elevando os índices de perdas de água, especialmente por conta dos efeitos resultantes do descuido nas atividades de conservação. Abdulshaheed, Mustapha e Ghavamian (2017) consideram que o segundo tipo é mais difícil de detectar devido ao processo de formação lenta com declínio adequado de baixa pressão.

Mutikanga, Sharma e Vairavamoorthy (2013) explicam que existem alguns equipamentos que podem ser utilizados em campo para localizar um vazamento na tubulação, no entanto, nas últimas três décadas, modelos hidráulicos têm sido bastante utilizados como ferramenta para prever a magnitude e a localização de um ponto de perda de água em redes de distribuição.

Entre os modelos hidráulicos utilizados estão o de Soares et al. (2004), que utiliza de método inverso através de algoritmos genéticos para minimizar a função objetivo (f_{obj}) exposta pela Equação 34, o de Gumier e Luvizotto Júnior (2007), que difere do primeiro apenas pelo uso da função objetivo representada pela Equação 35, o de Salam et al. (2015), que utiliza dois métodos, de inteligência artificial, denominados *Support Vector Machine (SVM)* e *Extreme Learning Machine (ELM)*, além das simulações hidráulicas através do EPANET, que buscam alcançar o mínimo objetivo representado pelo menor erro calculado através da Equação 36, o de Mashford et al. (2012) que também utilizaram inteligência artificial através do método *SVM* associado às simulações hidráulicas através do EPANET, e o de Rosich, Puig e Casillas (2015), que desenvolveram um modelo hidráulico específico para a localização das perdas capaz de simular redes com, além das perdas, trechos, nós e reservatórios, com a perda de carga calculada através da equação de Hazen-Williams e as equações não lineares resolvidas através do método de Newton-Raphson.

$$f_{obj} = \sum_{n_D} \left[\sum_{n_P} \frac{(P_C - P_O)^2}{\left(\frac{\sum_{n_P} P_O}{n_P}\right)^2} + \sum_{n_Q} \frac{(Q_C - Q_O)^2}{\left(\frac{\sum_{n_Q} Q_O}{n_Q}\right)^2} \right] \quad (34)$$

$$f_{\text{obj}} = \sum_{n_D} \left[\frac{(H_O - H_C)^2}{\sigma^2} \right] \quad (35)$$

$$f_{\text{obj}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n_P} \sum_{n_P} (P_O - P_C)^2}}{P_{\text{MAX}} - P_{\text{MIN}}} \quad (36)$$

Em que $P_C(m)$ é a pressão calculada, $P_O(m)$ é a pressão observada, $Q_C(L/s)$ é a vazão calculada, $Q_O(L/s)$ é a vazão observada, n_D é o número de nós com demandas conhecidas, n_P é o número de nós com pressões conhecidas, n_Q é o número de trechos com vazões conhecidas, $H_C(m)$ é a carga hidráulica calculada, $H_O(m)$ é a carga hidráulica observada, $\sigma(m)$ é o desvio padrão, $P_{\text{MAX}}(m)$ é o máximo valor de pressão observada e $P_{\text{MIN}}(m)$ é o mínimo valor de pressão observada.

2.3 Simulação de redes de distribuição de água através do software EPANET

De acordo com Rossman (2000), o EPANET é um programa de computador que simula o comportamento hidráulico e de qualidade da água em redes de tubulações pressurizadas. O software encontra o fluxo de água em cada tubulação, a pressão em cada nó, o nível de água em cada reservatório e a concentração de um elemento químico durante um período de simulação da rede.

Através do software é utilizado o método do gradiente hidráulico proposto por Todini e Pilati (1987) para a simulação hidráulica da rede, considerando, para cada trecho da rede, a vazão inicial equivalente a uma velocidade no trecho de 0,305 m/s a ser atualizada no processo iterativo. Para as bombas hidráulicas a vazão inicial adotada é a vazão especificada para o funcionamento da bomba.

Para o cálculo do gradiente hidráulico, três equações podem ser utilizadas, de acordo com as preferências do usuário. A primeira é a equação de Manning (Equação 37) que, apesar de poder ser utilizada para efetuar cálculos de sistemas de tubulações sob pressão, tem sua principal utilização no estudo de escoamentos livres.

$$\nabla H = \frac{10,29n^2Q^2}{D^{5,33}} \quad (37)$$

Em que n , em $s/m^{1/3}$, é o coeficiente de rugosidade de Manning.

A segunda equação utilizada para o cálculo do gradiente hidráulico, com o uso do EPANET, é a Equação 3 de Hazen-Williams, considerando coeficientes C de rugosidade constantes para cada trecho. Já a terceira é a Equação 5 apresentada, ou seja, a fórmula universal da perda de carga.

O cálculo do fator de atrito, para o uso da equação de Darcy-Weisbach, é realizado de acordo com o tipo de escoamento. No caso de escoamento laminar, o fator de atrito é calculado através da Equação 8 com base na equação de Hagen-Poiseuille. Para o escoamento turbulento, a Equação 21, de Swamee-Jain, é utilizada para determinar o fator de atrito.

Apesar de compreender apenas uma pequena parte da faixa dos números de Reynolds, o escoamento transicional, que para Rossman (2000) se encontra dentro da faixa $2.000 < Rey < 4.000$, é abrangido pelo software que, segundo o autor, segue a metodologia desenvolvida por Dunlop em 1991, de acordo com as Equações 38 a 47.

$$f = \{X_1 + R[X_2 + R(X_3 + X_4)]\} \quad (38)$$

Em que:

$$R = \frac{Rey}{2000} \quad (39)$$

$$X_1 = 7F_A - F_B \quad (40)$$

$$X_2 = 0,128 - 17F_A + 2,5F_B \quad (41)$$

$$X_3 = -0,128 + 13F_A - 2F_B \quad (42)$$

$$X_4 = R(0,032 - 3F_A + 0,5F_B) \quad (43)$$

$$F_A = (Y_2)^{-2} \quad (44)$$

$$F_B = F_A \left(2 - \frac{0,00514215}{Y_1 Y_2} \right) \quad (45)$$

$$Y_1 = \frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{\text{Rey}^{0,9}} \quad (46)$$

$$Y_2 = -0,86859 \ln \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{4000^{0,9}} \right) \quad (47)$$

Para este procedimento, X_1 , X_2 , X_3 , X_4 , R , F_A , F_B , Y_1 e Y_2 são coeficientes específicos para o cálculo do fator de atrito em escoamento transicional.

Quanto à análise da qualidade da água, através do uso do software, é possível simular o transporte de substâncias conservativas, como o flúor, o transporte de substâncias não conservativas, como o cloro, a idade da água dentro das tubulações e o percentual de água em cada nó que veio de cada fonte.

No caso do cloro, ou seja, o transporte de elementos químicos não conservativos, com o uso do EPANET a dispersão do cloro é desprezada, ou seja, a Equação 28 é utilizada para o cálculo do decaimento deste elemento.

O modelo permite a mistura dos elementos químicos dentro dos reservatórios, através da Equação 48, e a mistura nos nós da rede, através da Equação 49.

$$\frac{\partial(V_{oi}C_R)}{\partial t} = \sum_{ent} QC_C - \sum_{sai} QC_C + k_v C_R \quad (48)$$

$$C_C = \frac{\sum_{ent} QC_C + \sum_{ext} QC_C}{\sum_{ent} Q + \sum_{ext} Q} \quad (49)$$

Em que $V_{oi}(m^3)$ é o volume do reservatório, $k_v(m^3/s)$ é o coeficiente de reação no volume do escoamento, $C_R(g/m^3)$ é a concentração de cloro dentro do reservatório e os índices ent, sai e ext se referem, respectivamente, aos fluxos das tubulações que entram no nó ou reservatório, aos fluxos das tubulações que saem do reservatório e aos fluxos externos ao sistema desenhado que entram no nó.

Com o uso do EPANET, as reações entre o cloro e o seio do líquido, dentro da tubulação, ocorrem de acordo com a Equação 31, já as reações entre o cloro e as paredes do conduto ocorrem através da Equação 32.

Há no software a opção de determinar que a constante de decaimento do cloro nas paredes da tubulação K_W seja calculada de acordo com a equação para o cálculo do gradiente

hidráulico escolhido, ou seja, caso o gradiente hidráulico seja calculado por Hazen-Williams, Darcy-Weisbach ou Manning, o coeficiente K_W pode ser calculado, respectivamente, através das Equações 50, 51 e 52.

$$K_W = \frac{F_1}{C} \quad (50)$$

$$K_W = \frac{-F_2}{\log\left(\frac{\varepsilon}{D}\right)} \quad (51)$$

$$K_W = F_3 \cdot n \quad (52)$$

Em que F_1 ($m^{1,367}/s^2$), F_2 (m/s) e F_3 ($m^{1,333}/s^2$) são coeficientes usados para o cálculo de K_W e devem ser determinados através de medições de campo.

Maier, Powell e Woodward (2000) informam que o EPANET utiliza a Equação 33 para relacionar os coeficientes K , K_f , K_W e K_B . Para Rossman (2000), o coeficiente de transferência de massa entre o fluxo de água e a parede da tubulação K_f pode ser encontrado através do uso da Equação 53.

$$K_f = Sh \frac{D_M}{D} \quad (53)$$

Em que Sh , adimensional, é o número de Sherwood que, considerando um fluxo ao longo de um comprimento de tubulação, de acordo com Rossman, Clark e Grayman (1994), para $Rey < 2.300$, é determinado através da Equação 54. Rossman (2000) informa que, para $Rey > 2.300$, o adimensional é determinado através da Equação 55.

$$Sh = 3,65 + \frac{0,0668 \left(\frac{D}{L}\right) \cdot Rey \cdot Sc}{1 + 0,04 \left[\left(\frac{D}{L}\right) \cdot Rey \cdot Sc\right]^{2/3}} \quad (54)$$

$$Sh = 0,0149Rey^{0,88}Sc^{1/3} \quad (55)$$

Em que Sc , adimensional, é o número de Schmidt (Equação 56).

$$Sc = \frac{v}{D_M} \quad (56)$$

O software EPANET é bastante utilizado, tanto no meio acadêmico como na realização de projetos técnicos de sistemas de abastecimento de água. Entre suas aplicações, em redes de distribuição de água, estão: operação ótima (RAO E SALOMONS, 2007; COSTA, CASTRO E RAMOS, 2010), dimensionamento otimizado (PINNTO ET AL., 2017), calibração (ROCHA ET AL., 2013; SOARES E REIS, 2004), análise da qualidade da água (PEREIRA E CASTRO, 2013; WAGNER, NEUPAUER E CICHOWITZ, 2015; SUSE, YOSHIKAWA E LUVIZOTTO JÚNIOR, 2014; REZAIAN, MAZLOUMI E SADRI, 2013), análise de perdas (ABDULSHAHEED, MUSTAPHA E GHAVAMIAN, 2017; SOARES ET AL., 2004; MASHFORD ET AL., 2012; SALAM ET AL., 2015) e até fluxo intermitente (CABRERA-BÉJAR E TZATCHKOV, 2012).

2.4 Calibração em redes de distribuição

Com o passar do tempo, devido ao envelhecimento das tubulações das redes de distribuição de água, suas características, como rugosidades, se alteram, gerando dificuldades na análise, operação e manutenção das redes. Vassiljev, Koor e Koppel (2015) entendem que as mudanças de rugosidades e diâmetros das tubulações acontecem devido à corrosão e os processos de encrustamento, que ocorrem com o tempo. Vasconcelos, Costa e Araújo (2015) informam que tais modificações podem chegar a afetar significativamente o mecanismo de distribuição de água, ocasionando perdas de pressões internas, perda de capacidade de transporte de fluidos e até mesmo vazamentos.

Entretanto, a dificuldade encontrada para análise de uma rede de distribuição não está apenas na idade das tubulações, mas, também, na estimativa inicial dos parâmetros ou nos dados fornecidos por fabricantes. Cheng e He (2011), afirmam que sem uma estimativa apropriada dos parâmetros, um modelo numérico não pode simular adequadamente a realidade, havendo, na prática, diferenças entre os comportamentos de modelos previstos e de sistemas reais em campo. Para Ormsbee e Lingireddy (1997), quando se utilizam tubos novos, é útil verificar os valores de rugosidade no campo, uma vez que o coeficiente de rugosidade utilizado no modelo pode representar uma combinação de vários fatores secundários, tais como perdas de adaptação e esqueletização do sistema.

Para Dini e Tabesh (2014), dada a complexidade de sistemas de distribuição de água e a larga escala na tomada de decisão em análise, projeto, operação e manutenção desses sistemas, é cada vez mais necessário o uso de modelagem computacional para entender o comportamento de sistemas de distribuição de água.

Walski (1983) entende que os dados iniciais de uma rede de distribuição não são perfeitos, então, alguns valores precisam ser calibrados para que haja concordância entre o modelo e o real. Vassiljev, Koor e Koppel (2015) também entendem que a calibração de um modelo computacional é necessária para que este possa se aproximar da realidade. Ormsbee e Lingireddy (1997) acreditam que devido à dificuldade de obter medições econômicas e confiáveis de parâmetros como rugosidades e demandas, os valores do modelo hidráulico final devem ser determinados através do processo de calibração.

O processo de calibração, ou método inverso, visa à atualização de dados computacionais calculados buscando se aproximar de dados físicos observados. Solomatine, Dibike e Kukuric (1999) consideram que o objetivo da calibração de qualquer modelo físico é encontrar parâmetros, em um modelo, os quais não são conhecidos *a priori*. Segundo Soares et al. (2004), a calibração visa ao ajuste dos parâmetros do sistema de tal forma que os desvios entre os dados simulados e observados em campo sejam minimizados. Cheng e He (2011) explicam que a calibração de modelos computacionais é definida como o processo de ajuste de dados descrevendo o modelo matemático do sistema até que os desempenhos observados, tipicamente pressões e taxas de fluxo, estejam razoavelmente de acordo com os desempenhos calculados por computador em uma ampla gama de condições operacionais.

Para Walski (1983), uma definição mais precisa para calibração de um modelo de distribuição de água consiste em um processo de dois passos, no qual, o primeiro, consiste na comparação de pressões e vazões calculadas com as observadas em condições de operação do sistema e, o segundo, no ajuste dos dados de entrada do modelo para que haja concordância entre o modelo calculado e o sistema observado.

Ostfeld et al. (2012) explicam que calibração é um processo de comparação entre os resultados de um modelo com dados medidos em campo, geralmente analisando por que o modelo não concorda com os dados medidos, e de fazer ajustes apropriados para que ambos os resultados concordem. Para os autores, o objetivo de calibração é tipicamente definido de tal modo que, com o processo, os valores dos coeficientes do modelo são ajustados dentro dos seus domínios viáveis na direção da redução da função objetivo de calibração.

De acordo com Righetto (2001), a dificuldade em se calibrar um modelo hidráulico de rede está nas incertezas envolvidas quanto às informações das demandas ou vazões de

consumo atribuídas aos vários nós da rede de distribuição e também, aos valores de rugosidade e dos próprios diâmetros efetivos das tubulações que compõem os diversos trechos da rede. Para o autor, apesar desses valores serem considerados como dados do modelo hidráulico, na realidade, são variáveis aleatórias na modelagem do sistema, com valores médios razoavelmente bem estimados e, em geral, os desvios em relação às médias são significativos e alteram totalmente o funcionamento hidráulico da rede.

Ormsbee e Lingireddy (1997) e Cheng e He (2011) citam que as técnicas utilizadas para calibração de redes hidráulicas incluem, geralmente, modelos baseados em equações analíticas ou modelos de tentativa e erro, que necessitam de uma simplificação significativa da rede, modelos de simulação ou modelos explícitos, que apresentam a desvantagem de poder lidar com um conjunto de condições de contorno de cada vez, além de desprezar erros de medição, e métodos de otimização ou modelos implícitos que, geralmente, visam a minimização de uma função objetivo.

Conforme Righetto (2001), quando se conhecem, apenas, valores de carga hidráulica em nós da rede, é comum o uso de uma função objetivo, a ser minimizada, que depende, apenas, do quadrado dos desvios das cargas nodais, de acordo com o que pode ser visto na Equação 57. Quando se possui, também, dados de vazão, o autor considera que se deve incluir na função objetivo o quadrado dos desvios de vazão. Substituindo a carga hidráulica pela pressão, Ormsbee e Lingireddy (1997) apresentam o caso citado através da Equação 58. Cheng e He (2011) apresentam a Equação 59, a ser minimizada, mais completa, que considera, além de pressões nos nós e vazões nos trechos, as vazões nas fontes de água da rede.

$$f_{\text{obj}} = \sum_{n_p} (H_o - H_c)^2 \quad (57)$$

$$f_{\text{obj}} = \alpha \sum_{n_p} (P_o - P_c)^2 + \beta \sum_{n_q} (Q_o - Q_c)^2 \quad (58)$$

$$f_{\text{obj}} = \alpha^2 \sum_{n_p} (P_o - P_c)^2 + \beta^2 \sum_{n_q} (Q_o - Q_c)^2 + \xi^2 \sum_{n_g} (G_o - G_c)^2 \quad (59)$$

Em que α , β e ξ são parâmetros de peso, G_o (m³/s) é a vazão observada nas fontes de água, G_c (m³/s) é a vazão calculada nas fontes de água e n_g é o número de fontes de vazão na rede com dados conhecidos.

A maioria dos métodos de otimização usados para a calibração utiliza, para a função objetivo a ser minimizada, apenas os dados conhecidos ou medidos em campo. Por exemplo, se uma rede de 80 nós e 70 trechos possui 20 pressões e 8 vazões conhecidas, $n_P = 20$ e $n_Q = 8$. No entanto, no trabalho de Rocha, Castro e Araújo (2009), a função objetivo depende do número total de trechos, uma vez que se baseia no trabalho de Guo e Zhang (2000), ou seja, no quadrado dos desvios dos gradientes hidráulicos, como é mostrado na Equação 60.

$$f_{\text{obj}} = \sum_{n_T} (\nabla H_O - \nabla H_C)^2 \quad (60)$$

Em que n_T é o número total de trechos, ∇H_O é o gradiente hidráulico observado e ∇H_C é o gradiente hidráulico calculado.

Para Cheng e He (2011), a maioria das metodologias disponíveis utiliza a minimização de erros como o único critério para a calibração, o que pode ser bom para casos simples com dados de monitoramento suficientes. No entanto, os autores afirmam que o erro encontrado através do uso desses modelos diminui e a incerteza no parâmetro calculado aumenta se o número de parâmetros aumenta.

De acordo com Ormsbee e Lingireddy (1997), os principais parâmetros associados a um modelo de rede hidráulica são a rugosidade do tubo e as demandas nodais. Kun et al. (2015) esclarecem que a rugosidade é uma das características de maior incerteza nas tubulações, pois é de difícil medição direta em campo, sendo, portanto, um dos principais objetivos de calibração. Ormsbee e Lingireddy (1997) consideram que o segundo grande parâmetro determinado na análise de calibração é a demanda média (considerando um escoamento permanente) ou temporariamente variável (considerando um escoamento não permanente) a ser atribuída a cada nó.

Ostfeld et al. (2012) sugerem que a correspondência entre os valores calculados e medidos (observados) seja feita através da soma dos quadrados dos erros relativos (SQER) que, para as pressões, por exemplo, pode ser calculada através da Equação 61 e, para as vazões, outro exemplo, através da Equação 62.

$$\text{SQER} = \sum_{n_P} \frac{(P_O - P_C)^2}{(P_C)^2} \quad (61)$$

$$SQER = \sum_{n_Q} \frac{(Q_O - Q_C)^2}{(Q_C)^2} \quad (62)$$

Vários autores já utilizaram a calibração nesses parâmetros em redes de distribuição, como no caso de rugosidades (ORMSBEE E WOOD, 1986; SILVA ET AL., 2004; VASCONCELOS, COSTA E ARAÚJO, 2015; VASSILJEV, KOOR E KOPPEL, 2015), de demanda (BHAVE, 1988; KUN ET AL., 2015; CHENG E HE, 2011) ou ambos (RIGHETTO, 2001; OSTFELD ET AL., 2012.)

2.5 Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo - MIGHA

O Método Iterativo do Gradiente Hidráulico (MIGH), proposto por Guo e Zhang (1994), teve sua origem na calibração da transmissividade (ou da condutividade) hidráulica de aquíferos subterrâneos. Nesse caso, para a utilização de um método de otimização na estimativa de parâmetros de um problema inverso, é comum o uso da Equação 63 como função objetivo a ser minimizada.

$$f_{obj} = \sum_{n_H} (H_O - H_C)^2 \quad (63)$$

Em que n_H é o número de pontos com carga hidráulica conhecida no aquífero.

Guo e Zhang (2000) descrevem o MIGH como um procedimento numérico iterativo que começa com a estimativa inicial dos parâmetros hidráulicos e melhora a estimativa de acordo com a melhor condição baseada nos resultados da simulação de um modelo com dados observados. O processo iterativo reduz as diferenças entre a carga hidráulica calculada pela estimativa e a carga hidráulica simulada pelo modelo com dados observados.

Os autores propõem que, para a utilização do MIGH, a função objetivo a ser minimizada condiz com a diferença entre os gradientes hidráulicos calculados e observados, sendo apresentada na Equação 64.

$$f_{obj} = \int_R (\nabla H_C - \nabla H_O)(\nabla H_C - \nabla H_O) dx dy \quad (64)$$

Em que dx e dy são as dimensões infinitesimais da célula do aquífero.

Guo e Zhang (2000) mostraram que a condição ótima para o parâmetro transmissividade ocorre quando a derivada parcial (Equação 65) da função objetivo, em função da transmissividade, se aproxima de zero.

$$\frac{\partial f_{obj}}{\partial T_j} = -\frac{2}{T_j} \int_{R_j} (\nabla H_{C_j} - \nabla H_{O_j}) \nabla H_{C_j} dx dy \quad (65)$$

Em que T é a transmissividade e j é o índice da célula. Assim, os autores indicam que o parâmetro a ser utilizado segue o que estabelece a Equação 66 a cada iteração.

$$T_j^{i+1} = T_j^i - \delta \left(\frac{\partial f_{obj}}{\partial T_j} \right)^i \quad (66)$$

Em que i é o número da iteração e δ é o comprimento de passo.

Na versão alternativa do método, Schuster e Araújo (2004), transformaram a Equação 65 na Equação 67, equivalente, expressa em diferenças finitas.

$$\frac{\partial f_{obj}}{\partial T_j} = -\frac{2}{T_j} \sum_{n_H} (\nabla H_{C_j} - \nabla H_{O_j}) \nabla H_{C_j} \Delta x \Delta y \quad (67)$$

Em que $\Delta x(m)$ e $\Delta y(m)$ são as dimensões de cada célula j . Além disso, os autores propuseram a Equação 68, alternativa, ao invés da Equação 66.

$$T_j^{i+1} = T_j^i \frac{|\nabla H_{C_j}^i|}{|\nabla H_{O_j}^i|} \quad (68)$$

Em que em cada iteração i será calculado o ângulo θ formado entre os vetores dos gradientes hidráulicos observado e calculado em cada célula j , conforme mostrado na Equação 69.

$$\cos \theta_j = \frac{\nabla H_{O_j} \nabla H_{C_j}}{|\nabla H_{O_j}| |\nabla H_{C_j}|} \quad (69)$$

Para a otimização, os ângulos $\theta_j > 60^\circ$ não são considerados até que as transmissividades calculadas nas células vizinhas causem a diminuição do ângulo.

Após Schuster e Araújo (2004) desenvolverem o método, Tavares *et al.* (2010), Sousa *et al.* (2012) e Souza e Castro (2013) o aplicaram em casos de fluxo subterrâneo, razão para a qual o método foi desenvolvido.

Rocha, Castro e Araújo (2009) foram os primeiros a adaptar e aplicar o método no cálculo de coeficientes de rugosidade em redes de distribuição de água. Os autores aplicaram o método na calibração do coeficiente C de Hazen-Williams onde as iterações ocorrem com o uso da Equação 70 a seguir, em que C é o coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams, o índice i é o número da iteração e o índice j é o número do trecho.

$$C_j^{i+1} = C_j^i \frac{|\nabla H_{C_j}^i|}{|\nabla H_{O_j}^i|} \quad (70)$$

A aplicação em redes de distribuição manteve o estabelecido por Schuster e Araújo (2004) quanto ao cálculo do ângulo θ e da função objetivo (Equação 60), substituindo apenas a transmissividade pelo coeficiente de rugosidade. Após a adaptação, o MIGHA também foi utilizado na calibração do coeficiente C de Hazen-Williams no trabalho Rocha *et al.* (2013).

No caso de redes de distribuição, o ângulo θ só pode possuir os valores 0° ou 180° , assim, ao aceitar apenas ângulos menores que 60° , com o uso do método não é permitido que o mesmo trecho apresente sentidos de fluxo opostos nas redes calculada e observada.

Em seu trabalho, Rocha, Castro e Araújo (2009) apresentaram três formas de realizar a calibração dos coeficientes de rugosidade em redes de distribuição através do MIGHA. A primeira foi chamada de MIGHA-C e, utilizando este procedimento, a cada iteração apenas as rugosidades da rede calculada sofrem alteração, gerando um novo gradiente hidráulico calculado a ser utilizado na Equação 70 para o cálculo de uma nova rugosidade.

A segunda forma foi denominada de MIGHA-M. Nessa forma, as rugosidades, tanto da rede calculada quanto da rede observada, sofrem alterações, gerando novos gradientes hidráulicos calculados e observados. No entanto, apenas as rugosidades da rede calculada são

alteradas em todas as iterações. As rugosidades da rede observada só são alteradas a cada ciclo de nove iterações alterando as rugosidades da rede calculada.

Por fim, a terceira forma considerada foi o MIGHA-O que, assim como na segunda, as rugosidades da rede calculada e da rede observada sofrem alterações, gerando novos gradientes hidráulicos calculados e observados. A diferença é que, nessa forma, as rugosidades das duas redes são alteradas a cada iteração. Assim, o número de iterações necessárias ao processo de calibração deve diminuir, uma vez que as duas redes tendem a se tornar mais parecidas a cada iteração.

É importante perceber que, para que ocorra mudança no gradiente hidráulico observado, apenas os parâmetros envolvidos no modelo inverso, como rugosidades, sofrem alterações. Características da rede que sofrem medições, ou seja, dados observados, como pressões, não são alterados.

Para que haja a possibilidade de calcular o gradiente hidráulico observado em todos os trechos da rede, independentemente de haver medições de pressão nos nós de montante e jusante de todos os trechos, Rocha, Castro e Araújo (2009) consideram o uso de redes de distribuição as quais foram chamadas de Rede Calculada e Rede Observada. No caso do uso de uma rede fictícia, os autores definiram, ainda, uma rede denominada Rede Gabarito.

- Rede Calculada: é a rede a qual serão realizados os cálculos hidráulicos e obtidos os resultados calculados. Parâmetros iniciais estimados são usados e, a cada iteração, com base no valor dos gradientes hidráulicos calculados obtidos nessa rede, esses parâmetros são alterados, gerando novos resultados, cada vez mais próximos dos medidos em campo;
- Rede Observada: rede que apresenta os mesmos parâmetros iniciais da rede calculada, no entanto, possui pressões fixadas de acordo com os dados conhecidos. Além disso, são obtidos valores de gradientes hidráulicos observados para cada trecho e, esses valores, podem ser diferentes a cada iteração, dependendo da forma de calibração do MIGHA utilizada;
- Rede Gabarito: rede fictícia na qual todos os parâmetros de entrada e resultados hidráulicos são conhecidos. Pode ser utilizada como base para conferir os resultados encontrados com o uso do método.

Rocha (2013) explica como foram fixadas as pressões das redes observadas no processo de calibração através do MIGHA, uma vez que para a simulação hidráulica das redes de distribuição foi utilizado o software EPANET. A solução dada foi a utilização de reservatórios de nível fixo, sendo o nível fixado em cada reservatório a cota piezométrica de cada nó com pressão conhecida, ligados a seus respectivos nós através de trechos de tubulações com comprimento extremamente pequeno, quase inexistente, e diâmetros extremamente grandes. O objetivo é fazer com que a vazão, que porventura venha a passar pelo trecho fictício, seja a menor possível e a carga hidráulica adquirida pelo nó, devido a existência do reservatório de nível fixo, seja a mesma do reservatório, sem que haja perda de carga considerável através desse trecho. Tanto o reservatório quanto o trecho criados são considerados fictícios, uma vez que não existem na rede real.

O objetivo principal do trabalho de Rocha (2013) foi a aplicação do MIGHA em escoamento com regime transiente calibrando a rugosidade absoluta com o cálculo da perda de carga através da fórmula universal. Para isso, considerando apenas a aplicação do MIGHA, o autor utilizou a Equação 71 apresentada a seguir para o cálculo da rugosidade absoluta.

$$\varepsilon_j^{i+1} = \varepsilon_j^i \left(\frac{|\nabla H_{C_j}^i|}{|\nabla H_{O_j}^i|} \right)^{-1} \quad (71)$$

Pereira e Castro (2013) também aplicaram o método em redes de distribuição de água, entretanto, ao invés de utilizar o gradiente hidráulico, usaram o gradiente de concentração de cloro para calibrar o coeficiente K_W de decaimento do cloro nas paredes da tubulação.

Em seu trabalho, os citados autores utilizaram a Equação 72 para a calibração do coeficiente.

$$K_{W_j}^{i+1} = K_{W_j}^i \frac{|\nabla C_{C_j}^i|}{|\nabla C_{O_j}^i|} \quad (72)$$

O estabelecido para o cálculo do ângulo θ também foi mantido e na função objetivo apenas substituíram o gradiente hidráulico pelo gradiente de concentração.

3 METODOLOGIA

O Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo (MIGHA) foi desenvolvido para a calibração da transmissividade de fluxo hídrico subterrâneo que, de acordo com a fórmula de Darcy, é um parâmetro inversamente proporcional ao gradiente hidráulico do escoamento hídrico.

O presente trabalho considera a proporcionalidade existente entre parâmetros das equações para o cálculo da perda de carga unitária e o próprio gradiente hidráulico no desenvolvimento de novas equações e procedimentos computacionais para o uso do MIGHA em redes de distribuição de água.

As metodologias de calibração desenvolvidas são aplicadas em cinco redes de distribuição de água com o intuito de testar a eficiência de cada processo.

3.1 Equações e procedimentos numéricos propostos

Observando a proporcionalidade entre o gradiente hidráulico na fórmula de Hazen-Williams (Equação 3) e seus parâmetros, é possível desenvolver relações para o uso do MIGHA com a finalidade de calibrar a rugosidade C e a vazão Q .

Com a proporcionalidade entre o gradiente hidráulico na fórmula de Darcy-Weisbach (Equação 5) e seus parâmetros, é possível desenvolver relações para o uso do MIGHA com a finalidade de calibrar o fator de atrito f e a vazão Q . Com a calibração do fator de atrito é possível realizar o cálculo da rugosidade absoluta ϵ das paredes de cada uma das tubulações da rede de distribuição, assim como, com a calibração da vazão Q , é possível calcular o consumo existente em cada nó da rede.

Analisando o decaimento da concentração de cloro nas redes de distribuição de água, nota-se que o coeficiente K de decaimento total do cloro é diretamente proporcional ao que foi denominado aqui de gradiente logarítmico de concentração do cloro, sendo este melhor explicitado mais à frente.

Além disso, para o desenvolvimento computacional, é utilizado o auxílio da biblioteca Epanet2.dll para as simulações hidráulicas e/ou de qualidade de água em todos os processos desenvolvidos neste trabalho. Dessa forma, a cada iteração é realizada uma nova simulação hidráulica e/ou de qualidade de água através do software Epanet.

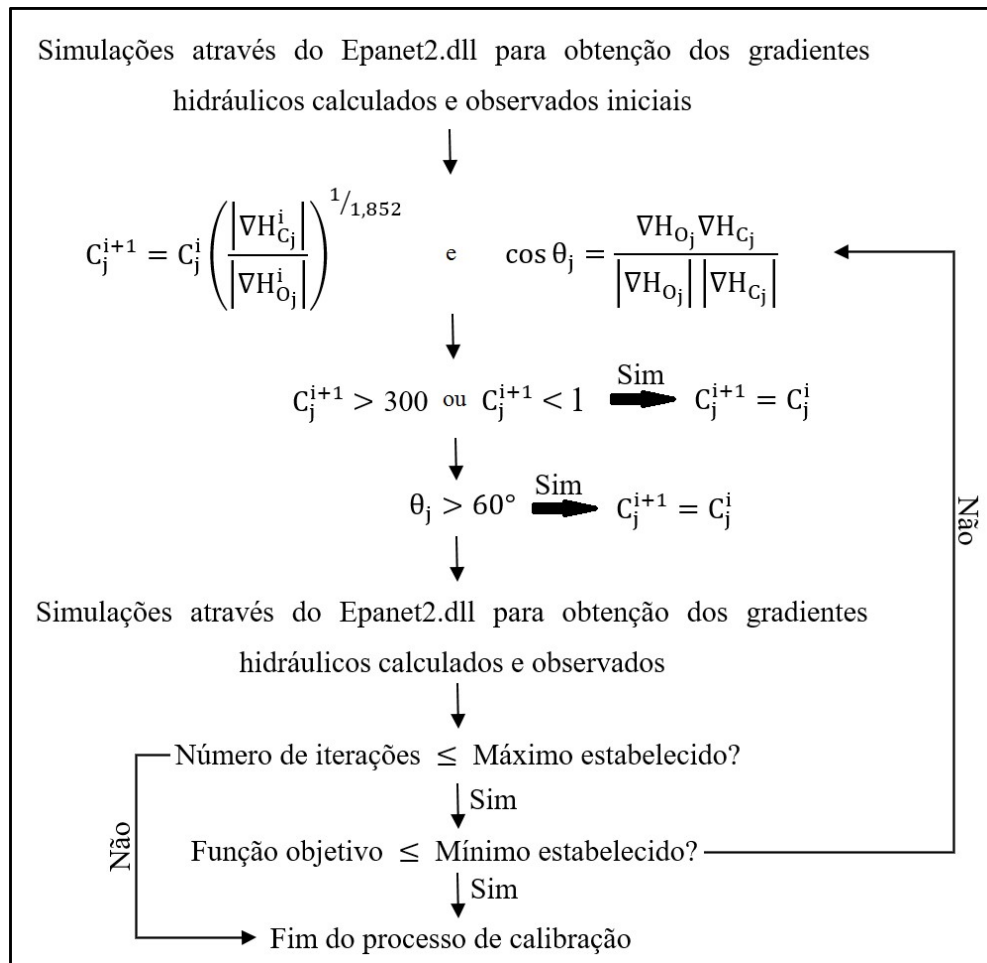
3.1.1 Calibração do coeficiente C de Hazen-Williams

Ao analisar a equação de Hazen-Williams (Equação 3), percebe-se que o coeficiente C de rugosidade não é diretamente nem inversamente proporcional ao gradiente hidráulico, mas apresenta uma relação exponencial com o mesmo.

Dessa forma, neste trabalho é proposta a Equação 73 para a calibração do coeficiente de rugosidade C de Hazen-Williams através do uso do MIGHA. A Figura 13 mostra o fluxograma do processo computacional através do uso do MIGHA proposto para a calibração desse coeficiente.

$$C_j^{i+1} = C_j^i \left(\frac{|\nabla H_{C_j}^i|}{|\nabla H_{O_j}^i|} \right)^{1/1,852} \quad (73)$$

Figura 13 – Fluxograma do processo MIGHA proposto para a calibração da rugosidade C de Hazen-Williams



Fonte: Elaborado pelo autor

Como dito anteriormente, no caso de redes de distribuição, o ângulo θ só pode assumir os valores 0° ou 180° . Devido o gradiente hidráulico calculado pelo Epanet2 ser sempre positivo, ou seja, θ sempre será igual a 0° , a Equação 69 proposta por Schuster e Araújo (2004) é computacionalmente substituída pela Equação 74, em função da vazão, uma vez que o sinal desta, em cada trecho, é responsável por indicar o sentido do escoamento.

$$\cos \theta_j = \frac{Q_{O_j} Q_{C_j}}{|Q_{O_j}| |Q_{C_j}|} \quad (74)$$

A metodologia proposta para calibração do coeficiente de rugosidade C de Hazen-Williams pode ser explicada como segue. Após a obtenção dos gradientes hidráulicos calculados e observados iniciais de todos os trechos da rede, através da utilização da biblioteca Epanet2.dll e com o uso de coeficientes de rugosidade iniciais para cada trecho definidos previamente, novos coeficientes C são calculados através da Equação 73 e os ângulos entre os vetores gradientes hidráulicos calculados e observados são obtidos com o uso da Equação 74. Caso, em algum trecho, o coeficiente encontrado for menor que 1 ou maior que $300 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ (limitando a tubos tão lisos quanto tubos com rugosidade C igual ao dobro do PVC) ou o ângulo entre os vetores for maior que 60° , o C a ser utilizado, para esse trecho, será o da iteração anterior. Isso ocorrerá até que os trechos vizinhos alterem as pressões nos nós existentes nas extremidades do trecho, para que, com isso, o novo gradiente hidráulico altere a situação. Obtidos os novos coeficientes a ser utilizados, uma nova simulação hidráulica é realizada. Esse processo se repete até que o número de iterações alcance um máximo estabelecido ou até que a função objetivo (Equação 60) alcance um mínimo estabelecido.

Rocha, Castro e Araújo (2009) haviam proposto a Equação 70 para a calibração do mesmo parâmetro, no entanto, apesar do pioneirismo dos autores ao serem os primeiros a adaptar o método para redes de distribuição de água, a não observação da proporcionalidade gera, além de resultados de menor proximidade com a realidade, a necessidade de um número excessivo de iterações.

3.1.2 Calibração do fator de atrito f e cálculo da rugosidade absoluta ε de Darcy-Weisbach

Como o fator de atrito f da fórmula universal da perda de carga (Equação 5) é diretamente proporcional ao gradiente hidráulico, a adaptação MIGHA proposta neste trabalho para a calibração do fator de atrito da equação de Darcy-Weisbach em redes de distribuição de água ocorre de acordo com a Equação 75.

$$f_j^{i+1} = f_j^i \left(\frac{|\nabla H_{C_j}^i|}{|\nabla H_{O_j}^i|} \right)^{-1} \quad (75)$$

Como o objetivo é encontrar a rugosidade absoluta ε de cada trecho da rede e, de acordo com Rossman (2000), o software Epanet2 utiliza, para o cálculo do fator de atrito, a fórmula de Swamee-Jain (Equação 21), considerando apenas o escoamento turbulento, ao isolar a rugosidade absoluta na fórmula utilizada encontra-se como opções para o cálculo desta as Equações 76 e 77.

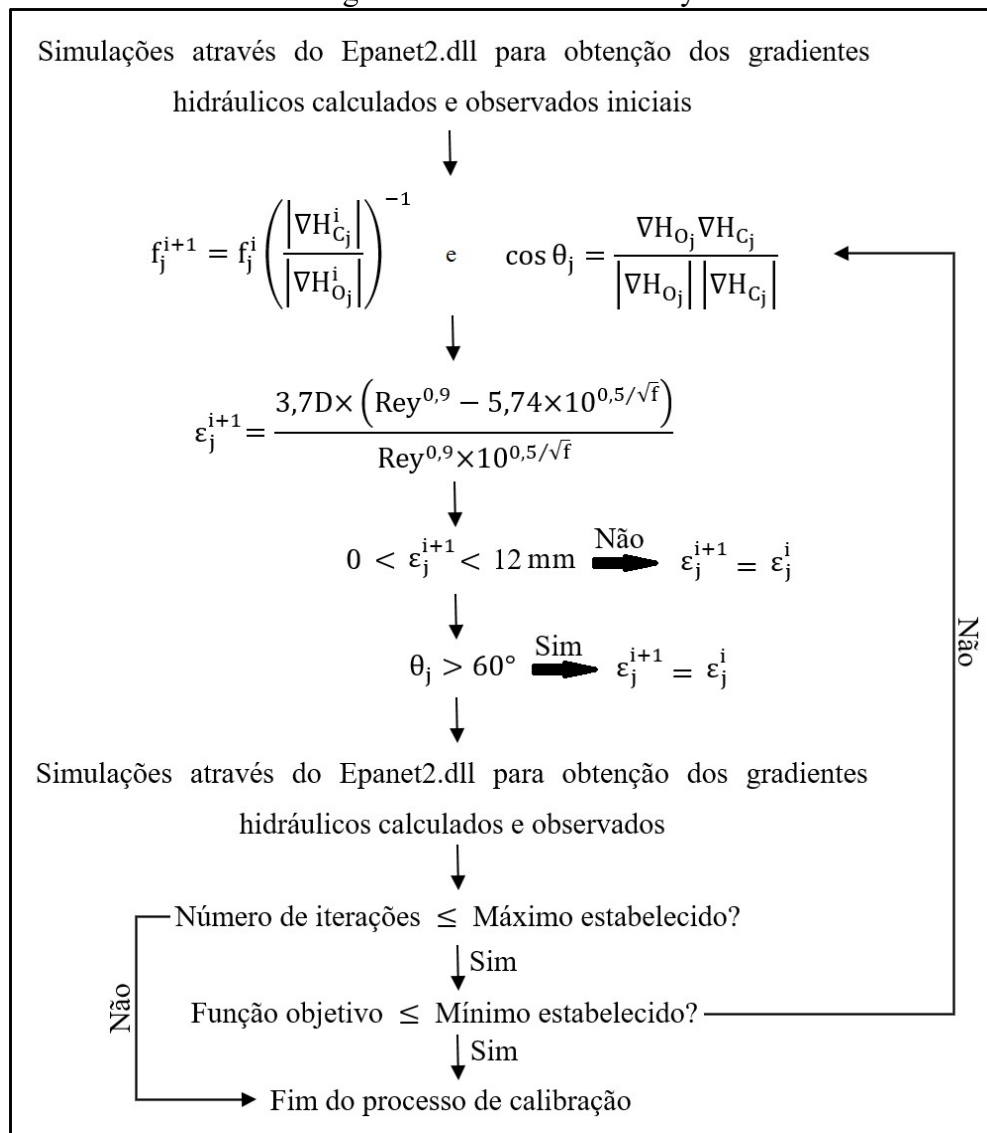
$$\varepsilon = 3,7D \times 10^{0,5/\sqrt{f}} - \frac{21,238D}{\text{Rey}^{0,9}} \quad (76)$$

$$\varepsilon = \frac{3,7D \times (\text{Rey}^{0,9} - 5,74 \times 10^{0,5/\sqrt{f}})}{\text{Rey}^{0,9} \times 10^{0,5/\sqrt{f}}} \quad (77)$$

As rugosidades absolutas calculadas com a utilização da Equação 76 apresentam ordem de grandeza muito elevadas, na ordem de metros ou quilômetros. Os valores encontrados com o uso da Equação 77 são os resultados esperados, na ordem dos milésimos, centésimos ou décimos de milímetros, ou ainda, milímetros. Assim, a rugosidade absoluta, em função do fator de atrito calibrado, é calculada através da Equação 77.

A Figura 14 apresenta o fluxograma do procedimento MIGHA utilizado na calibração do fator de atrito e cálculo da rugosidade absoluta.

cálculo da rugosidade absoluta de Darcy-Weisbach



Fonte: Elaborado pelo autor

A metodologia proposta para calibração do fator de atrito f e cálculo da rugosidade absoluta ε de Darcy-Weisbach pode ser explicada como segue. Após a obtenção dos gradientes hidráulicos calculados e observados iniciais de todos os trechos da rede, através da utilização da biblioteca Epanet2.dll e com o uso de rugosidades absolutas iniciais para cada trecho definidos previamente, novos fatores de atrito f são calculados através da Equação 75 e os ângulos entre os vetores gradientes hidráulicos calculados e observados são obtidos com o uso da Equação 74. De posse do fator de atrito de cada trecho e, com o uso da equação de Swamee-Jain, novas rugosidades absolutas são calculadas através da utilização da Equação 77. Caso, em algum trecho, o ângulo entre os vetores for maior que 60° ou, devido o fator de atrito ser calculado, não por características físicas dos trechos, mas pela Equação 75, a rugosidade absoluta calculada for menor que 0 ou maior que 12mm (dobro do valor máximo encontrado

para tubulações usadas em Porto (2006), desprezando casos extremos, como incrustações graves), a rugosidade absoluta ε a ser utilizada, para esse trecho, será a encontrada na iteração anterior. Isso ocorrerá até que os trechos vizinhos alterem as pressões nos nós existentes nas extremidades do trecho, com a finalidade de que, com essa mudança, o novo gradiente hidráulico encontrado altere a situação. Obtidos os novos valores de rugosidade absoluta a ser utilizado, uma nova simulação hidráulica é realizada. Esse processo se repete até que o número de iterações alcance um máximo estabelecido ou até que a função objetivo (Equação 60) alcance um mínimo estabelecido.

Assim como no caso da calibração do coeficiente C de Hazen-Williams, na calibração do fator de atrito f , o ângulo central com cálculo representado pela Equação 69 é, na verdade, computacionalmente calculado através da Equação 74.

Rocha (2013) havia proposto a calibração da rugosidade absoluta da fórmula universal da perda de carga através da Equação 71, no entanto, a rugosidade absoluta não tem relação direta com o gradiente hidráulico, sendo, a proporcionalidade entre eles, melhor representada através da calibração do fator de atrito e posterior cálculo da rugosidade absoluta.

3.1.3 Calibração da vazão e cálculo dos consumos nodais

Neste trabalho, a calibração da vazão pode ser realizada de duas formas, sendo, a primeira, pela perda de carga calculada através da fórmula de Hazen-Williams e, a segunda, pela perda de carga calculada através da fórmula de Darcy-Weisbach.

No primeiro caso, em função da proporcionalidade existente entre a vazão e o gradiente hidráulico calculado pela fórmula de Hazen-Williams, a calibração da vazão é realizada pelo procedimento MIGHA através da Equação 78. Já no segundo caso, com base na equação de Darcy-Weisbach, a vazão é calibrada através da Equação 79.

$$Q_j^{i+1} = Q_j^i \left(\frac{|\nabla H_{C_j}^i|}{|\nabla H_{O_j}^i|} \right)^{-1/1,852} \quad (78)$$

$$Q_j^{i+1} = Q_j^i \left(\frac{|\nabla H_{C_j}^i|}{|\nabla H_{O_j}^i|} \right)^{-0,5} \quad (79)$$

Para encontrar o consumo em cada nó da rede de distribuição, é considerado um balanço de vazão, ou seja, é aplicada a equação da continuidade em cada nó da rede de distribuição, considerando as vazões de entrada e saída dos trechos em contato com o nó, sendo, o que sobrar, o consumo nodal. Como as vazões de entrada e saída consideradas em cada nó não são as calculadas pelo Epanet2, mas as encontradas pelas Equações 78 ou 79, a vazão que sobra é considerada como o módulo da diferença entre o que entra e o que sai. Assim, de posse da vazão em cada trecho, para cada nó da rede, o consumo é calculado através da aplicação da Equação 80.

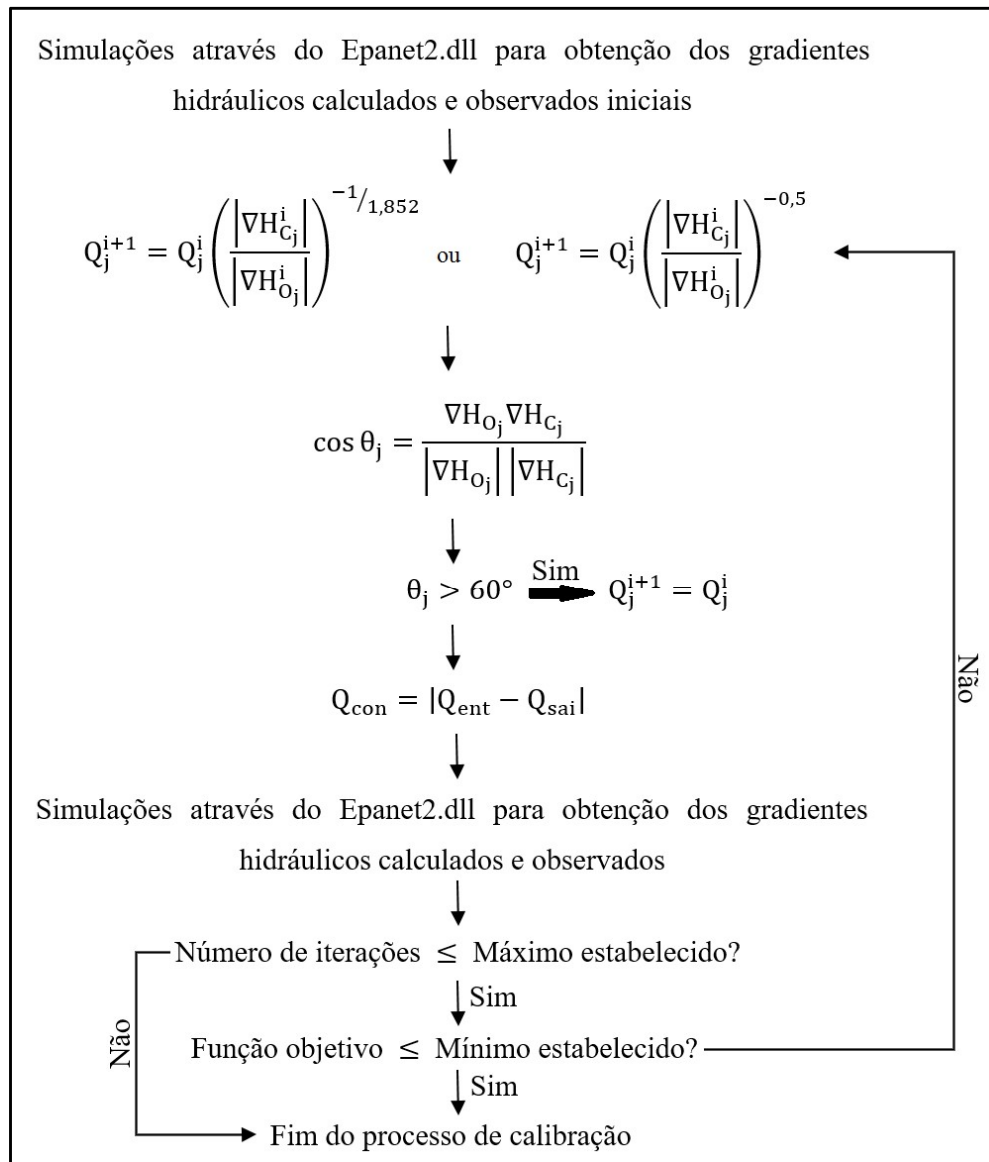
$$Q_{\text{con}} = |Q_{\text{ent}} - Q_{\text{sai}}| \quad (80)$$

Em que $Q_{\text{con}}(\text{L/s})$ é a vazão consumida em um nó da rede, $Q_{\text{ent}}(\text{L/s})$ é a vazão de entrada em um nó da rede através dos trechos adjacentes a ele e $Q_{\text{sai}}(\text{L/s})$ é a vazão de saída do nó através dos trechos adjacentes a esse nó na rede de distribuição.

A metodologia proposta para calibração da vazão Q e cálculo das demandas nodais pode ser explicada como segue. Após a obtenção dos gradientes hidráulicos calculados e observados iniciais de todos os trechos da rede, através da utilização da biblioteca Epanet2.dll e com o uso de consumos nodais iniciais para cada nó definidos previamente, a vazão inicial calculada pelo Epanet2 é obtida e utilizada no cálculo de novas vazões através da Equação 78, para perda de carga calculada pela fórmula de Hazen-Williams, ou da Equação 79, para perda de carga calculada pela fórmula universal da perda de carga. Também são calculados os ângulos entre os vetores gradientes hidráulicos calculados e observados através da Equação 74. De posse da vazão de cada trecho, o consumo de cada nó da rede de distribuição é calculado através da utilização da Equação 80. Caso, em algum trecho, o ângulo entre os vetores for maior que 60° , a vazão considerada, para esse trecho, será a encontrada na simulação hidráulica para a iteração anterior. Isso ocorrerá até que os trechos vizinhos alterem as pressões nos nós existentes nas extremidades do trecho, com a finalidade de que, com essa mudança, o novo gradiente hidráulico encontrado altere a situação. Obtidos os novos valores de consumos nodais, uma nova simulação hidráulica é realizada. Esse processo se repete até que o número de iterações alcance um máximo estabelecido ou até que a função objetivo (Equação 60) alcance um mínimo estabelecido.

A Figura 15 apresenta o fluxograma do procedimento MIGHA utilizado na calibração da vazão e cálculo do consumo nodal, tanto para perdas calculadas por Hazen-Williams como por Darcy-Weisbach.

Figura 15 – Fluxograma do processo MIGHA proposto para a calibração da vazão e cálculo do consumo nodal



Fonte: Elaborado pelo autor

Na calibração da vazão, o ângulo central com cálculo representado pela Equação 69 também é, na verdade, computacionalmente calculado através da Equação 74.

3.1.4 Calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo da constante K_w de decaimento do cloro nas paredes da tubulação

Para o decaimento de cloro em redes de distribuição de água, como mostra a Equação 25, mais completa, que rege o comportamento do decaimento do cloro ao longo de

condutos forçados, não há componente desta equação que tenha relação com o gradiente hidráulico dos trechos.

Nesse caso, a constante K de decaimento total de cloro, em cada trecho, tem importante relação com a concentração de cloro em cada nó nas extremidades do trecho. No entanto, devido a dispersão não ser considerada com o uso do Epanet2 e, assim, a Equação 28 ser utilizada, sua solução analítica (Equação 30), indica que a constante K de decaimento total de cloro é diretamente proporcional ao, aqui denominado, gradiente logarítmico de concentração do cloro, como é apresentado na Equação 81 em que é mostrado a constante K isolada dos outros termos da Equação 30. A Equação 82 define o gradiente logarítmico de concentração do cloro.

$$K = -V \cdot \nabla_{\ln} C_C \quad (81)$$

Em que:

$$\nabla_{\ln} C_C = \frac{\ln(C_{C_M}) - \ln(C_{C_J})}{L} \quad (82)$$

E $\nabla_{\ln} C_C$ foi denominado de gradiente logarítmico de concentração do cloro.

Em virtude da proporcionalidade existente, a Equação 83 é proposta para a calibração, através do processo MIGHA, da constante K de decaimento total de cloro.

$$K_j^{i+1} = K_j^i \left(\frac{|\nabla_{\ln} C_{C_C}|}{|\nabla_{\ln} C_{C_O}|} \right)^{-1} \quad (83)$$

Em que $\nabla_{\ln} C_{C_C}$ é o gradiente logarítmico de concentração do cloro calculado e $\nabla_{\ln} C_{C_O}$ é o gradiente logarítmico de concentração do cloro observado.

Como dados de entrada, o Epanet2 recebe a constante de decaimento do cloro no seio do líquido K_B e a constante de decaimento do cloro nas paredes da tubulação K_W . Destas, K_W tem uma influência na determinação da concentração de cloro extremamente maior que K_B , sendo, portanto, a variável a ser calculada pela metodologia proposta.

O coeficiente de transferência de massa entre o fluxo de água e a parede da tubulação K_f pode ser encontrado através do procedimento exposto entre as Equações 53 e 56.

O coeficiente de difusão molecular D_M do cloro na água utilizado, igual a $1,4 \cdot 10^{-9}$ m²/s, foi obtido em Gonçalves (2014) e a viscosidade cinemática $\nu = 1,01 \cdot 10^{-6}$ m²/s é a mesma considerada no software Epanet2 (ROSSMAN, 2000).

Assim, de posse da constante K , do coeficiente K_f e de K_B , que pode ser zero ou outro valor pré-definido, a constante de decaimento do cloro nas paredes da tubulação K_W pode ser encontrada através de processo iterativo a ser realizado com uso das Equações 84 ou 85. As citadas equações apresentam o isolamento de um termo de K_W na Equação 32.

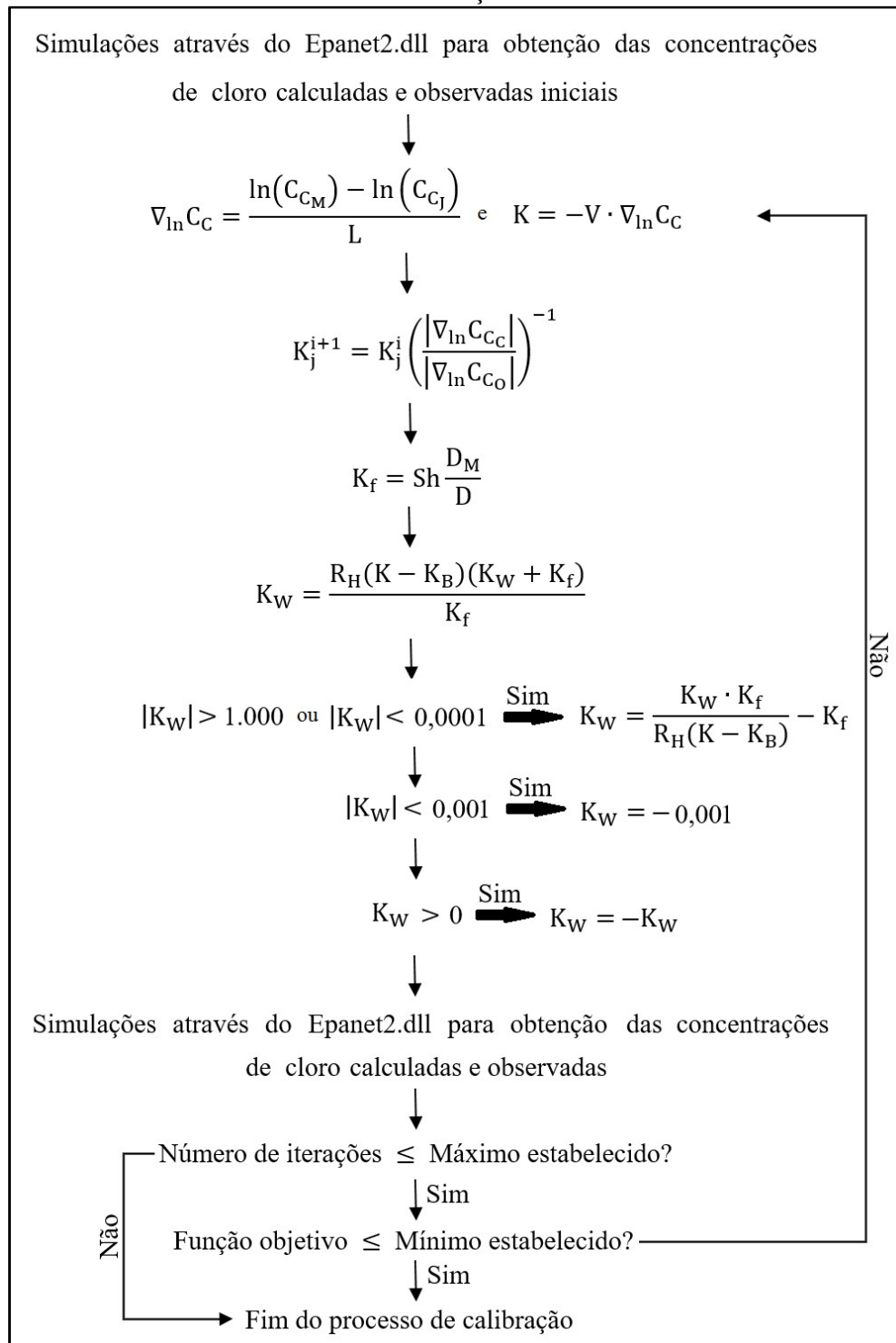
$$K_W = \frac{R_H(K - K_B)(K_W + K_f)}{K_f} \quad (84)$$

$$K_W = \frac{K_W \cdot K_f}{R_H(K - K_B)} - K_f \quad (85)$$

A metodologia proposta para calibração da constante K de decaimento total de cloro e cálculo da constante de decaimento do cloro nas paredes da tubulação K_W pode ser explicada como segue. Após a obtenção das concentrações de cloro calculadas e observadas iniciais de todos os nós da rede, além das velocidades em cada trecho, através da utilização da biblioteca Epanet2.dll e com o uso de K_W definidos previamente, para cada trecho, com o uso da Equação 82, são calculados os gradientes logarítmicos de concentração de cloro e, em seguida, através da Equação 81, a constante de decaimento total de cloro. Assim, com a Equação 83, novas constantes de decaimento total do cloro são calculadas. Além disso, são calculados os números adimensionais de Sherwood, Reynolds e Schmidt para, assim, calcular o coeficiente de transferência de massa entre o fluxo de água e a parede da tubulação. A constante de decaimento do cloro no seio do líquido considerada é a mesma indicada como dado de entrada no Epanet2. Com todos os parâmetros, inicia-se o processo iterativo para o cálculo da constante de decaimento do cloro nas paredes da tubulação através da Equação 84 até que o K_W do termo da esquerda da equação seja igual ao K_W do termo da direita da equação ou até que o módulo de K_W seja maior que 1.000 m/dia ou menor 0,0001 m/dia. No último caso, o processo iterativo passa a utilizar a Equação 85. Com o K_W encontrado por uma das equações, caso o módulo deste seja menor que 0,001 m/dia, $K_W = -0,001$ m/dia, caso K_W seja positivo, $K_W = -K_W$. Finalmente, definidos os valores de K_W , uma nova simulação hidráulica é realizada. Esse processo se repete até que o número de iterações alcance um máximo estabelecido ou até que a função objetivo alcance um mínimo estabelecido.

A Figura 16 apresenta o fluxograma do procedimento MIGHA utilizado na calibração da constante K de decaimento total de cloro e cálculo da constante de decaimento do cloro nas paredes da tubulação K_W .

Figura 16 – Fluxograma do processo MIGHA proposto para a calibração da constante de decaimento total de cloro e cálculo da constante de decaimento do cloro nas paredes da tubulação



Fonte: Elaborado pelo autor

No caso da calibração da constante K de decaimento total de cloro não há necessidade de calcular o ângulo central entre os gradientes logarítmicos de concentração de cloro, tampouco entre os gradientes hidráulicos. Estes não mudam ao longo do processo de calibração e àqueles não têm influência nos sentidos de escoamento dos trechos, não podendo alterá-los.

Então, no caso da calibração da constante K de decaimento total do cloro em uma rede de distribuição, o gradiente hidráulico não interfere na calibração, mas sim, o gradiente logarítmico da concentração de cloro. Assim, a função objetivo utilizada nessa calibração é calculada através da Equação 86.

$$f_{\text{obj}} = \sum_{n_T} (\nabla_{\ln C_O} - \nabla_{\ln C_C})^2 \quad (86)$$

3.2 Software desenvolvido – UFC10

O software UFC10 tem por objetivo a calibração de elementos de redes de distribuição de água e foi desenvolvido nas linguagens de programação AutoLISP, VBA (Visual Basic for Applications) e VB (Visual Basic), sendo as duas primeiras linguagens internas ao AutoCAD, utilizadas para a elaboração dos elementos gráficos do programa e importação de dados, enquanto que a terceira linguagem de programação citada, externa ao AutoCAD, é responsável pelos cálculos de calibração dos parâmetros hidráulicos e de qualidade de água, além da apresentação dos resultados.

3.2.1 Recursos utilizados do UFC2

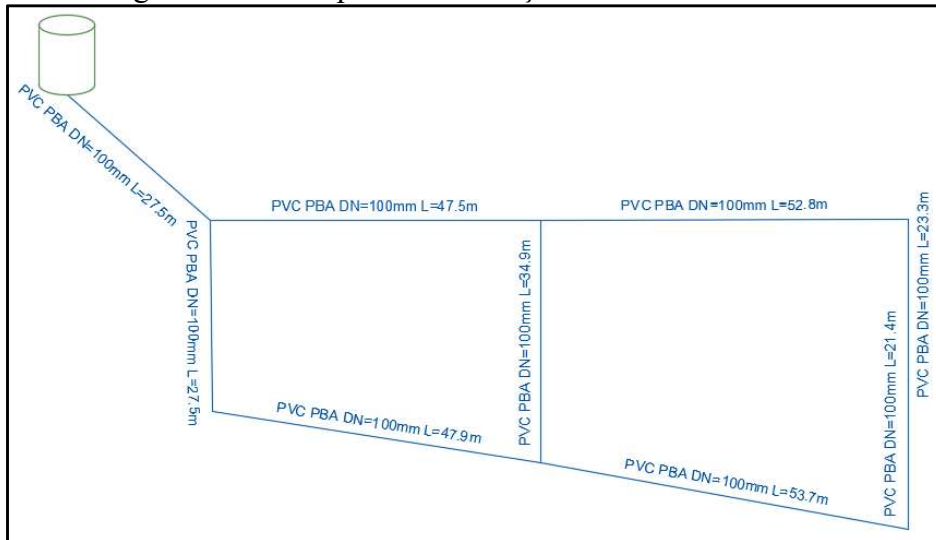
De acordo com Costa e Castro (2006), o programa computacional UFC2 faz parte de um pacote de programas, denominado UFC, desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará. Segundo os autores, o software foi desenvolvido no ambiente AutoCAD, em linguagens AutoLISP e VBA, que permite, dentre outras coisas, realizar o traçado da rede no AutoCAD e exportá-la diretamente para o Epanet.

O software UFC10, objeto deste trabalho, utiliza como rede de entrada, ou seja, rede a ser calibrada, qualquer rede de distribuição traçada, no AutoCAD, com a utilização do software UFC2.

Além disso, o arquivo a ser simulado com uso da biblioteca Epanet2.dll durante o processo de calibração é gerado através de função, já existente, do software UFC2 para transferência da rede, do AutoCAD para o Epanet, com a criação do arquivo “.inp”.

Na Figura 17 é mostrado, em ambiente AutoCAD, uma rede de distribuição traçada com uso do UFC2.

Figura 17 – Exemplo de rede traçada com o uso do UFC2



Fonte: Elaborado pelo autor com uso do UFC2 no AutoCAD

3.2.2 Aplicativo UFC10 interno ao AutoCAD – AutoLISP e VBA

Fazendo parte do pacote UFC, o software UFC10, em sua parte interna ao AutoCAD, é desenvolvido nas linguagens de programação AutoLISP e VBA.

O menu do programa, mostrado na Figura 18, apresenta as seguintes funções:

- Pressão medida;
- Vazão medida;
- Concentração de cloro medida;
- Editar medições;
- Calibrar pelo MIGHA.

Figura 18 – Menu do software UFC10 – AutoCAD



Fonte: Elaborado pelo autor: UFC10

A função “Pressão medida” indica, como dado de entrada ao aplicativo UFC10 externo ao AutoCAD, a pressão medida, em campo, em qualquer nó da rede de distribuição. Caso a pressão, da rede de distribuição real, tenha sido coletada em um ponto ao longo de um trecho, não de um nó, o software também utiliza um recurso do UFC2 para transformar um trecho em dois, sendo que o ponto onde a medição da pressão ocorreu passa a ser um nó e o trecho é dividido em dois com mesmas características (diâmetro, material, rugosidade, ...) e comprimentos divididos a partir do ponto com pressão indicada.

A função “Vazão medida” indica, como dado de entrada ao aplicativo UFC10 externo ao AutoCAD, a vazão medida, em campo, em qualquer trecho da rede de distribuição.

A função “Concentração de cloro medida” indica, como dado de entrada ao aplicativo UFC10 externo ao AutoCAD, a concentração de cloro medida, em campo, em qualquer nó da rede de distribuição. Caso a concentração de cloro, da rede de distribuição real, tenha sido coletada em um ponto ao longo de um trecho, não de um nó, o software também utiliza um recurso do UFC2 para transformar um trecho em dois, sendo que o ponto onde a medição da concentração de cloro ocorreu passa a ser um nó e o trecho é dividido em dois com mesmas características (diâmetro, material, rugosidade, ...) e comprimentos divididos a partir do ponto com concentração de cloro indicada.

A função “Editar medições” pode ser utilizada para alterar valores de medições, de pressão, vazão ou concentração de cloro, que tenham sido indicadas pelo usuário do software sem a necessidade de apagar a medição e inserção de uma nova.

Por fim, a função “Calibrar pelo MIGHA”, além de inicializar o aplicativo executável UFC10 externo ao AutoCAD, cria, automaticamente, os dois arquivos de entrada para o aplicativo UFC10 externo ao AutoCAD. O primeiro é o arquivo a ser simulado através da biblioteca Epanet2.dll, “Rede_Calculada_base.inp”. O segundo é o arquivo contendo todos os dados de medições inseridos no AutoCAD e é denominado “Dados.u10”. Ambos arquivos são gerados na pasta “C:/UFC/UFC10/Rede_UFC10”. Um exemplo de arquivo “Dados.u10” pode ser visto na Figura 19.

Figura 19 – Exemplo de arquivo “Dados.u10” do UFC10

| Dados de entrada de calibração do UFC10 | | | | | | | |
|---|------|----------------------|----------------------|--------------------|--------------------|---------|---------|
| Tipo | Dado | Coordenada x inicial | Coordenada y inicial | Coordenada x final | Coordenada y final | Valor 1 | Valor 2 |
| N | P | 4499326.53 | 9850815.82 | | | 7.71 | |
| N | C | 4499273.70 | 9850803.94 | | | 1.43 | |
| T | Q | 4499326.53 | 9850794.43 | 4499273.70 | 9850803.94 | 6.48 | |

Fonte: Elaborado pelo autor: UFC10

O arquivo “Dados.u10” é dividido em:

- Tipo: é informado “N” para medição de um dado em um nó da rede e “T” para medição de um dado em um trecho da rede;
- Dado: é informado “P” para um dado de pressão indicada, “C” para concentração de cloro indicada e “Q” para vazão indicada em um trecho;
- Coordenada x inicial: no caso de ser indicado dado em um nó, neste campo é informado a coordenada x do nó para que o mesmo seja identificado no programa UFC10 desenvolvido em VB, caso seja um trecho, é indicado a coordenada x do nó inicial do trecho;
- Coordenada y inicial: no caso de ser indicado dado em um nó, neste campo é informado a coordenada y do nó para que o mesmo seja identificado no programa UFC10 desenvolvido em VB, caso seja um trecho, é indicado a coordenada y do nó inicial do trecho;
- Coordenada x final: no caso de ser indicado dado em um nó, este campo é vazio, caso seja um trecho, é indicado a coordenada x do nó final do trecho;
- Coordenada y final: no caso de ser indicado dado em um nó, este campo é vazio, caso seja um trecho, é indicado a coordenada y do nó final do trecho;
- Valor 1: Neste campo é informado o valor do dado medido, seja este pressão, concentração de cloro ou vazão;
- Valor 2: Este campo não está em uso, sendo deixado em branco, podendo ser utilizado em futuras atualizações do software.

3.2.3 Aplicativo UFC10 externo ao AutoCAD – Visual Basic

O aplicativo UFC10, externo ao AutoCAD, é programado na linguagem de programação Visual Basic e recebe, como dados de entrada, o arquivo de entrada do Epanet2,

“Rede_Calculada_base.inp”, e o arquivo “Dados.u10”, contendo os dados de medição em campo.

De acordo com a fórmula de perda de carga, Hazen-Williams ou Darcy-Weisbach, identificada no arquivo “Rede_Calculada_base.inp”, é dado como opção de parâmetro a ser calibrado, respectivamente, rugosidade C de Hazen-Williams ou fator de atrito f e cálculo da rugosidade ϵ de Darcy-Weisbach. Com o software, além do cálculo de rugosidades, é possível realizar a calibração da vazão Q e cálculo do consumo nos nós e calibração da constante K e cálculo de K_W de decaimento do cloro nas paredes da tubulação.

Independente do parâmetro a ser calibrado, o software UFC10 permite a calibração através das metodologias MIGHA C ou MIGHA O. No caso da calibração da rugosidade C de Hazen-Williams, o MIGHA C altera, a cada iteração, a rugosidade C , apenas, na rede calculada. Já o MIGHA O, a cada iteração, altera o parâmetro C nas redes calculada e observada.

Para a calibração do fator de atrito f e cálculo da rugosidade ϵ de Darcy-Weisbach, o MIGHA C altera, a cada iteração, a rugosidade ϵ , apenas, na rede calculada. Já o MIGHA O, a cada iteração, altera ϵ nas redes calculada e observada.

Ao calibrar a vazão Q , com posterior cálculo do consumo nos nós, independente da metodologia de cálculo do gradiente hidráulico utilizada, o parâmetro atualizado, a cada iteração na rede calculada, através do MIGHA C, é o consumo em cada nó da rede de distribuição. Já com o uso do MIGHA O, o mesmo parâmetro é atualizado nas redes calculada e observada.

Na calibração da constante K e cálculo do coeficiente K_W de decaimento do cloro nas paredes da tubulação, K_W é modificado a cada iteração, apenas na rede calculada, com o uso da metodologia MIGHA C. Com o uso de MIGHA O, K_W é modificado, a cada iteração, tanto na rede calculada quanto na rede observada.

Como critérios de parada durante as iterações MIGHA, são considerados uma máxima função objetivo e um número máximo de iterações. São considerados como valores iniciais para a máxima função objetivo e o número máximo de iterações, respectivamente, 0,000000001 e 100. Apesar de haver valores iniciais pré-definidos, ambos valores podem ser modificados pelo usuário antes de iniciar a calibração.

O menu do software UFC10 elaborado em Visual Basic, apresentado na Figura 20, possui as seguintes funções:

— Calibrar rede através do MIGHA;

- Exportar planilhas para o Excel;
- Visualizar com Epanet a rede calculada;
- Visualizar com Epanet a rede observada;
- Sair do calibrador.

Figura 20 – Menu do software UFC10 – Visual Basic



Fonte: Elaborado pelo autor: UFC10

A função “Calibrar rede através do MIGHA” inicia o processo de calibração do parâmetro a ser calibrado selecionado através da metodologia MIGHA de calibração indicada até que se alcance algum dos critérios de parada informados.

A função “Exportar planilhas para o Excel” transfere os resultados de simulação obtidos, de trechos e nós, tanto para a rede calculada como para a rede observada, do software UFC10 para o programa Excel. As características consideradas, para os trechos, são: nome, 1º nó, 2º nó, comprimento, diâmetro, rugosidade, K_B , K_W , fator de atrito, vazão, velocidade e gradiente hidráulico. Para os nós, as características consideradas são: nome, coordenada x, coordenada y, consumo, cota do terreno, carga hidráulica, pressão e qualidade.

A função “Visualizar com Epanet a rede calculada” executa o aplicativo Epanet2w.exe com a rede calculada iniciada, pronta para ser executada ou salva. Este procedimento pode ser realizado antes ou depois de realizar a calibração.

A função “Visualizar com Epanet a rede observada” também executa o aplicativo Epanet2w.exe, no entanto, com a rede observada iniciada, pronta para ser executada ou salva. Este procedimento também pode ser realizado antes ou depois de realizar a calibração.

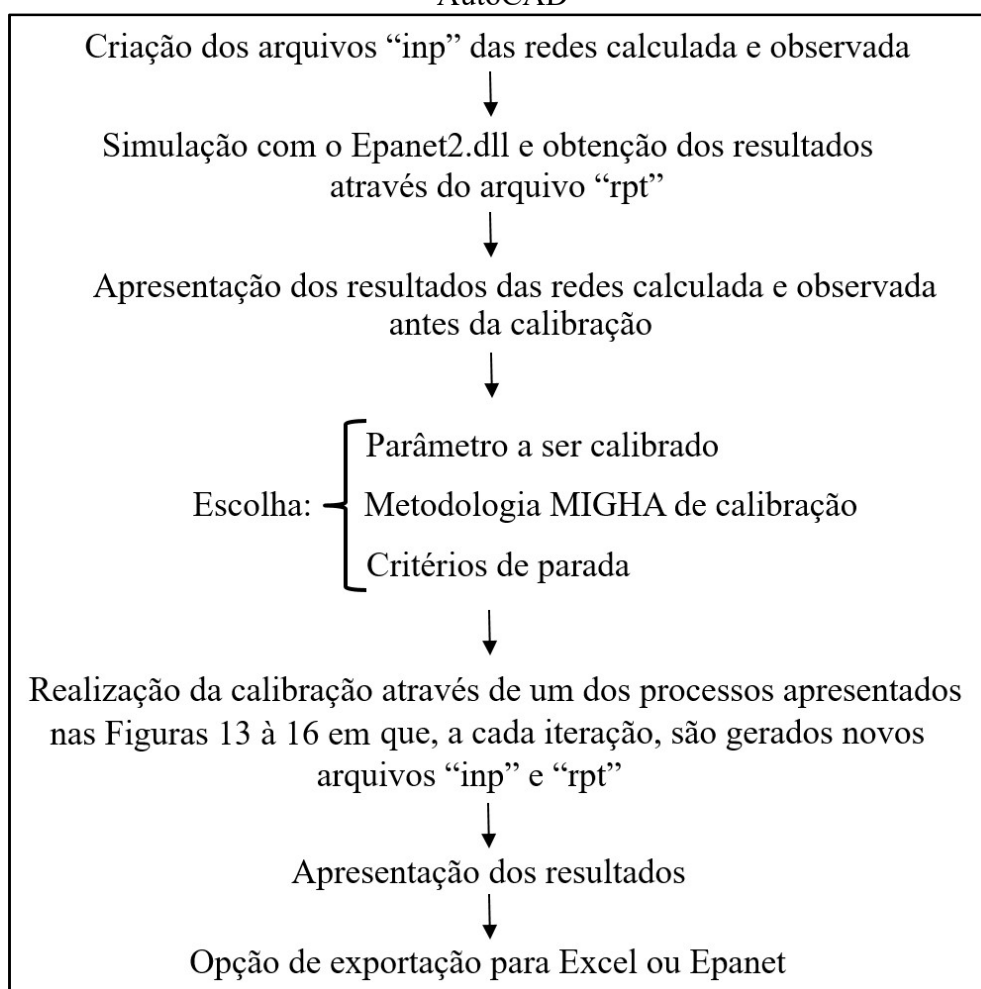
A função “Sair do calibrador” encerra o software UFC10 em Visual Basic.

Ao ser inicializado, o aplicativo UFC10, externo ao AutoCAD, a partir do arquivo de entrada “Rede_Calculada_base.inp”, cria os arquivos, a serem simulados pelo Epanet2.dll, das redes calculada e observada e, em seguida, executa a simulação das redes, obtêm e apresenta os resultados, para ambas as redes, antes da calibração. Com os arquivos gerados, o usuário tem a opção de escolher três elementos. O primeiro é o parâmetro a ser calibrado que permite ao usuário escolher entre três opções (rugosidade/fator de atrito, vazão e constante de decaimento total de cloro). O segundo é a metodologia MIGHA de calibração que tem como opções o MIGHA C e o MIGHA O. O terceiro elemento é a definição dos critérios de parada, ou seja,

máxima função objetivo e número máximo de iterações. A continuidade do processo é a calibração do parâmetro selecionado que, após concluída, é apresentada. Por fim, os resultados podem ser exportados para o Excel e, os arquivos das redes calculada e observada, podem ser exportados para simulação direta no Epanet.

De forma resumida, o aplicativo UFC10, externo ao AutoCAD, segue o procedimento exposto na Figura 21.

Figura 21 – Fluxograma do procedimento de funcionamento do programa UFC10, externo ao AutoCAD



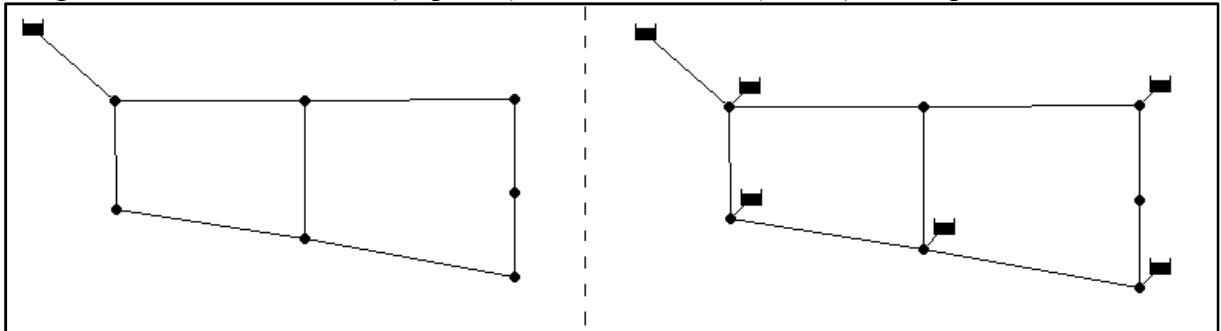
Fonte: Elaborado pelo autor

A calibração de um parâmetro hidráulico da rede, através do software UFC10, pode ser realizada através da indicação de pressões nos nós da rede ou através da indicação de vazões nos trechos da rede.

Quando se tem pressões indicadas como dados de entrada no programa, a metodologia utilizada é a mesma utilizada em Rocha (2013), ou seja, são criados, para cada nó com pressão indicada, reservatórios fictícios de nível fixo, com carga hidráulica de mesmo valor

à do nó de pressão conhecida, ligados a cada nó através de trechos fictícios de grande diâmetro e pequeno comprimento. No caso deste trabalho, o diâmetro considerado é de 3.000 mm e o comprimento é de 1 mm. Na Figura 22 pode ser vista a diferença entre as redes calculada e observada, de uma mesma rede de distribuição, da forma em que são simuladas no software Epanet.

Figura 22 – Rede calculada (esquerda) e rede observada (direita) com 5 pressões indicadas



Fonte: Elaborado pelo autor com uso do UFC10 e do Epanet

No caso de haver vazões conhecidas, como dados de entrada, no processo de calibração, a metodologia utilizada é a não utilização do gradiente hidráulico observado advindo dos resultados da simulação da rede observada através da biblioteca Epanet2.dll. Ao invés disso, o gradiente hidráulico observado é calculado, com uso da equação para perda de carga adequada, utilizando a vazão indicada para o trecho.

3.3 Sub-rotinas computacionais para o cálculo de parâmetros iniciais

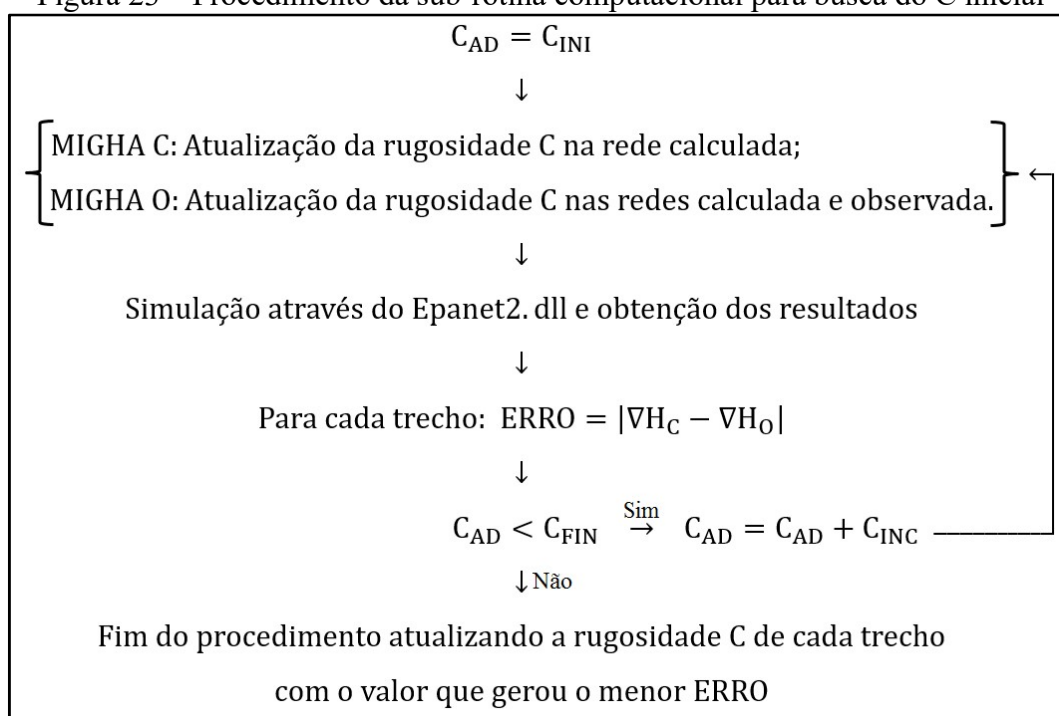
Uma vez que os gradientes hidráulicos dos trechos de uma rede de distribuição são fortemente dependentes de todos os parâmetros da equação, os parâmetros iniciais considerados no cálculo são extremamente importantes. Assim, foram desenvolvidas sub-rotinas computacionais para a definição de parâmetros iniciais das redes de distribuição, como rugosidades, demandas e coeficientes de decaimento do cloro nas paredes da tubulação.

3.3.1 Testar rugosidades iniciais (*C de Hazen-Williams*)

No caso de o parâmetro a calibrar ser o coeficiente *C* de Hazen-Williams, a sub-rotina computacional desenvolvida serve para buscar uma boa opção de rugosidade *C* inicial a ser considerada no processo de calibração.

Para o procedimento de busca considera-se, inicialmente, um parâmetro C adotado (C_{AD}) igual a um C inicial (C_{INI}) escolhido pelo usuário do software e, de posse do C adotado, caso a calibração ocorra através do MIGHA C , as rugosidades de cada trecho são alteradas apenas na rede calculada, já se o método escolhido for o MIGHA O , tanto a rede calculada quanto a rede observada têm as rugosidades de cada trecho atualizadas para o valor adotado. Após a atualização, ocorre a simulação com o uso da biblioteca Epanet2.dll e a obtenção dos resultados das redes para que, assim, possa-se calcular o ERRO para cada trecho, ou seja, o módulo da diferença entre os gradientes hidráulicos calculados e observados de cada trecho da rede. Caso o C adotado seja menor que um parâmetro C final (C_{FIN}) escolhido pelo usuário, a busca continua, repetindo-se o procedimento desde a atualização das rugosidades nas redes, adicionando ao valor da rugosidade adotada um certo C incremental (C_{INC}), também indicado pelo usuário. Caso o C adotado seja maior que o C final, o procedimento de busca se encerra e a rugosidade a ser considerada no início do processo de calibração para cada trecho é aquela que gerou um menor valor de ERRO. Na Figura 23 pode ser visto o resumo do procedimento.

Figura 23 – Procedimento da sub-rotina computacional para busca do C inicial



Fonte: Elaborado pelo autor

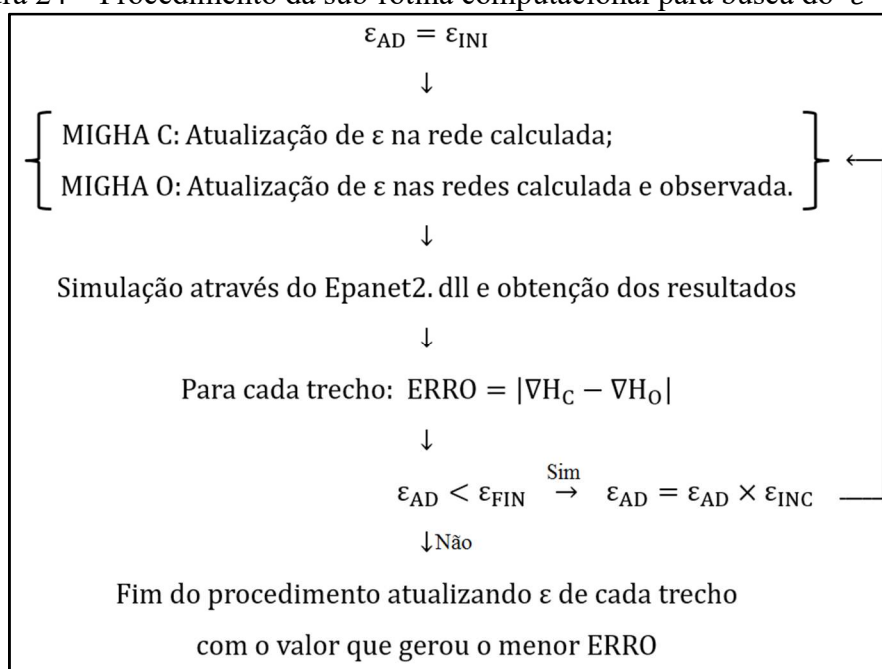
Apesar da possibilidade de alteração, por parte de usuário do programa UFC10, dos valores inicial, incremental e final da rugosidade C , na metodologia são utilizados $C_{INI} = 50 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$, $C_{INC} = 10 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ e $C_{FIN} = 150 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$, tais valores definidos como padrão inicial.

3.3.2 Testar rugosidades iniciais (ϵ de Darcy-Weisbach)

No caso de o parâmetro a calibrar ser o fator de atrito f para posterior cálculo da rugosidade absoluta ϵ de Darcy-Weisbach, a sub-rotina computacional desenvolvida serve para buscar uma boa opção de rugosidade inicial a ser considerada no processo de calibração.

Para o procedimento de busca considera-se, inicialmente, uma rugosidade adotada (ϵ_{AD}) igual a um ϵ inicial (ϵ_{INI}) escolhido pelo usuário do software e, de posse do ϵ adotado, caso a calibração ocorra através do MIGHA C, as rugosidades de cada trecho são alteradas apenas na rede calculada, já se o método escolhido for o MIGHA O, tanto a rede calculada quanto a rede observada têm as rugosidades de cada trecho atualizadas para o valor adotado. Após a atualização, ocorre a simulação com o uso da biblioteca Epanet2.dll e a obtenção dos resultados das redes para que, assim, possa-se calcular o ERRO para cada trecho, ou seja, o módulo da diferença entre os gradientes hidráulicos calculados e observados de cada trecho da rede. Caso o ϵ adotado seja menor que um ϵ final (ϵ_{FIN}) escolhido pelo usuário, a busca continua repetindo-se o procedimento desde a atualização das rugosidades nas redes, multiplicando ao valor da rugosidade adotada um certo ϵ incremental (ϵ_{INC}), também indicado pelo usuário. Caso o ϵ adotado seja maior que o ϵ final, o procedimento de busca se encerra e a rugosidade a ser considerada no início do processo de calibração para cada trecho é aquela que gerou um menor valor de ERRO. Na Figura 24 pode ser visto o resumo do procedimento.

Figura 24 – Procedimento da sub-rotina computacional para busca do ϵ inicial



Fonte: Elaborado pelo autor

No caso da rugosidade absoluta, a atualização de ε_{AD} ocorre através de uma multiplicação devido ao grande número de possíveis valores, podendo variar através de um espaçamento numérico muito pequeno. Apesar de haver a possibilidade de alteração, por parte de usuário do programa UFC10, dos valores inicial, incremental e final da rugosidade ε , na metodologia são utilizados $\varepsilon_{INI} = 0,006$ mm, $\varepsilon_{INC} = \sqrt{10}$ mm e $\varepsilon_{FIN} = 6$ mm, tais valores definidos como padrão inicial.

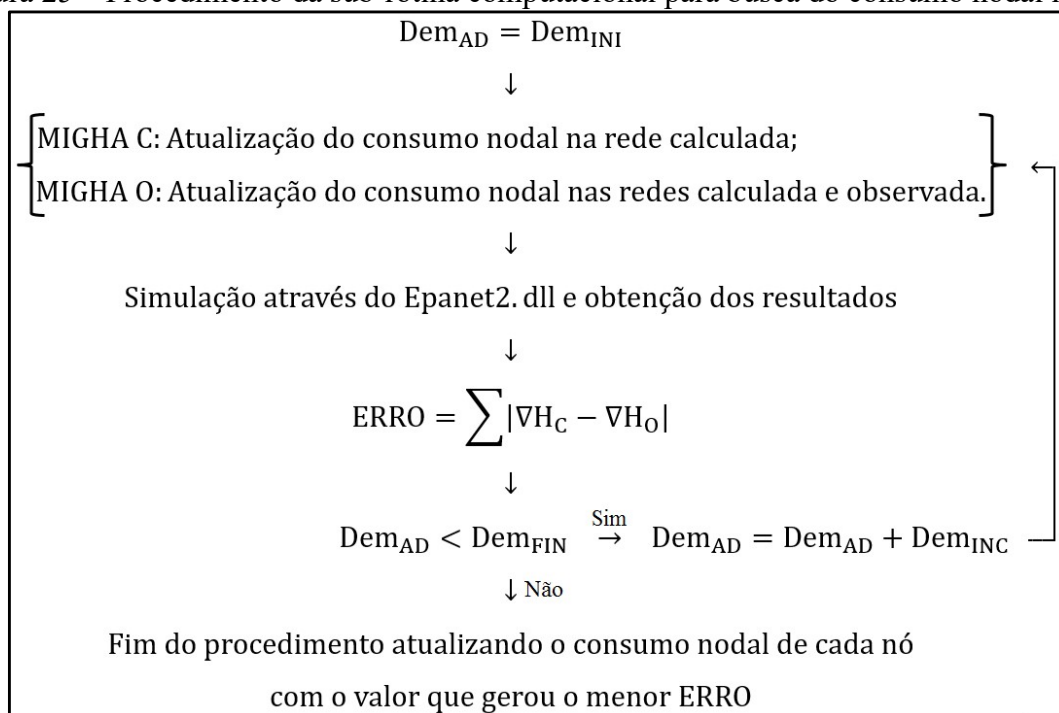
3.3.3 Testar demandas iniciais

No caso de o parâmetro a calibrar ser a vazão Q para posterior cálculo dos consumos nodais da rede, a sub-rotina computacional desenvolvida serve para buscar uma boa opção de consumos nodais iniciais a ser considerados no processo de calibração.

Para o procedimento de busca considera-se, inicialmente, uma demanda nodal adotada (Dem_{AD}), comum a todos os nós da rede, igual a uma demanda nodal inicial (Dem_{INI}) escolhida pelo usuário do software e, de posse da demanda nodal adotada, caso a calibração ocorra através do MIGHA C, os consumos de cada nó são alterados apenas na rede calculada, já se o método escolhido for o MIGHA O, tanto a rede calculada quanto a rede observada têm os consumos de cada nó atualizados para o valor adotado. Após a atualização, ocorre a simulação com o uso da biblioteca Epanet2.dll e a obtenção dos resultados das redes para que, assim, possa-se calcular o ERRO global de todos os trechos, ou seja, o somatório do módulo da diferença entre os gradientes hidráulicos calculados e observados de todos os trechos da rede. Caso a demanda adotada seja menor que uma demanda final (Dem_{FIN}) escolhida pelo usuário, a busca continua repetindo-se o procedimento desde a atualização dos consumos nodais nas redes, adicionando ao valor da demanda adotada uma certa demanda incremental (Dem_{INC}), também indicada pelo usuário. Caso a demanda adotada seja maior que a demanda final, o procedimento de busca se encerra e o consumo nodal a ser considerado no início do processo de calibração para todos os nós é aquele que gerou um menor valor de ERRO. Na Figura 25 pode ser visto o resumo do procedimento.

Apesar de haver a possibilidade de alteração, por parte de usuário do programa UFC10, dos valores inicial, incremental e final da demanda nodal, na metodologia são utilizados $Dem_{INI} = 0$ L/s, $Dem_{INC} = 0,1$ L/s e $Dem_{FIN} = 10$ L/s, tais valores definidos como padrão inicial.

Figura 25 – Procedimento da sub-rotina computacional para busca do consumo nodal inicial



Fonte: Elaborado pelo autor

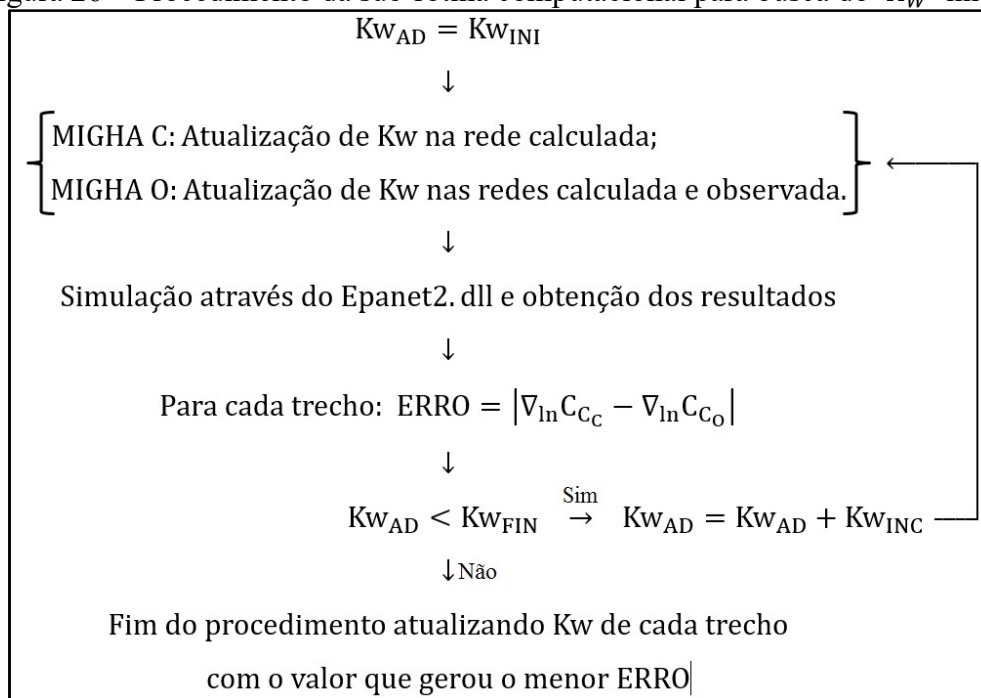
3.3.4 Testar K_W iniciais

No caso de o parâmetro a calibrar ser a constante K para posterior cálculo do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação K_W , a sub-rotina computacional desenvolvida serve para buscar uma boa opção de K_W inicial a ser considerada no processo de calibração.

Para o procedimento de busca considera-se, inicialmente, um coeficiente K_W adotado ($K_{W_{AD}}$) igual a um K_W inicial ($K_{W_{INI}}$) escolhido pelo usuário do software e, de posse do K_W adotado, caso a calibração ocorra através do MIGHA C, os coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação de cada trecho são alterados apenas na rede calculada, já se o método escolhido for o MIGHA O, tanto a rede calculada quanto a rede observada têm os K_W de cada trecho atualizados para o valor adotado. Após a atualização, ocorre a simulação com o uso da biblioteca Epanet2.dll e a obtenção dos resultados das redes para que, assim, possa-se calcular o ERRO para cada trecho, ou seja, o módulo da diferença entre os gradientes logarítmicos de concentração de cloro calculados e observados de cada trecho da rede. Caso o K_W adotado seja menor que um parâmetro K_W final ($K_{W_{FIN}}$) escolhido pelo usuário, a busca

continua, repetindo-se o procedimento desde a atualização dos K_W nas redes, adicionando ao valor de K_W adotado um certo K_W incremental ($K_{W_{INC}}$), também indicado pelo usuário. Caso o K_W adotado seja maior que o K_W final, o procedimento de busca se encerra e o K_W a ser considerada no início do processo de calibração para cada trecho é aquele que gerou um menor valor de ERRO. Na Figura 26 pode ser visto o resumo do procedimento.

Figura 26 – Procedimento da sub-rotina computacional para busca do K_W inicial



Fonte: Elaborado pelo autor

Apesar de haver a possibilidade de alteração, por parte de usuário do programa UFC10, dos valores inicial, incremental e final do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação, na metodologia são utilizados $K_{W_{INI}} = -0,1$ m/dia, $K_{W_{INC}} = -0,1$ m/dia e $K_{W_{FIN}} = -1$ m/dia, tais valores definidos como padrão inicial.

3.4 Redes de distribuição calibradas

Para mostrar a aplicação do MIGHA com o uso das metodologias propostas neste trabalho, os procedimentos desenvolvidos (Calibração do C de Hazen-Williams, calibração do fator de atrito e cálculo da rugosidade absoluta de Darcy-Weisbach, calibração da vazão e cálculo dos consumos nodais para perdas de carga calculadas por Hazen-Williams ou Darcy-Weisbach e calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo da constante K_W

de decaimento do cloro nas paredes da tubulação) foram utilizados em quatro redes de distribuição do tipo malhada. Além disso, a calibração de K , com posterior cálculo de K_W , também foi realizada em uma rede ramificada.

Para todas as redes, serão apresentados os dados físicos (diâmetro, comprimento, rugosidade absoluta, cotas e consumo nodal), além de coeficientes, como C de Hazen-Williams e K_W de decaimento do cloro nas paredes da tubulação, de entrada para a simulação com o Epanet 2 (ROSSMAN, 2000), assim como os dados, calculados com o citado software, de pressão, vazão, gradiente hidráulico e concentração de cloro.

Os valores gabarito referentes às pressões, vazões ou concentrações de cloro foram usados como valores observados nas calibrações, uma vez que as redes são hipotéticas e não há como se obter medidas de campo.

Excetuando-se o caso de uma rede totalmente criada, exclusivamente, para este trabalho, para as outras redes, diâmetros, comprimentos e coeficientes C de Hazen-Williams dos trechos, além de consumos nodais, cota de terreno e de nível d'água foram obtidos através dos autores originais da rede ou de trabalhos que as utilizaram. Já as rugosidades absolutas e coeficientes de decaimento do cloro nas paredes da tubulação utilizadas na rede gabarito foram indicados em cada trecho de forma aleatória, a fim de se obter valores distintos a ser encontrados pelo processo de calibração.

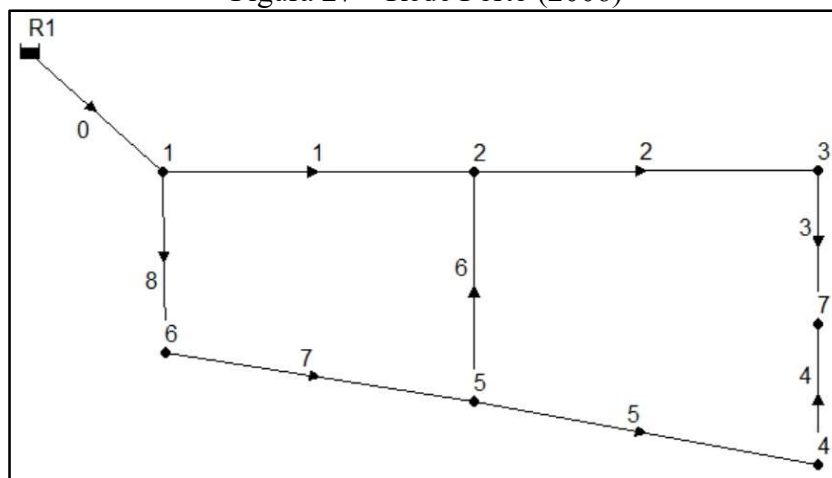
Ainda, para a análise do decaimento do cloro ao longo de todas as redes de distribuição utilizadas, foi considerada uma concentração inicial de cloro, em todos os reservatórios presentes nas redes, de 2mg/L.

3.4.1 Rede Porto (2006)

A primeira rede de distribuição malhada (Figura 27) analisada foi proposta por Porto (2006). A rede apresenta 9 trechos e 7 nós. Os gabaritos referentes aos trechos e nós desta rede são apresentados nas Tabelas 5, 6, 7 e 8.

As simulações realizadas para obtenção do gabarito tinham como cota do nível d'água do reservatório o valor 485,8m. O arquivo com extensão “.inp” de entrada para o software Epanet referente ao gabarito da rede Porto (2006) com perdas calculadas por Darcy-Weisbach encontra-se no Apêndice A e o arquivo com os gradientes hidráulicos calculados por Hazen-Williams, além de conter os dados para simulação da qualidade da água, encontra-se no Apêndice B.

Figura 27 – Rede Porto (2006)



Fonte: Elaborado pelo autor com uso do Epanet

Tabela 5 – Gabarito referente aos trechos para perdas de carga calculadas por Darcy-Weisbach
– Rede Porto (2006)

| Trecho | L (m) | D (mm) | ϵ (mm) | Q (L/s) | V (m/s) | ∇H |
|--------|----------|-----------|--------------------|------------|------------|------------|
| 0 | 520 | 250 | 0,050 | 40,00 | 0,81 | 0,00232 |
| 1 | 1850 | 150 | 0,023 | 14,33 | 0,81 | 0,00407 |
| 2 | 790 | 125 | 0,100 | 8,71 | 0,71 | 0,00451 |
| 3 | 700 | 100 | 0,010 | 0,71 | 0,09 | 0,00013 |
| 4 | 600 | 100 | 0,012 | 1,29 | 0,16 | 0,00038 |
| 5 | 980 | 100 | 0,018 | 6,29 | 0,80 | 0,00644 |
| 6 | 850 | 100 | 0,024 | 4,38 | 0,56 | 0,00338 |
| 7 | 650 | 200 | 0,600 | 20,67 | 0,66 | 0,00302 |
| 8 | 850 | 200 | 0,070 | 25,67 | 0,82 | 0,00316 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6 – Gabarito referente aos trechos para perdas de carga calculadas por Hazen-Williams
– Rede Porto (2006)

| Trecho | L (m) | D (mm) | C ($m^{0,367}/s$) | Q (L/s) | V (m/s) | ∇H | K_w (m/dia) |
|--------|----------|-----------|------------------------|------------|------------|------------|------------------|
| 0 | 520 | 250 | 110 | 40,00 | 0,81 | 0,00390 | -0,44 |
| 1 | 1850 | 150 | 122 | 14,68 | 0,83 | 0,00605 | -0,38 |
| 2 | 790 | 125 | 105 | 8,52 | 0,69 | 0,00710 | -0,48 |
| 3 | 700 | 100 | 133 | 0,52 | 0,07 | 0,00008 | -0,32 |
| 4 | 600 | 100 | 130 | 1,48 | 0,19 | 0,00055 | -0,41 |
| 5 | 980 | 100 | 129 | 6,48 | 0,82 | 0,00865 | -0,49 |
| 6 | 850 | 100 | 121 | 3,84 | 0,49 | 0,00370 | -0,39 |
| 7 | 650 | 200 | 83 | 20,32 | 0,65 | 0,00556 | -0,45 |
| 8 | 850 | 200 | 107 | 25,32 | 0,81 | 0,00522 | -0,41 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 7 – Gabarito referente aos nós para perdas de carga calculadas por Darcy-Weisbach – Rede Porto (2006)

| Nó | Consumo (L/s) | Cota do Terreno (m) | Carga Hidráulica (m) | Pressão (m) |
|----|---------------|---------------------|----------------------|-------------|
| 1 | 0 | 463,2 | 484,59 | 21,39 |
| 2 | 10 | 460,2 | 477,07 | 16,87 |
| 3 | 8 | 458,9 | 473,51 | 14,61 |
| 4 | 5 | 461,2 | 473,64 | 12,44 |
| 5 | 10 | 457,7 | 479,95 | 22,25 |
| 6 | 5 | 463,2 | 481,91 | 18,71 |
| 7 | 2 | 459,2 | 473,41 | 14,21 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 8 – Gabarito referente aos nós para perdas de carga calculadas por Hazen-Williams – Rede Porto (2006)

| Nó | Consumo (L/s) | Cota do Terreno (m) | Carga Hidráulica (m) | Pressão (m) | Concentração de cloro (mg/L) |
|----|---------------|---------------------|----------------------|-------------|------------------------------|
| 1 | 0 | 463,2 | 483,77 | 20,57 | 1,92 |
| 2 | 10 | 460,2 | 472,57 | 12,37 | 1,48 |
| 3 | 8 | 458,9 | 466,97 | 8,07 | 1,26 |
| 4 | 5 | 461,2 | 467,25 | 6,05 | 1,33 |
| 5 | 10 | 457,7 | 475,72 | 18,02 | 1,62 |
| 6 | 5 | 463,2 | 479,34 | 16,14 | 1,77 |
| 7 | 2 | 459,2 | 466,91 | 7,71 | 0,78 |

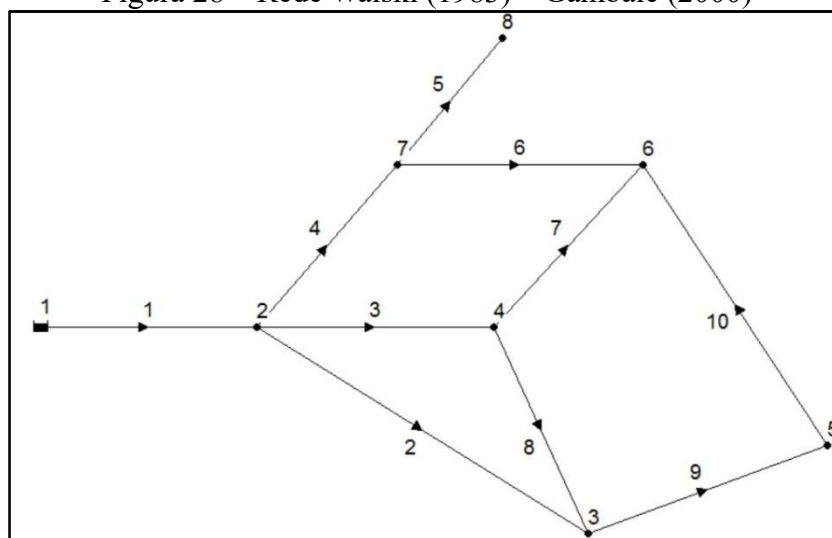
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4.2 Rede Walski (1983) – Gambale (2000)

A segunda rede de distribuição malhada (Figura 28) analisada foi proposta por Walski (1983) e modificada por Gambale (2000). A rede apresenta 10 trechos e 7 nós. Os gabaritos referentes aos trechos e nós desta rede são apresentados nas Tabelas 9, 10, 11 e 12.

As simulações realizadas para obtenção do gabarito tinham como cota do nível d'água do reservatório o valor 60,0 m. O arquivo com extensão “.inp” de entrada para o software Epanet referente ao gabarito da rede Walski (1983) – Gambale (2000) com perdas calculadas por Darcy-Weisbach, além de conter os dados para simulação da qualidade da água, encontra-se no Apêndice C e o arquivo com os gradientes hidráulicos calculados por Hazen-Williams encontra-se no Apêndice D.

Figura 28 – Rede Walski (1983) – Gambale (2000)



Fonte: Elaborado pelo autor com uso do Epanet

Tabela 9 – Gabarito referente aos trechos para perdas de carga calculadas por Darcy-Weisbach
– Rede Walski (1983) – Gambale (2000)

| Trecho | L (m) | D (mm) | ϵ (mm) | Q (L/s) | V (m/s) | ∇H | K_w (m/dia) |
|--------|----------|-----------|--------------------|------------|------------|------------|------------------|
| 1 | 700 | 500 | 0,007 | 207,50 | 1,06 | 0,00151 | -0,21 |
| 2 | 1800 | 250 | 0,015 | 27,81 | 0,57 | 0,00112 | -0,43 |
| 3 | 1520 | 400 | 0,010 | 104,07 | 0,83 | 0,00126 | -0,27 |
| 4 | 1220 | 300 | 0,012 | 75,61 | 1,07 | 0,00286 | -0,54 |
| 5 | 600 | 300 | 0,700 | 37,50 | 0,53 | 0,00122 | -0,3 |
| 6 | 1220 | 200 | 0,100 | 8,11 | 0,26 | 0,00038 | -0,25 |
| 7 | 920 | 250 | 0,080 | 38,11 | 0,78 | 0,00221 | -0,19 |
| 8 | 300 | 150 | 0,060 | 3,46 | 0,20 | 0,00032 | -0,19 |
| 9 | 600 | 200 | 0,900 | 16,27 | 0,52 | 0,00210 | -0,61 |
| 10 | 1220 | 100 | 1,000 | 1,27 | 0,16 | 0,00056 | -0,33 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 10 – Gabarito referente aos trechos para perdas de carga calculadas por Hazen-Williams – Rede Walski (1983) – Gambale (2000)

| Trecho | L (m) | D (mm) | C ($m^{0,367}/s$) | Q (L/s) | V (m/s) | ∇H |
|--------|----------|-----------|------------------------|------------|------------|------------|
| 1 | 700 | 500 | 140 | 207,50 | 1,06 | 0,00180 |
| 2 | 1800 | 250 | 110 | 25,22 | 0,51 | 0,00166 |
| 3 | 1520 | 400 | 130 | 105,61 | 0,84 | 0,00175 |
| 4 | 1220 | 300 | 135 | 76,66 | 1,08 | 0,00366 |
| 5 | 600 | 300 | 90 | 37,50 | 0,53 | 0,00206 |
| 6 | 1220 | 200 | 110 | 9,16 | 0,29 | 0,00075 |
| 7 | 920 | 250 | 120 | 37,63 | 0,77 | 0,00296 |
| 8 | 300 | 150 | 115 | 5,48 | 0,31 | 0,00109 |
| 9 | 600 | 200 | 85 | 15,71 | 0,50 | 0,00330 |
| 10 | 1220 | 100 | 80 | 0,71 | 0,09 | 0,00034 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 11 – Gabarito referente aos nós para perdas de carga calculadas por Darcy-Weisbach
– Rede Walski (1983) – Gambale (2000)

| Nó | Consumo (L/s) | Cota do Terreno (m) | Carga Hidráulica (m) | Pressão (m) | Concentração de cloro (mg/L) |
|----|---------------|---------------------|----------------------|-------------|------------------------------|
| 2 | 0,0 | 0 | 58,95 | 58,95 | 1,98 |
| 3 | 15,0 | 0 | 56,93 | 56,93 | 1,64 |
| 4 | 62,5 | 0 | 57,02 | 57,02 | 1,88 |
| 5 | 15,0 | 0 | 55,67 | 55,67 | 1,47 |
| 6 | 47,5 | 0 | 54,99 | 54,99 | 1,73 |
| 7 | 30,0 | 0 | 55,46 | 55,46 | 1,85 |
| 8 | 37,5 | 0 | 54,72 | 54,72 | 1,75 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 12 – Gabarito referente aos nós para perdas de carga calculadas por Hazen-Williams
– Rede Walski (1983) – Gambale (2000)

| Nó | Consumo (L/s) | Cota do Terreno (m) | Carga Hidráulica (m) | Pressão (m) |
|----|---------------|---------------------|----------------------|-------------|
| 2 | 0,0 | 0 | 58,74 | 58,74 |
| 3 | 15,0 | 0 | 55,75 | 55,75 |
| 4 | 62,5 | 0 | 56,08 | 56,08 |
| 5 | 15,0 | 0 | 53,77 | 53,77 |
| 6 | 47,5 | 0 | 53,35 | 53,35 |
| 7 | 30,0 | 0 | 54,27 | 54,27 |
| 8 | 37,5 | 0 | 53,03 | 53,03 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

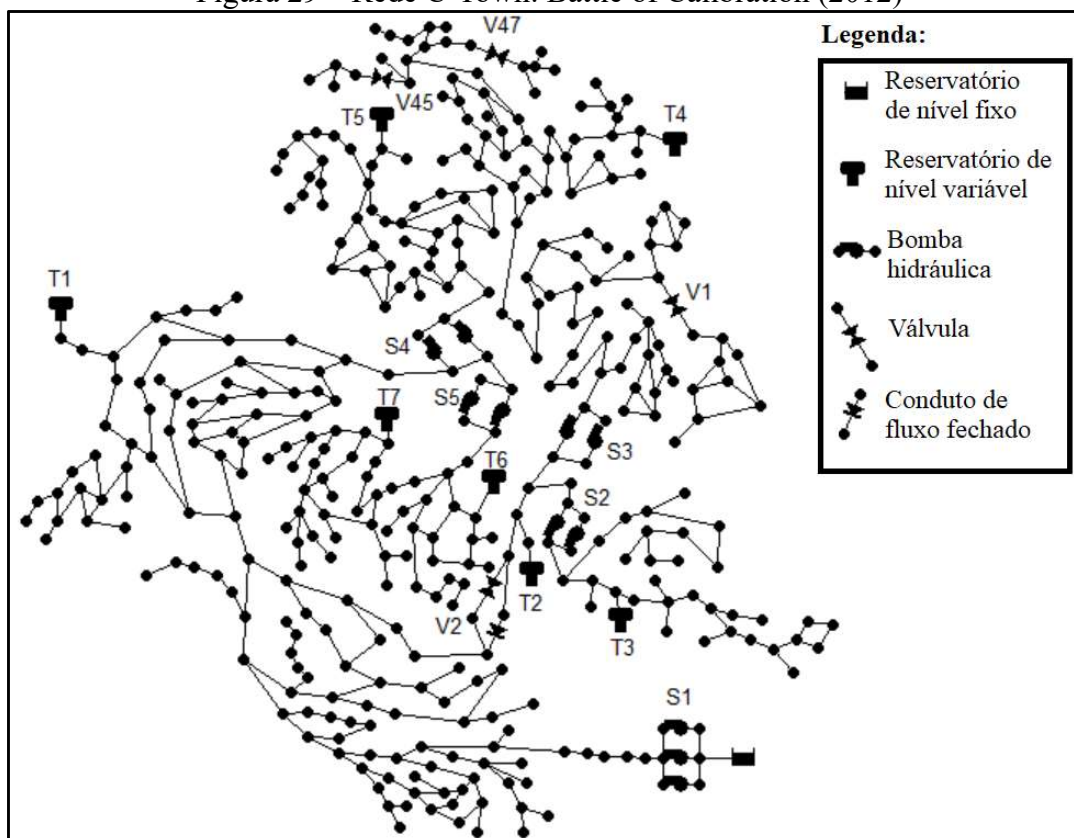
3.4.3 Rede C-Town: Battle of Calibration (2012)

A terceira rede de distribuição malhada analisada foi uma rede real denominada de rede C-Town (Figura 29) apresentada por Ostfeld et al. (2012). A rede possui 429 trechos e 388 nós. Os gabaritos referentes aos trechos e nós desta rede são apresentados nos Apêndices E, F, G e H.

Além dos 429 trechos e 388 nós, a rede C-Town possui um reservatório de nível fixo com cota do nível d'água igual a 59,0 m, 7 reservatórios de nível variável com características apresentadas na Tabela 13, 4 válvulas mostradas na Tabela 14 e 11 bombas divididas em 5 estações de bombeamento com características presentes na Tabela 15.

Como pode ser visto na Tabela 14, foram utilizadas 3 válvulas redutoras de pressão, que limitam a pressão nos nós imediatamente a jusante de cada válvula a 40m, e 1 válvula de controle de perda de carga, que estabelece que a perda de energia por toda a extensão da válvula é igual a 0m. Com uso do UFC10, as válvulas são simuladas através do Epanet mas em nenhum destes elementos ocorre calibração, ou seja, não sofrem alterações.

Figura 29 – Rede C-Town: Battle of Calibration (2012)



Fonte: Modificada de Ostfeld et al. (2012).

Tabela 13 – Características dos reservatórios de nível variável da rede C-Town

| Reservatório | Cota do Terreno (m) | Nível inicial (m) | Nível mínimo (m) | Nível máximo (m) | Diâmetro (m) |
|--------------|---------------------|-------------------|------------------|------------------|--------------|
| T1 | 71,5 | 3,0 | 0 | 6,50 | 31,30 |
| T2 | 65,0 | 0,5 | 0 | 5,90 | 20,78 |
| T3 | 112,9 | 3,0 | 0 | 6,75 | 13,73 |
| T4 | 132,5 | 2,5 | 0 | 4,70 | 11,64 |
| T5 | 105,8 | 1,0 | 0 | 4,50 | 11,89 |
| T6 | 101,5 | 5,2 | 0 | 5,50 | 8,33 |
| T7 | 102,0 | 2,5 | 0 | 5,00 | 7,14 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 14 – Características das válvulas existentes na rede C-Town

| Válvula | Tipo | Diâmetro (mm) | Parâmetro de controle (m) |
|---------|---------------------------------------|---------------|---------------------------|
| V1 | Válvula redutora de pressão | 203,2 | 40 |
| V2 | Válvula de controle de perda de carga | 254,0 | 0 |
| V45 | Válvula redutora de pressão | 152,4 | 40 |
| V47 | Válvula redutora de pressão | 101,6 | 40 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

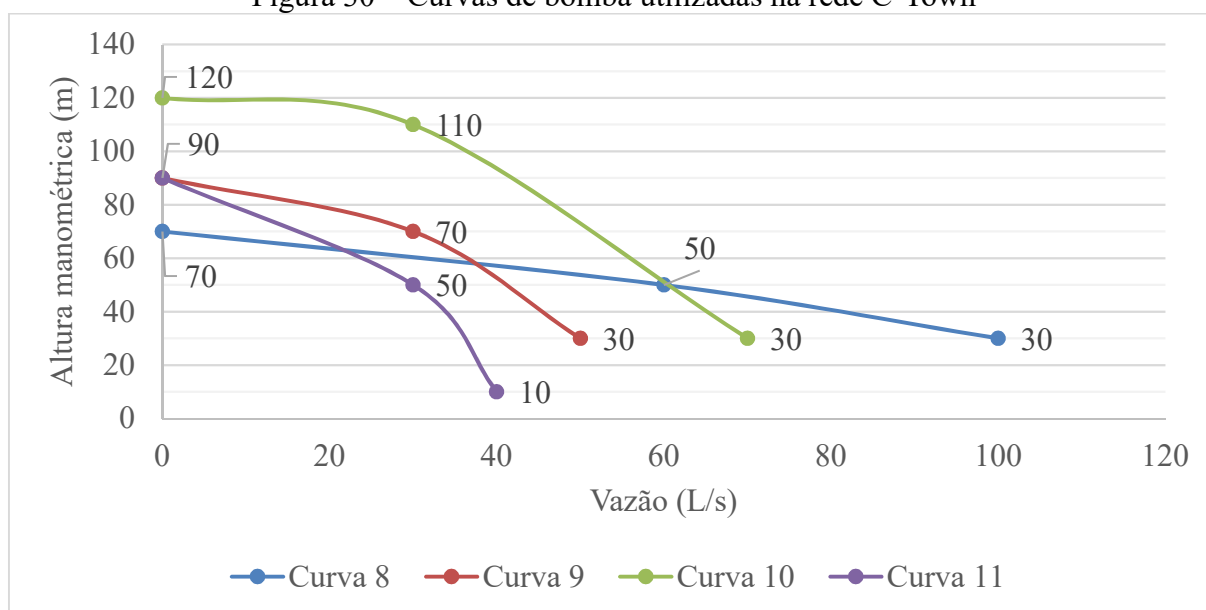
Tabela 15 – Características das bombas presentes na rede C-Town

| Estação de bombeamento | Bomba | Curva |
|------------------------|-------|-------|
| S1 | PU1 | 8 |
| | PU2 | 8 |
| | PU3 | 8 |
| S2 | PU4 | 9 |
| | PU5 | 9 |
| S3 | PU6 | 10 |
| | PU7 | 10 |
| S4 | PU8 | 9 |
| | PU9 | 9 |
| S5 | PU10 | 11 |
| | PU11 | 11 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 30 a seguir mostra as curvas de bomba consideradas na rede C-Town.

Figura 30 – Curvas de bomba utilizadas na rede C-Town



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o caso da rede C-Town, a simulação hidráulica ocorre para 168 horas de funcionamento da rede, enquanto que, para as outras redes testadas neste trabalho, as simulações ocorrem em regime permanente. Um diferencial desta rede é o fato de possuir variação horária de consumo para as 168 horas simuladas, havendo 5 padrões distintos de variação horária de consumo entre os nós da rede. Os padrões de consumo podem ser encontrados no Apêndice I.

Outra característica que diferencia esta rede das outras é que a mesma possui operações automáticas de controle da rede para acionamento e desligamento de bombas e abertura e fechamento de válvula, de acordo com os níveis d'água dos reservatórios de nível variável, como mostrado na Tabela 16. Por exemplo, a bomba PU1 é acionada caso o reservatório T1 esteja com nível d'água menor que 4m e é desligada caso o nível seja maior que 6,3m. No caso de válvulas, V2 é aberta quando o reservatório T2 chega a um nível menor que 0,5m e é fechada para níveis maiores que 5,5m.

Tabela 16 – Operações automáticas de operação de bombas e válvula na rede C-Town

| Elemento | Operação | Condição |
|-----------------|-----------------|--|
| Bomba PU1 | Liga | Nível d'água do reservatório T1 < 4,0m |
| Bomba PU1 | Desliga | Nível d'água do reservatório T1 > 6,3m |
| Bomba PU2 | Liga | Nível d'água do reservatório T1 < 1,0m |
| Bomba PU2 | Desliga | Nível d'água do reservatório T1 > 4,5m |
| Válvula V2 | Abre | Nível d'água do reservatório T2 < 0,5m |
| Válvula V2 | Fecha | Nível d'água do reservatório T2 > 5,5m |
| Bomba PU4 | Liga | Nível d'água do reservatório T3 < 3,0m |
| Bomba PU4 | Desliga | Nível d'água do reservatório T3 > 5,3m |
| Bomba PU5 | Liga | Nível d'água do reservatório T3 < 1,0m |
| Bomba PU5 | Desliga | Nível d'água do reservatório T3 > 3,5m |
| Bomba PU6 | Liga | Nível d'água do reservatório T4 < 2,0m |
| Bomba PU6 | Desliga | Nível d'água do reservatório T4 > 3,5m |
| Bomba PU7 | Liga | Nível d'água do reservatório T4 < 3,0m |
| Bomba PU7 | Desliga | Nível d'água do reservatório T4 > 4,5m |
| Bomba PU8 | Liga | Nível d'água do reservatório T5 < 1,5m |
| Bomba PU8 | Desliga | Nível d'água do reservatório T5 > 4,5m |
| Bomba PU10 | Liga | Nível d'água do reservatório T7 < 2,5m |
| Bomba PU10 | Desliga | Nível d'água do reservatório T7 > 4,8m |
| Bomba PU11 | Liga | Nível d'água do reservatório T7 < 1,0m |
| Bomba PU11 | Desliga | Nível d'água do reservatório T7 > 3,0m |

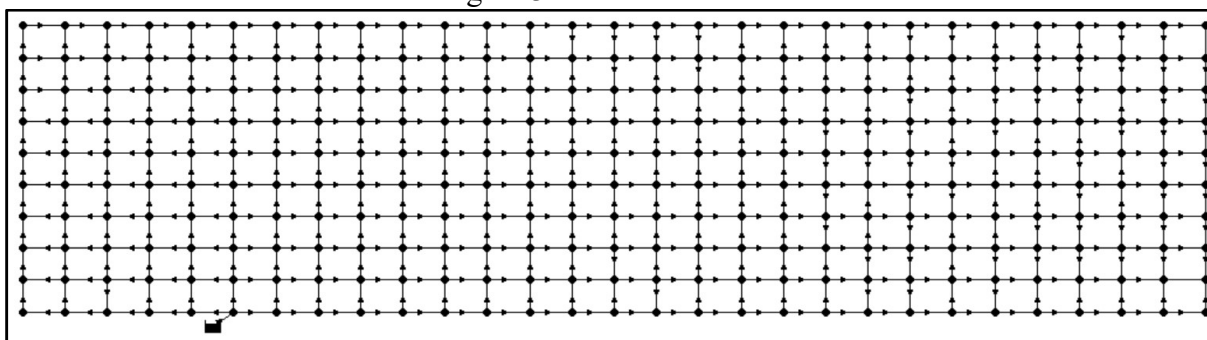
Fonte: Elaborado pelo autor.

A rede C-Town pôde ser utilizada neste trabalho devido ao fato de que os autores originais fornecem o arquivo “.inp” de entrada do Epanet da rede como material suplementar ao artigo publicado. Os valores gabarito desta rede foram usados como dados observados neste trabalho uma vez que em Ostfeld et al. (2012) foram usados, como parâmetros observados, além de pressões, vazões de saída de bombas, vazões de saída de reservatórios, consumos existentes nos nós, níveis d'água em reservatórios, sendo, ainda, alguns desses dados considerando a variação horária do consumo. Assim, não foi possível comparar seus resultados com os encontrados com o MIGHA.

3.4.4 Rede MIGHA

A quarta rede malhada analisada foi uma rede de distribuição denominada de rede MIGHA (Figura 31) elaborada para este trabalho com o objetivo de compará-la com a rede C-Town, uma vez que ambas têm portes semelhantes. A grande diferença entre a rede C-Town e a rede MIGHA é que esta não possui bombas, válvulas ou controles, possuindo, apenas, trechos, nós e um reservatório. A rede possui 542 trechos e 290 nós. Os dados físicos (diâmetro, comprimento, rugosidade absoluta, cotas e consumo nodal), além de coeficientes, como C de Hazen-Williams e K_W de decaimento do cloro nas paredes da tubulação, de entrada da rede, assim como os dados de pressão, vazão, gradiente hidráulico e concentração de cloro, são apresentados nos Apêndices J, K, L e M.

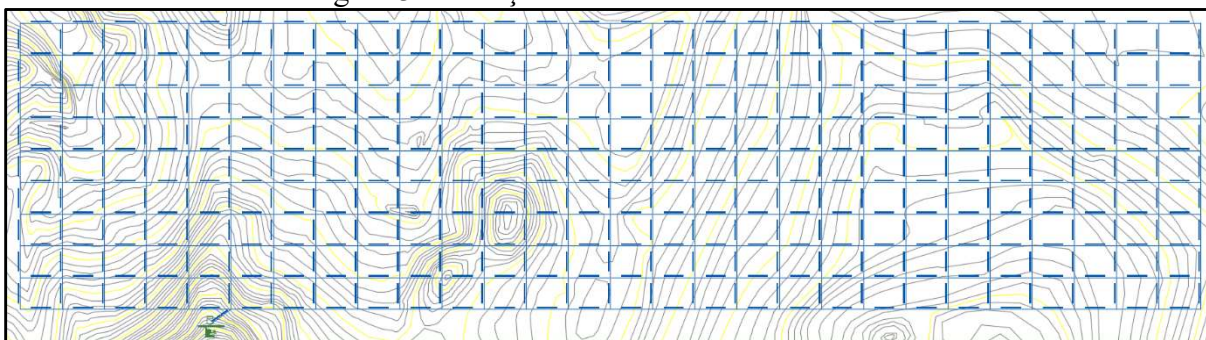
Figura 31 – Rede MIGHA



Fonte: Elaborado pelo autor com uso do Epanet

As simulações realizadas para obtenção do gabarito tinham como cota do nível d'água do reservatório o valor 263,435 m. A rede foi traçada, para obtenção de um formato simples, com o uso do software UFC2 sobre curvas de nível existentes em arquivos exemplos disponíveis no sistema, como pode ser visto na Figura 32. Através do traçado foram obtidos extensões, cotas e consumos. Rugosidades absolutas, coeficientes C de Hazen-Williams e coeficientes de decaimento do cloro nas paredes das tubulações foram determinados aleatoriamente. Através do uso do software Epanet 2 (ROSSMAN, 2000) os diâmetros foram dimensionados e, assim, obtidos os valores de pressão, vazão, velocidade, gradiente hidráulico e concentração de cloro.

Figura 32 – Traçado da rede MIGHA no UFC2

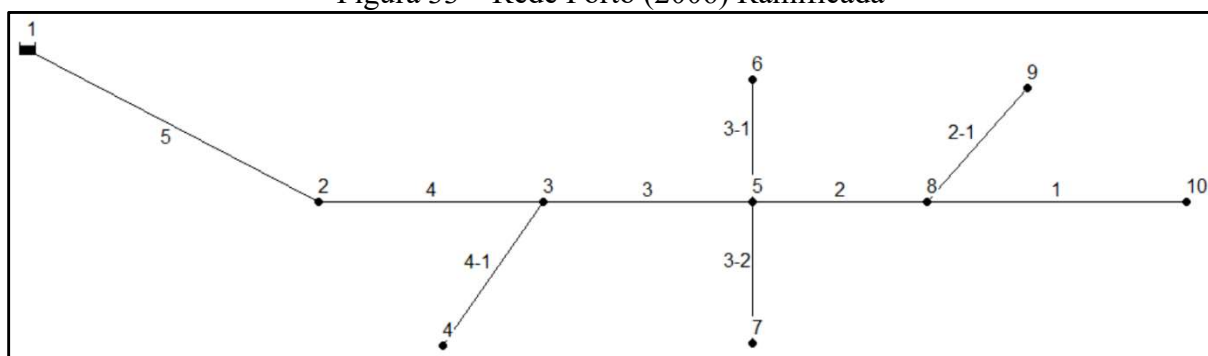


Fonte: Elaborado pelo autor com uso do UFC2

3.4.5 Rede Porto (2006) Ramificada

A rede ramificada utilizada para análise da calibração do coeficiente K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente K_W de decaimento de cloro nas paredes da tubulação foi a rede ramificada de distribuição (Figura 33) proposta por Porto (2006).

Figura 33 – Rede Porto (2006) Ramificada



Fonte: Elaborado pelo autor com uso do Epanet

A rede apresenta 9 trechos e 9 nós. Os gabaritos referentes aos trechos e nós desta rede são apresentados nas Tabelas 17 e 18.

As simulações realizadas para obtenção do gabarito tinham como cota do nível d'água do reservatório o valor 131,55m. Apesar da rede ser ramificada, o cálculo hidráulico, com uso do Epanet, foi realizado considerando consumos nos nós ao invés da vazão em marcha ao longo do trecho. O arquivo com extensão “.inp” de entrada para o software Epanet referente ao gabarito da rede Porto (2006) Ramificada encontra-se no Apêndice N.

Tabela 17 – Gabarito referente aos trechos – Rede Porto (2006) Ramificada

| Trecho | L (m) | D (mm) | ϵ (mm) | Q (L/s) | V (m/s) | ∇H | K_w (m/dia) |
|--------|----------|-----------|--------------------|------------|------------|------------|------------------|
| 5 | 400 | 125 | 0,060 | 9,43 | 0,77 | 0,00493 | -0,55 |
| 4 | 200 | 125 | 0,080 | 8,69 | 0,71 | 0,00437 | -0,40 |
| 3 | 200 | 125 | 0,070 | 6,09 | 0,5 | 0,00222 | -0,31 |
| 2 | 150 | 100 | 0,250 | 2,78 | 0,35 | 0,00185 | -0,44 |
| 1 | 200 | 60 | 0,200 | 0,74 | 0,26 | 0,00196 | -0,33 |
| 4-1 | 150 | 50 | 0,100 | 0,56 | 0,29 | 0,00266 | -0,60 |
| 3-1 | 150 | 50 | 0,070 | 0,56 | 0,29 | 0,00257 | -0,53 |
| 3-2 | 120 | 50 | 0,075 | 0,45 | 0,23 | 0,00175 | -0,51 |
| 2-1 | 100 | 50 | 0,300 | 0,37 | 0,19 | 0,00145 | -0,48 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 18 – Gabarito referente aos nós – Rede Porto (2006) Ramificada

| Nó | Consumo (L/s) | Cota do Terreno (m) | Carga Hidráulica (m) | Pressão (m) | Concentração de cloro (mg/L) |
|----|------------------|------------------------|-------------------------|----------------|---------------------------------|
| 2 | 0,74 | 100,0 | 129,58 | 29,58 | 1,83 |
| 3 | 2,04 | 113,0 | 128,70 | 15,70 | 1,76 |
| 4 | 0,56 | 109,0 | 128,31 | 19,31 | 1,42 |
| 5 | 2,30 | 102,5 | 128,26 | 25,76 | 1,69 |
| 6 | 0,56 | 105,0 | 127,87 | 22,87 | 1,39 |
| 7 | 0,45 | 100,0 | 128,05 | 28,05 | 1,42 |
| 8 | 1,67 | 95,0 | 127,98 | 32,98 | 1,58 |
| 9 | 0,37 | 95,0 | 127,84 | 32,84 | 1,34 |
| 10 | 0,74 | 85,0 | 127,59 | 42,59 | 1,35 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.5 Calibrações realizadas

Para o presente trabalho foram realizadas 1.668 calibrações, sendo 760 com a rede Porto (2006), 794 com a rede Walski (1983) – Gambale (2000), 44 com a rede C-Town: Battle of Calibration (2012), 44 com a rede MIGHA e 26 com a rede Porto (2006) Ramificada. As calibrações estão divididas em: calibrações do coeficiente C de Hazen-Williams; calibrações fator de atrito f e cálculo da rugosidade absoluta ϵ de Darcy-Weisbach; calibrações da vazão e cálculo dos consumos nodais, tanto para gradientes hidráulicos calculados por Hazen-Williams quanto pela fórmula universal; calibração da vazão e cálculo de perdas de água; e calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo da constante K_w de decaimento do cloro nas paredes da tubulação. Na Tabela 19 pode ser visto um resumo da quantidade de calibrações realizadas para cada situação.

Tabela 19 – Resumo da quantidade de calibrações realizadas para cada situação

| | Calibração do coeficiente C de Hazen-Williams | | Calibração do fator de atrito f de Darcy-Weisbach e cálculo da rugosidade absoluta | | Calibração da vazão por Hazen-Williams e cálculo dos consumos nodais | | Calibração da vazão por Darcy-Weisbach e cálculo dos consumos nodais | | Calibração da vazão e cálculo de perdas | | Calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo de K _w | | TOTAL |
|---|---|---------|--|---------|--|---------|--|---------|---|---------|--|---------|--------------|
| | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | |
| Rede Porto (2006) | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 20 | 20 | 40 | 40 | 760 |
| Rede Waski (1983) - Gambale (2000) | 84 | 84 | 84 | 84 | 84 | 84 | 84 | 84 | 21 | 21 | 40 | 40 | 794 |
| Rede C-Town: Battle of Calibrati on (2012) | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | - | - | 2 | 2 | 44 |
| Rede MIGHA | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | - | - | 2 | 2 | 44 |
| Rede Porto (2006) Ramifica da | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 13 | 13 | 26 |
| TOTAL | 348 | | 348 | | 348 | | 348 | | 82 | | 194 | | 1.668 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode ser visto na Tabela 19, para calibração do coeficiente C de Hazen-Williams, calibração do fator de atrito de Darcy-Weisbach com cálculo da rugosidade absoluta e calibração da vazão, para gradientes hidráulicos calculados tanto por Hazen-Williams quanto pela fórmula universal, com posterior cálculo do consumo dos nós, foram utilizadas as redes Porto (2006), Walski (1983) – Gambale (2000), C-Town e MIGHA. Para a calibração da constante de decaimento total de cloro com cálculo do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação, além das 4 citadas redes, também foi utilizada a rede Porto (2006) Ramificada. Já para a calibração da vazão, com cálculo de perdas de água, foram utilizadas apenas a rede Porto (2006), com perda de carga calculada pela equação de Hazen-Williams, e a rede Walski (1983) – Gambale (2000), com perda de carga calculada pela equação de Darcy-Weisbach.

Considerando as calibrações do coeficiente C de Hazen-Williams, do fator de atrito de Darcy-Weisbach e da vazão foram realizadas calibrações para diferentes dados de entrada conhecidos, como vazão nos trechos e pressões nos nós. Para as redes Porto (2006) e Walski (1983) – Gambale (2000), no caso das vazões, há simulações com dados conhecidos desde todos os trechos, diminuindo o número de vazões conhecidas até 1 único trecho. Para as pressões, além das simulações com pressões conhecidas desde todos nós, diminuindo o número de pressões conhecidas até um único nó, também foram realizadas simulações com dados conhecidos em nós diferentes, comparando resultados para coleta de dados próximos entre si ou separados, sendo 3 nós próximos, 3 nós afastados, 2 nós próximos, 2 nós afastados, 1 nó próximo ao reservatório e 1 nó longe do reservatório. Também foram realizadas simulações para dados conhecidos de vazão em 3 trechos e pressão em 3 nós.

Na Tabela 20 podem ser vistos quais foram os trechos e nós que foram utilizados como dados observados de vazão e pressão/concentração de cloro, respectivamente, em cada simulação da rede Porto (2006). Para a rede Walski (1983) – Gambale (2000), o mesmo pode ser visto na Tabela 21.

No caso da rede C-Town, para as vazões, há simulações com dados conhecidos em todos os trechos e em 12 trechos, já para as pressões, além das simulações com pressões conhecidas em todos os nós, também foram realizadas simulações com dados conhecidos em 13 nós. Ainda, foram realizadas simulações para dados conhecidos de vazão em 12 trechos e pressão em 13 nós. Na Figura 34 podem ser vistos quais foram os trechos e nós que foram utilizados como dados observados de vazão e pressão/concentração de cloro.

Tabela 20 – Trechos e nós contendo dados observados em cada simulação da rede Porto (2006)

| Vazões observadas | Trechos | Pressões/concentrações observadas | Nós | Vazões e Pressões observadas | Trechos /nós |
|-------------------|-------------------|-----------------------------------|---------------|------------------------------|--------------|
| 9 trechos | 0,1,2,3,4,5,6,7,8 | 7 nós | 1,2,3,4,5,6,7 | 3 trechos | 0,1,5 |
| 8 trechos | 0,1,2,3,4,5,7,8 | 6 nós | 1,2,3,4,5,6 | 3 nós | 3,4,6 |
| 7 trechos | 0,1,2,4,5,7,8 | 5 nós | 1,3,4,5,6 | | |
| 6 trechos | 0,1,2,5,7,8 | 4 nós | 1,3,4,6 | | |
| 5 trechos | 0,1,2,5,7 | 3 nós separados | 2,4,6 | | |
| 4 trechos | 1,2,5,7 | 3 nós juntos | 3,4,7 | | |
| 3 trechos | 3,6,8 | 2 nós separados | 3,6 | | |
| 2 trechos | 6,8 | 2 nós juntos | 4,7 | | |
| 1 trecho | 6 | 1 nó perto do reservatório | 1 | | |
| | | 1 nó longe do reservatório | 4 | | |

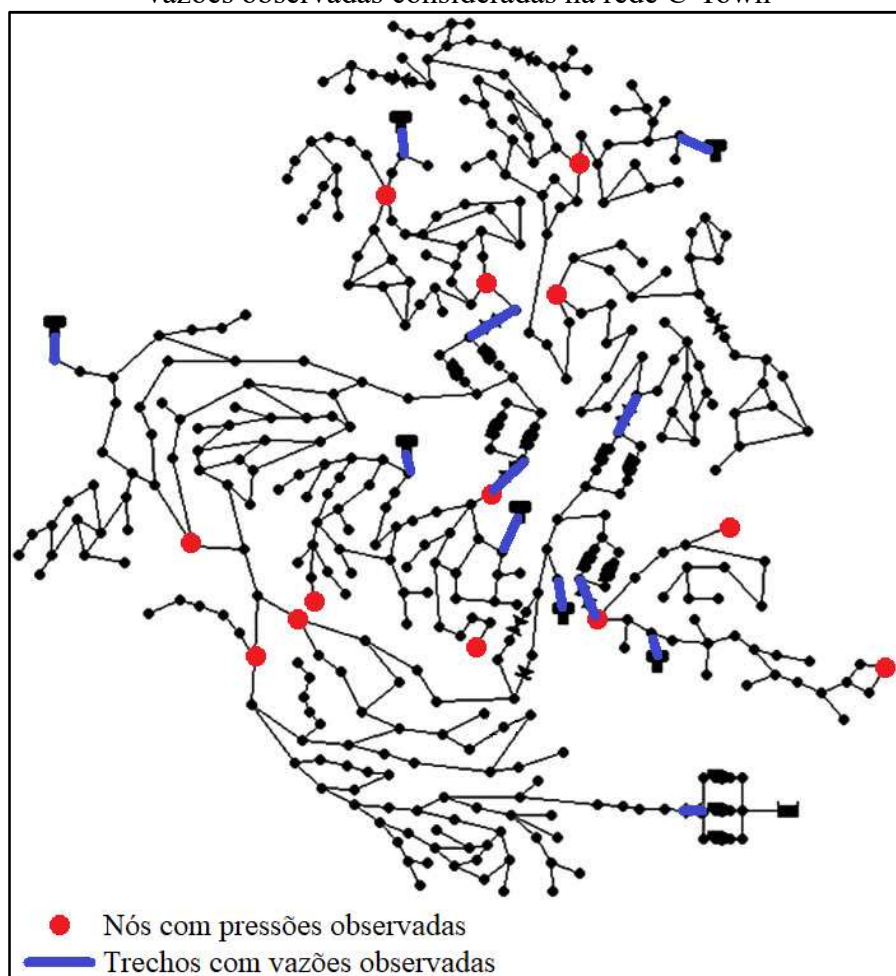
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 21 – Trechos e nós contendo dados observados em cada simulação da rede Walski (1983) – Gambale (2000)

| Vazões observadas | Trechos | Pressões/concentrações observadas | Nós | Vazões e Pressões observadas | Trechos /nós |
|-------------------|----------------------|-----------------------------------|---------------|------------------------------|--------------|
| 10 trechos | 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10 | 7 nós | 2,3,4,5,6,7,8 | 3 trechos | 3,7,8 |
| 9 trechos | 1,2,4,5,6,7,8,9,10 | 6 nós | 2,3,5,6,7,8 | 3 nós | 2,4,5 |
| 8 trechos | 1,2,4,5,6,8,9,10 | 5 nós | 2,3,5,7,8 | | |
| 7 trechos | 1,2,4,5,6,9,10 | 4 nós | 2,3,5,7 | | |
| 6 trechos | 2,4,5,6,9,10 | 3 nós separados | 2,5,8 | | |
| 5 trechos | 2,4,6,9,10 | 3 nós juntos | 2,3,4 | | |
| 4 trechos | 1,3,7,8 | 2 nós separados | 2,5 | | |
| 3 trechos | 3,7,8 | 2 nós juntos | 4,6 | | |
| 2 trechos | 7,8 | 1 nó perto do reservatório | 2 | | |
| 1 trecho | 3 | 1 nó longe do reservatório | 5 | | |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 34 – Nós com pressões observadas e concentrações de cloro observadas e trechos com vazões observadas consideradas na rede C-Town

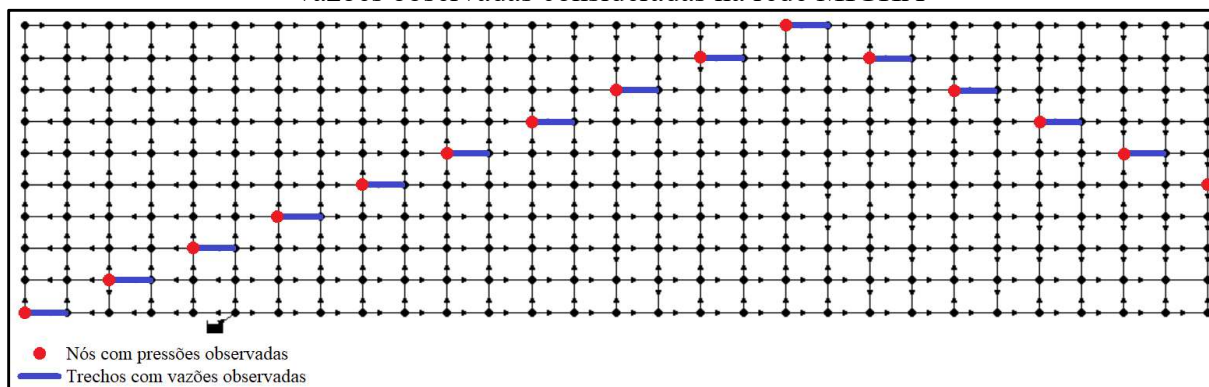


Fonte: Modificada de Ostfeld et al. (2012).

Para a rede C-Town, os 12 trechos utilizados como vazões observadas foram os trechos mais comuns de se haver medições de vazão, como saída de reservatórios e de estações de bombeamento, os valores considerados foram obtidos através da simulação da rede com o Epanet para as 18h. As 13 pressões utilizadas como dados observados são de nós com dados conhecidos fornecidos pelos autores originais da rede, no entanto, os valores considerados são os calculados às 18h, sendo desprezados os valores fornecidos pelos autores originais.

Já para a rede MIGHA, no caso das vazões, há simulações com dados conhecidos em todos os trechos e em 14 trechos, já para as pressões, além das simulações com pressões conhecidas em todos os nós, também foram realizadas simulações com dados conhecidos em 15 nós. Ainda, foram realizadas simulações para dados conhecidos de vazão em 14 trechos e pressão em 15 nós. Na Figura 35 podem ser vistos quais foram os trechos e nós que foram utilizados como dados observados de vazão e pressão/concentração de cloro.

Figura 35 – Nós com pressões observadas e concentrações de cloro observadas e trechos com vazões observadas consideradas na rede MIGHA



Fonte: Elaborado pelo autor

Tanto os trechos quanto os nós utilizados como elementos com dados conhecidos da rede MIGHA foram adotados sem critério relevante, apenas escolhidos ao longo da rede.

No caso da calibração do coeficiente C de Hazen-Williams, para estudar a relevância da rugosidade inicial no conjunto processo iterativo e simulações hidráulicas, considerando as redes Porto (2006) e Walski (1983) – Gambale (2000), todas as simulações foram feitas para coeficientes C iniciais de $5 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ em todos os trechos, $75 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ em todos os trechos, $150 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ em todos os trechos e para coeficientes encontrados através da sub-rotina computacional. No caso das redes C-Town e MIGHA, todas as calibrações foram feitas para coeficientes C iniciais, em todos os trechos, de $100 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ e de $150 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$, respectivamente.

Para a calibração do fator de atrito e cálculo da rugosidade absoluta de Darcy-Weisbach, considerando as redes Porto (2006) e Walski (1983) – Gambale (2000), todas as simulações foram feitas para rugosidades absolutas ε iniciais de $0,006 \text{ mm}$ em todos os trechos, $0,6 \text{ mm}$ em todos os trechos, 6 mm em todos os trechos e para rugosidades encontradas através da sub-rotina computacional. No caso das redes C-Town e MIGHA, todas as calibrações foram feitas para rugosidades absolutas iniciais, em todos os trechos, de $0,06 \text{ mm}$.

Já na calibração da vazão com cálculo dos consumos nodais, tanto para gradientes hidráulicos calculados pela equação de Hazen-Williams quanto pela fórmula universal, para a rede Porto (2006), todas as simulações foram feitas para consumos nodais iniciais de 2 L/s em todos os nós, $5,7 \text{ L/s}$ em todos os nós, 10 L/s em todos os nós e para consumos encontrados através da sub-rotina computacional. Para a rede Walski (1983) – Gambale (2000), os consumos iniciais foram de 5 L/s em todos os nós, 29 L/s em todos os nós, 70 L/s em todos os nós e para consumos encontrados através da sub-rotina computacional. Para a rede C-Town, todas as

simulações hidráulicas foram feitas para consumos nodais iniciais de 1 L/s em todos os nós e, para a rede MIGHA, todas as simulações hidráulicas foram feitas para consumos nodais iniciais de 0,1 L/s em todos os nós.

Considerando, agora, as calibrações do coeficiente K de decaimento total do cloro, para as redes Porto (2006), Walski (1983) – Gambale (2000) e Porto (2006) Ramificada, além das simulações com concentrações de cloro conhecidas desde todos nós, diminuindo o número de concentrações conhecidas até um único nó, também foram realizadas simulações com dados conhecidos em nós diferentes, comparando resultados para coleta de dados próximos entre si ou separados, sendo 3 nós próximos, 3 nós afastados, 2 nós próximos, 2 nós afastados, 1 nó próximo ao reservatório e 1 nó longe do reservatório. Apenas para a rede Porto (2006) Ramificada, também foram realizadas calibrações com concentrações conhecidas em 4 nós próximos e em 4 nós afastados entre si.

No caso da rede C-Town, além das simulações com concentrações de cloro conhecidas em todos os nós, também foram realizadas simulações com dados conhecidos em 13 nós. Já para a rede MIGHA, além das simulações com concentrações de cloro conhecidas em todos os nós, também foram realizadas simulações com dados conhecidos em 15 nós.

Para estudar a relevância do coeficiente de decaimento de cloro nas paredes da tubulação K_W inicial no conjunto processo iterativo e simulações de qualidade de água, todas as simulações das redes Porto (2006) e Walski (1983) – Gambale (2000) foram feitas para K_W iniciais de $-0,1$ m/dia em todos os trechos, $-0,7$ m/dia em todos os trechos, -10 m/dia em todos os trechos e para os coeficientes de decaimento de cloro nas paredes da tubulação encontrados através da sub-rotina computacional.

No caso das redes C-Town, MIGHA e Porto (2006) Ramificada, todas simulações de qualidade de água foram feitas para coeficientes K_W iniciais de $-0,7$ m/dia em todos os trechos.

Na Tabela 22 podem ser vistos quais foram os nós utilizados como dados observados de concentração de cloro em cada simulação da rede Porto (2006) Ramificada.

Tabela 22 – Nós contendo dados observados em cada simulação da rede Porto (2006)
Ramificada

| Concentrações de cloro observadas | Nós |
|-----------------------------------|----------------------------|
| 9 nós | 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 |
| 8 nós | 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 |
| 7 nós | 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 |
| 6 nós | 2, 3, 4, 5, 7, 8 |
| 5 nós | 2, 3, 4, 5, 8 |
| 4 nós separados | 4, 6, 7, 9 |
| 4 nós juntos | 2, 3, 5, 8 |
| 3 nós separados | 4, 5, 10 |
| 3 nós juntos | 3, 5, 8 |
| 2 nós separados | 4, 9 |
| 2 nós juntos | 3, 5 |
| 1 nó perto do reservatório | 2 |
| 1 nó longe do reservatório | 10 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando a calibração da vazão com posterior cálculo das perdas de água, para a rede Porto (2006), todas as simulações foram feitas para consumos nodais iniciais de 5,7 L/s em todos os nós. Já para a rede Walski (1983) – Gambale (2000), todas as simulações foram feitas para consumos nodais iniciais de 29 L/s em todos os nós.

No caso da rede Porto (2006), foram inseridos 2 pontos de vazamento ao longo da rede, ambos com perdas de água no valor de 1 L/s. O primeiro foi inserido no nó 3, assim, o consumo nodal foi alterado de 8 L/s para 9 L/s. O segundo foi considerado ao longo do trecho 7.

A rede gabarito da rede Porto (2006), para este caso, é mostrada na Figura 36. O gabarito considerando perdas de água ao longo da rede encontra-se nas Tabelas 23, para os trechos e 24, para os nós.

Tabela 23 – Gabarito referente aos trechos para a Rede Porto (2006) com perdas de água

| Trecho | L (m) | D (mm) | C ($m^{0,367}/s$) | Q (L/s) | V (m/s) | ∇H |
|--------|-------|--------|---------------------|---------|---------|------------|
| 0 | 520 | 250 | 110 | 42,00 | 0,86 | 0,00427 |
| 1 | 1850 | 150 | 122 | 15,29 | 0,87 | 0,00653 |
| 2 | 790 | 125 | 105 | 9,20 | 0,75 | 0,00819 |
| 3 | 700 | 100 | 133 | 0,20 | 0,03 | 0,00001 |
| 4 | 600 | 100 | 130 | 1,80 | 0,23 | 0,00079 |
| 5 | 980 | 100 | 129 | 6,80 | 0,87 | 0,00945 |
| 6 | 850 | 100 | 121 | 3,92 | 0,50 | 0,00384 |
| 7 | 650 | 200 | 83 | 21,71 | 0,69 | 0,00628 |
| 8 | 850 | 200 | 107 | 26,71 | 0,85 | 0,00576 |

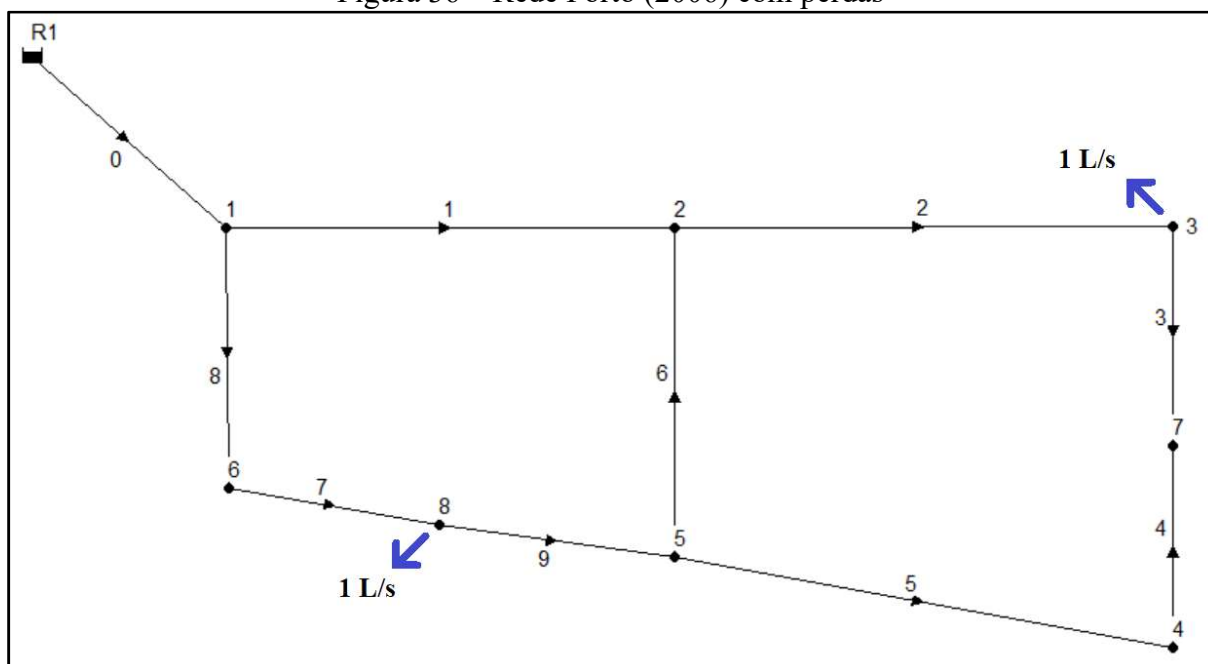
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 24 – Gabarito referente aos nós para a Rede Porto (2006) com perdas de água

| Nó | Consumo (L/s) | Cota do Terreno (m) | Carga Hidráulica (m) | Pressão (m) |
|----|---------------|---------------------|----------------------|-------------|
| 1 | 0 | 463,2 | 483,58 | 20,38 |
| 2 | 10 | 460,2 | 471,51 | 11,31 |
| 3 | 8 | 458,9 | 465,04 | 6,14 |
| 4 | 5 | 461,2 | 465,51 | 4,31 |
| 5 | 10 | 457,7 | 474,77 | 17,07 |
| 6 | 5 | 463,2 | 478,68 | 15,48 |
| 7 | 2 | 459,2 | 465,03 | 5,83 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 36 – Rede Porto (2006) com perdas

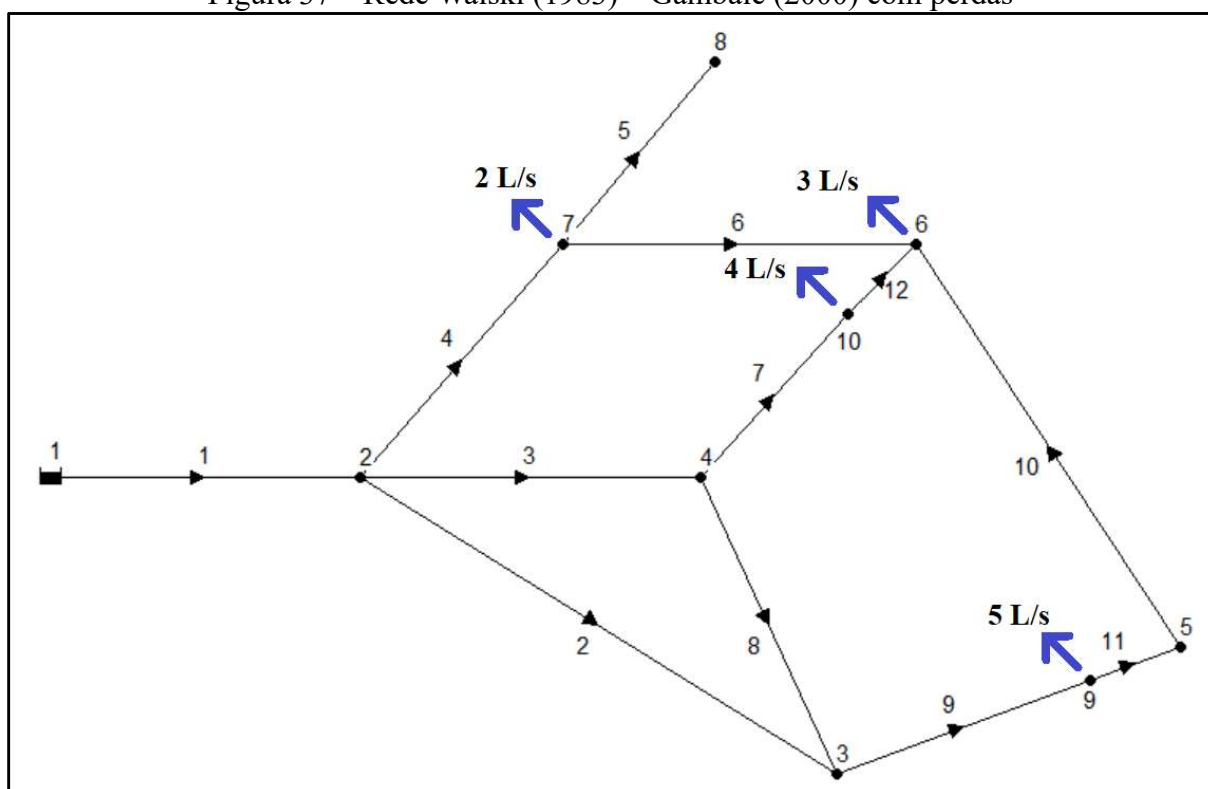


Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o caso da rede Walski (1983) – Gambale (2000), foram inseridos 4 pontos de vazamento ao longo da rede. O primeiro ponto, com perda de 2 L/s, foi inserido no nó 7, assim, o consumo nodal foi alterado de 30 L/s para 32 L/s. O segundo ponto de perda, de 3 L/s, foi inserido no nó 6, sendo o consumo nodal alterado de 47,5 L/s para 50,5 L/s. O terceiro foi considerado ao longo do trecho 7, com valor de 4 L/s. O quarto, de 5 L/s, foi considerado ao longo do trecho 9.

A rede gabarito Walski (1983) – Gambale (2000), para este caso, é mostrada na Figura 37. O gabarito considerando perdas de água ao longo da rede encontra-se nas Tabelas 25, para os trechos e 26, para os nós.

Figura 37 – Rede Walski (1983) – Gambale (2000) com perdas



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 25 – Gabarito referente aos trechos para a Rede Walski (1983) – Gambale (2000) com perdas de água

| Trecho | L (m) | D (mm) | ϵ (mm) | Q (L/s) | V (m/s) | ∇H |
|--------|----------|-----------|--------------------|------------|------------|------------|
| 1 | 700 | 500 | 0,007 | 207,50 | 1,06 | 0,00151 |
| 2 | 1800 | 250 | 0,015 | 27,81 | 0,57 | 0,00112 |
| 3 | 1520 | 400 | 0,010 | 104,07 | 0,83 | 0,00126 |
| 4 | 1220 | 300 | 0,012 | 75,61 | 1,07 | 0,00286 |
| 5 | 600 | 300 | 0,700 | 37,50 | 0,53 | 0,00122 |
| 6 | 1220 | 200 | 0,100 | 8,11 | 0,26 | 0,00038 |
| 7 | 920 | 250 | 0,080 | 38,11 | 0,78 | 0,00221 |
| 8 | 300 | 150 | 0,060 | 3,46 | 0,20 | 0,00032 |
| 9 | 600 | 200 | 0,900 | 16,27 | 0,52 | 0,00210 |
| 10 | 1220 | 100 | 1,000 | 1,27 | 0,16 | 0,00056 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 26 – Gabarito referente aos nós para a Rede Walski (1983) – Gambale (2000) com perdas de água

| Nó | Consumo (L/s) | Cota do Terreno (m) | Carga Hidráulica (m) | Pressão (m) |
|----|---------------|---------------------|----------------------|-------------|
| 2 | 0,0 | 0 | 58,95 | 58,95 |
| 3 | 15,0 | 0 | 56,93 | 56,93 |
| 4 | 62,5 | 0 | 57,02 | 57,02 |
| 5 | 15,0 | 0 | 55,67 | 55,67 |
| 6 | 47,5 | 0 | 54,99 | 54,99 |
| 7 | 30,0 | 0 | 55,46 | 55,46 |
| 8 | 37,5 | 0 | 54,72 | 54,72 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

É importante observar que tanto o nó 8 quanto o trecho 9 da rede Porto (2006), assim como os nós 9 e 10, além dos trechos 11 e 12 da rede Walski (1983) – Gambale (2000), ambas as redes considerando as perdas, apresentados nas Figuras 36 e 37, respectivamente, são fictícios, uma vez que foram criados apenas para representar os vazamentos impostos na rede. Assim, estes trechos e nós não aparecem nas redes a ser calibradas.

3.6 Comparação entre a metodologia proposta e Algoritmos Genéticos

A metodologia MIGHA apresentada neste trabalho foi comparada com outro método de calibração utilizado em um trabalho já publicado para a rede Walski (1983) – Gambale (2000).

No trabalho de Silva (2006), o coeficiente C de Hazen-Williams foi calibrado através de algoritmos genéticos. O autor realizou a calibração através de vários tipos de operadores dos algoritmos genéticos e, definiu como melhor resultado, as rugosidades encontradas utilizando substituição de indivíduos do tipo *steady-state*, seleção tipo torneio, mutação gaussiana e recombinação do tipo heurístico com 1.000 gerações. Além disso, ainda utilizando algoritmos genéticos, o autor também calibrou a rugosidade absoluta de Darcy-Weisbach. Para este elemento da rede calibrado, os parâmetros utilizados pelo autor foram substituição de indivíduos do tipo *steady-state*, seleção tipo torneio, mutação gaussiana, recombinação aleatória dos operadores a cada geração e uma população de 2.000 indivíduos com 100 gerações.

Os diâmetros, comprimentos, cotas e coeficientes C de Hazen-Williams utilizados na rede Walski (1983) – Gambale (2000) neste trabalho e no trabalho de Silva (2006) foram os mesmos, mas as rugosidades absolutas foram diferentes. Além disso, o citado autor utilizou dois cenários de consumos nodais distintos em cada calibração. Para a comparação entre as

calibrações utilizando o método de algoritmos genéticos executado por Silva (2006) e as calibrações utilizando o MIGHA através das equações propostas neste trabalho, foram considerados dados de entrada de pressões em todos os nós da rede, tanto para a calibração do coeficiente C de Hazen-Williams como para a calibração do fator de atrito da fórmula universal com posterior cálculo da rugosidade absoluta. Para tais calibrações, foram considerados os parâmetros utilizados por Silva (2006) com uso de seu cenário 2 de consumos nodais. Para a calibração do C de Hazen-Williams com uso do MIGHA, foram utilizados C iniciais de $150 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ em todos os trechos da rede e, para a calibração do fator de atrito, foi considerada uma rugosidade absoluta inicial de 0,006mm nos trechos da rede. Nos dois casos foram utilizados o método MIGHA O.

Para os dois casos, os valores gabarito referentes às pressões foram usados como valores observados nas calibrações, uma vez que a rede é hipotética e não há como se obter medidas de campo.

4 RESULTADOS

4.1 Software desenvolvido – UFC10

O software UFC10 desenvolvido para calibração em redes de distribuição de água pode ser utilizado para a calibração do fator de atrito e consequente cálculo de rugosidades absolutas de Darcy-Weisbach, calibração de coeficientes C de Hazen-Williams, calibração de vazões e posterior cálculo de consumos nodais, podendo, também, ser utilizado para a identificação de perdas de água e, por fim, calibração da constante K de decaimento total do cloro e posterior cálculo do coeficiente K_W de decaimento de cloro nas paredes da tubulação.

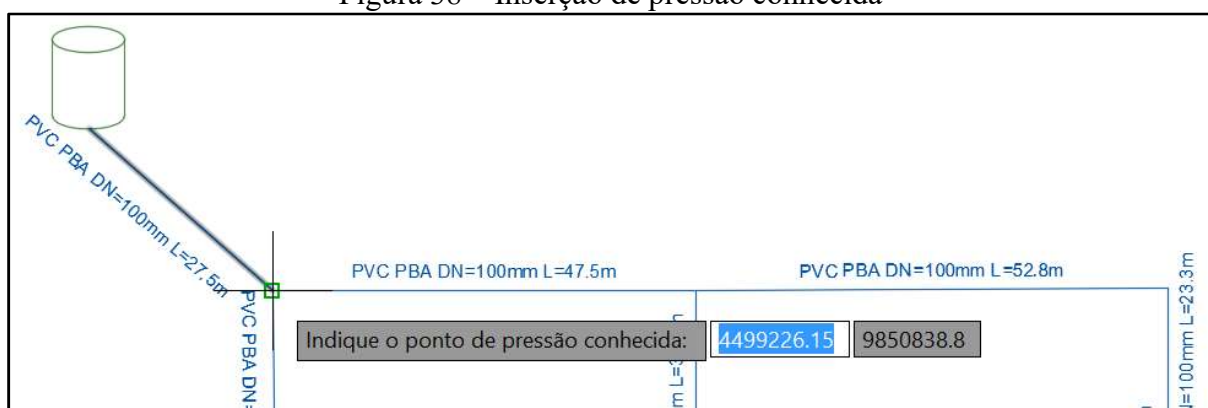
O programa foi dividido em duas partes, sendo uma interna ao AutoCAD, em que são fornecidos pelo usuário valores de pressão e concentrações de cloro conhecidas nos nós da rede e valores de vazão conhecida nos trechos da rede. Os dados inseridos funcionam como entrada para a segunda parte, externa ao AutoCAD e programada em Visual Basic, em que a calibração ocorre.

4.1.1 Aplicativo UFC10 interno ao AutoCAD

A parte interna ao AutoCAD do software UFC10 é utilizada para a inserção dos dados conhecidos, tanto nos nós quanto nos trechos da rede, deixando essas informações no desenho da rede traçada com o uso do UFC2.

A indicação de valores de pressão medida é informada com o uso da função “Pressão Medida” apresentada anteriormente. Ao clicar no botão correspondente, o nó contendo a pressão conhecida é solicitado ao usuário, como mostrado na Figura 38.

Figura 38 – Inserção de pressão conhecida



Fonte: Elaborado pelo autor

É importante notar que, na Figura 38, as casas decimais são separadas dos números inteiros por pontos, não por vírgulas. Isso ocorre porque todo o sistema UFC funciona no formato americano, para evitar erros de compatibilidade.

Se o ponto clicado não for um nó, o software divide o trecho, transformando àquele ponto em um nó da rede. Após clicado, o valor da pressão é solicitado ao usuário através de uma caixa de diálogo, mostrada na Figura 39, que apresenta as coordenadas do nó indicado.

Figura 39 – Caixa de diálogo para inserção de pressão conhecida

UFC10 - Indicar pressão medida: [X]

Coordenada x do nó (m):

Coordenada y do nó (m):

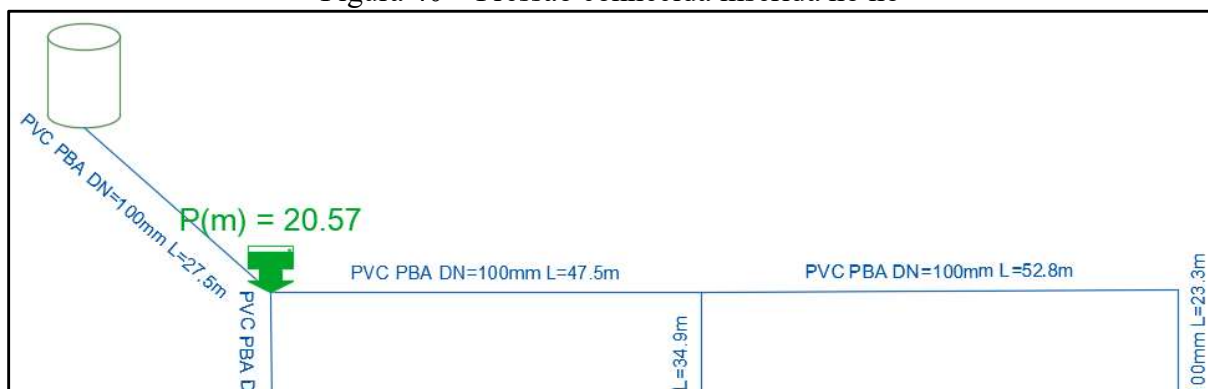
Pressão medida (mca):

[Indicar] [Cancelar]

Fonte: Elaborado pelo autor

Também, para evitar erros de compatibilidade, como o formato numérico americano é utilizado, a separação dos milhares e milhões ocorre através de vírgulas, não pontos. Na Figura 40 pode ser visto a pressão indicada no nó inserida no desenho da rede de distribuição.

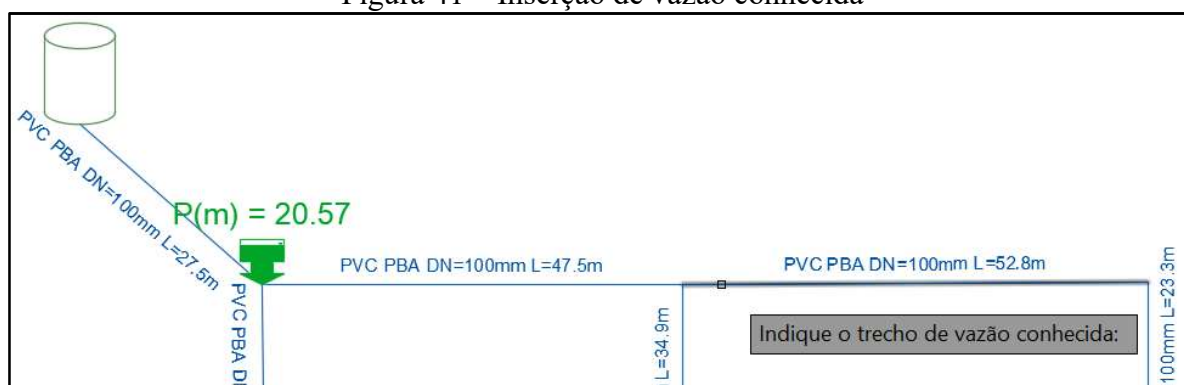
Figura 40 – Pressão conhecida inserida no nó



Fonte: Elaborado pelo autor

Da mesma forma, ao clicar no botão “Vazão medida”, o trecho que contém a vazão de valor conhecido é solicitado ao usuário do software UFC10. A mensagem mostrada na Figura 41 é apresentada.

Figura 41 – Inserção de vazão conhecida



Fonte: Elaborado pelo autor

Após clicado, o valor da vazão é solicitado ao usuário através de uma caixa de diálogo, mostrada na Figura 42, que apresenta as coordenadas dos nós inicial e final do trecho. Já na Figura 43 pode ser vista a vazão indicada no trecho inserida no desenho da rede de distribuição.

Figura 42 – Caixa de diálogo para inserção de vazão conhecida

UFC10 - Indicar vazão medida:

Nó inicial:

Coordenada x do nó (m): 4,499,273.7000

Coordenada y do nó (m): 9,850,838.8000

Nó final:

Coordenada x do nó (m): 4,499,326.5300

Coordenada y do nó (m): 9,850,839.0700

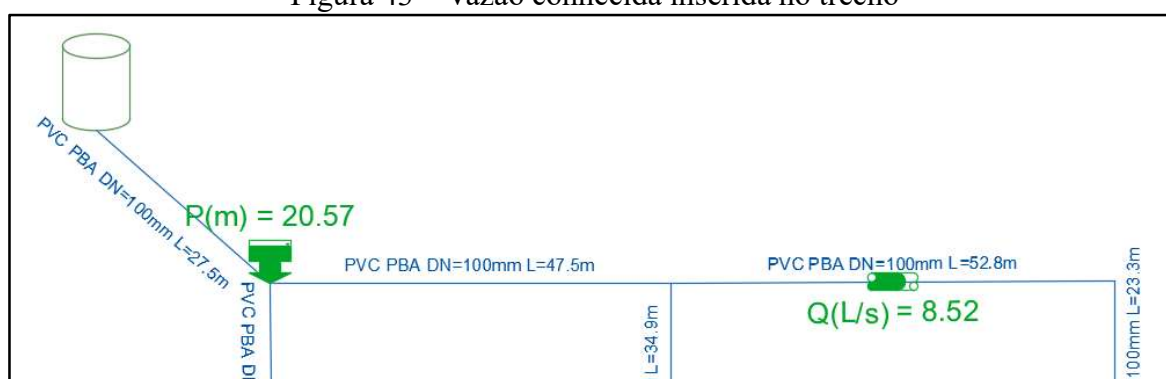
Vazão medida (L/s):

Indicar

Cancelar

Fonte: Elaborado pelo autor

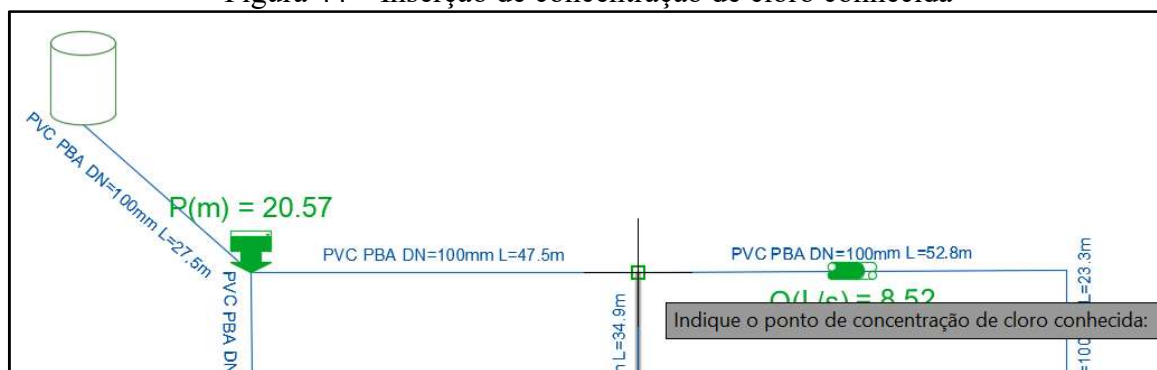
Figura 43 – Vazão conhecida inserida no trecho



Fonte: Elaborado pelo autor

Assim como no caso da pressão medida, ao clicar no botão “Concentração de cloro medida” é solicitado ao usuário o ponto onde a concentração de cloro é conhecida, como mostrado na Figura 44. Caso o ponto clicado não seja um nó, o trecho é dividido em dois, transformando o ponto clicado em nó.

Figura 44 – Inserção de concentração de cloro conhecida



Fonte: Elaborado pelo autor

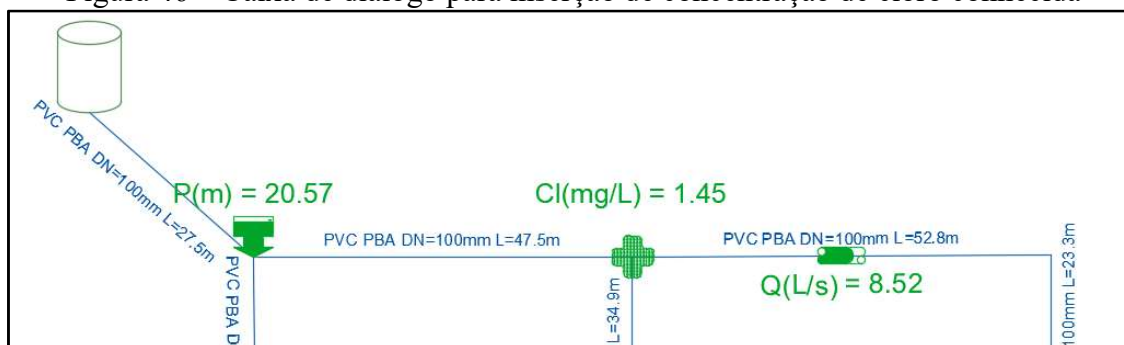
Após clicado, o valor da concentração de cloro no nó é solicitado ao usuário através de uma caixa de diálogo, mostrada na Figura 45, que apresenta as coordenadas do nó indicado. Já na Figura 46 pode ser vista a concentração de cloro indicada no nó inserida no desenho da rede de distribuição.

Figura 45 – Caixa de diálogo para inserção de concentração de cloro conhecida

| UFC10 - Indicar concentração de cloro medida: | | ✕ |
|---|---|----------|
| Coordenada x do nó (m): | <input type="text" value="4,499,273.7000"/> | Indicar |
| Coordenada y do nó (m): | <input type="text" value="9,850,838.8000"/> | |
| Concentração de cloro medida (mg/L): | <input type="text"/> | Cancelar |

Fonte: Elaborado pelo autor

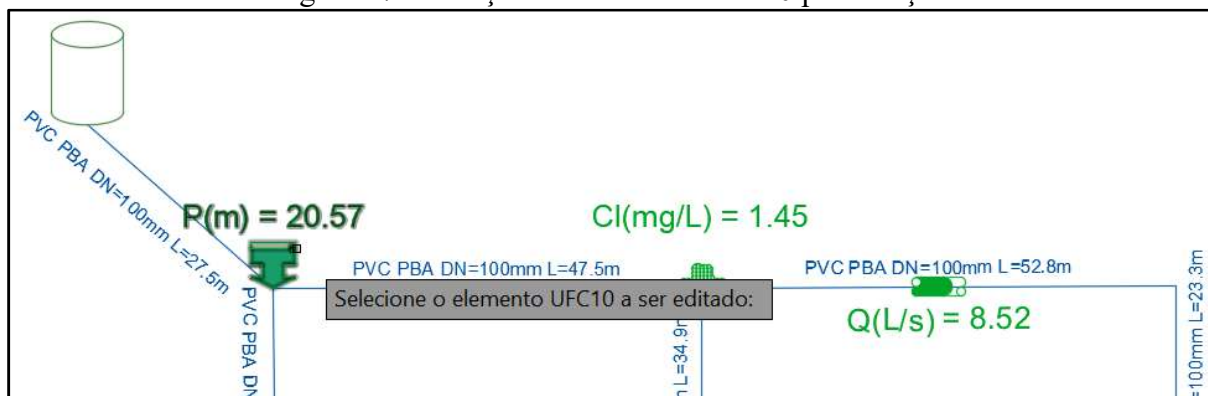
Figura 46 – Caixa de diálogo para inserção de concentração de cloro conhecida



Fonte: Elaborado pelo autor

Ao clicar no botão “Editar medições”, é solicitado ao usuário o elemento do programa UFC10 a ser editado, como mostrado na Figura 47.

Figura 47 – Seleção de elemento UFC10 para edição



Fonte: Elaborado pelo autor

Independentemente de o elemento selecionado ser pressão indicada, vazão indicada ou concentração de cloro indicada, ao ser selecionado a caixa de diálogo correspondente aparecerá, de forma similar à da inserção, podendo ser alterado o valor do elemento clicado. Além disso, qualquer elemento também pode ser deletado ou excluído sem prejuízo.

Por fim, após todas as indicações e edições necessárias serem feitas, o botão “Calibrar pelo MIGHA” deve ser clicado. Assim, é realizada a exportação dos dados para o aplicativo externo ao AutoCAD, tanto da rede traçada pelo UFC2, através da criação do arquivo “.inp”, como dos dados medidos inseridos com o uso do UFC10, através da criação do arquivo “Dados.u10”.

4.1.2 Aplicativo UFC10 externo ao AutoCAD – Visual Basic

A parte externa ao AutoCAD do software UFC10 é utilizada para a realização dos cálculos de calibração da rede de distribuição. É nessa parte que é solicitado ao usuário a indicação se a calibração a ser realizada será de rugosidade/fator de atrito, vazão ou coeficiente de decaimento de cloro. Também é nessa parte que o usuário indica a Metodologia MIGHA a ser utilizada, ou seja, MIGHA C ou MIGHA O. Ainda, deve ser informado pelo usuário os parâmetros de parada das iterações.

Após o botão “Calibrar pelo MIGHA” ser acionado no AutoCAD, automaticamente, a parte externa ao AutoCAD do UFC10 é iniciada, aparecendo para o usuário como mostrado na Figura 48.

Figura 48 – Início do UFC10 – Visual Basic

UFC10 - MIGHA: Calibração de redes de distribuição

Trechos: Nós: Parâmetros medidos

| Rede Observada: Planilha de trechos da rede de distribuição | | | | | | | | | | | |
|---|-------|-------|-----------------|---------------|---------------------------------------|--------|--------|-----------------|-------------|------------------|----------------------|
| Nome | 1º Nó | 2º Nó | Comprimento (m) | Diâmetro (mm) | $E(\text{mm}) D-W / C \text{ de H-W}$ | K bulk | K wall | Fator de Atrito | Vazão (L/s) | Velocidade (m/s) | Gradiente Hidráulico |
| 1 | 1 | 2 | 60 | 54.6 | 150 | | -0.731 | | 0.29 | 0.12 | 0.00038 |
| 2 | 2 | 3 | 45 | 54.6 | 150 | | -0.624 | | -0.50 | 0.21 | 0.00109 |
| 3 | 3 | 4 | 60 | 54.6 | 150 | | -0.440 | | -0.21 | 0.09 | 0.00022 |
| 4 | 2 | 5 | 60 | 54.6 | 150 | | -0.852 | | 0.26 | 0.11 | 0.00033 |
| 5 | 5 | 6 | 45 | 54.6 | 150 | | -0.243 | | -0.50 | 0.21 | 0.00109 |
| 6 | 6 | 3 | 60 | 54.6 | 150 | | -0.931 | | -0.26 | 0.11 | 0.00033 |
| 7 | 5 | 7 | 60 | 54.6 | 150 | | -0.113 | | 0.30 | 0.13 | 0.00043 |

| Rede Calculada: Planilha de trechos da rede de distribuição | | | | | | | | | | | | |
|---|-------|-------|-----------------|---------------|---------------------------------------|--------|--------|-----------------|-------------|------------------|----------------------|-------------|
| Nome | 1º Nó | 2º Nó | Comprimento (m) | Diâmetro (mm) | $E(\text{mm}) D-W / C \text{ de H-W}$ | K bulk | K wall | Fator de Atrito | Vazão (L/s) | Velocidade (m/s) | Gradiente Hidráulico | Resíduo (%) |
| 1 | 1 | 2 | 60 | 54.6 | 150 | | -0.731 | | 0.18 | 0.08 | 0.00016 | 0.000000048 |
| 2 | 2 | 3 | 45 | 54.6 | 150 | | -0.624 | | -0.30 | 0.13 | 0.00042 | 0.000000449 |
| 3 | 3 | 4 | 60 | 54.6 | 150 | | -0.440 | | -0.14 | 0.06 | 0.00011 | 0.000000012 |
| 4 | 2 | 5 | 60 | 54.6 | 150 | | -0.852 | | 0.22 | 0.10 | 0.00024 | 0.000000008 |
| 5 | 5 | 6 | 45 | 54.6 | 150 | | -0.243 | | -0.31 | 0.13 | 0.00045 | 0.000000041 |
| 6 | 6 | 3 | 60 | 54.6 | 150 | | -0.931 | | -0.21 | 0.09 | 0.00022 | 0.000000012 |
| 7 | 5 | 7 | 60 | 54.6 | 150 | | -0.113 | | 0.23 | 0.10 | 0.00026 | 0.000000029 |

Resumo da rede:
 Simulação hidráulica: Hazen-Williams
 Nº de trechos: 542
 Nº de nós: 250

Parâmetro a ser calibrado:
 Rugosidade C de Hazen-Williams
 Vazão Q e cálculo do consumo nos nós
 Constante K e cálculo de Kw de decaimento do cloro

Metodologia MIGHA de calibração:
 MIGHA C: Realiza iterações atualizando apenas a rede calculada.
 MIGHA D: Realiza iterações atualizando tanto a rede calculada quanto a rede observada.

Critérios de parada:
 Máxima função objetivo: 0,000000001
 Nº máximo de iterações: 100
 Função objetivo atingida:
 Nº de iterações atingidas:

Testar rugosidades iniciais. Enquanto: Cini: 50 + Cinc: 10 < Cfin: 150

Fonte: Elaborado pelo autor

Como pode ser visto na Figura 48, o padrão inicial do software é a calibração da rugosidade C de Hazen-Williams ou fator de atrito f e cálculo da rugosidade absoluta de Darcy-Weisbach, de acordo com a metodologia de perda de carga utilizada na rede pelo Epanet, escolhida no UFC2 antes da importação, MIGHA O como metodologia de calibração e critérios de parada de no máximo 100 iterações ou 0,000000001 como máxima função objetivo. Além disso, a sub-rotina computacional para seleção de rugosidades iniciais não é o padrão inicial do programa, mas a rugosidade obtida de cada trecho com a importação dos dados da rede.

O software reconhece, devido ao arquivo do Epanet, a metodologia de cálculo do gradiente hidráulico utilizada na simulação hidráulica, além do número de trechos e nós da rede a ser calibrada e informa ao usuário no campo “Resumo da rede”.

De acordo com o método presente na simulação hidráulica da rede, a opção no campo “Parâmetro a ser calibrado” reconhece, de forma automática, se a calibração será da rugosidade C de Hazen-Williams ou do fator de atrito f e cálculo da rugosidade absoluta de Darcy-Weisbach. A calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente de decaimento de cloro nas paredes da tubulação K_W fica habilitada, ou não habilitada, de acordo com a opção de simulação da qualidade da água no Epanet, se estiver ativa

ou inativa, respectivamente. As possibilidades existentes no campo “Parâmetro a ser calibrado” podem ser vistas na Figura 49.

Figura 49 – Possibilidades para o campo “Parâmetro a ser calibrado”

Parâmetro a ser calibrado:

- Fator de atrito f e cálculo da rugosidade ϵ de D-W
- Vazão Q e cálculo do consumo nos nós
- Constante K e cálculo de K_w de decaimento do cloro

Parâmetro a ser calibrado:

- Rugosidade C de Hazen-Williams
- Vazão Q e cálculo do consumo nos nós
- Constante K e cálculo de K_w de decaimento do cloro

Parâmetro a ser calibrado:

- Rugosidade C de Hazen-Williams
- Vazão Q e cálculo do consumo nos nós
- Constante K e cálculo de K_w de decaimento do cloro

Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com o parâmetro a ser calibrado definido, o texto para utilizar a sub-rotina computacional para testar parâmetros iniciais da calibração também muda. Na Figura 50 são mostrados os valores padrão para o teste de parâmetros iniciais de rugosidade absoluta, coeficiente C , demanda e coeficiente K_w , respectivamente.

Figura 50 – Possibilidades para o teste de parâmetros iniciais usando a sub-rotina computacional

| | | | | | | | | | |
|---|-----------|--------------------|------------------------------------|----------|--------------------|---------------------------------------|-----|--------------------|----------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Testar rugosidades iniciais. | Enquanto: | ϵ_{ini} : | <input type="text" value="0.006"/> | \times | ϵ_{inc} : | <input type="text" value="3.162277"/> | $<$ | ϵ_{fin} : | <input type="text" value="6"/> |
| <input type="checkbox"/> Testar rugosidades iniciais. | Enquanto: | C_{ini} : | <input type="text" value="50"/> | $+$ | C_{inc} : | <input type="text" value="10"/> | $<$ | C_{fin} : | <input type="text" value="150"/> |
| <input type="checkbox"/> Testar demandas iniciais. | Enquanto: | D_{ini} : | <input type="text" value="0"/> | $+$ | D_{inc} : | <input type="text" value="0.1"/> | $<$ | D_{fin} : | <input type="text" value="10"/> |
| <input type="checkbox"/> Testar K_w iniciais. | Enquanto: | K_{wini} : | <input type="text" value="0.1"/> | $+$ | K_{winc} : | <input type="text" value="0.1"/> | $>$ | K_{wfin} : | <input type="text" value="1"/> |

Fonte: Elaborado pelo autor

Os valores iniciais, incrementais e finais de qualquer parâmetro podem ser alterados pelo usuário do software, de acordo com a necessidade. Na Figura 48 foi apresentado a aba dos trechos das redes observada e calculada, na Figuras 51 pode ser vista a aba dos nós em que as rugosidades devem ser calibradas, uma vez que os consumos estão adequados e as pressões entre as redes observada e calculada variam.

Figura 51 – Aba dos nós para calibração da rugosidade

UFC10 - MIGHA: Calibração de redes de distribuição

Trechos **Nós** Parâmetros medidos

| Rede Observada: Planilha de nós da rede de distribuição | | | | | | | |
|---|--------------|--------------|---------------|---------------------|----------------------|-------------|-----------|
| Nome | Coordenada X | Coordenada Y | Consumo (L/s) | Cota do Terreno (m) | Carga Hidráulica (m) | Pressão (m) | Qualidade |
| 1 | 222868.77 | 9450280.45 | 0.09 | 196.2317 | 256.75 | 60.52 | |
| 2 | 222928.77 | 9450280.45 | 0.25 | 192.3587 | 256.73 | 64.37 | |
| 3 | 222928.77 | 9450235.45 | 0.23 | 194.2377 | 256.78 | 62.54 | |
| 4 | 222868.77 | 9450235.45 | 0.18 | 204.7611 | 256.79 | 52.03 | |
| 5 | 222988.77 | 9450280.45 | 0.30 | 201.039 | 256.71 | 55.67 | |
| 6 | 222988.77 | 9450235.45 | 0.36 | 196.7379 | 256.76 | 60.02 | |
| 7 | 223048.77 | 9450280.45 | 0.10 | 204.033 | 256.68 | 52.65 | |

| Rede Calculada: Planilha de nós da rede de distribuição | | | | | | | | |
|---|--------------|--------------|---------------|---------------------|----------------------|-------------|-----------|-------------|
| Nome | Coordenada X | Coordenada Y | Consumo (L/s) | Cota do Terreno (m) | Carga Hidráulica (m) | Pressão (m) | Qualidade | Residuo (%) |
| 1 | 222868.77 | 9450280.45 | 0.09 | 196.2317 | 260.75 | 64.51 | | |
| 2 | 222928.77 | 9450280.45 | 0.25 | 192.3587 | 260.74 | 68.38 | | |
| 3 | 222928.77 | 9450235.45 | 0.23 | 194.2377 | 260.75 | 66.52 | | |
| 4 | 222868.77 | 9450235.45 | 0.18 | 204.7611 | 260.76 | 56.00 | | |
| 5 | 222988.77 | 9450280.45 | 0.30 | 201.039 | 260.72 | 59.68 | | |
| 6 | 222988.77 | 9450235.45 | 0.36 | 196.7379 | 260.74 | 64.00 | | |
| 7 | 223048.77 | 9450280.45 | 0.10 | 204.033 | 260.71 | 56.67 | | |

Resumo da rede: Simulação hidráulica: Hazen-Williams
 Nº de trechos: 542
 Nº de nós: 290

Parâmetro a ser calibrado:
 Rugosidade C de Hazen-Williams
 Vazão Q e cálculo do consumo nos nós
 Constante K e cálculo de Kw de decaimento do cloro

Metodologia MIGHA de calibração:
 MIGHA C: Realiza iterações atualizando apenas a rede calculada.
 MIGHA D: Realiza iterações atualizando tanto a rede calculada quanto a rede observada.

Critérios de parada:
 Máxima função objetivo: 0.000000001
 Nº máximo de iterações: 100
 Função objetivo atingida:
 Nº de iterações atingidas:

Testar rugosidades iniciais. Enquanto: Cini: 50 + Cinc: 10 < Cfin: 150

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 52 – Aba dos nós para calibração da constante K

UFC10 - MIGHA: Calibração de redes de distribuição

Trechos **Nós** Parâmetros medidos

| Rede Observada: Planilha de nós da rede de distribuição | | | | | | | |
|---|--------------|--------------|---------------|---------------------|----------------------|-------------|-----------|
| Nome | Coordenada X | Coordenada Y | Consumo (L/s) | Cota do Terreno (m) | Carga Hidráulica (m) | Pressão (m) | Qualidade |
| 1 | 222868.77 | 9450280.45 | 0.09 | 196.2317 | 256.75 | 60.52 | 0.36 |
| 2 | 222928.77 | 9450280.45 | 0.25 | 192.3587 | 256.73 | 64.37 | 0.35 |
| 3 | 222928.77 | 9450235.45 | 0.23 | 194.2377 | 256.77 | 62.54 | 0.42 |
| 4 | 222868.77 | 9450235.45 | 0.18 | 204.7611 | 256.79 | 52.03 | 0.40 |
| 5 | 222988.77 | 9450280.45 | 0.30 | 201.039 | 256.71 | 55.67 | 0.40 |
| 6 | 222988.77 | 9450235.45 | 0.36 | 196.7379 | 256.75 | 60.02 | 0.49 |
| 7 | 223048.77 | 9450280.45 | 0.10 | 204.033 | 256.69 | 52.65 | 0.46 |

| Rede Calculada: Planilha de nós da rede de distribuição | | | | | | | | |
|---|--------------|--------------|---------------|---------------------|----------------------|-------------|-----------|-------------|
| Nome | Coordenada X | Coordenada Y | Consumo (L/s) | Cota do Terreno (m) | Carga Hidráulica (m) | Pressão (m) | Qualidade | Residuo (%) |
| 1 | 222868.77 | 9450280.45 | 0.09 | 196.2317 | 256.75 | 60.52 | 0.34 | |
| 2 | 222928.77 | 9450280.45 | 0.25 | 192.3587 | 256.73 | 64.37 | 0.34 | |
| 3 | 222928.77 | 9450235.45 | 0.23 | 194.2377 | 256.77 | 62.54 | 0.41 | |
| 4 | 222868.77 | 9450235.45 | 0.18 | 204.7611 | 256.79 | 52.03 | 0.39 | |
| 5 | 222988.77 | 9450280.45 | 0.30 | 201.039 | 256.71 | 55.67 | 0.39 | |
| 6 | 222988.77 | 9450235.45 | 0.36 | 196.7379 | 256.75 | 60.02 | 0.48 | |
| 7 | 223048.77 | 9450280.45 | 0.10 | 204.033 | 256.69 | 52.65 | 0.46 | |

Resumo da rede: Simulação hidráulica: Hazen-Williams
 Nº de trechos: 542
 Nº de nós: 290

Parâmetro a ser calibrado:
 Rugosidade C de Hazen-Williams
 Vazão Q e cálculo do consumo nos nós
 Constante K e cálculo de Kw de decaimento do cloro

Metodologia MIGHA de calibração:
 MIGHA C: Realiza iterações atualizando apenas a rede calculada.
 MIGHA D: Realiza iterações atualizando tanto a rede calculada quanto a rede observada.

Critérios de parada:
 Máxima função objetivo: 0.000000001
 Nº máximo de iterações: 100
 Função objetivo atingida:
 Nº de iterações atingidas:

Testar rugosidades iniciais. Enquanto: Cini: 50 + Cinc: 10 < Cfin: 150

Fonte: Elaborado pelo autor

Já na Figura 52 aparece a aba dos nós em que os coeficientes de decaimento do cloro nas paredes da tubulação devem ser calculados, já que a qualidade está presente, o terceiro item do campo “Parâmetro a ser calculado” está disponível e o item qualidade, que representa a concentração de cloro, varia entre as redes observada e calculada.

Nesta etapa da calibração, o usuário também pode ver quais os parâmetros medidos indicados no AutoCAD clicando na aba dos parâmetros medidos. Na Figura 53 podem ser vistos, como exemplo, parâmetros medidos de pressão. Poderiam haver, ainda, valores de vazão em alguns trechos e qualidade em alguns nós.

Figura 53 – Aba de parâmetros medidos

The screenshot shows the 'UFC10 - MIGHA: Calibração de redes de distribuição' software interface. The 'Parâmetros medidos' tab is active, displaying two tables and configuration options.

Planilha de trechos: Parâmetros medidos

| Nome | 1º Nó | 2º Nó | Vazão (L/s) |
|------|-------|-------|-------------|
| 1 | 1 | 2 | |
| 2 | 2 | 3 | |
| 3 | 3 | 4 | |
| 4 | 2 | 5 | |
| 5 | 5 | 6 | |
| 6 | 6 | 3 | |
| 7 | 5 | 7 | |

Planilha de nós: Parâmetros medidos

| Nome | Coordenada X | Coordenada Y | Pressão (m) | Qualidade (mg/L) |
|------|--------------|--------------|-------------|------------------|
| 1 | 222868.77 | 9450280.45 | 60.52 | |
| 2 | 222928.77 | 9450280.45 | 64.37 | |
| 3 | 222928.77 | 9450235.45 | 62.54 | |
| 4 | 222868.77 | 9450235.45 | 52.03 | |
| 5 | 222988.77 | 9450280.45 | 55.67 | |
| 6 | 222988.77 | 9450235.45 | 60.02 | |
| 7 | 223048.77 | 9450280.45 | 52.65 | |

Resumo da rede:
 Simulação hidráulica: Hazen-Williams
 Nº de trechos: 542
 Nº de nós: 290

Parâmetro a ser calibrado:
 Rugosidade C de Hazen-Williams
 Vazão Q e cálculo do consumo nos nós
 Constante K e cálculo de Kw de decaimento do cloro

Metodologia MIGHA de calibração:
 MIGHA C: Realiza iterações atualizando apenas a rede calculada.
 MIGHA O: Realiza iterações atualizando tanto a rede calculada quanto a rede observada.

Critérios de parada:
 Máxima função objetivo: 0.00000001
 Nº máximo de iterações: 100
 Função objetivo atingida:
 Nº de iterações atingidas:

Testar rugosidades iniciais. Enquanto: Cini: 50 + Cinc: 10 < Cfin: 150

Fonte: Elaborado pelo autor

As planilhas de trechos e nós, tanto da rede calculada quanto da rede observada, podem ser exportadas ao programa Excel antes ou depois da calibração. O mesmo pode ser feito para a exportação da rede calculada ou da rede observada para o software Epanet.

Na Figura 54 pode ser visto um exemplo de uma rede em que o fator de atrito foi calibrado em 7 iterações, já que a função objetivo atingida foi menor que a máxima permitida.

Figura 54 – Exemplo de uma rede calibrada com o UFC10

UFC10 - MIGHA: Calibração de redes de distribuição

Trechos Nós Parâmetros medidos

Rede Observada: Planilha de trechos da rede de distribuição

| Nome | 1º Nó | 2º Nó | Comprimento (m) | Diâmetro (mm) | ϵ (mm) D-W / C de H-W | K bulk | K wall | Fator de Atrito | Vazão (L/s) | Velocidade (m/s) | Gradiente Hidráulico |
|------|-------|-------|-----------------|---------------|--------------------------------|--------|--------|-----------------|-------------|------------------|----------------------|
| 0 | R1 | 1 | 520 | 250 | 0.05348 | | -0.100 | 0.017222 | 39.95 | 0.81 | 0.00233 |
| 1 | 1 | 2 | 1850 | 150 | 0.03094 | | -0.100 | 0.018507 | 14.20 | 0.80 | 0.00406 |
| 2 | 2 | 3 | 790 | 125 | 0.10501 | | -0.100 | 0.022071 | 8.68 | 0.71 | 0.00451 |
| 3 | 3 | 7 | 700 | 100 | 0.37126 | | -0.100 | 0.037426 | 0.68 | 0.09 | 0.00014 |
| 4 | 7 | 4 | 600 | 100 | 0.04052 | | -0.100 | 0.028272 | -1.28 | 0.16 | 0.00038 |
| 5 | 4 | 5 | 980 | 100 | 0.01401 | | -0.100 | 0.019438 | -6.32 | 0.81 | 0.00644 |
| 6 | 2 | 5 | 850 | 100 | 0.00186 | | -0.100 | 0.020288 | -4.49 | 0.57 | 0.00339 |

Rede Calculada: Planilha de trechos da rede de distribuição

| Nome | 1º Nó | 2º Nó | Comprimento (m) | Diâmetro (mm) | ϵ (mm) D-W / C de H-W | K bulk | K wall | Fator de Atrito | Vazão (L/s) | Velocidade (m/s) | Gradiente Hidráulico | Resíduo (%) |
|------|-------|-------|-----------------|---------------|--------------------------------|--------|--------|-----------------|-------------|------------------|----------------------|-------------|
| 0 | R1 | 1 | 520 | 250 | 0.05348 | | -0.100 | 0.017222 | 40.00 | 0.81 | 0.00233 | 0.0 |
| 1 | 1 | 2 | 1850 | 150 | 0.03094 | | -0.100 | 0.018507 | 14.19 | 0.80 | 0.00406 | 0.0 |
| 2 | 2 | 3 | 790 | 125 | 0.10501 | | -0.100 | 0.022071 | 8.68 | 0.71 | 0.00451 | 0.0 |
| 3 | 3 | 7 | 700 | 100 | 0.37126 | | -0.100 | 0.037426 | 0.68 | 0.09 | 0.00015 | 0.0 |
| 4 | 7 | 4 | 600 | 100 | 0.04052 | | -0.100 | 0.027873 | -1.32 | 0.17 | 0.00040 | 0.0 |
| 5 | 4 | 5 | 980 | 100 | 0.01401 | | -0.100 | 0.019483 | -6.32 | 0.80 | 0.00643 | 0.0 |
| 6 | 2 | 5 | 850 | 100 | 0.00186 | | -0.100 | 0.020288 | -4.49 | 0.57 | 0.00338 | 0.0 |

Resumo da rede: Simulação hidráulica: Darcy-Weisbach
 Nº de trechos: 9
 Nº de nós: 7

Parâmetro a ser calibrado:
 Fator de atrito f e cálculo da rugosidade ϵ de D-W
 Vazão Q e cálculo do consumo nos nós
 Constante K e cálculo de Kw de decaimento do cloro

Metodologia MIGHA de calibração:
 MIGHA C: Realiza iterações atualizando apenas a rede calculada.
 MIGHA O: Realiza iterações atualizando tanto a rede calculada quanto a rede observada.

Critérios de parada:
 Máxima função objetivo: 0.00000001
 Nº máximo de iterações: 100
 Função objetivo atingida: 0.000000006
 Nº de iterações atingidas: 7

Testar rugosidades iniciais. Enquanto: ϵ ini: 0.006 x ϵ inc: 3.162277 < ϵ fin: 6

Fonte: Elaborado pelo autor

Após a rede ser calibrada, o arquivo “.inp” do Epanet pode ser aberto, salvo e traçado no AutoCAD com os coeficientes adequados com o uso do UFC2.

4.2 Calibrações realizadas

No caso da calibração do coeficiente C de Hazen-Williams, os resultados encontrados para as calibrações realizadas para a rede Porto (2006) usando, como dados de entrada, vazões e pressões simultaneamente, apenas vazões conhecidas nos trechos, apenas pressões conhecidas nos nós, além de dados existentes em nós separados e juntos, tanto para MIGHA O quanto para MIGHA C, considerando, ainda, coeficientes C iniciais diferentes podem ser vistos entre os Apêndices O e Z. Para o mesmo caso, considerando agora a rede Walski (1983) – Gambale (2000), os resultados encontrados podem ser vistos entre os Apêndices AA e AL. Os resultados encontrados para a rede C-Town encontram-se entre os Apêndices AN e AO e, para a rede MIGHA, entre os Apêndices AP e AR.

Considerando, agora, a calibração do fator de atrito com posterior cálculo da rugosidade absoluta de Darcy-Weisbach, os resultados encontrados para a rede Porto (2006)

podem ser vistos entre os Apêndices AS e BD. Para o mesmo caso, considerando a rede Walski (1983) – Gambale (2000), os resultados encontrados podem ser vistos entre os Apêndices BE e BP. Os resultados encontrados para a rede C-Town encontram-se entre os Apêndices BQ e BS e, para a rede MIGHA, entre os Apêndices BT e BV.

Para a calibração da vazão e cálculo dos consumos nodais, com o gradiente hidráulico calculado tanto por Hazen-Williams quanto pela fórmula universal, os resultados encontrados para a rede Porto (2006) podem ser vistos entre os Apêndices BW e CT. Para o mesmo caso, considerando a rede Walski (1983) – Gambale (2000), os resultados encontrados podem ser vistos entre os Apêndices CU e DR. Os resultados encontrados para a rede C-Town encontram-se entre os Apêndices DS e DX e, para a rede MIGHA, entre os Apêndices DY e ED.

Os resultados encontrados ao calibrar a vazão para o cálculo das perdas de água, no caso da rede Porto (2006), podem ser vistos entre os Apêndices EE e EG. Já para a rede Walski (1983) – Gambale (2000), os resultados se encontram entre os Apêndices EH e EJ.

E, finalmente, os resultados encontrados para a calibração da constante de decaimento total do cloro com posterior cálculo do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação, usando como dados de entrada concentração de cloro nos nós, além de dados existentes em nós separados e juntos, tanto para MIGHA O quanto para MIGHA C, considerando, ainda, coeficientes K_W iniciais diferentes, podem ser vistos, para a rede Porto (2006), nos Apêndices EK e EL. Para a rede Walski (1983) – Gambale (2000), estes resultados se encontram nos Apêndices EM e EN, assim como, para a rede C-Town nos Apêndices EO e EP, para a rede MIGHA nos Apêndices EQ e ER e para a rede Porto (2006) Ramificada no Apêndice ES.

Todas as calibrações foram realizadas com o uso do UFC10, software desenvolvido nessa pesquisa. A discussão dos resultados foi dividida por parâmetro calibrado e, internamente, por rede calibrada.

4.2.1 Calibração do coeficiente C de Hazen-Williams

Ao todo, foram realizadas 348 calibrações para testar e analisar o novo procedimento desenvolvido para executar a calibração do coeficiente C de Hazen-Williams em redes de distribuição de água. A seguir, os resultados serão apresentados por rede calibrada para este parâmetro.

4.2.1.1 Rede Porto (2006)

Para a calibração do coeficiente C de Hazen-Williams na rede Porto (2006) foram realizadas 160 calibrações, sendo 80 pelo processo MIGHA C e 80 pelo MIGHA O.

O coeficiente C de Hazen-Williams igual a $150 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ é o valor utilizado para o tubo mais liso existente na atualidade para escoamento de água em redes de distribuição. Ao utilizar este como valor inicial, para a maioria dos nós da rede e ao se calibrar utilizando como dados de entrada pressões e vazões ao mesmo tempo, o procedimento MIGHA O apresentou resultados de pressão mais próximos do valor gabarito do que o MIGHA C. O inverso aconteceu para vazões e coeficientes C encontrados.

Para o MIGHA O, apesar de que na maior parte dos nós os valores de pressão encontrados foram os mesmos ou extremamente próximos do gabarito, para o nó 2, a diferença de pressão encontrada foi de 8,02m. Já para o MIGHA C, a menor diferença de pressão foi de 0,79m no nó 6 e a maior de 4,82m no nó 4. Para as vazões, excluindo-se o trecho de saída do reservatório, que obrigatoriamente recebe toda a vazão consumida ao longo da rede, a menor diferença de vazão foi de 1,46 L/s nos trechos 2, 3, 4 e 5 e a maior foi de 5,03 L/s no trecho 6, todos ocorreram utilizando o MIGHA O. No caso das rugosidades encontradas o resultado foi bem pior, para este caso, não houve diferença de coeficientes C de Hazen-Williams menor que $20 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ e vários trechos obtiveram diferenças encontradas maiores que $100 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$.

Assim, é possível perceber que, para dados de entrada de vazões e pressões ao mesmo tempo e coeficiente de rugosidade C de Hazen-Williams inicial para todos os trechos igual a $150 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$, tanto o método MIGHA O quanto o MIGHA C não apresentaram bons resultados, não devendo ser utilizados sob estas condições.

Ao se calibrar a rugosidade, usando apenas vazões nos trechos como dados de entrada conhecidos, não foi possível visualizar melhora ao se aumentar o número de trechos com vazões conhecidas. Para pressões, a menor diferença média foi de 4,32m para calibração com 6 vazões conhecidas e uso do MIGHA O e a maior diferença média entre as calibrações foi 6,76m para vazões em 2 trechos, também com MIGHA O. Apesar de a maior média entre as diferenças das pressões encontradas e as pressões gabarito ocorrer com vazões conhecidas em 2 trechos, a terceira maior ocorreu quando se tinha vazões conhecidas em todos os trechos, o que mostra a inconsistência do uso de vazões na calibração do coeficiente C de Hazen-Williams.

Na Tabela 27 são apresentadas as diferenças médias entre as pressões, de todos os nós, vazões e rugosidades C, de todos os trechos, calculadas após a calibração e seus respectivos

valores gabarito para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressões e vazões ao mesmo tempo, além de apenas vazões nos trechos.

Tabela 27 – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades C calculadas e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do C para C inicial de $150 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ na rede Porto (2006)

| Dados conhecidos: | Diferença média | | | | | |
|---------------------|-----------------|---------|--------------|---------|--|---------|
| | Pressões (m) | | Vazões (L/s) | | Rugosidade C ($\text{m}^{0,367}/\text{s}$) | |
| | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C |
| 3 vazões e pressões | 2,06 | 3,16 | 2,40 | 1,93 | 97,86 | 61,48 |
| Vazão em 9 trechos | 6,63 | 5,10 | 9,42 | 3,17 | 125,12 | 78,12 |
| Vazão em 8 trechos | 6,45 | 5,09 | 8,72 | 3,59 | 84,54 | 83,56 |
| Vazão em 7 trechos | 4,95 | 5,10 | 9,04 | 3,61 | 86,66 | 83,36 |
| Vazão em 6 trechos | 4,42 | 5,10 | 8,98 | 3,56 | 85,56 | 86,32 |
| Vazão em 5 trechos | 6,65 | 5,03 | 8,37 | 3,31 | 66,80 | 83,51 |
| Vazão em 4 trechos | 6,64 | 5,03 | 8,37 | 3,31 | 67,44 | 83,53 |
| Vazão em 3 trechos | 6,76 | 5,35 | 1,61 | 3,02 | 68,11 | 82,49 |
| Vazão em 2 trechos | 6,76 | 5,36 | 1,61 | 3,01 | 61,99 | 82,65 |
| Vazão em 1 trecho | 5,59 | 5,28 | 1,16 | 2,48 | 46,77 | 73,15 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao calibrar o coeficiente C de Hazen-Williams considerando apenas pressões conhecidas nos nós da rede Porto (2006), analisando apenas as pressões encontradas, há uma leve piora dos resultados a medida em que se vai diminuindo o número de dados conhecidos na rede. Para as rugosidades calibradas, isso ocorre de forma geral. Já para as vazões encontradas, a diminuição do número de nós com pressões conhecidas não teve grande influência nos resultados encontrados.

Ao analisar o que acontece quando se tem dados conhecidos em nós juntos ou separados, além de, no caso de apenas 1 nó, este estar próximo ou longe do reservatório, no caso das pressões encontradas, fica bem claro que pressões conhecidas em nós separados apresenta melhores resultados que nós próximos entre si. No entanto, para as vazões encontradas, a localização dos dados de entrada só influenciou no caso de se utilizar o MIGHA C, em que dados próximos apresentou melhores resultados. Já as rugosidades, para 3 nós juntos apresentaram melhores resultados que para 3 nós separados, no entanto, para 2 nós separados apresentaram melhores valores que para 2 nós juntos e até mesmo que para 3 nós juntos.

Na Tabela 28 são mostradas as diferenças médias entre as pressões, de todos os nós, vazões e rugosidades C, de todos os trechos, calculadas após a calibração e seus respectivos

valores gabarito para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressões nos nós. É possível perceber que, nesse caso, o MIGHA O obteve melhores resultados que o MIGHA C.

Tabela 28 – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades C calculadas e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração do C para C inicial de $150 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ na rede Porto (2006)

| Dados conhecidos de pressão em: | Diferença média | | | | | |
|---------------------------------|-----------------|---------|--------------|---------|--|---------|
| | Pressões (m) | | Vazões (L/s) | | Rugosidade C ($\text{m}^{0,367}/\text{s}$) | |
| | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C |
| | O | C | O | C | O | C |
| 7 nós | 0,00 | 0,00 | 0,43 | 0,43 | 11,17 | 11,17 |
| 6 nós | 0,00 | 0,01 | 0,43 | 0,41 | 10,97 | 23,13 |
| 5 nós | 0,03 | 0,04 | 0,43 | 0,42 | 11,30 | 23,65 |
| 4 nós | 0,39 | 0,40 | 0,43 | 0,43 | 14,69 | 27,14 |
| 3 nós separados | 0,47 | 0,51 | 0,44 | 0,91 | 23,53 | 26,99 |
| 3 juntos | 0,96 | 0,96 | 0,43 | 0,43 | 19,46 | 19,44 |
| 2 nós separados | 0,52 | 0,57 | 0,42 | 0,69 | 18,18 | 24,96 |
| 2 nós juntos | 1,45 | 1,45 | 0,43 | 0,43 | 27,56 | 27,52 |
| 1 nó perto do Reservatório | 4,39 | 4,39 | 0,44 | 0,44 | 30,00 | 30,00 |
| 1 nó longe do Reservatório | 1,56 | 1,68 | 0,45 | 0,94 | 28,80 | 39,91 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao observar a Tabela 28 pode-se perceber que o uso da metodologia aqui proposta para calibração do coeficiente C de Hazen-Williams, no caso da rede Porto (2006) com coeficiente C inicial de $150 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$, quando se tem dados de pressão em 7, 6 ou 5 nós, as pressões encontradas geraram diferenças médias com as pressões gabarito de aproximadamente zero metros, ficando maior que 1m apenas a partir de quando se tem dados de pressão em 2 nós juntos. A maior diferença encontrada entre as pressões calculadas e gabarito foi de 6,83m no nó 3 para 1 nó perto do reservatório, valor este tanto para o MIGHA C quanto para o MIGHA O.

Para as vazões encontradas, em todas as situações, as diferenças com as vazões gabarito foram menores que 1 L/s. Considerando apenas o método MIGHA O, essa diferença foi menor que 0,5 L/s em todos os casos simulados. Excluindo-se o trecho 0, em que a vazão foi igual a gabarito em todos os casos simulados, a menor diferença de vazão foi de 0,05 L/s nos trechos 7 e 8 quando se tem dados de pressão em 3 nós separados entre si. A maior diferença foi de 1,71 L/s no trecho 6 pra dados de pressão em 1 nó longe do reservatório.

Os coeficientes C de Hazen-Williams encontrados ao fim do processo de calibração foram muito bons em alguns trechos e, em outros, não apresentaram resultados tão bons. Como

exemplo, para dados de pressão em todos os nós, 6 trechos apresentaram variações de valores de rugosidade C , entre o calibrado e o gabarito, menores que $6 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$, já os outros 3 trechos apresentaram diferenças maiores que $19 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$.

O próximo valor de coeficiente C testado no processo de calibração foi de $75 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$. Este valor pode ser considerado baixo, uma vez que é pouco menor que o menor valor encontrado na Tabela 2 deste trabalho. Ao utilizá-lo como valor inicial, para a maioria dos nós da rede, e ao se calibrar utilizando como dados de entrada pressões e vazões ao mesmo tempo, o procedimento MIGHA C apresentou resultados de pressão mais próximos do valor gabarito do que o MIGHA O. O mesmo ocorreu para vazões e coeficientes C nos trechos. Apesar disso, para este caso, os valores encontrados pelos dois métodos foram bem diferentes do gabarito, havendo, inclusive, muitos valores negativos para as pressões.

Ao se calibrar a rugosidade usando apenas vazões nos trechos, como dados de entrada conhecidos, não houve grande diferença nos resultados encontrados ao se comparar os métodos MIGHA C e MIGHA O, em alguns casos um foi pior que o outro e vice-versa. Além disso, também não foi possível visualizar diferença ao se aumentar o número de trechos com vazões conhecidas. O que pode ser visto é que o uso de vazões na calibração do coeficiente C de Hazen-Williams com C inicial igual a $75 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ gerou resultados ruins.

Na Tabela 29 são apresentadas as diferenças médias entre as pressões, de todos os nós, vazões e rugosidades C , de todos os trechos, calculadas após a calibração e seus respectivos valores gabarito para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressões e vazões ao mesmo tempo, além de apenas vazões nos trechos.

Ao calibrar o coeficiente C de Hazen-Williams, considerando apenas pressões conhecidas nos nós da rede Porto (2006), analisando apenas as pressões encontradas, há uma leve piora dos resultados a medida em que se vai diminuindo o número de dados conhecidos na rede. Para as rugosidades calibradas, isso ocorre de forma geral. Já para as vazões encontradas, a diminuição do número de nós com pressões conhecidas não teve grande influência nos resultados encontrados.

Na Tabela 30 são mostradas as diferenças médias entre as pressões, de todos os nós, vazões e rugosidades C , de todos os trechos, calculadas após a calibração e seus respectivos valores gabarito para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressões nos nós. É possível perceber que, nesse caso, o MIGHA O obteve melhores resultados que o MIGHA C.

Tabela 29 – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades C calculadas e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do C para C inicial de $75 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ na rede Porto (2006)

| Dados conhecidos: | Diferença média | | | | | |
|---------------------|-----------------|-------|-----------------|-------|---|-------|
| | Pressões (m) | | Vazões (L/s) | | Rugosidade C ($\text{m}^{0,367}/\text{s}$) | |
| | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA |
| | O | C | O | C | O | C |
| 3 vazões e pressões | 18,44 | 9,18 | 9,29 | 7,87 | 118,60 | 97,33 |
| Vazão em 9 trechos | 7,58 | 13,74 | 9,49 | 7,26 | 115,23 | 84,22 |
| Vazão em 8 trechos | 11,62 | 13,57 | 9,22 | 7,28 | 92,70 | 85,23 |
| Vazão em 7 trechos | 12,70 | 13,59 | 9,09 | 7,27 | 89,60 | 76,25 |
| Vazão em 6 trechos | 18,09 | 13,59 | 9,13 | 7,27 | 94,18 | 76,10 |
| Vazão em 5 trechos | 37,93 | 13,99 | 8,69 | 7,27 | 73,75 | 75,81 |
| Vazão em 4 trechos | 37,66 | 13,98 | 8,69 | 7,27 | 73,47 | 75,81 |
| Vazão em 3 trechos | 5,90 | 13,43 | 2,65 | 7,00 | 62,15 | 83,41 |
| Vazão em 2 trechos | 5,99 | 13,45 | 2,61 | 6,83 | 63,70 | 71,59 |
| Vazão em 1 trecho | 12,01 | 13,69 | 1,67 | 6,85 | 45,71 | 73,81 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 30 – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades C calculadas e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração do C para C inicial de $75 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ na rede Porto (2006)

| Dados conhecidos de pressão em: | Diferença média | | | | | |
|------------------------------------|-----------------|-------|-----------------|-------|---|-------|
| | Pressões (m) | | Vazões (L/s) | | Rugosidade C ($\text{m}^{0,367}/\text{s}$) | |
| | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA |
| | O | C | O | C | O | C |
| 7 nós | 0,00 | 0,00 | 0,43 | 0,43 | 11,22 | 11,22 |
| 6 nós | 0,04 | 0,04 | 0,43 | 0,43 | 18,08 | 18,08 |
| 5 nós | 0,12 | 0,50 | 0,39 | 0,44 | 9,11 | 26,65 |
| 4 nós | 0,54 | 0,54 | 0,44 | 0,44 | 26,38 | 26,39 |
| 3 nós separados | 0,80 | 0,77 | 0,42 | 0,68 | 23,27 | 28,24 |
| 3 juntos | 1,24 | 1,24 | 0,44 | 0,44 | 25,03 | 25,04 |
| 2 nós separados | 1,38 | 1,34 | 0,46 | 0,91 | 34,17 | 39,31 |
| 2 nós juntos | 1,37 | 2,41 | 0,76 | 0,76 | 38,59 | 40,00 |
| 1 nó perto do Reservatório | 11,67 | 11,67 | 0,44 | 0,44 | 36,67 | 36,67 |
| 1 nó longe do Reservatório | 4,24 | 4,13 | 0,38 | 0,76 | 34,81 | 44,29 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar o que acontece quando se tem dados conhecidos em nós juntos ou separados, além de, no caso de apenas 1 nó, este estar próximo ou longe do reservatório, no caso das pressões encontradas, fica bem claro que pressões conhecidas em nós separados

apresenta melhores resultados que nós próximos entre si. No entanto, para as vazões e rugosidades encontradas, a localização dos dados de entrada só influenciou no caso de se utilizar o MIGHA C, em que dados próximos apresentou melhores resultados.

Ao observar a Tabela 30 pode-se perceber que o uso da metodologia aqui proposta para calibração do coeficiente C de Hazen-Williams, no caso da rede Porto (2006) com coeficiente C inicial de $75 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$, quando se tem dados de pressão em 7 ou 6 nós, os resultados encontrados geraram diferenças médias entre as pressões de aproximadamente zero metros, ficando maior que 1m apenas a partir de quando se tem dados de pressão em 3 nós juntos. A maior diferença encontrada entre as pressões calculadas e gabarito foi de 19,40m no nó 7 para 1 nó perto do reservatório, valor este tanto para o MIGHA C quanto para o MIGHA O. Desprezando o caso em que se tem um dado de pressão como dado de entrada, a maior diferença foi de 6,29m no nó 2 para 2 nós juntos entre si.

Para as vazões encontradas, em todas as situações, as diferenças com as vazões gabarito foram menores que 1 L/s, considerando apenas o método MIGHA O, essa diferença só passou de 0,5 L/s quando se tinham dados em 2 nós juntos entre si. Excluindo-se o trecho 0, em que a vazão foi igual a gabarito em todos os casos simulados, a menor diferença de vazão foi de 0,03 L/s nos trechos 2, 3, 4 e 5 quando se tem dados de pressão em 1 nó longe do reservatório com uso do MIGHA O. A maior diferença foi de 1,64 L/s no trecho 6 pra dados de pressão em 2 nós separados entre si com uso do MIGHA C.

Os coeficientes C de Hazen-Williams encontrados ao fim do processo de calibração foram muito bons em alguns trechos e, em outros, não apresentaram resultados tão bons. Como exemplo, para dados de pressão em todos os nós, 6 trechos apresentaram variações de valores de rugosidade C, entre o calibrado e o gabarito, menores que $6,05 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$, já os outros 3 trechos apresentaram diferenças maiores que $18,9 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$.

Também foram consideradas calibrações com C inicial de $5 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$. Este valor pode ser considerado extremamente baixo, provavelmente não será encontrado em tubulações reais, no entanto, pode ser utilizado para testar a metodologia. Ao considerar este valor, tanto utilizando como dados de entrada pressões e vazões ao mesmo tempo, como usando apenas vazões nos trechos, independente de se utilizar o método MIGHA C ou o MIGHA O, obteve-se pressões negativas em todos os nós da rede. As vazões e rugosidades encontradas nos trechos para esta situação também apresentaram valores bem distintos dos valores gabarito. Nesse caso, o uso de vazões ou vazões e pressões ao mesmo tempo na calibração do coeficiente C de Hazen-Williams não é adequado. Além disso, o uso de valores extremamente baixos para rugosidades no início do processo de calibração, torna os resultados piores, como visto na Tabela 31.

Tabela 31 – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades C calculadas e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do C para C inicial de $5 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ na rede Porto (2006)

| Dados conhecidos: | Diferença média | | | | | |
|---------------------|-----------------|------------|-----------------|------------|---|------------|
| | Pressões (m) | | Vazões (L/s) | | Rugosidade C ($\text{m}^{0,367}/\text{s}$) | |
| | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C |
| 3 vazões e pressões | 1.399,61 | 4.045,29 | 8,90 | 6,09 | 124,84 | 104,42 |
| Vazão em 9 trechos | 817,24 | 3.630,66 | 9,31 | 6,83 | 105,46 | 105,80 |
| Vazão em 8 trechos | 927,68 | 3.874,05 | 9,03 | 6,29 | 108,93 | 107,37 |
| Vazão em 7 trechos | 1.584,24 | 3.876,75 | 7,45 | 6,27 | 123,45 | 108,13 |
| Vazão em 6 trechos | 2.513,40 | 3.876,76 | 6,91 | 6,28 | 129,16 | 108,10 |
| Vazão em 5 trechos | 4.067,24 | 3.936,19 | 5,87 | 6,25 | 118,44 | 108,20 |
| Vazão em 4 trechos | 4.023,41 | 3.935,76 | 5,87 | 6,25 | 118,42 | 108,20 |
| Vazão em 3 trechos | 2.354,91 | 3.652,92 | 4,07 | 6,55 | 117,30 | 106,53 |
| Vazão em 2 trechos | 2.390,10 | 3.655,63 | 3,96 | 6,62 | 113,16 | 107,18 |
| Vazão em 1 trecho | 3.591,07 | 3.715,06 | 2,27 | 6,54 | 116,10 | 107,34 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 32 são apresentadas as diferenças médias entre as pressões, de todos os nós, vazões e rugosidades C, de todos os trechos, calculadas após a calibração e seus respectivos valores gabarito para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressões nos nós.

Tabela 32 – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades C calculadas e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração do C para C inicial de $5 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ na rede Porto (2006)

| Dados conhecidos de pressão em: | Diferença média | | | | | |
|------------------------------------|-----------------|------------|-----------------|------------|---|------------|
| | Pressões (m) | | Vazões (L/s) | | Rugosidade C ($\text{m}^{0,367}/\text{s}$) | |
| | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C |
| 7 nós | 0,00 | 0,00 | 0,43 | 0,43 | 11,25 | 11,25 |
| 6 nós | 10,31 | 10,31 | 0,44 | 0,44 | 33,40 | 33,40 |
| 5 nós | 0,22 | 204,52 | 1,33 | 2,61 | 46,27 | 72,30 |
| 4 nós | 6,40 | 1.151,57 | 0,87 | 0,78 | 38,42 | 84,42 |
| 3 nós separados | 87,71 | 593,60 | 2,82 | 3,69 | 57,35 | 83,81 |
| 3 juntos | 0,71 | 1.432,91 | 1,53 | 1,14 | 55,42 | 74,72 |
| 2 nós separados | 5,37 | 1.010,62 | 3,12 | 5,24 | 61,77 | 100,42 |
| 2 nós juntos | 4,17 | 1.536,27 | 0,85 | 1,35 | 70,28 | 94,72 |
| 1 nó perto do Reservatório | 3.339,34 | 3.339,34 | 0,44 | 0,44 | 98,89 | 98,89 |
| 1 nó longe do Reservatório | 198,31 | 1.890,93 | 0,66 | 0,92 | 83,15 | 108,64 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao calibrar o coeficiente C de Hazen-Williams, considerando apenas pressões conhecidas nos nós da rede Porto (2006), percebe-se que, analisando todos os nós e trechos da rede, apenas quando se tem os dados de pressão em todos os nós da rede de distribuição se tem bons resultados. Dessa forma, o uso do coeficiente inicial C igual a $5 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ não é adequado para a calibração deste coeficiente.

Com o uso da sub-rotina computacional para a escolha do coeficiente C de Hazen-Williams inicial, da mesma forma que quando se tinham valores determinados, o uso de vazões e pressões ao mesmo tempo, assim como o uso de apenas vazões, não geraram bons resultados. Nesse caso, apesar de nenhum dos dois métodos terem gerado bons resultados, o MIGHA O foi bem pior que o MIGHA C, gerando muitas pressões negativas.

É interessante notar que, para a metodologia MIGHA C, para todos os casos calibrados com vazões conhecidas, todos os valores de pressão encontrados foram os mesmos de quando se inicia o processo com C igual a $150 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$. Já para o MIGHA O isso não aconteceu em nenhum caso, apresentando, ao invés disso, muitos valores de pressão negativa. Independente disso, da mesma forma que aconteceu para os outros casos, a utilização, como dados de entrada, de pressões e vazões ao mesmo tempo, além de apenas vazões, não é adequada para a calibração do coeficiente C de Hazen-Williams.

Na Tabela 33 são mostradas as diferenças médias entre as pressões, de todos os nós, vazões e rugosidades C , de todos os trechos, calculadas após a calibração e seus respectivos valores gabarito para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos.

Ao calibrar o coeficiente C de Hazen-Williams, considerando apenas pressões conhecidas nos nós da rede Porto (2006), analisando apenas as pressões encontradas, há uma leve piora dos resultados a medida em que se vai diminuindo o número de dados conhecidos na rede. As pressões encontradas foram quase tão boas quanto as encontradas para o C inicial de $150 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$. Os resultados só foram ruins para 1 nó perto do reservatório, principalmente com o uso do MIGHA O, no qual obteve-se várias pressões negativas. Para as rugosidades calibradas, de forma geral, também há uma leve piora dos resultados a medida em que se vai diminuindo o número de dados conhecidos na rede. Já para as vazões encontradas, excetuando-se os casos com pressões medidas em 7 ou 6 nós, em que as diferenças médias entre as vazões encontradas e as vazões gabarito foram menores que $0,1 \text{ L/s}$, a diminuição do número de nós com pressões conhecidas não teve grande influência nos resultados encontrados.

Tabela 33 – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades C calculadas e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do C para C inicial calculado através da sub-rotina computacional na rede Porto (2006)

| Dados conhecidos: | Diferença média | | | | | |
|--------------------|---------------------|------------|-----------------|------------|-----------------------------------|------------|
| | Pressões (m) | | Vazões (L/s) | | Rugosidade C ($m^{0,367}/s$) | |
| | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C |
| | 3 vazões e pressões | 13,59 | 3,12 | 9,78 | 2,03 | 108,64 |
| Vazão em 9 trechos | 85,67 | 5,10 | 9,84 | 3,17 | 100,34 | 78,12 |
| Vazão em 8 trechos | 290,86 | 5,09 | 8,45 | 3,59 | 104,00 | 83,56 |
| Vazão em 7 trechos | 301,94 | 5,10 | 8,59 | 3,61 | 97,37 | 83,36 |
| Vazão em 6 trechos | 294,68 | 5,10 | 8,41 | 3,56 | 112,11 | 86,32 |
| Vazão em 5 trechos | 345,15 | 5,03 | 8,77 | 3,31 | 98,64 | 83,51 |
| Vazão em 4 trechos | 282,51 | 5,03 | 8,77 | 3,31 | 94,87 | 83,53 |
| Vazão em 3 trechos | 413,69 | 5,35 | 13,56 | 3,02 | 81,95 | 82,49 |
| Vazão em 2 trechos | 425,22 | 5,36 | 12,12 | 3,01 | 76,17 | 82,65 |
| Vazão em 1 trecho | 52,28 | 5,28 | 1,73 | 2,48 | 70,94 | 73,15 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar o que acontece quando se tem dados conhecidos em nós juntos ou separados, além de, no caso de apenas 1 nó, este estar próximo ou longe do reservatório, no caso das pressões encontradas, o uso da sub-rotina computacional para a escolha do C inicial fez com que, em alguns casos, nós separados gerassem melhores resultados de pressão e, em outros, isso ocorresse com dados em nós juntos. Assim, a localização dos nós não gerou influência sobre resultados de pressão. O mesmo ocorreu para vazões e rugosidades encontradas.

Na Tabela 34 são mostradas as diferenças médias entre as pressões, de todos os nós, vazões e rugosidades C, de todos os trechos, calculadas após a calibração e seus respectivos valores gabarito para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressões nos nós.

Ao observar a Tabela 34 se percebe que o uso da metodologia aqui proposta para calibração do coeficiente C de Hazen-Williams, no caso da rede Porto (2006) com coeficiente C inicial calculado pela sub-rotina computacional desenvolvida, quando se tem dados de pressão em 7 ou 6 nós, os resultados encontrados geraram diferenças médias entre as pressões de aproximadamente zero metros, ficando maior que 1m apenas a partir de quando se tem dados de pressão em 2 nós juntos com uso do MIGHA C. A maior diferença encontrada entre as pressões calculadas e gabarito foi de 59,98m no nó 7 para 1 nó perto do reservatório, valor este para o MIGHA O. Desprezando os casos com dados de pressão em apenas 1 nó, a maior diferença foi de 3,59m no nó 5 para 2 nós juntos entre si, através do MIGHA C.

Tabela 34 – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades C calculadas e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração do C para C inicial calculado através da sub-rotina computacional na rede Porto (2006)

| Dados conhecidos de pressão em: | Diferença média | | | | | |
|---------------------------------|-----------------|-------|--------------|-------|--------------------------------|-------|
| | Pressões (m) | | Vazões (L/s) | | Rugosidade C ($m^{0,367}/s$) | |
| | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA |
| | O | C | O | C | O | C |
| 7 nós | 0,00 | 0,00 | 0,07 | 0,07 | 3,42 | 3,42 |
| 6 nós | 0,01 | 0,01 | 0,08 | 0,06 | 6,90 | 14,34 |
| 5 nós | 0,12 | 0,05 | 0,39 | 0,03 | 9,11 | 12,86 |
| 4 nós | 0,36 | 0,40 | 0,58 | 0,43 | 13,63 | 27,16 |
| 3 nós separados | 0,44 | 0,52 | 0,31 | 0,97 | 27,26 | 26,58 |
| 3 juntos | 0,38 | 0,95 | 0,44 | 0,45 | 15,17 | 24,66 |
| 2 nós separados | 0,56 | 0,57 | 0,77 | 0,67 | 29,94 | 25,88 |
| 2 nós juntos | 0,74 | 1,45 | 0,71 | 0,30 | 29,63 | 26,58 |
| 1 nó perto do Reservatório | 36,55 | 4,39 | 0,44 | 0,44 | 58,89 | 30,00 |
| 1 nó longe do Reservatório | 1,05 | 1,68 | 0,60 | 0,93 | 29,19 | 40,41 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para as vazões encontradas, em todas as situações, as diferenças com as vazões gabarito foram menores que 1 L/s. Excluindo-se o trecho 0, em que a vazão foi igual a gabarito em todos os casos simulados, ainda houve trechos em que a diferença de vazão foi de 0 L/s, isso ocorreu nos trechos 1, 7 e 8 quando se tem dados de pressão em 5 nós com uso do MIGHA C. A maior diferença foi de 1,70 L/s no trecho 6 para dados de pressão em 1 nó longe do reservatório com uso do MIGHA C.

Os coeficientes C de Hazen-Williams encontrados ao fim do processo de calibração foram muito bons em alguns trechos e, em outros, não apresentaram resultados tão bons. Como exemplo, para dados de pressão em todos os nós, 7 trechos apresentaram variações de valores de rugosidade C, entre o calibrado e o gabarito, menores que $4 m^{0,367}/s$, já os outros 2 trechos apresentaram diferenças maiores que $10 m^{0,367}/s$.

Outra forma de analisar a eficiência dos métodos propostos para a calibração do coeficiente C de Hazen-Williams é saber se a função objetivo foi atingida. Também é interessante conhecer o número de iterações necessárias para atingir essa função.

Para calibração deste parâmetro na rede Porto (2006) foram estabelecidas um máximo de 100 iterações, caso a função objetivo estivesse muito próxima de ser atingida, esse valor foi ampliado até 150. A função objetivo mínima a ser alcançada foi estabelecida com um valor de 0,000000001.

Nas Tabelas 35 e 36 podem ser vistos o número de iterações e o valor de função objetivo alcançados por cada caso simulado para um coeficiente C de Hazen-Williams inicial de $150 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$.

Tabela 35 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do C para C inicial de $150 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ na rede Porto (2006)

| Dados conhecidos: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|--------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 3 vazões e pressões | 100 | 0,0000013942 | 100 | 0,0000134501 |
| Vazão em 9 trechos | 100 | 600,9305189225 | 100 | 0,0000053871 |
| Vazão em 8 trechos | 100 | 9,9785610496 | 100 | 0,0000012666 |
| Vazão em 7 trechos | 100 | 245,4417360163 | 100 | 0,0000012411 |
| Vazão em 6 trechos | 100 | 38,3997255238 | 100 | 0,0000012819 |
| Vazão em 5 trechos | 100 | 1,4434087414 | 100 | 0,0000009091 |
| Vazão em 4 trechos | 100 | 1,4434087414 | 100 | 0,0000009091 |
| Vazão em 3 trechos | 100 | 0,0000042304 | 100 | 0,0000019176 |
| Vazão em 2 trechos | 100 | 0,0000042118 | 100 | 0,0000019182 |
| Vazão em 1 trecho | 100 | 0,0000017653 | 100 | 0,0000015244 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 36 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração do C para C inicial de $150 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ na rede Porto (2006)

| Dados conhecidos de pressão em: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|--|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 7 nós | 1 | 0,0000000003 | 2 | 0,0000000003 |
| 6 nós | 2 | 0,0000000002 | 5 | 0,0000000002 |
| 5 nós | 2 | 0,0000000000 | 5 | 0,0000000001 |
| 4 nós | 2 | 0,0000000002 | 5 | 0,0000000001 |
| 3 nós separados | 2 | 0,0000000003 | 101 | 0,0000000000 |
| 3 juntos | 1 | 0,0000000003 | 2 | 0,0000000004 |
| 2 nós separados | 2 | 0,0000000002 | 33 | 0,0000000003 |
| 2 nós juntos | 1 | 0,0000000003 | 2 | 0,0000000005 |
| 1 nó perto do Reservatório | 1 | 0,0000000001 | 2 | 0,0000000001 |
| 1 nó longe do Reservatório | 2 | 0,0000000002 | 28 | 0,0000000000 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

O que pode ser visto na Tabela 35 é que, para calibrações com dados de entrada de vazões e pressões ao mesmo tempo, além de somente vazões, nenhuma função objetivo foi alcançada, algumas tiveram valores maiores que 1 e, para o MIGHA O com vazões em 9 trechos,

a função objetivo foi maior que 600. Isso complementa o observado anteriormente, ou seja, dados de vazões ou vazões e pressões simultaneamente não são adequados para a calibração do coeficiente C de Hazen-Williams.

Como esperado, uma vez que os resultados encontrados para calibrações com uso de pressões nos nós, como dados de entrada, foram bons, pode ser visto na Tabela 36 que, para todos os casos de pressões como dados de entrada, a função objetivo foi atingida. Ainda é possível perceber que, além de, geralmente, apresentar melhores resultados, a grande vantagem do MIGHA O em relação ao MIGHA C é o número de iterações necessário para atingir a função objetivo.

Nas Tabelas 37 e 38 são apresentados o número de iterações e o valor de função objetivo alcançados por cada caso simulado para um coeficiente C de Hazen-Williams inicial de $75 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$.

Da mesma forma que para o C inicial de $150 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$, para o C inicial de $75 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$, dados de vazões ou vazões e pressões simultaneamente não são adequados para a calibração do coeficiente C de Hazen-Williams. Já para dados de pressão nos nós da rede como entrada para a calibração, em todas as simulações a função objetivo foi atingida e, ainda, o MIGHA O precisou de menos iterações que o MIGHA C.

Tabela 37 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do C para C inicial de $75 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ na rede Porto (2006)

| Dados conhecidos: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|--------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 3 vazões e pressões | 100 | 270,7039448324 | 100 | 0,0001788761 |
| Vazão em 9 trechos | 100 | 4.848,0684043149 | 100 | 0,0000380570 |
| Vazão em 8 trechos | 100 | 319,9599302005 | 100 | 0,0000037643 |
| Vazão em 7 trechos | 100 | 241,0218065311 | 100 | 0,0000042346 |
| Vazão em 6 trechos | 100 | 1.124,7614784700 | 100 | 0,0000035005 |
| Vazão em 5 trechos | 100 | 574,3026311682 | 100 | 0,0000029168 |
| Vazão em 4 trechos | 100 | 574,3026311682 | 100 | 0,0000029168 |
| Vazão em 3 trechos | 100 | 0,0000278224 | 100 | 0,0000212624 |
| Vazão em 2 trechos | 100 | 0,0000275090 | 100 | 0,0000214665 |
| Vazão em 1 trecho | 100 | 0,0000090363 | 100 | 0,0000178207 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 38 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração do C para C inicial de $75 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ na rede Porto (2006)

| Dados conhecidos de pressão em: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 7 nós | 1 | 0,0000000001 | 2 | 0,0000000001 |
| 6 nós | 1 | 0,0000000001 | 2 | 0,0000000001 |
| 5 nós | 2 | 0,0000000000 | 3 | 0,0000000001 |
| 4 nós | 1 | 0,0000000002 | 2 | 0,0000000001 |
| 3 nós separados | 2 | 0,0000000000 | 29 | 0,0000000000 |
| 3 juntos | 1 | 0,0000000001 | 2 | 0,0000000000 |
| 2 nós separados | 2 | 0,0000000000 | 54 | 0,0000000000 |
| 2 nós juntos | 2 | 0,0000000002 | 4 | 0,0000000002 |
| 1 nó perto do Reservatório | 1 | 0,0000000000 | 2 | 0,0000000000 |
| 1 nó longe do Reservatório | 2 | 0,0000000001 | 8 | 0,0000000001 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas Tabelas 39 e 40 são apresentados o número de iterações e o valor de função objetivo alcançados por cada caso simulado para um coeficiente C de Hazen-Williams inicial de $5 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$.

Como visto na Tabela 39, dados de vazões ou vazões e pressões simultaneamente não geraram calibrações capazes de alcançar a função objetivo. Já para dados de pressão nos nós da rede como entrada para a calibração, isso ocorreu em alguns casos.

Tabela 39 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do C para C inicial de $5 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ na rede Porto (2006)

| Dados conhecidos: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---------------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 3 vazões e pressões | 100 | 2.206,2618434114 | 100 | 15,8810925960 |
| Vazão em 9 trechos | 100 | 1.394,5825477489 | 100 | 1,3447247520 |
| Vazão em 8 trechos | 100 | 529,7038729674 | 100 | 0,0748888462 |
| Vazão em 7 trechos | 100 | 695,5548881537 | 100 | 0,0720212435 |
| Vazão em 6 trechos | 100 | 1.421,1992124698 | 100 | 0,0781147136 |
| Vazão em 5 trechos | 100 | 637,8607903958 | 100 | 0,0595235147 |
| Vazão em 4 trechos | 100 | 637,8607896270 | 100 | 0,0595235147 |
| Vazão em 3 trechos | 100 | 0,0001165970 | 100 | 0,5069505780 |
| Vazão em 2 trechos | 100 | 0,0001336708 | 100 | 0,4686432518 |
| Vazão em 1 trecho | 100 | 0,0000067710 | 100 | 0,4442272804 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 40 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração do C para C inicial de $5 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ na rede Porto (2006)

| Dados conhecidos de pressão em: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 7 nós | 1 | 0,0000000001 | 2 | 0,0000000001 |
| 6 nós | 1 | 0,0000000000 | 2 | 0,0000000001 |
| 5 nós | 7 | 0,0000000001 | 100 | 1,5659680930 |
| 4 nós | 5 | 0,0000000000 | 100 | 9,0427298110 |
| 3 nós separados | 5 | 0,0000000002 | 100 | 3,1016901761 |
| 3 juntos | 17 | 0,0000000000 | 100 | 6,2193394839 |
| 2 nós separados | 7 | 0,0000000001 | 100 | 3,7847146949 |
| 2 nós juntos | 11 | 0,0000000002 | 100 | 4,8656449830 |
| 1 nó perto do Reservatório | 1 | 0,0000000001 | 2 | 0,0000000000 |
| 1 nó longe do Reservatório | 12 | 0,0000000002 | 100 | 10,4818170157 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o coeficiente C inicial de $5 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$, duas diferenças podem ser notadas observando a Tabela 40. A primeira é que o número de iterações necessárias para alcançar a função objetivo mínima foi maior que para os outros dois valores de C inicial testados. A segunda é, em alguns casos, o MIGHA C não foi capaz de alcançar a função objetivo.

Nas Tabelas 41 e 42 são apresentados o número de iterações e o valor de função objetivo alcançados por cada caso simulado para um coeficiente C de Hazen-Williams inicial calculado pela sub-rotina computacional desenvolvida.

Tabela 41 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do C para C inicial da sub-rotina computacional na rede Porto (2006)

| Dados conhecidos: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---------------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 3 vazões e pressões | 100 | 460,9474044952 | 100 | 0,0000127066 |
| Vazão em 9 trechos | 100 | 1.030,8442919289 | 100 | 0,0000053871 |
| Vazão em 8 trechos | 100 | 614,0530599757 | 100 | 0,0000012666 |
| Vazão em 7 trechos | 100 | 4.524,6716907844 | 100 | 0,0000012411 |
| Vazão em 6 trechos | 100 | 575,3718405265 | 100 | 0,0000012819 |
| Vazão em 5 trechos | 100 | 1.045,6304613985 | 100 | 0,0000009091 |
| Vazão em 4 trechos | 100 | 1.045,6304613988 | 100 | 0,0000009091 |
| Vazão em 3 trechos | 100 | 355,7308573330 | 100 | 0,0000019176 |
| Vazão em 2 trechos | 100 | 66,8081165785 | 100 | 0,0000019182 |
| Vazão em 1 trecho | 100 | 129,7070181845 | 100 | 0,0000015244 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 42 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração do C para C inicial da sub-rotina computacional na rede Porto (2006)

| Dados conhecidos de pressão em: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 7 nós | 2 | 0,0000000001 | 3 | 0,0000000001 |
| 6 nós | 2 | 0,0000000002 | 3 | 0,0000000000 |
| 5 nós | 2 | 0,0000000000 | 3 | 0,0000000000 |
| 4 nós | 2 | 0,0000000000 | 3 | 0,0000000001 |
| 3 nós separados | 3 | 0,0000000001 | 105 | 0,0000000000 |
| 3 juntos | 2 | 0,0000000001 | 3 | 0,0000000000 |
| 2 nós separados | 3 | 0,0000000001 | 30 | 0,0000000001 |
| 2 nós juntos | 3 | 0,0000000000 | 3 | 0,0000000001 |
| 1 nó perto do Reservatório | 2 | 0,0000000000 | 3 | 0,0000000000 |
| 1 nó longe do Reservatório | 4 | 0,0000000000 | 27 | 0,0000000001 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como aconteceu nos outros valores de C inicial, para dados de vazão ou vazão e pressão simultaneamente, a função objetivo não foi atingida em nenhum caso simulado. Já para as pressões nos nós como dados de entrada no processo de calibração, todas as funções objetivo foram alcançadas, com um número de iterações necessárias para o MIGHA O, menor que para o MIGHA C.

Considerando apenas o MIGHA O, o número de iterações necessárias foi um pouco maior que para os casos de C inicial igual a 150 ou 75 m^{0,367}/s.

4.2.1.2 Rede Walski (1983) – Gambale (2000)

Para a Calibração do coeficiente C de Hazen-Williams na rede Walski (1983) – Gambale (2000) foram realizadas 168 calibrações, sendo 84 pelo processo MIGHA C e 84 pelo MIGHA O.

Ao utilizar o coeficiente C de Hazen-Williams igual a 150 m^{0,367}/s, para a maioria dos nós da rede e ao se calibrar utilizando como dados de entrada pressões e vazões ao mesmo tempo, para a rede Walski (1983) – Gambale (2000), o procedimento MIGHA C apresentou resultados de pressão, vazão e coeficiente C mais próximos do valor gabarito do que o MIGHA O. Apesar disso, não se pode dizer que os resultados foram bons.

Neste caso, as diferenças entre os valores de pressão encontrados e os valores gabarito variaram de 0m, para o nó 2, usando tanto o MIGHA O quanto o MIGHA C, até 8,54m para o nó 7, usando o MIGHA O. Para as vazões, excluindo-se o trecho de saída do reservatório, que obrigatoriamente recebe toda a vazão consumida ao longo da rede, e o trecho 5, que recebe vazão consumida no seu nó de jusante (ponta seca), a menor diferença de vazão foi de 0,68 L/s nos trechos 9 e 10 e a maior foi de 92,15 L/s no trecho 3, todos ocorreram utilizando o MIGHA O. No caso das rugosidades encontradas a variação nos resultados foi bem maior, a diferença de coeficientes C de Hazen-Williams variou de 0,20 m^{0,367}/s até 200,98 m^{0,367}/s.

Assim, é possível perceber que, para dados de entrada de vazões e pressões ao mesmo tempo e coeficiente de rugosidade C de Hazen-Williams inicial para todos os trechos igual a 150 m^{0,367}/s, tanto o método MIGHA O quanto o MIGHA C não apresentaram bons resultados, não devendo ser utilizados sob estas condições.

Ao se calibrar a rugosidade, usando apenas vazões nos trechos como dados de entrada conhecidos, não foi possível visualizar melhora no aumento do número de trechos com vazões conhecidas, mas uma superioridade nos resultados do MIGHA C perante o MIGHA O. Esta superioridade deve acontecer por as rugosidades gabarito desta rede serem próximas de 150 m^{0,367}/s, e, ao manter a rugosidade da rede observada fixa, os valores encontrados não variam muito do gabarito. Para pressões, a menor diferença média foi de 1,26m para calibração com 1 e 3 vazões conhecidas e uso do MIGHA C e a maior diferença média entre as calibrações foi 215,28m para vazões em 4 trechos com MIGHA O.

Para vazões e rugosidades também é possível notar grandes variações entre os valores encontrados através da utilização do MIGHA C e do MIGHA O, no entanto, nenhum dos dois pode ser considerado adequado para a calibração do coeficiente C de Hazen-Williams utilizando apenas vazões nos trechos como dados de entrada. Apesar da diferença, mesmo o MIGHA C gerou grandes diferenças entre as rugosidades C calibradas e as rugosidades consideradas na rede gabarito.

Na Tabela 43 são apresentadas as diferenças médias entre as pressões, de todos os nós, vazões e rugosidades C, de todos os trechos, calculadas após a calibração e seus respectivos valores gabarito para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressões e vazões ao mesmo tempo, além de apenas vazões nos trechos.

Ao calibrar o coeficiente C de Hazen-Williams, considerando apenas pressões conhecidas nos nós da rede Walski (1983) – Gambale (2000), analisando as pressões e rugosidades encontradas, de forma geral, há uma piora dos resultados a medida em que se vai diminuindo o número de dados conhecidos na rede. Já para as vazões encontradas, a diminuição

do número de nós com pressões conhecidas não teve grande influência nos resultados encontrados.

Tabela 43 – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades C calculadas e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do C para C inicial de $150 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ na rede Walski (1983) – Gambale (2000)

| Dados conhecidos: | Diferença média | | | | | |
|---------------------|-----------------|-------|-----------------|-------|---|-------|
| | Pressões (m) | | Vazões (L/s) | | Rugosidade C ($\text{m}^{0,367}/\text{s}$) | |
| | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA |
| | O | C | O | C | O | C |
| 3 vazões e pressões | 3,05 | 0,61 | 34,99 | 10,70 | 103,22 | 76,00 |
| Vazão em 10 trechos | 3,06 | 1,36 | 31,14 | 4,54 | 123,47 | 59,21 |
| Vazão em 9 trechos | 33,05 | 1,37 | 30,15 | 4,55 | 93,60 | 58,80 |
| Vazão em 8 trechos | 16,93 | 1,37 | 31,13 | 4,55 | 80,35 | 58,66 |
| Vazão em 7 trechos | 42,02 | 1,36 | 31,93 | 4,88 | 78,07 | 56,72 |
| Vazão em 6 trechos | 42,01 | 1,36 | 31,93 | 4,88 | 78,68 | 56,72 |
| Vazão em 5 trechos | 42,00 | 1,36 | 31,93 | 4,88 | 79,17 | 56,68 |
| Vazão em 4 trechos | 215,28 | 1,27 | 23,12 | 2,59 | 65,59 | 42,50 |
| Vazão em 3 trechos | 215,23 | 1,26 | 23,12 | 2,59 | 66,09 | 42,49 |
| Vazão em 2 trechos | 1,44 | 1,29 | 3,50 | 4,33 | 56,12 | 55,12 |
| Vazão em 1 trecho | 9,10 | 1,26 | 34,70 | 5,82 | 49,17 | 78,65 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar o que acontece quando se tem dados conhecidos em nós juntos ou separados, além de, no caso de apenas 1 nó, este estar próximo ou longe do reservatório, os resultados encontrados mostraram que no caso de apenas 1 nó com dado de pressão conhecido, é melhor que este esteja longe do reservatório. No caso de dados em 3 nós, para os 3 parâmetros considerados, nós separados são melhores que juntos. Já para 2 nós, para rugosidades e vazões, os resultados foram melhores quando eles estavam separados, no caso da pressão, não houve influência. Assim, de forma geral, nós separados apresentam melhores resultados que juntos entre si.

Na Tabela 44 são mostradas as diferenças médias entre as pressões, de todos os nós, vazões e rugosidades C, de todos os trechos, calculadas após a calibração e seus respectivos valores gabarito para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressões nos nós. É possível perceber que, nesse caso, o MIGHA O obteve melhores resultados que o MIGHA C.

Ao observar a Tabela 44 percebe-se que o uso da metodologia aqui proposta para calibração do coeficiente C de Hazen-Williams, no caso da rede Walski (1983) – Gambale (2000) com coeficiente C inicial de $150 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$, quando se tem dados de pressão em 7 ou 6 nós, as

pressões encontradas geraram diferenças médias com as pressões gabarito de aproximadamente zero metros, ficando maior que 1m apenas quando se tem pressão conhecida em apenas um nó perto do reservatório. A maior diferença encontrada entre as pressões calculadas e gabarito foi de 2,07m no nó 5 para 1 nó perto do reservatório, valor este tanto para o MIGHA C quanto para o MIGHA O.

Tabela 44 – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades C calculadas e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração do C para C inicial de $150 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ na rede Walski (1983) – Gambale (2000)

| Dados conhecidos de pressão em: | Diferença média | | | | | |
|---------------------------------|-----------------|-------|--------------|-------|--|-------|
| | Pressões (m) | | Vazões (L/s) | | Rugosidade C ($\text{m}^{0,367}/\text{s}$) | |
| | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA |
| | O | C | O | C | O | C |
| 7 nós | 0,01 | 0,01 | 1,30 | 1,30 | 24,17 | 24,17 |
| 6 nós | 0,02 | 0,02 | 1,30 | 1,30 | 25,18 | 25,15 |
| 5 nós | 0,09 | 0,14 | 1,04 | 1,09 | 19,55 | 24,44 |
| 4 nós | 0,20 | 0,25 | 1,04 | 1,09 | 25,53 | 30,42 |
| 3 nós separados | 0,14 | 0,16 | 0,99 | 1,15 | 35,03 | 34,47 |
| 3 juntos | 0,64 | 0,64 | 1,32 | 1,32 | 35,03 | 35,03 |
| 2 nós separados | 0,43 | 0,56 | 1,19 | 1,23 | 19,80 | 23,28 |
| 2 nós juntos | 0,42 | 0,44 | 1,40 | 1,65 | 24,62 | 38,85 |
| 1 nó perto do Reservatório | 1,12 | 1,12 | 1,32 | 1,32 | 37,52 | 37,52 |
| 1 nó longe do Reservatório | 0,41 | 0,55 | 1,18 | 1,22 | 20,24 | 23,17 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para as vazões encontradas, em todas as situações, as diferenças médias com as vazões gabarito ficaram entre, aproximadamente, 1 e 2 L/s, não havendo grandes diferenças entre os métodos MIGHA O e MIGHA C. Excluindo-se os trechos 1 e 5, em que a vazão foi igual a gabarito em todos os casos simulados, a menor diferença de vazão foi de 0,15 L/s nos trechos 9 e 10 quando se tem dados de pressão em 3 nós separados entre si. A maior diferença foi de 4,27 L/s no trecho 2 pra dados de pressão em 2 nós juntos entre si.

Os coeficientes C de Hazen-Williams encontrados ao fim do processo de calibração foram muito bons em alguns trechos e, em outros, não apresentaram resultados tão bons. Como exemplo, para dados de pressão em todos os nós, 6 trechos apresentaram variações de valores de rugosidade C, entre o calibrado e o gabarito, menores que $7,5 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$, já os outros 4 trechos apresentaram diferenças maiores que $13,5 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ e, ainda para este caso, para o trecho 10, a diferença encontrada foi de $154,86 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$.

O próximo valor de coeficiente C testado no processo de calibração foi de 75 $m^{0,367}/s$. Ao utilizar este, como valor inicial, para a maioria dos nós da rede, e ao se calibrar utilizando como dados de entrada pressões e vazões ao mesmo tempo, o procedimento MIGHA O apresentou resultados de pressão mais próximos do valor gabarito do que o MIGHA C. O inverso ocorreu para vazões e coeficientes C nos trechos. Além disso, para este caso, os valores encontrados pelos dois métodos foram bem diferentes do gabarito.

Ao se calibrar a rugosidade, usando apenas vazões nos trechos como dados de entrada conhecidos, os resultados encontrados, ao se comparar os métodos MIGHA C e MIGHA O, mostraram que o primeiro foi melhor. No entanto, independentemente do método utilizado, não foi possível visualizar diferença de resultados ao se aumentar o número de trechos com vazões conhecidas. O que pode ser visto é que o uso de vazões na calibração do coeficiente C de Hazen-Willimas com C inicial igual a 75 $m^{0,367}/s$ gerou resultados ruins.

Na Tabela 45 são apresentadas as diferenças médias entre as pressões, de todos os nós, vazões e rugosidades C, de todos os trechos, calculadas após a calibração e seus respectivos valores gabarito para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressões e vazões ao mesmo tempo, além de apenas vazões nos trechos.

Tabela 45 – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades C calculadas e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do C para C inicial de 75 $m^{0,367}/s$ na rede Walski (1983)-Gambale (2000)

| Dados conhecidos: | Diferença média | | | | | |
|---------------------|-----------------|-------|-----------------|-------|-----------------------------------|-------|
| | Pressões (m) | | Vazões (L/s) | | Rugosidade C ($m^{0,367}/s$) | |
| | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA |
| | O | C | O | C | O | C |
| 3 vazões e pressões | 2,96 | 3,91 | 35,32 | 11,56 | 98,77 | 72,29 |
| Vazão em 10 trechos | 314,30 | 8,17 | 68,79 | 5,87 | 113,15 | 62,31 |
| Vazão em 9 trechos | 43,01 | 8,12 | 30,73 | 5,95 | 98,09 | 61,78 |
| Vazão em 8 trechos | 49,63 | 8,15 | 31,79 | 6,02 | 89,99 | 61,90 |
| Vazão em 7 trechos | 24,08 | 8,15 | 34,08 | 6,57 | 90,98 | 60,62 |
| Vazão em 6 trechos | 23,81 | 8,15 | 34,08 | 6,57 | 90,72 | 60,62 |
| Vazão em 5 trechos | 23,78 | 8,15 | 34,08 | 6,57 | 90,35 | 60,61 |
| Vazão em 4 trechos | 47,17 | 8,48 | 33,91 | 2,32 | 48,30 | 45,37 |
| Vazão em 3 trechos | 46,89 | 8,48 | 33,91 | 2,32 | 48,03 | 45,37 |
| Vazão em 2 trechos | 7,20 | 8,43 | 5,71 | 4,33 | 52,57 | 56,81 |
| Vazão em 1 trecho | 44,15 | 8,50 | 33,65 | 8,32 | 43,78 | 58,14 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao calibrar o coeficiente C de Hazen-Williams, considerando apenas pressões conhecidas nos nós da rede Walski (1983) – Gambale (2000), analisando as pressões, vazões e rugosidades encontradas, de forma geral, há uma piora dos resultados a medida em que se vai diminuindo o número de dados conhecidos na rede.

Ao analisar o que acontece quando se tem dados conhecidos em nós juntos ou separados, além de, no caso de apenas 1 nó, este estar próximo ou longe do reservatório, a localização dos nós com pressões conhecidas foi, em alguns casos, melhor para nós próximos entre si e, em outros, melhor quando estes estão separados.

Na Tabela 46 são mostradas as diferenças médias entre as pressões, de todos os nós, vazões e rugosidades C, de todos os trechos, calculadas após a calibração e seus respectivos valores gabarito para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressões nos nós. É possível perceber que, nesse caso, o MIGHA O também obteve melhores resultados que o MIGHA C.

Tabela 46 – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades C calculadas e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração do C para C inicial de $75 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ na rede Walski (1983)-Gambale (2000)

| Dados conhecidos de pressão em: | Diferença média | | | | | |
|---------------------------------|-----------------|---------|--------------|---------|--|---------|
| | Pressões (m) | | Vazões (L/s) | | Rugosidade C ($\text{m}^{0,367}/\text{s}$) | |
| | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C |
| 7 nós | 0,00 | 0,00 | 1,32 | 1,32 | 24,28 | 24,28 |
| 6 nós | 0,12 | 0,17 | 2,32 | 2,31 | 23,13 | 25,32 |
| 5 nós | 0,64 | 0,84 | 3,07 | 3,06 | 28,64 | 30,81 |
| 4 nós | 0,71 | 0,91 | 3,07 | 3,06 | 30,12 | 32,29 |
| 3 nós separados | 0,99 | 2,02 | 2,07 | 2,56 | 31,85 | 35,28 |
| 3 juntos | 2,88 | 2,90 | 1,61 | 1,62 | 24,31 | 36,16 |
| 2 nós separados | 3,68 | 4,42 | 2,64 | 2,73 | 44,89 | 35,17 |
| 2 nós juntos | 0,55 | 1,57 | 4,21 | 6,31 | 31,49 | 38,96 |
| 1 nó perto do Reservatório | 5,72 | 5,72 | 1,32 | 1,32 | 30,01 | 30,01 |
| 1 nó longe do Reservatório | 4,46 | 5,77 | 3,04 | 2,93 | 45,72 | 42,24 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao observar a Tabela 46 percebe-se que o uso da metodologia aqui proposta para calibração do coeficiente C de Hazen-Williams, no caso da rede Walski (1983) – Gambale (2000) com coeficiente C inicial de $75 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$, quando se tem dados de pressão em 7 nós, os resultados encontrados geraram diferenças médias entre as pressões de zero metros e, nesse caso, tanto

para o MIGHA O quanto para o MIGHA C, todas as pressões foram iguais aos valores gabarito. A maior diferença encontrada entre as pressões calculadas e gabarito foi de 9,91m no nó 8 para 1 nó longe do reservatório e uso do MIGHA C.

Para as vazões encontradas, as diferenças médias variaram de 1,32 até 6,31 L/s. Excluindo-se os trechos 1 e 5, em que a vazão foi igual a gabarito em todos os casos simulados, a menor diferença de vazão foi de 0,12 L/s nos trechos 9 e 10 quando se tem dados de pressão em 2 nós juntos entre si com uso do MIGHA O. A maior diferença foi de 15,39 L/s no trecho 7 para dados de pressão em 2 nós juntos entre si, mas com uso do MIGHA C.

Os coeficientes C de Hazen-Williams encontrados ao fim do processo de calibração foram muito bons em alguns trechos e, em outros, não apresentaram bons resultados. Como exemplo, para dados de pressão em todos os nós, 6 trechos apresentaram variações de valores de rugosidade C, entre o calibrado e o gabarito, menores que $7,5 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$, já os outros 4 trechos apresentaram diferenças maiores que $13,5 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$.

Ao considerar o coeficiente C de Hazen-Williams inicial igual a $5 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$, ao utilizar como dados de entrada pressões e vazões ao mesmo tempo, para o nó 2, as pressões calculadas após a calibração, tanto pelo MIGHA O quanto pelo MIGHA C, foram exatamente as mesmas pressões da rede gabarito. No entanto, para os outros nós, as pressões encontradas foram bem diferentes das pressões gabarito, sendo, a maioria delas, negativa. Da mesma forma, as vazões calculadas e os coeficientes C de Hazen-Williams calibrados não apresentaram bons resultados.

Usando apenas vazões nos trechos, independente de se utilizar o método MIGHA C ou o MIGHA O, obteve-se pressões negativas em todos os nós da rede. Além disso, as vazões e rugosidades encontradas nos trechos, para esta situação, também apresentaram valores bem distintos dos valores gabarito.

Nesse caso, para o coeficiente C de Hazen-Williams inicial igual a $5 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$, o uso de vazões ou vazões e pressões ao mesmo tempo na calibração do coeficiente C de Hazen-Williams não é adequado.

Ainda, o uso de valores extremamente baixos para rugosidades no início do processo de calibração torna os resultados piores, ou seja, para vazões ou vazões e pressões ao mesmo tempo na calibração do coeficiente C, o uso do C inicial igual a $5 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ gerou piores resultados que o uso do C inicial de 75 ou $150 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$. Na Tabela 47 são apresentadas as diferenças médias entre as pressões, de todos os nós, vazões e rugosidades C, de todos os trechos, calculadas após a calibração e seus respectivos valores gabarito para as calibrações

realizadas com dados de entrada de pressões e vazões ao mesmo tempo, além de apenas vazões nos trechos e, na Tabela 48, para dados de entrada de pressões nos nós.

Tabela 47 – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades C calculadas e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do C para C inicial de $5 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ na rede Walski (1983)-Gambale (2000)

| Dados conhecidos: | Diferença média | | | | | |
|---------------------|-----------------|----------|-----------------|-------|---|--------|
| | Pressões (m) | | Vazões (L/s) | | Rugosidade C ($\text{m}^{0,367}/\text{s}$) | |
| | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA |
| | O | C | O | C | O | C |
| 3 vazões e pressões | 174,48 | 1.012,78 | 33,49 | 9,51 | 102,93 | 89,42 |
| Vazão em 10 trechos | 1.622,71 | 1.880,63 | 62,64 | 25,54 | 89,90 | 117,65 |
| Vazão em 9 trechos | 1.563,90 | 1.875,18 | 43,14 | 25,20 | 96,46 | 119,40 |
| Vazão em 8 trechos | 1.420,40 | 1.876,86 | 38,47 | 25,60 | 87,73 | 117,76 |
| Vazão em 7 trechos | 1.361,34 | 1.875,41 | 41,18 | 25,91 | 90,33 | 118,94 |
| Vazão em 6 trechos | 1.318,79 | 1.874,99 | 41,18 | 25,91 | 90,31 | 118,94 |
| Vazão em 5 trechos | 1.316,15 | 1.874,97 | 41,18 | 25,91 | 90,29 | 118,94 |
| Vazão em 4 trechos | 4.123,64 | 2.026,86 | 17,44 | 2,20 | 99,20 | 106,97 |
| Vazão em 3 trechos | 4.081,08 | 2.026,45 | 17,44 | 2,20 | 99,18 | 106,97 |
| Vazão em 2 trechos | 1.800,23 | 2.019,32 | 6,86 | 3,68 | 112,89 | 107,62 |
| Vazão em 1 trecho | 4.480,21 | 2.029,15 | 18,91 | 8,17 | 106,90 | 105,54 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 48 – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades C calculadas e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração do C para C inicial de $5 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ na rede Walski (1983)-Gambale (2000)

| Dados conhecidos de pressão em: | Diferença média | | | | | |
|---------------------------------|-----------------|----------|-----------------|-------|---|--------|
| | Pressões (m) | | Vazões (L/s) | | Rugosidade C ($\text{m}^{0,367}/\text{s}$) | |
| | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA |
| | O | C | O | C | O | C |
| 7 nós | 0,00 | 0,00 | 1,32 | 1,32 | 24,30 | 24,30 |
| 6 nós | 4,09 | 28,44 | 19,07 | 20,38 | 71,78 | 75,83 |
| 5 nós | 196,20 | 234,97 | 5,96 | 5,96 | 62,07 | 62,26 |
| 4 nós | 233,40 | 272,17 | 5,96 | 5,96 | 70,56 | 70,75 |
| 3 nós separados | 207,30 | 462,48 | 3,82 | 3,83 | 68,56 | 91,20 |
| 3 juntos | 738,02 | 738,49 | 1,65 | 4,29 | 64,67 | 67,24 |
| 2 nós separados | 857,59 | 1.061,16 | 4,22 | 4,19 | 82,80 | 92,44 |
| 2 nós juntos | 134,85 | 764,28 | 7,59 | 4,10 | 75,21 | 93,77 |
| 1 nó perto do Reservatório | 1.421,57 | 1.421,57 | 1,32 | 1,32 | 93,01 | 93,01 |
| 1 nó longe do Reservatório | 824,21 | 1.416,19 | 5,08 | 5,15 | 110,45 | 104,96 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao calibrar o coeficiente C de Hazen-Williams, considerando apenas pressões conhecidas nos nós da rede Walski (1983) – Gambale (2000), percebe-se que, analisando todos os nós e trechos da rede, apenas quando se tem os dados de pressão em todos os nós da rede de distribuição se tem bons resultados. Para os outros casos, houveram muitas pressões negativas, vazões incompatíveis e coeficientes de rugosidade C com valores muito baixos. Dessa forma, o uso do coeficiente inicial C igual a $5 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ não é adequado para a calibração deste coeficiente.

Com o uso da sub-rotina computacional, para a escolha do coeficiente C de Hazen-Williams inicial, da mesma forma que quando se tinham valores determinados, o uso de vazões e pressões ao mesmo tempo, assim como o uso de apenas vazões, não geraram bons resultados.

É interessante notar que, para a metodologia MIGHA C , para quase todos os casos calibrados com vazões conhecidas, os valores de pressão encontrados foram os mesmos de quando se inicia o processo com C igual a $5 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$. Isso não aconteceu em nenhum caso, com uso do MIGHA O . No caso do uso da sub-rotina computacional e uso do MIGHA C , vale lembrar que para a rede Porto (2006), os valores de pressão encontrados foram os mesmos quando se iniciou o processo com C igual a $150 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$. A explicação disso é que para a rede Porto (2006), apesar de se utilizar a sub-rotina computacional para escolha do C inicial, como a calibração foi através do MIGHA C , a rede tinha todos os coeficientes C iguais a $150 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$. Isso faz com que a rede observada tenha C igual a $150 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ e, conseqüentemente, a rede calculada busque se igualar a isso. No caso da rede Walski (1983) – Gambale (2000), o C inicial utilizado em todos os trechos, na rede observada foi igual a $5 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$. Isso não ocorre com uso do MIGHA O pois, diferente do MIGHA C , tanto a rede calculada quanto a rede observada têm seus parâmetros variados para buscar a melhor aproximação inicial.

Independente do uso do MIGHA C ou MIGHA O , da mesma forma que aconteceu para os outros casos, a utilização, como dados de entrada, de pressões nos nós e vazões nos trechos ao mesmo tempo, além de apenas vazões nos trechos, não é adequada para a calibração do coeficiente C de Hazen-Williams.

Na Tabela 49 são mostradas as diferenças médias entre as pressões, de todos os nós, vazões e rugosidades C , de todos os trechos, calculadas após a calibração e seus respectivos valores gabarito para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos.

Tabela 49 – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades C calculadas e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do C para C inicial calculado através da sub-rotina computacional na rede Walski (1983)-Gambale (2000)

| Dados conhecidos: | Diferença média | | | | | |
|---------------------|---------------------|------------|-----------------|------------|-----------------------------------|------------|
| | Pressões (m) | | Vazões (L/s) | | Rugosidade C ($m^{0,367}/s$) | |
| | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C |
| | 3 vazões e pressões | 19,28 | 860,39 | 32,54 | 25,86 | 95,12 |
| Vazão em 10 trechos | 2.084,36 | 1.880,63 | 56,15 | 25,57 | 101,32 | 117,68 |
| Vazão em 9 trechos | 328,50 | 1.875,19 | 59,97 | 25,23 | 114,57 | 119,43 |
| Vazão em 8 trechos | 179,14 | 1.876,86 | 34,95 | 25,63 | 88,97 | 117,79 |
| Vazão em 7 trechos | 177,79 | 1.875,41 | 34,54 | 25,94 | 88,16 | 118,96 |
| Vazão em 6 trechos | 116,76 | 1.874,99 | 34,54 | 24,94 | 84,77 | 118,96 |
| Vazão em 5 trechos | 112,97 | 1.874,97 | 34,54 | 25,94 | 81,37 | 118,96 |
| Vazão em 4 trechos | 152,43 | 2.026,86 | 31,05 | 2,19 | 73,05 | 106,97 |
| Vazão em 3 trechos | 91,41 | 2.026,45 | 31,05 | 2,19 | 69,65 | 106,97 |
| Vazão em 2 trechos | 43,18 | 2.019,32 | 16,08 | 3,67 | 71,17 | 107,62 |
| Vazão em 1 trecho | 97,39 | 2.029,15 | 33,10 | 8,19 | 66,33 | 105,53 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao calibrar o coeficiente C de Hazen-Williams, considerando apenas pressões conhecidas nos nós da rede Walski (1983) – Gambale (2000), analisando as pressões encontradas, de forma geral, há uma piora dos resultados a medida em que se vai diminuindo o número de dados conhecidos na rede. As pressões encontradas foram boas considerando apenas o MIGHA O, já para o MIGHA C, os resultados foram ruins, sendo encontradas várias pressões negativas. Para as rugosidades calibradas, de forma geral, também há uma piora dos resultados a medida em que se vai diminuindo o número de dados conhecidos na rede. É interessante perceber que, para um maior número de dados conhecidos, as rugosidades calculadas com uso da sub-rotina computacional obtiveram os melhores resultados dentre os testados. Já para menos dados, as melhores rugosidades aconteceram para C inicial de $150 m^{0,367}/s$. Claro que considerando apenas o MIGHA O, já que, nesse caso, o MIGHA C não gerou bons resultados. Já para as vazões encontradas, de forma geral, a sub-rotina desenvolvida obteve melhores resultados, no entanto, a diminuição do número de nós com pressões conhecidas não teve grande influência nos resultados encontrados.

Ao analisar o que acontece quando se tem dados conhecidos em nós juntos ou separados, além de, no caso de apenas 1 nó, este estar próximo ou longe do reservatório, no caso das pressões encontradas, o uso da sub-rotina computacional para a escolha do C inicial

fez com que, em alguns casos, nós separados gerassem melhores resultados de pressão e, em outros, isso ocorresse com dados em nós juntos. Assim, a localização dos nós não gerou influência sobre resultados de pressão. O mesmo ocorreu para vazões e rugosidades encontradas.

Na Tabela 50 são mostradas as diferenças médias entre as pressões, de todos os nós, vazões e rugosidades C, de todos os trechos, calculadas após a calibração e seus respectivos valores gabarito para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressões nos nós.

Tabela 50 – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades C calculadas e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração do C para C inicial calculado através da sub-rotina computacional na rede Walski (1983)-Gambale (2000)

| Dados conhecidos de pressão em: | Diferença média | | | | | |
|------------------------------------|-----------------|------------|-----------------|------------|-----------------------------------|------------|
| | Pressões (m) | | Vazões (L/s) | | Rugosidade C ($m^{0,367}/s$) | |
| | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C |
| | | | | | | |
| 7 nós | 0,00 | 0,00 | 1,10 | 1,10 | 9,59 | 9,59 |
| 6 nós | 0,04 | 30,53 | 1,51 | 26,18 | 19,17 | 89,12 |
| 5 nós | 0,07 | 234,97 | 0,69 | 24,92 | 11,27 | 76,81 |
| 4 nós | 0,42 | 272,17 | 0,69 | 24,92 | 15,25 | 85,29 |
| 3 nós separados | 0,33 | 373,18 | 0,76 | 16,89 | 26,19 | 80,93 |
| 3 juntos | 0,56 | 738,49 | 1,11 | 4,34 | 18,36 | 67,58 |
| 2 nós separados | 1,48 | 1.008,44 | 1,40 | 12,41 | 27,99 | 85,64 |
| 2 nós juntos | 0,66 | 488,65 | 1,61 | 6,48 | 21,95 | 94,52 |
| 1 nó perto do Reservatório | 16,30 | 1.421,57 | 1,32 | 1,31 | 52,50 | 93,00 |
| 1 nó longe do Reservatório | 1,37 | 1.362,88 | 1,07 | 12,88 | 35,37 | 97,92 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao observar a Tabela 50 se percebe que o uso da metodologia aqui proposta para calibração do coeficiente C de Hazen-Williams, no caso da rede Walski (1983) – Gambale (2000) com coeficiente C inicial calculado pela sub-rotina computacional desenvolvida, quando se tem dados de pressão em 7, 6 ou 5 nós, com uso do MIGHA O, os resultados encontrados geraram diferenças médias entre as pressões de aproximadamente zero metros, ficando maior que 1m apenas quando se tem dados de pressão em 2 nós separados e para apenas 1 dado de pressão. A maior diferença encontrada entre as pressões calculadas e gabarito, considerando apenas o MIGHA O, foi de 24,82m no nó 8 para 1 nó perto do reservatório. Desprezando os casos com dados de pressão em apenas 1 nó, a maior diferença foi de 4,45m no nó 8 para 2 nós separados entre si.

Para as vazões encontradas, em todas as situações, também considerando apenas o MIGHA O, as diferenças com as vazões gabarito foram menores que 4 L/s (menor que 2% da vazão total da rede). Excluindo-se os trechos 1 e 5, em que as vazões foram iguais a gabarito em todos os casos simulados, a menor diferença de vazão foi de 0,01 L/s, isso ocorreu nos trechos 9 e 10 quando se tem dados de pressão em 7 nós. A maior diferença foi de 3,59 L/s no trecho 8 pra dados de pressão em 2 nós separados entre si.

Os coeficientes C de Hazen-Williams encontrados ao fim do processo de calibração foram muito bons em alguns trechos e, em outros, não apresentaram resultados tão bons. Como exemplo, para dados de pressão em todos os nós, 7 trechos apresentaram variações de valores de rugosidade C, entre o calibrado e o gabarito, menores que $6,5 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$, já os outros 3 trechos apresentaram diferenças maiores que $10 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$.

Para calibração do coeficiente C de Hazen-Williams na rede Walski (1983) – Gambale (2000) foram estabelecidas um máximo de 100 iterações. A função objetivo mínima a ser alcançada foi estabelecida com um valor de 0,000000001.

Nas Tabelas 51 e 52 podem ser vistos o número de iterações e o valor de função objetivo alcançados por cada caso simulado para um coeficiente C de Hazen-Williams inicial de $150 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$.

Tabela 51 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do C para C inicial de $150 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ na rede Walski (1983)-Gambale (2000)

| Dados conhecidos: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 3 vazões e pressões | 100 | 0,0001016481 | 100 | 0,0000076470 |
| Vazão em 10 trechos | 100 | 397,6691704518 | 100 | 0,0000016000 |
| Vazão em 9 trechos | 100 | 381,8528359776 | 100 | 0,0000013281 |
| Vazão em 8 trechos | 100 | 650,0686986217 | 100 | 0,0000013663 |
| Vazão em 7 trechos | 100 | 529,0215913515 | 100 | 0,0000017317 |
| Vazão em 6 trechos | 100 | 529,0215913514 | 100 | 0,0000017316 |
| Vazão em 5 trechos | 100 | 529,0215913514 | 100 | 0,0000017316 |
| Vazão em 4 trechos | 100 | 263,1574560771 | 100 | 0,0000002564 |
| Vazão em 3 trechos | 100 | 263,1574560770 | 100 | 0,0000002564 |
| Vazão em 2 trechos | 100 | 0,0422772706 | 100 | 0,0000001107 |
| Vazão em 1 trecho | 100 | 2,5577032929 | 100 | 0,0000000281 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

O que se encontra na Tabela 51 é que, para calibrações com dados de entrada de vazões e pressões ao mesmo tempo, além de somente vazões, nenhuma função objetivo foi alcançada, algumas tiveram valores maiores que 1 e, para o MIGHA O, em muitas calibrações a função objetivo foi maior que 200. Isso complementa o observado anteriormente, que dados de vazões ou vazões e pressões simultaneamente não são adequados para a calibração do coeficiente C de Hazen-Williams.

Como esperado, uma vez que os resultados encontrados, para calibrações com uso de pressões nos nós como dados de entrada, foram bons, pode ser visto na Tabela 52 que, para todos os casos de pressões com dados de entrada, a função objetivo foi atingida. Ainda é possível perceber que, além de, geralmente, apresentar melhores resultados, a grande vantagem do MIGHA O em relação ao MIGHA C é o número de iterações necessário para atingir a função objetivo.

Tabela 52 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração do C para C inicial de $150 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ na rede Walski (1983)-Gambale (2000)

| Dados conhecidos de pressão em: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 7 nós | 1 | 0,0000000003 | 2 | 0,0000000003 |
| 6 nós | 1 | 0,0000000003 | 2 | 0,0000000004 |
| 5 nós | 5 | 0,0000000007 | 5 | 0,0000000002 |
| 4 nós | 5 | 0,0000000007 | 5 | 0,0000000002 |
| 3 nós separados | 4 | 0,0000000001 | 7 | 0,0000000005 |
| 3 juntos | 1 | 0,0000000001 | 2 | 0,0000000001 |
| 2 nós separados | 3 | 0,0000000000 | 4 | 0,0000000002 |
| 2 nós juntos | 1 | 0,0000000001 | 8 | 0,0000000000 |
| 1 nó perto do Reservatório | 1 | 0,0000000000 | 2 | 0,0000000000 |
| 1 nó longe do Reservatório | 3 | 0,0000000001 | 5 | 0,0000000005 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas Tabelas 53 e 54 são apresentados o número de iterações e o valor de função objetivo alcançados por cada caso simulado para um coeficiente C de Hazen-Williams inicial de $75 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$.

Tabela 53 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do C para C inicial de $75 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ na rede Walski (1983)-Gambale (2000)

| Dados conhecidos: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|--------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 3 vazões e pressões | 100 | 69,2269717298 | 100 | 0,0001085050 |
| Vazão em 10 trechos | 100 | 1299,3779172343 | 100 | 0,0000206206 |
| Vazão em 9 trechos | 100 | 427,1790887719 | 100 | 0,0000177466 |
| Vazão em 8 trechos | 100 | 552,7595079069 | 100 | 0,0000186897 |
| Vazão em 7 trechos | 100 | 286,1237918539 | 100 | 0,0000235397 |
| Vazão em 6 trechos | 100 | 286,1237918539 | 100 | 0,0000235397 |
| Vazão em 5 trechos | 100 | 286,1237918539 | 100 | 0,0000235397 |
| Vazão em 4 trechos | 100 | 417,1153683538 | 100 | 0,0000032597 |
| Vazão em 3 trechos | 100 | 417,1153683538 | 100 | 0,0000032597 |
| Vazão em 2 trechos | 100 | 0,6039509139 | 100 | 0,0000015166 |
| Vazão em 1 trecho | 100 | 10,1455962386 | 100 | 0,0000001889 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 54 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração do C para C inicial de $75 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ na rede Walski (1983)-Gambale (2000)

| Dados conhecidos de pressão em: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|--|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 7 nós | 1 | 0,0000000001 | 2 | 0,0000000001 |
| 6 nós | 3 | 0,0000000003 | 4 | 0,0000000004 |
| 5 nós | 2 | 0,0000000002 | 3 | 0,0000000003 |
| 4 nós | 2 | 0,0000000002 | 3 | 0,0000000003 |
| 3 nós separados | 3 | 0,0000000008 | 100 | 0,0000245922 |
| 3 juntos | 2 | 0,0000000003 | 3 | 0,0000000001 |
| 2 nós separados | 3 | 0,0000000000 | 100 | 0,0000180893 |
| 2 nós juntos | 3 | 0,0000000001 | 7 | 0,0000000005 |
| 1 nó perto do Reservatório | 1 | 0,0000000000 | 2 | 0,0000000000 |
| 1 nó longe do Reservatório | 3 | 0,0000000000 | 100 | 0,0000147346 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Da mesma forma que para o C inicial de $150 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$, para o C inicial de $75 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$, dados de vazões ou vazões e pressões simultaneamente não são adequados para a calibração do coeficiente C de Hazen-Williams. Já para dados de pressão nos nós da rede como entrada para a calibração, em todas as simulações a função objetivo foi atingida para o uso do MIGHA O, já para o MIGHA C, no caso de dados separados entre si e para 1 nó distante do reservatório, a função objetivo não foi atingida. O MIGHA O precisou de menos iterações que o MIGHA C.

Nas Tabelas 55 e 56 estão o número de iterações e a função objetivo alcançados por cada caso simulado para um coeficiente C de Hazen-Williams inicial de $5 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$.

Tabela 55 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do C para C inicial de $5 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ na rede Walski (1983)-Gambale (2000)

| Dados conhecidos: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 3 vazões e pressões | 100 | 46,9059024442 | 100 | 10,9453382537 |
| Vazão em 10 trechos | 100 | 729,8045990552 | 100 | 0,7348312383 |
| Vazão em 9 trechos | 100 | 366,3674260528 | 100 | 0,6794886315 |
| Vazão em 8 trechos | 100 | 863,2344397938 | 100 | 0,6972654123 |
| Vazão em 7 trechos | 100 | 901,5798902557 | 100 | 0,8324906712 |
| Vazão em 6 trechos | 100 | 901,5798898557 | 100 | 0,8325137862 |
| Vazão em 5 trechos | 100 | 901,5798897567 | 100 | 0,8325137862 |
| Vazão em 4 trechos | 100 | 59,4725374275 | 100 | 0,0745217621 |
| Vazão em 3 trechos | 100 | 59,4725370311 | 100 | 0,0745217621 |
| Vazão em 2 trechos | 100 | 3,6354687889 | 100 | 0,0367261227 |
| Vazão em 1 trecho | 100 | 110,2379939894 | 100 | 0,0046206807 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 56 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração do C para C inicial de $5 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ na rede Walski (1983)-Gambale (2000)

| Dados conhecidos de pressão em: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 7 nós | 1 | 0,0000000000 | 2 | 0,0000000000 |
| 6 nós | 100 | 0,0003848971 | 100 | 0,0006615939 |
| 5 nós | 2 | 0,0000000002 | 3 | 0,0000000002 |
| 4 nós | 2 | 0,0000000002 | 3 | 0,0000000002 |
| 3 nós separados | 6 | 0,0000000005 | 100 | 0,3346272558 |
| 3 juntos | 2 | 0,0000000001 | 21 | 0,0000000001 |
| 2 nós separados | 5 | 0,0000000000 | 100 | 0,3184975105 |
| 2 nós juntos | 4 | 0,0000000002 | 100 | 1,2365155803 |
| 1 nó perto do Reservatório | 1 | 0,0000000000 | 2 | 0,0000000000 |
| 1 nó longe do Reservatório | 27 | 0,0000000000 | 100 | 0,6801305149 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como visto na Tabela 55, dados de vazões ou vazões e pressões simultaneamente não geraram calibrações capazes de alcançar a função objetivo. Para dados de pressão nos nós da rede como entrada para a calibração, em nem todas as simulações a função objetivo foi

atingida, 5 casos do MIGHA C e 1 do MIGHA O não alcançaram a função objetivo. Ainda assim, o MIGHA O precisou de menos iterações que o MIGHA C.

Assim, para o coeficiente C inicial de $5 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$, o número de iterações necessárias para alcançar a função objetivo mínima foi maior que para os outros dois valores de C inicial testados, além de maior número de casos que não foram capazes de alcançar a função objetivo.

Na Tabela 57 são apresentados o número de iterações e o valor de função objetivo alcançados por cada caso simulado, para dados de entrada de vazões e pressões simultaneamente e de apenas vazões, para um coeficiente C de Hazen-Williams inicial calculado pela sub-rotina computacional desenvolvida.

Tabela 57 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do C para C inicial da sub-rotina computacional na rede Walski (1983)-Gambale (2000)

| Dados conhecidos: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 3 vazões e pressões | 100 | 13,6540730499 | 100 | 10,2499966151 |
| Vazão em 10 trechos | 100 | 543,1418569494 | 100 | 0,7347816287 |
| Vazão em 9 trechos | 100 | 804,6811095461 | 100 | 0,6794099311 |
| Vazão em 8 trechos | 100 | 145,6014924009 | 100 | 0,6972299731 |
| Vazão em 7 trechos | 100 | 74,2103405220 | 100 | 0,8324433877 |
| Vazão em 6 trechos | 100 | 74,2103405176 | 100 | 0,8324433877 |
| Vazão em 5 trechos | 100 | 74,2103405164 | 100 | 0,8324433877 |
| Vazão em 4 trechos | 100 | 7,8846950669 | 100 | 0,0745272196 |
| Vazão em 3 trechos | 100 | 7,8846950623 | 100 | 0,0745217625 |
| Vazão em 2 trechos | 100 | 293,9409060871 | 100 | 0,0367404337 |
| Vazão em 1 trecho | 100 | 27,0035669993 | 100 | 0,0046252626 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como aconteceu nos outros valores de C inicial, para dados de vazão ou vazão e pressão simultaneamente, a função objetivo não foi atingida em nenhum caso simulado. Já para dados de pressão nos nós da rede como entrada para a calibração, em todas as simulações a função objetivo foi atingida para o uso do MIGHA O, já para o MIGHA C, 5 casos não alcançaram a função objetivo. O MIGHA O precisou de menos iterações que o MIGHA C.

Na Tabela 58 são apresentados o número de iterações e o valor de função objetivo alcançados por cada caso simulado, considerando dados de entrada de pressão nos nós, para um coeficiente C de Hazen-Williams inicial calculado pela sub-rotina computacional desenvolvida.

Tabela 58 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração do C para C inicial da sub-rotina computacional na rede Walski (1983)-Gambale (2000)

| Dados conhecidos de pressão em: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 7 nós | 3 | 0,0000000008 | 4 | 0,0000000008 |
| 6 nós | 3 | 0,0000000006 | 100 | 0,0022806592 |
| 5 nós | 5 | 0,0000000005 | 10 | 0,0000000001 |
| 4 nós | 5 | 0,0000000005 | 10 | 0,0000000001 |
| 3 nós separados | 2 | 0,0000000000 | 100 | 0,2880855925 |
| 3 juntos | 2 | 0,0000000001 | 42 | 0,0000000000 |
| 2 nós separados | 3 | 0,0000000000 | 100 | 0,2938168897 |
| 2 nós juntos | 2 | 0,0000000002 | 100 | 0,0402367761 |
| 1 nó perto do Reservatório | 2 | 0,0000000000 | 3 | 0,0000000001 |
| 1 nó longe do Reservatório | 2 | 0,0000000000 | 100 | 1,0638790009 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.1.3 Rede C-Town: Battle of Calibration (2012)

Para a Calibração do coeficiente C de Hazen-Williams na rede C-Town foram realizadas 10 calibrações, sendo 5 pelo processo MIGHA C e 5 pelo MIGHA O.

Analisando os resultados de pressão encontrados para dados de entrada de pressão em todos os nós da rede, a maior diferença entre as pressões encontradas após o processo de calibração e as pressões gabarito foi de 4,98m, tanto para o uso do MIGHA C quanto para o MIGHA O. Apesar do valor máximo, neste caso, a diferença média entre as citadas pressões para os 388 nós da rede de distribuição C-Town foi de 0,67m para o MIGHA O e 0,77m para o MIGHA C. Considerando os valores de vazão encontrados, a máxima diferença em relação aos valores gabarito foi de 3,44 L/s para o MIGHA O e 5,03 L/s para o MIGHA C. Já as diferenças médias foram de 0,31 L/s e 0,39 L/s, respectivamente. Já para as rugosidades C encontradas, as diferenças máximas foram 143,64 $m^{0,367}/s$ para o MIGHA O e 105,46 $m^{0,367}/s$ para o MIGHA C, no entanto, as diferenças médias foram 9,95 $m^{0,367}/s$ e 11,60 $m^{0,367}/s$, respectivamente. Assim, apesar de que boas rugosidades não foram encontradas em todos os trechos, de forma geral, o uso de todas as pressões nos nós como dados de entrada gerou bons resultados.

Considerando dados de entrada de pressão em 13 nós da rede de distribuição, a maior diferença entre as pressões encontradas após o processo de calibração e as pressões gabarito foi de 231,5m para o uso do MIGHA O, já com o uso do MIGHA C foi de 13m. Para

o MIGHA O, a diferença média entre as citadas pressões para os 388 nós da rede de distribuição C-Town foi de 24,33m e para o MIGHA C, 2,96m. Para as vazões, a máxima diferença em relação aos valores gabarito foi de 113,36 L/s para o MIGHA O e 88,23 L/s para o MIGHA C. Já as diferenças médias foram de 8,07 L/s e 7,04 L/s, respectivamente. Já para as rugosidades C encontradas, as diferenças máximas foram 289,33 $m^{0,367}/s$ para o MIGHA O e 218,30 $m^{0,367}/s$ para o MIGHA C, ainda, as diferenças médias foram 70,55 $m^{0,367}/s$ e 30,86 $m^{0,367}/s$, respectivamente. Nesse caso, a entrada de um número de dados de pressão em menos de 5% do número de nós da rede não gerou uma boa calibração.

Quando se tem dados de entrada em 13 nós e de vazão em 12 trechos da rede, a maior diferença entre as pressões encontradas após o processo de calibração e as pressões gabarito foi de 2.964,23m para o uso do MIGHA O, já com o uso do MIGHA C foi de 24,15m. Para o MIGHA O, a diferença média entre as citadas pressões para os 388 nós da rede de distribuição C-Town foi de 354,41m e para o MIGHA C foi de 5,59m. Para as vazões, os resultados também foram muito ruins, a máxima diferença em relação aos valores gabarito foi de 103,34 L/s para o MIGHA O e 124,59 L/s para o MIGHA C. Já as diferenças médias foram de 8,31 L/s e 9,10 L/s, respectivamente. Já para as rugosidades C encontradas, as diferenças máximas foram 233,12 $m^{0,367}/s$ para o MIGHA O e 220,47 $m^{0,367}/s$ para o MIGHA C, ainda, as diferenças médias foram 66,44 $m^{0,367}/s$ e 31,09 $m^{0,367}/s$, respectivamente. Para este caso, adicionar dados de vazão, além das 13 pressões já utilizadas, piorou ainda mais os resultados encontrados.

Ao utilizar apenas a vazão em 12 trechos da rede, como entrada do processo de calibração, a maior diferença entre as pressões encontradas após o processo de calibração e as pressões gabarito foi de 2.800,68m para o uso do MIGHA O, no entanto, com o uso do MIGHA C, foi de 7,78m. Para o MIGHA O, a diferença média entre as citadas pressões para os 388 nós da rede de distribuição C-Town foi de 314,57m e para o MIGHA C foi de 1,08m. Para as vazões, os resultados também foram muito ruins para o MIGHA O e consideráveis para o MIGHA C, a máxima diferença em relação aos valores gabarito foi de 110,17 L/s para o MIGHA O e 12,14 L/s para o MIGHA C. Já as diferenças médias foram de 7,69 L/s e 1,07 L/s, respectivamente. Para as rugosidades C encontradas, as diferenças máximas foram 284,75 $m^{0,367}/s$ para o MIGHA O e 102,49 $m^{0,367}/s$ para o MIGHA C, já as diferenças médias foram 15,52 $m^{0,367}/s$ e 13,45 $m^{0,367}/s$, respectivamente. Diferente do que se esperava, o uso de 12 trechos com vazões conhecidas gerou, aparentemente, resultados ruins para o MIGHA O e bons resultados para o MIGHA C, no entanto, os valores médios elevados com uso do MIGHA O se deu pelo fato de

que, dos 388 nós da rede, em 43 deles os resultados de pressão encontrados foram extremamente ruins, podendo os outros serem considerados bons.

Por fim, ao utilizar a vazão em todos os trechos da rede, como entrada do processo de calibração, a maior diferença entre as pressões encontradas após o processo de calibração e as pressões gabarito foi de 11.078,23m para o uso do MIGHA O, no entanto, com o uso do MIGHA C, foi de 8,32m. Para o MIGHA O, a diferença média entre as citadas pressões para os 388 nós da rede de distribuição C-Town foi de 4.754,95m e para o MIGHA C foi de 1,25m. Para as vazões, a máxima diferença em relação aos valores gabarito foi de 107,77 L/s para o MIGHA O e 56,41 L/s para o MIGHA C. Já as diferenças médias foram de 9,79 L/s e 3,93 L/s, respectivamente. Para as rugosidades C encontradas, as diferenças máximas foram 277,37 $m^{0,367}/s$ para o MIGHA O e 226,14 $m^{0,367}/s$ para o MIGHA C, já as diferenças médias foram 95,20 $m^{0,367}/s$ e 50,56 $m^{0,367}/s$, respectivamente. O uso de todos os trechos com vazões conhecidas não gerou bons resultados. Diferente do que aconteceu no caso anterior, para o MIGHA O, muitos nós apresentaram pressões extremamente ruins.

É interessante notar que em nenhum caso, considerando os diferentes dados de entrada iniciais simulados, as pressões encontradas com o uso do MIGHA C foram negativas. Provavelmente, isso ocorre devido a rede observada, utilizada como entrada e objetivo da rede calculada, não apresentar pressões negativas no formato inicial. Para alguns casos, isso pode ser considerado uma vantagem do MIGHA C perante o MIGHA O, apesar de que para o melhor caso simulado, pressões em todos os nós, o MIGHA O apresentou melhores resultados.

Na Tabela 59 podem ser vistos o número de iterações e a função objetivo alcançada em cada simulação.

Tabela 59 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada – Calibração do C na rede C-Town

| Dados conhecidos | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---|-----------------|--------------------|-----------------|-----------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| Pressão em todos os nós | 1.000 | 0,0113146545 | 1.000 | 0,0113062377 |
| Pressão em 13 nós | 1.000 | 3,2054955290 | 1.000 | 0,0252966360 |
| Pressão em 13 nós e vazão em 12 trechos | 1.000 | 22.527,9711398931 | 1.000 | 0,0047615802 |
| Vazão em 12 trechos | 1.000 | 49.465,4018413375 | 1.000 | 0,0000000024 |
| Vazão em todos os trechos | 1.000 | 101.541,0151831960 | 1.000 | 0,0004575506 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Mesmo que, em alguns dos casos simulados, os resultados encontrados tenham sido bons, em nenhum deles, a máxima função objetivo foi atingida. Para estes casos, foram realizadas 1.000 iterações. Apesar de que os melhores resultados ocorreram nas calibrações que alcançaram os menores valores de função objetiva, não necessariamente o melhor resultado teve a menor função objetiva.

4.2.1.4 Rede MIGHA

Para a Calibração do coeficiente C de Hazen-Williams na rede MIGHA foram realizadas 10 calibrações, sendo 5 pelo processo MIGHA C e 5 pelo MIGHA O.

Analisando os resultados para dados de entrada de pressão em todos os nós da rede, o método MIGHA O e o MIGHA C apresentaram os mesmos resultados, tanto para os trechos quanto para os nós. No caso das pressões encontradas após a calibração, estas coincidiram exatamente com as pressões gabarito em todos os nós. Considerando os valores de vazão encontrados, a máxima diferença em relação aos valores gabarito foi de 2,07 L/s, já a diferença média foi de 0,25 L/s. Para as rugosidades C encontradas, a diferença máxima foi de 229,03 $m^{0,367}/s$ e a diferença média foi de 30,45 $m^{0,367}/s$. Nota-se que, apesar de ótimos resultados de pressão e bons resultados de vazão, as rugosidades encontradas não foram tão boas. Isso mostra que o processo de calibração pode encontrar mais de uma configuração de rugosidades que gere as mesmas pressões e vazões.

Considerando dados de entrada de pressão em 15 nós da rede de distribuição, a maior diferença entre as pressões encontradas após o processo de calibração e as pressões gabarito foi de 1,60m para o uso do MIGHA O, já com o uso do MIGHA C foi de 1,64m. Para o MIGHA O, a diferença média entre as citadas pressões para os 290 nós da rede de distribuição MIGHA foi de 0,46m e para o MIGHA C, 0,51m. Para as vazões, a máxima diferença em relação aos valores gabarito foi de 2,05 L/s para o MIGHA O e 2,06 L/s para o MIGHA C. Já as diferenças médias foram de 0,29 L/s e 0,30 L/s, respectivamente. Já para as rugosidades C encontradas, as diferenças máximas foram 187,10 $m^{0,367}/s$ para o MIGHA O e 180,85 $m^{0,367}/s$ para o MIGHA C, ainda, as diferenças médias foram 31,57 $m^{0,367}/s$ e 38,00 $m^{0,367}/s$, respectivamente. Da mesma forma que ocorreu para dados de entrada em todos os nós, a entrada de um número de dados de pressão em 5% do número de nós da rede no processo de calibração gerou bons resultados de pressão e vazão, mas não de rugosidades.

Quando se tem dados de entrada de pressão em 15 nós e de vazão em 14 trechos da rede, a maior diferença entre as pressões encontradas após o processo de calibração e as

pressões gabarito foi de 1,71m para o uso do MIGHA O, já com o uso do MIGHA C foi de 1,64m. Para o MIGHA O, a diferença média entre as citadas pressões para os 290 nós da rede MIGHA foi de 0,51m e para o MIGHA C foi de 0,52m. Para as vazões, a máxima diferença em relação aos valores gabarito foi de 3,92 L/s para o MIGHA O e 13,69 L/s para o MIGHA C. Já as diferenças médias foram de 0,37 L/s e 0,75 L/s, respectivamente. Já para as rugosidades C encontradas, as diferenças máximas foram $217,74 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ para o MIGHA O e $232,97 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ para o MIGHA C, ainda, as diferenças médias foram $36,17 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ e $61,64 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$, respectivamente. Para este caso, adicionar dados de vazão, além das 15 pressões já utilizadas, piorou um pouco os resultados encontrados para o MIGHA O, mas piorou um pouco mais no caso do MIGHA C.

Ao utilizar apenas a vazão em 14 trechos da rede, como entrada do processo de calibração, a maior diferença entre as pressões encontradas após o processo de calibração e as pressões gabarito foi de 13,37m para o uso do MIGHA O e, com o uso do MIGHA C, foi de 13,35m. Para o MIGHA O, a diferença média entre as citadas pressões para todos os nós da rede foi de 7,68m e para o MIGHA C foi de 7,70m. Para as vazões, os resultados foram consideráveis para o MIGHA O, entretanto, foram um pouco pior para o MIGHA C, a máxima diferença em relação aos valores gabarito foi de 3,68 L/s para o MIGHA O e 9,03 L/s para o MIGHA C. Já as diferenças médias foram de 0,36 L/s e 0,57 L/s, respectivamente. Para as rugosidades C encontradas, as diferenças máximas foram $218,21 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ para o MIGHA O e $230,84 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ para o MIGHA C, já as diferenças médias foram $48,31 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ e $72,35 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$, respectivamente.

Por fim, ao utilizar a vazão em todos os trechos da rede, como entrada do processo de calibração, a maior diferença entre as pressões encontradas após o processo de calibração e as pressões gabarito foi de 134,01m para o uso do MIGHA O, no entanto, com o uso do MIGHA C, foi de 13,17m. Para o MIGHA O, a diferença média entre as citadas pressões da rede de distribuição foi de 13,06m e para o MIGHA C foi de 7,59m. Para as vazões, a máxima diferença em relação aos valores gabarito foi de 40,52 L/s para o MIGHA O e 13,76 L/s para o MIGHA C. Já as diferenças médias foram de 2,51 L/s e 1,44 L/s, respectivamente. Para as rugosidades C encontradas, as diferenças máximas foram $231,85 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ para o MIGHA O e $233,92 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ para o MIGHA C, já as diferenças médias foram $119,91 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ e $114,78 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$, respectivamente. O uso de todos os trechos com vazões conhecidas não gerou bons resultados.

No caso da rede MIGHA, a calibração com dados de entrada de vazão em todos os trechos da rede e uso do MIGHA O, foi o único caso que apresentou pressões negativas em seus resultados. Pela experiência das redes anteriores, isso ocorreu devido à inconsistência do uso

de vazões na calibração do C de Hazen-Williams e, não ocorreu para o MIGHA C, provavelmente, como na rede C-Town, devido a rede observada, utilizada como entrada e objetivo da rede calculada, não apresentar pressões negativas no formato inicial, C inicial de $150 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$.

Apesar de que, apenas no caso da entrada de pressão em 15 nós da rede com uso do MIGHA O a função objetivo ter sido atingida, este não foi o melhor resultado. Como esperado, o melhor resultado ocorreu ao se fornecer como entrada as pressões em todos os nós da rede de distribuição. Neste caso, apesar da função objetivo não ter sido atingida, a diferença foi extremamente pequena.

Na Tabela 60 podem ser vistos o número de iterações e a função objetivo alcançada em cada simulação.

Tabela 60 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada – Calibração do C na rede MIGHA

| Dados conhecidos | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---|-----------------|--------------------|-----------------|-----------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| Pressão em todos os nós | 1000 | 0,0000000023 | 1000 | 0,0000000023 |
| Pressão em 15 nós | 4 | 0,0000000007 | 1000 | 0,0000000066 |
| Pressão em 15 nós e vazão em 14 trechos | 1000 | 1.058,9376739836 | 1000 | 0,0005524579 |
| Vazão em 14 trechos | 1000 | 30,4682941978 | 1000 | 0,0000148329 |
| Vazão em todos os trechos | 1000 | 369.526,5576918600 | 1000 | 0,0037206902 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.1.5 Resumo dos resultados da calibração do coeficiente C de Hazen-Williams

Nas Tabelas 61 à 70 são apresentados o resumo dos resultados encontrados na realização das calibrações do coeficiente C de Hazen-Williams.

Tabela 61 – Resumo dos resultados da calibração do C de Hazen-Williams na rede Porto (2006) com C inicial de 150 m^{0,367}/s

| Situação | Pressões | Vazões | Rugosidades | Geral |
|--------------------------------|-----------|-------------|-------------|---|
| Pressões e vazões | Razoável | Ruim | Ruim | Não é adequado. |
| Vazões | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. |
| Pressões | Bom | Bom | Bom | Bons resultados. Adequado. |
| Nós juntos ou separados | Separados | Indiferente | Indiferente | Separados. |
| MIGHA C ou MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O |
| Rugosidade inicial | Bom | Bom | Bom | Adequado. |
| Função objetivo | - | - | - | Não atendeu em nenhum caso para pressões e vazões ou apenas vazões. Atendeu todos os casos para pressões. |
| Nº de iterações | - | - | - | Q e QP: MIGHA O - 100; MIGHA C - 100 P: MIGHA O - 1,6; MIGHA C - 18,5 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 62 – Resumo dos resultados da calibração do C de Hazen-Williams na rede Porto (2006) com C inicial de 75 m^{0,367}/s

| Situação | Pressões | Vazões | Rugosidades | Geral |
|--------------------------------|-----------|-------------|-------------|---|
| Pressões e vazões | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. |
| Vazões | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. |
| Pressões | Bom | Bom | Bom | Bons resultados. Adequado. |
| Nós juntos ou separados | Separados | Indiferente | Indiferente | Separados. |
| MIGHA C ou MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O |
| Rugosidade inicial | Bom | Bom | Bom | Adequado. |
| Função objetivo | - | - | - | Não atendeu em nenhum caso para pressões e vazões ou apenas vazões. Atendeu todos os casos para pressões. |
| Nº de iterações | - | - | - | Q e QP: MIGHA O - 100; MIGHA C - 100 P: MIGHA O - 1,5; MIGHA C - 10,8 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 63 – Resumo dos resultados da calibração do C de Hazen-Williams na rede Porto (2006) com C inicial de $5 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$

| Situação | Pressões | Vazões | Rugosidades | Geral |
|--------------------------------|-------------|-------------|-------------|---|
| Pressões e vazões | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. |
| Vazões | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. |
| Pressões | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. Os resultados encontrados só foram bons quando se tinha pressões conhecidas em todos os nós. |
| Nós juntos ou separados | Indiferente | Indiferente | Indiferente | Indiferente. |
| MIGHA C ou MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O |
| Rugosidade inicial | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. |
| Função objetivo | - | - | - | Não atendeu em nenhum caso para pressões e vazões ou apenas vazões. Atendeu todos os casos para pressões MIGHA O e 3 MIGHA C. |
| Nº de iterações | - | - | - | Q e QP: MIGHA O - 100; MIGHA C - 100 P: MIGHA O - 6,7; MIGHA C - 70,6 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 64 – Resumo dos resultados da calibração do C de Hazen-Williams na rede Porto (2006) com C inicial calculado através da sub-rotina computacional

| Situação | Pressões | Vazões | Rugosidades | Geral |
|--------------------------------|-------------|-------------|-------------|---|
| Pressões e vazões | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. |
| Vazões | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. |
| Pressões | Bom | Bom | Bom | Bons resultados. Adequado. |
| Nós juntos ou separados | Indiferente | Indiferente | Indiferente | Indiferente. |
| MIGHA C ou MIGHA O | Indiferente | Indiferente | MIGHA O | MIGHA O |
| Rugosidade inicial | Bom | Bom | Bom | Adequado. |
| Função objetivo | - | - | - | Não atendeu em nenhum caso para pressões e vazões ou apenas vazões. Atendeu todos os casos para pressões. |
| Nº de iterações | - | - | - | Q e QP: MIGHA O - 100; MIGHA C - 100 P: MIGHA O - 2,5; MIGHA C - 18,3 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 65 – Resumo dos resultados da calibração do C de Hazen-Williams na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com C inicial de 150 m^{0,367}/s

| Situação | Pressões | Vazões | Rugosidades | Geral |
|--------------------------------|-----------|-----------|-------------|---|
| Pressões e vazões | Razoável | Ruim | Ruim | Não é adequado. |
| Vazões | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. |
| Pressões | Bom | Bom | Bom | Bons resultados. Adequado. |
| Nós juntos ou separados | Separados | Separados | Separados | Separados. |
| MIGHA C ou MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O |
| Rugosidade inicial | Bom | Bom | Bom | Adequado. |
| Função objetivo | - | - | - | Não atendeu em nenhum caso para pressões e vazões ou apenas vazões. Atendeu todos os casos para pressões. |
| Nº de iterações | - | - | - | Q e QP: MIGHA O - 100; MIGHA C - 100 P: MIGHA O - 2,5; MIGHA C - 4,2 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 66 – Resumo dos resultados da calibração do C de Hazen-Williams na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com C inicial de 75 m^{0,367}/s

| Situação | Pressões | Vazões | Rugosidades | Geral |
|--------------------------------|-------------|-------------|-------------|---|
| Pressões e vazões | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. |
| Vazões | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. |
| Pressões | Bom | Bom | Bom | Bons resultados. Adequado. |
| Nós juntos ou separados | Indiferente | Indiferente | Indiferente | Indiferente. |
| MIGHA C ou MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O |
| Rugosidade inicial | Bom | Bom | Bom | Adequado. |
| Função objetivo | - | - | - | Não atendeu em nenhum caso para pressões e vazões ou apenas vazões. Atendeu todos os casos para pressões MIGHA O e 7 MIGHA C. |
| Nº de iterações | - | - | - | Q e QP: MIGHA O - 100; MIGHA C - 100 P: MIGHA O - 2,3; MIGHA C - 32,4 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 67 – Resumo dos resultados da calibração do C de Hazen-Williams na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com C inicial de $5 \text{ m}^{0,367/\text{s}}$

| Situação | Pressões | Vazões | Rugosidades | Geral |
|--------------------------------|-------------|-------------|-------------|---|
| Pressões e vazões | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. |
| Vazões | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. |
| Pressões | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. Os resultados encontrados só foram bons quando se tinha pressões conhecidas em todos os nós. |
| Nós juntos ou separados | Indiferente | Indiferente | Indiferente | Indiferente. |
| MIGHA C ou MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O |
| Rugosidade inicial | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. |
| Função objetivo | - | - | - | Não atendeu em nenhum caso para pressões e vazões ou apenas vazões. Só atendeu 9 casos para pressões MIGHA O e 5 MIGHA C. |
| Nº de iterações | - | - | - | Q e QP: MIGHA O - 100; MIGHA C - 100 P: MIGHA O - 15; MIGHA C - 53,1 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 68 – Resumo dos resultados da calibração do C de Hazen-Williams na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com C inicial calculado através da sub-rotina computacional

| Situação | Pressões | Vazões | Rugosidades | Geral |
|--------------------------------|-------------|-------------|-------------|---|
| Pressões e vazões | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. |
| Vazões | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. |
| Pressões | Bom | Bom | Bom | Bons resultados com o MIGHA O. Adequado. |
| Nós juntos ou separados | Indiferente | Indiferente | Indiferente | Indiferente. |
| MIGHA C ou MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O |
| Rugosidade inicial | Bom | Bom | Bom | Adequado para o MIGHA O. |
| Função objetivo | - | - | - | Não atendeu em nenhum caso para pressões e vazões ou apenas vazões. Atendeu todos os casos para pressões MIGHA O e 5 MIGHA C. |
| Nº de iterações | - | - | - | Q e QP: MIGHA O - 100; MIGHA C - 100 P: MIGHA O - 2,9; MIGHA C - 56,9 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 69 – Resumo dos resultados da calibração do C de Hazen-Williams na rede C-Town com C inicial de $100 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$

| Situação | Pressões | Vazões | Rugosidades | Geral |
|----------------------------|----------|----------|-------------|---|
| Pressões em todos os nós | Bom | Bom | Bom | Adequado. Melhor: MIGHA O |
| Pressões em 13 nós | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. Melhor: MIGHA C |
| Pressões e vazões | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. Ao adicionar vazões como entrada os resultados pioram. Melhor: MIGHA C |
| Vazões em 12 trechos | Razoável | Razoável | Razoável | Não é adequado. Os bons resultados encontrados se deve pelo fato de a rede ter sido pouco alterada. Melhor: MIGHA C |
| Vazões em todos os trechos | Razoável | Ruim | Ruim | Não é adequado. Melhor: MIGHA C |
| MIGHA C ou MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O |
| Rugosidade inicial | Bom | Bom | Bom | Adequado. |
| Função objetivo | - | - | - | Não atendeu em nenhum caso. A menor função objetivo não ocorreu para a melhor situação. |
| Nº de iterações | - | - | - | 1000 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 70 – Resumo dos resultados da calibração do C de Hazen-Williams na rede MIGHA com C inicial de $150 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$

| Situação | Pressões | Vazões | Rugosidades | Geral |
|----------------------------|----------|----------|-------------|--|
| Pressões em todos os nós | Bom | Bom | Razoável | Adequado. MIGHA O e MIGHA C iguais. |
| Pressões em 15 nós | Bom | Bom | Razoável | Adequado. Melhor: MIGHA O |
| Pressões e vazões | Bom | Bom | Razoável | Não é adequado. Ao adicionar vazões como entrada os resultados pioram. Melhor: MIGHA O |
| Vazões em 14 trechos | Ruim | Razoável | Ruim | Não é adequado. Melhor: MIGHA O |
| Vazões em todos os trechos | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. Melhor: MIGHA C |
| MIGHA C ou MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O |
| Rugosidade inicial | Bom | Bom | Bom | Adequado. |
| Função objetivo | - | - | - | Só atendeu para pressões em 15 nós com o MIGHA O. O melhor caso, pressões em todos os nós, quase atende. |
| Nº de iterações | - | - | - | 1000 - Pressões em 15 nós e MIGHA O: 4 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.2 Calibração do fator de atrito f e cálculo da rugosidade absoluta ϵ de Darcy-Weisbach

Ao todo, foram executadas 348 calibrações para testar e analisar o novo procedimento desenvolvido para realizar a calibração do fator de atrito f e cálculo da rugosidade absoluta ϵ de Darcy-Weisbach em redes de distribuição de água. A seguir, os resultados serão apresentados por rede calibrada para este parâmetro.

4.2.2.1 Rede Porto (2006)

Para a Calibração do fator de atrito na rede Porto (2006) foram realizadas 160 calibrações, sendo 80 pelo processo MIGHA C e 80 pelo MIGHA O.

Para rugosidade absoluta inicial em todos os trechos da rede igual a 0,006 mm e utilizando como dados de entrada pressões e vazões ao mesmo tempo, tanto o procedimento MIGHA O quanto o MIGHA C não geraram bons resultados.

Ao se calcular a rugosidade através da calibração do fator de atrito, usando apenas vazões nos trechos como dados de entrada conhecidos, não foi possível visualizar melhora ao se aumentar o número de trechos com vazões conhecidas.

Na Tabela 71 são apresentadas as diferenças médias entre as pressões, de todos os nós, vazões e rugosidades, de todos os trechos, calculadas após a calibração e seus respectivos valores gabarito para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressões e vazões ao mesmo tempo, além de apenas vazões nos trechos.

Considerando apenas pressões conhecidas nos nós da rede Porto (2006), há uma leve piora dos resultados a medida em que se vai diminuindo o número de dados conhecidos na rede.

Ao analisar o que acontece quando se tem dados conhecidos em nós juntos ou separados, além de, no caso de apenas 1 nó, este estar próximo ou longe do reservatório, no caso das pressões encontradas, as pressões conhecidas em nós separados apresenta melhores resultados que em nós próximos entre si. Para as vazões encontradas, a localização dos dados de entrada só influenciou no caso de se utilizar o MIGHA C, em que a utilização de dados próximos apresentou melhores resultados. Já para as rugosidades, houve casos em que dados de pressão em nós separados geraram melhores resultados que a utilização de dados próximos entre si como também houve casos em que o inverso ocorreu.

Tabela 71 – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades absolutas calculadas e

gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do fator de atrito para ϵ inicial de 0,006 mm na rede Porto (2006)

| Dados conhecidos: | Diferença média | | | | | |
|---------------------|-----------------|------------|-----------------|------------|-------------------------------|------------|
| | Pressões (m) | | Vazões (L/s) | | Rugosidade ϵ (mm) | |
| | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C |
| 3 vazões e pressões | 3,58 | 0,24 | 2,61 | 0,38 | 1,28 | 1,49 |
| Vazão em 9 trechos | 2,48 | 0,63 | 2,51 | 0,35 | 0,97 | 0,24 |
| Vazão em 8 trechos | 2,48 | 0,63 | 2,51 | 0,35 | 0,97 | 0,24 |
| Vazão em 7 trechos | 2,49 | 0,63 | 2,51 | 0,36 | 0,88 | 0,29 |
| Vazão em 6 trechos | 2,49 | 0,63 | 2,52 | 0,36 | 0,89 | 0,28 |
| Vazão em 5 trechos | 2,49 | 0,63 | 2,52 | 0,38 | 0,89 | 0,28 |
| Vazão em 4 trechos | 2,46 | 0,63 | 2,52 | 0,38 | 0,89 | 0,28 |
| Vazão em 3 trechos | 0,84 | 0,84 | 0,16 | 0,16 | 0,09 | 0,09 |
| Vazão em 2 trechos | 0,84 | 0,84 | 0,16 | 0,16 | 0,09 | 0,09 |
| Vazão em 1 trecho | 0,84 | 0,84 | 0,16 | 0,16 | 0,09 | 0,09 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 72 são mostradas as diferenças médias entre as pressões, de todos os nós, vazões e rugosidades absolutas, de todos os trechos, calculadas após a calibração e seus respectivos valores gabarito para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressões nos nós. É possível perceber que, nesse caso, para vazões o MIGHA O obteve melhores resultados que o MIGHA C, já para as rugosidades, o inverso ocorreu e, para as pressões encontradas não houve grandes variações.

Ao observar a Tabela 72 pode-se perceber que o uso da metodologia aqui proposta para o cálculo da rugosidade absoluta através da calibração do fator de atrito da equação de Darcy-Weisbach, no caso da rede Porto (2006) com rugosidade absoluta inicial de 0,006 mm, quando se tem dados de pressão em 7, 6 ou 5 nós, as pressões encontradas geraram diferenças médias com as pressões gabarito de aproximadamente zero metros, ficando maior que 0,25m apenas quando se tem dados de pressão em 1 nó perto do reservatório.

Para as vazões encontradas, em todas as situações, as diferenças com as vazões gabarito foram menores que 0,33 L/s, considerando apenas o método MIGHA O, a diferença máxima foi de 0,17 L/s.

As rugosidades ϵ encontradas ao fim do processo de calibração foram muito boas em alguns trechos e, em outros, não apresentaram resultados tão bons. Como exemplo, para dados de pressão em todos os nós, 8 trechos apresentaram variações de valores de rugosidade,

entre o calibrado e o gabarito, menores que 0,05 mm, o outro trecho apresentou diferença de 0,36 mm. Para todos os casos, geralmente, apenas 1 ou 2 trechos apresentam resultados ruins.

Tabela 72 – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades absolutas calculadas e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração do fator de atrito para ϵ inicial de 0,006 mm na rede Porto (2006)

| Dados conhecidos de pressão em: | Diferença média | | | | | |
|------------------------------------|-----------------|-------|-----------------|-------|-------------------------------|-------|
| | Pressões (m) | | Vazões (L/s) | | Rugosidade ϵ (mm) | |
| | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA |
| | O | C | O | C | O | C |
| 7 nós | 0,00 | 0,00 | 0,07 | 0,07 | 0,05 | 0,05 |
| 6 nós | 0,00 | 0,00 | 0,09 | 0,08 | 0,14 | 0,05 |
| 5 nós | 0,03 | 0,02 | 0,14 | 0,12 | 0,04 | 0,05 |
| 4 nós | 0,09 | 0,09 | 0,17 | 0,16 | 0,08 | 0,08 |
| 3 nós separados | 0,12 | 0,14 | 0,17 | 0,29 | 0,75 | 0,10 |
| 3 juntos | 0,14 | 0,14 | 0,16 | 0,16 | 0,09 | 0,09 |
| 2 nós separados | 0,12 | 0,13 | 0,16 | 0,32 | 0,20 | 0,10 |
| 2 nós juntos | 0,19 | 0,20 | 0,16 | 0,16 | 1,20 | 1,20 |
| 1 nó perto do Reservatório | 0,74 | 0,74 | 0,16 | 0,16 | 0,09 | 0,09 |
| 1 nó longe do Reservatório | 0,20 | 0,24 | 0,17 | 0,31 | 1,18 | 0,13 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

O próximo valor de rugosidade absoluta testado no processo de calibração foi de 0,6 mm. Ao utilizar esta rugosidade como valor inicial, para a maioria dos nós da rede, e ao se calibrar utilizando como dados de entrada pressões e vazões ao mesmo tempo, os valores encontrados pelos dois métodos foram bem diferentes do gabarito, não sendo, portanto, adequado para a calibração.

Ao se calibrar o fator de atrito usando apenas vazões nos trechos como dados de entrada conhecidos, não houve grande diferença nos resultados encontrados ao se comparar os métodos MIGHA C e MIGHA O, em alguns casos um foi pior que o outro e vice-versa. Além disso, também não foi possível visualizar diferença ao se aumentar o número de trechos com vazões conhecidas. O que pode ser visto é que o uso de vazões na calibração do fator de atrito com rugosidade absoluta inicial igual a 0,6 mm apresentou resultados ruins.

Na Tabela 73 são apresentadas as diferenças médias entre as pressões, de todos os nós, vazões e rugosidades absolutas, de todos os trechos, calculadas após a calibração e seus respectivos valores gabarito para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressões e vazões ao mesmo tempo, além de apenas vazões nos trechos.

Ao calibrar o fator de atrito, considerando apenas pressões conhecidas nos nós da rede Porto (2006), analisando apenas as pressões encontradas, há uma leve piora dos resultados a medida em que se vai diminuindo o número de dados conhecidos na rede. Já para as rugosidades e para as vazões encontradas, a diminuição do número de nós com pressões conhecidas não teve grande influência nos resultados encontrados.

Tabela 73 – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades absolutas calculadas e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do fator de atrito para ϵ inicial de 0,6 mm na rede Porto (2006)

| Dados conhecidos: | Diferença média | | | | | |
|---------------------|-----------------|-------|-----------------|-------|-------------------------------|-------|
| | Pressões (m) | | Vazões (L/s) | | Rugosidade ϵ (mm) | |
| | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA |
| | O | C | O | C | O | C |
| 3 vazões e pressões | 6,05 | 3,16 | 2,83 | 1,05 | 2,36 | 0,58 |
| Vazão em 9 trechos | 6,15 | 4,20 | 2,93 | 1,94 | 2,13 | 1,47 |
| Vazão em 8 trechos | 6,64 | 4,20 | 2,46 | 1,88 | 2,00 | 1,97 |
| Vazão em 7 trechos | 6,67 | 4,20 | 2,50 | 1,85 | 2,13 | 1,97 |
| Vazão em 6 trechos | 6,68 | 4,20 | 2,49 | 1,85 | 2,18 | 1,81 |
| Vazão em 5 trechos | 6,35 | 4,26 | 2,24 | 1,80 | 1,67 | 1,67 |
| Vazão em 4 trechos | 6,10 | 4,25 | 2,24 | 1,80 | 1,63 | 1,67 |
| Vazão em 3 trechos | 2,86 | 3,94 | 0,71 | 1,19 | 0,34 | 1,74 |
| Vazão em 2 trechos | 2,86 | 3,94 | 0,71 | 1,19 | 0,38 | 1,69 |
| Vazão em 1 trecho | 3,72 | 4,00 | 0,55 | 0,87 | 0,44 | 0,56 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar o que acontece quando se tem dados conhecidos em nós juntos ou separados, além de, no caso de apenas 1 nó, este estar próximo ou longe do reservatório, os casos com pressões conhecidas em nós juntos apresentaram melhores resultados que com nós separados entre si.

Na Tabela 74 são mostradas as diferenças médias entre as pressões, de todos os nós, vazões e rugosidades absolutas, de todos os trechos, calculadas após a calibração e seus respectivos valores gabarito para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressões nos nós. É possível perceber que, nesse caso, o MIGHA O obteve melhores resultados de pressão e vazão que o MIGHA C. Já para as rugosidades, o inverso ocorreu.

Percebe-se que o uso da metodologia aqui proposta para cálculo da rugosidade absoluta através da calibração do fator de atrito, no caso da rede Porto (2006) com rugosidade inicial de 0,6 mm, quando se tem dados de pressão em 7 ou 6 nós, os resultados encontrados

geraram diferenças médias entre as pressões de aproximadamente zero metros, ficando maior que 0,25m apenas a partir de quando se tem dados de pressão em 3 nós juntos.

Para as vazões encontradas, em todas as situações, as diferenças com as vazões gabarito foram menores que 0,75 L/s. Considerando apenas o método MIGHA O, essa diferença não passou de 0,55 L/s. Considerando o trecho 0, em que a vazão foi igual a gabarito em todos os casos simulados, para dados de pressão em 7 nós, 5 trechos tiveram a vazão encontrada após a calibração igual a gabarito, tanto para o MIGHA O quanto para o MIGHA C.

Tabela 74 – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades absolutas calculadas e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração do fator de atrito para ε inicial de 0,6 mm na rede Porto (2006)

| Dados conhecidos de pressão em: | Diferença média | | | | | |
|---------------------------------|-----------------|-------|--------------|-------|-------------------------------|-------|
| | Pressões (m) | | Vazões (L/s) | | Rugosidade ε (mm) | |
| | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA |
| | O | C | O | C | O | C |
| 7 nós | 0,00 | 0,00 | 0,16 | 0,16 | 0,04 | 0,04 |
| 6 nós | 0,01 | 0,01 | 0,18 | 0,18 | 0,75 | 0,29 |
| 5 nós | 0,04 | 0,88 | 0,23 | 0,53 | 1,20 | 0,26 |
| 4 nós | 0,08 | 0,90 | 0,26 | 0,52 | 1,05 | 0,30 |
| 3 nós separados | 0,25 | 0,24 | 0,15 | 0,22 | 1,20 | 0,46 |
| 3 juntos | 0,10 | 1,25 | 0,06 | 0,44 | 0,09 | 0,46 |
| 2 nós separados | 0,09 | 0,50 | 0,30 | 0,27 | 0,28 | 0,22 |
| 2 nós juntos | 0,13 | 0,88 | 0,10 | 0,23 | 0,18 | 0,37 |
| 1 nó perto do Reservatório | 3,41 | 3,41 | 0,20 | 0,20 | 0,44 | 0,44 |
| 1 nó longe do Reservatório | 0,25 | 1,34 | 0,22 | 0,28 | 0,72 | 0,29 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

As rugosidades absolutas encontradas ao fim do processo de calibração foram muito boas em alguns trechos e, em outros, não apresentaram resultados tão bons. Como exemplo, para dados de pressão em 5 nós, 2 trechos apresentaram os mesmos valores de rugosidade, entre o calibrado e o gabarito. Considerando, ainda, o mesmo caso, um trecho apresentou diferença maior que 10 mm.

Ainda, foram consideradas calibrações com rugosidade absoluta inicial de 6 mm. Este valor pode ser considerado extremamente alto, só é encontrado em tubulações com rugosidades propositalmente elevadas ou, ainda, extremamente velhas.

Utilizando como dados de entrada pressões e vazões ao mesmo tempo, assim como usando apenas vazões nos trechos, independente de se utilizar o método MIGHA C ou o

MIGHA O, obteve-se resultados ruins em todos os nós da rede. As vazões encontradas nos trechos para esta situação também apresentaram valores distintos dos valores gabarito e, as rugosidades, apresentaram valores bastante destoantes. Nesse caso, o uso de vazões ou vazões e pressões ao mesmo tempo na calibração do fator de atrito não é adequado. Além disso, o uso de valores distantes do usual para rugosidades no início do processo de calibração, torna os resultados piores, como visto na Tabela 75.

Na Tabela 76 são apresentadas as diferenças médias entre as pressões, de todos os nós, vazões e rugosidades absolutas, de todos os trechos, calculadas após a calibração e seus respectivos valores gabarito para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressões nos nós.

Tabela 75 – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades absolutas calculadas e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do fator de atrito para ε inicial de 6 mm na rede Porto (2006)

| Dados conhecidos: | Diferença média | | | | | |
|---------------------|-----------------|------------|-----------------|------------|----------------------------------|------------|
| | Pressões (m) | | Vazões (L/s) | | Rugosidade ε (mm) | |
| | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C |
| 3 vazões e pressões | 14,12 | 12,85 | 1,56 | 1,46 | 5,16 | 4,42 |
| Vazão em 9 trechos | 9,56 | 16,88 | 2,44 | 1,94 | 4,03 | 5,13 |
| Vazão em 8 trechos | 14,56 | 18,11 | 1,03 | 1,67 | 4,99 | 5,67 |
| Vazão em 7 trechos | 14,41 | 18,11 | 1,00 | 1,68 | 5,91 | 5,71 |
| Vazão em 6 trechos | 14,53 | 18,11 | 1,02 | 1,69 | 5,34 | 5,74 |
| Vazão em 5 trechos | 18,94 | 18,30 | 0,89 | 1,67 | 6,09 | 5,76 |
| Vazão em 4 trechos | 18,40 | 18,29 | 0,89 | 1,67 | 5,82 | 5,75 |
| Vazão em 3 trechos | 13,13 | 17,09 | 1,28 | 1,98 | 4,02 | 5,45 |
| Vazão em 2 trechos | 13,16 | 17,05 | 1,27 | 1,99 | 4,61 | 5,37 |
| Vazão em 1 trecho | 17,16 | 17,24 | 0,89 | 1,98 | 5,27 | 5,46 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando apenas pressões conhecidas nos nós da rede Porto (2006), percebe-se que, analisando todos os nós e trechos da rede, apenas quando se tem os dados de pressão em todos os nós da rede de distribuição se tem bons resultados. Os resultados pioram um pouco para dados em 6 nós e piora bem mais com menos dados. Dessa forma, o uso de uma rugosidade absoluta elevada, longe da realidade, no início do processo não é adequado para a calibração do fator de atrito.

Tabela 76 – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades absolutas calculadas e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração do fator de atrito para ε inicial de 6 mm na rede Porto (2006)

| Dados conhecidos de pressão em: | Diferença média | | | | | |
|---------------------------------|-----------------|-------|--------------|-------|-------------------------------|-------|
| | Pressões (m) | | Vazões (L/s) | | Rugosidade ε (mm) | |
| | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA |
| | O | C | O | C | O | C |
| 7 nós | 0,00 | 0,00 | 0,20 | 0,20 | 0,05 | 0,05 |
| 6 nós | 0,01 | 0,04 | 0,24 | 0,20 | 0,53 | 1,71 |
| 5 nós | 0,03 | 2,83 | 0,09 | 1,19 | 0,71 | 2,44 |
| 4 nós | 0,12 | 3,25 | 0,38 | 1,04 | 0,73 | 1,51 |
| 3 nós separados | 0,54 | 1,42 | 0,51 | 0,69 | 1,80 | 1,90 |
| 3 juntos | 0,15 | 7,66 | 0,05 | 1,01 | 0,10 | 3,26 |
| 2 nós separados | 0,06 | 3,34 | 0,13 | 1,02 | 1,19 | 2,30 |
| 2 nós juntos | 0,22 | 10,12 | 0,17 | 0,37 | 0,16 | 3,53 |
| 1 nó perto do Reservatório | 15,88 | 15,88 | 0,21 | 0,21 | 5,24 | 5,24 |
| 1 nó longe do Reservatório | 0,64 | 8,30 | 0,31 | 0,84 | 1,26 | 2,82 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o uso da sub-rotina computacional para a escolha da rugosidade absoluta inicial, da mesma forma que quando se tinham valores determinados, o uso de vazões e pressões ao mesmo tempo, assim como o uso de apenas vazões, não geraram bons resultados.

Na Tabela 77 são mostradas as diferenças médias entre as pressões, de todos os nós, vazões e rugosidades absolutas, de todos os trechos, calculadas após a calibração e seus respectivos valores gabarito para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos.

Ao calcular a rugosidade absoluta através da calibração do fator de atrito, considerando apenas pressões conhecidas nos nós da rede Porto (2006), há uma leve piora dos resultados a medida em que se vai diminuindo o número de dados conhecidos na rede. Os resultados foram bons considerando apenas o MIGHA O, já o uso do MIGHA C não gerou resultados satisfatórios. Isso ocorreu, provavelmente, devido a base da rede observada, para este caso, estar com rugosidade absoluta inicial, em todos os trechos, igual a 6 mm.

Ao analisar o que acontece quando se tem dados conhecidos em nós juntos ou separados, além de, no caso de apenas 1 nó, este estar próximo ou longe do reservatório, o uso da sub-rotina computacional para a escolha da rugosidade inicial fez com que, em alguns casos, nós separados gerassem melhores resultados e, em outros, isso ocorresse com dados em nós juntos. Assim, a localização dos nós não gerou influência sobre resultados.

Tabela 77 – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades absolutas calculadas e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do fator de atrito para ϵ inicial calculado através da sub-rotina computacional na rede Porto (2006)

| Dados conhecidos: | Diferença média | | | | | |
|---------------------|-----------------|-------|--------------|-------|----------------------------|-------|
| | Pressões (m) | | Vazões (L/s) | | Rugosidade ϵ (mm) | |
| | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA |
| | O | C | O | C | O | C |
| 3 vazões e pressões | 10,73 | 10,78 | 2,17 | 1,81 | 3,43 | 4,27 |
| Vazão em 9 trechos | 9,81 | 16,88 | 2,17 | 1,94 | 3,24 | 5,43 |
| Vazão em 8 trechos | 7,89 | 18,12 | 2,88 | 1,68 | 3,10 | 5,69 |
| Vazão em 7 trechos | 8,30 | 18,11 | 2,88 | 1,69 | 3,34 | 5,72 |
| Vazão em 6 trechos | 7,71 | 18,12 | 2,79 | 1,70 | 2,79 | 5,73 |
| Vazão em 5 trechos | 9,45 | 18,30 | 2,36 | 1,68 | 2,81 | 5,77 |
| Vazão em 4 trechos | 9,08 | 18,30 | 2,36 | 1,68 | 2,70 | 5,77 |
| Vazão em 3 trechos | 6,51 | 17,07 | 0,80 | 2,00 | 1,22 | 5,34 |
| Vazão em 2 trechos | 6,52 | 17,06 | 0,80 | 1,99 | 1,43 | 5,60 |
| Vazão em 1 trecho | 8,53 | 17,24 | 0,56 | 1,98 | 1,63 | 5,36 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 78 são mostradas as diferenças médias entre as pressões, de todos os nós, vazões e rugosidades absolutas, de todos os trechos, calculadas após a calibração e seus respectivos valores gabarito para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressões nos nós.

Ao observar a Tabela 78 se percebe que o uso da metodologia aqui proposta para calibração do fator de atrito, no caso da rede Porto (2006) com rugosidade absoluta inicial calculada pela sub-rotina computacional desenvolvida, quando se tem dados de pressão em 7 ou 6 nós, os resultados encontrados geraram diferenças médias entre as pressões de, aproximadamente, zero metros, no caso do MIGHA O, essa diferença só é maior que 1m quando se tem dados de pressão em 1 nó perto do reservatório. Ainda para o MIGHA O, a maior diferença encontrada entre as pressões calculadas e gabarito foi de 12,77m no nó 7 para 1 nó perto do reservatório. Desprezando os casos com dados de pressão em apenas 1 nó, a maior diferença foi de 0,80m no nó 6 para 3 nós juntos entre si.

Para as vazões encontradas, em todas as situações, as diferenças com as vazões gabarito, para o MIGHA O, foram menores que 1 L/s. A maior diferença foi de 0,52 L/s em 3 trechos para dados de pressão em 4 nós.

Tabela 78 – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades absolutas calculadas e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração do fator de atrito para ϵ inicial calculado através da sub-rotina computacional na rede Porto (2006)

| Dados conhecidos de pressão em: | Diferença média | | | | | |
|---------------------------------|-----------------|-------|--------------|-------|----------------------------|-------|
| | Pressões (m) | | Vazões (L/s) | | Rugosidade ϵ (mm) | |
| | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA |
| | O | C | O | C | O | C |
| 7 nós | 0,00 | 0,00 | 0,06 | 0,06 | 0,03 | 0,03 |
| 6 nós | 0,02 | 0,04 | 0,05 | 0,05 | 0,61 | 1,67 |
| 5 nós | 0,10 | 1,17 | 0,24 | 0,59 | 0,65 | 1,25 |
| 4 nós | 0,12 | 1,28 | 0,31 | 0,57 | 1,34 | 1,27 |
| 3 nós separados | 0,17 | 1,41 | 0,19 | 0,65 | 0,54 | 1,42 |
| 3 juntos | 0,23 | 2,61 | 0,08 | 0,17 | 0,11 | 0,26 |
| 2 nós separados | 0,15 | 2,30 | 0,18 | 0,49 | 1,37 | 1,84 |
| 2 nós juntos | 0,23 | 5,25 | 0,18 | 0,94 | 0,23 | 1,05 |
| 1 nó perto do Reservatório | 7,67 | 15,88 | 0,21 | 0,20 | 1,59 | 5,25 |
| 1 nó longe do Reservatório | 0,55 | 7,11 | 0,23 | 1,23 | 1,55 | 2,51 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

As rugosidades absolutas encontradas ao fim do processo de calibração foram muito boas em alguns trechos e, em outros, não apresentaram resultados tão bons. De forma geral para a calibração do fator de atrito com uso de pressões como dados de entrada na rede Porto (2006), as rugosidades encontradas para o trecho 3, em todas as simulações, foram responsáveis pelo aumento da diferença média em relação aos valores gabarito.

Outra forma de analisar a eficiência dos métodos propostos para a calibração do fator de atrito é saber se a função objetiva foi atingida. Também é interessante conhecer o número de iterações necessárias para atingir essa função.

Para calibração deste parâmetro na rede Porto (2006) foram estabelecidas um máximo de 100 iterações. A função objetivo mínima a ser alcançada foi estabelecida com um valor de 0,000000001.

Nas Tabelas 79 e 80 podem ser vistos o número de iterações e o valor de função objetivo alcançados por cada caso simulado para uma rugosidade absoluta inicial de 0,006 mm.

O que pode ser visto na Tabela 79 é que, para calibrações com dados de entrada de vazões e pressões ao mesmo tempo, além de somente vazões, nenhuma função objetivo foi alcançada. Isso complementa o observado anteriormente, que dados de vazões ou vazões e pressões simultaneamente não são adequados para a calibração do fator de atrito.

Como esperado, uma vez que os resultados encontrados para calibrações com uso de pressões nos nós como dados de entrada foram bons, pode ser visto na Tabela 80 que, para todos os casos de apenas pressões como dados de entrada, a função objetivo foi atingida. Ainda é possível perceber que, além de, geralmente, apresentar melhores resultados, a grande vantagem do MIGHA O em relação ao MIGHA C é o número de iterações necessário para atingir a função objetivo.

Tabela 79 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do fator de atrito para ε inicial de 0,006 mm na rede Porto (2006)

| Dados conhecidos: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|--------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 3 vazões e pressões | 100 | 0,0000948419 | 100 | 0,0000006244 |
| Vazão em 9 trechos | 100 | 0,0000932755 | 100 | 0,0000008116 |
| Vazão em 8 trechos | 100 | 0,0000794005 | 100 | 0,0000001659 |
| Vazão em 7 trechos | 100 | 0,0000804674 | 100 | 0,0000001637 |
| Vazão em 6 trechos | 100 | 0,0000787546 | 100 | 0,0000001634 |
| Vazão em 5 trechos | 100 | 0,0000778362 | 100 | 0,0000001677 |
| Vazão em 4 trechos | 100 | 0,0000778362 | 100 | 0,0000001660 |
| Vazão em 3 trechos | 100 | 0,0000003174 | 100 | 0,0000003174 |
| Vazão em 2 trechos | 100 | 0,0000003174 | 100 | 0,0000003174 |
| Vazão em 1 trecho | 100 | 0,0000003110 | 100 | 0,0000003110 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 80 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração do fator de atrito para ε inicial de 0,006 mm na rede Porto (2006)

| Dados conhecidos de pressão em: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|--|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 7 nós | 7 | 0,0000000006 | 8 | 0,0000000006 |
| 6 nós | 4 | 0,0000000003 | 8 | 0,0000000010 |
| 5 nós | 2 | 0,0000000001 | 5 | 0,0000000005 |
| 4 nós | 1 | 0,0000000003 | 2 | 0,0000000003 |
| 3 nós separados | 2 | 0,0000000003 | 29 | 0,0000000007 |
| 3 juntos | 1 | 0,0000000005 | 2 | 0,0000000005 |
| 2 nós separados | 2 | 0,0000000000 | 25 | 0,0000000009 |
| 2 nós juntos | 1 | 0,0000000003 | 2 | 0,0000000002 |
| 1 nó perto do Reservatório | 1 | 0,0000000000 | 2 | 0,0000000000 |
| 1 nó longe do Reservatório | 2 | 0,0000000003 | 46 | 0,0000000010 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas Tabelas 81 e 82 são apresentados o número de iterações atingidas e o valor de função objetivo alcançados por cada caso simulado para uma rugosidade absoluta inicial de 0,6 mm.

Da mesma forma que para a rugosidade absoluta inicial igual a 0,006 mm, para ε inicial de 0,6 mm, dados de vazões ou vazões e pressões simultaneamente não são adequados para a calibração do fator de atrito da fórmula universal. Já para dados de pressão nos nós da rede como entrada para a calibração, em todas as simulações, com uso do MIGHA O, a função objetivo foi atingida. Já para o MIGHA C, em vários casos a função objetivo não foi alcançada, no entanto, o valor de nenhuma delas alcançou 0,00002.

Tabela 81 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do fator de atrito para ε inicial de 0,6 mm na rede Porto (2006)

| Dados conhecidos: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|--------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 3 vazões e pressões | 100 | 0,0001852981 | 100 | 0,0000190633 |
| Vazão em 9 trechos | 100 | 0,0002655141 | 100 | 0,0000047266 |
| Vazão em 8 trechos | 100 | 0,0001602012 | 100 | 0,0000012762 |
| Vazão em 7 trechos | 100 | 0,0001737054 | 100 | 0,0000013141 |
| Vazão em 6 trechos | 100 | 0,0001646490 | 100 | 0,0000013593 |
| Vazão em 5 trechos | 100 | 0,0001029733 | 100 | 0,0000009882 |
| Vazão em 4 trechos | 100 | 0,0001029732 | 100 | 0,0000009882 |
| Vazão em 3 trechos | 100 | 0,0000070960 | 100 | 0,0000015418 |
| Vazão em 2 trechos | 100 | 0,0000070897 | 100 | 0,0000015441 |
| Vazão em 1 trecho | 100 | 0,0000038731 | 100 | 0,0000012046 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas Tabelas 83 e 84 são apresentados o número de iterações e o valor de função objetivo alcançados por cada caso simulado para uma rugosidade absoluta de Darcy-Weisbach inicial de 6 mm.

Como pode ser visto na Tabela 83, dados de vazões ou vazões e pressões simultaneamente não geraram calibrações capazes de alcançar a função objetivo. Já para dados de pressão nos nós da rede como entrada para a calibração, em todas as simulações, do MIGHA O, a função objetivo foi atingida.

Tabela 82 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração do fator de atrito para ε inicial de 0,6 mm na rede Porto (2006)

| Dados conhecidos de pressão em: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 7 nós | 10 | 0,0000000000 | 11 | 0,0000000000 |
| 6 nós | 3 | 0,0000000001 | 4 | 0,0000000001 |
| 5 nós | 4 | 0,0000000001 | 100 | 0,0000081123 |
| 4 nós | 4 | 0,0000000002 | 100 | 0,0000079226 |
| 3 nós separados | 2 | 0,0000000001 | 100 | 0,0000000020 |
| 3 juntos | 21 | 0,0000000000 | 100 | 0,0000115833 |
| 2 nós separados | 3 | 0,0000000000 | 100 | 0,0000012104 |
| 2 nós juntos | 4 | 0,0000000001 | 100 | 0,0000015374 |
| 1 nó perto do Reservatório | 1 | 0,0000000000 | 2 | 0,0000000000 |
| 1 nó longe do Reservatório | 4 | 0,0000000000 | 100 | 0,0000073982 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 83 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do fator de atrito para ε inicial de 6 mm na rede Porto (2006)

| Dados conhecidos: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 3 vazões e pressões | 100 | 0,0003625514 | 100 | 0,0003300457 |
| Vazão em 9 trechos | 100 | 0,0004140047 | 100 | 0,0000122291 |
| Vazão em 8 trechos | 100 | 0,0000883762 | 100 | 0,0000022224 |
| Vazão em 7 trechos | 100 | 0,0000609706 | 100 | 0,0000021850 |
| Vazão em 6 trechos | 100 | 0,0000731483 | 100 | 0,0000018098 |
| Vazão em 5 trechos | 100 | 0,0000613223 | 100 | 0,0000016344 |
| Vazão em 4 trechos | 100 | 0,0000613222 | 100 | 0,0000016344 |
| Vazão em 3 trechos | 100 | 0,0000574378 | 100 | 0,0000048100 |
| Vazão em 2 trechos | 100 | 0,0000570417 | 100 | 0,0000048479 |
| Vazão em 1 trecho | 100 | 0,0000234118 | 100 | 0,0000045395 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 84 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração do fator de atrito para ε inicial de 6 mm na rede Porto (2006)

| Dados conhecidos de pressão em: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 7 nós | 11 | 0,0000000003 | 12 | 0,0000000003 |
| 6 nós | 7 | 0,0000000002 | 11 | 0,0000000006 |
| 5 nós | 5 | 0,0000000001 | 100 | 0,0001074963 |
| 4 nós | 4 | 0,0000000002 | 100 | 0,0001234107 |
| 3 nós separados | 12 | 0,0000000006 | 100 | 0,0000112922 |
| 3 juntos | 12 | 0,0000000007 | 100 | 0,0005433309 |
| 2 nós separados | 4 | 0,0000000000 | 100 | 0,0001390097 |
| 2 nós juntos | 5 | 0,0000000007 | 100 | 0,0006043169 |
| 1 nó perto do Reservatório | 1 | 0,0000000000 | 2 | 0,0000000000 |
| 1 nó longe do Reservatório | 10 | 0,0000000002 | 100 | 0,0003847171 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas Tabelas 85 e 86 são apresentados o número de iterações e o valor de função objetivo alcançados por cada caso simulado para uma rugosidade absoluta inicial calculada pela sub-rotina computacional desenvolvida.

Tabela 85 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do fator de atrito para ε inicial da sub-rotina computacional na rede Porto (2006)

| Dados conhecidos: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 3 vazões e pressões | 100 | 0,0003395808 | 100 | 0,0001807772 |
| Vazão em 9 trechos | 100 | 0,0003403761 | 100 | 0,0000122012 |
| Vazão em 8 trechos | 100 | 0,0002887970 | 100 | 0,0000022282 |
| Vazão em 7 trechos | 100 | 0,0002996764 | 100 | 0,0000021673 |
| Vazão em 6 trechos | 100 | 0,0001891070 | 100 | 0,0000018202 |
| Vazão em 5 trechos | 100 | 0,0001338645 | 100 | 0,0000016344 |
| Vazão em 4 trechos | 100 | 0,0001338644 | 100 | 0,0000016344 |
| Vazão em 3 trechos | 100 | 0,0000201355 | 100 | 0,0000048834 |
| Vazão em 2 trechos | 100 | 0,0000199954 | 100 | 0,0000048545 |
| Vazão em 1 trecho | 100 | 0,0000080917 | 100 | 0,0000046155 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 86 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração do fator de atrito para ε inicial da sub-rotina computacional na rede Porto (2006)

| Dados conhecidos de pressão em: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 7 nós | 4 | 0,0000000006 | 5 | 0,0000000006 |
| 6 nós | 4 | 0,0000000001 | 6 | 0,0000000008 |
| 5 nós | 5 | 0,0000000008 | 100 | 0,0000086232 |
| 4 nós | 4 | 0,0000000007 | 100 | 0,0000093261 |
| 3 nós separados | 4 | 0,0000000001 | 100 | 0,0000099205 |
| 3 juntos | 5 | 0,0000000005 | 100 | 0,0000208394 |
| 2 nós separados | 3 | 0,0000000001 | 100 | 0,0000283480 |
| 2 nós juntos | 5 | 0,0000000000 | 100 | 0,0001374329 |
| 1 nó perto do Reservatório | 1 | 0,0000000000 | 2 | 0,0000000001 |
| 1 nó longe do Reservatório | 7 | 0,0000000000 | 100 | 0,0001330917 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como aconteceu nos outros valores de ε inicial, para dados de vazão ou vazão e pressão simultaneamente, a função objetivo não foi atingida em nenhum caso simulado. Já para as pressões nos nós como dados de entrada no processo de calibração, com uso do MIGHA O, todas as funções objetivo foram alcançadas. Já com o MIGHA C, como a base da rede observada foi considerada com rugosidades absolutas em todos os trechos iguais a 6 mm, muitas situações não alcançaram a função objetivo.

Considerando apenas o MIGHA O, o número de iterações necessárias ficou entre os valores encontrados para os casos com rugosidades de 0,006 mm e 0,6 mm.

4.2.2.2 Rede Walski (1983) – Gambale (2000)

Para a Calibração do fator de atrito na rede Walski (1983) – Gambale (2000) foram realizadas 168 calibrações, sendo 84 pelo processo MIGHA C e 84 pelo MIGHA O.

Ao utilizar a rugosidade absoluta inicial igual a 0,006 mm, para a maioria dos nós da rede e ao se calibrar utilizando como dados de entrada pressões e vazões ao mesmo tempo, para a rede Walski (1983) – Gambale (2000), o procedimento MIGHA O apresentou resultados de pressão, vazão e coeficiente C mais próximos do valor gabarito do que o MIGHA C. Apesar disso, não se pode dizer que os resultados foram bons.

Neste caso, as diferenças entre os valores de pressão encontrados e os valores gabarito variaram de 0m, para o nó 2, usando tanto o MIGHA O quanto o MIGHA C, até 0,37m para o nó 8, usando o MIGHA O. Para as vazões, excluindo-se o trecho de saída do reservatório, que obrigatoriamente recebe toda a vazão consumida ao longo da rede, e o trecho 5, que recebe vazão consumida no seu nó de jusante (ponta seca), a menor diferença de vazão foi de 0,06 L/s nos trechos 9 e 10, utilizando o MIGHA O, e a maior foi de 2,33 L/s no trecho 3, utilizando o MIGHA C. No caso das rugosidades encontradas a variação nos resultados foi bem maior, a diferença de rugosidades absolutas variou de 0 mm até 0,99 mm.

Assim, é possível perceber que, para dados de entrada de vazões e pressões ao mesmo tempo e rugosidade absoluta inicial para todos os trechos igual a 0,006 mm, tanto o método MIGHA O quanto o MIGHA C não apresentaram bons resultados, não devendo ser utilizados sob estas condições.

Ao se calibrar o fator de atrito, usando apenas vazões nos trechos como dados de entrada conhecidos, não foi possível visualizar melhora com o aumento do número de trechos com vazões conhecidas, mas uma superioridade nos resultados do MIGHA C perante o MIGHA O. Esta superioridade deve acontecer por as rugosidades gabarito desta rede, de forma geral, serem baixas, e, ao manter a rugosidade da rede observada fixa e baixa, os valores encontrados não variaram muito do gabarito.

Apesar da superioridade do MIGHA C, neste caso, nem ele nem o MIGHA O podem ser considerados adequados para a calibração do fator de atrito utilizando apenas vazões nos trechos como dados de entrada, pois, mesmo o MIGHA C gerou grandes diferenças entre as rugosidades calculadas e as rugosidades consideradas na rede gabarito.

Na Tabela 87 são apresentadas as diferenças médias entre as pressões, de todos os nós, vazões e rugosidades absolutas, de todos os trechos, calculadas após a calibração e seus respectivos valores gabarito para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressões e vazões ao mesmo tempo, além de apenas vazões nos trechos.

Ao calibrar o fator de atrito, considerando apenas pressões conhecidas nos nós da rede Walski (1983) – Gambale (2000), de forma geral, há uma piora dos resultados a medida em que se vai diminuindo o número de dados conhecidos na rede.

Ao analisar o que acontece quando se tem dados conhecidos em nós juntos ou separados, além de, no caso de apenas 1 nó, este estar próximo ou longe do reservatório, os resultados encontrados mostraram que, no caso de apenas 1 nó com dado de pressão conhecido, as pressões e vazões encontradas foram melhores no caso em que este esteja longe do reservatório, já as rugosidades encontradas foram melhores quando o nó está perto do

reservatório. No caso de dados em 3 ou 2 nós, considerando vazões, pressões e rugosidades, não houve como identificar qual o melhor caso, uma vez que as vezes os resultados são melhores quando estão juntos e outras quando estão separados.

Tabela 87 – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades calculadas e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do fator de atrito para ε inicial de 0,006 mm: rede Walski (1983)-Gambale (2000)

| Dados conhecidos: | Diferença média | | | | | |
|---------------------|-----------------|-------|-----------------|-------|----------------------------------|-------|
| | Pressões (m) | | Vazões (L/s) | | Rugosidade ε (mm) | |
| | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA |
| | O | C | O | C | O | C |
| 3 vazões e pressões | 0,10 | 0,12 | 0,49 | 0,77 | 0,21 | 0,25 |
| Vazão em 10 trechos | 1,72 | 0,14 | 8,67 | 1,07 | 1,93 | 0,54 |
| Vazão em 9 trechos | 1,72 | 0,14 | 8,63 | 1,08 | 1,98 | 0,54 |
| Vazão em 8 trechos | 1,53 | 0,13 | 8,63 | 1,02 | 1,47 | 0,49 |
| Vazão em 7 trechos | 1,53 | 0,13 | 8,62 | 1,02 | 1,20 | 0,49 |
| Vazão em 6 trechos | 1,54 | 0,13 | 8,62 | 1,02 | 1,20 | 0,49 |
| Vazão em 5 trechos | 1,54 | 0,13 | 8,62 | 1,02 | 1,20 | 0,49 |
| Vazão em 4 trechos | 0,19 | 0,18 | 0,45 | 0,51 | 0,28 | 0,27 |
| Vazão em 3 trechos | 0,18 | 0,18 | 0,45 | 0,51 | 0,28 | 0,27 |
| Vazão em 2 trechos | 0,18 | 0,17 | 0,43 | 0,50 | 0,28 | 0,27 |
| Vazão em 1 trecho | 0,17 | 0,17 | 0,43 | 0,43 | 0,28 | 0,28 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 88 são mostradas as diferenças médias entre as pressões, de todos os nós, vazões e rugosidades absolutas, de todos os trechos, calculadas após a calibração e seus respectivos valores gabarito para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressões nos nós. É possível perceber que, nesse caso, o uso do MIGHA O ou do MIGHA C não gerou resultados muito distantes, sendo o MIGHA O um pouco melhor.

Ao observar a Tabela 88 percebe-se que o uso da metodologia aqui proposta para calibração do fator de atrito, no caso da rede Walski (1983) – Gambale (2000) com rugosidade absoluta inicial de 0,006 mm, quando se tem dados de pressão em 7, 6 ou 5 nós, as pressões encontradas geraram diferenças médias com as pressões gabarito de aproximadamente zero metros, não chegando a 0,50m em nenhum caso calibrado. A maior diferença encontrada entre as pressões calculadas e gabarito foi de 0,46m no nó 5 para 1 nó perto do reservatório e 3 nós juntos, valor este tanto para o MIGHA C quanto para o MIGHA O, nos dois casos.

Tabela 88 – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades calculadas e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração do fator de atrito para ϵ inicial de 0,006 mm: rede Walski (1983)-Gambale (2000)

| Dados conhecidos de pressão em: | Diferença média | | | | | |
|---------------------------------|-----------------|---------|--------------|---------|----------------------------|---------|
| | Pressões (m) | | Vazões (L/s) | | Rugosidade ϵ (mm) | |
| | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C |
| | O | C | O | C | O | C |
| 7 nós | 0,00 | 0,00 | 0,32 | 0,32 | 0,16 | 0,16 |
| 6 nós | 0,01 | 0,01 | 0,33 | 0,43 | 0,16 | 0,14 |
| 5 nós | 0,01 | 0,02 | 0,32 | 0,44 | 0,13 | 0,13 |
| 4 nós | 0,05 | 0,06 | 0,32 | 0,44 | 0,19 | 0,20 |
| 3 nós separados | 0,08 | 0,07 | 0,43 | 0,69 | 0,45 | 0,63 |
| 3 juntos | 0,17 | 0,17 | 0,39 | 0,36 | 0,28 | 0,27 |
| 2 nós separados | 0,11 | 0,12 | 0,26 | 0,23 | 0,57 | 0,72 |
| 2 nós juntos | 0,11 | 0,11 | 0,39 | 0,41 | 0,28 | 0,29 |
| 1 nó perto do Reservatório | 0,17 | 0,17 | 0,41 | 0,41 | 0,28 | 0,28 |
| 1 nó longe do Reservatório | 0,11 | 0,12 | 0,28 | 0,25 | 0,54 | 0,56 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para as vazões encontradas, em todas as situações, as diferenças com as vazões gabarito foram menores que 2 L/s. A maior diferença de vazão foi de 1,60 L/s nos trechos 4 e 6 para dados de pressão em 3 nós separados entre si e com uso do MIGHA C.

As rugosidades absolutas encontradas ao fim do processo de calibração foram muito boas em alguns trechos e, em outros, não apresentaram resultados tão bons. Como exemplo, para dados de pressão em todos os nós, 7 trechos apresentaram variações de valores de rugosidade, entre o calibrado e o gabarito, menores que 0,05 mm, já os outros 3 trechos apresentaram diferenças maiores que 0,14 mm. Em percentual, 5 trechos tiveram diferenças menores ou iguais a 15%.

O próximo valor de rugosidade absoluta testada no processo de calibração foi de 0,6 mm. Ao utilizá-la como valor inicial, para a maioria dos nós da rede, e ao se calibrar utilizando como dados de entrada pressões e vazões ao mesmo tempo, o procedimento MIGHA C apresentou resultados de pressão, vazão e rugosidades mais próximos do valor gabarito do que o MIGHA O. Apesar disso, para este caso, os valores encontrados pelos dois métodos foram bem diferentes do gabarito.

Independentemente do método utilizado, não foi possível visualizar melhora de resultados ao se aumentar o número de trechos com vazões conhecidas. O uso de vazões na

calibração do fator de atrito com rugosidade absoluta inicial igual a 0,6 mm gerou resultados ruins.

Na Tabela 89 são apresentadas as diferenças médias entre as pressões, de todos os nós, vazões e rugosidades absolutas, de todos os trechos, calculadas após a calibração e seus respectivos valores gabarito para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressões e vazões ao mesmo tempo, além de apenas vazões nos trechos.

Tabela 89 – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades calculadas e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do fator de atrito para ϵ inicial de 0,6 mm: rede Walski (1983)-Gambale (2000)

| Dados conhecidos: | Diferença média | | | | | |
|---------------------|-----------------|-------|-----------------|-------|-------------------------------|-------|
| | Pressões (m) | | Vazões (L/s) | | Rugosidade ϵ (mm) | |
| | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA |
| | O | C | O | C | O | C |
| 3 vazões e pressões | 1,54 | 1,14 | 7,90 | 1,92 | 2,35 | 1,43 |
| Vazão em 10 trechos | 2,34 | 1,97 | 6,76 | 2,49 | 2,16 | 2,40 |
| Vazão em 9 trechos | 2,88 | 1,98 | 6,02 | 2,44 | 2,32 | 2,24 |
| Vazão em 8 trechos | 3,29 | 1,99 | 5,20 | 2,21 | 2,22 | 1,91 |
| Vazão em 7 trechos | 3,31 | 1,99 | 5,30 | 2,22 | 1,97 | 1,96 |
| Vazão em 6 trechos | 3,11 | 1,99 | 5,30 | 2,22 | 1,93 | 1,96 |
| Vazão em 5 trechos | 3,11 | 1,99 | 5,30 | 2,22 | 1,94 | 1,96 |
| Vazão em 4 trechos | 1,51 | 1,97 | 3,46 | 2,16 | 0,37 | 2,50 |
| Vazão em 3 trechos | 1,31 | 1,97 | 3,46 | 2,16 | 0,33 | 2,50 |
| Vazão em 2 trechos | 1,86 | 1,98 | 1,54 | 0,99 | 1,28 | 0,49 |
| Vazão em 1 trecho | 1,98 | 1,98 | 0,62 | 0,62 | 0,47 | 0,47 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao calibrar o fator de atrito, considerando apenas pressões conhecidas nos nós da rede Walski (1983) – Gambale (2000), analisando as pressões, vazões e rugosidades encontradas, de forma geral, há uma piora dos resultados a medida em que se vai diminuindo o número de dados conhecidos na rede.

Ao analisar o que acontece quando se tem dados conhecidos em nós juntos ou separados, além de, no caso de apenas 1 nó, este estar próximo ou longe do reservatório, a relevância da localização dos nós com pressões conhecidas foi indiferente, não sendo possível concluir a melhor posição, neste caso.

Na Tabela 90 são mostradas as diferenças médias entre as pressões, de todos os nós, vazões e rugosidades absolutas, de todos os trechos, calculadas após a calibração e seus respectivos valores gabarito para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressões

nos nós. É possível perceber que, nesse caso, o MIGHA O obteve melhores resultados que o MIGHA C.

Tabela 90 – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades calculadas e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração do fator de atrito para ϵ inicial de 0,6 mm: rede Walski (1983)-Gambale (2000)

| Dados conhecidos de pressão em: | Diferença média | | | | | |
|---------------------------------|-----------------|---------|--------------|---------|----------------------------|---------|
| | Pressões (m) | | Vazões (L/s) | | Rugosidade ϵ (mm) | |
| | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C |
| | O | C | O | C | O | C |
| 7 nós | 0,01 | 0,01 | 0,32 | 0,32 | 0,56 | 0,56 |
| 6 nós | 0,01 | 0,09 | 0,15 | 0,62 | 0,09 | 0,95 |
| 5 nós | 0,06 | 0,26 | 0,45 | 0,58 | 0,74 | 1,78 |
| 4 nós | 0,07 | 0,26 | 0,45 | 0,58 | 0,74 | 1,79 |
| 3 nós separados | 0,30 | 0,56 | 0,64 | 0,91 | 1,45 | 1,68 |
| 3 juntos | 0,65 | 0,70 | 0,56 | 1,32 | 0,52 | 0,34 |
| 2 nós separados | 0,90 | 1,13 | 0,71 | 1,46 | 1,13 | 1,74 |
| 2 nós juntos | 0,05 | 0,36 | 0,54 | 1,63 | 0,61 | 1,35 |
| 1 nó perto do Reservatório | 1,36 | 1,36 | 0,59 | 0,59 | 0,41 | 0,41 |
| 1 nó longe do Reservatório | 0,98 | 1,52 | 0,83 | 1,78 | 1,08 | 1,17 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao observar a Tabela 90 percebe-se que o uso da metodologia aqui proposta para calibração do fator de atrito, no caso da rede Walski (1983) – Gambale (2000) com rugosidade absoluta inicial igual a 0,6 mm, quando se tem dados de pressão em 7 nós, os resultados encontrados geraram diferenças médias entre as pressões de quase zero metros. A maior diferença encontrada entre as pressões calculadas e gabarito foi de 2,35m no nó 7 para 1 nó longe do reservatório e uso do MIGHA C.

Para as vazões encontradas, as médias variaram de 0,15 até 1,78 L/s. Excluindo-se os trechos 1 e 5, em que a vazão foi igual a gabarito em todos os casos simulados, a menor diferença de vazão ainda foi de 0 L/s nos trechos 9 e 10 quando se tem dados de pressão em 2 nós separados entre si com uso do MIGHA C. A maior diferença foi de 4,58 L/s no trecho 2 para dados de pressão em 1 nó longe do reservatório e uso do MIGHA C.

As rugosidades absolutas encontradas ao fim do processo de calibração foram muito boas em alguns trechos e, em outros, não apresentaram bons resultados. Em vários casos as rugosidades coincidiram ou ficaram próximas de coincidir, no entanto, os piores resultados

ocorreram para o trecho 10, seguido do trecho 6. Estes dois trechos são os responsáveis pela elevação da diferença média entre os valores calculados e gabarito.

Com rugosidade absoluta inicial de 6 mm, ao utilizar como dados de entrada pressões e vazões ao mesmo tempo, para o nó 2, as pressões calculadas após a calibração, tanto pelo MIGHA O quanto pelo MIGHA C, foram exatamente as mesmas pressões da rede gabarito. No entanto, para os outros nós, as pressões encontradas foram bem diferentes das pressões gabarito. Da mesma forma, as vazões calculadas e as rugosidades absolutas calculadas após a calibração do fator de atrito não apresentaram bons resultados.

Usando apenas vazões nos trechos, independente de se utilizar o método MIGHA C ou o MIGHA O, obteve-se pressões, em todos os nós da rede, bastante diferentes das pressões gabarito. As vazões e rugosidades encontradas nos trechos, para esta situação, também apresentaram valores bem distintos dos valores gabarito.

Assim como nos outros casos, para a rugosidade absoluta inicial igual a 6 mm, o uso de vazões ou vazões e pressões ao mesmo tempo na calibração do fator de atrito não é adequado.

Além disso, o uso de valores muito distantes da realidade para rugosidades no início do processo de calibração, torna os resultados piores, ou seja, para vazões ou vazões e pressões ao mesmo tempo na calibração do fator de atrito, o uso de rugosidade inicial igual a 6 mm gerou resultados piores que o uso da rugosidade inicial de 0,006 ou 0,6 mm.

Na Tabela 91 são apresentadas as diferenças médias entre as pressões, de todos os nós, vazões e rugosidades absolutas, de todos os trechos, calculadas após a calibração e seus respectivos valores gabarito para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressões e vazões ao mesmo tempo, além de apenas vazões nos trechos e, na Tabela 92, para dados de entrada de pressões nos nós.

Ao calibrar o fator de atrito de Darcy-Weisbach, considerando apenas pressões conhecidas nos nós da rede Walski (1983) – Gambale (2000), percebe-se que, analisando todos os nós e trechos da rede, considerando somente o MIGHA O, apenas quando se tem dados de pressão em 7 ou em 6 nós da rede de distribuição se tem bons resultados. Apesar de poder considerar como sendo o melhor resultado para a calibração do fator de atrito a calibração deste com dados de entrada de pressão em 6 nós com uso do MIGHA O e rugosidade absoluta inicial de 6 mm, para os outros casos, houveram muitas pressões bastante distintas do gabarito, vazões incompatíveis e rugosidades distantes dos valores reais. Dessa forma, o uso de uma rugosidade absoluta inicial de 6 mm não é adequado para a calibração do fator de atrito.

Tabela 91 – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades calculadas e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do fator de atrito para ε inicial de 6 mm: rede Walski (1983)-Gambale (2000)

| Dados conhecidos: | Diferença média | | | | | |
|---------------------|-----------------|-------|-----------------|-------|----------------------------------|-------|
| | Pressões (m) | | Vazões (L/s) | | Rugosidade ε (mm) | |
| | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA |
| | O | C | O | C | O | C |
| 3 vazões e pressões | 1,85 | 4,51 | 7,58 | 4,54 | 4,04 | 4,84 |
| Vazão em 10 trechos | 5,59 | 7,63 | 8,02 | 2,94 | 4,33 | 4,56 |
| Vazão em 9 trechos | 6,52 | 7,66 | 6,98 | 1,84 | 3,88 | 4,81 |
| Vazão em 8 trechos | 7,58 | 7,69 | 4,34 | 1,48 | 4,46 | 4,70 |
| Vazão em 7 trechos | 7,27 | 7,68 | 5,06 | 1,50 | 5,01 | 5,38 |
| Vazão em 6 trechos | 6,84 | 7,67 | 5,06 | 1,50 | 4,76 | 5,37 |
| Vazão em 5 trechos | 6,82 | 7,67 | 5,06 | 1,50 | 4,58 | 5,37 |
| Vazão em 4 trechos | 5,16 | 7,55 | 7,38 | 2,43 | 4,27 | 6,48 |
| Vazão em 3 trechos | 4,73 | 7,54 | 7,38 | 2,43 | 4,02 | 6,48 |
| Vazão em 2 trechos | 6,93 | 7,60 | 2,96 | 2,14 | 4,66 | 6,60 |
| Vazão em 1 trecho | 5,95 | 7,57 | 3,71 | 2,22 | 5,12 | 6,70 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 92 – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades calculadas e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração do fator de atrito para ε inicial de 6 mm: rede Walski (1983)-Gambale (2000)

| Dados conhecidos de pressão em: | Diferença média | | | | | |
|------------------------------------|-----------------|-------|-----------------|-------|----------------------------------|-------|
| | Pressões (m) | | Vazões (L/s) | | Rugosidade ε (mm) | |
| | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA |
| | O | C | O | C | O | C |
| 7 nós | 0,01 | 0,01 | 0,54 | 0,54 | 0,44 | 0,44 |
| 6 nós | 0,01 | 0,96 | 0,17 | 4,75 | 0,04 | 1,93 |
| 5 nós | 0,17 | 1,28 | 0,63 | 4,45 | 1,83 | 3,29 |
| 4 nós | 0,27 | 1,38 | 0,63 | 4,45 | 2,35 | 3,82 |
| 3 nós separados | 0,41 | 1,73 | 1,75 | 4,47 | 3,44 | 4,74 |
| 3 juntos | 2,89 | 2,94 | 0,89 | 2,23 | 4,12 | 3,41 |
| 2 nós separados | 2,57 | 4,29 | 1,53 | 3,81 | 2,99 | 4,13 |
| 2 nós juntos | 0,23 | 1,92 | 0,76 | 5,95 | 1,81 | 2,87 |
| 1 nó perto do Reservatório | 5,44 | 5,44 | 0,63 | 0,63 | 5,11 | 5,11 |
| 1 nó longe do Reservatório | 2,53 | 5,69 | 1,30 | 3,20 | 2,52 | 4,13 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o uso da sub-rotina computacional, para a escolha da rugosidade absoluta inicial, da mesma forma que quando se tinham valores determinados, o uso de vazões e pressões ao mesmo tempo, assim como o uso de apenas vazões, não geraram bons resultados.

Na Tabela 93 são mostradas as diferenças médias entre as pressões, de todos os nós, vazões e rugosidades absolutas, de todos os trechos, calculadas após a calibração e seus respectivos valores gabarito para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos.

Tabela 93 – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades calculadas e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do fator de atrito para ε inicial calculado através da sub-rotina computacional na rede Walski (1983)-Gambale (2000)

| Dados conhecidos: | Diferença média | | | | | |
|---------------------|-----------------|-------|-----------------|-------|----------------------------------|-------|
| | Pressões (m) | | Vazões (L/s) | | Rugosidade ε (mm) | |
| | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA |
| | O | C | O | C | O | C |
| 3 vazões e pressões | 1,82 | 3,93 | 8,02 | 5,11 | 3,02 | 4,11 |
| Vazão em 10 trechos | 3,07 | 7,63 | 6,62 | 2,97 | 3,20 | 4,60 |
| Vazão em 9 trechos | 4,90 | 7,66 | 7,04 | 1,85 | 3,85 | 4,90 |
| Vazão em 8 trechos | 5,13 | 7,68 | 4,79 | 1,42 | 2,65 | 4,70 |
| Vazão em 7 trechos | 5,13 | 7,68 | 4,89 | 1,45 | 2,54 | 5,37 |
| Vazão em 6 trechos | 4,80 | 7,68 | 4,89 | 1,45 | 2,43 | 5,36 |
| Vazão em 5 trechos | 4,79 | 7,68 | 4,89 | 1,45 | 2,35 | 5,36 |
| Vazão em 4 trechos | 3,03 | 7,55 | 5,09 | 2,40 | 1,20 | 6,44 |
| Vazão em 3 trechos | 2,71 | 7,55 | 5,09 | 2,40 | 1,09 | 6,44 |
| Vazão em 2 trechos | 3,73 | 7,60 | 2,05 | 2,15 | 2,38 | 6,60 |
| Vazão em 1 trecho | 3,16 | 7,57 | 2,90 | 2,21 | 1,43 | 6,68 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Independentemente do uso do MIGHA C ou MIGHA O, da mesma forma que aconteceu para os outros casos, a utilização, como dados de entrada, de pressões nos nós e vazões nos trechos ao mesmo tempo, além de apenas vazões nos trechos, não é adequada para a calibração do fator de atrito.

Ao calibrar o fator de atrito, considerando apenas pressões conhecidas nos nós da rede Walski (1983) – Gambale (2000), analisando as pressões encontradas, de forma geral, há uma piora dos resultados a medida em que se vai diminuindo o número de dados conhecidos na rede. As pressões encontradas foram boas considerando apenas o MIGHA O, já para o MIGHA C, os resultados foram ruins. Para as rugosidades encontradas, de forma geral, também há uma piora dos resultados a medida em que se vai diminuindo o número de dados conhecidos

na rede. É interessante perceber que, para 6 dados de pressão conhecidos, as rugosidades calculadas com uso da sub-rotina computacional obtiveram o segundo melhor resultado dentre os testados, perdendo apenas para o caso com mesmo número de dados de entrada com rugosidade inicial de 6 mm. Considerando apenas o MIGHA O, já que, nesse caso, o MIGHA C não gerou bons resultados, para as vazões encontradas e uso da sub-rotina desenvolvida, a diminuição do número de nós com pressões conhecidas não teve grande influência nos resultados encontrados.

Ao analisar o que acontece quando se tem dados conhecidos em nós juntos ou separados, além de, no caso de apenas 1 nó, este estar próximo ou longe do reservatório, no caso das pressões encontradas, o uso da sub-rotina computacional para a escolha da rugosidade inicial fez com que, em alguns casos, nós separados gerassem melhores resultados de pressão e, em outros, isso ocorresse com dados em nós juntos. Assim, a localização dos nós não gerou influência sobre resultados de pressão. O mesmo ocorreu para vazões e rugosidades encontradas.

Na Tabela 94 são mostradas as diferenças médias entre as pressões, de todos os nós, vazões e rugosidades absolutas, de todos os trechos, calculadas após a calibração e seus respectivos valores gabarito para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressões nos nós.

Ao observar a Tabela 94 se percebe que o uso da metodologia aqui proposta para calibração do fator de atrito, no caso da rede Walski (1983) – Gambale (2000) com rugosidade absoluta inicial calculada pela sub-rotina computacional desenvolvida, quando se tem dados de pressão em 7 ou 6 nós, com uso do MIGHA O, os resultados encontrados geraram diferenças médias entre as pressões de aproximadamente zero metros, ficando maior que 1m apenas quando se tem dados de pressão em 2 nós separados e para apenas 1 dado de pressão. A maior diferença encontrada entre as pressões calculadas e gabarito, considerando apenas o MIGHA O, foi de 4,31m no nó 8 para 1 nó perto do reservatório.

Para as vazões encontradas, em todas as situações, também considerando apenas o MIGHA O, a maior diferença com a vazão gabarito foi de 4,02 L/s no trecho 3 para dados de pressão em 3 nós separados entre si. Excluindo-se os trechos 1 e 5, em que as vazões foram iguais a gabarito em todos os casos simulados, a menor diferença de vazão foi de 0,04 L/s, isso ocorreu no trecho 8 quando se tem dados de pressão em 7 nós.

Tabela 94 – Diferenças médias entre as pressões, vazões e rugosidades calculadas e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração do fator de atrito para ϵ inicial calculado através da sub-rotina computacional na rede Walski (1983)-Gambale (2000)

| Dados conhecidos de pressão em: | Diferença média | | | | | |
|---------------------------------|-----------------|-------|--------------|-------|----------------------------|-------|
| | Pressões (m) | | Vazões (L/s) | | Rugosidade ϵ (mm) | |
| | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA |
| | O | C | O | C | O | C |
| 7 nós | 0,00 | 0,00 | 0,50 | 0,50 | 0,19 | 0,19 |
| 6 nós | 0,01 | 0,47 | 0,22 | 2,89 | 0,07 | 1,33 |
| 5 nós | 0,05 | 1,30 | 0,61 | 4,49 | 0,40 | 2,91 |
| 4 nós | 0,08 | 1,39 | 0,61 | 4,49 | 0,52 | 3,43 |
| 3 nós separados | 0,30 | 1,54 | 1,50 | 5,10 | 1,34 | 4,07 |
| 3 juntos | 1,45 | 2,93 | 0,76 | 1,93 | 1,23 | 2,55 |
| 2 nós separados | 1,59 | 4,09 | 1,34 | 3,71 | 1,89 | 4,61 |
| 2 nós juntos | 0,13 | 1,91 | 1,06 | 5,97 | 0,90 | 2,28 |
| 1 nó perto do Reservatório | 2,82 | 5,44 | 0,62 | 0,62 | 1,42 | 5,14 |
| 1 nó longe do Reservatório | 1,60 | 5,59 | 0,99 | 3,44 | 1,69 | 3,45 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

As rugosidades absolutas encontradas ao fim do processo de calibração foram muito boas em alguns trechos e, em outros, não apresentaram resultados tão bons. Como exemplo, para dados de pressão em todos os nós, 7 trechos apresentaram variações de valores de rugosidade, entre o calibrado e o gabarito, menores ou iguais a 0,05 mm, já os outros 3 trechos apresentaram diferenças maiores ou iguais a 0,14 mm. O trecho com piores resultados, aumentando a média das diferenças em todos os casos, foi o trecho 10 que, para dados de pressão em todos os nós, gerou uma diferença de 0,99 mm entre o valor de rugosidade encontrado e o gabarito.

Para calibração do fator de atrito na rede Walski (1983) – Gambale (2000) foram estabelecidas um máximo de 100 iterações. A função objetivo mínima a ser alcançada foi estabelecida com um valor de 0,000000001.

Nas Tabelas 95 e 96 podem ser vistos o número de iterações e o valor de função objetivo alcançados por cada caso simulado para uma rugosidade absoluta de Darcy-Weisbach inicial de 0,006 mm.

O que pode ser visto na Tabela 95 é que, para calibrações com dados de entrada de vazões e pressões ao mesmo tempo, além de somente vazões, nenhuma função objetivo foi alcançada, exceto quando se tem dados de vazão em apenas um nó da rede de distribuição, o que ocorreu tanto para o MIGHA O quanto para o MIGHA C. Além disso complementar o

observado anteriormente, ou seja, que dados de vazões ou vazões e pressões simultaneamente não são adequados para a calibração do fator de atrito, também mostra a incoerência do uso desse tipo de dados, uma vez que apenas um valor como entrada do processo de calibração é uma quantidade muito pequena.

Tabela 95 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do fator de atrito para ε inicial de 0,006 mm na rede Walski (1983)-Gambale (2000)

| Dados conhecidos: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|--------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 3 vazões e pressões | 100 | 0,0000000246 | 100 | 0,0000001696 |
| Vazão em 10 trechos | 100 | 0,0000439492 | 100 | 0,0000002967 |
| Vazão em 9 trechos | 100 | 0,0000431610 | 100 | 0,0000002962 |
| Vazão em 8 trechos | 100 | 0,0000326705 | 100 | 0,0000002938 |
| Vazão em 7 trechos | 100 | 0,0000324355 | 100 | 0,0000002916 |
| Vazão em 6 trechos | 100 | 0,0000324355 | 100 | 0,0000002916 |
| Vazão em 5 trechos | 100 | 0,0000324355 | 100 | 0,0000002916 |
| Vazão em 4 trechos | 100 | 0,0000000047 | 100 | 0,0000000063 |
| Vazão em 3 trechos | 100 | 0,0000000047 | 100 | 0,0000000063 |
| Vazão em 2 trechos | 100 | 0,0000000036 | 100 | 0,0000000048 |
| Vazão em 1 trecho | 1 | 0,0000000001 | 1 | 0,0000000001 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como esperado, uma vez que os resultados encontrados, para calibrações com uso de pressões nos nós como dados de entrada, foram bons, pode ser visto na Tabela 96 que, para todos os casos de pressões com dados de entrada, a função objetivo foi atingida, apesar de que no caso de 3 nós juntos entre si, com uso do MIGHA O, o número de iterações foi o máximo estabelecido, a função objetivo foi atingida. Ainda é possível perceber que, além de, geralmente, apresentar melhores resultados, a grande vantagem do MIGHA O em relação ao MIGHA C é o número de iterações necessário para atingir a função objetivo.

Tabela 96 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração do fator de atrito para ε inicial de 0,006 mm na rede Walski (1983)-Gambale (2000)

| Dados conhecidos de pressão em: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 7 nós | 2 | 0,0000000002 | 3 | 0,0000000002 |
| 6 nós | 2 | 0,0000000008 | 31 | 0,0000000006 |
| 5 nós | 2 | 0,0000000004 | 4 | 0,0000000008 |
| 4 nós | 2 | 0,0000000004 | 4 | 0,0000000008 |
| 3 nós separados | 2 | 0,0000000002 | 6 | 0,0000000008 |
| 3 juntos | 100 | 0,0000000010 | 8 | 0,0000000006 |
| 2 nós separados | 2 | 0,0000000001 | 4 | 0,0000000007 |
| 2 nós juntos | 1 | 0,0000000003 | 2 | 0,0000000003 |
| 1 nó perto do Reservatório | 1 | 0,0000000000 | 1 | 0,0000000000 |
| 1 nó longe do Reservatório | 2 | 0,0000000002 | 4 | 0,0000000003 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas Tabelas 97 e 98 são apresentados o número de iterações e o valor de função objetivo alcançados por cada caso simulado para uma rugosidade absoluta inicial de 0,6 mm.

Tabela 97 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do fator de atrito para ε inicial de 0,6 mm na rede Walski (1983)-Gambale (2000)

| Dados conhecidos: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 3 vazões e pressões | 100 | 0,0000181150 | 100 | 0,0000005338 |
| Vazão em 10 trechos | 100 | 0,0000187798 | 100 | 0,0000010784 |
| Vazão em 9 trechos | 100 | 0,0000140620 | 100 | 0,0000011238 |
| Vazão em 8 trechos | 100 | 0,0000145513 | 100 | 0,0000011887 |
| Vazão em 7 trechos | 100 | 0,0000150172 | 100 | 0,0000012340 |
| Vazão em 6 trechos | 100 | 0,0000150172 | 100 | 0,0000012340 |
| Vazão em 5 trechos | 100 | 0,0000150172 | 100 | 0,0000012339 |
| Vazão em 4 trechos | 100 | 0,0000011477 | 100 | 0,0000000304 |
| Vazão em 3 trechos | 100 | 0,0000011477 | 100 | 0,0000000304 |
| Vazão em 2 trechos | 100 | 0,0000003489 | 9 | 0,0000000010 |
| Vazão em 1 trecho | 1 | 0,0000000003 | 1 | 0,0000000003 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 98 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração do fator de atrito para ε inicial de 0,6 mm na rede Walski (1983)-Gambale (2000)

| Dados conhecidos de pressão em: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 7 nós | 7 | 0,0000000001 | 8 | 0,0000000001 |
| 6 nós | 5 | 0,0000000004 | 100 | 0,0000001868 |
| 5 nós | 5 | 0,0000000001 | 100 | 0,0000006866 |
| 4 nós | 5 | 0,0000000001 | 100 | 0,0000006866 |
| 3 nós separados | 4 | 0,0000000007 | 100 | 0,0000014597 |
| 3 juntos | 100 | 0,0000000010 | 100 | 0,0000000081 |
| 2 nós separados | 5 | 0,0000000002 | 100 | 0,0000013940 |
| 2 nós juntos | 4 | 0,0000000001 | 100 | 0,0000007372 |
| 1 nó perto do Reservatório | 1 | 0,0000000000 | 2 | 0,0000000000 |
| 1 nó longe do Reservatório | 6 | 0,0000000002 | 100 | 0,0000030511 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Da mesma forma que para a rugosidade inicial de 0,006 mm, para ε inicial de 0,6 mm, dados de vazões ou vazões e pressões simultaneamente não são adequados para a calibração do fator de atrito. Já para dados de pressão nos nós da rede como entrada para a calibração, em todas as simulações, a função objetivo foi atingida para o uso do MIGHA O, já para o MIGHA C, a função objetivo só foi atingida em 2 casos, mostrando a superioridade do MIGHA O para este caso. Além disso, no caso em que ambos os métodos atingiram a função objetivo, o MIGHA O precisou de menos iterações que o MIGHA C.

Nas Tabelas 99 e 100 estão o número de iterações e a função objetivo alcançados por cada caso simulado para uma rugosidade absoluta inicial de 6 mm.

Como visto na Tabela 99, dados de vazões ou vazões e pressões simultaneamente não geraram calibrações capazes de alcançar a função objetivo. Para dados de pressão nos nós da rede como entrada para a calibração, em nem todas as simulações a função objetivo foi atingida, 8 casos do MIGHA C e 1 do MIGHA O não alcançaram a função objetivo. Ainda assim, o MIGHA O precisou de menos iterações que o MIGHA C.

Assim, para a rugosidade absoluta inicial de 6 mm, o número de iterações necessárias para alcançar a função objetivo mínima foi maior que para os outros dois valores de rugosidade inicial testados, além de maior número de casos que não foram capazes de alcançar a função objetivo.

Tabela 99 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do fator de atrito para ε inicial de 6 mm na rede Walski (1983)-Gambale (2000)

| Dados conhecidos: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|--------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 3 vazões e pressões | 100 | 0,0000289484 | 100 | 0,0000215347 |
| Vazão em 10 trechos | 100 | 0,0000314361 | 100 | 0,0000033008 |
| Vazão em 9 trechos | 100 | 0,0000260412 | 100 | 0,0000033029 |
| Vazão em 8 trechos | 100 | 0,0000245102 | 100 | 0,0000035756 |
| Vazão em 7 trechos | 100 | 0,0000296027 | 100 | 0,0000037015 |
| Vazão em 6 trechos | 100 | 0,0000296027 | 100 | 0,0000037014 |
| Vazão em 5 trechos | 100 | 0,0000296027 | 100 | 0,0000037014 |
| Vazão em 4 trechos | 100 | 0,0000125807 | 100 | 0,0000002886 |
| Vazão em 3 trechos | 100 | 0,0000125807 | 100 | 0,0000002886 |
| Vazão em 2 trechos | 100 | 0,0000010552 | 100 | 0,0000000841 |
| Vazão em 1 trecho | 100 | 0,0000000880 | 100 | 0,0000000284 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 100 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração do fator de atrito para ε inicial de 6 mm na rede Walski (1983)-Gambale (2000)

| Dados conhecidos de pressão em: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|--|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 7 nós | 3 | 0,0000000001 | 4 | 0,0000000001 |
| 6 nós | 8 | 0,0000000002 | 100 | 0,0000199105 |
| 5 nós | 14 | 0,0000000002 | 100 | 0,0000190145 |
| 4 nós | 14 | 0,0000000002 | 100 | 0,0000190145 |
| 3 nós separados | 13 | 0,0000000006 | 100 | 0,0000266116 |
| 3 juntos | 100 | 0,0000000089 | 100 | 0,0000000207 |
| 2 nós separados | 15 | 0,0000000006 | 100 | 0,0000294913 |
| 2 nós juntos | 10 | 0,0000000007 | 100 | 0,0000142399 |
| 1 nó perto do Reservatório | 1 | 0,0000000000 | 2 | 0,0000000000 |
| 1 nó longe do Reservatório | 10 | 0,0000000006 | 100 | 0,0000611413 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas Tabelas 101 e 102 são apresentados o número de iterações e o valor de função objetivo alcançados por cada caso simulado para uma rugosidade absoluta inicial calculada pela sub-rotina computacional desenvolvida.

Tabela 101 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração do fator de atrito para ε inicial da sub-rotina computacional na rede Walski (1983)-Gambale (2000)

| Dados conhecidos: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|--------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 3 vazões e pressões | 100 | 0,0000204596 | 100 | 0,0000045906 |
| Vazão em 10 trechos | 100 | 0,0000185986 | 100 | 0,0000033077 |
| Vazão em 9 trechos | 100 | 0,0000283861 | 100 | 0,0000033029 |
| Vazão em 8 trechos | 100 | 0,0000197425 | 100 | 0,0000035756 |
| Vazão em 7 trechos | 100 | 0,0000198056 | 100 | 0,0000037500 |
| Vazão em 6 trechos | 100 | 0,0000198056 | 100 | 0,0000037500 |
| Vazão em 5 trechos | 100 | 0,0000198056 | 100 | 0,0000037500 |
| Vazão em 4 trechos | 100 | 0,0000026111 | 100 | 0,0000002597 |
| Vazão em 3 trechos | 100 | 0,0000026111 | 100 | 0,0000002597 |
| Vazão em 2 trechos | 100 | 0,0000007122 | 100 | 0,0000000962 |
| Vazão em 1 trecho | 100 | 0,0000000437 | 100 | 0,0000000250 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como aconteceu nos outros valores de rugosidade inicial, para dados de vazão ou vazão e pressão simultaneamente, a função objetivo não foi atingida em nenhum caso simulado. Já para dados de pressão nos nós da rede como entrada para a calibração, apenas para 3 nós juntos entre si a função objetivo não foi atingida para o uso do MIGHA O, já para o MIGHA C, 8 casos não alcançaram a função objetivo. O MIGHA O precisou de menos iterações que o MIGHA C.

Tabela 102 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração do fator de atrito para ε inicial da sub-rotina computacional na rede Walski (1983)-Gambale (2000)

| Dados conhecidos de pressão em: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|--|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 7 nós | 2 | 0,0000000006 | 3 | 0,0000000006 |
| 6 nós | 8 | 0,0000000005 | 100 | 0,0000064981 |
| 5 nós | 9 | 0,0000000004 | 100 | 0,0000219531 |
| 4 nós | 9 | 0,0000000004 | 100 | 0,0000219531 |
| 3 nós separados | 6 | 0,0000000000 | 100 | 0,0000117490 |
| 3 juntos | 100 | 0,0000000017 | 100 | 0,0000000202 |
| 2 nós separados | 9 | 0,0000000002 | 100 | 0,0000121322 |
| 2 nós juntos | 12 | 0,0000000002 | 100 | 0,0000127593 |
| 1 nó perto do Reservatório | 1 | 0,0000000000 | 2 | 0,0000000003 |
| 1 nó longe do Reservatório | 9 | 0,0000000007 | 100 | 0,0000509918 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.2.3 Rede C-Town: Battle of Calibration (2012)

Para a Calibração do fator de atrito na rede C-Town foram realizadas 10 calibrações, sendo 5 pelo processo MIGHA C e 5 pelo MIGHA O.

Analisando os resultados de pressão encontrados para dados de entrada de pressão em todos os nós da rede, a maior diferença entre as pressões encontradas após o processo de calibração e as pressões gabarito foi de 21,95m, tanto para o uso do MIGHA C quanto para o MIGHA O. Apesar do valor máximo, neste caso, a diferença média entre as citadas pressões para os 388 nós da rede de distribuição C-Town foi de 1,55m tanto para o MIGHA O quanto para o MIGHA C. Considerando os valores de vazão encontrados, a máxima diferença em relação aos valores gabarito foi de 34 L/s para os dois métodos. Já as diferenças médias foram de 2,32 L/s. Já para as rugosidades absolutas encontradas, as diferenças máximas foram 9,94 mm para ambos os métodos, já as diferenças médias foram 1,61 mm. Assim, mesmo ao utilizar pressões em todos os nós como dados de entrada, o uso de uma rugosidade absoluta igual a 0,06 mm no início do processo de calibração não gerou bons resultados. É interessante observar que 0,06 mm é um valor baixo de rugosidade absoluta inicial quando comparado aos valores de rugosidades gabarito.

Considerando dados de entrada de pressão em 13 nós da rede de distribuição, a maior diferença entre as pressões encontradas após o processo de calibração e as pressões gabarito foi de 5,99m para o uso do MIGHA O, já com o uso do MIGHA C foi de 21,76m. Para o MIGHA O, a diferença média entre as citadas pressões para os 388 nós da rede de distribuição C-Town foi de 1,45m e para o MIGHA C, 2,14m. Para as vazões, a máxima diferença em relação aos valores gabarito foi de 10,24 L/s para o MIGHA O e 34 L/s para o MIGHA C. Já as diferenças médias foram de 0,82 L/s e 2,57 L/s, respectivamente. Já para as rugosidades absolutas encontradas, as diferenças máximas foram 10,28 mm para o MIGHA O e 9,62 mm para o MIGHA C, ainda, as diferenças médias foram 2,48 mm e 2,26 mm, respectivamente. É provável que os resultados ruins sejam devido a grande diferença entre as rugosidades iniciais e as rugosidades gabarito.

Quando se tem dados de entrada em 13 nós e de vazão em 12 trechos da rede, a maior diferença entre as pressões encontradas após o processo de calibração e as pressões gabarito foi de 16,56m para o uso do MIGHA O, já com o uso do MIGHA C foi de 21,73m. Para o MIGHA O, a diferença média entre as citadas pressões para os 388 nós da rede de distribuição C-Town foi de 2,60m e para o MIGHA C foi de 1,97m. Para as vazões, os resultados também foram ruins, a máxima diferença em relação aos valores gabarito foi de 86,79 L/s para

o MIGHA O e 34 L/s para o MIGHA C. Já as diferenças médias foram de 5,53 L/s e 2,45 L/s, respectivamente. Já para as rugosidades absolutas encontradas, as diferenças máximas foram 10,44 mm para o MIGHA O e 10,07 mm para o MIGHA C, ainda, as diferenças médias foram 2,83 mm e 2,27 mm, respectivamente. Para este caso, adicionar dados de vazão, além das 13 pressões já utilizadas, piorou um pouco os resultados encontrados.

Ao utilizar apenas a vazão em 12 trechos da rede, como entrada do processo de calibração, a maior diferença entre as pressões encontradas após o processo de calibração e as pressões gabarito foi de 21,91m para o uso do MIGHA O e, com o uso do MIGHA C, foi de 21,96m. Para o MIGHA O, a diferença média entre as citadas pressões para os 388 nós da rede de distribuição C-Town foi de 2,18m e para o MIGHA C foi de 2,22m. Para as vazões, os resultados também não foram bons, a máxima diferença em relação aos valores gabarito foi de 34 L/s tanto para o MIGHA O quanto para o MIGHA C. Já as diferenças médias foram de 2,84 L/s e 2,89 L/s, respectivamente. Para as rugosidades absolutas encontradas, as diferenças máximas foram 7,74 mm para o MIGHA O e 5,98 mm para o MIGHA C, já as diferenças médias foram 2,14 mm e 2,13 mm, respectivamente.

Por fim, ao utilizar a vazão em todos os trechos da rede, como entrada do processo de calibração, a maior diferença entre as pressões encontradas, após o processo de calibração, e as pressões gabarito foi de 7,12m para o uso do MIGHA O e, com o uso do MIGHA C, foi de 21,45m. Para o MIGHA O, a diferença média entre as citadas pressões para os 388 nós da rede de distribuição C-Town foi de 1,38m e para o MIGHA C foi de 2,10m. Para as vazões, a máxima diferença em relação aos valores gabarito foi de 20,19 L/s para o MIGHA O e 34 L/s para o MIGHA C. Já as diferenças médias foram de 1,88 L/s e 2,94 L/s, respectivamente. Para as rugosidades absolutas encontradas, as diferenças máximas foram 10,95 mm para o MIGHA O e 9,66 mm para o MIGHA C, já as diferenças médias foram 3,39 mm e 2,19 mm, respectivamente. O uso de todos os trechos com vazões conhecidas não gerou bons resultados.

De forma geral os resultados foram ruins. Isso pode ser explicado devido à grande distância entre as rugosidades iniciais e as rugosidades gabarito, da mesma forma que aconteceu às redes Porto (2006) e Walski (1983) – Gambale (2000) quando se tinha rugosidades de 6 mm.

Também é interessante notar que, diferente da calibração do C de Hazen-Williams, no caso da calibração do fator de atrito, em nenhum caso, considerando os diferentes dados de entrada iniciais simulados, as pressões encontradas foram negativas, nem com MIGHA C nem com MIGHA O. Provavelmente, isso ocorre devido às rugosidades gabarito já serem bastante elevadas, gerando uma perda de carga alta.

Como esperado, em nenhum dos casos simulados a máxima função objetivo foi atingida. Para estes casos, foram realizadas 1.000 iterações.

Na Tabela 103 podem ser vistos o número de iterações e a função objetivo alcançada em cada simulação.

Tabela 103 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada – Calibração do fator de atrito para ε inicial de 0,06 mm na rede C-Town

| Dados conhecidos | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| Pressão em todos os nós | 1.000 | 0,0165861924 | 1.000 | 0,0165860820 |
| Pressão em 13 nós | 1.000 | 0,0111319879 | 1.000 | 0,0116938530 |
| Pressão em 13 nós e vazão em 12 trechos | 1.000 | 0,0191157652 | 1.000 | 0,0097143057 |
| Vazão em 12 trechos | 1.000 | 0,0000217290 | 1.000 | 0,0000253698 |
| Vazão em todos os trechos | 1.000 | 0,0090326278 | 1.000 | 0,0121929205 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.2.4 Rede MIGHA

Para a Calibração do fator de atrito na rede MIGHA foram realizadas 10 calibrações, sendo 5 pelo processo MIGHA C e 5 pelo MIGHA O.

Analisando os resultados para dados de entrada de pressão em todos os nós da rede, o método MIGHA O e o MIGHA C apresentaram os mesmos resultados, tanto para os trechos quanto para os nós. No caso das pressões encontradas após a calibração, estas coincidiram exatamente com as pressões gabarito em todos os nós, exceto no nó 87, que fica na extremidade direita da rede. Nesse nó a diferença foi de 0,01m. Considerando os valores de vazão encontrados, a máxima diferença em relação aos valores gabarito foi de 0,69 L/s, já a diferença média foi de 0,09 L/s. Apesar dos excelentes resultados de pressão e vazão, para as rugosidades absolutas encontradas, a diferença máxima foi de 11,83 mm e a diferença média foi de 1,25 mm. Nota-se que, apesar de ótimos resultados de pressão e bons resultados de vazão, as rugosidades encontradas não foram tão boas. Isso mostra que o processo de calibração pode encontrar mais de uma configuração de rugosidades que gere as mesmas pressões e vazões.

Considerando dados de entrada de pressão em 15 nós da rede de distribuição, a maior diferença entre as pressões encontradas após o processo de calibração e as pressões gabarito foi de 0,40m para o uso do MIGHA O, já com o uso do MIGHA C foi de 0,43m. Para

o MIGHA O, a diferença média entre as citadas pressões para os 290 nós da rede de distribuição MIGHA foi de 0,11m e para o MIGHA C, 0,15m. Para as vazões, a máxima diferença em relação aos valores gabarito foi de 0,71 L/s para o MIGHA O e 0,90 L/s para o MIGHA C. Já as diferenças médias foram de 0,10 L/s e 0,14 L/s, respectivamente. Já para as rugosidades absolutas encontradas, as diferenças máximas foram 9,67 mm para o MIGHA O e 11,85 mm para o MIGHA C, ainda, as diferenças médias foram 0,56 mm e 1,70 mm, respectivamente. Da mesma forma que ocorreu para dados de entrada em todos os nós, a entrada de um número de dados de pressão em 5% do número de nós da rede no processo de calibração gerou bons resultados de pressão e vazão, mas não de rugosidades.

Quando se tem dados de entrada de pressão em 15 nós e de vazão em 14 trechos da rede, a maior diferença entre as pressões encontradas após o processo de calibração e as pressões gabarito foi de 0,48m para o uso do MIGHA O, já com o uso do MIGHA C foi de 0,43m. Para o MIGHA O, a diferença média entre as citadas pressões para os 290 nós da rede MIGHA foi de 0,14m e para o MIGHA C foi de 0,15m. Para as vazões, a máxima diferença em relação aos valores gabarito foi de 0,95 L/s para o MIGHA O e 2,98 L/s para o MIGHA C. Já as diferenças médias foram de 0,11 L/s e 0,19 L/s, respectivamente. Já para as rugosidades absolutas encontradas, as diferenças máximas foram 11,02 mm para o MIGHA O e 11,82 mm para o MIGHA C, ainda, as diferenças médias foram 0,63 mm e 1,89 mm, respectivamente. Para este caso, adicionar dados de vazão, além das 15 pressões já utilizadas, piorou um pouco os resultados encontrados.

Ao utilizar apenas a vazão em 14 trechos da rede, como entrada do processo de calibração, a maior diferença entre as pressões encontradas após o processo de calibração e as pressões gabarito foi de 5,05m para o uso do MIGHA O e, com o uso do MIGHA C, foi de 5,40m. Para o MIGHA O, a diferença média entre as citadas pressões para todos os nós da rede foi de 2,61m e para o MIGHA C foi de 2,83m. Para as vazões, a máxima diferença em relação aos valores gabarito foi de 2,74 L/s para o MIGHA O e 2,52 L/s para o MIGHA C. Já as diferenças médias foram de 0,16 L/s e 0,23 L/s, respectivamente. Para as rugosidades absolutas encontradas, as diferenças máximas foram 9,67 mm para o MIGHA O e 11,70 mm para o MIGHA C, já as diferenças médias foram 0,52 mm e 1,69 mm, respectivamente. Apesar de, nesse caso, as diferenças médias de rugosidade encontradas, para o MIGHA O, terem sido as melhores, as rugosidades encontradas não foram próximas dos valores gabarito e, também, não foram encontrados bons valores de pressão.

Por fim, ao utilizar a vazão em todos os trechos da rede como entrada do processo de calibração, a maior diferença entre as pressões encontradas após o processo de calibração e

as pressões gabarito foi de 1,81m para o uso do MIGHA O e, com o uso do MIGHA C, foi de 4,23m. Para o MIGHA O, a diferença média entre as citadas pressões da rede de distribuição foi de 0,87m e para o MIGHA C foi de 2,29m. Para as vazões, a máxima diferença em relação aos valores gabarito foi de 4,81 L/s para o MIGHA O e 3,18 L/s para o MIGHA C. Já as diferenças médias foram de 0,62 L/s e 0,36 L/s, respectivamente. Para as rugosidades absolutas encontradas, as diferenças máximas foram 11,91 mm para ambas metodologias, já as diferenças médias foram 3,27 mm para o MIGHA O e 2,16 mm para o MIGHA C. O uso de todos os trechos com vazões conhecidas também não gerou bons resultados.

É interessante perceber que, mesmo que em nenhum caso as rugosidades encontradas tenham sido iguais às rugosidades gabarito, as pressões e vazões encontradas foram muito boas quando se tinham pressões como dados de entrada, nesse caso, mesmo associadas às vazões. Assim, para conhecer as pressões e vazões reais de uma rede de distribuição, a calibração do fator de atrito apresentou ótimos resultados.

Apesar de que, apenas no caso da entrada de pressão em 15 nós da rede com uso do MIGHA O a função objetivo ter sido atingida, este não foi o melhor resultado para pressões, vazões ou rugosidades. Como esperado, o melhor resultado para pressões e vazões ocorreu ao se fornecer como entrada as pressões em todos os nós da rede de distribuição. Neste caso, apesar da função objetivo não ter sido atingida, a diferença foi pequena.

Na Tabela 104 podem ser vistos o número de iterações e a função objetivo alcançada em cada simulação.

Tabela 104 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada – Calibração do fator de atrito para ε inicial de 0,06 mm na rede MIGHA

| Dados conhecidos | MIGHA O | | MIGHA C | |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| Pressão em todos os nós | 1.000 | 0,0000001131 | 1.000 | 0,0000001131 |
| Pressão em 15 nós | 5 | 0,0000000009 | 1.000 | 0,0000015232 |
| Pressão em 15 nós e vazão em 14 trechos | 1.000 | 0,0000688741 | 1.000 | 0,0001254697 |
| Vazão em 14 trechos | 1.000 | 0,0030734099 | 1.000 | 0,0000105706 |
| Vazão em todos os trechos | 1.000 | 0,1054874733 | 1.000 | 0,0009914744 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.2.5 Resumo dos resultados da calibração do fator de atrito f e cálculo da rugosidade absoluta ε de Darcy-Weisbach

Nas Tabelas 105 à 114 são apresentados o resumo dos resultados encontrados na realização das calibrações do fator de atrito de Darcy-Weisbach.

Tabela 105 – Resumo dos resultados da calibração do fator de atrito na rede Porto (2006) com rugosidade absoluta inicial de 0,006 mm

| Situação | Pressões | Vazões | Rugosidades | Geral |
|--------------------------------|-------------|-------------|-------------|---|
| Pressões e vazões | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. |
| Vazões | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. |
| Pressões | Bom | Bom | Bom | Bons resultados. Adequado. |
| Nós juntos ou separados | Separados | Indiferente | Indiferente | Separados. |
| MIGHA C ou MIGHA O | Indiferente | MIGHA O | MIGHA C | Indiferente. |
| Rugosidade inicial | Bom | Bom | Bom | Adequado. |
| Função objetivo | - | - | - | Não atendeu em nenhum caso para pressões e vazões ou apenas vazões. Atendeu todos os casos para pressões. |
| Nº de iterações | - | - | - | Q e QP: MIGHA O - 100; MIGHA C - 100 P: MIGHA O - 2,3; MIGHA C - 12,9 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 106 – Resumo dos resultados da calibração do fator de atrito na rede Porto (2006) com rugosidade absoluta inicial de 0,6 mm

| Situação | Pressões | Vazões | Rugosidades | Geral |
|--------------------------------|-----------|---------|-------------|---|
| Pressões e vazões | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. |
| Vazões | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. |
| Pressões | Bom | Bom | Bom | Bons resultados. Adequado. |
| Nós juntos ou separados | Separados | Juntos | Juntos | Juntos. |
| MIGHA C ou MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O |
| Rugosidade inicial | Bom | Bom | Bom | Adequado. |
| Função objetivo | - | - | - | Não atendeu em nenhum caso para pressões e vazões ou apenas vazões. Atendeu todos os casos para pressões MIGHA O e 3 MIGHA C. |
| Nº de iterações | - | - | - | Q e QP: MIGHA O - 100; MIGHA C - 100 P: MIGHA O - 5,6; MIGHA C - 71,7 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 107 – Resumo dos resultados da calibração do fator de atrito na rede Porto (2006) com rugosidade absoluta inicial de 6 mm

| Situação | Pressões | Vazões | Rugosidades | Geral |
|--------------------------------|-------------|-------------|-------------|---|
| Pressões e vazões | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. |
| Vazões | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. |
| Pressões | Razoável | Razoável | Ruim | Não é adequado. Os resultados encontrados só foram bons quando se tinha pressões conhecidas em muitos nós. |
| Nós juntos ou separados | Indiferente | Indiferente | Indiferente | Indiferente. |
| MIGHA C ou MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O |
| Rugosidade inicial | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. |
| Função objetivo | - | - | - | Não atendeu em nenhum caso para pressões e vazões ou apenas vazões. Atendeu todos os casos para pressões MIGHA O e 3 MIGHA C. |
| Nº de iterações | - | - | - | Q e QP: MIGHA O - 100; MIGHA C - 100 P: MIGHA O - 7,1; MIGHA C - 72,5 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 108 – Resumo dos resultados da calibração fator de atrito na rede Porto (2006) com rugosidade absoluta inicial calculada através da sub-rotina computacional

| Situação | Pressões | Vazões | Rugosidades | Geral |
|--------------------------------|-----------|-------------|-------------|---|
| Pressões e vazões | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. |
| Vazões | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. |
| Pressões | Bom | Bom | Bom | Bons resultados. Adequado. |
| Nós juntos ou separados | Separados | Indiferente | Juntos | Indiferente. |
| MIGHA C ou MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O |
| Rugosidade inicial | Bom | Bom | Bom | Adequado para o uso do MIGHA O. |
| Função objetivo | - | - | - | Não atendeu em nenhum caso para pressões e vazões ou apenas vazões. Atendeu todos os casos para pressões MIGHA O e 3 MIGHA C. |
| Nº de iterações | - | - | - | Q e QP: MIGHA O - 100; MIGHA C - 100 P: MIGHA O - 4,2; MIGHA C - 71,3 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 109 – Resumo dos resultados da calibração do fator de atrito na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com rugosidade absoluta inicial de 0,006 mm

| Situação | Pressões | Vazões | Rugosidades | Geral |
|--------------------------------|-------------|-------------|-------------|--|
| Pressões e vazões | Razoável | Ruim | Ruim | Não é adequado. |
| Vazões | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. |
| Pressões | Bom | Bom | Bom | Bons resultados. Adequado. |
| Nós juntos ou separados | Indiferente | Indiferente | Indiferente | Indiferente. |
| MIGHA C ou MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O |
| Rugosidade inicial | Bom | Bom | Bom | Adequado. |
| Função objetivo | - | - | - | Não atendeu para pressões e vazões e atendeu para apenas 1 vazão. Atendeu todos os casos para pressões. 1 MIGHA O com 100 iterações. |
| Nº de iterações | - | - | - | Q e QP: MIGHA O - 91; MIGHA C - 91 P: MIGHA O - 11,6; MIGHA C - 6,7 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 110 – Resumo dos resultados da calibração do fator de atrito na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com rugosidade absoluta inicial de 0,6 mm

| Situação | Pressões | Vazões | Rugosidades | Geral |
|--------------------------------|-------------|-------------|-------------|---|
| Pressões e vazões | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. |
| Vazões | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. |
| Pressões | Bom | Bom | Bom | Bons resultados. Adequado. |
| Nós juntos ou separados | Indiferente | Indiferente | Indiferente | Indiferente. |
| MIGHA C ou MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O |
| Rugosidade inicial | Bom | Bom | Bom | Adequado. |
| Função objetivo | - | - | - | Não atendeu para pressões e vazões e atendeu para vazão 1 MIGHA O e 2 MIGHA C. Atendeu todos os casos para pressões MIGHA O, 1 com 100 iterações e 2 MIGHA C. |
| Nº de iterações | - | - | - | Q e QP: MIGHA O - 91; MIGHA C - 82,7 P: MIGHA O - 14,2; MIGHA C - 81 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 111 – Resumo dos resultados da calibração do fator de atrito na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com rugosidade absoluta inicial de 6 mm

| Situação | Pressões | Vazões | Rugosidades | Geral |
|--------------------------------|-------------|-------------|-------------|---|
| Pressões e vazões | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. |
| Vazões | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. |
| Pressões | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. Os resultados encontrados só foram bons quando se tinha pressões conhecidas em 7 ou 6 nós, este último o melhor de todos. |
| Nós juntos ou separados | Indiferente | Indiferente | Indiferente | Indiferente. |
| MIGHA C ou MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O |
| Rugosidade inicial | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. |
| Função objetivo | - | - | - | Não atendeu em nenhum caso para pressões e vazões ou apenas vazões. Só atendeu 9 casos para pressões MIGHA O e 2 MIGHA C. |
| Nº de iterações | - | - | - | Q e QP: MIGHA O - 100; MIGHA C - 100 P: MIGHA O - 18,8; MIGHA C - 80,6 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 112 – Resumo dos resultados da calibração do fator de atrito na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com rugosidade absoluta inicial calculada através da sub-rotina computacional

| Situação | Pressões | Vazões | Rugosidades | Geral |
|--------------------------------|-------------|-------------|-------------|--|
| Pressões e vazões | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. |
| Vazões | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. |
| Pressões | Bom | Bom | Bom | Bons resultados com o MIGHA O. |
| Nós juntos ou separados | Indiferente | Indiferente | Indiferente | Indiferente. |
| MIGHA C ou MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O |
| Rugosidade inicial | Bom | Bom | Bom | Adequado para o MIGHA O. |
| Função objetivo | - | - | - | Não atendeu em nenhum caso para pressões e vazões ou apenas vazões. Atendeu 9 casos para pressões MIGHA O e 2 MIGHA C. |
| Nº de iterações | - | - | - | Q e QP: MIGHA O - 100; MIGHA C - 100 P: MIGHA O - 16,5; MIGHA C - 80,5 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 113 – Resumo dos resultados da calibração do fator de atrito na rede C-Town com rugosidade absoluta inicial de 0,06 mm

| Situação | Pressões | Vazões | Rugosidades | Geral |
|-----------------------------------|----------|---------|-------------|---|
| Pressões em todos os nós | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. Apesar de se utilizar pressões em todos os nós, a rugosidade absoluta inicial é baixa quando comparada às gabarito. |
| Pressões em 13 nós | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. |
| Pressões e vazões | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. Adicionar vazões como entrada os resultados pioram. |
| Vazões em 12 trechos | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. |
| Vazões em todos os trechos | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. |
| MIGHA C ou MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O |
| Rugosidade inicial | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. |
| Função objetivo | - | - | - | Não atendeu em nenhum caso. |
| Nº de iterações | - | - | - | 1000 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 114 – Resumo dos resultados da calibração do fator de atrito na rede MIGHA com rugosidade absoluta inicial de 0,06 mm

| Situação | Pressões | Vazões | Rugosidades | Geral |
|-----------------------------------|----------|---------|-------------|--|
| Pressões em todos os nós | Bom | Bom | Razoável | Adequado. MIGHA O e MIGHA C iguais. |
| Pressões em 15 nós | Bom | Bom | Razoável | Adequado. Melhor: MIGHA O |
| Pressões e vazões | Bom | Bom | Razoável | Não é adequado. Ao adicionar vazões como entrada os resultados pioram. Melhor: MIGHA O |
| Vazões em 14 trechos | Ruim | Bom | Razoável | Não é adequado. Melhor: MIGHA O |
| Vazões em todos os trechos | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. Melhor: MIGHA O |
| MIGHA C ou MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O |
| Rugosidade inicial | Bom | Bom | Bom | Adequado. |
| Função objetivo | - | - | - | Só atendeu para pressões em 15 nós com o MIGHA O (melhor rugosidade). O melhor caso (pressões e vazões), pressões em todos os nós, quase atende. |
| Nº de iterações | - | - | - | 1000 - Pressões em 15 nós e MIGHA O: 5 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.3 Calibração da vazão e cálculo dos consumos nodais

Ao todo, foram executadas 696 calibrações, sendo 348 com uso da equação de Hazen-Williams e 348 com a fórmula universal, para testar e analisar os novos procedimentos desenvolvidos para realizar a calibração da vazão e cálculo dos consumos nodais em redes de distribuição de água. A seguir, os resultados serão apresentados por rede calibrada para este parâmetro.

4.2.3.1 Rede Porto (2006)

Para a Calibração da vazão na rede Porto (2006) foram realizadas 160 calibrações com uso, para perda de carga, da equação de Hazen-Williams e 160 com uso da fórmula de Darcy-Weisbach, sendo, para cada caso, 80 pelo processo MIGHA C e 80 pelo MIGHA O.

Para consumos iniciais em todos os nós da rede igual a 2 L/s e utilizando como dados de entrada pressões e vazões ao mesmo tempo, diferente do que ocorreu nas calibrações anteriores, o procedimento MIGHA O apresentou resultados muito bons, no entanto, o MIGHA C não gerou bons resultados.

Ao se calcular os consumos nodais através da calibração da vazão, usando apenas vazões nos trechos como dados de entrada conhecidos, independente da fórmula para perda de carga utilizada, foi possível perceber que para dados conhecidos de vazão em 9, 8, 7 ou 6 trechos, os resultados encontrados, para pressão, vazão e consumos nodais, com uso do MIGHA O, foram muito bons. No entanto, os resultados encontrados com o MIGHA C ou, com uso do MIGHA O, para 5 ou menos dados de vazão na rede Porto (2006), não foram bons.

Na Tabela 115 são apresentadas as diferenças médias entre as pressões e consumos, de todos os nós, e vazões, de todos os trechos, calculados após a calibração e seus respectivos valores gabarito para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressões e vazões ao mesmo tempo, além de apenas vazões nos trechos, com uso tanto da equação de Hazen-Williams quanto da fórmula universal para o cálculo da perda de carga.

Considerando apenas pressões conhecidas nos nós da rede Porto (2006), os resultados encontrados foram bons para pressões medidas em 7 e 6 nós. A partir de dados em 5 nós ou menos, aparecem resultados bons em alguns nós, mas ruins em outros.

Tabela 115 – Diferenças médias entre as pressões, consumos e vazões calculados e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração da vazão para consumo inicial de 2 L/s na rede Porto (2006) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo)

| Dados conhecidos: | Cálculo de ∇H | Diferença média | | | | | |
|---------------------|-----------------------|-----------------|---------|---------------------|---------|--------------|---------|
| | | Pressões (m) | | Consumo nodal (L/s) | | Vazões (L/s) | |
| | | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C |
| 3 vazões e pressões | H-W | 0,03 | 1,45 | 0,33 | 4,02 | 0,14 | 2,18 |
| | D-W | 0,03 | 0,96 | 0,47 | 4,12 | 0,19 | 2,20 |
| Vazão em 9 trechos | H-W | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| | D-W | 0,01 | 1,72 | 0,01 | 0,90 | 0,01 | 1,50 |
| Vazão em 8 trechos | H-W | 0,01 | 0,53 | 0,01 | 0,79 | 0,01 | 0,66 |
| | D-W | 0,01 | 1,30 | 0,01 | 1,24 | 0,01 | 1,71 |
| Vazão em 7 trechos | H-W | 0,02 | 0,51 | 0,10 | 1,04 | 0,05 | 0,73 |
| | D-W | 0,02 | 1,34 | 0,09 | 1,29 | 0,04 | 1,79 |
| Vazão em 6 trechos | H-W | 0,01 | 0,52 | 0,04 | 1,04 | 0,03 | 0,82 |
| | D-W | 0,01 | 1,74 | 0,05 | 1,86 | 0,04 | 2,39 |
| Vazão em 5 trechos | H-W | 2,62 | 5,06 | 3,22 | 5,20 | 3,01 | 4,78 |
| | D-W | 1,89 | 4,79 | 3,37 | 5,46 | 3,27 | 6,02 |
| Vazão em 4 trechos | H-W | 3,01 | 3,81 | 3,66 | 3,88 | 3,36 | 3,76 |
| | D-W | 1,99 | 3,85 | 3,54 | 3,95 | 3,42 | 4,85 |
| Vazão em 3 trechos | H-W | 3,71 | 5,72 | 7,58 | 7,35 | 4,50 | 5,32 |
| | D-W | 2,15 | 3,51 | 8,01 | 7,94 | 4,51 | 6,11 |
| Vazão em 2 trechos | H-W | 3,70 | 6,26 | 7,59 | 7,68 | 4,42 | 5,26 |
| | D-W | 2,18 | 3,61 | 7,81 | 7,97 | 4,57 | 6,28 |
| Vazão em 1 trecho | H-W | 9,01 | 10,54 | 3,51 | 4,06 | 7,02 | 8,60 |
| | D-W | 5,34 | 6,49 | 3,71 | 3,89 | 6,75 | 8,13 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Apesar de que para dados de pressão em 3 nós ou menos os resultados não foram muito bons, ao analisar o que acontece quando se tem dados conhecidos em nós juntos ou separados, além de, no caso de apenas 1 nó, este estar próximo ou longe do reservatório, no caso das pressões e consumos encontrados, as pressões conhecidas em nós separados apresenta melhores resultados que em nós próximos entre si. Para as vazões encontradas, houve casos em que dados de pressão em nós separados geraram melhores resultados que a utilização de dados próximos entre si como também houve casos em que o inverso ocorreu.

Na Tabela 116 são mostradas as diferenças médias entre as pressões e consumos, de todos os nós, e vazões, de todos os trechos, calculadas após a calibração e seus respectivos valores gabarito para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressões nos nós. É possível perceber que, independente do método para perda de carga, não houve grandes diferenças entre os resultados encontrados com o uso do MIGHA O ou do MIGHA C.

Tabela 116 – Diferenças médias entre as pressões, consumos e vazões calculados e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração da vazão para consumo inicial de 2 L/s na rede Porto (2006) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo)

| Dados conhecidos de pressão em: | Cálculo de VH | Diferença média | | | | | |
|---------------------------------|---------------|-----------------|---------|---------------------|---------|--------------|---------|
| | | Pressões (m) | | Consumo nodal (L/s) | | Vazões (L/s) | |
| | | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C |
| 7 nós | H-W | 0,01 | 0,01 | 0,03 | 0,03 | 0,02 | 0,02 |
| | D-W | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,03 | 0,02 | 0,02 |
| 6 nós | H-W | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,01 |
| | D-W | 0,00 | 0,00 | 0,05 | 0,03 | 0,03 | 0,02 |
| 5 nós | H-W | 0,45 | 0,44 | 2,31 | 2,31 | 0,90 | 0,90 |
| | D-W | 0,35 | 0,34 | 2,43 | 2,32 | 0,95 | 0,91 |
| 4 nós | H-W | 0,95 | 0,95 | 4,58 | 4,57 | 1,96 | 1,96 |
| | D-W | 0,60 | 0,59 | 4,51 | 4,59 | 1,95 | 1,97 |
| 3 nós separados | H-W | 0,70 | 0,80 | 4,21 | 4,21 | 1,90 | 2,14 |
| | D-W | 0,44 | 0,53 | 3,85 | 4,20 | 1,74 | 2,08 |
| 3 nós juntos | H-W | 2,20 | 2,20 | 3,85 | 3,85 | 4,11 | 4,09 |
| | D-W | 1,37 | 1,38 | 3,77 | 3,79 | 4,13 | 4,19 |
| 2 nós separados | H-W | 1,34 | 1,56 | 5,27 | 5,27 | 2,51 | 2,76 |
| | D-W | 0,83 | 1,01 | 5,08 | 5,29 | 2,41 | 2,76 |
| 2 nós juntos | H-W | 3,68 | 3,68 | 5,14 | 5,14 | 5,42 | 5,42 |
| | D-W | 2,39 | 2,49 | 4,87 | 5,00 | 5,39 | 5,57 |
| 1 nó perto do Reserv. | H-W | 9,19 | 9,19 | 8,00 | 8,00 | 6,23 | 6,23 |
| | D-W | 5,94 | 5,94 | 8,02 | 8,02 | 6,28 | 6,28 |
| 1 nó longe do Reserv. | H-W | 3,77 | 4,42 | 5,11 | 5,02 | 5,56 | 6,15 |
| | D-W | 2,46 | 2,99 | 4,89 | 4,91 | 5,53 | 6,36 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao observar as Tabelas 115 e 116 pode-se perceber que o uso da metodologia aqui proposta para o cálculo dos consumos nodais através da calibração da vazão, no caso da rede Porto (2006) com consumo nodal inicial de 2 L/s, quando se tem dados de vazão em 9, 8, 7 ou 6 trechos, além de pressão em 7 ou 6 nós, as pressões encontradas geraram diferenças médias com as pressões gabarito de aproximadamente zero metros. O uso simultâneo, como dados de entrada, de 3 vazões e 3 pressões, através do MIGHA O, não foi melhor que entrar com 6 vazões ou com 6 pressões, no entanto, foi bem melhor que 5 vazões ou 5 pressões. Ou seja, o uso de vazões e pressões ao mesmo tempo foi uma boa alternativa como dados de entrada para calibração da vazão com consumo inicial de 2 L/s.

O próximo valor de consumo nodal testado no processo de calibração foi de 5,7 L/s. Ao utilizá-lo como valor inicial, para a maioria dos nós da rede, e ao se calibrar utilizando como dados de entrada pressões e vazões ao mesmo tempo, os valores de pressões encontrados foram

satisfatórios, no entanto, as vazões e os consumos, em alguns trechos ou nós, não se aproximaram do gabarito.

Ao se calibrar a vazão usando apenas vazões nos trechos como dados de entrada conhecidos, o MIGHA O foi melhor que o MIGHA C e, para 9, 8 ou 7 trechos com vazões conhecidas, os resultados foram muito bons, com 6 ou menos, os resultados foram satisfatórios. Além disso, foi possível perceber que um maior número de dados de vazão gera melhores resultados. Assim, o uso de vazões na calibração da vazão com consumo nodal inicial igual a 5,7 L/s apresentou bons resultados.

Na Tabela 117 são apresentadas as diferenças médias entre as pressões e consumos, de todos os nós, e vazões, de todos os trechos, calculadas após a calibração e seus respectivos valores gabarito para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressões e vazões ao mesmo tempo, além de apenas vazões nos trechos.

Tabela 117 – Diferenças médias entre as pressões, consumos e vazões calculados e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração da vazão para consumo inicial de 5,7 L/s na rede Porto (2006) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo)

| Dados conhecidos: | Cálculo de ∇H | Diferença média | | | | | |
|---------------------|-----------------------|-----------------|-------|---------------------|-------|--------------|-------|
| | | Pressões (m) | | Consumo nodal (L/s) | | Vazões (L/s) | |
| | | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA |
| | | O | C | O | C | O | C |
| 3 vazões e pressões | H-W | 0,15 | 0,59 | 1,14 | 2,33 | 0,45 | 1,11 |
| | D-W | 0,12 | 0,42 | 1,12 | 2,29 | 0,44 | 1,14 |
| Vazão em 9 trechos | H-W | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| | D-W | 0,01 | 0,12 | 0,01 | 0,20 | 0,01 | 0,23 |
| Vazão em 8 trechos | H-W | 0,01 | 0,15 | 0,01 | 0,21 | 0,01 | 0,18 |
| | D-W | 0,00 | 0,11 | 0,02 | 0,32 | 0,01 | 0,31 |
| Vazão em 7 trechos | H-W | 0,02 | 0,55 | 0,10 | 1,18 | 0,05 | 0,64 |
| | D-W | 0,01 | 0,49 | 0,09 | 1,26 | 0,04 | 0,82 |
| Vazão em 6 trechos | H-W | 0,16 | 0,54 | 1,06 | 1,26 | 0,42 | 0,67 |
| | D-W | 0,13 | 0,47 | 1,07 | 1,35 | 0,42 | 0,84 |
| Vazão em 5 trechos | H-W | 0,24 | 0,64 | 1,37 | 2,21 | 0,54 | 0,97 |
| | D-W | 0,18 | 0,47 | 1,35 | 2,22 | 0,53 | 0,99 |
| Vazão em 4 trechos | H-W | 0,25 | 0,65 | 1,36 | 2,19 | 0,55 | 0,98 |
| | D-W | 0,18 | 0,48 | 1,33 | 2,21 | 0,54 | 1,00 |
| Vazão em 3 trechos | H-W | 0,55 | 0,70 | 2,44 | 2,44 | 0,97 | 1,15 |
| | D-W | 0,39 | 0,37 | 2,46 | 2,41 | 0,98 | 1,13 |
| Vazão em 2 trechos | H-W | 0,95 | 1,07 | 3,10 | 3,10 | 1,38 | 1,51 |
| | D-W | 0,72 | 0,80 | 3,10 | 3,08 | 1,38 | 1,49 |
| Vazão em 1 trecho | H-W | 1,26 | 1,28 | 3,10 | 3,10 | 1,81 | 1,82 |
| | D-W | 0,92 | 0,94 | 3,10 | 3,09 | 1,84 | 1,83 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao calibrar a vazão, considerando apenas pressões conhecidas nos nós da rede Porto (2006), assim como ocorreu para dados de entrada de vazões nos trechos, há uma leve piora dos resultados a medida em que se vai diminuindo o número de dados conhecidos na rede. Para dados conhecidos em todos os nós da rede, os resultados foram muito bons, no entanto, a partir de quando se tem dados de pressão em 6 nós, apesar de se haver bons resultados para a maioria dos nós, alguns deles aprecem com diferenças entre os consumos calculados e gabarito de mais de 3 L/s.

Na Tabela 118 são mostradas as diferenças médias entre pressões e consumos, de todos os nós, e vazões, de todos os trechos, calculadas após a calibração e seus respectivos valores gabarito para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressões nos nós. É possível perceber que, nesse caso, não houve grandes diferenças entre o MIGHA O e o MIGHA C.

Tabela 118 – Diferenças médias entre as pressões, consumos e vazões calculados e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração da vazão para consumo inicial de 5,7 L/s na rede Porto (2006) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo)

| Dados conhecidos de pressão em: | Cálculo de ∇H | Diferença média | | | | | |
|---------------------------------|-----------------------|-----------------|---------|---------------------|---------|--------------|---------|
| | | Pressões (m) | | Consumo nodal (L/s) | | Vazões (L/s) | |
| | | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C |
| 7 nós | H-W | 0,01 | 0,01 | 0,04 | 0,04 | 0,02 | 0,02 |
| | D-W | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,01 |
| 6 nós | H-W | 0,15 | 0,15 | 1,08 | 1,08 | 0,42 | 0,42 |
| | D-W | 0,11 | 0,12 | 1,05 | 1,08 | 0,41 | 0,42 |
| 5 nós | H-W | 0,41 | 0,41 | 1,90 | 1,90 | 0,90 | 0,90 |
| | D-W | 0,30 | 0,31 | 1,82 | 1,85 | 0,89 | 0,90 |
| 4 nós | H-W | 0,68 | 0,68 | 2,86 | 2,86 | 1,46 | 1,46 |
| | D-W | 0,45 | 0,45 | 2,87 | 2,88 | 1,46 | 1,45 |
| 3 nós separados | H-W | 0,35 | 0,36 | 2,80 | 2,80 | 1,54 | 1,54 |
| | D-W | 0,25 | 0,25 | 2,84 | 2,86 | 1,54 | 1,55 |
| 3 nós juntos | H-W | 0,81 | 0,81 | 2,54 | 2,54 | 1,42 | 1,42 |
| | D-W | 0,51 | 0,51 | 2,53 | 2,52 | 1,43 | 1,43 |
| 2 nós separados | H-W | 1,08 | 1,08 | 3,32 | 3,32 | 1,88 | 1,88 |
| | D-W | 0,82 | 0,82 | 3,31 | 3,32 | 1,88 | 1,88 |
| 2 nós juntos | H-W | 1,27 | 1,27 | 3,08 | 3,08 | 1,82 | 1,82 |
| | D-W | 0,90 | 0,90 | 3,05 | 3,04 | 1,88 | 1,88 |
| 1 nó perto do Reserv. | H-W | 1,29 | 1,29 | 3,12 | 3,12 | 1,82 | 1,82 |
| | D-W | 0,95 | 0,95 | 3,12 | 3,12 | 1,84 | 1,84 |
| 1 nó longe do Reserv. | H-W | 1,27 | 1,27 | 3,08 | 3,08 | 1,86 | 1,86 |
| | D-W | 0,90 | 0,90 | 3,06 | 3,05 | 1,93 | 1,93 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar o que acontece quando se tem dados conhecidos em nós juntos ou separados, além de, no caso de apenas 1 nó, este estar próximo ou longe do reservatório, para as pressões encontradas, os casos com pressões conhecidas em nós separados apresentaram melhores resultados que com nós próximos entre si. Já para os consumos e vazões encontrados, o inverso ocorreu.

Percebe-se que o uso da metodologia aqui proposta para cálculo dos consumos nodais através da calibração da vazão, no caso da rede Porto (2006) com consumo inicial de 5,7 L/s, quando se tem dados de pressão em 7 nós, os resultados encontrados geraram diferenças médias entre pressões, consumos e vazões de aproximadamente zero metros, no entanto, para dados de pressão em 6 ou menos nós, apesar de boas médias dos valores de pressão, as diferenças médias entre os consumos foram maiores que 1 L/s, uma vez que, para dados de pressão em 6 nós, 3 nós apresentaram diferenças entre os consumos calculados e gabarito maiores que 1,5 L/s.

Ainda, foram consideradas calibrações com consumos nodais iniciais de 10 L/s. Dessa forma, utilizando como dados de entrada pressões e vazões ao mesmo tempo, tanto para perdas de carga calculadas por Hazen-Williams quanto por Darcy-Weisbach, os resultados encontrados para as pressões foram bons, no entanto, os valores obtidos para consumos e vazões foram apenas satisfatórios, com melhores resultados usando o MIGHA O. Considerando apenas vazões nos trechos como dados de entrada, obteve-se bons resultados para pressão, consumo e vazão. Como esperado, os resultados pioram para menor número de dados, no entanto, considerando apenas o MIGHA O, para 3 dados de vazão conhecidos, os resultados deixam de ser razoáveis para ser extremamente ruins, alcançando diferenças de pressões de mais de 800m e, de consumos e vazões, de mais de 1.000 L/s. Assim, para vazões conhecidas em 9, 8, 7, 6, 5 ou 4 trechos, o uso do MIGHA O gerou melhores resultados, já para 3 dados ou menos, foi o MIGHA C.

Na Tabela 119 podem ser vistas as diferenças médias entre as pressões e consumos, de todos os nós, e vazões, de todos os trechos, calculados após a calibração e seus respectivos valores gabarito para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressões e vazões, simultaneamente, além de apenas vazões.

Como pode ser visto na citada tabela, os resultados médios encontrados para dados de entrada de 3 vazões e 3 pressões foram similares a dados de entrada de 6 vazões. Isso mostra que, neste caso, para o cálculo dos consumos nodais através da calibração da vazão, é vantajoso o uso de vazões, juntamente com pressões, como dados de entrada no processo de calibração, tendo estes, praticamente, influências semelhantes.

Tabela 119 – Diferenças médias entre as pressões, consumos e vazões calculados e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração da vazão para consumo inicial de 10 L/s na rede Porto (2006) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo)

| Dados conhecidos: | Cálculo de VH | Diferença média | | | | | |
|---------------------|---------------|-----------------|---------|---------------------|---------|--------------|---------|
| | | Pressões (m) | | Consumo nodal (L/s) | | Vazões (L/s) | |
| | | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C |
| 3 vazões e pressões | H-W | 0,46 | 0,73 | 2,33 | 3,06 | 0,91 | 1,24 |
| | D-W | 0,37 | 0,55 | 2,36 | 2,98 | 0,92 | 1,28 |
| Vazão em 9 trechos | H-W | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| | D-W | 0,00 | 0,45 | 0,01 | 0,32 | 0,01 | 0,36 |
| Vazão em 8 trechos | H-W | 0,02 | 0,40 | 0,01 | 0,49 | 0,01 | 0,41 |
| | D-W | 0,00 | 0,26 | 0,01 | 1,12 | 0,01 | 0,71 |
| Vazão em 7 trechos | H-W | 0,02 | 1,13 | 0,09 | 2,30 | 0,04 | 1,07 |
| | D-W | 0,02 | 0,88 | 0,08 | 2,45 | 0,04 | 1,26 |
| Vazão em 6 trechos | H-W | 0,46 | 1,12 | 2,29 | 2,75 | 0,90 | 1,24 |
| | D-W | 0,37 | 0,84 | 2,30 | 2,94 | 0,90 | 1,42 |
| Vazão em 5 trechos | H-W | 3,97 | 6,82 | 5,86 | 6,54 | 4,18 | 5,75 |
| | D-W | 2,94 | 4,05 | 5,93 | 6,56 | 4,54 | 5,72 |
| Vazão em 4 trechos | H-W | 5,78 | 7,34 | 7,68 | 7,04 | 5,62 | 6,14 |
| | D-W | 3,82 | 4,42 | 7,33 | 7,13 | 5,65 | 6,17 |
| Vazão em 3 trechos | H-W | 922,95 | 18,37 | 150,29 | 6,18 | 120,33 | 8,59 |
| | D-W | 817,00 | 12,18 | 159,85 | 6,32 | 127,63 | 8,69 |
| Vazão em 2 trechos | H-W | 925,67 | 19,10 | 150,17 | 6,18 | 121,31 | 9,29 |
| | D-W | 820,12 | 12,85 | 159,71 | 6,33 | 128,69 | 9,44 |
| Vazão em 1 trecho | H-W | 19,54 | 19,71 | 5,14 | 4,76 | 9,15 | 9,18 |
| | D-W | 12,95 | 13,11 | 5,31 | 4,85 | 9,19 | 9,21 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando apenas pressões conhecidas nos nós da rede Porto (2006), percebe-se que, analisando todos os nós e trechos da rede, quando se tem dados de pressão em todos os nós da rede de distribuição se tem excelentes resultados. Como esperado, apesar de continuarem bons, a qualidade dos resultados decaiu com a diminuição no número de dados de pressão nos nós da rede. Assim como ocorreu para dados de entrada de pressão nos nós com consumo inicial de 5,7 L/s, a partir de dados de pressão em 6 nós, a pressão encontrada para o nó 7 é responsável por deteriorar a diferença média de pressão em todos os nós. O interessante disso é que, para dados de entrada de vazões, o mesmo ocorre para vazões em 6 trechos, tendo melhores resultados para dados em 7, 8 e 9 trechos.

Na Tabela 120 são apresentadas as diferenças médias entre as pressões e consumos, de todos os nós, e vazões, de todos os trechos, calculados após a calibração e seus respectivos valores gabarito para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressão nos nós.

Tabela 120 – Diferenças médias entre as pressões, consumos e vazões calculados e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração da vazão para consumo inicial de 10 L/s na rede Porto (2006) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo)

| Dados conhecidos de pressão em: | Cálculo de VH | Diferença média | | | | | |
|---------------------------------|---------------|-----------------|---------|---------------------|---------|--------------|---------|
| | | Pressões (m) | | Consumo nodal (L/s) | | Vazões (L/s) | |
| | | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C |
| 7 nós | H-W | 0,00 | 0,00 | 0,04 | 0,04 | 0,02 | 0,02 |
| | D-W | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,03 | 0,02 | 0,02 |
| 6 nós | H-W | 0,45 | 0,45 | 2,31 | 2,30 | 0,90 | 0,90 |
| | D-W | 0,36 | 0,37 | 2,27 | 2,31 | 0,89 | 0,91 |
| 5 nós | H-W | 0,45 | 0,45 | 2,31 | 2,31 | 0,90 | 0,90 |
| | D-W | 0,37 | 0,37 | 2,31 | 2,31 | 0,91 | 0,91 |
| 4 nós | H-W | 0,45 | 0,45 | 2,30 | 2,30 | 0,90 | 0,90 |
| | D-W | 0,37 | 0,37 | 2,41 | 2,31 | 0,96 | 0,90 |
| 3 nós separados | H-W | 3,91 | 3,89 | 4,38 | 4,38 | 2,90 | 2,90 |
| | D-W | 1,19 | 2,36 | 4,16 | 4,41 | 2,61 | 2,79 |
| 3 nós juntos | H-W | 1,02 | 1,02 | 2,43 | 2,43 | 2,33 | 2,33 |
| | D-W | 0,64 | 0,64 | 2,54 | 2,39 | 2,34 | 2,32 |
| 2 nós separados | H-W | 7,48 | 7,47 | 4,78 | 4,77 | 4,01 | 4,01 |
| | D-W | 9,93 | 4,99 | 6,20 | 4,85 | 6,10 | 3,86 |
| 2 nós juntos | H-W | 1,22 | 2,17 | 3,86 | 2,78 | 3,00 | 2,59 |
| | D-W | 0,83 | 1,22 | 3,88 | 2,80 | 2,98 | 2,56 |
| 1 nó perto do Reserv. | H-W | 21,57 | 21,57 | 5,71 | 5,71 | 10,32 | 10,32 |
| | D-W | 14,20 | 14,20 | 5,47 | 5,47 | 10,17 | 10,17 |
| 1 nó longe do Reserv. | H-W | 11,80 | 11,82 | 3,76 | 3,76 | 6,61 | 6,62 |
| | D-W | 1,97 | 6,92 | 5,84 | 3,92 | 3,76 | 6,16 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na comparação entre a eficiência de se ter dados de pressão em nós juntos ou separados, para este caso, dados de entrada em nós juntos apresentaram melhores resultados que dados em nós separados. Quanto ao uso dos métodos MIGHA O ou MIGHA C, não houve diferença significativa em seus resultados.

Com o uso da sub-rotina computacional para a escolha dos consumos nodais iniciais em todos os nós, os resultados encontrados foram exatamente os mesmos, tanto com uso do MIGHA O quanto com uso do MIGHA C, para consumos nodais iniciais de 10 L/s. É importante saber que este foi o valor utilizado como base para o arquivo da rede observada. Assim, é válido dizer que o uso da sub-rotina computacional desenvolvida para seleção dos consumos iniciais ao processo de calibração em todos os nós é adequada para a rede Porto (2006).

Para calibração da vazão na rede Porto (2006) foram estabelecidas um máximo de 100 iterações. A função objetiva mínima a ser alcançada foi estabelecida com um valor de 0,000000001.

Nas Tabelas 121 e 122 podem ser vistos o número de iterações e o valor de função objetivo alcançados por cada caso simulado para consumos nodais iniciais de 2 L/s.

Tabela 121 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração da vazão para consumo inicial de 2 L/s na rede Porto (2006) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo)

| Dados conhecidos: | Cálculo de ∇H | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 3 vazões e pressões | H-W | 35 | 0,0000000007 | 100 | 0,0000127781 |
| | D-W | 35 | 0,0000000008 | 100 | 0,0000068593 |
| Vazão em 9 trechos | H-W | 1 | 0,0000000010 | 2 | 0,0000000010 |
| | D-W | 2 | 0,0000000005 | 100 | 0,0000001540 |
| Vazão em 8 trechos | H-W | 7 | 0,0000000010 | 100 | 0,0000038605 |
| | D-W | 7 | 0,0000000004 | 100 | 0,0000062507 |
| Vazão em 7 trechos | H-W | 39 | 0,0000000010 | 100 | 0,0000033178 |
| | D-W | 33 | 0,0000000009 | 100 | 0,0000057324 |
| Vazão em 6 trechos | H-W | 31 | 0,0000000010 | 100 | 0,0000029871 |
| | D-W | 25 | 0,0000000009 | 100 | 0,0000057912 |
| Vazão em 5 trechos | H-W | 100 | 0,0000070105 | 100 | 0,0001046107 |
| | D-W | 100 | 0,0000040012 | 100 | 0,0000529590 |
| Vazão em 4 trechos | H-W | 16 | 0,0000000008 | 100 | 0,0001167453 |
| | D-W | 13 | 0,0000000010 | 100 | 0,0000580306 |
| Vazão em 3 trechos | H-W | 13 | 0,0000000004 | 100 | 0,0000358933 |
| | D-W | 14 | 0,0000000003 | 100 | 0,0000274167 |
| Vazão em 2 trechos | H-W | 13 | 0,0000000005 | 100 | 0,0000380436 |
| | D-W | 13 | 0,0000000003 | 100 | 0,0000258885 |
| Vazão em 1 trecho | H-W | 15 | 0,0000000009 | 100 | 0,0000064314 |
| | D-W | 15 | 0,0000000003 | 100 | 0,0000103450 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

O que pode ser visto na Tabela 121 é que, para calibrações com dados de entrada de vazões e pressões ao mesmo tempo, o sistema foi calibrado com uso do MIGHA O, entretanto, isso não aconteceu através do uso do MIGHA C. Considerando como dados de entrada somente vazões, a função objetivo só não foi atingida, com uso do MIGHA O, para dados em 5 trechos. Já com uso do MIGHA C, esta função só foi atingida para dados de vazão em todos os trechos e com perdas de carga calculadas através da equação de Hazen-Williams. Isso complementa que, para a calibração da vazão com dados de entrada de vazões nos trechos e consumos iniciais de 2 L/s, o MIGHA O apresenta melhores resultados.

Tabela 122 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração da vazão para consumo inicial de 2 L/s na rede Porto (2006) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo)

| Dados conhecidos de pressão em: | Cálculo de ∇H | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---------------------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 7 nós | H-W | 1 | 0,0000000007 | 2 | 0,0000000007 |
| | D-W | 3 | 0,0000000002 | 4 | 0,0000000002 |
| 6 nós | H-W | 1 | 0,0000000007 | 2 | 0,0000000007 |
| | D-W | 3 | 0,0000000003 | 4 | 0,0000000002 |
| 5 nós | H-W | 1 | 0,0000000007 | 2 | 0,0000000008 |
| | D-W | 3 | 0,0000000003 | 4 | 0,0000000002 |
| 4 nós | H-W | 1 | 0,0000000009 | 2 | 0,0000000008 |
| | D-W | 3 | 0,0000000002 | 4 | 0,0000000003 |
| 3 nós separados | H-W | 2 | 0,0000000002 | 10 | 0,0000000002 |
| | D-W | 3 | 0,0000000004 | 11 | 0,0000000004 |
| 3 nós juntos | H-W | 1 | 0,0000000003 | 2 | 0,0000000004 |
| | D-W | 3 | 0,0000000002 | 4 | 0,0000000003 |
| 2 nós separados | H-W | 2 | 0,0000000003 | 11 | 0,0000000002 |
| | D-W | 3 | 0,0000000002 | 14 | 0,0000000003 |
| 2 nós juntos | H-W | 2 | 0,0000000002 | 3 | 0,0000000002 |
| | D-W | 4 | 0,0000000000 | 5 | 0,0000000001 |
| 1 nó perto do Reserv. | H-W | 1 | 0,0000000001 | 2 | 0,0000000001 |
| | D-W | 2 | 0,0000000009 | 3 | 0,0000000009 |
| 1 nó longe do Reserv. | H-W | 2 | 0,0000000001 | 4 | 0,0000000007 |
| | D-W | 4 | 0,0000000001 | 6 | 0,0000000005 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode ser visto na Tabela 122 que, para todos os casos de pressões como dados de entrada, a função objetivo foi atingida. Ainda é possível perceber que, com o uso do MIGHA O, o número de iterações necessário para atingir a função objetivo é reduzido.

Nas Tabelas 123 e 124 são apresentados o número de iterações atingidas e o valor de função objetivo alcançado por cada caso simulado para um consumo nodal de 5,7 L/s em todos os nós da rede.

Da mesma forma que para calibração da vazão com consumos iniciais de 2 L/s, dados de vazões e pressões simultaneamente atingem a função objetivo com uso do MIGHA O, no entanto, isso não ocorre com o uso do MIGHA C. Já para o uso exclusivo de dados de vazão nos trechos da rede de distribuição como entrada para a calibração, em todas as simulações, com uso do MIGHA O, a função objetivo foi atingida. Já para o MIGHA C, apenas um caso atingiu esta função.

Tabela 123 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração da vazão para consumo inicial de 5,7 L/s na rede Porto (2006) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo)

| Dados conhecidos: | Cálculo de VH | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---------------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 3 vazões e pressões | H-W | 31 | 0,0000000009 | 100 | 0,0000033523 |
| | D-W | 30 | 0,0000000006 | 100 | 0,0000017972 |
| Vazão em 9 trechos | H-W | 1 | 0,0000000003 | 2 | 0,0000000003 |
| | D-W | 1 | 0,0000000002 | 100 | 0,0000000284 |
| Vazão em 8 trechos | H-W | 5 | 0,0000000008 | 100 | 0,0000005299 |
| | D-W | 5 | 0,0000000008 | 100 | 0,0000004615 |
| Vazão em 7 trechos | H-W | 48 | 0,0000000009 | 100 | 0,0000010281 |
| | D-W | 40 | 0,0000000008 | 100 | 0,0000011539 |
| Vazão em 6 trechos | H-W | 17 | 0,0000000007 | 100 | 0,0000009143 |
| | D-W | 17 | 0,0000000003 | 100 | 0,0000010565 |
| Vazão em 5 trechos | H-W | 14 | 0,0000000008 | 100 | 0,0000020835 |
| | D-W | 14 | 0,0000000009 | 100 | 0,0000018522 |
| Vazão em 4 trechos | H-W | 14 | 0,0000000008 | 100 | 0,0000020835 |
| | D-W | 15 | 0,0000000003 | 100 | 0,0000018522 |
| Vazão em 3 trechos | H-W | 8 | 0,0000000009 | 100 | 0,0000025500 |
| | D-W | 8 | 0,0000000003 | 100 | 0,0000018931 |
| Vazão em 2 trechos | H-W | 8 | 0,0000000009 | 100 | 0,0000013963 |
| | D-W | 8 | 0,0000000007 | 100 | 0,0000010791 |
| Vazão em 1 trecho | H-W | 6 | 0,0000000009 | 100 | 0,0000005201 |
| | D-W | 7 | 0,0000000003 | 100 | 0,0000005201 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para dados de pressão nos nós como entrada na calibração da vazão com consumos nodais iniciais de 5,7 L/s em todos os nós, todos os casos calibrados, tanto com o uso do MIGHA O quanto com a utilização do MIGHA C, a função objetivo foi atingida em um número máximo de 4 iterações.

Mesmo que, para a calibração da vazão, o uso de vazões nos trechos tenha se mostrado uma boa alternativa, a diferença da utilização de pressões nos nós da rede como entrada no processo de calibração pode ser facilmente visualizado, neste caso, quanto ao número de iterações necessárias para atingir a função objetivo. Analisando apenas os casos calibrados através do MIGHA O, para dados de entrada de vazão nos trechos, o número médio de iterações necessárias para atingir a função objetivo foi de 13,11 iterações, já considerando entrada de pressões nos nós, essa média foi de 1,55 iterações.

Tabela 124 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração da vazão para consumo inicial de 5,7 L/s na rede Porto (2006) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo)

| Dados conhecidos de pressão em: | Cálculo de ∇H | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---------------------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 7 nós | H-W | 1 | 0,0000000001 | 2 | 0,0000000001 |
| | D-W | 2 | 0,0000000005 | 3 | 0,0000000005 |
| 6 nós | H-W | 1 | 0,0000000001 | 2 | 0,0000000002 |
| | D-W | 3 | 0,0000000001 | 4 | 0,0000000001 |
| 5 nós | H-W | 1 | 0,0000000001 | 2 | 0,0000000001 |
| | D-W | 2 | 0,0000000005 | 3 | 0,0000000007 |
| 4 nós | H-W | 1 | 0,0000000000 | 2 | 0,0000000001 |
| | D-W | 2 | 0,0000000007 | 3 | 0,0000000007 |
| 3 nós separados | H-W | 1 | 0,0000000002 | 2 | 0,0000000003 |
| | D-W | 3 | 0,0000000000 | 4 | 0,0000000000 |
| 3 nós juntos | H-W | 1 | 0,0000000001 | 2 | 0,0000000001 |
| | D-W | 2 | 0,0000000001 | 3 | 0,0000000001 |
| 2 nós separados | H-W | 1 | 0,0000000003 | 2 | 0,0000000001 |
| | D-W | 2 | 0,0000000000 | 3 | 0,0000000001 |
| 2 nós juntos | H-W | 1 | 0,0000000001 | 2 | 0,0000000001 |
| | D-W | 2 | 0,0000000000 | 3 | 0,0000000001 |
| 1 nó perto do Reserv. | H-W | 1 | 0,0000000004 | 1 | 0,0000000004 |
| | D-W | 1 | 0,0000000004 | 1 | 0,0000000004 |
| 1 nó longe do Reserv. | H-W | 1 | 0,0000000001 | 2 | 0,0000000002 |
| | D-W | 2 | 0,0000000002 | 3 | 0,0000000002 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas Tabelas 125 e 126 são apresentados o número de iterações e o valor de função objetivo alcançados por cada caso simulado para consumos nodais iniciais de 10 L/s.

Como pode ser visto na Tabela 125, a utilização de vazões e pressões simultaneamente, juntamente com o uso do MIGHA O, atingiu a função objetivo com poucas iterações. No entanto, a utilização de apenas vazões como dados de entrada na calibração da vazão com consumos nodais iniciais iguais a 10 L/s, em todos os nós da rede Porto (2006), apesar de a função objetivo ter sido alcançada para a maioria dos casos com uso do MIGHA O, em 3 casos esta função não foi alcançada, mais casos que quando a calibração ocorreu com consumos nodais iniciais de 2 L/s ou 5,7 L/s.

É interessante lembrar que, como dito anteriormente, os resultados encontrados para a calibração da vazão com consumos nodais iniciais de 10 L/s e dados de entrada de vazão em 3 trechos, assim como para dados de entrada de vazão em 2 trechos, foram extremamente ruins e, é possível perceber, ao analisar a Tabela 105, que para estes dois casos a função objetivo não foi atingida.

Tabela 125 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração da vazão para consumo inicial de 10 L/s na rede Porto (2006) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo)

| Dados conhecidos: | Cálculo de VH | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---------------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 3 vazões e pressões | H-W | 6 | 0,0000000008 | 100 | 0,0000000828 |
| | D-W | 5 | 0,0000000010 | 100 | 0,0000000394 |
| Vazão em 9 trechos | H-W | 1 | 0,0000000001 | 2 | 0,0000000001 |
| | D-W | 1 | 0,0000000002 | 100 | 0,0000000363 |
| Vazão em 8 trechos | H-W | 6 | 0,0000000008 | 100 | 0,0000051059 |
| | D-W | 6 | 0,0000000002 | 100 | 0,0000050061 |
| Vazão em 7 trechos | H-W | 55 | 0,0000000010 | 100 | 0,0000290999 |
| | D-W | 44 | 0,0000000009 | 100 | 0,0000259684 |
| Vazão em 6 trechos | H-W | 12 | 0,0000000007 | 100 | 0,0000231016 |
| | D-W | 13 | 0,0000000004 | 100 | 0,0000216289 |
| Vazão em 5 trechos | H-W | 100 | 0,0000133061 | 100 | 0,0000719340 |
| | D-W | 100 | 0,0000077493 | 100 | 0,0000424568 |
| Vazão em 4 trechos | H-W | 14 | 0,0000000009 | 100 | 0,0000347516 |
| | D-W | 7 | 0,0000000010 | 100 | 0,0000281773 |
| Vazão em 3 trechos | H-W | 100 | 0,0000206877 | 100 | 0,0000488039 |
| | D-W | 100 | 0,0000096850 | 100 | 0,0000335570 |
| Vazão em 2 trechos | H-W | 100 | 0,0000206877 | 100 | 0,0000252654 |
| | D-W | 100 | 0,0000096852 | 100 | 0,0000143086 |
| Vazão em 1 trecho | H-W | 6 | 0,0000000004 | 100 | 0,0000040865 |
| | D-W | 7 | 0,0000000002 | 100 | 0,0000036713 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao observar a Tabela 126, percebe-se que com o uso do MIGHA O atinge a função objetivo com um número menor de iterações que com a utilização do MIGHA C. Também se nota o porquê de os resultados da calibração da vazão, para consumos iniciais de 10 L/s, com dados de pressão em nós juntos foram melhores do que os resultados com nós separados, uma vez que, para dados de entrada em 2 ou 3 nós separados, a função objetivo não foi atingida e, para nós juntos, ela foi alcançada.

É interessante observar que, apesar de a calibração da vazão com consumos nodais iniciais de 10 L/s ter apresentado resultados satisfatórios, dentre os casos testados para a rede Porto (2006), este foi o único que, para dados de entrada de pressões nos nós da rede, apresentou calibrações que, mesmo com 100 iterações, não alcançou a máxima função objetivo estabelecida.

Tabela 126 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração da vazão para consumo inicial de 10 L/s na rede Porto (2006) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo)

| Dados conhecidos de pressão em: | Cálculo de ∇H | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---------------------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 7 nós | H-W | 1 | 0,0000000000 | 2 | 0,0000000000 |
| | D-W | 3 | 0,0000000000 | 4 | 0,0000000000 |
| 6 nós | H-W | 1 | 0,0000000001 | 2 | 0,0000000001 |
| | D-W | 3 | 0,0000000003 | 4 | 0,0000000003 |
| 5 nós | H-W | 1 | 0,0000000001 | 2 | 0,0000000001 |
| | D-W | 3 | 0,0000000002 | 4 | 0,0000000003 |
| 4 nós | H-W | 1 | 0,0000000001 | 2 | 0,0000000001 |
| | D-W | 3 | 0,0000000003 | 4 | 0,0000000002 |
| 3 nós separados | H-W | 100 | 0,0000245808 | 100 | 0,0000244129 |
| | D-W | 100 | 0,0000001345 | 100 | 0,0000081322 |
| 3 nós juntos | H-W | 1 | 0,0000000000 | 2 | 0,0000000000 |
| | D-W | 3 | 0,0000000000 | 4 | 0,0000000000 |
| 2 nós separados | H-W | 100 | 0,0000438213 | 100 | 0,0000438553 |
| | D-W | 100 | 0,0002087102 | 100 | 0,0000129927 |
| 2 nós juntos | H-W | 2 | 0,0000000000 | 100 | 0,0000027721 |
| | D-W | 3 | 0,0000000004 | 100 | 0,0000006729 |
| 1 nó perto do Reserv. | H-W | 100 | 0,0001034289 | 100 | 0,0001034290 |
| | D-W | 100 | 0,0000348100 | 100 | 0,0000348100 |
| 1 nó longe do Reserv. | H-W | 100 | 0,0002827137 | 100 | 0,0002840037 |
| | D-W | 100 | 0,0000006232 | 100 | 0,0000982306 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

No caso do uso da sub-rotina computacional para o cálculo dos consumos nodais iniciais, assim como os resultados encontrados, o número de iterações e o valor da função objetivo encontrados foram os mesmos para consumos iniciais de 10 L/s, apresentados nas Tabelas 125 e 126.

4.2.3.2 Rede Walski (1983) – Gambale (2000)

Para a Calibração da vazão na rede Walski (1983) – Gambale (2000) foram realizadas 168 calibrações com uso, para perda de carga, da equação de Hazen-Williams e 168 com uso da fórmula de Darcy-Weisbach, sendo, para cada caso, 84 pelo processo MIGHA C e 84 pelo MIGHA O.

Para consumos iniciais em todos os nós da rede igual a 5 L/s e utilizando como dados de entrada pressões e vazões ao mesmo tempo, em geral os resultados encontrados para pressões foram bons, mas o mesmo não ocorreu para consumos e vazões. É provável que isto

tenha ocorrido devido à grande diferença entre o consumo inicial adotado e a maior parte dos consumos nodais da rede.

Na Tabela 127 são apresentadas as diferenças médias entre as pressões e consumos, de todos os nós, e vazões, de todos os trechos, calculados após a calibração e seus respectivos valores gabarito para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressões e vazões ao mesmo tempo, além de apenas vazões nos trechos, com uso tanto da equação de Hazen-Williams quanto da fórmula universal para o cálculo da perda de carga.

Tabela 127 – Diferenças médias entre as pressões, consumos e vazões calculados e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração da vazão para consumo inicial de 5 L/s na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo)

| Dados conhecidos: | Cálculo de ∇H | Diferença média | | | | | |
|---------------------|-----------------------|-----------------|---------|---------------------|---------|--------------|---------|
| | | Pressões (m) | | Consumo nodal (L/s) | | Vazões (L/s) | |
| | | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C |
| 3 vazões e pressões | H-W | 1,14 | 1,77 | 15,18 | 29,16 | 8,58 | 14,03 |
| | D-W | 0,86 | 1,27 | 15,57 | 27,97 | 8,76 | 14,15 |
| Vazão em 10 trechos | H-W | 0,00 | 0,01 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,06 |
| | D-W | 0,00 | 1,68 | 0,07 | 7,72 | 0,04 | 11,98 |
| Vazão em 9 trechos | H-W | 0,01 | 0,31 | 0,15 | 17,87 | 0,07 | 10,07 |
| | D-W | 0,01 | 1,75 | 0,29 | 24,40 | 0,13 | 15,97 |
| Vazão em 8 trechos | H-W | 0,32 | 1,13 | 9,76 | 30,53 | 3,78 | 13,48 |
| | D-W | 0,18 | 1,11 | 9,18 | 36,18 | 3,56 | 19,06 |
| Vazão em 7 trechos | H-W | 0,56 | 1,17 | 21,90 | 30,49 | 7,88 | 13,37 |
| | D-W | 0,34 | 1,10 | 21,12 | 36,06 | 7,76 | 19,01 |
| Vazão em 6 trechos | H-W | 0,61 | 1,19 | 20,88 | 28,74 | 8,57 | 12,15 |
| | D-W | 0,41 | 1,03 | 19,57 | 34,20 | 8,85 | 17,71 |
| Vazão em 5 trechos | H-W | 0,78 | 1,33 | 30,16 | 38,03 | 11,81 | 15,40 |
| | D-W | 0,51 | 0,91 | 28,85 | 43,48 | 12,09 | 20,61 |
| Vazão em 4 trechos | H-W | 1,62 | 2,30 | 20,81 | 26,46 | 11,44 | 16,42 |
| | D-W | 1,08 | 1,16 | 19,25 | 30,22 | 10,88 | 19,53 |
| Vazão em 3 trechos | H-W | 1,64 | 2,30 | 20,51 | 26,48 | 11,66 | 16,44 |
| | D-W | 1,08 | 1,16 | 19,72 | 30,33 | 11,16 | 19,61 |
| Vazão em 2 trechos | H-W | 3,63 | 4,15 | 20,07 | 19,77 | 28,29 | 32,65 |
| | D-W | 2,81 | 2,90 | 21,20 | 17,83 | 30,02 | 30,08 |
| Vazão em 1 trecho | H-W | 2,32 | 2,14 | 33,97 | 37,68 | 16,95 | 19,44 |
| | D-W | 1,66 | 1,28 | 34,72 | 44,09 | 17,27 | 27,55 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao se calcular os consumos nodais através da calibração da vazão, usando apenas vazões nos trechos como dados de entrada conhecidos, independente da fórmula para perda de carga utilizada, foi possível perceber que para dados conhecidos de vazão em 10 ou 9 trechos,

os resultados encontrados, para pressão, vazão e consumos nodais, com uso do MIGHA O, foram bons, já com o MIGHA C isso não ocorreu. Mesmo considerando apenas os casos simulados com o MIGHA O, a partir da entrada de dados de vazão em 8 trechos, aparecem nós com diferenças entre os consumos calculado e gabarito de mais de 34 L/s. Como pode ser visto na Tabela 127, os resultados encontrados com uso do MIGHA O foram melhores que os encontrados com a utilização do MIGHA C.

Na Tabela 128 são mostradas as diferenças médias entre as pressões e consumos, de todos os nós, e vazões, de todos os trechos, calculadas após a calibração e seus respectivos valores gabarito para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressões nos nós.

Tabela 128 – Diferenças médias entre as pressões, consumos e vazões calculados e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração da vazão para consumo inicial de 5 L/s na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo)

| Dados conhecidos de pressão em: | Cálculo de ∇H | Diferença média | | | | | |
|---------------------------------|-----------------------|-----------------|---------|---------------------|---------|--------------|---------|
| | | Pressões (m) | | Consumo nodal (L/s) | | Vazões (L/s) | |
| | | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C |
| | | | | | | | |
| 7 nós | H-W | 0,01 | 0,01 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 |
| | D-W | 0,01 | 0,01 | 0,18 | 0,18 | 0,11 | 0,11 |
| 6 nós | H-W | 0,22 | 0,22 | 16,68 | 16,50 | 5,85 | 5,79 |
| | D-W | 0,15 | 0,16 | 16,01 | 16,58 | 5,66 | 5,87 |
| 5 nós | H-W | 0,59 | 0,83 | 24,00 | 28,59 | 8,71 | 11,42 |
| | D-W | 0,42 | 0,58 | 24,00 | 28,49 | 8,80 | 11,32 |
| 4 nós | H-W | 0,77 | 1,00 | 33,29 | 37,88 | 11,96 | 14,66 |
| | D-W | 0,53 | 0,69 | 33,29 | 37,78 | 12,05 | 14,56 |
| 3 nós separados | H-W | 1,28 | 1,46 | 35,01 | 38,46 | 15,48 | 17,90 |
| | D-W | 0,92 | 1,04 | 35,30 | 38,27 | 15,78 | 18,02 |
| 3 nós juntos | H-W | 1,90 | 1,97 | 27,59 | 31,46 | 13,54 | 14,92 |
| | D-W | 1,40 | 1,45 | 27,44 | 31,34 | 13,78 | 15,14 |
| 2 nós separados | H-W | 2,75 | 2,75 | 47,87 | 48,07 | 24,57 | 24,53 |
| | D-W | 2,05 | 2,03 | 48,15 | 47,80 | 24,77 | 24,57 |
| 2 nós juntos | H-W | 1,48 | 1,91 | 12,15 | 17,04 | 13,04 | 16,19 |
| | D-W | 1,05 | 1,38 | 13,71 | 17,33 | 12,48 | 16,14 |
| 1 nó perto do Reserv. | H-W | 3,59 | 3,59 | 50,75 | 50,75 | 26,60 | 26,60 |
| | D-W | 2,60 | 2,60 | 50,56 | 50,56 | 26,55 | 26,55 |
| 1 nó longe do Reserv. | H-W | 3,69 | 3,69 | 26,15 | 26,62 | 39,71 | 39,50 |
| | D-W | 2,84 | 2,81 | 26,61 | 26,58 | 40,02 | 39,44 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando apenas pressões conhecidas nos nós da rede Walski (1983) – Gambale (2000) como dados de entrada, os resultados encontrados só foram bons para pressões

medidas em 7 nós. A partir de dados em 6 nós ou menos, aparecem resultados bons em alguns nós, mas ruins em outros.

Apesar de os resultados encontrados para dados de entrada de pressões em 3 nós e vazões em 3 trechos, ao mesmo tempo, não terem sido tão bons, estes foram melhores do que os resultados encontrados para dados de vazão em 7 trechos ou de pressões em 6 nós, considerando apenas os consumos encontrados.

Assim como ocorreu para dados de entrada de vazões nos trechos, para dados de entrada de pressões nos nós, com o uso do método MIGHA O foram apresentados melhores resultados que com o MIGHA C. Além disso, apesar de apresentar resultados apenas satisfatórios, o uso de nós juntos entre si para medição de pressões como dados de entrada no processo de calibração se mostrou melhor do que a utilização de dados em nós separados uns dos outros.

O próximo valor de consumo nodal testado no processo de calibração foi de 29 L/s, valor próximo da média dos consumos nodais da rede gabarito. Ao utilizá-lo como valor inicial, para a maioria dos nós da rede, e ao se calibrar utilizando como dados de entrada pressões e vazões ao mesmo tempo, os valores de pressões encontrados foram bons, tendo apenas um nó com diferença de pressão maior que 1m, considerando o gradiente hidráulico calculado através da equação de Hazen-Williams. No entanto, para as vazões e os consumos, há variações, em poucos casos entre os valores calculado e gabarito, de mais de 8 L/s. Mesmo assim, de forma geral, o uso de pressões e vazões, simultaneamente, para a calibração da vazão com consumos nodais iniciais de 29 L/s na rede Walski (1983) – Gambale (2000) gerou bons resultados.

Ao se calibrar a vazão usando apenas vazões nos trechos como dados de entrada conhecidos, o MIGHA O foi melhor que o MIGHA C e, para 10, 9 ou 8 trechos com vazões conhecidas, os resultados foram muito bons, com 7 ou menos, os resultados foram satisfatórios. Além disso, foi possível perceber que um maior número de dados de vazão gera melhores resultados. Assim, o uso de vazões na calibração da vazão com consumo nodal inicial igual a 29 L/s apresentou bons resultados.

Na Tabela 129 são apresentadas as diferenças médias entre as pressões e consumos, de todos os nós, e vazões, de todos os trechos, calculadas após a calibração e seus respectivos valores gabarito para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressões e vazões ao mesmo tempo, além de apenas vazões nos trechos.

Tabela 129 – Diferenças médias entre as pressões, consumos e vazões calculados e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração da vazão para consumo inicial de 29 L/s na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo)

| Dados conhecidos: | Cálculo de VH | Diferença média | | | | | |
|---------------------|---------------|-----------------|---------|---------------------|---------|--------------|---------|
| | | Pressões (m) | | Consumo nodal (L/s) | | Vazões (L/s) | |
| | | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C |
| 3 vazões e pressões | H-W | 0,26 | 0,52 | 2,75 | 4,62 | 1,85 | 3,13 |
| | D-W | 0,18 | 0,35 | 2,72 | 4,39 | 1,85 | 3,06 |
| Vazão em 10 trechos | H-W | 0,00 | 0,01 | 0,03 | 0,07 | 0,02 | 0,08 |
| | D-W | 0,00 | 0,14 | 0,11 | 1,37 | 0,07 | 1,43 |
| Vazão em 9 trechos | H-W | 0,01 | 0,46 | 0,13 | 7,97 | 0,09 | 3,55 |
| | D-W | 0,01 | 0,31 | 0,21 | 8,19 | 0,09 | 3,49 |
| Vazão em 8 trechos | H-W | 0,01 | 0,62 | 0,14 | 8,35 | 0,09 | 4,10 |
| | D-W | 0,01 | 0,43 | 0,29 | 7,96 | 0,12 | 3,77 |
| Vazão em 7 trechos | H-W | 0,23 | 0,76 | 9,62 | 12,57 | 3,70 | 5,71 |
| | D-W | 0,09 | 0,49 | 9,54 | 19,14 | 3,39 | 8,01 |
| Vazão em 6 trechos | H-W | 0,25 | 0,78 | 8,93 | 11,88 | 4,12 | 6,13 |
| | D-W | 0,13 | 0,49 | 8,93 | 18,47 | 3,82 | 8,44 |
| Vazão em 5 trechos | H-W | 0,32 | 0,85 | 11,34 | 14,30 | 4,97 | 6,98 |
| | D-W | 0,18 | 0,51 | 11,36 | 20,90 | 4,67 | 9,27 |
| Vazão em 4 trechos | H-W | 0,75 | 1,18 | 5,95 | 5,75 | 3,25 | 4,93 |
| | D-W | 0,49 | 0,75 | 5,87 | 5,94 | 3,24 | 4,85 |
| Vazão em 3 trechos | H-W | 0,77 | 1,20 | 5,27 | 5,06 | 3,67 | 5,35 |
| | D-W | 0,52 | 0,75 | 5,21 | 5,42 | 3,67 | 5,19 |
| Vazão em 2 trechos | H-W | 1,05 | 1,35 | 12,54 | 12,92 | 5,58 | 7,80 |
| | D-W | 0,70 | 0,87 | 12,34 | 12,99 | 5,36 | 7,47 |
| Vazão em 1 trecho | H-W | 1,84 | 1,90 | 8,44 | 9,04 | 7,48 | 8,22 |
| | D-W | 1,18 | 1,21 | 8,45 | 8,63 | 7,30 | 7,74 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao calibrar a vazão, considerando apenas pressões conhecidas nos nós da rede Walski (1983) – Gambale (2000), assim como ocorreu para dados de entrada de vazões nos trechos, há uma piora dos resultados a medida em que se vai diminuindo o número de dados conhecidos na rede. Para dados conhecidos em todos os nós da rede, os resultados foram muito bons, no entanto, a partir de quando se tem dados de pressão em 6 nós, os resultados foram apenas satisfatórios.

Na Tabela 130 são mostradas as diferenças médias entre pressões e consumos, de todos os nós, e vazões, de todos os trechos, calculadas após a calibração e seus respectivos valores gabarito para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressões nos nós. É possível perceber que, nesse caso, a utilização da metodologia MIGHA O gerou melhores resultados.

Tabela 130 – Diferenças médias entre as pressões, consumos e vazões calculados e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração da vazão para consumo inicial de 29 L/s na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo)

| Dados conhecidos de pressão em: | Cálculo de VH | Diferença média | | | | | |
|---------------------------------|---------------|-----------------|---------|---------------------|---------|--------------|---------|
| | | Pressões (m) | | Consumo nodal (L/s) | | Vazões (L/s) | |
| | | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C |
| 7 nós | H-W | 0,01 | 0,01 | 0,06 | 0,06 | 0,04 | 0,04 |
| | D-W | 0,01 | 0,01 | 0,18 | 0,18 | 0,14 | 0,14 |
| 6 nós | H-W | 0,13 | 0,13 | 9,63 | 9,61 | 3,40 | 3,40 |
| | D-W | 0,09 | 0,09 | 9,45 | 9,55 | 3,36 | 3,40 |
| 5 nós | H-W | 0,28 | 0,36 | 11,94 | 14,86 | 4,33 | 5,37 |
| | D-W | 0,17 | 0,24 | 11,29 | 14,87 | 4,25 | 5,35 |
| 4 nós | H-W | 0,35 | 0,43 | 14,36 | 17,28 | 5,17 | 6,22 |
| | D-W | 0,21 | 0,29 | 13,72 | 17,29 | 5,10 | 6,19 |
| 3 nós separados | H-W | 0,54 | 0,56 | 15,36 | 15,24 | 6,77 | 7,43 |
| | D-W | 0,36 | 0,37 | 15,32 | 15,05 | 6,74 | 7,35 |
| 3 nós juntos | H-W | 1,08 | 1,08 | 11,05 | 11,05 | 4,95 | 4,95 |
| | D-W | 0,74 | 0,75 | 10,92 | 10,93 | 4,99 | 4,97 |
| 2 nós separados | H-W | 1,14 | 1,14 | 17,59 | 17,58 | 9,07 | 9,07 |
| | D-W | 0,81 | 0,81 | 17,36 | 17,53 | 8,93 | 8,94 |
| 2 nós juntos | H-W | 1,55 | 1,55 | 12,62 | 12,62 | 8,87 | 8,87 |
| | D-W | 0,94 | 0,96 | 12,71 | 12,67 | 8,77 | 8,81 |
| 1 nó perto do Reserv. | H-W | 2,05 | 2,05 | 17,56 | 17,56 | 10,38 | 10,38 |
| | D-W | 1,34 | 1,34 | 17,52 | 17,52 | 10,23 | 10,23 |
| 1 nó longe do Reserv. | H-W | 1,26 | 1,26 | 14,97 | 14,97 | 10,85 | 10,85 |
| | D-W | 0,90 | 0,90 | 15,06 | 15,14 | 10,45 | 10,53 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar o que acontece quando se tem dados conhecidos em nós juntos ou separados, além de, no caso de apenas 1 nó, este estar próximo ou longe do reservatório, para as pressões encontradas, os casos com pressões conhecidas em nós separados apresentaram melhores resultados que com nós próximos entre si. Já para os consumos e vazões encontrados, o inverso ocorreu.

Percebe-se que o uso da metodologia aqui proposta para cálculo dos consumos nodais através da calibração da vazão, no caso da rede Walski (1983) – Gambale (2000) com consumo inicial de 29 L/s, quando se tem dados de pressão em 7 nós, os resultados encontrados geraram pequenas diferenças médias entre pressões, consumos e vazões, no entanto, para dados de pressão em 6 ou menos nós, as diferenças médias não foram adequadas.

Nota-se, também, que o uso de pressões e vazões ao mesmo tempo como dados de entrada gerou melhores resultados do que o uso de dados de entrada de vazão em 7 trechos ou menos e de pressão em 6 nós ou menos.

Ainda, foram consideradas calibrações com consumos nodais iniciais de 70 L/s. Na Tabela 131 podem ser vistas as diferenças médias entre as pressões e consumos, de todos os nós, e vazões, de todos os trechos, calculados após a calibração e seus respectivos valores gabarito para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressões e vazões, simultaneamente, além de apenas vazões.

Tabela 131 – Diferenças médias entre as pressões, consumos e vazões calculados e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração da vazão para consumo inicial de 70 L/s na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo)

| Dados conhecidos: | Cálculo de ∇H | Diferença média | | | | | |
|---------------------|-----------------------|-----------------|---------|---------------------|---------|--------------|---------|
| | | Pressões (m) | | Consumo nodal (L/s) | | Vazões (L/s) | |
| | | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C |
| 3 vazões e pressões | H-W | 2,26 | 11,62 | 16,31 | 32,11 | 15,10 | 43,28 |
| | D-W | 1,71 | 8,17 | 16,21 | 31,57 | 14,84 | 42,15 |
| Vazão em 10 trechos | H-W | 0,00 | 0,00 | 0,04 | 0,07 | 0,03 | 0,04 |
| | D-W | 0,00 | 0,34 | 0,09 | 1,98 | 0,05 | 2,51 |
| Vazão em 9 trechos | H-W | 0,26 | 4,69 | 5,41 | 28,14 | 3,77 | 30,43 |
| | D-W | 0,10 | 3,36 | 3,04 | 27,90 | 1,93 | 29,40 |
| Vazão em 8 trechos | H-W | 0,41 | 5,17 | 8,44 | 28,46 | 5,65 | 31,57 |
| | D-W | 0,12 | 3,76 | 4,13 | 27,94 | 2,51 | 30,28 |
| Vazão em 7 trechos | H-W | 0,12 | 6,16 | 2,17 | 23,68 | 1,58 | 30,24 |
| | D-W | 0,06 | 4,00 | 2,20 | 22,83 | 1,29 | 27,53 |
| Vazão em 6 trechos | H-W | 4,96 | 8,61 | 41,30 | 40,36 | 29,02 | 41,91 |
| | D-W | 4,12 | 6,25 | 41,55 | 41,47 | 29,02 | 40,57 |
| Vazão em 5 trechos | H-W | 21,95 | 9,30 | 119,75 | 48,92 | 82,61 | 46,11 |
| | D-W | 18,88 | 7,10 | 121,99 | 49,22 | 83,94 | 46,17 |
| Vazão em 4 trechos | H-W | 9,87 | 14,57 | 33,48 | 50,65 | 37,49 | 54,54 |
| | D-W | 7,00 | 10,86 | 33,63 | 50,19 | 36,79 | 55,03 |
| Vazão em 3 trechos | H-W | 134,06 | 15,09 | 341,24 | 53,92 | 252,92 | 56,83 |
| | D-W | 108,44 | 11,44 | 327,53 | 54,47 | 242,52 | 58,02 |
| Vazão em 2 trechos | H-W | 19,33 | 17,38 | 52,76 | 50,55 | 67,10 | 63,20 |
| | D-W | 12,40 | 12,84 | 50,90 | 52,12 | 60,22 | 63,48 |
| Vazão em 1 trecho | H-W | 391,19 | 19,96 | 627,50 | 58,23 | 464,64 | 64,09 |
| | D-W | 329,05 | 14,59 | 599,38 | 59,31 | 444,69 | 66,02 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa forma, utilizando como dados de entrada pressões e vazões ao mesmo tempo, tanto para perdas de carga calculadas por Hazen-Williams quanto por Darcy-Weisbach, mesmo

com melhores resultados usando o MIGHA O, os valores encontrados não se adequaram aos valores gabarito. Considerando apenas vazões nos trechos como dados de entrada, obteve-se bons resultados para pressão, consumo e vazão. Como esperado, os resultados pioram para menor número de dados, sendo os melhores resultados com uso do MIGHA O. Para dados de entrada de vazão em 10, 9, 8 ou 7 trechos, os resultados foram muito bons, já para dados de entrada em 6 ou menos trechos, os resultados foram satisfatórios ou ruins.

Na Tabela 132 são apresentadas as diferenças médias entre as pressões e consumos, de todos os nós, e vazões, de todos os trechos, calculados após a calibração e seus respectivos valores gabarito para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressões

Tabela 132 – Diferenças médias entre as pressões, consumos e vazões calculados e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração da vazão para consumo inicial de 70 L/s na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo)

| Dados conhecidos de pressão em: | Cálculo de ∇H | Diferença média | | | | | |
|---------------------------------|-----------------------|-----------------|-------|---------------------|-------|--------------|-------|
| | | Pressões (m) | | Consumo nodal (L/s) | | Vazões (L/s) | |
| | | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA |
| | | O | C | O | C | O | C |
| 7 nós | H-W | 0,01 | 0,01 | 0,10 | 0,10 | 0,05 | 0,05 |
| | D-W | 0,02 | 0,02 | 0,27 | 0,27 | 0,21 | 0,21 |
| 6 nós | H-W | 0,12 | 0,12 | 2,11 | 2,10 | 1,53 | 1,53 |
| | D-W | 0,09 | 0,07 | 9,28 | 1,95 | 3,28 | 1,28 |
| 5 nós | H-W | 0,19 | 0,65 | 13,12 | 8,56 | 4,67 | 6,27 |
| | D-W | 0,11 | 0,46 | 10,86 | 8,44 | 3,93 | 5,96 |
| 4 nós | H-W | 0,74 | 2,17 | 21,75 | 14,49 | 8,85 | 14,18 |
| | D-W | 0,49 | 1,63 | 18,67 | 14,43 | 7,74 | 14,04 |
| 3 nós separados | H-W | 0,43 | 8,75 | 14,58 | 28,57 | 5,76 | 32,51 |
| | D-W | 0,28 | 6,17 | 12,38 | 26,99 | 5,31 | 31,72 |
| 3 nós juntos | H-W | 14,33 | 14,44 | 38,58 | 38,57 | 47,39 | 48,35 |
| | D-W | 11,07 | 10,25 | 41,03 | 37,15 | 49,73 | 47,24 |
| 2 nós separados | H-W | 4,99 | 14,86 | 27,56 | 39,39 | 27,68 | 54,59 |
| | D-W | 3,95 | 10,83 | 25,94 | 37,76 | 27,93 | 53,04 |
| 2 nós juntos | H-W | 12,40 | 14,14 | 41,93 | 47,05 | 37,51 | 44,99 |
| | D-W | 8,86 | 9,67 | 42,94 | 47,65 | 38,73 | 44,12 |
| 1 nó perto do Reserv. | H-W | 24,58 | 24,58 | 60,70 | 60,70 | 80,04 | 80,04 |
| | D-W | 17,78 | 17,78 | 58,27 | 58,27 | 78,32 | 78,32 |
| 1 nó longe do Reserv. | H-W | 4,23 | 14,24 | 28,67 | 31,19 | 25,08 | 50,62 |
| | D-W | 2,44 | 10,54 | 29,20 | 31,24 | 22,16 | 50,83 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando apenas pressões conhecidas nos nós da rede percebe-se que, analisando todos os nós e trechos, quando se tem dados de pressão em todos os nós da rede de

distribuição se tem excelentes resultados. Como esperado, os resultados pioram com a diminuição no número de dados de pressão nos nós da rede. Na comparação entre a eficiência de se ter dados de pressão em nós juntos ou separados, para este caso, dados de entrada em nós separados apresentaram melhores resultados que dados em nós juntos. Quanto ao uso dos métodos MIGHA O ou MIGHA C, o primeiro apresentou melhores resultados.

Na Tabela 133 podem ser vistas as diferenças médias entre as pressões e consumos, de todos os nós, e vazões, de todos os trechos, calculados após a calibração e seus respectivos valores gabarito para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressões e vazões, simultaneamente, além de apenas vazões com o uso da sub-rotina computacional para a escolha dos consumos nodais iniciais.

Tabela 133 – Diferenças médias entre as pressões, consumos e vazões calculados e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração da vazão para consumo inicial calculado com uso da sub-rotina computacional na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo)

| Dados conhecidos: | Cálculo de ∇H | Diferença média | | | | | |
|---------------------|-----------------------|-----------------|---------|---------------------|---------|--------------|---------|
| | | Pressões (m) | | Consumo nodal (L/s) | | Vazões (L/s) | |
| | | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C |
| | | | | | | | |
| 3 vazões e pressões | H-W | 1,05 | 4,89 | 13,58 | 27,79 | 7,52 | 29,98 |
| | D-W | 0,72 | 3,63 | 12,47 | 27,08 | 7,19 | 29,03 |
| Vazão em 10 trechos | H-W | 0,01 | 0,00 | 0,05 | 0,09 | 0,06 | 0,05 |
| | D-W | 0,00 | 0,33 | 0,05 | 2,02 | 0,03 | 2,47 |
| Vazão em 9 trechos | H-W | 0,01 | 4,68 | 0,13 | 28,13 | 0,07 | 30,43 |
| | D-W | 0,01 | 3,36 | 0,26 | 27,92 | 0,11 | 29,41 |
| Vazão em 8 trechos | H-W | 0,32 | 5,17 | 9,74 | 28,45 | 3,77 | 31,57 |
| | D-W | 0,18 | 3,77 | 9,18 | 28,01 | 3,57 | 30,36 |
| Vazão em 7 trechos | H-W | 0,54 | 6,15 | 20,72 | 23,63 | 7,41 | 30,19 |
| | D-W | 0,33 | 4,00 | 19,97 | 22,83 | 7,22 | 27,53 |
| Vazão em 6 trechos | H-W | 0,73 | 8,60 | 17,88 | 40,37 | 9,38 | 41,90 |
| | D-W | 0,43 | 6,25 | 17,76 | 41,49 | 8,76 | 40,60 |
| Vazão em 5 trechos | H-W | 0,89 | 9,30 | 25,74 | 48,94 | 12,13 | 46,12 |
| | D-W | 0,53 | 7,09 | 25,61 | 49,24 | 11,51 | 46,14 |
| Vazão em 4 trechos | H-W | 1,36 | 14,57 | 17,86 | 50,62 | 9,42 | 54,53 |
| | D-W | 0,91 | 10,85 | 16,20 | 50,18 | 8,88 | 54,95 |
| Vazão em 3 trechos | H-W | 1,37 | 15,10 | 17,76 | 53,94 | 9,49 | 56,85 |
| | D-W | 0,95 | 11,43 | 15,54 | 54,50 | 9,30 | 57,98 |
| Vazão em 2 trechos | H-W | 3,41 | 17,38 | 19,71 | 50,55 | 25,91 | 63,20 |
| | D-W | 2,58 | 12,84 | 20,35 | 52,14 | 26,39 | 63,50 |
| Vazão em 1 trecho | H-W | 1,89 | 19,97 | 27,05 | 58,24 | 13,51 | 64,13 |
| | D-W | 1,42 | 14,59 | 26,51 | 59,30 | 14,09 | 66,02 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o uso da sub-rotina computacional para a escolha dos consumos nodais iniciais em todos os nós, considerando dados de entrada de vazões e pressões ao mesmo tempo, os resultados encontrados foram bons para pressões e satisfatórios para consumos e vazões.

Já para o caso de se utilizar, como dados de entrada, apenas vazões nos trechos, com uso do MIGHA O, os resultados foram muito bons para dados de entrada em 10 ou 9 trechos. Apesar de continuar com bons resultados, como esperado, com a diminuição do número de vazões conhecidas os resultados encontrados pioram um pouco.

Na Tabela 134 são apresentadas as diferenças médias entre as pressões e consumos, de todos os nós, e vazões, de todos os trechos, calculados após a calibração e seus respectivos valores gabarito para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressões

Tabela 134 – Diferenças médias entre as pressões, consumos e vazões calculados e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração da vazão para consumo inicial calculado com uso da sub-rotina computacional na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo)

| Dados conhecidos de pressão em: | Cálculo de ∇H | Diferença média | | | | | |
|---------------------------------|-----------------------|-----------------|---------|---------------------|---------|--------------|---------|
| | | Pressões (m) | | Consumo nodal (L/s) | | Vazões (L/s) | |
| | | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C |
| 7 nós | H-W | 0,00 | 0,00 | 0,15 | 0,15 | 0,07 | 0,07 |
| | D-W | 0,01 | 0,01 | 0,24 | 0,24 | 0,15 | 0,15 |
| 6 nós | H-W | 0,20 | 0,12 | 15,06 | 2,16 | 5,30 | 1,56 |
| | D-W | 0,15 | 0,07 | 15,50 | 1,86 | 5,51 | 1,22 |
| 5 nós | H-W | 0,50 | 0,65 | 21,04 | 8,58 | 7,50 | 6,28 |
| | D-W | 0,35 | 0,47 | 21,59 | 8,48 | 7,68 | 6,02 |
| 4 nós | H-W | 0,66 | 2,17 | 28,90 | 14,52 | 10,24 | 14,19 |
| | D-W | 0,45 | 1,63 | 29,45 | 14,44 | 10,42 | 14,07 |
| 3 nós separados | H-W | 1,15 | 3,24 | 31,80 | 27,87 | 13,99 | 24,09 |
| | D-W | 0,82 | 2,18 | 32,30 | 25,99 | 14,24 | 22,36 |
| 3 nós juntos | H-W | 1,70 | 14,44 | 22,38 | 38,55 | 11,21 | 48,33 |
| | D-W | 1,23 | 10,25 | 22,25 | 37,14 | 11,32 | 47,24 |
| 2 nós separados | H-W | 2,53 | 9,45 | 40,94 | 39,42 | 21,19 | 46,63 |
| | D-W | 1,88 | 7,10 | 41,03 | 37,50 | 21,39 | 45,34 |
| 2 nós juntos | H-W | 1,19 | 14,14 | 11,45 | 47,10 | 10,35 | 44,97 |
| | D-W | 0,76 | 9,68 | 10,57 | 47,64 | 8,82 | 44,16 |
| 1 nó perto do Reserv. | H-W | 3,20 | 24,58 | 42,18 | 60,69 | 22,12 | 80,04 |
| | D-W | 2,34 | 17,78 | 42,07 | 58,27 | 22,34 | 78,30 |
| 1 nó longe do Reserv. | H-W | 3,35 | 7,86 | 23,29 | 30,78 | 33,33 | 39,64 |
| | D-W | 2,57 | 6,01 | 23,85 | 30,42 | 33,74 | 39,18 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para dados de entrada de pressões nos nós, considerando o MIGHA O, apenas para dados em todos os nós da rede, se tem resultados muito bons. No entanto, considerando agora o MIGHA C, têm-se ótimos resultados para dados em 7 ou 6 nós. Para ambos os métodos, os resultados pioram com a diminuição do número de dados. Para estas calibrações, o uso de dados em nós juntos apresentaram melhores resultados do que em nós separados.

Com o uso da sub-rotina computacional desenvolvida para escolha dos consumos nodais iniciais, para a calibração da vazão, com uso de vazões como dados de entrada, o método MIGHA O se mostrou muito melhor que o MIGHA C. Já com o uso de pressões nos nós, como entrada do processo de calibração, para dados em muitos nós, o uso da metodologia MIGHA C apresentou melhores resultados.

Para calibração da vazão na rede Walski (1983) – Gambale (2000) foram estabelecidas um máximo de 100 iterações. A função objetiva mínima a ser alcançada foi estabelecida com um valor de 0,000000001.

Analisando os casos com consumos nodais iniciais de 5 L/s, para calibrações com dados de entrada de vazões e pressões ao mesmo tempo, o sistema foi calibrado com uso do MIGHA O, entretanto, isso não aconteceu através do uso do MIGHA C. Isso explica a grande diferença existente entre os resultados encontrados pelos dois métodos, mostrando que, quando a função objetivo é alcançada durante o processo de calibração, têm-se melhores resultados de pressão, consumo e vazão.

Considerando como dados de entrada somente vazões, a função objetivo só não foi atingida, com uso do MIGHA O, para dados em 8, 7, 6 e 5 trechos. Para dados de vazão em 10 ou 9 trechos os resultados foram muitos bons, como esperado. No entanto, apesar de que a função objetiva foi atingida para dados de entrada em 4 ou menos trechos, os resultados foram apenas satisfatórios, provavelmente devido à quantidade reduzida de dados de entrada para a calibração.

Com uso do MIGHA C, a função objetivo só foi atingida para dados de vazão em todos os trechos e com perdas de carga calculadas através da equação de Hazen-Williams. Isso complementa que, para a calibração da vazão com dados de entrada de vazões nos trechos e consumos iniciais de 5 L/s, o MIGHA O apresenta melhores resultados.

Nas Tabelas 135 e 136 podem ser vistos o número de iterações e o valor de função objetivo alcançados por cada caso simulado para consumos nodais iniciais de 5 L/s.

Tabela 135 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração da vazão para consumo inicial de 5 L/s na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo)

| Dados conhecidos: | Cálculo de ∇H | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 3 vazões e pressões | H-W | 6 | 0,0000000008 | 100 | 0,0000086865 |
| | D-W | 6 | 0,0000000009 | 100 | 0,0000139686 |
| Vazão em 10 trechos | H-W | 3 | 0,0000000001 | 5 | 0,0000000008 |
| | D-W | 2 | 0,0000000002 | 100 | 0,0000006156 |
| Vazão em 9 trechos | H-W | 19 | 0,0000000006 | 100 | 0,0000048468 |
| | D-W | 15 | 0,0000000010 | 100 | 0,0000056971 |
| Vazão em 8 trechos | H-W | 100 | 0,0000003320 | 100 | 0,0000149909 |
| | D-W | 100 | 0,0000000708 | 100 | 0,0000148362 |
| Vazão em 7 trechos | H-W | 100 | 0,0000003341 | 100 | 0,0000149435 |
| | D-W | 100 | 0,0000000689 | 100 | 0,0000146042 |
| Vazão em 6 trechos | H-W | 100 | 0,0000003217 | 100 | 0,0000183707 |
| | D-W | 100 | 0,0000000688 | 100 | 0,0000198651 |
| Vazão em 5 trechos | H-W | 100 | 0,0000003217 | 100 | 0,0000183707 |
| | D-W | 100 | 0,0000000688 | 100 | 0,0000198651 |
| Vazão em 4 trechos | H-W | 7 | 0,0000000009 | 100 | 0,0000096464 |
| | D-W | 7 | 0,0000000009 | 100 | 0,0000147828 |
| Vazão em 3 trechos | H-W | 7 | 0,0000000009 | 100 | 0,0000132965 |
| | D-W | 7 | 0,0000000009 | 100 | 0,0000200900 |
| Vazão em 2 trechos | H-W | 5 | 0,0000000003 | 100 | 0,0000051332 |
| | D-W | 6 | 0,0000000006 | 100 | 0,0000054496 |
| Vazão em 1 trecho | H-W | 4 | 0,0000000001 | 100 | 0,0000123107 |
| | D-W | 3 | 0,0000000007 | 100 | 0,0000211736 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode ser visto na Tabela 136, para todos os casos de pressões como dados de entrada, a função objetivo foi atingida. Ainda é possível perceber que, com o uso do MIGHA O, o número de iterações necessário para atingir a função objetivo é reduzido.

Também pode-se notar que, apesar de a função objetivo ter sido atingida para a calibração com dados de entrada de pressão em 6 nós da rede em apenas 3 ou 4 iterações e, para dados de entrada de vazão em 8 trechos, mesmo com 100 iterações, a função objetivo não ter sido alcançada, os resultados obtidos para o último caso citado foram melhores do que os encontrados no primeiro.

Tabela 136 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração da vazão para consumo inicial de 5 L/s na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo)

| Dados conhecidos de pressão em: | Cálculo de ∇H | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---------------------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 7 nós | H-W | 3 | 0,000000001 | 4 | 0,000000001 |
| | D-W | 3 | 0,000000009 | 4 | 0,000000000 |
| 6 nós | H-W | 3 | 0,000000002 | 4 | 0,000000002 |
| | D-W | 4 | 0,000000002 | 4 | 0,000000010 |
| 5 nós | H-W | 2 | 0,000000003 | 3 | 0,000000003 |
| | D-W | 3 | 0,000000005 | 5 | 0,000000005 |
| 4 nós | H-W | 2 | 0,000000003 | 3 | 0,000000003 |
| | D-W | 3 | 0,000000005 | 5 | 0,000000005 |
| 3 nós separados | H-W | 2 | 0,000000002 | 3 | 0,000000005 |
| | D-W | 3 | 0,000000002 | 4 | 0,000000002 |
| 3 nós juntos | H-W | 2 | 0,000000002 | 7 | 0,000000001 |
| | D-W | 3 | 0,000000001 | 9 | 0,000000002 |
| 2 nós separados | H-W | 2 | 0,000000000 | 3 | 0,000000004 |
| | D-W | 2 | 0,000000010 | 4 | 0,000000003 |
| 2 nós juntos | H-W | 2 | 0,000000002 | 5 | 0,000000001 |
| | D-W | 3 | 0,000000005 | 6 | 0,000000003 |
| 1 nó perto do Reserv. | H-W | 2 | 0,000000000 | 3 | 0,000000000 |
| | D-W | 2 | 0,000000009 | 3 | 0,000000009 |
| 1 nó longe do Reserv. | H-W | 1 | 0,000000001 | 4 | 0,000000003 |
| | D-W | 2 | 0,000000009 | 4 | 0,000000002 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas Tabelas 137 e 138 são apresentados o número de iterações atingidas e o valor de função objetivo alcançado por cada caso simulado para um consumo nodal de 29 L/s em todos os nós da rede.

Da mesma forma que para calibração da vazão com consumos iniciais de 5 L/s, dados de vazões e pressões simultaneamente atingem a função objetivo com uso do MIGHA O, no entanto, isso não ocorre com o uso do MIGHA C. Já para o uso exclusivo de dados de vazão nos trechos da rede de distribuição como entrada para a calibração, em todas as simulações, com uso do MIGHA O e gradiente hidráulico calculado através do uso da equação de Darcy-Weisbach, a função objetivo foi atingida. Já para o MIGHA C e perda de carga unitária calculada através da mesma equação, nenhum caso atingiu esta função. No caso de se utilizar Hazen-Williams, 3 casos não alcançaram a máxima função objetivo com uso do MIGHA O e apenas um a alcançou com uso do MIGHA C.

Tabela 137 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração da vazão para consumo inicial de 29 L/s na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo)

| Dados conhecidos: | Cálculo de ∇H | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 3 vazões e pressões | H-W | 8 | 0,0000000006 | 100 | 0,0000024108 |
| | D-W | 6 | 0,0000000006 | 100 | 0,0000009160 |
| Vazão em 10 trechos | H-W | 2 | 0,0000000005 | 5 | 0,0000000006 |
| | D-W | 2 | 0,0000000001 | 100 | 0,0000000586 |
| Vazão em 9 trechos | H-W | 18 | 0,0000000008 | 100 | 0,0000019514 |
| | D-W | 15 | 0,0000000007 | 100 | 0,0000006948 |
| Vazão em 8 trechos | H-W | 32 | 0,0000000007 | 100 | 0,0000023376 |
| | D-W | 21 | 0,0000000010 | 100 | 0,0000010969 |
| Vazão em 7 trechos | H-W | 100 | 0,0000001815 | 100 | 0,0000258636 |
| | D-W | 10 | 0,0000000003 | 100 | 0,0000072029 |
| Vazão em 6 trechos | H-W | 100 | 0,0000001815 | 100 | 0,0000258636 |
| | D-W | 10 | 0,0000000003 | 100 | 0,0000072029 |
| Vazão em 5 trechos | H-W | 100 | 0,0000001815 | 100 | 0,0000258636 |
| | D-W | 10 | 0,0000000003 | 100 | 0,0000072029 |
| Vazão em 4 trechos | H-W | 6 | 0,0000000010 | 100 | 0,0000160959 |
| | D-W | 5 | 0,0000000007 | 100 | 0,0000050154 |
| Vazão em 3 trechos | H-W | 6 | 0,0000000010 | 100 | 0,0000160959 |
| | D-W | 5 | 0,0000000006 | 100 | 0,0000050154 |
| Vazão em 2 trechos | H-W | 16 | 0,0000000009 | 100 | 0,0000272134 |
| | D-W | 13 | 0,0000000009 | 100 | 0,0000089044 |
| Vazão em 1 trecho | H-W | 2 | 0,0000000005 | 100 | 0,0000030280 |
| | D-W | 2 | 0,0000000003 | 100 | 0,0000019107 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Mesmo que com o uso da equação de Hazen-Williams para o uso de dados de entrada de vazão em 7, 6 e 5 trechos a calibração não tenha alcançado e função objetivo e com o uso da fórmula universal tenha, os resultados encontrados por ambas metodologias de calibração propostas continuaram com resultados similares nestes casos.

Para dados de pressão nos nós como entrada na calibração da vazão com consumos nodais iniciais de 29 L/s em todos os nós, todos os casos calibrados, tanto com o uso do MIGHA O quanto com a utilização do MIGHA C, a função objetivo foi atingida em um número máximo de 7 iterações.

Assim como se pôde perceber ao analisar o número de iterações necessárias na calibração da rede Porto (2006), para este exemplo da rede Walski (1983) – Gambale (2000), também se vê um número reduzido de iterações no uso de pressões nos nós como dados de

entrada no processo de calibração da vazão com uso do MIGHA perante o uso de vazões nos trechos.

Tabela 138 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração da vazão para consumo inicial de 29 L/s na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo)

| Dados conhecidos de pressão em: | Cálculo de ∇H | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---------------------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 7 nós | H-W | 4 | 0,0000000001 | 5 | 0,0000000001 |
| | D-W | 3 | 0,0000000010 | 4 | 0,0000000010 |
| 6 nós | H-W | 3 | 0,0000000002 | 4 | 0,0000000005 |
| | D-W | 4 | 0,0000000000 | 5 | 0,0000000001 |
| 5 nós | H-W | 2 | 0,0000000002 | 5 | 0,0000000007 |
| | D-W | 4 | 0,0000000001 | 5 | 0,0000000000 |
| 4 nós | H-W | 2 | 0,0000000002 | 5 | 0,0000000007 |
| | D-W | 4 | 0,0000000001 | 5 | 0,0000000000 |
| 3 nós separados | H-W | 2 | 0,0000000002 | 7 | 0,0000000002 |
| | D-W | 2 | 0,0000000004 | 6 | 0,0000000003 |
| 3 nós juntos | H-W | 1 | 0,0000000000 | 2 | 0,0000000000 |
| | D-W | 2 | 0,0000000005 | 3 | 0,0000000007 |
| 2 nós separados | H-W | 1 | 0,0000000000 | 2 | 0,0000000001 |
| | D-W | 2 | 0,0000000000 | 3 | 0,0000000000 |
| 2 nós juntos | H-W | 1 | 0,0000000004 | 2 | 0,0000000004 |
| | D-W | 2 | 0,0000000008 | 3 | 0,0000000004 |
| 1 nó perto do Reserv. | H-W | 1 | 0,0000000000 | 2 | 0,0000000000 |
| | D-W | 1 | 0,0000000001 | 2 | 0,0000000001 |
| 1 nó longe do Reserv. | H-W | 1 | 0,0000000002 | 2 | 0,0000000001 |
| | D-W | 2 | 0,0000000000 | 3 | 0,0000000001 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Mesmo assim, isso não significa que o uso de pressões gere melhores resultados, apenas estes são obtidos de forma mais rápida.

Nas Tabelas 139 e 140 são apresentados o número de iterações realizadas e o valor de função objetivo alcançado por cada caso simulado para consumos iniciais de 70 L/s em cada nó da rede de distribuição.

Como pode ser visto na Tabela 139, a utilização de vazões e pressões como dados de entrada, simultaneamente, não alcançou a função objetivo, nem com o uso do MIGHA O nem com o MIGHA C.

Tabela 139 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração da vazão para consumo inicial de 70 L/s na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo)

| Dados conhecidos: | Cálculo de ∇H | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 3 vazões e pressões | H-W | 100 | 0,0000012104 | 100 | 0,0026287028 |
| | D-W | 100 | 0,0000007228 | 100 | 0,0011662025 |
| Vazão em 10 trechos | H-W | 2 | 0,0000000002 | 6 | 0,0000000002 |
| | D-W | 2 | 0,0000000002 | 100 | 0,0000000159 |
| Vazão em 9 trechos | H-W | 100 | 0,0000003348 | 100 | 0,0000483453 |
| | D-W | 100 | 0,0000000322 | 100 | 0,0000387144 |
| Vazão em 8 trechos | H-W | 100 | 0,0000002032 | 100 | 0,0000795615 |
| | D-W | 100 | 0,0000000245 | 100 | 0,0000562842 |
| Vazão em 7 trechos | H-W | 100 | 0,0000000172 | 100 | 0,0022127808 |
| | D-W | 100 | 0,0000000064 | 100 | 0,0009014537 |
| Vazão em 6 trechos | H-W | 10 | 0,0000000004 | 100 | 0,0022003158 |
| | D-W | 10 | 0,0000000003 | 100 | 0,0008935029 |
| Vazão em 5 trechos | H-W | 100 | 0,0000002675 | 100 | 0,0022017253 |
| | D-W | 100 | 0,0000002095 | 100 | 0,0009032249 |
| Vazão em 4 trechos | H-W | 100 | 0,0003513006 | 100 | 0,0009811349 |
| | D-W | 100 | 0,0001156046 | 100 | 0,0003652170 |
| Vazão em 3 trechos | H-W | 100 | 0,0003412480 | 100 | 0,0009414385 |
| | D-W | 100 | 0,0001086073 | 100 | 0,0003362002 |
| Vazão em 2 trechos | H-W | 25 | 0,0000000009 | 100 | 0,0004730071 |
| | D-W | 11 | 0,0000000004 | 100 | 0,0001406571 |
| Vazão em 1 trecho | H-W | 100 | 0,0000020683 | 100 | 0,0000430417 |
| | D-W | 100 | 0,0000011009 | 100 | 0,0000284973 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na utilização de apenas vazões como dados de entrada na calibração da vazão com consumos nodais iniciais iguais a 70 L/s, em todos os nós da rede Walski (1983) – Gambale (2000), a função objetivo só foi alcançada para o caso em que se tem vazões conhecidas em todos os trechos da rede. Apesar disso, como dito anteriormente, para dados de entrada de vazão em 10, 9, 8 ou 7 trechos, os resultados ainda foram muito bons, piorando com a diminuição do número de dados.

Ao observar a Tabela 140, percebe-se o motivo de só se ter excelentes resultados para dados de entrada de pressão em todos os nós da rede, já que, além desse caso, apenas outros dois, considerando o MIGHA O, atingiram a função objetivo.

Tabela 140 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração da vazão para consumo inicial de 70 L/s na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo)

| Dados conhecidos de pressão em: | Cálculo de ∇H | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---------------------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 7 nós | H-W | 4 | 0,0000000002 | 5 | 0,0000000002 |
| | D-W | 4 | 0,0000000005 | 5 | 0,0000000005 |
| 6 nós | H-W | 100 | 0,0000000144 | 100 | 0,0000000144 |
| | D-W | 5 | 0,0000000000 | 100 | 0,0000000082 |
| 5 nós | H-W | 4 | 0,0000000001 | 100 | 0,0000001156 |
| | D-W | 4 | 0,0000000001 | 100 | 0,0000000676 |
| 4 nós | H-W | 100 | 0,0000001778 | 100 | 0,0000060860 |
| | D-W | 100 | 0,0000001141 | 100 | 0,0000036983 |
| 3 nós separados | H-W | 4 | 0,0000000003 | 100 | 0,0021376363 |
| | D-W | 5 | 0,0000000006 | 100 | 0,0010349168 |
| 3 nós juntos | H-W | 100 | 0,0014113454 | 100 | 0,0013808246 |
| | D-W | 100 | 0,0004672661 | 100 | 0,0004170433 |
| 2 nós separados | H-W | 100 | 0,0000066050 | 100 | 0,0019674163 |
| | D-W | 100 | 0,0000046225 | 100 | 0,0009564997 |
| 2 nós juntos | H-W | 100 | 0,0000108838 | 100 | 0,0000219246 |
| | D-W | 100 | 0,0000081820 | 100 | 0,0000124603 |
| 1 nó perto do Reserv. | H-W | 100 | 0,0001527696 | 100 | 0,0001527696 |
| | D-W | 100 | 0,0000952576 | 100 | 0,0000952577 |
| 1 nó longe do Reserv. | H-W | 100 | 0,0000002285 | 100 | 0,0018185129 |
| | D-W | 6 | 0,0000000003 | 100 | 0,0008278026 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

No caso do uso da sub-rotina computacional para o cálculo dos consumos nodais iniciais, para dados de entrada de vazões nos trechos e pressões nos nós, simultaneamente, a função objetivo só foi atingida com a utilização do método MIGHA O, já com o uso do MIGHA C, mesmo com 100 iterações a máxima função objetivo não foi atingida, independente da metodologia de cálculo do gradiente hidráulico.

Nas Tabelas 141 e 142 são apresentados o número de iterações realizadas e o valor de função objetivo alcançado por cada caso simulado para consumos iniciais, em cada nó da rede de distribuição, calculados com uso da sub-rotina computacional desenvolvida neste trabalho.

Tabela 141 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração da vazão para consumo inicial calculado com uso da sub-rotina computacional desenvolvida na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo)

| Dados conhecidos: | Cálculo de ∇H | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 3 vazões e pressões | H-W | 6 | 0,0000000003 | 100 | 0,0000402657 |
| | D-W | 6 | 0,0000000006 | 100 | 0,0000207378 |
| Vazão em 10 trechos | H-W | 2 | 0,0000000002 | 5 | 0,0000000006 |
| | D-W | 2 | 0,0000000002 | 100 | 0,0000000175 |
| Vazão em 9 trechos | H-W | 21 | 0,0000000007 | 100 | 0,0000483452 |
| | D-W | 17 | 0,0000000010 | 100 | 0,0000386886 |
| Vazão em 8 trechos | H-W | 100 | 0,0000003207 | 100 | 0,0000794692 |
| | D-W | 100 | 0,0000000699 | 100 | 0,0000563721 |
| Vazão em 7 trechos | H-W | 100 | 0,0000003327 | 100 | 0,0022117163 |
| | D-W | 100 | 0,0000000661 | 100 | 0,0009015058 |
| Vazão em 6 trechos | H-W | 100 | 0,0000003327 | 100 | 0,0021993219 |
| | D-W | 100 | 0,0000000661 | 100 | 0,0008935550 |
| Vazão em 5 trechos | H-W | 100 | 0,0000003327 | 100 | 0,0022017220 |
| | D-W | 100 | 0,0000000661 | 100 | 0,0009032240 |
| Vazão em 4 trechos | H-W | 7 | 0,0000000001 | 100 | 0,0009816393 |
| | D-W | 7 | 0,0000000001 | 100 | 0,0003665702 |
| Vazão em 3 trechos | H-W | 7 | 0,0000000001 | 100 | 0,0009420683 |
| | D-W | 7 | 0,0000000001 | 100 | 0,0003374455 |
| Vazão em 2 trechos | H-W | 6 | 0,0000000004 | 100 | 0,0004738071 |
| | D-W | 6 | 0,0000000001 | 100 | 0,0001410701 |
| Vazão em 1 trecho | H-W | 4 | 0,0000000001 | 100 | 0,0000429070 |
| | D-W | 4 | 0,0000000000 | 100 | 0,0000285310 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

No caso do uso de apenas vazões nos trechos como dados de entrada do processo de calibração, o MIGHA O também se mostrou mais eficiente que o MIGHA C, uma vez que, com este último, apenas para dados de vazão em todos os trechos da rede e perdas de carga calculadas através da equação de Hazen-Williams a função objetivo foi atingida. Já com o primeiro, a função objetivo só não foi atingida para dados de vazão em 8, 7, 6 e 5 trechos com vazão conhecida.

Considerando pressões como dados de entrada, o MIGHA O também foi mais eficiente, com no máximo 3 iterações, todos os casos calibrados com esta metodologia atingiram a função objetivo. Já com uso do MIGHA C, esta só foi alcançada para dados de pressão em todos os nós da rede.

Tabela 142 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração da vazão para consumo inicial calculado com uso da sub-rotina computacional desenvolvida na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo)

| Dados conhecidos de pressão em: | Cálculo de ∇H | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---------------------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 7 nós | H-W | 3 | 0,0000000001 | 4 | 0,0000000001 |
| | D-W | 3 | 0,0000000007 | 4 | 0,0000000007 |
| 6 nós | H-W | 3 | 0,0000000001 | 100 | 0,0000000169 |
| | D-W | 3 | 0,0000000009 | 100 | 0,0000000067 |
| 5 nós | H-W | 2 | 0,0000000000 | 100 | 0,0000001156 |
| | D-W | 3 | 0,0000000006 | 100 | 0,0000000676 |
| 4 nós | H-W | 2 | 0,0000000000 | 100 | 0,0000060620 |
| | D-W | 3 | 0,0000000006 | 100 | 0,0000037103 |
| 3 nós separados | H-W | 2 | 0,0000000001 | 100 | 0,0000147938 |
| | D-W | 3 | 0,0000000001 | 100 | 0,0000055025 |
| 3 nós juntos | H-W | 2 | 0,0000000001 | 100 | 0,0013807409 |
| | D-W | 3 | 0,0000000001 | 100 | 0,0004169675 |
| 2 nós separados | H-W | 1 | 0,0000000006 | 100 | 0,0000481174 |
| | D-W | 3 | 0,0000000001 | 100 | 0,0000253134 |
| 2 nós juntos | H-W | 2 | 0,0000000002 | 100 | 0,0000220383 |
| | D-W | 3 | 0,0000000003 | 100 | 0,0000123976 |
| 1 nó perto do Reserv. | H-W | 1 | 0,0000000000 | 100 | 0,0001527697 |
| | D-W | 2 | 0,0000000009 | 100 | 0,0000952576 |
| 1 nó longe do Reserv. | H-W | 1 | 0,0000000003 | 100 | 0,0000507754 |
| | D-W | 3 | 0,0000000000 | 100 | 0,0000269721 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.3.3 Rede C-Town: Battle of Calibration (2012)

Para a Calibração da vazão na rede C-Town foram realizadas 10 calibrações com uso, para perda de carga, da equação de Hazen-Williams e 10 com uso da fórmula de Darcy-Weisbach, sendo, para cada caso, 5 pelo processo MIGHA C e 5 pelo MIGHA O.

As 10 calibrações realizadas com o uso da equação de Hazen-Williams obtiveram os mesmos resultados. Da mesma forma, as 10 realizadas com uso da fórmula universal também tiveram os mesmos resultados. O motivo disso ter ocorrido é que, devido à complexidade dos elementos de operação da rede C-Town, em algum momento da calibração a rede não atingiu o balanço hidráulico necessário. Dessa forma, a cada iteração, o programa UFC10 utilizava os últimos resultados válidos obtidos para a geração de um novo consumo em cada nó que, por sua vez, não gerava resultado nenhum. Assim, apesar de ter sido solicitado uma quantidade de 1.000 iterações, as iterações só ocorreram, efetivamente, enquanto o sistema hidráulico encontrava um balanço hidráulico.

Para as calibrações realizadas a partir do uso da equação desenvolvida para perdas de carga calculadas através da equação de Hazen-Williams, analisando os resultados de pressão encontrados, a maior diferença entre as pressões encontradas após o processo de calibração e as pressões gabarito foi de 19,32m. Já a diferença média entre as citadas pressões para os 388 nós da rede de distribuição C-Town foi de 5,40m. Considerando os valores de vazão encontrados, a máxima diferença em relação aos valores gabarito foi de 122,5 L/s. Já as diferenças médias foram de 14,79 L/s. Já para os consumos encontrados, as diferenças máximas foram 3,38 L/s e as diferenças médias foram 0,69 L/s.

Para as calibrações realizadas a partir do uso da equação desenvolvida para perdas de carga calculadas através da fórmula universal, considerando os resultados de pressão encontrados, a maior diferença entre as pressões encontradas após o processo de calibração e as pressões gabarito foi de 18,78m. Já a diferença média entre as citadas pressões para os 388 nós da rede de distribuição C-Town foi de 4,71m. Considerando os valores de vazão encontrados, a máxima diferença em relação aos valores gabarito foi de 125,43 L/s. Já as diferenças médias foram de 14,34 L/s. Já para os consumos encontrados, as diferenças máximas foram 3,38 L/s e as diferenças médias foram 0,69 L/s.

Como esperado, em nenhum dos casos simulados a máxima função objetivo foi atingida. Para estes casos, foram realizadas 1.000 iterações. Na Tabela 143 podem ser vistos o número de iterações e a função objetivo alcançada em cada simulação.

Tabela 143 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada – Calibração da vazão para consumo inicial de 1 L/s na rede C-Town com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo)

| Dados conhecidos | Cálculo de ∇H | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| Pressão em todos os nós | H-W | 1.000 | 0,5032101756 | 1.000 | 0,5031944060 |
| | D-W | 1.000 | 0,0428894087 | 1.000 | 0,0428841923 |
| Pressão em 13 nós | H-W | 1.000 | 0,4010773474 | 1.000 | 0,3738763927 |
| | D-W | 1.000 | 0,0556413156 | 1.000 | 0,0734732817 |
| Pressão em 13 nós e vazão em 12 trechos | H-W | 1.000 | 0,5452903198 | 1.000 | 0,5260192008 |
| | D-W | 1.000 | 0,0521662211 | 1.000 | 0,0710941406 |
| Vazão em 12 trechos | H-W | 1.000 | 0,4506209546 | 1.000 | 0,5072914190 |
| | D-W | 1.000 | 0,0134822213 | 1.000 | 0,0391516879 |
| Vazão em todos os trechos | H-W | 1.000 | 0,4974202030 | 1.000 | 0,5044938516 |
| | D-W | 1.000 | 0,0562132294 | 1.000 | 0,0440274826 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

De forma geral os resultados foram ruins. Também é interessante notar que, diferente da calibração do C de Hazen-Williams, assim como no caso da calibração do fator de atrito, para a calibração da vazão, em nenhum caso, as pressões encontradas foram negativas.

4.2.3.4 Rede MIGHA

Para a Calibração da vazão na rede MIGHA foram realizadas 10 calibrações com uso, para perda de carga, da equação de Hazen-Williams e 10 com uso da fórmula de Darcy-Weisbach, sendo, para cada caso, 5 pelo processo MIGHA C e 5 pelo MIGHA O.

Analisando os resultados para dados de entrada de pressão em todos os nós da rede, os métodos MIGHA O e MIGHA C, para cada uma das metodologias de cálculo de perda de carga utilizadas, apresentaram os mesmos resultados, tanto para os trechos quanto para os nós. No caso das pressões encontradas após a calibração, para perdas calculadas por Hazen-Williams, a máxima diferença com as pressões gabarito foi de 0,75m e, a média, de 0,39m. Para a fórmula universal, a máxima diferença foi de 2,41m e a média de 1,05m. Considerando os valores de vazão encontrados, as máximas diferenças em relação aos valores gabarito foram de 0,7 L/s e 3,17 L/s, já as diferenças médias foram de 0,04 L/s e 0,11 L/s, todos os resultados considerando, respectivamente, perdas calculadas por Hazen-Williams e Darcy-Weisbach. Considerando a mesma ordem do uso da equação de cálculo do gradiente hidráulico, para os consumos nodais encontrados, as diferenças máximas foram de 0,28 L/s e 1,03 L/s e as diferenças médias foram de 0,05 L/s e 0,06 L/s. Nota-se que, apesar de ótimos resultados, a calibração da vazão com uso da equação proposta baseada na fórmula de Hazen-Williams gerou melhores resultados do que através da equação gerada com base na fórmula universal.

Considerando dados de entrada de pressão em 15 nós da rede de distribuição, a maior diferença entre as pressões encontradas após o processo de calibração e as pressões gabarito, através de Hazen-Williams, foi de 1,47m para o uso do MIGHA O e, com o uso do MIGHA C, foi de 1,64m. Com uso de Darcy-Weisbach, as diferenças máximas utilizando o MIGHA O e o MIGHA C, respectivamente, foram 1,18m e 1,30m. Para o MIGHA O, as diferenças médias entre as citadas pressões para os 290 nós da rede de distribuição MIGHA, usando, para a perda de carga, Hazen-Williams e Darcy-Weisbach, respectivamente, foram 0,44m e 0,32m e, para o MIGHA C, foram 0,68m e 0,53m. Para as vazões, ainda considerando, respectivamente, perdas calculadas por Hazen-Williams e fórmula universal, as máximas diferenças em relação aos valores gabarito foram de 2,26 L/s e 1,25 L/s para o MIGHA O e 2,55 L/s e 2,47 L/s para o MIGHA C. Já as diferenças médias foram de 0,19 L/s e 0,17 L/s para

o MIGHA O e, para o MIGHA C, 0,26 L/s para as duas equações de perda de carga. Já para os consumos nodais encontrados, as diferenças máximas foram 2,87 L/s e 2,01 L/s para o MIGHA O e 3,40 L/s e 3,35 L/s para o MIGHA C, ainda, as diferenças médias foram 0,21 L/s e 0,20 L/s para o MIGHA O e 0,24 L/s para o MIGHA C com as duas equações para o cálculo do gradiente hidráulico. A entrada de um número de dados de pressão em 5% do número de nós da rede no processo de calibração gerou bons resultados de pressão e vazão. Já para os consumos nodais, apesar dos baixos valores médios encontrados para as diferenças entre os valores obtidos após a calibração e os consumos gabarito, variando de 0,20 L/s a 0,24 L/s, considerando que a média dos consumos nodais da rede gabarito é de 0,23 L/s, percebe-se que os resultados encontrados para consumos nodais não foram bons.

Quando se tem dados de entrada de pressão em 15 nós e de vazão em 14 trechos da rede, a maior diferença entre as pressões encontradas após o processo de calibração e as pressões gabarito, através de Hazen-Williams, foi de 1,44m para o uso do MIGHA O e, com o uso do MIGHA C, foi de 1,63m. Já considerando o gradiente hidráulico calculado com Darcy-Weisbach, as diferenças máximas, com uso do MIGHA O e MIGHA C, respectivamente, foram 1,14m e 1,31m. No caso das diferenças médias encontradas em todos os nós, usando a equação de Hazen-Williams, para MIGHA O e MIGHA C, respectivamente, essas diferenças foram 0,38m e 0,54m e, usando a fórmula universal, também para MIGHA O e MIGHA C, respectivamente, essas diferenças foram 0,27m e 0,42m. Para as vazões, considerando perdas por Hazen-Williams e Darcy-Weisbach, respectivamente, as máximas diferenças em relação aos valores gabarito, para MIGHA O, foram 1,32 L/s e 1,24 L/s e, para o MIGHA C, foram 2,21 L/s e 2,30 L/s. Já as diferenças médias foram de 0,18 L/s e 0,16 L/s, para o MIGHA O e, para o MIGHA C, foram 0,25 L/s nos dois casos. Considerando, agora, os consumos nodais encontrados, as diferenças máximas foram 1,96 L/s e 1,28 L/s para o MIGHA O e 3,35 L/s e 2,87 L/s para o MIGHA C, ainda, as diferenças médias foram 0,21 L/s e 0,20 L/s para o MIGHA O e 0,23 L/s, nas duas situações, para o MIGHA C. Para este caso, adicionar dados de vazão, além das 15 pressões já utilizadas, melhorou um pouco os resultados encontrados ao se utilizar apenas as pressões nos nós. Esta melhora se baseia no aumento do número de dados de entrada ao processo de calibração.

Ao utilizar apenas a vazão em 14 trechos da rede, como entrada do processo de calibração, considerando ainda, respectivamente, perdas de carga nos trechos calculadas com uso das equações de Hazen-Williams e Darcy-Weisbach, as maiores diferenças entre as pressões encontradas após o processo de calibração e as pressões gabarito foram de 3,52m e 3,11m para o uso do MIGHA O e, com o uso do MIGHA C, foram de 3,69m e 2,87m. Para o MIGHA O,

as diferenças médias entre as citadas pressões, para todos os nós da rede, foram de 1,38m e 1,26m e, para o MIGHA C, foram de 1,77m e 1,36m. Para as vazões, as máximas diferenças em relação aos valores gabarito foram 10,52 L/s e 11,82 L/s para o MIGHA O e 9,44 L/s e 10,29 L/s para o MIGHA C. Já as diferenças médias foram as mesmas em ambas as metodologias de cálculo do gradiente hidráulico com valores iguais a 0,34 L/s e 0,36 L/s, respectivamente, para o MIGHA O e MIGHA C. Para os consumos nodais encontrados, as diferenças máximas foram 9,58 L/s e 9,60 L/s para o MIGHA O e 4,53 L/s e 4,98 L/s para o MIGHA C, já as diferenças médias foram 0,28 L/s e 0,29 L/s para o MIGHA O e 0,25 L/s e 0,26 L/s para o MIGHA C. Para dados de entrada de 14 vazões, os resultados encontrados foram um pouco piores do que os encontrados com dados de entrada de 15 pressões.

Por fim, ao utilizar a vazão em todos os trechos da rede como entrada do processo de calibração, as maiores diferenças entre as pressões encontradas após o processo de calibração e as pressões gabarito foram 0,25m e 0,13m para o uso do MIGHA O e, com o uso do MIGHA C, foram 0,50m e 3,09m. Para o MIGHA O, as diferenças médias entre as citadas pressões da rede de distribuição foram 0,12m e 0,06m e para o MIGHA C foram 0,21m e 1,61m. Para as vazões, as máximas diferenças em relação aos valores gabarito foram 0,38 L/s e 0,41 L/s para o MIGHA O e 0,41 L/s e 7,20 L/s para o MIGHA C. Já as diferenças médias foram 0,01 L/s para o MIGHA O, nos dois casos, e 0,02 L/s e 0,18 L/s para o MIGHA C. Para os consumos nodais encontrados, as diferenças máximas foram 0,41 L/s e 0,48 L/s para o MIGHA O e, para o MIGHA C, foram 0,54 L/s e 0,98 L/s. Já as diferenças médias foram 0,02 L/s e 0,03 L/s para o MIGHA O e 0,03 L/s e 0,11 L/s para o MIGHA C. O uso de dados de entrada de vazões conhecidas em todos os trechos da rede para o processo de calibração da vazão e cálculo dos consumos nodais gerou os melhores resultados para a calibração da rede MIGHA, mesmo quando comparados aos resultados para dados de entrada de pressões em todos os nós.

É interessante perceber que a rede MIGHA possui 290 nós e 542 trechos, assim, a utilização de vazão em todos os trechos como dados de entrada possui mais dados que o uso de pressões em todos os nós. Ainda, para a maior parte dos casos, o processo MIGHA O foi mais adequado que o MIGHA C.

Apesar de os resultados encontrados para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressão em todos os nós e, principalmente, vazões em todos os trechos terem sido muito bons, nenhum caso simulado teve sua função objetivo atingida, mesmo com 1.000 iterações.

Na Tabela 144 podem ser vistos o número de iterações e a função objetivo alcançada em cada simulação.

Tabela 144 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada – Calibração da vazão para consumo inicial de 0,1 L/s na rede MIGHA com gradiente hidráulico calculado por Hazen-Williams (cima) e Darcy-Weisbach (baixo)

| Dados conhecidos | Cálculo de ∇H | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| Pressão em todos os nós | H-W | 1.000 | 0,0001036019 | 1.000 | 0,0001036019 |
| | D-W | 1.000 | 0,0005204515 | 1.000 | 0,0005204515 |
| Pressão em 15 nós | H-W | 1.000 | 0,0000000214 | 1.000 | 0,00000002166 |
| | D-W | 1.000 | 0,0000000265 | 1.000 | 0,0000001509 |
| Pressão em 15 nós e vazão em 14 trechos | H-W | 1.000 | 0,0000000795 | 1.000 | 0,0002270011 |
| | D-W | 1.000 | 0,0000000413 | 1.000 | 0,0001481718 |
| Vazão em 14 trechos | H-W | 1.000 | 0,0000002398 | 1.000 | 0,0648020394 |
| | D-W | 1.000 | 0,0000000516 | 1.000 | 0,0455905917 |
| Vazão em todos os trechos | H-W | 1.000 | 0,0000119462 | 1.000 | 0,0000343220 |
| | D-W | 1.000 | 0,0000038542 | 1.000 | 0,0005401936 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.3.5 Resumo dos resultados da calibração da vazão e cálculo dos consumos nodais

Nas Tabelas 145 à 154 são apresentados o resumo dos resultados encontrados na realização das calibrações da vazão com posterior cálculo dos consumos nodais. É importante ressaltar que o comportamento dos resultados das calibrações com uso da fórmula universal e da equação de Hazen-Williams foram semelhantes.

Tabela 145 – Resumo dos resultados da calibração da vazão na rede Porto (2006) com consumo nodal inicial de 2 L/s

| Situação | Pressões | Vazões | Rugosidades | Geral |
|-------------------------|--|-------------|-------------|---|
| Pressões e vazões | Bom | Razoável | Razoável | Adequado com MIGHA O. |
| Vazões | Bom | Bom | Bom | Adequado para 9, 8, 7 ou 6 trechos e MIGHA O. |
| Pressões | Bom | Razoável | Razoável | Adequado para 7 ou 6 nós. |
| Nós juntos ou separados | Separados | Indiferente | Separados | Separados. |
| MIGHA C ou MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O. |
| Consumo inicial | Bom | Bom | Bom | Adequado. |
| Função objetivo - HW | Não atendeu 1 caso para vazões com MIGHA O e só atendeu 1 com MIGHA C. Atendeu todos os casos para pressões. | | | |
| Nº de iterações - HW | Q e QP: MIGHA O - 27; MIGHA C - 90,2 P: MIGHA O - 1,4; MIGHA C - 4 | | | |
| Função objetivo - DW | Não atendeu 1 caso para vazões com MIGHA O e nenhum com MIGHA C. Atendeu todos os casos para pressões. | | | |
| Nº de iterações - DW | Q e QP: MIGHA O - 25,7; MIGHA C - 100 P: MIGHA O - 3,1; MIGHA C - 5,9 | | | |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 146 – Resumo dos resultados da calibração da vazão na rede Porto (2006) com consumo nodal inicial de 5,7 L/s

| Situação | Pressões | Vazões | Rugosidades | Geral |
|--------------------------------|--|-------------|-------------|---|
| Pressões e vazões | Bom | Razoável | Razoável | Adequado. |
| Vazões | Bom | Bom | Bom | Adequado. Resultados melhoram com o aumento do número de dados. |
| Pressões | Bom | Razoável | Razoável | Adequado. Resultados melhoram com o aumento do número de dados. |
| Nós juntos ou separados | Separados | Juntos | Juntos | Juntos. |
| MIGHA C ou MIGHA O | Indiferente | Indiferente | Indiferente | Indiferente. |
| Consumo inicial | Bom | Bom | Bom | Adequado. |
| Função objetivo - HW | Não atendeu 1 caso para vazões com MIGHA O e só atendeu 1 com MIGHA C. Atendeu todos os casos para pressões. | | | |
| Nº de iterações - HW | Q e QP: MIGHA O - 15,2; MIGHA C - 90,2 P: MIGHA O - 1; MIGHA C - 1,9 | | | |
| Função objetivo - DW | Atendeu todos os casos para vazões com MIGHA O e nenhum com MIGHA C. Atendeu todos os casos para pressões. | | | |
| Nº de iterações - DW | Q e QP: MIGHA O - 14,5; MIGHA C - 100 P: MIGHA O - 2; MIGHA C - 3 | | | |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 147 – Resumo dos resultados da calibração da vazão na rede Porto (2006) com consumo nodal inicial de 10 L/s

| Situação | Pressões | Vazões | Rugosidades | Geral |
|--------------------------------|---|-------------|-------------|--------------|
| Pressões e vazões | Bom | Razoável | Razoável | Adequado. |
| Vazões | Bom | Bom | Bom | Adequado. |
| Pressões | Bom | Bom | Bom | Adequado. |
| Nós juntos ou separados | Juntos | Juntos | Juntos | Juntos. |
| MIGHA C ou MIGHA O | Indiferente | Indiferente | Indiferente | Indiferente. |
| Consumo inicial | Bom | Bom | Bom | Adequado. |
| Função objetivo - HW | Não atendeu 3 casos para vazões com MIGHA O e só atendeu 1 com MIGHA C. Para pressões, não atendeu 4 casos com MIGHA O e 5 com MIGHA C. | | | |
| Nº de iterações - HW | Q e QP: MIGHA O - 40; MIGHA C - 90,2 P: MIGHA O - 40,7; MIGHA C - 51 | | | |
| Função objetivo - DW | Não atendeu 3 casos para vazões com MIGHA O e nenhum com MIGHA C. Para pressões, não atendeu 4 casos com MIGHA O e 5 com MIGHA C. | | | |
| Nº de iterações - DW | Q e QP: MIGHA O - 38,3; MIGHA C - 100 P: MIGHA O - 41,8; MIGHA C - 52 | | | |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 148 – Resumo dos resultados da calibração da vazão na rede Porto (2006) com consumo nodal inicial calculado através da sub-rotina computacional

| Situação | Pressões | Vazões | Rugosidades | Geral |
|--------------------------------|---|-------------|-------------|--------------|
| Pressões e vazões | Bom | Razoável | Razoável | Adequado. |
| Vazões | Bom | Bom | Bom | Adequado. |
| Pressões | Bom | Bom | Bom | Adequado. |
| Nós juntos ou separados | Juntos | Juntos | Juntos | Juntos. |
| MIGHA C ou MIGHA O | Indiferente | Indiferente | Indiferente | Indiferente. |
| Consumo inicial | Razoável | Razoável | Razoável | Adequado. |
| Função objetivo - HW | Não atendeu 3 casos para vazões com MIGHA O e só atendeu 1 com MIGHA C. Para pressões, não atendeu 4 casos com MIGHA O e 5 com MIGHA C. | | | |
| Nº de iterações - HW | Q e QP: MIGHA O - 40; MIGHA C - 90,2 P: MIGHA O - 40,7; MIGHA C - 51 | | | |
| Função objetivo - DW | Não atendeu 3 casos para vazões com MIGHA O e nenhum com MIGHA C. Para pressões, não atendeu 4 casos com MIGHA O e 5 com MIGHA C. | | | |
| Nº de iterações - DW | Q e QP: MIGHA O - 38,3; MIGHA C - 100 P: MIGHA O - 41,8; MIGHA C - 52 | | | |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 149 – Resumo dos resultados da calibração da vazão na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com consumo nodal inicial de 5 L/s

| Situação | Pressões | Vazões | Rugosidades | Geral |
|--------------------------------|---|----------|-------------|---|
| Pressões e vazões | Bom | Razoável | Razoável | Adequado. |
| Vazões | Razoável | Razoável | Razoável | Adequado para um grande número de dados. |
| Pressões | Razoável | Razoável | Razoável | Bons resultados. |
| Nós juntos ou separados | Indiferente | Juntos | Juntos | Juntos. |
| MIGHA C ou MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O |
| Consumo inicial | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. O consumo inicial considerado é muito distante dos reais. |
| Função objetivo - HW | Não atendeu 4 casos para vazões com MIGHA O e só atendeu 1 com MIGHA C. Para pressões, atendeu em todos os casos. | | | |
| Nº de iterações - HW | Q e QP: MIGHA O - 41; MIGHA C - 91,4 P: MIGHA O - 2,1; MIGHA C - 3,9 | | | |
| Função objetivo - DW | Não atendeu 4 casos para vazões com MIGHA O e nenhum com MIGHA C. Para pressões, atendeu em todos os casos. | | | |
| Nº de iterações - DW | Q e QP: MIGHA O - 40,5; MIGHA C - 100 P: MIGHA O - 2,8; MIGHA C - 4,8 | | | |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 150 – Resumo dos resultados da calibração da vazão na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com consumo nodal inicial de 29 L/s

| Situação | Pressões | Vazões | Rugosidades | Geral |
|--------------------------------|--|----------|-------------|---|
| Pressões e vazões | Bom | Bom | Bom | Adequado. |
| Vazões | Razoável | Razoável | Razoável | Bons resultados para vazões conhecidas em muitos nós. |
| Pressões | Razoável | Razoável | Razoável | Bons resultados para pressões em todos os nós. |
| Nós juntos ou separados | Separados | Juntos | Juntos | Juntos. |
| MIGHA C ou MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O |
| Consumo inicial | Razoável | Razoável | Razoável | Adequado. |
| Função objetivo - HW | Não atendeu 3 casos para vazões com MIGHA O e só atendeu 1 com MIGHA C. Para pressões, atendeu todos os casos. | | | |
| Nº de iterações - HW | Q e QP: MIGHA O - 35,5; MIGHA C - 91,4 P: MIGHA O - 1,8; MIGHA C - 3,6 | | | |
| Função objetivo - DW | Atendeu todos os casos para vazões com MIGHA O e nenhum com MIGHA C. Para pressões, atendeu todos os casos. | | | |
| Nº de iterações - DW | Q e QP: MIGHA O - 9; MIGHA C - 100 P: MIGHA O - 2,6; MIGHA C - 3,9 | | | |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 151 – Resumo dos resultados da calibração da vazão na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com consumo nodal inicial de 70 L/s

| Situação | Pressões | Vazões | Rugosidades | Geral |
|--------------------------------|---|-----------|-------------|---|
| Pressões e vazões | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. |
| Vazões | Razoável | Razoável | Razoável | Bons resultados com muitos dados. |
| Pressões | Razoável | Razoável | Razoável | Bons resultados com muitos dados. |
| Nós juntos ou separados | Separados | Separados | Separados | Separados. |
| MIGHA C ou MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O |
| Consumo inicial | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. O consumo inicial considerado é muito distante dos reais. |
| Função objetivo - HW | Só atendeu 3 casos para vazões com MIGHA O e só atendeu 1 com MIGHA C. Para pressões, só atendeu 3 casos para vazões com MIGHA O e só atendeu 1 com MIGHA C | | | |
| Nº de iterações - HW | Q e QP: MIGHA O - 76,1; MIGHA C - 91,5 P: MIGHA O - 71,2; MIGHA C - 90,5 | | | |
| Função objetivo - DW | Só atendeu 3 casos para vazões com MIGHA O e nenhum com MIGHA C. Para pressões, só atendeu 5 casos com MIGHA O e 1 com MIGHA C. | | | |
| Nº de iterações - DW | Q e QP: MIGHA O - 74,8; MIGHA C - 100 P: MIGHA O - 52,4; MIGHA C - 90,5 | | | |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 152 – Resumo dos resultados da calibração da vazão na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com consumo nodal inicial calculado através da sub-rotina computacional

| Situação | Pressões | Vazões | Rugosidades | Geral |
|--------------------------------|--|----------|-------------|-----------|
| Pressões e vazões | Bom | Razoável | Razoável | Adequado. |
| Vazões | Bom | Bom | Bom | Adequado. |
| Pressões | Bom | Razoável | Razoável | Adequado. |
| Nós juntos ou separados | Indiferente | Juntos | Juntos | Juntos. |
| MIGHA C ou MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O |
| Consumo inicial | Bom | Bom | Bom | Adequado. |
| Função objetivo - HW | Não atendeu 4 casos para vazões com MIGHA O e só atendeu 1 com MIGHA C. Para pressões, atendeu todos os casos com MIGHA O e 1 com MIGHA C. | | | |
| Nº de iterações - HW | Q e QP: MIGHA O - 41,2; MIGHA C - 91,4 P: MIGHA O - 1,9; MIGHA C - 90,4 | | | |
| Função objetivo - DW | Não atendeu 4 casos para vazões com MIGHA O e só atendeu 1 com MIGHA C. Para pressões, atendeu todos os casos com MIGHA O e 1 com MIGHA C. | | | |
| Nº de iterações - DW | Q e QP: MIGHA O - 40,8; MIGHA C - 100 P: MIGHA O - 2,9; MIGHA C - 90,4 | | | |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 153 – Resumo dos resultados da calibração da vazão na rede C-Town com consumo nodal inicial de 1 L/s

| Situação | Pressões | Vazões | Rugosidades | Geral |
|-----------------------------------|-------------|-------------|-------------|---|
| Pressões em todos os nós | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. Não atingiu o balanço hidráulico. |
| Pressões em 13 nós | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. Não atingiu o balanço hidráulico. |
| Pressões e vazões | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. Não atingiu o balanço hidráulico. |
| Vazões em 12 trechos | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. Não atingiu o balanço hidráulico. |
| Vazões em todos os trechos | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. Não atingiu o balanço hidráulico. |
| MIGHA C ou MIGHA O | Indiferente | Indiferente | Indiferente | Indiferente. |
| Consumo inicial | Ruim | Ruim | Ruim | Não é adequado. Não atingiu o balanço hidráulico. |
| Função objetivo | - | - | - | Não atendeu em nenhum caso. |
| Nº de iterações | - | - | - | 1000 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 154 – Resumo dos resultados da calibração da vazão na rede MIGHA com consumo nodal inicial de 0,1 L/s

| Situação | Pressões | Vazões | Rugosidades | Geral |
|-----------------------------------|----------|---------|-------------|---|
| Pressões em todos os nós | Bom | Bom | Bom | Adequado. Resultados excelentes de pressões, vazões e consumos. MIGHA O e MIGHA C iguais. |
| Pressões em 15 nós | Bom | Bom | Razoável | Adequado. Melhor: MIGHA O |
| Pressões e vazões | Bom | Bom | Razoável | Adequado. Melhor que 15 pressões ou 14 vazões. Melhor: MIGHA O |
| Vazões em 14 trechos | Bom | Bom | Razoável | Adequado. Melhor: MIGHA O |
| Vazões em todos os trechos | Bom | Bom | Bom | Adequado. Resultados excelentes de pressões, vazões e consumos. Foi o melhor resultado entre os testados. Melhor: MIGHA O |
| MIGHA C ou MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O |
| Consumo inicial | Bom | Bom | Bom | Adequado. |
| Função objetivo | - | - | - | Não atendeu em nenhum caso. |
| Nº de iterações | - | - | - | 1000 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.4 Calibração da Vazão e cálculo de perdas de água

Ao todo, foram realizadas 82 calibrações para testar e analisar o novo procedimento desenvolvido para executar a calibração da vazão em redes de distribuição de água e posterior cálculo dos consumos nodais com o intuito de calcular possíveis perdas de água na rede.

A calibração da vazão e cálculo de perdas de água será analisada de forma diferente dos outros casos, uma vez que, além de saber se os valores de pressão nos nós e vazão nos trechos encontrados com a calibração se adequam a realidade, é importante verificar se os consumos encontrados consideram as perdas existentes e de que forma. A seguir, os resultados serão apresentados por rede calibrada para este parâmetro.

4.2.4.1 Rede Porto (2006)

Para a calibração da vazão com cálculo de perdas de água na rede Porto (2006) foram realizadas 40 calibrações, sendo 20 pelo processo MIGHA C e 20 pelo MIGHA O. O cálculo hidráulico para perdas de carga e, conseqüentemente, a equação utilizada para a

calibração da vazão, para esta rede, tem como base a fórmula de Hazen-Williams. Ainda, o consumo nodal inicial considerado em todos os nós da rede para as calibrações realizadas é de 5,7 L/s.

Para esta rede, o consumo total existente é de 40 L/s. Considerando as perdas inseridas de 2 L/s, o consumo total nos nós é de 42 L/s.

Considerando a calibração realizada utilizando, como dados de entrada, vazões em 3 trechos e pressões em 3 nós, a utilização do MIGHA O gerou melhores resultados do que o uso do MIGHA C. Com o MIGHA O, as diferenças entre as pressões encontradas e as gabarito (conhecidas/medidas considerando as perdas) em todos os nós da rede foram menores que 0,1m, exceto no nó 7, no qual essa diferença foi de 0,93m. Para o MIGHA C, 3 nós tiveram diferenças maiores que 1m. No caso das vazões, 2 trechos tiveram diferenças entre os valores encontrados e os gabarito maiores que 1 L/s com uso do MIGHA O e, já com uso do MIGHA C, isso ocorreu com 4 trechos. O consumo total encontrado após a calibração foi de 42,04 L/s com uso do MIGHA O e 41,99 L/s com uso do MIGHA C. Com isso, percebe-se que com o uso do método foi-se capaz de identificar a existência das perdas de água ao longo da rede de distribuição, no entanto, diferenças consideráveis entre os consumos encontrados e os consumos gabarito (conhecidos/medidos excluindo as perdas) ocorreram não só em pontos importantes para encontrar os vazamentos mas, no caso do MIGHA O, ocorreu nos nós 3, 4, 5, 6 e 7 e, no caso do MIGHA C, isso ocorreu em todos os nós.

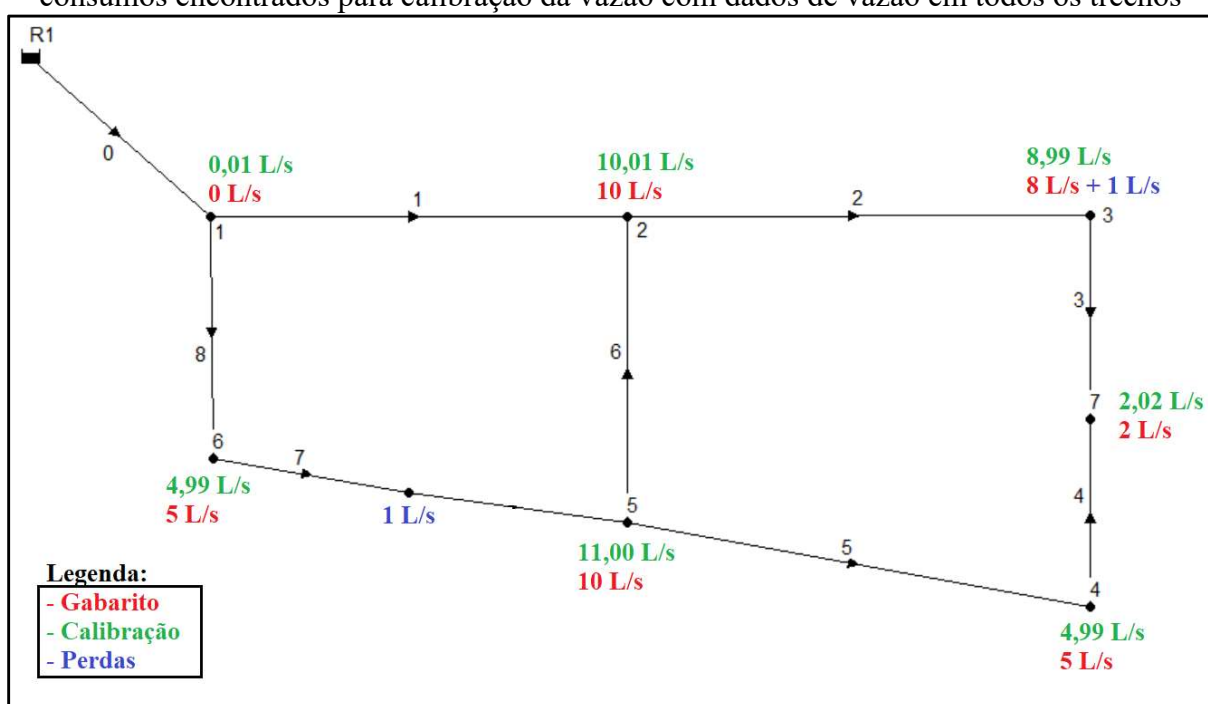
Considerando, como dados de entrada, apenas vazões nos trechos, os resultados encontrados também foram muito bons. Para dados em todos os trechos, os resultados encontrados com uso do MIGHA O e do MIGHA C foram iguais, para dados em menos trechos o uso do MIGHA O se mostrou superior. Analisando os resultados encontrados com uso apenas do MIGHA O, para dados de vazão em 9, 8 ou 7 trechos, as diferenças entre as pressões encontradas após a calibração e as pressões gabarito foram menores que 0,25m. Ainda considerando apenas o MIGHA O, em relação aos consumos nodais totais, os valores encontrados para dados de entrada em 9, 8, 7, 6 e 5 trechos são valores próximos de 42,00 L/s com diferenças menores que 0,05 L/s. Assim, para estes casos, pode-se perceber a existência das perdas de água. Apenas para dados de vazão a partir de 4 trechos, em que o consumo nodal total encontrado foi de 40,13 L/s é que as perdas não foram identificadas. Para o uso do MIGHA C o mesmo ocorreu, mas com valores pouco distintos.

É interessante perceber que, no caso de haver dados de vazão em todos os trechos da rede Porto (2006), as perdas de água encontradas se localizaram em pontos da rede que tornam sua localização mais simples. Na Figura 55 pode ser vista a comparação entre os

consumos nodais da rede gabarito, juntamente com as perdas de água, e os consumos nodais encontrados após a calibração da vazão para dados de entrada de vazão em todos os trechos da rede.

Na Tabela 155 são apresentadas as diferenças médias entre as pressões de todos os nós e vazões de todos os trechos, além dos consumos totais em todos os nós, calculados após a calibração e seus respectivos valores gabarito para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressões e vazões ao mesmo tempo, além de apenas vazões nos trechos.

Figura 55 – Comparação entre os consumos nodais da rede Porto (2006) com perdas e os consumos encontrados para calibração da vazão com dados de vazão em todos os trechos



Fonte: Elaborado pelo autor

Pelo que é mostrado na Figura 55, percebe-se que as perdas identificadas são nodais e, de acordo com os resultados encontrados, apesar de não se poder identificar o local exato das perdas de água, é possível indicar que as perdas de água encontradas estão localizadas no nó em foram identificadas ou em algum trecho afluente a este nó. Assim, para o caso do que foi encontrado no nó 3, a perda de água estaria no nó 3 ou no trecho 2 e, no caso do que foi encontrado para o nó 5, as perdas estariam localizadas no próprio nó 5 ou ao longo do trecho 7.

Tabela 155 – Diferenças médias entre as pressões e vazões, além dos consumos totais calculados e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração da vazão com cálculo de perdas na rede Porto (2006)

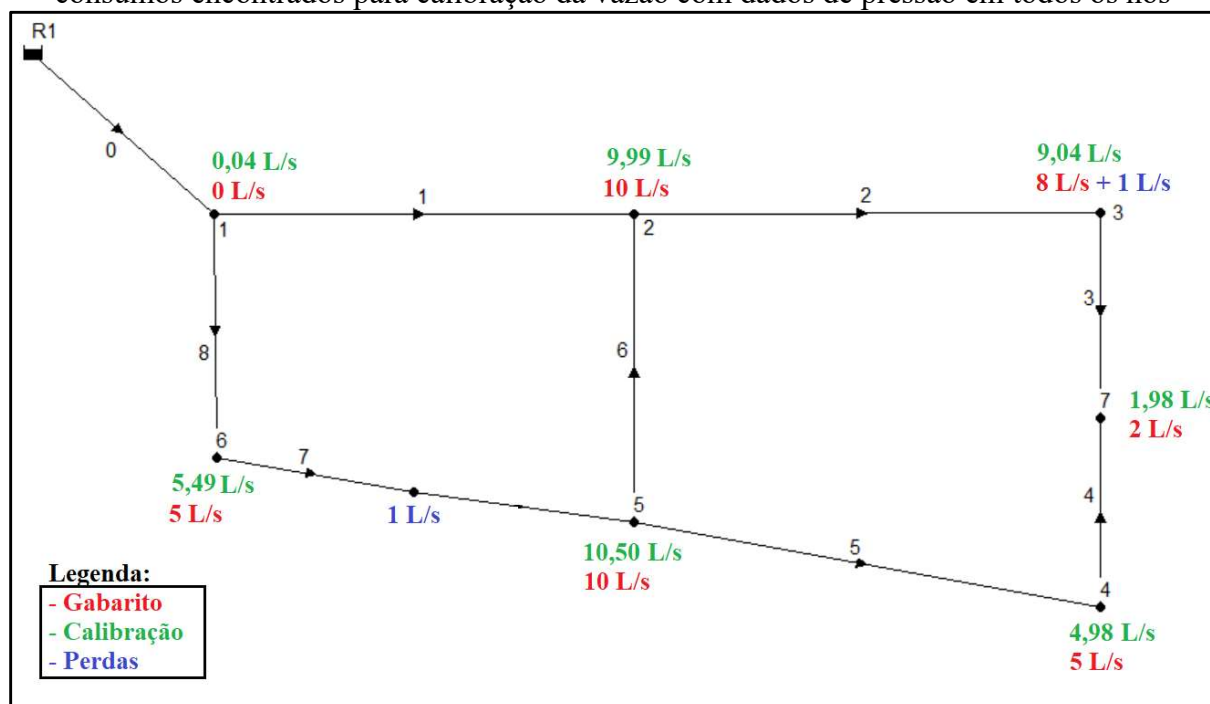
| Dados conhecidos: | Diferença média | | | | Valor total | |
|---------------------|-----------------|------------|-----------------|------------|--------------------------|------------|
| | Pressões (m) | | Vazões (L/s) | | Consumos nodais (L/s) | |
| | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C |
| 3 vazões e pressões | 0,15 | 0,62 | 0,50 | 1,22 | 42,04 | 41,99 |
| Vazão em 9 trechos | 0,08 | 0,08 | 0,03 | 0,03 | 42,01 | 42,01 |
| Vazão em 8 trechos | 0,07 | 0,13 | 0,03 | 0,19 | 42,03 | 42,00 |
| Vazão em 7 trechos | 0,10 | 0,59 | 0,14 | 0,67 | 42,04 | 42,04 |
| Vazão em 6 trechos | 0,21 | 0,60 | 0,43 | 0,67 | 42,02 | 42,03 |
| Vazão em 5 trechos | 0,32 | 0,75 | 0,65 | 1,14 | 42,00 | 41,99 |
| Vazão em 4 trechos | 0,45 | 0,85 | 0,86 | 1,37 | 40,13 | 39,90 |
| Vazão em 3 trechos | 1,12 | 1,65 | 1,26 | 1,57 | 40,61 | 39,90 |
| Vazão em 2 trechos | 0,96 | 1,40 | 1,63 | 1,90 | 40,63 | 39,90 |
| Vazão em 1 trecho | 2,11 | 2,20 | 2,30 | 2,31 | 39,90 | 39,90 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados encontrados para os casos calibrados apenas com dados de entrada de pressões nos nós da rede também foram muito bons. Assim como no caso de dados em todos os trechos, para dados de entrada de pressão em todos os nós, os resultados encontrados com uso do MIGHA O e do MIGHA C foram iguais e, para dados em menos nós, os resultados encontrados não foram iguais mas foram extremamente parecidos. Analisando os resultados encontrados com uso apenas do MIGHA O, apenas para dados de pressão em todos os nós as diferenças entre as pressões encontradas após a calibração e as pressões gabarito foram zero ou quase zero, para menos dados, aparece pelo menos um nó com diferença entre as pressões maior que 0,90m. Em relação aos consumos nodais totais, os valores encontrados para dados de entrada em 7, 6, 5 e 4 nós são valores próximos de 42,00 L/s com diferenças de 0,02 L/s. Assim, para estes casos, também pode-se perceber a existência das perdas de água.

É interessante perceber que, no caso de haver dados de pressão em todos os nós da rede Porto (2006), as perdas de água encontradas se localizaram em pontos da rede que tornam sua localização ainda mais específica que no caso de vazões em todos os trechos. Na Figura 56 pode ser vista a comparação entre os consumos nodais da rede gabarito, juntamente com as perdas de água, e os consumos nodais encontrados após a calibração da vazão para dados de entrada de pressão em todos os nós da rede.

Figura 56 – Comparação entre os consumos nodais da rede Porto (2006) com perdas e os consumos encontrados para calibração da vazão com dados de pressão em todos os nós



Fonte: Elaborado pelo autor

Pelo que se pode ver na Figura 56, as perdas de água nodais encontradas situam-se, quando estão localizadas em um nó, no próprio nó e, quando estão localizadas em um trecho, nos nós de montante e jusante do mesmo.

Percebe-se que a diferença entre as Figuras 55 e 56, ou seja, entre o uso de dados de vazão em todos os trechos e de pressão em todos os nós, na calibração da vazão com cálculo dos consumos nodais e identificação de perdas é que, a perda de água localizada no nó 3 foi identificada em ambos os casos mas, ao considerar a perda localizada no trecho 7, no primeiro caso, a vazão perdida foi encontrada, em sua totalidade, no nó 5 e, no segundo caso, os nós de montante e de jusante do trecho em que o vazamento está localizado absorveram, individualmente, metade dessa vazão. É importante ressaltar que o vazamento foi situado no meio do trecho.

Quanto à diferença em se determinar as perdas de água utilizando dados de entrada de pressão em nós próximos ou separados entre si, os melhores resultados de pressão ocorrem quando se tem dados separados entre si, no entanto, para consumos e vazões os melhores resultados ocorrem para nós próximos entre si.

Na Tabela 156 são apresentadas as diferenças médias entre as pressões de todos os nós e vazões de todos os trechos, além dos consumos totais em todos os nós, calculados após a

calibração e seus respectivos valores gabarito para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressões nos trechos.

Tabela 156 – Diferenças médias entre as pressões e vazões, além dos consumos totais calculados e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração da vazão com cálculo de perdas na rede Porto (2006)

| Dados conhecidos de pressão em: | Diferença média | | | | Valor total | |
|------------------------------------|-----------------|-------|-----------------|-------|--------------------------|-------|
| | Pressões (m) | | Vazões (L/s) | | Consumos nodais (L/s) | |
| | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA | MIGHA |
| | O | C | O | C | O | C |
| 7 nós | 0,00 | 0,00 | 0,07 | 0,07 | 42,02 | 42,02 |
| 6 nós | 0,14 | 0,14 | 0,47 | 0,47 | 42,02 | 42,02 |
| 5 nós | 0,41 | 0,41 | 0,95 | 0,94 | 42,02 | 42,02 |
| 4 nós | 0,71 | 0,71 | 1,56 | 1,56 | 42,02 | 42,02 |
| 3 nós separados | 0,41 | 0,41 | 1,70 | 1,70 | 46,15 | 46,15 |
| 3 juntos | 0,96 | 0,96 | 1,56 | 1,56 | 41,75 | 41,75 |
| 2 nós separados | 1,07 | 1,07 | 1,98 | 1,98 | 44,91 | 44,91 |
| 2 nós juntos | 1,57 | 1,58 | 2,22 | 2,22 | 40,73 | 40,73 |
| 1 nó perto do Reservatório | 2,09 | 2,09 | 2,10 | 2,10 | 42,02 | 42,02 |
| 1 nó longe do Reservatório | 1,62 | 1,62 | 2,27 | 2,27 | 40,67 | 40,67 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para calibração da vazão e cálculo das perdas na rede Porto (2006) foram estabelecidas um máximo de 100 iterações. A função objetivo mínima a ser alcançada foi definida com um valor de 0,000000001.

Para o uso de vazões como dados de entrada, em nem todos os casos a função objetivo foi alcançada. Nas Tabelas 157 e 158 podem ser vistos o número de iterações e o valor de função objetivo alcançados por cada caso simulado.

Tabela 157 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração da vazão e cálculo de perdas de água na rede Porto (2006)

| Dados conhecidos: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|--------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 3 vazões e pressões | 32 | 0,0000000007 | 100 | 0,0000038498 |
| Vazão em 9 trechos | 100 | 0,0000000079 | 100 | 0,0000000079 |
| Vazão em 8 trechos | 100 | 0,0000000095 | 100 | 0,0000005970 |
| Vazão em 7 trechos | 44 | 0,0000000009 | 100 | 0,0000009053 |
| Vazão em 6 trechos | 19 | 0,0000000008 | 100 | 0,0000009278 |
| Vazão em 5 trechos | 16 | 0,0000000008 | 100 | 0,0000028073 |
| Vazão em 4 trechos | 16 | 0,0000000008 | 100 | 0,0000028072 |
| Vazão em 3 trechos | 8 | 0,0000000006 | 100 | 0,0000035688 |
| Vazão em 2 trechos | 9 | 0,0000000006 | 100 | 0,0000022460 |
| Vazão em 1 trecho | 7 | 0,0000000006 | 100 | 0,0000006528 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 158 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração da vazão e cálculo de perdas de água na rede Porto (2006)

| Dados conhecidos de pressão em: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|--|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 7 nós | 1 | 0,0000000002 | 2 | 0,0000000002 |
| 6 nós | 1 | 0,0000000003 | 2 | 0,0000000003 |
| 5 nós | 1 | 0,0000000002 | 2 | 0,0000000003 |
| 4 nós | 1 | 0,0000000003 | 2 | 0,0000000003 |
| 3 nós separados | 1 | 0,0000000004 | 2 | 0,0000000003 |
| 3 juntos | 1 | 0,0000000005 | 2 | 0,0000000001 |
| 2 nós separados | 1 | 0,0000000003 | 2 | 0,0000000001 |
| 2 nós juntos | 1 | 0,0000000001 | 2 | 0,0000000002 |
| 1 nó perto do Reservatório | 1 | 0,0000000000 | 2 | 0,0000000000 |
| 1 nó longe do Reservatório | 1 | 0,0000000002 | 2 | 0,0000000002 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.4.2 Rede Walski (1983) – Gambale (2000)

Para a calibração da vazão com cálculo de perdas de água na rede Walski (1983) – Gambale (2000) foram realizadas 42 calibrações, sendo 21 pelo processo MIGHA C e 21 pelo MIGHA O. O cálculo hidráulico para perdas de carga e, conseqüentemente, a equação utilizada para a calibração da vazão, para esta rede, tem como base a fórmula de Darcy-Weisbach. Ainda,

o consumo nodal inicial considerado em todos os nós da rede para as calibrações realizadas é de 29 L/s.

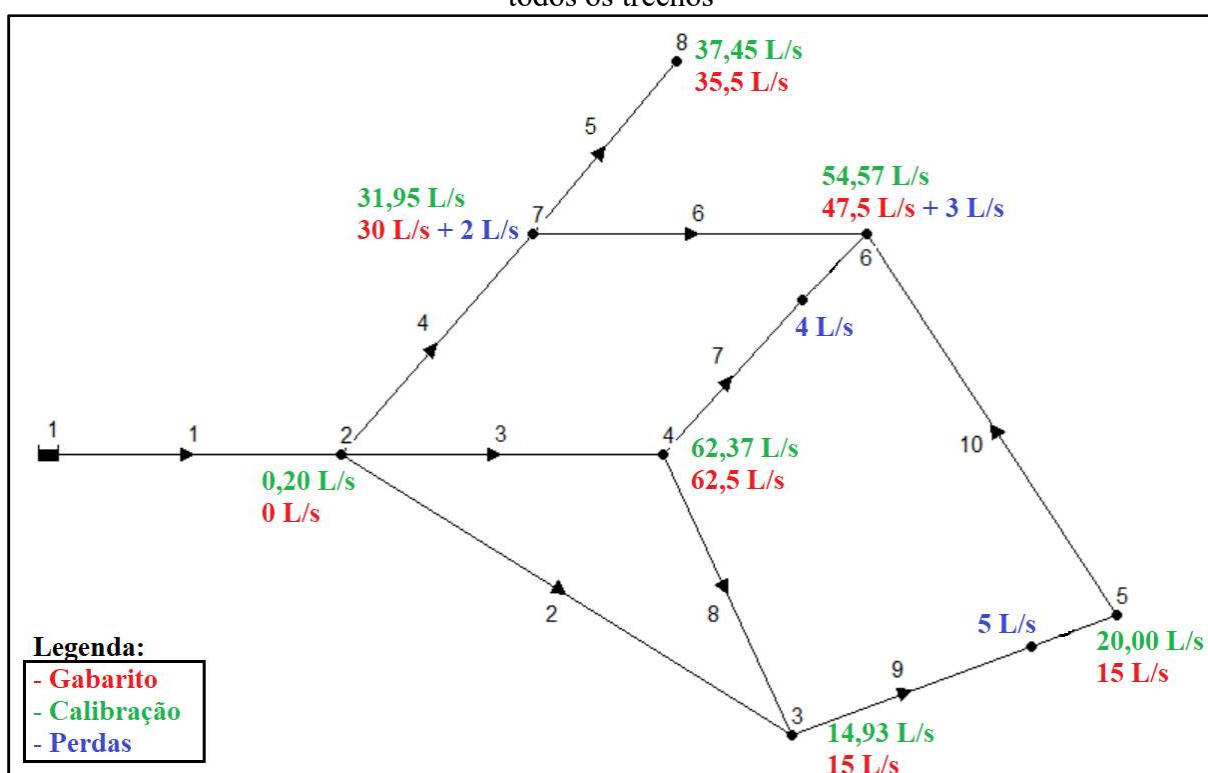
Para esta rede, o consumo total existente é de 207,5 L/s. Considerando as perdas inseridas de 14 L/s, o consumo total nos nós é de 221,5 L/s.

Considerando a calibração realizada utilizando, como dados de entrada, vazões em 3 trechos e pressões em 3 nós, a utilização do MIGHA O superou a do MIGHA C. Com o MIGHA O, as diferenças entre as pressões encontradas e as gabarito (conhecidas/medidas considerando as perdas) foram iguais a zero em 4 nós e menores que 1m nos outros 3. Para o MIGHA C, apenas 1 nó teve diferença entre as pressões iguais a zero e em 1 nó essa diferença foi maior que 1m. No caso das vazões, 3 trechos tiveram diferenças entre os valores encontrados e os gabarito maiores que 1 L/s com uso do MIGHA O e, já com uso do MIGHA C, isso só não ocorreu com 1 trecho. O consumo total encontrado após a calibração foi de 221,78 L/s com uso do MIGHA O e 221,76 L/s com uso do MIGHA C. Com isso, percebe-se que com o uso do método, para a rede Waski (1983) – Gambale (2000), também foi-se capaz de identificar a existência das perdas de água ao longo da rede de distribuição, no entanto, também houveram diferenças consideráveis entre os consumos encontrados e os consumos gabarito (conhecidos/medidos excluindo as perdas) não só em pontos importantes para encontrar os vazamentos mas, também, nos nós mais afastados dos vazamentos, ou seja, nós 2 e 8.

Considerando, como dados de entrada, apenas vazões nos trechos, os resultados encontrados apresentaram pequenas diferenças entre as pressões calculadas e as gabarito, no entanto, diferenças satisfatórias para vazões e consumos. Diferente do que aconteceu para a rede Porto (2006), para dados em todos os trechos, os resultados encontrados com uso do MIGHA O e do MIGHA C não foram iguais e, para a maioria dos casos de vazões como dados de entrada, o uso do MIGHA O se mostrou superior. Analisando os resultados encontrados com uso apenas do MIGHA O, para dados de vazão em 10, 9, 8, 7, 6 ou 5 trechos, as diferenças entre as pressões encontradas após a calibração e as pressões gabarito foram menores que 1m. Ainda considerando apenas o MIGHA O, em relação aos consumos nodais totais, os valores encontrados para dados de entrada em 10, 9, 8 e 7 trechos são valores próximos de 221,50 L/s com diferenças menores que 5 L/s. Assim, para estes casos, pode-se perceber a existência das perdas de água. Apenas para dados de vazão a partir de 6 trechos, em que o consumo nodal total encontrado foi de 203,01 L/s é que as perdas não foram identificadas. Para o uso do MIGHA C, a calibração com dados de entrada em 10 trechos gerou um consumo nodal total maior que 230 L/s.

É interessante perceber que, no caso de haver dados de vazão em todos os trechos da rede Walski (1983) – Gambale (2000), as perdas de água encontradas se localizaram em pontos da rede que tornam sua localização mais fácil. Na Figura 57 pode ser vista a comparação entre os consumos nodais da rede gabarito, juntamente com as perdas de água, e os consumos nodais encontrados após a calibração da vazão para dados de entrada de vazão em todos os trechos da rede.

Figura 57 – Comparação entre os consumos nodais da rede Walski (1983) – Gambale (2000) com perdas e os consumos encontrados para calibração da vazão com dados de vazão em todos os trechos



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Tabela 159 são apresentadas as diferenças médias entre as pressões de todos os nós e vazões de todos os trechos, além dos consumos totais em todos os nós, calculados após a calibração e seus respectivos valores gabarito para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressões e vazões ao mesmo tempo, além de apenas vazões nos trechos.

Os resultados encontrados para os casos calibrados apenas com dados de entrada de pressões nos nós da rede também foram muitos bons para as pressões calculadas, mas com diferenças razoáveis em relação ao gabarito para vazões e consumos. Assim como ocorreu na rede Porto (2006), para dados de entrada de pressão em todos os nós, os resultados encontrados com uso do MIGHA O e do MIGHA C foram iguais e, para dados em menos nós, os resultados

encontrados não foram iguais mas foram muito parecidos. Analisando os resultados encontrados com uso apenas do MIGHA O, apenas para dados de pressão em todos os nós as diferenças entre as pressões encontradas após a calibração e as pressões gabarito foram zero ou quase zero, para menos dados, aparece pelo menos um nó com diferença entre as pressões maior que 0,70m. Em relação aos consumos nodais totais, em apenas quatro casos calibrados (2 com MIGHA O e 2 com MIGHA C) usando pressões nos nós como dados de entrada, os valores encontrados não foram próximos de 221,50 L/s. Assim, para a maior parte dos casos, também pode-se perceber a existência das perdas de água.

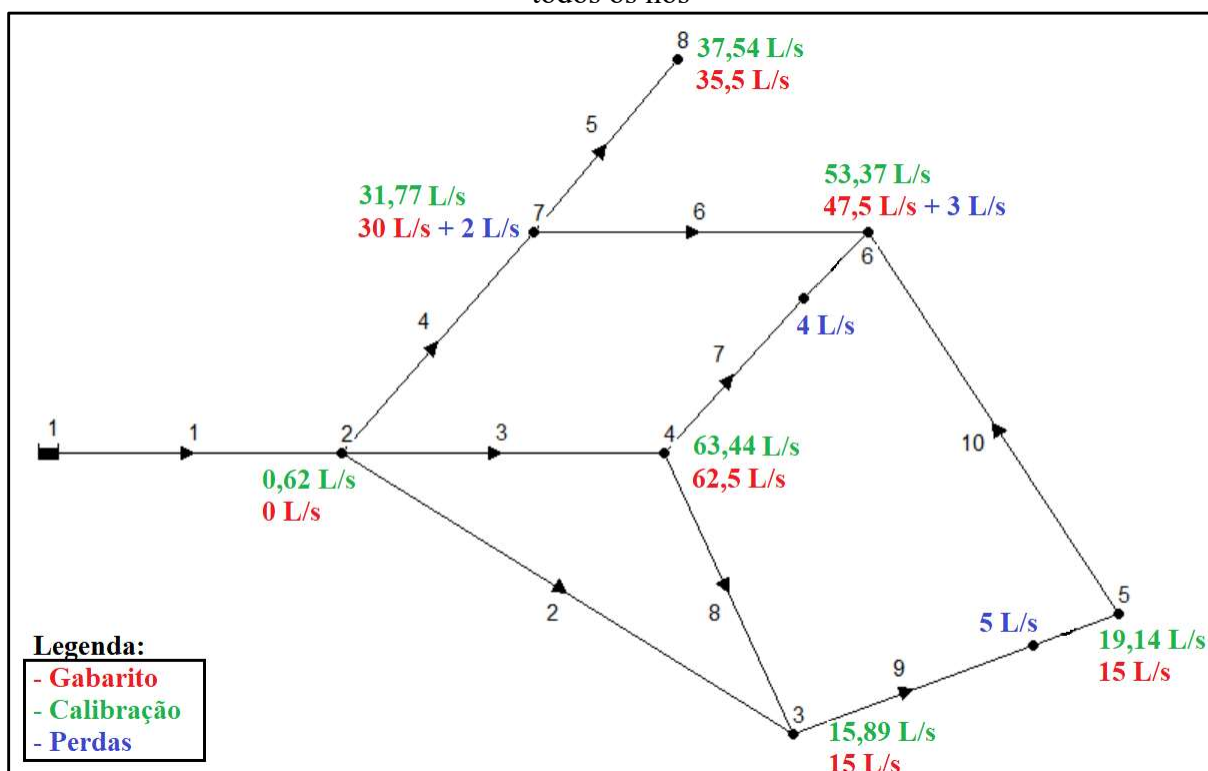
Tabela 159 – Diferenças médias entre as pressões e vazões, além dos consumos totais calculados e gabarito considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração da vazão com cálculo de perdas na rede Walski (1983) – Gambale (2000)

| Dados conhecidos: | Diferença média | | | | Valor total | |
|---------------------|-----------------|------------|-----------------|------------|--------------------------|------------|
| | Pressões (m) | | Vazões (L/s) | | Consumos nodais (L/s) | |
| | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C |
| 3 vazões e pressões | 0,21 | 0,41 | 2,06 | 3,72 | 221,78 | 221,76 |
| Vazão em 10 trechos | 0,04 | 0,24 | 0,18 | 1,89 | 221,47 | 230,34 |
| Vazão em 9 trechos | 0,04 | 0,32 | 0,29 | 4,36 | 221,60 | 223,54 |
| Vazão em 8 trechos | 0,10 | 0,54 | 1,11 | 5,21 | 224,86 | 223,55 |
| Vazão em 7 trechos | 0,19 | 0,55 | 3,68 | 6,44 | 221,61 | 223,55 |
| Vazão em 6 trechos | 0,30 | 0,63 | 5,52 | 8,09 | 203,02 | 203,01 |
| Vazão em 5 trechos | 0,34 | 0,68 | 6,36 | 8,92 | 203,01 | 203,00 |
| Vazão em 4 trechos | 0,46 | 0,71 | 2,93 | 4,68 | 221,66 | 223,54 |
| Vazão em 3 trechos | 0,49 | 0,72 | 3,58 | 4,82 | 214,86 | 218,09 |
| Vazão em 2 trechos | 0,90 | 1,05 | 8,43 | 9,88 | 203,01 | 203,00 |
| Vazão em 1 trecho | 1,19 | 1,20 | 7,79 | 7,83 | 216,29 | 219,32 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

É interessante perceber que, no caso de haver dados de pressão em todos os nós da rede Walski (1983) – Gambale (2000), as perdas de água encontradas se localizaram em pontos da rede que tornam sua localização ainda mais específica que no caso de vazões em todos os trechos. Na Figura 58 pode ser vista a comparação entre os consumos nodais da rede gabarito, juntamente com as perdas de água, e os consumos nodais encontrados após a calibração da vazão para dados de entrada de pressão em todos os nós da rede.

Figura 58 – Comparação entre os consumos nodais da rede Walski (1983) – Gambale (2000) com perdas e os consumos encontrados para calibração da vazão com dados de pressão em todos os nós



Fonte: Elaborado pelo autor

Percebe-se que a diferença entre as Figuras 57 e 58, ou seja, entre o uso de dados de vazão em todos os trechos e de pressão em todos os nós, na calibração da vazão com cálculo dos consumos nodais e identificação de perdas é que, a perda de água localizada no nó 7, nó com perdas existentes sem contato com trecho que também tem perdas, foi identificada em ambos os casos, com valores mais próximos para dados de entrada de vazão nos trechos. Ainda, apesar de isso não poder ser visto de forma clara com as perdas existentes no nó 6, acredita-se que o mesmo ocorreu. No entanto, ao considerar as perdas localizadas nos trechos 7 e 9, no caso de se utilizar vazão como entrada, a vazão perdida foi encontrada, em sua totalidade, nos nós 6 e 5, respectivamente. Já no caso da utilização de pressões nos nós como entrada na calibração, os nós de montante e de jusante dos trechos em que os vazamentos estão localizados absorveram, individualmente, parte dessa vazão.

Para este caso, diferente do que foi imposto na rede Porto (2006), os vazamentos presentes ao longo dos trechos na rede Walski (1983) – Gambale (2000) não foram situados no centro dos trechos, mas, no caso do trecho 7, a 70% da extensão do trecho de distância do nó 4 e, conseqüentemente, a 30% do nó 6. No caso do vazamento situado no trecho 9, a distância do vazamento até o nó 3 foi de 80% da extensão do trecho e, até o nó 5, 20% dessa extensão. Com

isso, considerando que quanto mais próximo de um nó, seja este de montante ou de jusante, esteja o vazamento, maior será a contribuição da vazão perdida que resulta no consumo do nó calculado após a calibração, a Equação 87 pode ser utilizada para encontrar, aproximadamente, a distância de um vazamento em relação a um nó da rede.

$$D_v = \left\{ 1 - \frac{(\text{Con}1_C - \text{Con}1_G)}{[(\text{Con}1_C - \text{Con}1_G) + (\text{Con}2_C - \text{Con}2_G)]} \right\} \times 100 \quad (87)$$

Em que D_v é a distância percentual do vazamento em relação ao nó 1 (pode ser tanto o nó de montante quanto o de jusante), $\text{Con}1_C$ é o consumo do nó 1 de um trecho calculado após a calibração, $\text{Con}1_G$ é o consumo gabarito do nó 1 de um trecho, $\text{Con}2_C$ é o consumo do nó 2 de um trecho calculado após a calibração, $\text{Con}2_G$ é o consumo gabarito do nó 2 de um trecho. É importante perceber que o numerador da citada equação representa a perda encontrada no nó 1 e o denominador a perda total encontrada no trecho.

Com uso da Equação 87 pôde-se encontrar, para o trecho 7, que o vazamento está localizado a uma distância de 86% da extensão total do trecho em relação ao nó 4 e 14% em relação ao nó 6. Já para o trecho 9, as distâncias encontradas foram de 82% da extensão do trecho em relação ao nó 3 e 18% em relação ao nó 5. No caso do último trecho, as distâncias encontradas foram bem próximas, já para o primeiro, isso não ocorreu devido à influência da perda existente no nó 6.

Infelizmente, no caso de muitos vazamentos, trechos sem perdas de água podem aparentar apresentar alguma perda, uma vez que qualquer diferença de consumo encontrada, devido a existência de perdas em nós ou trechos vizinhos ou mesmo por causa dos resultados numéricos aproximados encontrados, pode confundir a análise dos resultados e, assim, atrapalhar na localização final das perdas.

Apesar dos bons resultados na identificação e localização das perdas encontradas através do uso da metodologia proposta, é importante lembrar que este procedimento considerou os consumos em todos os nós da rede conhecidos e constantes ao longo do tempo.

Quanto à diferença em se determinar as perdas de água utilizando dados de entrada de pressão em nós próximos ou separados entre si, para os resultados de pressão, houve casos em os melhores resultados ocorrem quando se tem dados separados entre si e, em outros, para dados juntos. Já para consumos e vazões, os melhores resultados ocorrem para nós próximos entre si.

Na Tabela 160 são apresentadas as diferenças médias entre as pressões de todos os nós e vazões de todos os trechos, além dos consumos totais em todos os nós, calculados após a calibração e seus respectivos valores gabarito para as calibrações realizadas com dados de entrada de pressões nos trechos.

Tabela 160 – Diferenças médias entre as pressões e vazões, além dos consumos totais calculados e gabarito considerando dados de pressões nos nós – Calibração da vazão com cálculo de perdas na rede Walski (1983) – Gambale (2000)

| Dados conhecidos de pressão em: | Diferença média | | | | Valor total | |
|---------------------------------|-----------------|---------|--------------|---------|-----------------------|---------|
| | Pressões (m) | | Vazões (L/s) | | Consumos nodais (L/s) | |
| | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C |
| 7 nós | 0,00 | 0,00 | 0,28 | 0,28 | 221,77 | 221,77 |
| 6 nós | 0,10 | 0,11 | 3,53 | 3,52 | 221,77 | 221,77 |
| 5 nós | 0,23 | 0,32 | 4,73 | 6,43 | 221,77 | 221,77 |
| 4 nós | 0,27 | 0,36 | 5,58 | 7,27 | 221,77 | 221,77 |
| 3 nós separados | 0,46 | 0,48 | 8,35 | 8,97 | 221,77 | 221,77 |
| 3 juntos | 0,81 | 0,81 | 5,53 | 5,46 | 221,77 | 221,77 |
| 2 nós separados | 1,02 | 1,02 | 10,53 | 10,54 | 221,77 | 221,77 |
| 2 nós juntos | 0,83 | 0,85 | 7,77 | 7,88 | 243,83 | 243,82 |
| 1 nó perto do Reservatório | 1,38 | 1,38 | 11,14 | 11,14 | 221,77 | 221,77 |
| 1 nó longe do Reservatório | 1,16 | 1,16 | 12,91 | 12,94 | 196,60 | 196,60 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para calibração da vazão e cálculo das perdas na rede Walski (1983) – Gambale (2000) também foram estabelecidas um máximo de 100 iterações. A função objetivo mínima a ser alcançada foi definida com um valor de 0,000000001.

Para o uso de vazões como dados de entrada, a função objetivo foi alcançada para todos os casos calibrados com uso do MIGHA O, no entanto, em nenhuma calibração realizada com uso do MIGHA C essa função foi alcançada. Já para as calibrações realizadas com uso de pressão nos nós como dados de entrada, independentemente de se utilizar a metodologia MIGHA O ou MIGHA C, a função objetivo foi alcançada. Também é importante perceber que, tanto para a rede Porto (2006) quanto para a rede Walski (1983) – Gambale (2000), com o uso de pressões nos nós como dados de entrada na calibração da vazão a função objetivo foi alcançada com um número bem menor de iterações do que quando se usa vazões nos trechos como dados de entrada.

Nas Tabelas 161 e 162 podem ser vistos o número de iterações e o valor de função objetivo alcançados por cada caso simulado.

Tabela 161 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões e vazões simultâneas, além de apenas vazões nos trechos – Calibração da vazão e cálculo de perdas de água na rede Walski (1983) – Gambale (2000)

| Dados conhecidos: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|--------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 3 vazões e pressões | 6 | 0,0000000006 | 100 | 0,0000009160 |
| Vazão em 10 trechos | 2 | 0,0000000001 | 100 | 0,0000000586 |
| Vazão em 9 trechos | 15 | 0,0000000007 | 100 | 0,0000006948 |
| Vazão em 8 trechos | 21 | 0,0000000010 | 100 | 0,0000010969 |
| Vazão em 7 trechos | 10 | 0,0000000003 | 100 | 0,0000072029 |
| Vazão em 6 trechos | 10 | 0,0000000003 | 100 | 0,0000072029 |
| Vazão em 5 trechos | 10 | 0,0000000003 | 100 | 0,0000072029 |
| Vazão em 4 trechos | 5 | 0,0000000007 | 100 | 0,0000050154 |
| Vazão em 3 trechos | 5 | 0,0000000006 | 100 | 0,0000050154 |
| Vazão em 2 trechos | 13 | 0,0000000009 | 100 | 0,0000089044 |
| Vazão em 1 trecho | 2 | 0,0000000003 | 100 | 0,0000019107 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 162 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada considerando dados de pressões nos nós – Calibração da vazão e cálculo de perdas de água na rede Walski (1983) – Gambale (2000)

| Dados conhecidos de pressão em: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|--|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 7 nós | 3 | 0,0000000010 | 4 | 0,0000000010 |
| 6 nós | 4 | 0,0000000000 | 5 | 0,0000000001 |
| 5 nós | 4 | 0,0000000001 | 5 | 0,0000000000 |
| 4 nós | 4 | 0,0000000001 | 5 | 0,0000000000 |
| 3 nós separados | 2 | 0,0000000004 | 6 | 0,0000000003 |
| 3 juntos | 2 | 0,0000000005 | 3 | 0,0000000007 |
| 2 nós separados | 2 | 0,0000000000 | 3 | 0,0000000000 |
| 2 nós juntos | 2 | 0,0000000008 | 3 | 0,0000000004 |
| 1 nó perto do Reservatório | 1 | 0,0000000001 | 2 | 0,0000000001 |
| 1 nó longe do Reservatório | 2 | 0,0000000000 | 3 | 0,0000000001 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.4.3 Resumo dos resultados da calibração vazão e cálculo de perdas de água

Nas Tabelas 163 e 164 são apresentados o resumo dos resultados encontrados na realização das calibrações vazão com posterior cálculo das perdas de água na rede.

Tabela 163 – Resumo dos resultados da calibração da vazão com cálculo de perdas de água na rede Porto (2006) com consumo nodal inicial de 5,7 L/s

| Situação | Pressões | Vazões | Rugosidades | Geral |
|--------------------------------|---|---------|-------------|--|
| Pressões e vazões | Bom | Bom | Bom | Adequado. Perdas identificadas. |
| Vazões | Bom | Bom | Bom | Adequado. Perdas localizadas de 9 a 5 trechos. |
| Pressões | Bom | Bom | Bom | Adequado. Perdas identificadas de 7 a 4 nós. |
| Nós juntos ou separados | Separados | Juntos | Juntos | Juntos. |
| MIGHA C ou MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O. |
| Consumo inicial | Bom | Bom | Bom | Adequado. |
| Função objetivo - HW | Não atendeu 2 casos para vazões com MIGHA O e nenhum com MIGHA C. Atendeu todos os casos para pressões. | | | |
| Nº de iterações - HW | Q e QP: MIGHA O - 35,1; MIGHA C – 100 P: MIGHA O - 1; MIGHA C - 2 | | | |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 164 – Resumo dos resultados da calibração da vazão com cálculo de perdas de água na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com consumo nodal inicial de 29 L/s

| Situação | Pressões | Vazões | Rugosidades | Geral |
|--------------------------------|---|------------|-------------|---|
| Pressões e vazões | Bom | Bom | Bom | Adequado. Perdas identificadas. |
| Vazões | Bom | Bom | Bom | Adequado. Localizadas perdas de 10 a 7 trechos. |
| Pressões | Bom | Bom | Bom | Adequado. Perdas identificadas em todos os casos, exceto 2NJ e 1NL. |
| Nós juntos ou separados | Indefinido | Indefinido | Indefinido | Indefinido. |
| MIGHA C ou MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O |
| Consumo inicial | Bom | Bom | Bom | Adequado. |
| Função objetivo - DW | Atendeu todos os casos para vazões com MIGHA O e nenhum com MIGHA C. Para pressões, atendeu todos os casos. | | | |
| Nº de iterações - DW | Q e QP: MIGHA O - 9; MIGHA C – 100 P: MIGHA O - 2,6; MIGHA C - 3,9 | | | |

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.5 Calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente K_w de decaimento do cloro nas paredes da tubulação

Ao todo, foram executadas 194 calibrações para testar e analisar o novo procedimento desenvolvido para realizar a calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente K_w de decaimento do cloro nas paredes da tubulação em redes de distribuição de água. Diferente dos outros parâmetros calibrados, em que os dados de entrada utilizados eram vazões nos trechos e pressões nos nós, para a calibração deste parâmetro os dados de entrada considerados são concentrações de cloro conhecidas no nós da rede. A seguir, os resultados serão apresentados por rede calibrada para este parâmetro.

4.2.5.1 Rede Porto (2006)

Para a calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente K_w de decaimento do cloro nas paredes da tubulação na rede Porto (2006) foram realizadas 80 calibrações, sendo 40 pelo processo MIGHA C e 40 pelo MIGHA O.

O primeiro valor de K_w utilizado para testar a metodologia foi -0,1 m/dia. Ao utilizá-lo como valor inicial em todos os trechos da rede de distribuição, analisando tanto os valores encontrados de K_w nos trechos quanto as concentrações de cloro nos nós, há uma leve piora dos resultados a medida em que se vai diminuindo o número de concentrações de cloro conhecidas na rede.

No caso da utilização de dados de entrada em todos os nós da rede, a diferença entre os K_w encontrados e os valores gabarito foram menores que 0,1 m/dia em todos os trechos e, as diferenças entre as concentrações de cloro encontradas e as concentrações gabarito foram zero ou 0,01 mg/L.

Ao analisar o que acontece quando se tem dados conhecidos em nós juntos ou separados, além de, no caso de apenas 1 nó, este estar próximo ou longe do reservatório, para os dois parâmetros analisados não houve conclusão devido à localização dos nós com concentrações de cloro conhecidas. Para as concentrações de cloro nos nós da rede, os valores encontrados foram praticamente os mesmos, no entanto, no caso dos valores de K_w encontrados, para dados em 3 nós, os resultados deles separados foi melhor que juntos com uso do MIGHA O e, para o MIGHA C, o inverso ocorreu. No caso de dados em 2 nós, os melhores resultados ocorreram quando eles estão juntos entre si. Para dados em 1 nó, os melhores resultados para o coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação ocorreram

quando a concentração conhecida está próxima ao reservatório, no entanto, os melhores resultados de concentração foram encontrados quando o valor conhecido está longe do reservatório.

Para os dois parâmetros testados não houve grandes diferenças entre os resultados encontrados ao utilizar o MIGHA O ou o MIGHA C. Só houve real superioridade do MIGHA O no caso da calibração realizada com concentrações conhecidas em 5 nós e em 3 nós separados entre si ao se analisar os valores de K_W encontrados para o trecho 6 que, com o MIGHA C, o valor incoerente de -2,148 m/dia foi encontrado para os dois casos.

Na Tabela 165 são mostradas as diferenças médias entre as concentrações de cloro, de todos os nós, e os coeficientes K_W , de todos os trechos, calculados após a calibração e seus respectivos valores gabarito.

Tabela 165 – Diferenças médias entre as concentrações de cloro e os coeficientes K_W calculados e gabarito – Calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação para K_W inicial de -0,1 m/dia na rede Porto (2006)

| Dados conhecidos de concentração de cloro em: | Diferença média | | | |
|---|---------------------------|---------|-------------------------------|---------|
| | Coeficiente K_W (m/dia) | | Concentrações de cloro (mg/L) | |
| | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C |
| 7 nós | 0,04 | 0,04 | 0,00 | 0,00 |
| 6 nós | 0,10 | 0,09 | 0,05 | 0,04 |
| 5 nós | 0,22 | 0,40 | 0,10 | 0,08 |
| 4 nós | 0,28 | 0,30 | 0,12 | 0,11 |
| 3 nós separados | 0,24 | 0,44 | 0,11 | 0,12 |
| 3 juntos | 0,30 | 0,30 | 0,12 | 0,12 |
| 2 nós separados | 0,33 | 0,34 | 0,19 | 0,20 |
| 2 nós juntos | 0,27 | 0,27 | 0,19 | 0,19 |
| 1 nó perto do Reservatório | 0,29 | 0,29 | 0,32 | 0,31 |
| 1 nó longe do Reservatório | 0,31 | 0,32 | 0,26 | 0,27 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao observar a Tabela 165 pode-se perceber que com o uso da metodologia aqui proposta para calibração do coeficiente de decaimento total do cloro, no caso da rede Porto (2006) com coeficiente K_W inicial de -0,1 m/dia, de forma geral, se encontrou bons resultados de concentração de cloro. Os valores encontrados de K_W também foram bons, no entanto, alguns coeficientes encontrados se mostraram incoerentes. O provável motivo dessa incoerência é a mistura do cloro que ocorre nos nós, o que faz com que a concentração de cloro

no nó seja alcançada mesmo com um coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação diferente do gabarito.

O próximo coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação testado no processo de calibração foi de $-0,7$ m/dia. Ao utilizá-lo como valor inicial, analisando apenas as concentrações de cloro encontradas, há uma leve piora dos resultados a medida em que se vai diminuindo o número de dados conhecidos na rede. Para os coeficientes K_W calculados, no geral, isso também ocorre, entretanto, a pior média ocorreu quando se tem dados de entrada conhecidos em todos os nós da rede, devido ao coeficiente encontrado para o trecho 3 estar fora da faixa usual entre 0 e -1 m/dia.

Apesar de, no caso de haver dados de concentração de cloro em todos os 7 nós da rede Porto (2006), o K_W encontrado ter sido igual a $-21,89$ m/dia, para a mesma situação, com uso de coeficientes de decaimento do cloro nas paredes da tubulação iniciais iguais a $-0,7$ m/dia, os valores de concentrações de cloro nos nós da rede foram os mais próximos dos valores gabarito.

Quanto à posição dos dados de entrada, juntos ou separados, em nós separados foi mais comum a proximidade dos resultados com os valores gabarito e, quanto ao uso do MIGHA O ou MIGHA C, as diferenças ocorridas foram muito pequenas, não havendo superioridade de nenhum dos métodos.

Na Tabela 166 são mostradas as diferenças médias entre as concentrações de cloro, de todos os nós, e os coeficientes K_W , de todos os trechos, calculados após a calibração e seus respectivos valores gabarito.

Como pode ser visto na Tabela 166, com a calibração de K através do uso do coeficiente K_W inicial igual a $-0,7$ m/dia foram encontrados bons resultados de concentração de cloro. Os valores encontrados de K_W também foram bons, com poucos casos de coeficientes apresentando incoerência, sempre apenas no trecho 3, quando se tem dados de entrada em 7 nós, 2 nós juntos ou 1 único nó longe do reservatório. Da mesma forma que no caso anterior, o provável motivo dessa incoerência é a mistura do cloro que ocorre nos nós, o que faz com que a concentração de cloro no nó seja alcançada mesmo com um coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação diferente do gabarito.

Tabela 166 – Diferenças médias entre as concentrações de cloro e os coeficientes K_W calculados e gabarito – Calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação para K_W inicial de -0,7 m/dia na rede Porto (2006)

| Dados conhecidos de concentração de cloro em: | Diferença média | | | |
|---|---------------------------|---------|-------------------------------|---------|
| | Coeficiente K_W (m/dia) | | Concentrações de cloro (mg/L) | |
| | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C |
| 7 nós | 2,44 | 2,44 | 0,00 | 0,00 |
| 6 nós | 0,10 | 0,10 | 0,02 | 0,02 |
| 5 nós | 0,19 | 0,17 | 0,12 | 0,09 |
| 4 nós | 0,22 | 0,20 | 0,13 | 0,10 |
| 3 nós separados | 0,22 | 0,20 | 0,05 | 0,05 |
| 3 juntos | 0,23 | 0,23 | 0,14 | 0,14 |
| 2 nós separados | 0,26 | 0,24 | 0,15 | 0,16 |
| 2 nós juntos | 0,42 | 0,42 | 0,14 | 0,14 |
| 1 nó perto do Reservatório | 0,25 | 0,25 | 0,19 | 0,19 |
| 1 nó longe do Reservatório | 0,38 | 1,37 | 0,16 | 0,16 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Também foram consideradas calibrações com coeficientes K_W iniciais de -10 m/dia. Este valor está fora da faixa usual deste parâmetro, servindo, somente, para testar a metodologia proposta. Ao considerar este valor, para dados de entrada em 7 ou 6 nós, os resultados encontrados para as concentrações de cloro nos nós ainda foram muito bons, no entanto, a partir de dados em 5 nós ou menos, apareceram diferenças entre as concentrações encontradas após a calibração e as concentrações gabarito de mais de 1 mg/L em pelo menos 1 nó da rede em cada caso.

Na Tabela 167 são mostradas as diferenças médias entre as concentrações de cloro, de todos os nós, e os coeficientes K_W , de todos os trechos, calculados após a calibração e seus respectivos valores gabarito.

Como se percebe ao analisar a Tabela 167, os valores encontrados para os coeficientes de decaimento do cloro nas paredes das tubulações foram ainda piores que os de concentração de cloro. Vários coeficientes encontrados possuíam valores inferiores aos -10 m/dia. O pior deles foi para o trecho 7 no quando se tinha dados de entrada em 4 nós, nesse caso, o valor encontrado foi de -789,53 m/dia com uso do MIGHA C.

Apesar do caso citado, não se pode afirmar que o MIGHA O tenha apresentado melhores resultados que o MIGHA C pois, em outros casos, mesmo que os valores não tenham sido tão extremos, o MIGHA C se mostrou bem melhor que o MIGHA O. Assim, para este caso, não se pode chegar a uma conclusão que difira o MIGHA O e o MIGHA C. O que pode ser

concluído, no caso da rede Porto (2006), é que a utilização de um coeficiente K_W muito baixo para ser utilizado como parâmetro inicial na calibração do coeficiente de decaimento total do cloro gerou resultados ruins.

Tabela 167 – Diferenças médias entre as concentrações de cloro e os coeficientes K_W calculados e gabarito – Calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação para K_W inicial de -10 m/dia na rede Porto (2006)

| Dados conhecidos de concentração de cloro em: | Diferença média | | | |
|---|---------------------------|---------|-------------------------------|---------|
| | Coeficiente K_W (m/dia) | | Concentrações de cloro (mg/L) | |
| | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C |
| 7 nós | 0,07 | 0,07 | 0,00 | 0,00 |
| 6 nós | 2,22 | 0,12 | 0,06 | 0,02 |
| 5 nós | 3,62 | 2,90 | 0,39 | 0,33 |
| 4 nós | 7,29 | 90,38 | 0,66 | 0,62 |
| 3 nós separados | 5,69 | 4,80 | 0,73 | 0,69 |
| 3 juntos | 7,47 | 7,47 | 0,96 | 0,96 |
| 2 nós separados | 4,34 | 5,24 | 0,63 | 0,90 |
| 2 nós juntos | 8,55 | 8,55 | 0,96 | 0,96 |
| 1 nó perto do Reservatório | 7,78 | 4,19 | 0,84 | 0,75 |
| 1 nó longe do Reservatório | 8,97 | 8,57 | 0,96 | 0,96 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o uso da sub-rotina computacional para a escolha do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação inicial, analisando tanto as concentrações de cloro quanto os coeficientes K_W encontrados, há uma leve piora dos resultados a medida em que se vai diminuindo o número de dados conhecidos na rede.

Na Tabela 168 são mostradas as diferenças médias entre as concentrações de cloro, de todos os nós, e os coeficientes K_W , de todos os trechos, calculados após a calibração e seus respectivos valores gabarito.

Nesse caso, as calibrações realizadas com dados juntos entre si tiveram melhores resultados de K_W mas, no caso das concentrações de cloro, houveram casos em que os melhores resultados apareceram quando os dados de entrada estavam juntos e casos em que estavam separados. Com uso da sub-rotina computacional foi possível perceber uma grande superioridade dos resultados encontrados com uso do MIGHA O perante o MIGHA C, no entanto, para o caso de haver dados de entrada de concentração de cloro em 6 nós da rede Porto (2006), o MIGHA C se mostrou melhor que o MIGHA O.

Tabela 168 – Diferenças médias entre as concentrações de cloro e os coeficientes K_W calculados e gabarito – Calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação para K_W inicial calculado através da sub-rotina computacional na rede Porto (2006)

| Dados conhecidos de concentração de cloro em: | Diferença média | | | |
|---|---------------------------|---------|-------------------------------|---------|
| | Coeficiente K_W (m/dia) | | Concentrações de cloro (mg/L) | |
| | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C |
| 7 nós | 0,04 | 0,04 | 0,00 | 0,00 |
| 6 nós | 0,11 | 0,10 | 0,07 | 0,02 |
| 5 nós | 0,19 | 0,64 | 0,10 | 0,25 |
| 4 nós | 0,28 | 0,91 | 0,12 | 0,31 |
| 3 nós separados | 0,47 | 1,16 | 0,15 | 0,25 |
| 3 juntos | 0,30 | 1,43 | 0,12 | 0,60 |
| 2 nós separados | 0,49 | 1,49 | 0,13 | 0,56 |
| 2 nós juntos | 0,27 | 1,65 | 0,19 | 0,63 |
| 1 nó perto do Reservatório | 0,30 | 1,70 | 0,33 | 0,64 |
| 1 nó longe do Reservatório | 0,32 | 1,70 | 0,28 | 0,65 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Outra forma de analisar a eficiência dos métodos propostos para a calibração do coeficiente K de decaimento total do cloro é saber se a função objetivo foi atingida. Também é interessante conhecer o número de iterações necessárias para atingir essa função.

Para calibração deste parâmetro na rede Porto (2006) foram estabelecidas um máximo de 100 iterações e a função objetivo mínima a ser alcançada foi estabelecida com um valor de 0,000000001.

Na Tabela 169 podem ser vistos o número de iterações e o valor de função objetivo alcançados por cada caso simulado para um coeficiente K_W inicial de -0,1 m/dia.

O que pode ser visto na Tabela 169 é que, para calibrações com K_W inicial de -0,1 m/dia, apesar de a superioridade de resultados do MIGHA O ter sido pequena, a função objetivo, destes casos, foram atingidas, no entanto, nos casos em que o MIGHA C foi utilizado, a função objetivo só foi alcançada 3 vezes. Apesar disso, nos casos em que a função objetivo não foi atingida, o valor encontrado ficou próximo do mínimo estabelecido.

Tabela 169 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada – Calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação para K_W inicial de -0,1 m/dia na rede Porto (2006)

| Dados conhecidos de concentração de cloro em: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 7 nós | 7 | 0,0000000008 | 8 | 0,0000000008 |
| 6 nós | 3 | 0,0000000002 | 100 | 0,0000004310 |
| 5 nós | 3 | 0,0000000009 | 100 | 0,0000003927 |
| 4 nós | 4 | 0,0000000009 | 100 | 0,0000005488 |
| 3 nós separados | 2 | 0,0000000008 | 100 | 0,0000001755 |
| 3 juntos | 7 | 0,0000000008 | 8 | 0,0000000008 |
| 2 nós separados | 4 | 0,0000000009 | 100 | 0,0000000502 |
| 2 nós juntos | 10 | 0,0000000008 | 11 | 0,0000000008 |
| 1 nó perto do Reservatório | 1 | 0,0000000000 | 100 | 0,0000000012 |
| 1 nó longe do Reservatório | 3 | 0,0000000002 | 100 | 0,0000000558 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 170 podem ser vistos o número de iterações e o valor de função objetivo alcançados por cada caso simulado para um coeficiente K_W inicial de -0,7 m/dia.

Tabela 170 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada – Calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação para K_W inicial de -0,7 m/dia na rede Porto (2006)

| Dados conhecidos de concentração de cloro em: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 7 nós | 11 | 0,0000000008 | 12 | 0,0000000008 |
| 6 nós | 2 | 0,0000000003 | 3 | 0,0000000003 |
| 5 nós | 100 | 0,0000002236 | 100 | 0,0000002301 |
| 4 nós | 100 | 0,0000002236 | 100 | 0,0000002493 |
| 3 nós separados | 2 | 0,0000000004 | 3 | 0,0000000004 |
| 3 juntos | 100 | 0,0000003127 | 100 | 0,0000003127 |
| 2 nós separados | 100 | 0,0000002588 | 100 | 0,0000002906 |
| 2 nós juntos | 10 | 0,0000000008 | 11 | 0,0000000008 |
| 1 nó perto do Reservatório | 1 | 0,0000000006 | 2 | 0,0000000006 |
| 1 nó longe do Reservatório | 2 | 0,0000000000 | 19 | 0,0000000000 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

O que pode ser visto na Tabela 170 é que, para calibrações com K_W inicial de -0,7 m/dia, em 4 casos, tanto com uso do MIGHA O quanto com a utilização do MIGHA C, a função

objetivo não foi atingida. O fato de o mesmo número de casos não terem alcançado o valor estabelecido confirma o encontrado anteriormente para os valores de K_W nos trechos e de concentração de cloro nos nós, ou seja, para este caso, não há superioridade de resultados entre o MIGHA O e o MIGHA C. No entanto, o uso do MIGHA O apresenta a vantagem de necessitar de menos iterações.

Na Tabela 171 podem ser vistos o número de iterações e o valor de função objetivo alcançados por cada caso simulado para um coeficiente K_W inicial de -10 m/dia.

Tabela 171 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada – Calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação para K_W inicial de -10 m/dia na rede Porto (2006)

| Dados conhecidos de concentração de cloro em: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 7 nós | 9 | 0,0000000008 | 10 | 0,0000000008 |
| 6 nós | 4 | 0,0000000004 | 100 | 0,0000015952 |
| 5 nós | 100 | 0,0000158270 | 100 | 0,0000139899 |
| 4 nós | 100 | 0,0000124644 | 100 | 0,0000143212 |
| 3 nós separados | 100 | 0,0000103593 | 100 | 0,0000167736 |
| 3 juntos | 100 | 0,0000172906 | 100 | 0,0000172906 |
| 2 nós separados | 100 | 0,0000016775 | 100 | 0,0000197619 |
| 2 nós juntos | 100 | 0,0000178859 | 100 | 0,0000178859 |
| 1 nó perto do Reservatório | 3 | 0,0000000000 | 100 | 0,0000040465 |
| 1 nó longe do Reservatório | 100 | 0,0000177594 | 100 | 0,0000136227 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

O que pode ser visto na Tabela 171 é que, para calibrações com K_W inicial de -10 m/dia, com uso do MIGHA O, a função objetivo só foi atingida em 3 casos e, com uso do MIGHA C, em apenas 1.

No caso do MIGHA O, para dados de concentração de cloro em 7 ou em 6 nós da rede de distribuição, a função objetivo foi alcançada. Isso concorda com os resultados obtidos, uma vez que estes foram os únicos casos em que se obteve bons resultados.

Na Tabela 172 podem ser vistos o número de iterações e o valor de função objetivo alcançados por cada caso simulado para um coeficiente K_W inicial calculado através do uso da sub-rotina computacional.

Tabela 172 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada – Calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação para K_W inicial calculado através da sub-rotina computacional na rede Porto (2006)

| Dados conhecidos de concentração de cloro em: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 7 nós | 9 | 0,0000000008 | 9 | 0,0000000008 |
| 6 nós | 4 | 0,0000000005 | 100 | 0,0000015952 |
| 5 nós | 4 | 0,0000000004 | 100 | 0,0000071283 |
| 4 nós | 6 | 0,0000000009 | 100 | 0,0000072856 |
| 3 nós separados | 4 | 0,0000000009 | 100 | 0,0000014406 |
| 3 juntos | 8 | 0,0000000008 | 100 | 0,0000063977 |
| 2 nós separados | 6 | 0,0000000009 | 100 | 0,0000099349 |
| 2 nós juntos | 12 | 0,0000000008 | 100 | 0,0000066372 |
| 1 nó perto do Reservatório | 3 | 0,0000000002 | 100 | 0,0000020679 |
| 1 nó longe do Reservatório | 4 | 0,0000000002 | 100 | 0,0000044793 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

O que pode ser visto na Tabela 172 é que, para calibrações com K_W inicial calculados através da sub-rotina computacional desenvolvida, como esperado, devido à superioridade do MIGHA O observada com os resultados encontrados, em todos os casos calibrados com uso do MIGHA O, a função objetivo foi alcançada e, com uso do MIGHA C, apenas no caso com dados de entrada em todos os nós. Apesar de, no caso de haver dados de entrada em 6 nós da rede, o uso do MIGHA C ter apresentado melhores resultados, a função objetivo não foi alcançada.

4.2.5.2 Rede Walski (1983) – Gambale (2000)

Para a calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente K_W de decaimento do cloro nas paredes da tubulação na rede Walski (1983) – Gambale (2000) foram realizadas 80 calibrações, sendo 40 pelo processo MIGHA C e 40 pelo MIGHA O.

Assim como na rede Porto (2006), o primeiro valor de K_W utilizado para testar a metodologia na rede Walski (1983) – Gambale (2000) foi -0,1 m/dia e, ao utilizá-lo como valor inicial em todos os trechos da rede de distribuição, analisando tanto os valores encontrados de K_W nos trechos quanto as concentrações de cloro nos nós, também há uma leve piora dos

resultados a medida em que se vai diminuindo o número de concentrações de cloro conhecidas na rede.

As diferenças encontradas entre os valores de K_W calculados e os gabarito na rede Porto (2006) foram menores que as encontradas na rede Walski (1983) – Gambale (2000). Isso suporta a tese de que as grandes diferenças ocorrem devido à mistura de cloro que acontece nos nós da rede, uma vez que a primeira rede possui 2 anéis e a segunda apresenta 3, o que amplia a quantidade de trechos se encontrando e, conseqüentemente, a mistura do elemento.

Apesar de maiores diferenças para valores do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação, em relação às concentrações de cloro nos nós da rede, os resultados encontrados foram bem melhores que na primeira rede testada. Por exemplo, para dados de concentração em todos os nós da rede, tanto com o uso do MIGHA O quanto com a utilização do MIGHA C, os resultados de concentração de cloro coincidiram com os valores gabarito em todos os nós da rede.

Ao analisar o que acontece quando se tem dados conhecidos em nós juntos ou separados, além de, no caso de apenas 1 nó, este estar próximo ou longe do reservatório, para as concentrações de cloro, para dados em 3 ou 2 nós, os valores encontrados foram praticamente os mesmos, no entanto, no caso dos valores de K_W encontrados, os resultados deles juntos foram melhores que eles separados. Para dados em 1 nó, os melhores resultados para o coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação ocorreram quando a concentração conhecida está próxima ao reservatório, no entanto, os melhores resultados de concentração foram encontrados quando o valor conhecido está longe do reservatório.

Para os dois parâmetros testados não houve grandes diferenças entre os resultados encontrados ao utilizar o MIGHA O ou o MIGHA C. Na Tabela 173 são mostradas as diferenças médias entre as concentrações de cloro, de todos os nós, e os coeficientes K_W , de todos os trechos, calculados após a calibração e seus respectivos valores gabarito.

Ao observar a Tabela 173 pode-se perceber que com o uso da metodologia aqui proposta para calibração do coeficiente de decaimento total do cloro, no caso da rede Walski (1983) – Gambale (2000) com coeficiente K_W inicial de -0,1 m/dia, de forma geral, foram encontrados bons resultados de concentração de cloro. Os valores encontrados de K_W também foram bons, no entanto, alguns coeficientes encontrados se mostraram incoerentes. O provável motivo dessa incoerência é a mistura do cloro que ocorre nos nós, o que faz com que a concentração de cloro no nó seja alcançada mesmo com um coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação diferente do gabarito.

Tabela 173 – Diferenças médias entre as concentrações de cloro e os coeficientes K_W calculados e gabarito – Calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação para K_W inicial de -0,1 m/dia na rede Walski (1983) – Gambale (2000)

| Dados conhecidos de concentração de cloro em: | Diferença média | | | |
|---|---------------------------|---------|-------------------------------|---------|
| | Coeficiente K_W (m/dia) | | Concentrações de cloro (mg/L) | |
| | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C |
| 7 nós | 0,10 | 0,10 | 0,00 | 0,00 |
| 6 nós | 0,12 | 0,12 | 0,01 | 0,01 |
| 5 nós | 0,14 | 0,14 | 0,02 | 0,02 |
| 4 nós | 0,15 | 0,17 | 0,03 | 0,04 |
| 3 nós separados | 0,33 | 0,33 | 0,07 | 0,08 |
| 3 juntos | 0,21 | 0,22 | 0,07 | 0,07 |
| 2 nós separados | 0,29 | 0,30 | 0,10 | 0,10 |
| 2 nós juntos | 0,20 | 0,20 | 0,12 | 0,12 |
| 1 nó perto do Reservatório | 0,23 | 0,23 | 0,15 | 0,15 |
| 1 nó longe do Reservatório | 0,29 | 0,30 | 0,10 | 0,10 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

O próximo coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação testado no processo de calibração da rede Walski (1983) – Gambale (2000) também foi de -0,7 m/dia. Ao utilizá-lo como valor inicial, analisando tanto os coeficientes K_W calculados quanto as concentrações de cloro encontradas, há uma leve piora dos resultados a medida em que se vai diminuindo o número de dados conhecidos na rede.

No caso da rede Walski (1983) – Gambale (2000), tanto as concentrações de cloro nos nós quanto os valores dos coeficientes de decaimento de cloro nas paredes das tubulações encontrados após a calibração de K com valores iniciais de K_W iguais a -0,7 m/dia foram um pouco piores que quando a calibração foi realizada com K_W iniciais iguais a -0,1 m/dia. Apesar disso, o uso de com K_W iniciais iguais a -0,7 m/dia apresentou a vantagem de, em nenhum caso calibrado, não ter apresentado, em nenhum trecho, valores incoerentes que possam ser considerados muito distantes dos valores gabarito ou, até mesmo, de valores usuais.

Na Tabela 174 são mostradas as diferenças médias entre as concentrações de cloro, de todos os nós, e os coeficientes K_W , de todos os trechos, calculados após a calibração e seus respectivos valores gabarito.

Tabela 174 – Diferenças médias entre as concentrações de cloro e os coeficientes K_W calculados e gabarito – Calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação para K_W inicial de -0,7 m/dia na rede Walski (1983) – Gambale (2000)

| Dados conhecidos de concentração de cloro em: | Diferença média | | | |
|---|---------------------------|---------|-------------------------------|---------|
| | Coeficiente K_W (m/dia) | | Concentrações de cloro (mg/L) | |
| | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C |
| 7 nós | 0,12 | 0,12 | 0,00 | 0,00 |
| 6 nós | 0,17 | 0,17 | 0,02 | 0,02 |
| 5 nós | 0,23 | 0,23 | 0,06 | 0,06 |
| 4 nós | 0,26 | 0,26 | 0,06 | 0,07 |
| 3 nós separados | 0,30 | 0,30 | 0,12 | 0,12 |
| 3 juntos | 0,23 | 0,23 | 0,06 | 0,06 |
| 2 nós separados | 0,33 | 0,33 | 0,14 | 0,14 |
| 2 nós juntos | 0,29 | 0,29 | 0,11 | 0,11 |
| 1 nó perto do Reservatório | 0,33 | 0,33 | 0,14 | 0,14 |
| 1 nó longe do Reservatório | 0,37 | 0,37 | 0,18 | 0,18 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quanto à posição dos dados de entrada, juntos ou separados, os melhores resultados ocorreram quando os nós contendo os dados de entrada estavam localizados juntos entre si e, no caso de haver apenas um nó com concentração de cloro conhecida, os melhores resultados ocorreram quando este nó estava localizado perto do reservatório. Quanto ao uso do MIGHA O ou MIGHA C, as diferenças ocorridas foram muito pequenas, não havendo superioridade de nenhum dos métodos.

Como pode ser visto na Tabela 174, com a calibração de K através do uso do coeficiente K_W inicial igual a -0,7 m/dia foram encontrados excelentes resultados de concentração de cloro e bons valores de K_W . Da mesma forma que no caso anterior, o provável motivo de os valores de K_W encontrados com o uso do método não serem tão bons quanto os de concentração de cloro é a mistura do cloro que ocorre nos nós.

Também foram consideradas calibrações com coeficientes K_W iniciais de -10 m/dia. Ao considerar este valor, apenas para dados de entrada em todos os nós, os resultados encontrados para as concentrações de cloro nos nós ainda foram bons, no entanto, a partir de dados em 6 nós ou menos, apareceram diferenças entre as concentrações encontradas após a calibração e as concentrações gabarito de mais de 0,75 mg/L em pelo menos 1 nó da rede em cada caso.

Na Tabela 175 são mostradas as diferenças médias entre as concentrações de cloro, de todos os nós, e os coeficientes K_W , de todos os trechos, calculados após a calibração e seus respectivos valores gabarito.

Tabela 175 – Diferenças médias entre as concentrações de cloro e os coeficientes K_W calculados e gabarito – Calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação para K_W inicial de -10 m/dia na rede Walski (1983) – Gambale (2000)

| Dados conhecidos de concentração de cloro em: | Diferença média | | | |
|---|---------------------------|---------|-------------------------------|---------|
| | Coeficiente K_W (m/dia) | | Concentrações de cloro (mg/L) | |
| | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C |
| 7 nós | 0,09 | 0,09 | 0,00 | 0,00 |
| 6 nós | 2,21 | 4,39 | 0,20 | 0,22 |
| 5 nós | 2,86 | 3,75 | 0,23 | 0,22 |
| 4 nós | 3,73 | 3,92 | 0,28 | 0,25 |
| 3 nós separados | 8,54 | 8,07 | 0,71 | 0,71 |
| 3 juntos | 3,72 | 2,48 | 0,35 | 0,31 |
| 2 nós separados | 8,56 | 8,09 | 0,71 | 0,71 |
| 2 nós juntos | 5,69 | 6,60 | 0,56 | 0,79 |
| 1 nó perto do Reservatório | 8,89 | 8,32 | 0,71 | 0,71 |
| 1 nó longe do Reservatório | 9,67 | 9,67 | 0,85 | 0,85 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como se percebe ao analisar a Tabela 175, os valores encontrados para os coeficientes de decaimento do cloro nas paredes das tubulações foram ainda piores que os de concentração de cloro. Vários coeficientes encontrados possuíam valores inferiores aos -10 m/dia. O pior deles foi para o trecho 3 quando se tinha dados de entrada em 6, 5, 4, 3 nós separados e 2 nós separados, nesse caso, o valor encontrado foi de -24,679 m/dia, todos com uso do MIGHA C.

Apesar de não poder afirmar isso no caso dos resultados encontrados de concentração de cloro, para os valores de K_W encontrados, é notório a superioridade do uso do MIGHA O. O que pode ser concluído, assim como no caso da rede Porto (2006), é que, no caso da rede Walski (1983) – Gambale (2000), a utilização de um coeficiente K_W muito baixo para ser utilizado como parâmetro inicial na calibração do coeficiente de decaimento total do cloro gerou resultados ruins.

Com o uso da sub-rotina computacional para a escolha do K_W inicial, analisando tanto as concentrações de cloro quanto os coeficientes K_W encontrados, há uma leve piora dos resultados a medida em que se vai diminuindo o número de dados conhecidos na rede.

Na Tabela 176 são mostradas as diferenças médias entre as concentrações de cloro, de todos os nós, e os coeficientes K_W , de todos os trechos, calculados após a calibração e seus respectivos valores gabarito.

Tabela 176 – Diferenças médias entre as concentrações de cloro e os coeficientes K_W calculados e gabarito – Calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação para K_W inicial calculado através da sub-rotina computacional na rede Walski (1983) – Gambale (2000)

| Dados conhecidos de concentração de cloro em: | Diferença média | | | |
|---|---------------------------|---------|-------------------------------|---------|
| | Coeficiente K_W (m/dia) | | Concentrações de cloro (mg/L) | |
| | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C |
| 7 nós | 0,10 | 0,09 | 0,00 | 0,00 |
| 6 nós | 0,15 | 0,72 | 0,01 | 0,14 |
| 5 nós | 0,12 | 0,79 | 0,03 | 0,16 |
| 4 nós | 0,13 | 0,95 | 0,04 | 0,18 |
| 3 nós separados | 0,37 | 1,32 | 0,08 | 0,41 |
| 3 juntos | 0,22 | 1,06 | 0,08 | 0,24 |
| 2 nós separados | 0,31 | 1,47 | 0,11 | 0,44 |
| 2 nós juntos | 0,30 | 1,39 | 0,15 | 0,43 |
| 1 nó perto do Reservatório | 0,25 | 1,57 | 0,16 | 0,47 |
| 1 nó longe do Reservatório | 0,29 | 1,79 | 0,10 | 0,56 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesse caso, as calibrações realizadas com dados juntos entre si tiveram melhores resultados de K_W mas, no caso das concentrações de cloro, houveram casos em que os melhores resultados apareceram quando os dados de entrada estavam juntos e casos em que estavam separados. Com uso da sub-rotina computacional foi possível perceber uma grande superioridade dos resultados encontrados com uso do MIGHA O perante o MIGHA C.

Para calibração do coeficiente K de decaimento total do cloro na rede Walski (1983) – Gambale (2000) foram estabelecidas um máximo de 100 iterações e a função objetivo mínima a ser alcançada foi estabelecida com um valor de 0,000000001.

Na Tabela 177 podem ser vistos o número de iterações e o valor de função objetivo alcançados por cada caso simulado para um coeficiente K_W inicial de -0,1 m/dia.

Para calibrações com K_W inicial de -0,1 m/dia, apesar de não haver grandes diferenças entre os resultados encontrados com uso do MIGHA O ou do MIGHA C, a função objetivo não foi atingida em 2 situações com a utilização do MIGHA C, enquanto que, com uso do MIGHA O, em todos os casos a função foi alcançada. Mesmo assim, os bons resultados com

uso do MIGHA C podem ser explicados pois, nos casos em que a função objetivo não foi atingida, os valores encontrados ficaram próximos do mínimo estabelecido.

Tabela 177 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada – Calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação para K_W inicial de -0,1 m/dia na rede Walski (1983) – Gambale (2000)

| Dados conhecidos de concentração de cloro em: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 7 nós | 3 | 0,0000000003 | 4 | 0,0000000003 |
| 6 nós | 3 | 0,0000000003 | 4 | 0,0000000003 |
| 5 nós | 3 | 0,0000000003 | 4 | 0,0000000006 |
| 4 nós | 3 | 0,0000000002 | 100 | 0,0000000065 |
| 3 nós separados | 8 | 0,0000000006 | 9 | 0,0000000006 |
| 3 juntos | 3 | 0,0000000000 | 100 | 0,0000000622 |
| 2 nós separados | 8 | 0,0000000006 | 9 | 0,0000000006 |
| 2 nós juntos | 2 | 0,0000000004 | 3 | 0,0000000004 |
| 1 nó perto do Reservatório | 1 | 0,0000000000 | 1 | 0,0000000000 |
| 1 nó longe do Reservatório | 8 | 0,0000000006 | 9 | 0,0000000006 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 178 podem ser vistos o número de iterações e o valor de função objetivo alcançados por cada caso simulado para um coeficiente K_W inicial de -0,7 m/dia.

Tabela 178 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada – Calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação para K_W inicial de -0,7 m/dia na rede Walski (1983) – Gambale (2000)

| Dados conhecidos de concentração de cloro em: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 7 nós | 3 | 0,0000000007 | 4 | 0,0000000007 |
| 6 nós | 4 | 0,0000000008 | 5 | 0,0000000008 |
| 5 nós | 3 | 0,0000000005 | 4 | 0,0000000005 |
| 4 nós | 3 | 0,0000000006 | 4 | 0,0000000005 |
| 3 nós separados | 100 | 0,0000000738 | 100 | 0,0000000738 |
| 3 juntos | 3 | 0,0000000005 | 4 | 0,0000000005 |
| 2 nós separados | 100 | 0,0000000738 | 100 | 0,0000000738 |
| 2 nós juntos | 2 | 0,0000000001 | 3 | 0,0000000001 |
| 1 nó perto do Reservatório | 1 | 0,0000000002 | 2 | 0,0000000002 |
| 1 nó longe do Reservatório | 100 | 0,0000000999 | 100 | 0,0000000999 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

O que pode ser visto na Tabela 178 é que, para calibrações com K_W inicial de -0,7 m/dia, em 3 casos, tanto com uso do MIGHA O quanto com a utilização do MIGHA C, a função objetivo não foi atingida. O fato de as mesmas situações calibradas não terem alcançado o valor estabelecido confirma o encontrado anteriormente para os valores de K_W nos trechos e de concentração de cloro nos nós, ou seja, para este caso, da mesma forma que aconteceu para a rede Porto (2006), não há superioridade de resultados entre o MIGHA O e o MIGHA C. E também, o uso do MIGHA O apresenta a vantagem de necessitar de menos iterações.

Na Tabela 179 podem ser vistos o número de iterações e o valor de função objetivo alcançados por cada caso simulado para um coeficiente K_W inicial de -10 m/dia. Ao utilizar este parâmetro como valor inicial, com uso do MIGHA O, a função objetivo só foi atingida em 5 casos e, com uso do MIGHA C, em apenas 2.

Tabela 179 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada – Calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação para K_W inicial de -10 m/dia na rede Walski (1983) – Gambale (2000)

| Dados conhecidos de concentração de cloro em: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 7 nós | 4 | 0,0000000005 | 5 | 0,0000000005 |
| 6 nós | 100 | 0,0000009073 | 100 | 0,0000009236 |
| 5 nós | 5 | 0,0000000005 | 100 | 0,0000001331 |
| 4 nós | 5 | 0,0000000005 | 100 | 0,0000001656 |
| 3 nós separados | 100 | 0,0000055583 | 100 | 0,0000064924 |
| 3 juntos | 3 | 0,0000000010 | 100 | 0,0000001568 |
| 2 nós separados | 100 | 0,0000044854 | 100 | 0,0000054195 |
| 2 nós juntos | 100 | 0,0000033890 | 100 | 0,0000032452 |
| 1 nó perto do Reservatório | 3 | 0,0000000000 | 2 | 0,0000000010 |
| 1 nó longe do Reservatório | 100 | 0,0000056242 | 100 | 0,0000056242 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tanto no caso do MIGHA O quanto do MIGHA C, para dados de concentração de cloro em 7 nós da rede de distribuição, a função objetivo foi alcançada. Isso concorda com os resultados obtidos, uma vez que estes foram os únicos casos em que se obteve bons resultados. Apesar de, no caso da calibração através do MIGHA O, ao se utilizar dados de entrada em 5 ou 4 nós, a função objetivo ter sido atingida, os resultados não foram bons. O provável motivo é o valor inicial do coeficiente de decaimento de cloro nas paredes da tubulação.

Na Tabela 180 podem ser vistos o número de iterações e o valor de função objetivo alcançados por cada caso simulado para um coeficiente K_W inicial calculado através do uso da sub-rotina computacional.

Tabela 180 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada – Calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação para K_W inicial calculado através da sub-rotina computacional na rede Walski (1983) – Gambale (2000)

| Dados conhecidos de concentração de cloro em: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 7 nós | 4 | 0,0000000003 | 5 | 0,0000000006 |
| 6 nós | 4 | 0,0000000008 | 100 | 0,0000007922 |
| 5 nós | 4 | 0,0000000006 | 100 | 0,0000004841 |
| 4 nós | 4 | 0,0000000006 | 100 | 0,0000005166 |
| 3 nós separados | 10 | 0,0000000006 | 100 | 0,0000028198 |
| 3 juntos | 4 | 0,0000000002 | 100 | 0,0000001951 |
| 2 nós separados | 10 | 0,0000000006 | 100 | 0,0000024962 |
| 2 nós juntos | 12 | 0,0000000008 | 100 | 0,0000025443 |
| 1 nó perto do Reservatório | 1 | 0,0000000001 | 100 | 0,0000008585 |
| 1 nó longe do Reservatório | 9 | 0,0000000006 | 100 | 0,0000032749 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para calibrações com K_W iniciais calculados através da sub-rotina computacional desenvolvida, a notável superioridade do MIGHA O, existente nos resultados encontrados, também pode ser observada na Tabela 180. Nesse caso, em todos os casos calibrados com uso do MIGHA O, a função objetivo foi alcançada e, com uso do MIGHA C, apenas no caso com dados de entrada em todos os nós.

4.2.5.3 Rede C-Town: Battle of Calibration (2012)

Para a calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente K_W de decaimento do cloro nas paredes da tubulação na rede C-Town foram realizadas 4 calibrações, sendo 2 pelo processo MIGHA C e 2 pelo MIGHA O.

Analisando os resultados de concentração de cloro encontrados para dados de entrada de concentração em todos os nós da rede, a maior diferença entre as concentrações encontradas após o processo de calibração e as gabarito foi de 0,45 mg/L, tanto para o uso do MIGHA C quanto para o MIGHA O. Neste caso, a diferença média entre as citadas

concentrações para os 388 nós da rede de distribuição C-Town foi de 0,19 mg/L tanto para o MIGHA O quanto para o MIGHA C. Considerando os valores de K_W encontrados, o menor valor encontrado foi de -8,83 m/dia para os dois métodos. Havendo vários valores incoerentes, as diferenças médias entre os valores encontrados e os valores gabarito foram de 0,47 m/dia. Assim, apesar de bons resultados de concentração de cloro nos nós da rede de distribuição terem sido encontrados, os valores relativos ao coeficiente de decaimento de cloro nas paredes da tubulação dos trechos não foram adequados. Como no caso das redes anteriores e, nesta rede, por haver um número bem maior de anéis, devido a mistura do elemento nos nós não foi possível encontrar valores adequados de K_W , mesmo com dados de entrada de concentrações em todos os nós.

Considerando dados de entrada de concentração de cloro em 13 nós da rede de distribuição, a maior diferença entre as concentrações encontradas após o processo de calibração e as gabarito foi de 0,86 mg/L para o uso do MIGHA O, já com o uso do MIGHA C foi de 0,63 mg/L. Para o MIGHA O, a diferença média entre as citadas concentrações de cloro para os 388 nós da rede de distribuição C-Town foi de 0,39 mg/L e para o MIGHA C, 0,27 mg/L. Para os valores de K_W , o menor valor encontrado foi de -9,03 m/dia para o MIGHA O e -11,30 m/dia para o MIGHA C. Já as diferenças médias entre os valores encontrados e os gabarito foram de 0,88 m/dia e 0,52 m/dia, respectivamente. Devido à pouca quantidade de dados de entrada, os valores para as concentrações de cloro encontrados não foram bons e, os de K_W , muito piores.

Em nenhum dos casos simulados a máxima função objetivo foi atingida. Para estes casos, foram realizadas 1.000 iterações. Na Tabela 181 podem ser vistos o número de iterações e a função objetivo alcançada em cada simulação.

Tabela 181 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada – Calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação para K_W inicial de -0,7 m/dia na rede Walski (1983) – Gambale (2000)

| Dados conhecidos de concentração de cloro em: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---|--------------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| Todos os nós | 1.000 | 0,0040747920 | 1.000 | 0,0040754888 |
| 13 nós | 1.000 | 0,0140444149 | 1.000 | 0,0026660896 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.5.4 Rede MIGHA

Para a calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente K_W de decaimento do cloro nas paredes da tubulação na rede MIGHA foram realizadas 4 calibrações, sendo 2 pelo processo MIGHA C e 2 pelo MIGHA O.

Analisando os resultados para dados de entrada de concentração de cloro em todos os nós da rede, o método MIGHA O e o MIGHA C apresentaram os mesmos resultados, tanto para os trechos quanto para os nós. No caso das concentrações de cloro encontradas após a calibração, a maior diferença entre os valores encontrados após a calibração e as concentrações gabarito foi de 0,15 mg/L. Já a diferença média foi de 0,01 mg/L. Considerando os valores dos coeficientes de decaimento do cloro nas paredes das tubulações, o menor valor de K_W encontrado foi de -49,20 m/dia. Apesar desse valor extremamente fora do esperado, isso só ocorreu uma vez no trecho 338, um trecho bem central na rede, pois, o segundo menor valor foi de -3,28 m/dia. A diferença média entre os valores de K_W encontrados após a calibração e os valores gabarito foi de 0,39 m/dia, excluindo o valor excessivo essa média foi de 0,31 m/dia. Apesar dos excelentes resultados de concentração de cloro encontradas, os valores encontrados para os coeficientes de decaimento do cloro nas paredes das tubulações não foram tão bons, mostrando, novamente, a influência da mistura do cloro na calibração de K para posterior cálculo de K_W .

Considerando dados de entrada de concentração de cloro em 15 nós da rede de distribuição, a maior diferença entre as concentrações encontradas após o processo de calibração e as gabarito foi de 0,36 mg/L usando tanto o MIGHA O quanto o MIGHA C. Para o MIGHA O, a diferença média entre as citadas concentrações para os 290 nós da rede de distribuição MIGHA foi de 0,14 mg/L e para o MIGHA C foi de 0,13 mg/L. Para os coeficientes K_W , o menor valor encontrado, considerando o uso do MIGHA O, foi de -13,77 m/dia, já utilizando o MIGHA C, o valor foi de -6,78 m/dia. Já as diferenças médias entre os valores calculados após a calibração e os valores gabarito foram de 0,64 m/dia para o MIGHA O e 0,41 m/dia para o MIGHA C. Da mesma forma que ocorreu para dados de entrada em todos os nós, a entrada de um número de dados de concentração de cloro em 5% do número de nós da rede no processo de calibração gerou bons resultados de concentração, mas não de coeficientes de decaimento de cloro nas paredes da tubulação.

É interessante perceber que, nesse caso, a utilização do método MIGHA C se mostrou melhor do que utilizar o MIGHA O, uma vez que para dados de entrada em todos os nós os resultados foram iguais e para dados em 15 nós o primeiro citado se destacou. Apesar

disso, é importante saber que, no caso com menos dados de entrada, os resultados dos 2 métodos para vários nós foram iguais ou muito próximos, no entanto, o que gerou uma pior média para o MIGHA O foi que, para este, em poucos trechos, os resultados se distanciavam muito do gabarito enquanto que, para o MIGHA C, isso não acontecia tanto. Como exemplo tem-se o trecho 354 em que o valor gabarito de K_W é -0,782 m/dia e os valores encontrados com uso do MIGHA O e do MIGHA C, respectivamente, foram -9,658 m/dia e -0,942 m/dia. Nesse caso, isso deve ter ocorrido devido o valor inicial de K_W igual a -0,7 m/dia em todos os trechos da rede ter sido adequado e, no caso do MIGHA C, este valor tendeu a não se distanciar.

Apesar de excelentes resultados, em nenhum dos casos simulados a máxima função objetivo foi atingida. Para estes casos, foram realizadas 1.000 iterações. Na Tabela 182 podem ser vistos o número de iterações e a função objetivo alcançada em cada simulação.

Tabela 182 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada – Calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação para K_W inicial de -0,7 m/dia na rede MIGHA

| Dados conhecidos de concentração de cloro em: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| Todos os nós | 1.000 | 0,0010126456 | 1.000 | 0,0010126456 |
| 15 nós | 1.000 | 0,0150663935 | 1.000 | 0,0025289346 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.5.5 Rede Porto (2006) Ramificada

Para a calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente K_W de decaimento do cloro nas paredes da tubulação na rede Porto (2006) Ramificada foram realizadas 26 calibrações, sendo 13 pelo processo MIGHA C e 13 pelo MIGHA O.

No caso da utilização de dados de entrada em todos os 9 nós da rede, a diferença entre os K_W encontrados e os valores gabarito foram menores que 0,03 m/dia em todos os trechos e, as diferenças entre as concentrações de cloro encontradas e as concentrações gabarito foram zero mg/L em todos os nós. Neste caso de uma rede ramificada, ou seja, em que não há mistura de cloro nos nós da rede de distribuição, percebe-se que as concentrações de cloro nos nós coincidiram com os valores gabarito, assim como aconteceu em outros casos em redes malhadas. No entanto, diferente do que ocorreu nos casos das redes malhadas, os valores de K_W foram muito próximos dos valores gabarito, o que mostra que a mistura do elemento

químico que ocorre nos nós da rede tem grande influência na determinação do K_W através da calibração do K com uso das simulações de qualidade de água através do Epanet.

Para dados de entrada de concentração em 8 nós, apenas no resultado do nó 10 a concentração de cloro fica diferente do valor gabarito e, também, em 1 único trecho, o valor de K_W difere do resultado para dados de entrada em todos os nós, saindo de uma diferença entre o valor encontrado e o gabarito de 0,001 m/dia para 0,378 m/dia no trecho 1. Assim, a medida em que se vai diminuindo o número de concentrações de cloro conhecidas na rede, tanto nos valores encontrados de K_W dos trechos quanto nas concentrações de cloro dos nós, há uma leve piora dos resultados.

Ao analisar o que acontece quando se tem dados conhecidos em nós juntos ou separados, além de, no caso de apenas 1 nó, este estar próximo ou longe do reservatório, para os dois parâmetros analisados, tanto para o caso de se ter dados de entrada em 4, 3 ou 2 nós, os melhores resultados ocorreram quando estes estavam juntos entre si. Para dados de entrada em 1 nó, considerando apenas o MIGHA O, não houve influência se o dado estava perto ou longe do reservatório, mas, no caso do MIGHA C, os melhores resultados ocorreram quando este dado estava próximo ao reservatório.

Para os dois parâmetros testados não houve grandes diferenças entre os resultados encontrados ao utilizar o MIGHA O ou o MIGHA C. Só houve real superioridade do MIGHA O no caso da calibração realizada com concentração conhecida em 1 nó longe do reservatório em que o valor de K_W encontrado para o trecho 2, com uso do MIGHA C, pode ser considerado incoerente, sendo igual a -10,46 m/dia.

Na Tabela 183 são mostradas as diferenças médias entre as concentrações de cloro, de todos os nós, e os coeficientes K_W , de todos os trechos, calculados após a calibração e seus respectivos valores gabarito.

Ao observar a Tabela 183 percebe-se que com o uso da metodologia aqui proposta para calibração do coeficiente de decaimento total do cloro, no caso da rede Porto (2006) Ramificada com coeficiente K_W inicial de -0,7 m/dia, de forma geral, se encontrou bons resultados, tanto de concentração de cloro quanto de coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação. Por a rede ser ramificada, não houve mistura de cloro nos nós, assim, considerando apenas os casos com dados de entrada em 5 nós ou mais ou, ainda, em nós juntos entre si, mesmo quando se tem dados conhecidos em apenas 2 nós, tem-se uma diferença média entre os valores encontrados após a calibração e os valores gabarito igual ou inferior a 0,05 mg/L de concentração de cloro nos nós e a 0,19 m/dia para o coeficiente K_W nos trechos. Os valores encontrados são muito bons, considerando tão poucos dados de entrada.

Tabela 183 – Diferenças médias entre as concentrações de cloro e os coeficientes K_W calculados e gabarito – Calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação para K_W inicial de -0,7 m/dia na rede Porto (2006) Ramificada

| Dados conhecidos de concentração de cloro em: | Diferença média | | | |
|---|---------------------------|---------|-------------------------------|---------|
| | Coeficiente K_W (m/dia) | | Concentrações de cloro (mg/L) | |
| | MIGHA O | MIGHA C | MIGHA O | MIGHA C |
| 9 nós | 0,02 | 0,02 | 0,00 | 0,00 |
| 8 nós | 0,06 | 0,06 | 0,02 | 0,02 |
| 7 nós | 0,08 | 0,08 | 0,02 | 0,02 |
| 6 nós | 0,09 | 0,09 | 0,03 | 0,03 |
| 5 nós | 0,11 | 0,11 | 0,03 | 0,03 |
| 4 nós separados | 0,28 | 0,28 | 0,08 | 0,08 |
| 4 juntos | 0,12 | 0,12 | 0,04 | 0,04 |
| 3 nós separados | 0,24 | 0,22 | 0,13 | 0,12 |
| 3 juntos | 0,16 | 0,16 | 0,04 | 0,04 |
| 2 nós separados | 0,26 | 0,26 | 0,11 | 0,11 |
| 2 nós juntos | 0,19 | 0,19 | 0,05 | 0,05 |
| 1 nó perto do Reservatório | 0,22 | 0,22 | 0,12 | 0,12 |
| 1 nó longe do Reservatório | 0,23 | 1,35 | 0,12 | 0,59 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a calibração deste parâmetro na rede Porto (2006) Ramificada foram estabelecidas um máximo de 100 iterações e a função objetivo mínima a ser alcançada foi estabelecida com um valor de 0,000000001.

Na Tabela 184 podem ser vistos o número de iterações e o valor de função objetivo alcançados por cada caso simulado para um coeficiente K_W inicial de -0,7 m/dia.

Como pode ser visto na Tabela 184, apenas para a calibração de K com dados de entrada em 3 nós separados a função objetivo não foi alcançada, sendo esse, um dos casos com piores resultados. E, além de não haver grande diferenças entre os resultados, em todos os casos calibrados com uso do MIGHA O em que a função objetivo foi atingida, só foi necessária 1 única iteração a menos que quando foi utilizado o MIGHA C. Ainda, a função objetivo, quando alcançada, foi igual a zero, exceto para dados de entrada em 1 nó perto do reservatório.

Tabela 184 – Número de iterações atingido e função objetivo alcançada – Calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente de decaimento do cloro nas paredes da tubulação para K_W inicial de -0,7 m/dia na rede Porto (2006) Ramificada

| Dados conhecidos de concentração de cloro em: | MIGHA O | | MIGHA C | |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Nº de iterações | Função objetivo | Nº de iterações | Função objetivo |
| 9 nós | 8 | 0,0000000000 | 9 | 0,0000000000 |
| 8 nós | 8 | 0,0000000000 | 9 | 0,0000000000 |
| 7 nós | 5 | 0,0000000000 | 6 | 0,0000000000 |
| 6 nós | 5 | 0,0000000000 | 6 | 0,0000000000 |
| 5 nós | 4 | 0,0000000000 | 5 | 0,0000000000 |
| 4 nós separados | 5 | 0,0000000000 | 6 | 0,0000000000 |
| 4 juntos | 4 | 0,0000000000 | 5 | 0,0000000000 |
| 3 nós separados | 100 | 0,0000001880 | 100 | 0,0000001892 |
| 3 juntos | 4 | 0,0000000000 | 5 | 0,0000000000 |
| 2 nós separados | 5 | 0,0000000000 | 6 | 0,0000000000 |
| 2 nós juntos | 3 | 0,0000000000 | 4 | 0,0000000000 |
| 1 nó perto do Reservatório | 1 | 0,0000000010 | 2 | 0,0000000010 |
| 1 nó longe do Reservatório | 3 | 0,0000000000 | 4 | 0,0000000000 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.5.6 Resumo dos resultados da calibração da constante K de decaimento total do cloro e cálculo do coeficiente K_W de decaimento do cloro nas paredes da tubulação

Nas Tabelas 185 à 195 são apresentados o resumo dos resultados encontrados na realização das calibrações da constante de decaimento total do cloro.

Tabela 185 – Resumo dos resultados da calibração da constante de decaimento total do cloro na rede Porto (2006) com K_W inicial de -0,1 m/dia

| Situação | Concentrações | Kw | Geral |
|--------------------------------|---------------|-------------|--|
| Concentrações | Bom | Bom | Bons resultados. Concentrações e Kw melhoram com o aumento do número de dados. |
| Nós juntos ou separados | Indiferente | Indiferente | Indiferente. |
| MIGHA C ou MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O |
| Kw inicial | Bom | Bom | Adequado. |
| Função objetivo | - | - | Atendeu todos os casos com MIGHA O, mas só 3 com MIGHA C. |
| Nº de iterações | - | - | MIGHA O - 4,4; MIGHA C - 72,7 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 186 – Resumo dos resultados da calibração da constante de decaimento total do cloro na rede Porto (2006) com K_W inicial de -0,7 m/dia

| Situação | Concentrações | Kw | Geral |
|--------------------------------|---------------|-------------|---|
| Concentrações | Bom | Bom | Bons resultados. Concentrações e Kw melhoram com o aumento do número de dados. No entanto, para 7 nós, houve 1 Kw incoerente. |
| Nós juntos ou separados | Separados | Separados | Separados. |
| MIGHA C ou MIGHA O | Indiferente | Indiferente | Indiferente. |
| Kw inicial | Bom | Bom | Adequado. |
| Função objetivo | - | - | Atendeu 6 casos com MIGHA O e 6 com MIGHA C. |
| Nº de iterações | - | - | MIGHA O - 42,8; MIGHA C - 45 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 187 – Resumo dos resultados da calibração da constante de decaimento total do cloro na rede Porto (2006) com K_W inicial de -10 m/dia

| Situação | Concentrações | Kw | Geral |
|--------------------------------|---------------|-------------|---|
| Concentrações | Satisfatório | Ruim | Não é adequado. Bons resultados apenas para muitos dados. |
| Nós juntos ou separados | Separados | Separados | Separados. |
| MIGHA C ou MIGHA O | Indiferente | Indiferente | Indiferente. |
| Kw inicial | Ruim | Ruim | Não é adequado. |
| Função objetivo | - | - | Atendeu 3 casos com MIGHA O e só 1 com MIGHA C. |
| Nº de iterações | - | - | MIGHA O - 71,6; MIGHA C - 91 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 188 – Resumo dos resultados da calibração da constante de decaimento total do cloro na rede Porto (2006) com K_W inicial calculado através da sub-rotina computacional

| Situação | Concentrações | Kw | Geral |
|--------------------------------|---------------|---------|--|
| Concentrações | Bom | Bom | Bons resultados. Concentrações e Kw melhoram com o aumento do número de dados. |
| Nós juntos ou separados | Indiferente | Juntos | Juntos. |
| MIGHA C ou MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O |
| Kw inicial | Bom | Bom | Adequado. |
| Função objetivo | - | - | Atendeu todos os casos com MIGHA O, mas só 1 com MIGHA C. |
| Nº de iterações | - | - | MIGHA O - 6; MIGHA C - 90,9 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 189 – Resumo dos resultados da calibração da constante de decaimento total do cloro na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com K_w inicial de -0,1 m/dia

| Situação | Concentrações | Kw | Geral |
|--------------------------------|---------------|-------------|--|
| Concentrações | Bom | Bom | Bons resultados. Concentrações e Kw melhoram com o aumento do número de dados. |
| Nós juntos ou separados | Indiferente | Juntos | Juntos. |
| MIGHA C ou MIGHA O | Indiferente | Indiferente | Indiferente. |
| Kw inicial | Bom | Bom | Adequado. |
| Função objetivo | - | - | Atendeu todos os casos com MIGHA O e não atendeu 2 casos com MIGHA C. |
| Nº de iterações | - | - | MIGHA O - 4,2; MIGHA C - 24,3 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 190 – Resumo dos resultados da calibração da constante de decaimento total do cloro na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com K_w inicial de -0,7 m/dia

| Situação | Concentrações | Kw | Geral |
|--------------------------------|---------------|-------------|--|
| Concentrações | Bom | Bom | Bons resultados. Concentrações e Kw melhoram com o aumento do número de dados. |
| Nós juntos ou separados | Juntos | Juntos | Juntos. |
| MIGHA C ou MIGHA O | Indiferente | Indiferente | Indiferente. |
| Kw inicial | Bom | Bom | Adequado. |
| Função objetivo | - | - | Atendeu 7 casos com MIGHA O e 7 com MIGHA C. |
| Nº de iterações | - | - | MIGHA O - 31,9; MIGHA C - 32,6 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 191 – Resumo dos resultados da calibração da constante de decaimento total do cloro na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com K_w inicial de -10 m/dia

| Situação | Concentrações | Kw | Geral |
|--------------------------------|---------------|---------|---|
| Concentrações | Satisfatório | Ruim | Não é adequado. Bons resultados apenas para muitos dados. |
| Nós juntos ou separados | Juntos | Juntos | Juntos. |
| MIGHA C ou MIGHA O | Indiferente | MIGHA O | MIGHA O |
| Kw inicial | Ruim | Ruim | Não é adequado. |
| Função objetivo | - | - | Atendeu 5 casos com MIGHA O e só 2 com MIGHA C. |
| Nº de iterações | - | - | MIGHA O - 52; MIGHA C - 80,7 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 192 – Resumo dos resultados da calibração da constante de decaimento total do cloro na rede Walski (1983) – Gambale (2000) com K_W inicial calculado através da sub-rotina computacional

| Situação | Concentrações | Kw | Geral |
|--------------------------------|---------------|---------|--|
| Concentrações | Bom | Bom | Bons resultados. Concentrações e Kw melhoram com o aumento do número de dados. |
| Nós juntos ou separados | Indiferente | Juntos | Juntos. |
| MIGHA C ou MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O | MIGHA O |
| Kw inicial | Bom | Bom | Adequado. |
| Função objetivo | - | - | Atendeu todos os casos com MIGHA O, mas só 1 com MIGHA C. |
| Nº de iterações | - | - | MIGHA O - 6,2; MIGHA C - 90,5 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 193 – Resumo dos resultados da calibração da constante de decaimento total do cloro na rede C-Town com K_W inicial de -0,7 m/dia

| Situação | Concentrações | Kw | Geral |
|--------------------------------------|---------------|-------------|---|
| Concentrações em todos os nós | Bom | Ruim | Adequado. Boas concentrações, mas por haver muitos anéis na rede, muitos nós com mistura, houve Kw ruins. MIGHA O e MIGHA C iguais. |
| Concentrações em 13 nós | Ruim | Ruim | Não é adequado o uso de um número de dados de entrada em menos de 5% do número de nós da rede. Melhor: MIGHA C |
| MIGHA C ou MIGHA O | Indiferente | Indiferente | Indiferente. |
| Kw inicial | Bom | Bom | Adequado. |
| Função objetivo | - | - | Não atendeu em nenhum caso. A menor função objetivo foi para 13 nós e MIGHA C, seguido de dados em todos os nós. |
| Nº de iterações | - | - | 1000 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 194 – Resumo dos resultados da calibração da constante de decaimento total do cloro na rede MIGHA com K_W inicial de -0,7 m/dia

| Situação | Concentrações | Kw | Geral |
|--------------------------------------|---------------|----------|---|
| Concentrações em todos os nós | Bom | Razoável | Adequado. Boas concentrações, mas por haver muitos anéis na rede, muitos nós com mistura, houve Kw ruins. MIGHA O e MIGHA C iguais. |
| Concentrações em 15 nós | Bom | Razoável | Adequado. Boas concentrações, mas por haver muitos anéis na rede, muitos nós com mistura, houve Kw ruins. Melhor: MIGHA C |
| MIGHA C ou MIGHA O | Indiferente | MIGHA C | MIGHA C |
| Kw inicial | Bom | Bom | Adequado. |
| Função objetivo | - | - | Não atendeu em nenhum caso. A menor função objetivo foi para dados em todos os nós. |
| Nº de iterações | - | - | 1000 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 195 – Resumo dos resultados da calibração da constante de decaimento total do cloro na rede Porto (2006) Ramificada com K_W inicial de -0,7 m/dia

| Situação | Concentrações | Kw | Geral |
|--------------------------------|---------------|-------------|---|
| Concentrações | Bom | Bom | Bons resultados. Concentrações e Kw melhoram com o aumento do número de dados. Excelentes resultados de Kw e concentrações. |
| Nós juntos ou separados | Juntos | Juntos | Juntos. |
| MIGHA C ou MIGHA O | Indiferente | Indiferente | Indiferente. |
| Kw inicial | Bom | Bom | Adequado. |
| Função objetivo | - | - | Só não atendeu 1 caso com MIGHA O e 1 com MIGHA C. |
| Nº de iterações | - | - | MIGHA O - 11,9; MIGHA C - 12,8 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 Comparação entre a metodologia proposta e Algoritmos Genéticos

No caso da calibração do coeficiente C de Hazen-Williams na rede Walski (1983) – Gambale (2000), as pressões encontradas através do MIGHA, com uso da equação proposta neste trabalho, foram um pouco melhores que as pressões encontradas no trabalho de Silva (2006), com uso de Algoritmos Genéticos. Na Tabela 196 pode ser vista a comparação entre as pressões encontradas com calibrações realizadas com uso de Algoritmos Genéticos e obtidas através do MIGHA, além de seus erros relativos.

Tabela 196 – Comparação entre as pressões encontradas com calibrações realizadas com uso de Algoritmos Genéticos e obtidas através do MIGHA – Calibração do C

| Nó | Gabarito | AG | MIGHA | Erro (%) AG | Erro (%) MIGHA |
|------------------------|----------|-------|-------|-------------|----------------|
| 2 | 56,44 | 56,43 | 56,44 | 0,02 | 0,00 |
| 3 | 48,37 | 48,38 | 48,37 | 0,02 | 0,00 |
| 4 | 48,72 | 48,71 | 48,71 | 0,02 | 0,02 |
| 5 | 47,03 | 47,03 | 47,03 | 0,00 | 0,00 |
| 6 | 41,80 | 41,80 | 41,80 | 0,00 | 0,00 |
| 7 | 44,12 | 44,12 | 44,12 | 0,00 | 0,00 |
| 8 | 42,88 | 42,88 | 42,88 | 0,00 | 0,00 |
| Erro (%) médio: | | | | 0,01 | 0,00 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a calibração realizada através do MIGHA, apenas o nó 4 apresentou pressão diferente do valor gabarito, enquanto que, com uso de Algoritmos Genéticos, isso ocorreu nos nós 2, 3 e 4. Apesar disso, as diferenças encontradas em relação às pressões gabarito foram de 0,01m, ou seja, pode-se considerar que, para as pressões encontradas, a diferença foi desprezível.

A comparação entre os coeficientes de rugosidade C de Hazen-Williams encontrados com calibrações realizadas com uso de Algoritmos Genéticos e os obtidos através do MIGHA pode ser vista na Tabela 197, além de seus erros relativos.

Tabela 197 – Comparação entre os coeficientes de rugosidades C encontrados com calibrações realizadas com uso de Algoritmos Genéticos e obtidas através do MIGHA - Calibração do C

| Trecho | Gabarito | AG | MIGHA | Erro (%) AG | Erro (%) MIGHA |
|------------------------|----------|--------|--------|-------------|----------------|
| 1 | 140 | 139,65 | 139,84 | 0,25 | 0,11 |
| 2 | 110 | 112,99 | 125,44 | 2,72 | 14,04 |
| 3 | 130 | 127,96 | 128,05 | 1,57 | 1,50 |
| 4 | 135 | 137,08 | 131,79 | 1,54 | 2,37 |
| 5 | 90 | 90,03 | 89,77 | 0,03 | 0,25 |
| 6 | 110 | 124,19 | 86,56 | 12,90 | 21,31 |
| 7 | 120 | 115,59 | 122,65 | 3,68 | 2,21 |
| 8 | 115 | 101,45 | 27,46 | 11,78 | 76,12 |
| 9 | 85 | 87,18 | 97,28 | 2,56 | 14,45 |
| 10 | 80 | 90,25 | 132,14 | 12,81 | 65,17 |
| Erro (%) médio: | | | | 4,98 | 19,75 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

No caso dos coeficientes C de Hazen-Williams encontrados, o uso de Algoritmos Genéticos gerou resultados bem mais próximos dos valores gabarito do que a calibração com o MIGHA. O método proposto só apresentou resultados melhores nos trechos 1 e 7 e, além disso,

apresentou um erro médio relativo para todos os trechos bem maior que o método utilizado por Silva (2006).

Para a calibração da rugosidade absoluta através de Algoritmos Genéticos e calibração do fator de atrito com uso do MIGHA, tanto as pressões quanto as rugosidades absolutas encontradas com uso da equação proposta neste trabalho foram piores que as encontradas em Silva (2006), com uso de Algoritmos Genéticos. Na Tabela 198 pode ser vista a comparação entre as pressões encontradas com calibrações realizadas com uso de Algoritmos Genéticos e obtidas através do MIGHA, além de seus erros relativos. Já a comparação entre as rugosidades absolutas encontradas, além de seus erros relativos, pode ser vista na Tabela 199.

Tabela 198 – Comparação entre as pressões encontradas com calibrações realizadas com uso de Algoritmos Genéticos e obtidas através do MIGHA – Calibração do f

| Nó | Gabarito | AG | MIGHA | Erro (%) AG | Erro (%) MIGHA |
|------------------------|----------|-------|-------|-------------|----------------|
| 2 | 56,42 | 56,42 | 56,43 | 0,00 | 0,02 |
| 3 | 48,24 | 48,21 | 48,37 | 0,06 | 0,27 |
| 4 | 48,72 | 48,73 | 48,72 | 0,02 | 0,00 |
| 5 | 46,81 | 46,77 | 47,03 | 0,09 | 0,47 |
| 6 | 41,46 | 41,42 | 41,8 | 0,10 | 0,82 |
| 7 | 43,95 | 43,95 | 44,12 | 0,00 | 0,39 |
| 8 | 42,66 | 42,66 | 42,88 | 0,00 | 0,52 |
| Erro (%) médio: | | | | 0,04 | 0,35 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 199 – Comparação entre as rugosidades absolutas encontradas com calibrações realizadas com uso de Algoritmos Genéticos e obtidas através do MIGHA - Calibração do f

| Trecho | Gabarito | AG | MIGHA | Erro (%) AG | Erro (%) MIGHA |
|------------------------|----------|-------|-------|--------------|----------------|
| 1 | 0,09 | 0,091 | 0,088 | 1,11 | 2,51 |
| 2 | 1,2 | 1,092 | 0,483 | 9,00 | 59,74 |
| 3 | 0,2 | 0,19 | 0,221 | 5,00 | 10,62 |
| 4 | 0,12 | 0,135 | 0,150 | 12,50 | 24,93 |
| 5 | 4,8 | 4,759 | 4,253 | 0,85 | 11,39 |
| 6 | 1,2 | 2,307 | 4,372 | 92,25 | 264,35 |
| 7 | 0,5 | 0,455 | 0,346 | 9,00 | 30,83 |
| 8 | 1 | 1,424 | 7,659 | 42,40 | 665,91 |
| 9 | 6,5 | 5,614 | 2,228 | 13,63 | 65,72 |
| 10 | 7,8 | 3,717 | 0,105 | 52,35 | 98,65 |
| Erro (%) médio: | | | | 23,81 | 123,47 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Percebe-se que, apesar de as pressões encontradas com a calibração realizada através do MIGHA possuírem valores mais distantes do gabarito que as encontradas através de

Algoritmos Genéticos, exceto para o nó 4, os erros relativos calculados são menores que 1% em todos os nós, ou seja, apesar de o pior entre os testados, os resultados ainda são bons. Já no caso das rugosidades absolutas encontradas, os resultados calculados através do MIGHA não foram melhores em nenhum trecho da rede e, de forma geral, não foram bons com uso de nenhum dos dois métodos, sendo, bem pior, quando calculados através do MIGHA.

Assim, percebe-se que, apesar de gerar excelentes resultados para as pressões, o método proposto não obteve as melhores rugosidades em nenhum dos casos. No entanto, é válido considerar que o método MIGHA foi comparado com os melhores resultados obtidos por Silva (2006), dentre as várias possibilidades existentes e utilizadas em seu trabalho. Além disso, já é sabido que há uma necessidade de um elevado tempo de processamento do uso do Método de Algoritmos Genéticos e, para a calibração da rede Walski (1983) – Gambale (2000) com uso do MIGHA, tanto para o coeficiente C de Hazen-Williams quanto para o fator de atrito, o tempo de processamento foi inferior a 3 segundos, sendo necessário, para o primeiro caso, 2 iterações alcançando uma função objetivo igual a 0,0000000004 e, para o segundo, 4 iterações para chegar ao valor de função objetivo igual a 0,0000000001.

5 CONCLUSÕES

Para a calibração do coeficiente C de Hazen-Williams, tanto no caso da rede Porto (2006) quanto da rede Walski (1983) – Gambale (2000), com coeficientes C iniciais de 150, 75 ou $5 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$, o uso de vazões nos trechos como dados de entrada para o processo de calibração não apresentou bons resultados, o que significa que a utilização de vazões nos trechos como dados de entrada na calibração do coeficiente C de Hazen-Williams não é indicado. Isso também pôde ser observado ao utilizar vazões como dados de entrada nas redes de maior porte, C-Town e MIGHA. Além disso, adicionar, como dados de entrada ao processo de calibração, vazões nos trechos, junto às pressões nos nós, deixa os resultados piores do que se utilizar apenas as pressões nos mesmos nós, ou seja, o uso de vazões nos trechos como dados de entrada na calibração do coeficiente C de Hazen-Williams através do MIGHA não só gera resultados ruins, como atrapalha a calibração através do uso exclusivo de pressões conhecidas.

Da mesma forma, para a calibração do fator de atrito de Darcy-Weisbach, considerando tanto as redes Porto (2006) e Walski (1983) – Gambale (2000), com rugosidades absolutas iniciais de 0,006 mm, 0,6 mm e 6 mm, como no caso das redes de maior porte, C-Town e MIGHA, com rugosidade inicial de 0,06 mm, o uso de vazões como dados de entrada para o processo de calibração não gerou bons resultados. E, também, piora os resultados de se utilizar apenas pressões quando as vazões são incluídas.

No entanto, considerando a calibração da vazão, na rede Porto (2006), com consumos nodais iniciais de 2 L/s, 5,7 L/s e 10 L/s, o uso de vazões nos trechos como dados de entrada gerou resultados tão bons quanto os encontrados com o uso de pressões nos nós como dados de entrada, independentemente de o método de perda de carga utilizado ser o de Hazen-Williams ou o de Darcy-Weisbach. O uso simultâneo de vazões em 3 trechos e pressões em 3 nós como entrada do processo de calibração gerou, de forma geral, resultados similares ao uso de vazões em 6 trechos ou pressões em 6 nós. Isso indica que, assim como também ocorreu para a rede Walski (1983) – Gambale (2000), para a calibração da vazão, o uso de vazões nos trechos como dados de entrada melhora o processo de calibração, sendo estes utilizados isoladamente ou de forma simultânea com dados de pressão. Apesar disso, o uso de pressões nos nós como dados de entrada necessitou de menos iterações para alcançar a máxima função objetivo, no entanto, isso não significa que gere melhores resultados.

Com os resultados encontrados para a calibração da vazão na rede MIGHA é possível concluir que o uso de vazões nos trechos como dados de entrada, neste tipo de calibração, é tão importante quanto o uso de pressões nos nós e que um maior número de dados

de entrada gera melhores resultados, independente destes serem dados de vazão ou pressão, uma vez que o uso de vazões em todos os trechos gerou melhores resultados que pressões em todos os nós, já que nesta rede existem muito mais trechos do que nós.

Exclusivamente no caso da rede Walski (1983) – Gambale (2000), a calibração da vazão não gerou resultados tão bons quanto os encontrados na rede Porto (2006). Isso ocorreu por os consumos existentes nos nós desta rede de distribuição de água serem bastante diferentes entre si e, principalmente, dos valores utilizados como dados iniciais. Assim, pode-se concluir que o método proposto para o cálculo dos consumos nodais através da calibração da vazão não deve ser utilizado para a calibração de macrossistemas, ou seja, sistemas que simulam apenas o escoamento dos condutos principais de uma rede de distribuição em que, os consumos nodais, representam a vazão consumida por uma grande extensão de condutos secundários que saem do nó considerado, por não apresentar resultados muito bons, nestes casos.

A utilização da calibração da vazão para cálculo de perdas de água em redes de distribuição de água através da metodologia proposta neste trabalho se mostrou muito boa para a identificação da existência de perdas no sistema. Ainda, com o uso de dados de entrada de vazões em todos os trechos da rede foi possível obter a localização dos nós que circundam os trechos com vazamentos e, com resultados ainda melhores, com o uso de dados de entrada de pressões em todos os nós da rede de distribuição, foi possível prever a localização de um único vazamento ao longo de um trecho. No caso da existência de mais de um vazamento, a localização deste perde cada vez mais sua precisão.

No caso das redes Porto (2006) e Walski (1983) – Gambale (2000), com coeficiente C inicial de $150 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$, o uso de pressões nos nós como dados de entrada para a calibração do coeficiente C gerou excelentes resultados. Para o C inicial de $75 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$, os resultados encontrados também foram bons. Para estes casos, foi encontrado que quanto maior o número de nós com pressões conhecidas, melhor os resultados, o que também pôde ser observado para as redes C-Town e MIGHA. Já para o C inicial de $5 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$, as pressões encontradas só foram boas quando se tinham todos os nós com dados conhecidos, excetuando-se esta situação, os resultados não foram bons. Isso indica que se deve utilizar pressões conhecidas para a calibração de C , contanto que o valor inicial para o coeficiente C utilizado esteja dentro da faixa de utilização do coeficiente.

Considerando a calibração do fator de atrito usando pressões nos nós como dados de entrada, para as redes Porto (2006) e Walski (1983) – Gambale (2000), os resultados foram muito bons para rugosidades absolutas iniciais de $0,006 \text{ mm}$ e de $0,6 \text{ mm}$. Já para a rugosidade absoluta inicial de 6 mm , os resultados não foram tão bons. Para todos os casos citados, quanto

maior o número de nós com pressões conhecidas, melhor os resultados. Os resultados encontrados com a rede MIGHA para pressões nos nós como dados de entrada também foram bons e, da mesma forma que ocorreu para as outras redes, um maior número de pressões gera melhores resultados. Já para a rede C-Town, os resultados encontrados não foram bons. Isso ocorreu pois, apesar da rugosidade inicial considerada para os trechos da rede ser de 0,06 mm, as rugosidades gabarito são, em geral, bem mais elevadas do que isso, o que gerou o mesmo efeito de se utilizar a rugosidade de 6 mm nas outras redes. Assim, os métodos propostos para a calibração do fator de atrito apresentam bons resultados, no entanto, rugosidades iniciais próximas dos valores reais da rede a ser calibrada devem ser utilizadas.

Para a calibração do coeficiente K de decaimento total do cloro com posterior cálculo do coeficiente K_W de decaimento do cloro nas paredes da tubulação, tanto para a rede Porto (2006) quanto para a rede Walski (1983) – Gambale (2000), os resultados encontrados, tanto de concentração de cloro nos nós quanto de coeficientes K_W nos trechos, com o uso de um coeficiente K_W inicial, em todos os trechos das redes, igual a -0,1 m/dia ou igual a -0,7 m/dia foram bons. O mesmo não ocorreu para um K_W inicial igual a -10 m/dia, que gerou resultados muito ruins. Assim, é indicado o uso de valores iniciais dentro de uma faixa usual do parâmetro, geralmente entre 0 e -1 m/dia. Essa recomendação foi confirmada pela obtenção de ótimos resultados para as redes de maior porte C-Town e MIGHA, além da rede Porto (2006) Ramificada, todas com K_W inicial igual a -0,7 m/dia.

Ainda sobre a calibração do coeficiente K de decaimento total do cloro, esta foi realizada em 4 redes malhadas e em 1 rede ramificada. Em todos os casos foram obtidos ótimos resultados de concentrações de cloro nos nós mas, quanto aos valores de K_W encontrados nos trechos, no caso das redes malhadas, mesmo com dados de entrada em todos os nós, não foram encontrados resultados tão bons. No entanto, os valores de K_W encontrados no caso da rede ramificada foram muito bons, mesmo com poucos nós com concentrações de cloro conhecidas. Com isso, pode-se perceber que, para o cálculo de K_W através da calibração de K , a mistura do cloro, que ocorre nos nós com a simulação de qualidade da água realizada através do Epanet, é responsável pela não obtenção dos valores adequados de K_W , uma vez que, quando essa mistura não ocorre, ótimos resultados são encontrados.

Quando se trata de pressões conhecidas localizadas ao longo da rede, analisando apenas a rede Porto (2006), tanto para a calibração do C de Hazen-Williams quanto para a calibração do fator de atrito de Darcy-Weisbach, pode-se concluir que o uso de dados distribuídos ao longo da rede é melhor que utilizar medições concentradas em um único local

da rede e, em alguns casos, um menor número de dados distribuídos apresentou resultados melhores que um maior número de dados juntos entre si. No entanto, para a rede Walski (1983) – Gambale (2000), isso não foi uma regra, apesar de ocorrer para a maior parte dos casos. Para esta rede, o uso de 2 nós juntos apresentou bons resultados e, o que difere este caso dos outros é que, esses nós, estão bem centralizados na rede de distribuição. Dessa forma, pode-se concluir que a disposição dos nós é importante para a calibração do C ou do fator de atrito, dependendo do tamanho da rede, estes devem estar centralizados e dispersos.

Para a calibração do coeficiente K de decaimento total do cloro, no caso da rede Porto (2006), os melhores resultados ocorreram quando os dados conhecidos de concentração de cloro nos nós estavam separados entre si. No entanto, tanto para a rede Walski (1983) – Gambale (2000) quanto para a rede Porto (2006) Ramificada, os melhores resultados ocorreram quando os nós contendo os dados conhecidos estavam juntos entre si. É importante perceber que, em ambas as redes, quando os nós que continham os dados de entrada conhecidos estavam juntos entre si, eles também estavam centralizados na rede.

Para a calibração do coeficiente C de Hazen-Williams, no caso das redes Porto (2006) e Walski (1983) – Gambale (2000) com coeficiente C inicial de 150 ou $75 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$, considerando apenas os dados de pressões conhecidas nos nós como entrada no processo de calibração, a metodologia MIGHA O gerou melhores resultados que a metodologia MIGHA C. Isso também ocorreu para as calibrações realizadas na rede MIGHA com pressões em todos os nós e pressões em 15 nós. Já para a rede C-Town, o MIGHA O foi melhor que o MIGHA C apenas para dados de entrada de pressão em todos os nós, para dados de pressão em 13 nós, ocorreu o inverso. Isso pode ter ocorrido devido a rede C-Town apresentar vários outros elementos, como válvulas, bombas ou controles.

Considerando a calibração do fator de atrito, também no caso das redes Porto (2006) e Walski (1983) – Gambale (2000), considerando apenas os dados de pressões conhecidas nos nós como entrada no processo de calibração, a metodologia MIGHA O gerou melhores resultados que a metodologia MIGHA C. Isso também ocorreu para as calibrações realizadas na rede MIGHA com pressões em 15 nós, uma vez que para pressões em todos os nós os resultados dos dois métodos coincidiram. Para a rede C-Town, o MIGHA C foi melhor que o MIGHA O para as rugosidades encontradas com 13 dados de pressão como dados de entrada.

No caso da calibração da vazão, também no caso das redes Porto (2006) e Walski (1983) – Gambale (2000), independentemente de se utilizar dados de vazões ou/e pressões conhecidas como entrada no processo de calibração, além de Hazen-Williams ou Darcy-Weisbach para a perda de carga, a metodologia MIGHA O gerou melhores resultados que a

metodologia MIGHA C. Isso também ocorreu para as calibrações realizadas na rede MIGHA.

Já para a calibração do coeficiente K de decaimento total do cloro, no caso das redes Porto (2006), Walski (1983) – Gambale (2000) e Porto (2006) Ramificada, para valores definidos de K_W iniciais, não foi observado grandes diferenças entre os métodos MIGHA O e MIGHA C. No entanto, usando a sub-rotina computacional desenvolvida, o uso do MIGHA O gerou resultados melhores. No caso das redes C-Town e MIGHA, não houve diferença para dados em todos os nós, no entanto, para dados em poucos nós, nenhum dos 2 apresentou bons resultados, sendo que, o MIGHA C, teve uma pequena vantagem.

Em se tratando do uso da sub-rotina computacional para a calibração do coeficiente C de Hazen-Williams, no caso das redes Porto (2006) e Walski (1983) – Gambale (2000), os seus resultados foram muito bons, ficando entre os resultados obtidos com C inicial de $150 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ e C inicial de $75 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$. Assim, os melhores resultados encontrados foram com C inicial de $150 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$, seguido pelo calculado pela sub-rotina computacional, depois pela calibração com C inicial de $75 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$. O C inicial de $5 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$ não gerou bons resultados e não deve ser utilizado.

Já para a calibração do fator de atrito, em se tratando do uso da sub-rotina computacional, no caso das redes Porto (2006) e Walski (1983) – Gambale (2000), os seus resultados foram satisfatórios, no entanto, ficando entre os resultados obtidos com rugosidade absoluta inicial de 0,6 mm e ϵ inicial de 6 mm. Assim, os melhores resultados encontrados foram com rugosidade absoluta inicial de 0,006 mm, seguido pelos resultados de ϵ igual a 0,6 mm, depois pela calibração com a rugosidade calculada pela sub-rotina computacional. Nesse caso, a calibração com ϵ inicial de 6 mm não gerou bons resultados e não deve ser utilizado.

Para a calibração da vazão, em se tratando do uso da sub-rotina computacional, no caso das redes Porto (2006) e Walski (1983) – Gambale (2000), independente da equação para perda de carga utilizada, os resultados foram satisfatórios. No caso da rede Porto (2006), os melhores resultados encontrados foram com consumos nodais iniciais de 5,7 L/s, seguido pelos resultados com consumos iguais a 2 L/s, depois, com resultados iguais, pelas calibrações com consumos nodais iguais a 10 L/s e consumos nodais calculados pela sub-rotina computacional. Já para a rede Walski (1983) – Gambale (2000) os melhores resultados encontrados foram com consumos nodais iniciais de 29 L/s, seguido pelos resultados com consumos iguais a 5 L/s, depois pelas calibrações com consumos calculados pela sub-rotina computacional e, por fim, com consumos nodais iniciais de 70 L/s. Nesse caso, o uso de consumos nodais iniciais de 70 L/s não é adequado, uma vez que se distancia muito dos consumos da maioria dos nós da rede.

No caso da calibração do coeficiente K de decaimento total do cloro com posterior

cálculo do coeficiente K_W de decaimento do cloro nas paredes da tubulação, em se tratando do uso da sub-rotina computacional, no caso das redes Porto (2006) e Walski (1983) – Gambale (2000), os resultados encontrados com a utilização do método MIGHA O foram bons, já com o uso do MIGHA C isso não aconteceu. No caso da rede Porto (2006), os valores de K_W iniciais que geraram os melhores resultados diferiram de acordo com o parâmetro analisado. Considerando apenas os resultados conseguidos com uso do MIGHA O, no caso das concentrações de cloro encontradas nos nós, os melhores resultados ocorreram com uso de K_W iniciais iguais a -0,7 m/dia, seguidos pelos obtidos com K_W iniciais iguais a -0,1 m/dia, depois, pelos valores encontrados com uso da sub-rotina computacional desenvolvida e, por fim, pelos resultados encontrados com uso de K_W iniciais iguais a -10 m/dia. No caso dos valores de K_W encontrados, os melhores resultados ocorreram para K_W iniciais iguais a -0,1 m/dia, seguidos pelos encontrados com uso da sub-rotina computacional desenvolvida, depois, pelos resultados para K_W iniciais iguais a -0,7 m/dia e, por fim, com uso de K_W iniciais iguais a -10 m/dia. Já no caso da rede Walski (1983) – Gambale (2000), a ordem de melhores resultados foi a mesma, independente do parâmetro analisado. Também considerando somente os valores obtidos através do MIGHA O, para esta rede, os melhores resultados ocorreram quando foi usado um valor inicial de K_W igual a -0,1 m/dia, seguido pelos resultados obtidos com K_W inicial calculado através da sub-rotina computacional, depois, pelos resultados para K_W iniciais iguais a -0,7 m/dia e, por fim, com uso de K_W iniciais iguais a -10 m/dia. O uso de um K_W inicial igual a -10 m/dia não foi adequado em nenhuma das redes analisadas, devendo ser utilizado, valores entre zero e -1 m/dia. O uso de um valor inicial de K_W igual a -0,1 m/dia pode ser considerado o melhor, uma vez que isso ocorreu para a rede Walski (1983) – Gambale (2000) e para os valores de K_W na rede Porto (2006).

Por fim, o MIGHA foi comparado com a metodologia de Algoritmos Genéticos e, pôde-se perceber que, no caso da calibração do coeficiente C de Hazen-Williams, os melhores resultados de pressão foram obtidos através da utilização da metodologia proposta neste trabalho. Na calibração do fator de atrito, as melhores pressões foram encontradas através de Algoritmos Genéticos, no entanto, as diferenças entre as pressões calculadas através do MIGHA e as pressões observadas/gabarito foram menores que 1%, o que mostra que, apesar de não ser o melhor resultado, este também foi muito bom. Quanto as rugosidades encontradas, tanto através da calibração do C quanto da calibração do fator de atrito, os resultados foram inferiores aos de Algoritmos Genéticos, entretanto, com um tempo de processamento bem melhor. Assim, o uso do MIGHA não gera os melhores resultados, mas bons resultados em pouco tempo.

6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo (MIGHA) se mostrou eficiente e bastante adaptável à calibração aplicada para vários casos em redes de distribuição de água, apesar de o método ter sido desenvolvido para a calibração da transmissividade em escoamentos subterrâneos.

Assim, recomenda-se a adaptação do método à calibração de outros elementos de uma rede de distribuição de água, como, por exemplo, na calibração de bombas hidráulicas, elemento extremamente importante na operação das redes.

Além disso, para melhorar o modelo de calibração da constante de decaimento total do cloro e cálculo da constante de decaimento do cloro nas paredes da tubulação, recomenda-se a elaboração de um modelo de análise da qualidade da água em redes de distribuição. Dessa forma, a concentração de cloro considerada à jusante de cada nó da rede será a concentração real, e não a concentração devido à mistura do residual de cloro advindo de cada trecho que chega no nó, como ocorre com o uso do Epanet, assim, a constante de decaimento do cloro nas paredes da tubulação calibrada, para cada trecho, será mais próxima da constante real do que no modelo proposto.

Para a calibração de parâmetros hidráulicos, fator de atrito, coeficiente C e vazão, também seria interessante considerar a variação horária no consumo de água na rede. Dessa forma, os parâmetros encontrados após a calibração seriam mais próximos do real do que considerando apenas uma hora do consumo.

Por fim, recomenda-se, se possível, a realização de um modelo computacional em que se possa executar a calibração de dois ou mais parâmetros hidráulicos e/ou de qualidade de água simultaneamente.

REFERÊNCIAS

- ABDULSHAHEED, A.; MUSTAPHA, F.; GHAVAMIAN, A. A pressure-based method for monitoring leaks in a pipe distribution system: A Review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 69, p. 902-911, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.218 – Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público – Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ALEM SOBRINHO, P; MARTINS, G. **Abastecimento de Água**. In: TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de Água**. 3. ed., São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.
- AQUINO, T. S. A.; GOMES, C. C.; SOUZA FILHO, F. A.; SILVA, S. M. O. Impacto da Recuperação do Investimento em Infraestrutura Hídrica na Cobrança pelo Uso da Água. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 18, n. 1, p. 87-98, 2013.
- ARAÚJO, R. S. A.; BEZERRA, A. A. Método para diâmetro e fator de atrito: rede de distribuição. **Revista DAE**. v. 64, n. 203, p. 48-63, 2016.
- AZEVEDO NETTO, J. M. Cronologia do Abastecimento de Água (até 1970). **Revista DAE**. v. 44, n. 137, p. 106-111, 1984.
- AZEVEDO NETTO, J. M. **Manual de Hidráulica**. 8. ed., São Paulo: Blucher, 1998.
- BARBOSA, F. C.; TEIXEIRA, A. S.; GONDIM, R. S. Avaliação do Impacto da Cobrança pelo uso de Recursos Hídricos na Bacia do Baixo Jaguaribe — CE. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 12, n. 1, p. 141-151, 2007.
- BHAVE, P. R. Calibrating Water Distribution Network Models. **Journal of Environmental Engineering**. v. 114, n. 1, p. 120-136, 1988.
- BISWAS, P.; LU, C.; CLARK, R. M. A model for chlorine concentration decay in pipes. **Water Research**. v. 27, n. 12, p. 1715-1724, 1993.
- CABRERA-BÉJAR, J. A.; TZATCHKOV, V. G. Modelación de redes de distribución de agua con suministro intermitente. **Tecnología y Ciencias del Agua**. v. 3, n. 2, p. 5-25, 2012.
- CAMARGO, L. A. **Equações Explícitas para o Fator de Atrito de Darcy-Weisbach**. 2001. Disponível em: <http://hidrotec.xpg.uol.com.br/EquExpli.pdf>. Acesso em: 11/03/2017.
- CHENG, W.; HE, Z. Calibration of Nodal Demand in Water Distribution Systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**. v. 137, n. 1, p. 31-40, 2011.
- CHRISTENSEN, B. A.; LOCHER, F. A.; SWAMEE, P. K. Limitations and proper use of the Hazen-Williams equation – Discussion. **Journal of Hydraulic Engineering**. v. 126, n. 2, p. 169-170, 2000.

COLEBROOK, C. F.; WHITE, C. M. Experiments with fluid friction in roughened pipes. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences (1934-1990)**. v. 161, n. 906, p. 367-381, 1937.

COSTA, L. H. M.; CASTRO, M. A. H.; RAMOS, H. Utilização de um algoritmo genético híbrido para operação ótima de sistemas de abastecimento de água. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 15, n. 2, p. 187-196, 2010.

COSTA, M. G.; CASTRO, M. A. H. Uma interface de pré-processamento para o Epanet utilizando o AutoCAD: o programa UFC2. **Anais do VI SEREA – seminário Iberoamericano sobre sistemas de abastecimento urbano de água**. 2006.

DACACH, N. G. Modalidades de rêsdes pùblicas de água. **Revista DAE**. v. 27, n. 66, p. 10-16, 1967.

DINI, M.; TABESH, M. A New Method for Simultaneous Calibration of Demand Pattern and Hazen-Williams Coefficients in Water Distribution Systems. **Water Resources Management**. v. 28, p. 2021-2034, 2014.

FEIL, A. A.; HAETINGER, C. Previsão de consumo de água via modelagem matemática de sistema de abastecimento de água. **Revista DAE**. v. 62, n. 195, p. 32-46, 2014.

GAMBALE, S. R. **Aplicação de algoritmo genético na calibração de rede de água**. 2000. 266 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Escola Politécnic, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

GARCEZ, L. N.; AZEVEDO NETTO, J. M. Métodos novos para o estudo das rêsdes hidráulicas. **Revista DAE**. v. 9, n. 19, p. 3-18, 1947.

GOMES, H. P.; FORMIGA, K. T. M. PNL2000 – Método Prático de Dimensionamento Econômico de Redes Malhadas de Abastecimento de Água. **Revista DAE**. v. 6, n. 4, p. 91-108, 2001.

GOMES, U. A. F.; HELLER, L. Acesso à água proporcionado pelo Programa de Formação e Mobilização Social para Convivência com o Semiárido: Um Milhão de Cisternas Rurais: combate à seca ou ruptura da vulnerabilidade? **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 21, n. 3, p. 623-633, 2016.

GONÇALVES, B. B. **Detalhando a solução unidimensional do método de OQA com função coeficiente de redução constante aplicado ao transporte escalar interfacial turbulento**. 2014. 185 f. Dissertação (Mestrado em Ciências: área de concentração em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

GUMIER, C. C.; LUVIZOTTO JÚNIOR, E. Aplicação de modelo de simulação-otimização na gestão de perda de água em sistemas de abastecimento. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 12, n. 1, p. 32-41, 2007.

GUO, X.; ZHANG, C. M. Hydraulic Gradient Comparison Method to estimate aquifer hydraulic parameters under steady-state conditions. **Ground Water**. v. 38, n. 6, p. 815-826, 2000.

GUO, X.; ZHANG, C. M. Use of the physical feature of groundwater flow system to reduce the mathematical complexity in parameter identification – A practical and efficient automated procedure. **Proceedings of the 1994 Groundwater Modeling Conference**, p. 111-118, 1994.

HELLER, L. The crisis in water supply: how different it can look through the lens of the human right to water? **Cadernos de Saúde Pública**. v. 31, n. 3, p. 447-449, 2015.

HELLER, L.; PÁDUA, V. L. **Abastecimento de água para consumo humano**. v. 1, 2. ed., Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010a.

HELLER, L.; PÁDUA, V. L. **Abastecimento de água para consumo humano**. v. 2, 2. ed., Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010b.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo 2010**. Rio de Janeiro, 2010.

KUN, D.; TIAN-YU, L.; JUN-HUI, W.; JIN-SONG, G. Inversion Model of Water Distribution Systems for Nodal Demand Calibration. **Journal of Water Resources Planning and Management**. v. 141, 2015.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 2. ed., Campinas: Editora Átomo, 2008.

LIU, C. P. Limitations and Proper Use of the Hazen-Williams Equation. **Journal of hydraulic engineering**. v. 129, n. 9, p. 951-954, 1998.

MAIER, S. H.; POWELL, R. S.; WOODWARD, C. A. Calibration and comparison of chlorine decay models for a test water distribution system. **Water Research**. v. 34, n. 8, p. 2301-2309, 2000.

MARTINS, J. A.; AZZEVADO NETTO, J. M. A aplicação do método de Hardy Cross. **Revista DAE**. v. 13, n. 23, p. 17-35, 1951.

MASHFORD, J.; SILVA, D.; BURN, S.; MARNEY, D. Leak detection in simulated water pipe networks using SVM. **Applied Artificial Intelligence**. v. 26, n. 5, p. 429-444, 2012.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. Portaria 2.914, de 12 de dezembro de 2011. **Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade**. Brasília: MS, 2011.

MONTOYA, L. J.; MONTOYA R. D. Efecto de la presión sobre las fugas de agua en un sistema de tubería simple. **Revista Ingenierías Universidad de Medellín**. v. 11, n. 20, p. 77-86, 2012.

MORAIS, D. C.; CAVALCANTE, C. A. V.; ALMEIDA, A. T. Priorização de áreas de controle de perdas em redes de distribuição de água. **Pesquisa Operacional**. v. 30, n. 1, p. 15-32, 2010.

MOURA, M. A. B.; ARAÚJO, R. C. P. Custo total da água como um bem social e econômico: o caso do sistema de abastecimento do concelho da praia, ilha de Santiago-CV. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 19, n. 4, p. 34-48, 2014.

MUTIKANGA, H. E.; SHARMA, S. K.; VAIRAVAMOORTHY, K. Methods and Tools for Managing Losses in Water Distribution Systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**. v. 139, n. 2, p. 166-174, 2013.

OLIVEIRA, M. F. A “libertação” dos jegues e a questão identitária. **História Revista**. v. 12, n. 1, p. 1-13, 2007.

ORMSBEE, L. E.; LINGIREDDY, S. Calibrating Hydraulic Network Models. **Journal of the American Water Works Association**. V. 89, n. 2, p. 42-50, 1997.

ORMSBEE, L. E.; WOOD, D. J. Explicit Pipe Network Calibration. **Journal of Water Resources Planning and Management**. v. 112, n. 2, p. 116-182, 1986.

OSTFELD, A.; SALOMONS, E.; ORMSBEE, L.; UBER, J. G.; BROS, C. M.; KALUNGI, P.; BURD, R.; ZAZULA-COETZEE, B.; BELRAIN, T.; KANG, D.; LANSEY, K.; SHEN, H.; MCBEAN, E.; WU, Z. Y.; WALSKI, T.; ALVISI, S.; FRANCHINI, M.; JOHNSON, J. P.; GHIMIRE, S. R.; BARKDOLL, B. D.; KOPPEL, T.; VASSILJEV, A.; KIM, J. H.; CHUNG, G.; YOO, D. G.; DIAO, K.; ZHOU, Y.; LI, J.; LIU, Z.; CHANG, K.; GAO, J.; QU, S.; YUAN, Y.; PRASAD, T. D.; LAUCELLI, D.; LYROUDIA, L. S. V.; KAPELAN, Z.; SAVIC, D.; BERARDI, L.; BARBARO, G.; GIUSTOLISI, O.; ASADZADEH, M.; TOLSON, B. A.; MCKILLOP, R. Battle of the water calibration networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**. v. 138, n. 5, p. 523-532, 2012.

PEREIRA, R. F., CASTRO, M. A. H. Calibração do Coeficiente de Decaimento do Cloro (kw) em Redes de Abastecimento de Água Utilizando o Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo Adaptado para Gradiente de Concentração. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 18, n. 4, p. 67-76, 2013.

PETROFISA. **Tubos e conexões em PRFV DEFOFO JE – catálogo de produto: saneamento básico**. Disponível em:
http://www.petrofisa.com.br/images/tubos_saneamento.pdf. Acesso em: 27/02/2017.

PINNTO, M. R.; CASTRO, M. A. H.; BARBOSA, J. M. C.; MAIA JÚNIOR, J. V. F. Dimensionamento econômico otimizado de redes de distribuição de água considerando custos de manutenção. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 22, n. 1, p. 145-153, 2017.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. 4. ed., São Carlos: EESC/USP, 2006.

RAO, Z.; SALOMONS, E. Development of a real-time, near-optimal control process for water-distribution networks. **Journal of Hydroinformatics**. v. 9, n. 1, p. 25-37, 2007.

REZAIAN, S.; MAZLOUMI, S. H.; SADRI, S. The evaluation of pipe wall reaction coefficient effect/impact on urban water network simulation using the EPANET2 model. **Advances in Environmental Biology**. v. 7, n. 6, p. 1168-1174, 2013.

RICHTER, C. A.; AZEVEDO NETTO, J. M. **Tratamento de água: tecnologia atualizada**. São Paulo: Editora Blucher, 1991.

RIGHETTO, A. M. Calibração de modelo hidráulico de rede de distribuição de água. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 6, n. 3, p. 33-44, 2001.

ROCHA, V. A. G. M. **Avaliação de calibração de redes hidráulicas usando o Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo (MIGHA) aplicado a escoamento transiente**. 2013. 134 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil: área de concentração em Recursos Hídricos) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

ROCHA, V. A. G. M.; ARAÚJO, J. K.; CASTRO, M. A. H.; COSTA, M. G.; COSTA, L. H. M. Análise Comparativa entre RNA, AG e MIGHA na Determinação de Rugosidades Através de Calibração de Redes Hidráulicas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 18, n. 1, p. 125-134, 2013.

ROCHA, V. A. G. M.; CASTRO, M. A. H.; ARAÚJO, J. K. Calibração de Rugosidade em Redes de Abastecimento a Partir de Gradientes Hidráulicos Através de Método Iterativo. **Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. 2009.

ROSICH, A.; PUIG, V. CASILLAS, M. V. Leak localization in drinking water distribution network using structured residuals. **International Journal of Adaptive Control and Signal Processing**. v. 28, n. 8, p. 991-1007, 2015.

ROSSMAN, L. A.; CLARK, R. M.; GRAYMAN, W. M. Modeling chlorine residuals in drinking-water distribution systems. **Journal of Environmental Engineering**. v. 120, n. 4, p. 803-820, 1994.

ROSSMAN, L. A. **EPANET 2: User's Manual**. National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development of U.S. Environmental Protection Agency. Cincinnati, OH, 2000.

SAINT-GOBAIN Canalização. **Catálogo de produtos**. Disponível em: http://www.saint-gobain-canalizacao.com.br/ln_aducao_agua/. Acesso em: 27/02/2017.

SALAM, A. E. U.; TOLA, M.; SELINTUNG, M.; MARICAR, F. Application of SVM and ELM methods to predict location and magnitude leakage of pipelines on water distribution network. **International Journal of Advanced Computer Research**. v. 5, n. 19, p. 139-144, 2015.

SARBU, I. Nodal Analysis of Urban Water Distribution Networks. **Water Resources Management**. v. 28, p. 3143-3159, 2014.

SCHUSTER, H. D. M.; ARAÚJO, H. D. B. Uma Formulação Alternativa do Método Iterativo de Gradiente Hidráulico no Procedimento de Calibração dos Parâmetros

Hidrodinâmicos do Sistema Aquífero. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 9, n 2, p. 31-37, 2004.

SILVA, A. C. A. **Calibração automática de rugosidades de tubulações em sistemas de distribuição de água com aplicação de algoritmos genéticos**. 2006. 176 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: área de concentração em Recursos Hídricos) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

SILVA, F. G. B.; REIS, L. F. R.; CALIMAN, R. O.; CHAUDHRY, F. H. Calibração de um Modelo de Rede de Distribuição de Água para um Setor de Abastecimento Real Contemplando Vazamentos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 9, n. 1, p. 37-54, 2004.

SILVA, W. T. P.; SANTOS, A. A.; GOMES, L. A.; MUSIS, C. R. Quota per capita de água, fatores intervenientes e modelagem: estudo de caso para classes socioeconômicas de Cuiabá. **Sociedade & Natureza**. v. 20, n. 2, p. 219-230, 2008.

SILVA, W. T. P.; SILVA, L. M.; CHICHORRO, J. F. Gestão de recursos hídricos: perspectivas do consumo *per capita* de água em Cuiabá. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 13, n, 1, p. 8-14, 2008.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 1996**. Brasília, 1998.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 1997**. Brasília, 1998.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 1998**. Brasília, 1999.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 1999**. Brasília, 2000.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2000**. Brasília, 2001.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2001**. Brasília, 2002.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2002**. Brasília, 2004.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2003**. Brasília, 2004.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2004**. Brasília, 2005.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2005**. Brasília, 2006.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2006**. Brasília, 2007.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2007**. Brasília, 2009.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2008**. Brasília, 2010.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2009**. Brasília, 2011.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2010**. Brasília, 2012.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2011**. Brasília, 2013.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2012**. Brasília, 2014.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2013**. Brasília, 2014.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2014**. Brasília, 2016.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2015**. Brasília, 2017.

SOARES, A. K.; CHEUNG, P. B.; REIS, L. F. R.; SANDIM, M. P. Avaliação das perdas físicas de um setor da rede de abastecimento de água de Campo Grande-MS via modelo inverso. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 9, n. 4, p. 312-321, 2004.

SOARES, A. K.; REIS, L. F. R. Calibração de Modelos de Redes de Distribuição de Água Utilizando Modelo de Simulação Hidráulica Dirigido pela Pressão (MSHDP) e Método Híbrido AG-Simplex. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 9, n. 2, p. 85-96, 2004.

SOLOMATINE, D. P.; DIBIKE, Y. B.; KUKURIC, N. Automatic calibration of groundwater models using global optimization techniques. **Hydrological Sciences Journal**. v. 44, n. 6, p. 879-894, 1999.

SONNAD, J. R.; GOUDAR, C. T. Explicit Reformulation of the Colebrook-White Equation for Turbulent Flow Friction Factor Calculation. **Industrial and Engineering Chemistry Research**. v. 46, n. 8, p. 2593-2600, 2007.

SOUSA, M. C. B.; CASTRO, M. A. H.; CASTRO, D. L.; ALENCAR NETO, M. F.; LOPES, B. L. S. Modelagem do fluxo de contaminantes em aquífero freático na área do cemitério Bom Jardim, Fortaleza, CE, Brasil. **Revista Ambiente & Água**. v. 7, n. 2, p. 163-178, 2012.

SOUZA, C. D.; CASTRO, M. A. H. Simulação do fluxo hídrico subterrâneo por estimativa de parâmetros usando cargas hidráulicas observadas: caso do Cariri Cearense, Brasil. **Revista Recursos Hídricos**. v. 34, n. 1, p. 43-61, 2013.

SPILIOTIS, M.; TSAKIRIS, G. Water Distribution System Analysis: Newton-Raphson Method Revisited. **Journal of hydraulic engineering**. v. 137, n. 8, p. 852-855, 2011.

SUSE, R.; YOSHIKAWA, A. M.; LUVIZOTTO JÚNIOR, E. Simulação da qualidade de água em redes de distribuição empregando o EPANET-MSX. **Revista DAE**. v. 62, n. 197, p. 32-41, 2014.

TAVARES, P. R. L.; CASTRO, M. A. H.; SCHUSTER, H. D. M.; COSTA, C. T. F.; FRISCHKORN, H.; ALENCAR NETO, M. F. Calibração da condutividade hidráulica horizontal utilizando o método iterativo do gradiente hidráulico. **Anais do XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**. 2010.

TAYLOR, G. Dispersion of soluble matter in solvent flowing slowly through a tube. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences**. v. 219, n. 1137, p. 186-203, 1953.

TAYLOR, G. Dispersion of soluble matter in solvent flowing slowly through a tube. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences**. v. 223, n. 1155, p. 446-468, 1954.

TIGRE. **Infraestrutura água: catálogo técnico**. Disponível em: <http://www.tigre.com.br/themes/tigre2016/downloads/catalogos-tecnicos/ct-infraestrutura-agua.pdf>. Acesso em: 27/02/2017.

TODINI, E.; PILATI, S. A gradient method for the analysis of pipe networks. **International Conference on Computer Applications for Water Supply and Distribution**. 1987.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de Água**. 3. ed., São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

TZATCHKOV, V. G.; ALDAMA, A. A.; ARREGUIN, F. I. Advection-Dispersion-Reaction Modeling in Water Distribution Networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**. v. 128, n. 5, p. 334-342, 2002.

TZATCHKOV, V. G.; ALDAMA, A. A.; ARREGUÍN, F. I. Modelación numérica de la advección y dispersión de solutos en redes de distribución de agua potable. **Ingeniería Hidráulica en México**. v. 15, n. 3, p. 101-116, 2000.

TZATCHKOV, V. G. Modelo numérico del decaimiento del cloro en redes de agua potable con flujo no permanente. **Ingeniería Hidráulica en México**. v. 11, n. 3, p. 53-60, 1996.

VARGAS L.; HELLER, L. Determinants in implementing a public policy for an essential volume of free water in Bogotá and Medellín, Colômbia. **Ciência & Saúde Coletiva**. v. 21, n. 3, p. 719-730, 2016.

VASCONCELOS, G. C. M. P.; COSTA, B. C. A.; ARAÚJO, J. K. Identificação do fator de atrito em rede de distribuição de água por meio do método do transiente inverso - algoritmo genético (MTI-AG) e fórmula de Swamee. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 20, n. 4, p. 980-990, 2015.

VASSILJEV, A.; KOOR, M.; KOPPEL, T. Real-time demands and calibration of water distribution systems. **Advances in Engineering Software**. v. 89, p. 108-113, 2015.

WAGNER, D. E.; NEUPAUER, R. M.; CICHOWITZ, C. Adjoint-Based Probabilistic Source Characterization in Water-Distribution Systems with Transient Flows and Imperfect Sensors. **Journal of Water Resources Planning and Management**. v. 141, n. 9, 2015.

WALSKI, T. M. Technique for Calibrating Network Models. **Journal of Water Resources Planning and Management**. v. 109, n. 4, p. 360-372, 1983.

WOLKMER, M. F. S.; PIMMEL, N. F. Política Nacional de Recursos Hídricos: governança da água e cidadania ambiental. **Sequência : Estudos Jurídicos e Políticos**. v. 34, n. 67, p. 165-198, 2013.

YAMANAKA, V. H. A.; TZATCHKOV, V.; ORTIZ, V. B. Desagregación temporal de lecturas acumuladas de consumo de agua potable por medio de métodos estocásticos. **Interciencia**. v. 33, n. 10, p. 725-732, 2008.

YEH, H.; WEN, S.; CHANG, Y.; LU, C. A new approximate solution for chlorine concentration decay in pipes. **Water Research**. v. 42, n. 10-11, p. 2787-2795, 2008.

**APÊNDICE A – Arquivo “.inp” referente ao gabarito da rede Porto (2006) com
perdas calculadas por Darcy-Weisbach**

```

Rede_Gabarito cenário 1

[TITLE]
Gabarito D-W Rede Porto(2006).inp

[JUNCTIONS]
;ID      Elev      Demand      Pattern
1        463.2     0           ;
2        460.2     10          ;
3        458.9     8           ;
4        461.2     5           ;
5        457.7     10          ;
6        463.2     5           ;
7        459.2     2           ;

[RESERVOIRS]
;ID      Head      Pattern
R1       485.8     ;Reserv. Circular (15, 19, 19.2, 3, 94.29)

[TANKS]
;ID      Elevation  InitLevel   MinLevel    MaxLevel    Diameter    MinVol      VolCurve

[PIPES]
;ID      Node1      Node2      Length      Diameter    Roughness   MinorLoss   Status
0        R1         1          520         250         0.05       0           open ;Rede projetada
1        1         2          1850        150         0.023      0           open ;Rede projetada
2        2         3          790         125         0.1        0           open ;Rede projetada
3        3         7          700         100         0.01       0           open ;Rede projetada
4        7         4          600         100         0.012      0           open ;Rede projetada
5        4         5          980         100         0.018      0           open ;Rede projetada
6        2         5          850         100         0.024      0           open ;Rede projetada
7        5         6          650         200         0.6        0           open ;Rede projetada
8        1         6          850         200         0.07       0           open ;Rede projetada

[PUMPS]
;ID      Node1      Node2      Parameters

[VALVES]
;ID      Node1      Node2      Diameter    Type    Setting    MinorLoss

[TAGS]
LINK 0      PVC-
LINK 1      PVC-
LINK 2      PVC-
LINK 3      PVC-
LINK 4      PVC-
LINK 5      PVC-
LINK 6      PVC-
LINK 7      PVC-
LINK 8      PVC-

[DEMANDS]
;Junction  Demand      Pattern      Category

[STATUS]
;ID      Status/Setting

[PATTERNS]
;ID      Multipliers

[CURVES]

```

Rede_Gabarito cenário 1

```

;ID          X-Value    Y-Value

[CONTROLS]

[RULES]

[ENERGY]
Global Efficiency 75
Global Price      0
Demand Charge    0

[EMITTERS]
;Junction          Coefficient

[QUALITY]
;Node              InitQual

[SOURCES]
;Node              Type          Quality    Pattern

[REACTIONS]
;Type              Pipe/Tank    Coefficient
Wall               0                0
Wall               1                0
Wall               2                0
Wall               3                0
Wall               4                0
Wall               5                0
Wall               6                0
Wall               7                0
Wall               8                0

[REACTIONS]
Order Bulk         1
Order Tank         1
Order Wall         1
Global Bulk        0.01
Global Wall        0
Limiting Potential 0
Roughness Correlation 0

[MIXING]
;Tank              Model

[TIMES]
Duration           24:00
Hydraulic Timestep 1:00
Quality Timestep   0:05
Pattern Timestep   1:00
Pattern Start      0:00
Report Timestep    1:00
Report Start       0:00
Start ClockTime    12 am
Statistic          NONE

```

Rede_Gabarito cenário 1

```

[REPORT]
Status          No
Summary        No
Page           0

[OPTIONS]
Units          LPS
Headloss      D-W
Specific Gravity 1
Viscosity     1
Trials        40
Accuracy      0.001
CHECKFREQ    10
MAXCHECK     10
DAMPLIMIT    0
Unbalanced   Continue 10
Pattern       1
Demand Multiplier 1.0
Emitter Exponent 1.5
Quality       None mg/L
Diffusivity   1
Tolerance     0.01

[COORDINATES]
;Node          X-Coord          Y-Coord
1             4499226.15      9850838.80
2             4499273.70      9850838.80
3             4499326.53      9850839.07
4             4499326.53      9850794.43
5             4499273.70      9850803.94
6             4499226.42      9850811.33
7             4499326.53      9850815.82
R1            4499205.51      9850856.91

[VERTICES]
;Link          X-Coord          Y-Coord

[LABELS]
;X-Coord      Y-Coord          Label & Anchor Node

[BACKDROP]
DIMENSIONS    4498226.99      9850518.36      4500100.15      9851277.25
UNITS         Meters
FILE
OFFSET       0.00          0.00

[END]

```

**APÊNDICE B – Arquivo “.inp” referente ao gabarito da rede Porto (2006) com
perdas calculadas por Hazen-Williams**

Gabarito rede Porto

```

[TITLE]
Gabarito H-W Rede Porto(2006).inp

[JUNCTIONS]
;ID          Elev      Demand   Pattern
1            463.2     0
2            460.2     10
3            458.9     8
4            461.2     5
5            457.7     10
6            463.2     5
7            459.2     2

[RESERVOIRS]
;ID          Head      Pattern
R1           485.8     ;Reserv. Circular (15, 19, 19.2, 3, 94.29)

[TANKS]
;ID          Elevation  InitLevel  MinLevel  MaxLevel  Diameter  MinVol  VolCurve

[PIPES]
;ID          Node1      Node2      Length   Diameter  Roughness  MinorLoss  Status
0            R1         1          520      250       110        0         open ;Rede projetada
1            1         2          1850     150       122        0         open ;Rede projetada
2            2         3          790      125       105        0         open ;Rede projetada
3            3         7          700      100       133        0         open ;Rede projetada
4            7         4          600      100       130        0         open ;Rede projetada
5            4         5          980      100       129        0         open ;Rede projetada
6            2         5          850      100       121        0         open ;Rede projetada
7            5         6          650      200       83         0         open ;Rede projetada
8            1         6          850      200       107        0         open ;Rede projetada

[PUMPS]
;ID          Node1      Node2      Parameters

[VALVES]
;ID          Node1      Node2      Diameter  Type  Setting  MinorLoss

[TAGS]
LINK 0      PVC-
LINK 1      PVC-
LINK 2      PVC-
LINK 3      PVC-
LINK 4      PVC-
LINK 5      PVC-
LINK 6      PVC-
LINK 7      PVC-
LINK 8      PVC-

[DEMANDS]
;Junction   Demand   Pattern   Category

[STATUS]
;ID          Status/Setting

[PATTERNS]
;ID          Multipliers

[CURVES]

```

Gabarito rede Porto

```

;ID          X-Value    Y-Value

[CONTROLS]

[RULES]

[ENERGY]
Global Efficiency 75
Global Price      0
Demand Charge    0

[EMITTERS]
;Junction          Coefficient

[QUALITY]
;Node              InitQual
R1                  2

[SOURCES]
;Node              Type          Quality    Pattern

[REACTIONS]
;Type              Pipe/Tank    Coefficient
Wall                0            -0.44
Wall                1            -0.38
Wall                2            -0.48
Wall                3            -0.32
Wall                4            -0.41
Wall                5            -0.49
Wall                6            -0.39
Wall                7            -0.45
Wall                8            -0.41

[REACTIONS]
Order Bulk          1
Order Tank          1
Order Wall          1
Global Bulk         0.01
Global Wall         0
Limiting Potential  0
Roughness Correlation 0

[MIXING]
;Tank              Model

[TIMES]
Duration            24:00
Hydraulic Timestep 1:00
Quality Timestep   0:05
Pattern Timestep   1:00
Pattern Start      0:00
Report Timestep    1:00
Report Start       0:00

```

Gabarito rede Porto

```

Start ClockTime      12 am
Statistic            NONE

[REPORT]
Status              No
Summary             No
Page                0

[OPTIONS]
Units               LPS
Headloss            H-W
Specific Gravity    1
Viscosity           1
Trials              40
Accuracy            0.001
Unbalanced          Continue 10
Pattern             1
Demand Multiplier  1.0
Emitter Exponent    1.5
Quality             Chemical mg/L
Diffusivity         1
Tolerance           0.01

[COORDINATES]
;Node               X-Coord           Y-Coord
1                   4499226.15        9850838.80
2                   4499273.70        9850838.80
3                   4499326.53        9850839.07
4                   4499326.53        9850794.43
5                   4499273.70        9850803.94
6                   4499226.42        9850811.33
7                   4499326.53        9850815.82
R1                  4499205.51        9850856.91

[VERTICES]
;Link               X-Coord           Y-Coord

[LABELS]
;X-Coord            Y-Coord           Label & Anchor Node

[BACKDROP]
DIMENSIONS          4498226.99        9850518.36        4500100.15        9851277.25
UNITS               Meters
FILE
OFFSET              0.00              0.00

[END]

```

**APÊNDICE C – Arquivo “.inp” referente ao gabarito da rede Walski (1983) –
Gambale (2000) com perdas calculadas por Darcy-Weisbach**

```

Rede_Gabarito Cenário 1

[TITLE]
Gabarito D-W Rede Walski (1983) - Gambale (2000).inp

[JUNCTIONS]
;ID          Elev      Demand   Pattern
2           0         0
3           0         15
4           0         62.5
5           0         15
6           0         47.5
7           0         30
8           0         37.5

[RESERVOIRS]
;ID          Head      Pattern
1           60         ;Reserv. Circular (15, 19, 19.2, 3, 94.29)

[TANKS]
;ID          Elevation  InitLevel  MinLevel  MaxLevel  Diameter  MinVol  VolCurve

[PIPES]
;ID          Node1      Node2      Length    Diameter  Roughness  MinorLoss  Status
1           1         2         700       500       0.007     0         open ;Rede projetada
2           2         3         1800      250       0.015     0         open ;Rede projetada
3           2         4         1520      400       0.01      0         open ;Rede projetada
4           2         7         1220      300       0.012     0         open ;Rede projetada
5           7         8         600       300       0.7       0         open ;Rede projetada
6           7         6         1220      200       0.1       0         open ;Rede projetada
7           4         6         920       250       0.08      0         open ;Rede projetada
8           4         3         300       150       0.06      0         open ;Rede projetada
9           5         3         600       200       0.9       0         open ;Rede projetada
10          6         5         1220      100       1         0         open ;Rede projetada

[PUMPS]
;ID          Node1      Node2      Parameters

[VALVES]
;ID          Node1      Node2      Diameter  Type  Setting  MinorLoss

[TAGS]
LINK 1      PVC-
LINK 2      PVC-
LINK 3      PVC-
LINK 4      PVC-
LINK 5      PVC-
LINK 6      PVC-
LINK 7      PVC-
LINK 8      PVC-
LINK 9      PVC-
LINK 10     PVC-

[DEMANDS]
;Junction   Demand   Pattern   Category

[STATUS]
;ID          Status/Setting

[PATTERNS]
;ID          Multipliers

```

Rede_Gabarito Cenário 1

```

[CURVES]
;ID          X-Value    Y-Value

[CONTROLS]

[RULES]

[ENERGY]
Global Efficiency 75
Global Price      0
Demand Charge    0

[EMITTERS]
;Junction        Coefficient

[QUALITY]
;Node            InitQual
1                2

[SOURCES]
;Node            Type        Quality    Pattern

[REACTIONS]
;Type            Pipe/Tank    Coefficient
Wall             1            -0.21
Wall             2            -0.43
Wall             3            -0.27
Wall             4            -0.54
Wall             5            -0.3
Wall             6            -0.25
Wall             7            -0.19
Wall             8            -0.19
Wall             9            -0.61
Wall             10           -0.33

[REACTIONS]
Order Bulk       1
Order Tank       1
Order Wall       1
Global Bulk      0.01
Global Wall      0
Limiting Potential 0
Roughness Correlation 0

[MIXING]
;Tank            Model

[TIMES]
Duration         24:00
Hydraulic Timestep 1:00
Quality Timestep 0:05
Pattern Timestep 1:00

```

Rede_Gabarito Cenário 1

Pattern Start 0:00
 Report Timestep 1:00
 Report Start 0:00
 Start ClockTime 12 am
 Statistic NONE

[REPORT]
 Status No
 Summary No
 Page 0

[OPTIONS]
 Units LPS
 Headloss D-W
 Specific Gravity 1
 Viscosity 1
 Trials 40
 Accuracy 0.001
 CHECKFREQ 10
 MAXCHECK 10
 DAMPLIMIT 0
 Unbalanced Continue 10
 Pattern 1
 Demand Multiplier 1.0
 Emitter Exponent 1.5
 Quality Chemical mg/L
 Diffusivity 1
 Tolerance 0.01

[COORDINATES]
 ;Node X-Coord Y-Coord
 2 4499213.57 9850838.76
 3 4499274.59 9850800.86
 4 4499257.12 9850838.76
 5 4499318.64 9850817.10
 6 4499284.68 9850868.53
 7 4499239.41 9850868.53
 8 4499258.85 9850891.90
 1 4499173.71 9850838.76

[VERTICES]
 ;Link X-Coord Y-Coord

[LABELS]
 ;X-Coord Y-Coord Label & Anchor Node

[BACKDROP]
 DIMENSIONS 4498226.99 9850518.36 4500100.15 9851277.25
 UNITS Meters
 FILE
 OFFSET 0.00 0.00

[END]

**APÊNDICE D – Arquivo “.inp” referente ao gabarito da rede Walski (1983) –
Gambale (2000) com perdas calculadas por Hazen-Williams**

Rede_Gabarito Cenário 1

```
[TITLE]
Gabarito H-W Rede Walski (1983) - Gambale (2000).inp

[JUNCTIONS]
;ID      Elev      Demand      Pattern
2        0         0           ;
3        0         15          ;
4        0         62.5        ;
5        0         15          ;
6        0         47.5        ;
7        0         30          ;
8        0         37.5        ;

[RESERVOIRS]
;ID      Head      Pattern
1        60         ;Reserv. Circular (15, 19, 19.2, 3, 94.29)

[TANKS]
;ID      Elevation  InitLevel  MinLevel  MaxLevel  Diameter  MinVol  VolCurve

[PIPES]
;ID      Node1      Node2      Length    Diameter  Roughness  MinorLoss  Status
1        1         2         700       500       140        0          open ;Rede projetada
2        2         3         1800      250       110        0          open ;Rede projetada
3        3         4         1520      400       130        0          open ;Rede projetada
4        2         7         1220      300       135        0          Open ;Rede projetada
5        7         8         600       300       90         0          Open ;Rede projetada
6        7         6         1220      200       110        0          Open ;Rede projetada
7        4         6         920       250       120        0          open ;Rede projetada
8        4         3         300       150       115        0          open ;Rede projetada
9        5         3         600       200       85         0          open ;Rede projetada
10       6         5         1220      100       80         0          open ;Rede projetada

[PUMPS]
;ID      Node1      Node2      Parameters

[VALVES]
;ID      Node1      Node2      Diameter  Type  Setting  MinorLoss

[TAGS]
LINK 1    PVC-
LINK 3    PVC-
LINK 4    PVC-
LINK 5    PVC-
LINK 6    PVC-
LINK 7    PVC-
LINK 10   PVC-
LINK 8    PVC-
LINK 9    PVC-
LINK 2    PVC-

[DEMANDS]
;Junction Demand      Pattern      Category

[STATUS]
;ID      Status/Setting

[PATTERNS]
;ID      Multipliers
```

Rede_Gabarito Cenário 1

```

[CURVES]
;ID          X-Value    Y-Value

[CONTROLS]

[RULES]

[ENERGY]
Global Efficiency  75
Global Price      0
Demand Charge     0

[EMITTERS]
;Junction          Coefficient

[QUALITY]
;Node              InitQual

[SOURCES]
;Node              Type          Quality    Pattern

[REACTIONS]
;Type              Pipe/Tank    Coefficient
Wall               1              0
Wall               3              0
Wall               4              0
Wall               5              0
Wall               6              0
Wall               7              0
Wall               10             0
Wall               8              0
Wall               9              0
Wall               2              0

[REACTIONS]
Order Bulk         1
Order Tank         1
Order Wall         1
Global Bulk        0.01
Global Wall        0
Limiting Potential 0
Roughness Correlation 0

[MIXING]
;Tank             Model

[TIMES]
Duration           24:00
Hydraulic Timestep 1:00
Quality Timestep   0:05
Pattern Timestep   1:00
Pattern Start      0:00
Report Timestep    1:00
Report Start       0:00
Start ClockTime    12 am
Statistic          NONE

```

Rede_Gabarito Cenário 1

```

[OPTIONS]
Units          LPS
Headloss       H-W
Specific Gravity 1
Viscosity      1
Trials         40
Accuracy       0.001
CHECKFREQ     10
MAXCHECK      10
DAMPLIMIT     0
Unbalanced    Continue 10
Pattern       1
Demand Multiplier 1.0
Emitter Exponent 1.5
Quality        None mg/L
Diffusivity   1
Tolerance     0.01

[COORDINATES]
;Node          X-Coord          Y-Coord
2              4499213.57       9850838.76
4              4499257.12       9850838.76
7              4499239.41       9850868.53
6              4499284.68       9850868.53
5              4499318.64       9850817.10
3              4499274.59       9850800.86
8              4499258.85       9850891.90
1              4499173.71       9850838.76

[VERTICES]
;Link          X-Coord          Y-Coord

[LABELS]
;X-Coord      Y-Coord          Label & Anchor Node

[BACKDROP]
DIMENSIONS    4498226.99       9850518.36       4500100.15       9851277.25
UNITS         Meters
FILE
OFFSET       0.00          0.00

[END]

```

**APÊNDICE E – Gabarito referente aos trechos para perdas de carga calculadas por
Darcy-Weisbach – Rede C-Town: Battle of Calibration (2012)**

| Trecho | L (m) | D (mm) | ϵ (mm) | Q (L/s) | V (m/s) | ∇H |
|--------|----------|-----------|--------------------|------------|------------|------------|
| P1 | 52,9 | 203 | 3,03198 | 1,34 | 0,04 | 0,00002 |
| P10 | 79,23 | 76 | 1,46758 | 2,27 | 0,50 | 0,00831 |
| P100 | 107,88 | 406 | 2,85337 | 121,17 | 0,94 | 0,00374 |
| P1000 | 109,27 | 203 | 2,83437 | 41,91 | 1,29 | 0,01804 |
| P101 | 243,37 | 254 | 2,51483 | 0,65 | 0,01 | 0,00000 |
| P1016 | 164,77 | 305 | 2,46952 | 37,58 | 0,51 | 0,00159 |
| P102 | 1280,3 | 508 | 2,13032 | 94,89 | 0,47 | 0,00065 |
| P1022 | 200,76 | 102 | 1,83845 | 0,24 | 0,03 | 0,00002 |
| P1023 | 136,34 | 102 | 2,00971 | 1,49 | 0,18 | 0,00085 |
| P1024 | 375,62 | 102 | 2,27669 | 3,90 | 0,48 | 0,00590 |
| P1025 | 39,18 | 76 | 1,91783 | 3,90 | 0,86 | 0,02677 |
| P1026 | 45,61 | 76 | 2,32818 | 2,53 | 0,56 | 0,01225 |
| P1027 | 82,32 | 51 | 2,17153 | 0,83 | 0,41 | 0,01125 |
| P1028 | 9,57 | 51 | 2,39229 | 0,02 | 0,01 | 0,00001 |
| P1029 | 122,62 | 76 | 2,20106 | 0,81 | 0,18 | 0,00126 |
| P103 | 35,98 | 254 | 2,72768 | 3,07 | 0,06 | 0,00003 |
| P1030 | 95,25 | 76 | 1,61723 | 1,88 | 0,42 | 0,00596 |
| P1031 | 188,28 | 152 | 2,50754 | 14,78 | 0,81 | 0,01018 |
| P1032 | 143,29 | 152 | 1,88904 | 13,48 | 0,74 | 0,00768 |
| P1033 | 128,79 | 152 | 2,49367 | 13,11 | 0,72 | 0,00800 |
| P1034 | 52,87 | 203 | 1,93358 | 0,66 | 0,02 | 0,00001 |
| P1035 | 122,47 | 152 | 1,91864 | 4,45 | 0,25 | 0,00086 |
| P1036 | 83,33 | 203 | 2,95089 | 12,19 | 0,38 | 0,00157 |
| P1039 | 121,38 | 203 | 2,16574 | 7,20 | 0,22 | 0,00050 |
| P104 | 33,11 | 203 | 1,82499 | 0,45 | 0,01 | 0,00000 |
| P1040 | 29,45 | 152 | 2,05369 | 3,64 | 0,20 | 0,00059 |
| P1041 | 307,54 | 102 | 1,26964 | 3,19 | 0,39 | 0,00325 |
| P1042 | 84,54 | 152 | 2,86939 | 2,73 | 0,15 | 0,00038 |
| P1044 | 65,8 | 203 | 1,8104 | 5,24 | 0,16 | 0,00026 |
| P1045 | 68,63 | 203 | 0,99186 | 5,67 | 0,18 | 0,00025 |
| P106 | 270,38 | 102 | 3,42375 | 1,35 | 0,16 | 0,00085 |
| P107 | 357 | 203 | 2,67757 | 3,61 | 0,11 | 0,00014 |
| P108 | 183,53 | 203 | 2,7563 | 0,76 | 0,02 | 0,00001 |
| P109 | 218,52 | 203 | 2,83669 | 4,52 | 0,14 | 0,00022 |
| P11 | 83,45 | 101,6 | 1,95929 | 1,18 | 0,15 | 0,00055 |
| P110 | 425,83 | 508 | 1,86426 | 98,84 | 0,49 | 0,00068 |
| P111 | 126,36 | 152 | 3,03388 | 0,55 | 0,03 | 0,00002 |
| P112 | 646,98 | 305 | 3,20156 | 1,84 | 0,03 | 0,00000 |
| P113 | 310,73 | 152 | 2,46443 | 3,96 | 0,22 | 0,00075 |
| P115 | 99,88 | 102 | 2,20581 | 9,86 | 1,21 | 0,03680 |
| P116 | 204,54 | 152 | 2,10715 | 1,65 | 0,09 | 0,00013 |
| P117 | 104 | 102 | 3,22967 | 4,51 | 0,55 | 0,00905 |
| P118 | 115,91 | 102 | 2,49473 | 1,85 | 0,23 | 0,00140 |
| P119 | 64,88 | 305 | 2,78179 | 0,30 | 0,00 | 0,00000 |
| P12 | 85,24 | 406 | 2,27485 | 111,44 | 0,86 | 0,00296 |
| P120 | 91,4 | 102 | 2,33088 | 4,12 | 0,50 | 0,00663 |
| P121 | 42,23 | 152 | 1,80383 | 0,54 | 0,03 | 0,00001 |

| Trecho | L (m) | D (mm) | ϵ (mm) | Q (L/s) | V (m/s) | ∇H |
|--------|----------|-----------|--------------------|------------|------------|------------|
| P122 | 45,06 | 305 | 2,74497 | 12,16 | 0,17 | 0,00018 |
| P123 | 51,21 | 152 | 3,5333 | 2,72 | 0,15 | 0,00041 |
| P124 | 99,09 | 102 | 2,75146 | 0,79 | 0,10 | 0,00028 |
| P125 | 193,35 | 508 | 2,49149 | 5,73 | 0,03 | 0,00000 |
| P126 | 109,6 | 76 | 2,27153 | 0,85 | 0,19 | 0,00143 |
| P127 | 87,22 | 102 | 2,97819 | 1,36 | 0,17 | 0,00081 |
| P128 | 165,63 | 102 | 2,21827 | 0,89 | 0,11 | 0,00032 |
| P129 | 79,59 | 102 | 2,78509 | 0,72 | 0,09 | 0,00023 |
| P13 | 62,56 | 406 | 2,56607 | 116,55 | 0,90 | 0,00335 |
| P130 | 56,79 | 76 | 3,10888 | 1,54 | 0,34 | 0,00515 |
| P131 | 86,5 | 76 | 2,93202 | 0,37 | 0,08 | 0,00031 |
| P132 | 67,35 | 76 | 2,32417 | 1,14 | 0,25 | 0,00254 |
| P134 | 68,79 | 76 | 2,76301 | 1,71 | 0,38 | 0,00605 |
| P136 | 241,77 | 102 | 2,88774 | 1,81 | 0,22 | 0,00142 |
| P138 | 19,28 | 254 | 3,03065 | 43,33 | 0,86 | 0,00597 |
| P139 | 73,66 | 406 | 3,19639 | 110,96 | 0,86 | 0,00326 |
| P14 | 151,39 | 406 | 3,0516 | 117,64 | 0,91 | 0,00361 |
| P140 | 222,3 | 102 | 1,47527 | 1,13 | 0,14 | 0,00045 |
| P141 | 169,94 | 102 | 1,65333 | 1,92 | 0,23 | 0,00130 |
| P142 | 16,61 | 152,4 | 2,46281 | 3,40 | 0,19 | 0,00054 |
| P144 | 130,79 | 76 | 1,82356 | 0,00 | 0,00 | 0,00000 |
| P147 | 60,08 | 203 | 2,13517 | 0,86 | 0,03 | 0,00001 |
| P148 | 561,69 | 305 | 1,97667 | 37,58 | 0,51 | 0,00149 |
| P15 | 395,29 | 406 | 2,23875 | 118,54 | 0,92 | 0,00333 |
| P150 | 93,19 | 152 | 1,68128 | 0,62 | 0,03 | 0,00002 |
| P154 | 170,64 | 152 | 1,43141 | 14,77 | 0,81 | 0,00841 |
| P155 | 59,38 | 101,6 | 1,56879 | 5,67 | 0,70 | 0,01108 |
| P156 | 80,34 | 102 | 1,34179 | 0,63 | 0,08 | 0,00014 |
| P157 | 232,93 | 102 | 1,69236 | 2,74 | 0,34 | 0,00265 |
| P158 | 69,88 | 76 | 1,59681 | 1,01 | 0,22 | 0,00175 |
| P159 | 118,78 | 203 | 2,69352 | 1,95 | 0,06 | 0,00004 |
| P16 | 252,34 | 102 | 1,94107 | 4,61 | 0,56 | 0,00774 |
| P160 | 68,68 | 76 | 1,61637 | 2,08 | 0,46 | 0,00725 |
| P161 | 40,31 | 76 | 2,25942 | 3,52 | 0,78 | 0,02339 |
| P162 | 190,67 | 152 | 1,87453 | 23,75 | 1,31 | 0,02364 |
| P163 | 67,74 | 203 | 2,07387 | 1,54 | 0,05 | 0,00003 |
| P165 | 143,81 | 305 | 2,13089 | 37,56 | 0,51 | 0,00152 |
| P166 | 235 | 101,6 | 2,10148 | 3,41 | 0,42 | 0,00450 |
| P17 | 32,42 | 508 | 2,81962 | 84,32 | 0,42 | 0,00055 |
| P174 | 278,59 | 102 | 2,28989 | 1,36 | 0,17 | 0,00074 |
| P177 | 56,8 | 102 | 1,79335 | 1,12 | 0,14 | 0,00047 |
| P18 | 283,3 | 508 | 1,8068 | 80,60 | 0,40 | 0,00045 |
| P184 | 59,38 | 101,6 | 1,99975 | 7,87 | 0,97 | 0,02314 |
| P19 | 750,87 | 508 | 1,9212 | 18,57 | 0,09 | 0,00003 |
| P195 | 144,33 | 76 | 2,67222 | 1,46 | 0,32 | 0,00437 |
| P2 | 295,25 | 203 | 3,4899 | 6,32 | 0,20 | 0,00045 |
| P20 | 579,67 | 508 | 2,27441 | 33,41 | 0,16 | 0,00008 |

| Trecho | L (m) | D (mm) | ϵ (mm) | Q (L/s) | V (m/s) | ∇H |
|--------|----------|-----------|--------------------|------------|------------|------------|
| P201 | 102,19 | 76 | 1,96838 | 1,19 | 0,26 | 0,00258 |
| P21 | 176,48 | 406 | 2,40548 | 57,41 | 0,44 | 0,00081 |
| P211 | 202,33 | 76 | 2,52173 | 0,89 | 0,20 | 0,00160 |
| P215 | 140,76 | 254 | 2,63737 | 36,03 | 0,71 | 0,00394 |
| P218 | 54,55 | 102 | 2,62206 | 1,01 | 0,12 | 0,00044 |
| P219 | 67,98 | 102 | 2,39921 | 0,51 | 0,06 | 0,00012 |
| P22 | 567,3 | 406 | 2,651 | 120,80 | 0,93 | 0,00364 |
| P220 | 68,33 | 76 | 2,09555 | 1,06 | 0,23 | 0,00213 |
| P223 | 108,98 | 203 | 2,11845 | 1,08 | 0,03 | 0,00001 |
| P225 | 120,77 | 102 | 2,14184 | 0,13 | 0,02 | 0,00001 |
| P228 | 42,72 | 76 | 1,85129 | 1,60 | 0,35 | 0,00452 |
| P23 | 316,91 | 508 | 2,82484 | 119,25 | 0,59 | 0,00110 |
| P230 | 114,61 | 76 | 2,81461 | 1,58 | 0,35 | 0,00520 |
| P231 | 12,21 | 76 | 1,88972 | 1,11 | 0,24 | 0,00222 |
| P233 | 58,66 | 76 | 1,93898 | 0,84 | 0,19 | 0,00132 |
| P234 | 41,63 | 76 | 2,38277 | 1,69 | 0,37 | 0,00560 |
| P235 | 92,74 | 76 | 2,50984 | 4,36 | 0,96 | 0,03723 |
| P237 | 12,01 | 305 | 5,99743 | 53,63 | 0,73 | 0,00438 |
| P238 | 12,59 | 304,8 | 1,61144 | 53,63 | 0,73 | 0,00284 |
| P24 | 71,05 | 508 | 2,32068 | 99,51 | 0,49 | 0,00073 |
| P241 | 49,46 | 102 | 1,16718 | 0,79 | 0,10 | 0,00021 |
| P242 | 25,06 | 152,4 | 1,86334 | 2,35 | 0,13 | 0,00024 |
| P243 | 57,08 | 203,2 | 2,57697 | 5,56 | 0,17 | 0,00032 |
| P245 | 18,65 | 152,4 | 0,92245 | 32,93 | 1,81 | 0,03558 |
| P246 | 56,94 | 152,4 | 0,86974 | 20,19 | 1,11 | 0,01324 |
| P248 | 6,96 | 152,4 | 1,37704 | 18,16 | 1,00 | 0,01235 |
| P249 | 28,43 | 51 | 2,46324 | 0,84 | 0,41 | 0,01211 |
| P25 | 4,3 | 508 | 2,9474 | 112,67 | 0,56 | 0,00100 |
| P251 | 11,49 | 152 | 1,65574 | 17,40 | 0,96 | 0,01221 |
| P252 | 135,44 | 305 | 2,59878 | 53,63 | 0,73 | 0,00327 |
| P255 | 76,14 | 51 | 3,07544 | 0,15 | 0,08 | 0,00048 |
| P256 | 55,17 | 305 | 2,0462 | 53,63 | 0,73 | 0,00304 |
| P258 | 79,53 | 102 | 2,89746 | 0,04 | 0,00 | 0,00000 |
| P259 | 136,09 | 102 | 2,56388 | 0,30 | 0,04 | 0,00004 |
| P26 | 22,94 | 508 | 2,34767 | 5,45 | 0,03 | 0,00000 |
| P264 | 11,73 | 101,6 | 1,26978 | 0,72 | 0,09 | 0,00019 |
| P266 | 55,29 | 101,6 | 1,50955 | 1,90 | 0,23 | 0,00127 |
| P267 | 344,62 | 152,4 | 2,01398 | 0,38 | 0,02 | 0,00001 |
| P268 | 146,46 | 152,4 | 2,39914 | 2,58 | 0,14 | 0,00032 |
| P27 | 163,63 | 254 | 3,17936 | 2,40 | 0,05 | 0,00002 |
| P270 | 88,36 | 101,6 | 2,13813 | 1,09 | 0,13 | 0,00048 |
| P272 | 143,88 | 102 | 2,96607 | 1,92 | 0,23 | 0,00160 |
| P275 | 172,96 | 152,4 | 1,90075 | 0,95 | 0,05 | 0,00004 |
| P28 | 117,42 | 152 | 2,33627 | 1,16 | 0,06 | 0,00007 |
| P280 | 333,4 | 203 | 2,33291 | 0,00 | 0,00 | 0,00000 |
| P282 | 131,93 | 102 | 2,4043 | 3,93 | 0,48 | 0,00610 |
| P284 | 198,97 | 76,2 | 2,2985 | 1,10 | 0,24 | 0,00234 |

| Trecho | L (m) | D (mm) | ϵ (mm) | Q (L/s) | V (m/s) | ∇H |
|--------|----------|-----------|--------------------|------------|------------|------------|
| P285 | 130,71 | 76,2 | 2,25197 | 0,11 | 0,02 | 0,00001 |
| P286 | 155,58 | 101,6 | 2,25976 | 0,46 | 0,06 | 0,00009 |
| P287 | 45,12 | 254 | 2,77263 | 36,03 | 0,71 | 0,00401 |
| P288 | 226,74 | 76,2 | 2,47768 | 1,97 | 0,43 | 0,00753 |
| P29 | 20,51 | 152 | 2,28271 | 1,02 | 0,06 | 0,00005 |
| P290 | 46,28 | 76,2 | 2,28443 | 0,42 | 0,09 | 0,00036 |
| P291 | 132,94 | 305 | 1,50848 | 53,63 | 0,73 | 0,00278 |
| P292 | 13,54 | 305 | 1,94028 | 53,63 | 0,73 | 0,00299 |
| P293 | 125,2 | 305 | 2,165 | 53,63 | 0,73 | 0,00309 |
| P294 | 101,2 | 102 | 2,70154 | 1,99 | 0,24 | 0,00167 |
| P295 | 133,23 | 76 | 3,034 | 5,23 | 1,15 | 0,05814 |
| P296 | 231,87 | 76 | 2,56988 | 2,55 | 0,56 | 0,01295 |
| P297 | 42,53 | 406 | 3,008 | 98,45 | 0,76 | 0,00252 |
| P298 | 40,11 | 305 | 2,49975 | 72,15 | 0,99 | 0,00584 |
| P299 | 61,51 | 102 | 2,36076 | 3,31 | 0,40 | 0,00432 |
| P3 | 136,52 | 300 | 2,97944 | 11,19 | 0,16 | 0,00017 |
| P30 | 40,89 | 254 | 2,40478 | 2,34 | 0,05 | 0,00002 |
| P301 | 45,31 | 305 | 2,47167 | 71,37 | 0,98 | 0,00569 |
| P302 | 178,28 | 305 | 2,68503 | 71,08 | 0,97 | 0,00580 |
| P303 | 131,94 | 76 | 2,33328 | 1,06 | 0,23 | 0,00219 |
| P304 | 268,74 | 101,6 | 2,28672 | 0,59 | 0,07 | 0,00015 |
| P305 | 43,41 | 203 | 2,22483 | 0,00 | 0,00 | 0,00000 |
| P307 | 47,3 | 305 | 3,55746 | 68,28 | 0,93 | 0,00587 |
| P308 | 334,57 | 305 | 2,3446 | 53,63 | 0,73 | 0,00317 |
| P309 | 128,8 | 101,6 | 2,04194 | 0,99 | 0,12 | 0,00040 |
| P31 | 144,67 | 152 | 1,43398 | 2,29 | 0,13 | 0,00022 |
| P310 | 9 | 610 | 2,38021 | 122,43 | 0,42 | 0,00042 |
| P316 | 11,62 | 610 | 3,12011 | 122,43 | 0,42 | 0,00046 |
| P319 | 10,54 | 610 | 2,84992 | 0,00 | 0,00 | 0,00000 |
| P32 | 84,44 | 152 | 1,66343 | 3,54 | 0,19 | 0,00053 |
| P320 | 11,47 | 610 | 2,85317 | 122,43 | 0,42 | 0,00044 |
| P322 | 11,5 | 610 | 2,28494 | 122,43 | 0,42 | 0,00042 |
| P323 | 11,47 | 610 | 2,49376 | 0,00 | 0,00 | 0,00000 |
| P329 | 134,52 | 152 | 1,81192 | 2,95 | 0,16 | 0,00038 |
| P33 | 22,81 | 254 | 3,00642 | 0,76 | 0,02 | 0,00000 |
| P330 | 66,79 | 76 | 1,97739 | 1,39 | 0,31 | 0,00352 |
| P331 | 93,46 | 51 | 2,1195 | 0,57 | 0,28 | 0,00532 |
| P336 | 182,99 | 152 | 2,16436 | 2,85 | 0,16 | 0,00038 |
| P337 | 20,49 | 305 | 5,9728 | 10,47 | 0,14 | 0,00017 |
| P338 | 74,38 | 76 | 1,80437 | 0,22 | 0,05 | 0,00009 |
| P339 | 307,49 | 102 | 2,31927 | 1,29 | 0,16 | 0,00067 |
| P34 | 98 | 508 | 2,76574 | 99,05 | 0,49 | 0,00076 |
| P340 | 96,21 | 305 | 1,77237 | 25,50 | 0,35 | 0,00067 |
| P341 | 189,74 | 305 | 2,05604 | 23,66 | 0,32 | 0,00060 |
| P343 | 111,65 | 152 | 1,8072 | 3,77 | 0,21 | 0,00061 |
| P344 | 45,26 | 152 | 2,44 | 7,41 | 0,41 | 0,00256 |
| P346 | 54,91 | 51 | 2,08781 | 0,08 | 0,04 | 0,00005 |

| Trecho | L (m) | D (mm) | ε (mm) | Q (L/s) | V (m/s) | ∇H |
|--------|----------|-----------|-----------------------|------------|------------|------------|
| P347 | 385,56 | 305 | 1,98565 | 0,49 | 0,01 | 0,00000 |
| P348 | 42,47 | 305 | 2,3159 | 0,82 | 0,01 | 0,00000 |
| P349 | 39,12 | 305 | 1,95145 | 3,86 | 0,05 | 0,00002 |
| P35 | 64,56 | 152 | 2,50716 | 0,14 | 0,01 | 0,00000 |
| P350 | 400,16 | 203 | 1,82617 | 0,80 | 0,02 | 0,00001 |
| P37 | 180,61 | 203 | 1,91663 | 0,22 | 0,01 | 0,00000 |
| P372 | 6,42 | 101,6 | 1,24296 | 7,65 | 0,94 | 0,01849 |
| P374 | 15,83 | 254 | 2,17571 | 0,00 | 0,00 | 0,00000 |
| P375 | 7,79 | 254 | 2,89847 | 0,00 | 0,00 | 0,00000 |
| P376 | 6,64 | 254 | 1,70183 | 0,00 | 0,00 | 0,00000 |
| P378 | 6,47 | 254 | 1,27222 | 0,00 | 0,00 | 0,00000 |
| P379 | 6,43 | 254 | 1,74188 | 53,63 | 1,06 | 0,00762 |
| P38 | 169,49 | 76 | 1,53554 | 0,71 | 0,16 | 0,00087 |
| P380 | 4,79 | 254 | 2,35622 | 53,63 | 1,06 | 0,00839 |
| P381 | 5,53 | 304,8 | 0,97489 | 53,63 | 0,73 | 0,00247 |
| P383 | 19,56 | 152 | 2,69343 | 5,64 | 0,31 | 0,00154 |
| P384 | 26,14 | 76 | 1,73584 | 4,10 | 0,90 | 0,02846 |
| P385 | 106,53 | 305 | 2,87496 | 24,72 | 0,34 | 0,00073 |
| P386 | 8,12 | 152 | 2,70435 | 11,82 | 0,65 | 0,00672 |
| P39 | 190,12 | 102 | 2,02075 | 0,51 | 0,06 | 0,00011 |
| P397 | 13,16 | 203,2 | 2,3732 | 64,28 | 1,98 | 0,03960 |
| P398 | 6,75 | 203,2 | 2,21378 | 30,28 | 0,93 | 0,00863 |
| P399 | 9,71 | 203,2 | 2,6378 | 30,28 | 0,93 | 0,00916 |
| P40 | 143,64 | 102 | 1,47177 | 5,02 | 0,61 | 0,00832 |
| P402 | 6,12 | 203,2 | 2,29718 | 0,00 | 0,00 | 0,00000 |
| P403 | 6,86 | 152,4 | 1,31521 | 34,00 | 1,86 | 0,04233 |
| P409 | 26,38 | 152,4 | 2,26449 | 34,00 | 1,86 | 0,05089 |
| P410 | 7,7 | 203,2 | 2,45062 | 0,00 | 0,00 | 0,00000 |
| P42 | 32,93 | 152 | 1,16356 | 6,44 | 0,35 | 0,00154 |
| P424 | 27,8 | 203,2 | 0,72063 | 30,28 | 0,93 | 0,00618 |
| P43 | 36,18 | 203 | 2,32436 | 0,35 | 0,01 | 0,00000 |
| P44 | 247,65 | 152 | 1,1526 | 13,38 | 0,74 | 0,00646 |
| P443 | 67,31 | 305 | 2,45465 | 67,77 | 0,93 | 0,00512 |
| P445 | 7,8 | 254 | 2,42673 | 90,49 | 1,79 | 0,02402 |
| P446 | 31,15 | 254 | 1,7233 | 0,00 | 0,00 | 0,00000 |
| P450 | 19,47 | 254 | 1,95354 | 0,00 | 0,00 | 0,00000 |
| P46 | 70,86 | 102 | 1,26284 | 0,15 | 0,02 | 0,00001 |
| P465 | 18,2 | 254 | 2,41112 | 89,66 | 1,77 | 0,02353 |
| P467 | 15,17 | 254 | 1,98922 | 89,66 | 1,77 | 0,02211 |
| P468 | 31,29 | 254 | 1,58797 | 53,63 | 1,06 | 0,00741 |
| P48 | 28,98 | 152 | 1,22514 | 5,68 | 0,31 | 0,00122 |
| P482 | 321,89 | 152 | 2,74823 | 2,58 | 0,14 | 0,00033 |
| P484 | 336,57 | 203 | 2,70088 | 25,08 | 0,77 | 0,00638 |
| P49 | 134,92 | 152 | 0,86498 | 0,93 | 0,05 | 0,00004 |
| P492 | 157,32 | 101,6 | 1,199 | 0,47 | 0,06 | 0,00008 |
| P5 | 588,97 | 406 | 2,54328 | 7,35 | 0,06 | 0,00001 |
| P500 | 24,23 | 203 | 1,2646 | 0,54 | 0,02 | 0,00000 |

| Trecho | L (m) | D (mm) | ϵ (mm) | Q (L/s) | V (m/s) | ∇H |
|--------|----------|-----------|--------------------|------------|------------|------------|
| P501 | 11,32 | 152,4 | 1,31605 | 1,62 | 0,09 | 0,00011 |
| P502 | 9,19 | 76,2 | 1,83784 | 1,57 | 0,34 | 0,00431 |
| P51 | 57,47 | 102 | 2,16153 | 3,39 | 0,41 | 0,00439 |
| P510 | 193,37 | 102 | 1,60199 | 0,00 | 0,00 | 0,00000 |
| P52 | 83,26 | 102 | 2,27522 | 1,69 | 0,21 | 0,00113 |
| P524 | 170,54 | 305 | 1,98598 | 4,81 | 0,07 | 0,00003 |
| P527 | 149,04 | 305 | 3,00253 | 9,64 | 0,13 | 0,00012 |
| P529 | 212,31 | 102 | 1,64762 | 1,25 | 0,15 | 0,00056 |
| P53 | 10,32 | 203 | 2,36733 | 30,28 | 0,94 | 0,00887 |
| P54 | 111,67 | 51 | 2,15449 | 1,05 | 0,51 | 0,01785 |
| P55 | 99,86 | 76 | 2,36327 | 1,35 | 0,30 | 0,00356 |
| P57 | 288,77 | 152 | 1,83775 | 24,38 | 1,34 | 0,02474 |
| P58 | 503,91 | 102 | 1,78264 | 8,41 | 1,03 | 0,02481 |
| P596 | 76,39 | 76 | 1,25655 | 1,13 | 0,25 | 0,00202 |
| P597 | 79,68 | 102 | 1,77067 | 0,70 | 0,09 | 0,00019 |
| P6 | 199,39 | 152 | 2,05562 | 0,22 | 0,01 | 0,00000 |
| P609 | 86,07 | 76 | 1,30812 | 2,07 | 0,46 | 0,00667 |
| P610 | 206,58 | 76 | 2,00481 | 0,00 | 0,00 | 0,00000 |
| P63 | 165,95 | 254 | 2,316 | 4,02 | 0,08 | 0,00005 |
| P633 | 173,88 | 152 | 0,97814 | 7,83 | 0,43 | 0,00215 |
| P64 | 126,63 | 203 | 2,6891 | 3,17 | 0,10 | 0,00011 |
| P65 | 164,93 | 102 | 1,73432 | 2,88 | 0,35 | 0,00295 |
| P67 | 330,24 | 203 | 2,95899 | 2,62 | 0,08 | 0,00008 |
| P670 | 54,41 | 152 | 1,87702 | 0,00 | 0,00 | 0,00000 |
| P671 | 62,97 | 152 | 2,04713 | 0,00 | 0,00 | 0,00000 |
| P68 | 302,74 | 305 | 2,55828 | 1,64 | 0,02 | 0,00000 |
| P69 | 103,63 | 152 | 3,03652 | 6,70 | 0,37 | 0,00227 |
| P697 | 88,89 | 102 | 1,91845 | 0,00 | 0,00 | 0,00000 |
| P7 | 60,22 | 508 | 2,76804 | 109,69 | 0,54 | 0,00093 |
| P70 | 88,36 | 152 | 3,01487 | 3,24 | 0,18 | 0,00054 |
| P71 | 419,4 | 254 | 2,49194 | 0,63 | 0,01 | 0,00000 |
| P72 | 247,46 | 305 | 2,47843 | 4,13 | 0,06 | 0,00002 |
| P724 | 92,72 | 152 | 1,96489 | 0,48 | 0,03 | 0,00001 |
| P725 | 117,32 | 152 | 1,58713 | 1,10 | 0,06 | 0,00006 |
| P752 | 70,36 | 152 | 1,54871 | 0,25 | 0,01 | 0,00000 |
| P753 | 71,91 | 152 | 2,28094 | 0,20 | 0,01 | 0,00000 |
| P754 | 92,49 | 51 | 2,48758 | 0,00 | 0,00 | 0,00000 |
| P755 | 47,12 | 305 | 1,19829 | 1,04 | 0,01 | 0,00000 |
| P756 | 41,66 | 305 | 1,47167 | 1,21 | 0,02 | 0,00000 |
| P757 | 568,43 | 305 | 1,82742 | 2,12 | 0,03 | 0,00001 |
| P758 | 102,21 | 305 | 2,11228 | 3,31 | 0,05 | 0,00001 |
| P759 | 97,19 | 152 | 1,62486 | 2,47 | 0,14 | 0,00026 |
| P760 | 88,54 | 152 | 1,7384 | 2,74 | 0,15 | 0,00032 |
| P761 | 171,27 | 152 | 1,95235 | 3,31 | 0,18 | 0,00049 |
| P763 | 387,59 | 305 | 1,28296 | 2,43 | 0,03 | 0,00001 |
| P766 | 37,85 | 152 | 2,03836 | 2,05 | 0,11 | 0,00019 |
| P767 | 227,5 | 305 | 1,41014 | 4,98 | 0,07 | 0,00003 |

| Trecho | L (m) | D (mm) | ϵ (mm) | Q (L/s) | V (m/s) | ∇H |
|--------|----------|-----------|--------------------|------------|------------|------------|
| P768 | 217,03 | 254 | 1,09349 | 1,16 | 0,02 | 0,00000 |
| P769 | 154,26 | 305 | 1,35278 | 5,77 | 0,08 | 0,00003 |
| P771 | 69,36 | 203 | 1,83618 | 0,58 | 0,02 | 0,00000 |
| P772 | 215,02 | 305 | 2,44466 | 7,36 | 0,10 | 0,00006 |
| P775 | 129,42 | 203 | 1,45119 | 0,48 | 0,01 | 0,00000 |
| P776 | 421,07 | 102 | 1,18861 | 0,24 | 0,03 | 0,00002 |
| P777 | 402,31 | 305 | 1,30231 | 7,87 | 0,11 | 0,00006 |
| P779 | 524,49 | 203 | 2,35197 | 8,61 | 0,27 | 0,00073 |
| P780 | 153,56 | 203 | 1,60199 | 0,00 | 0,00 | 0,00000 |
| P781 | 130,18 | 152 | 2,21978 | 5,51 | 0,30 | 0,00138 |
| P783 | 674,96 | 203 | 1,15647 | 10,54 | 0,33 | 0,00088 |
| P784 | 88,96 | 102 | 1,88899 | 0,40 | 0,05 | 0,00007 |
| P785 | 184,71 | 102 | 2,27551 | 0,93 | 0,11 | 0,00036 |
| P786 | 166,27 | 203 | 1,37999 | 10,69 | 0,33 | 0,00095 |
| P787 | 127,08 | 102 | 0,49461 | 20,49 | 2,51 | 0,09623 |
| P788 | 107,85 | 152 | 1,20778 | 8,57 | 0,47 | 0,00272 |
| P789 | 285,95 | 203 | 2,92138 | 13,93 | 0,43 | 0,00204 |
| P791 | 82,5 | 152 | 1,11837 | 6,73 | 0,37 | 0,00165 |
| P794 | 39,04 | 203 | 0,76635 | 6,45 | 0,20 | 0,00031 |
| P795 | 129,41 | 203 | 1,91767 | 5,15 | 0,16 | 0,00025 |
| P796 | 22,42 | 203 | 2,26545 | 0,00 | 0,00 | 0,00000 |
| P797 | 21,64 | 102 | 1,06962 | 1,12 | 0,14 | 0,00040 |
| P798 | 684,07 | 203 | 1,11213 | 4,61 | 0,14 | 0,00018 |
| P8 | 11,35 | 406 | 2,87259 | 102,26 | 0,79 | 0,00268 |
| P800 | 15,93 | 203 | 1,39463 | 1,70 | 0,05 | 0,00003 |
| P801 | 9,47 | 203 | 1,62337 | 0,23 | 0,01 | 0,00000 |
| P804 | 68,27 | 102 | 1,68776 | 3,02 | 0,37 | 0,00320 |
| P805 | 96,57 | 152 | 1,17935 | 3,67 | 0,20 | 0,00051 |
| P806 | 32,51 | 152 | 1,64844 | 4,01 | 0,22 | 0,00067 |
| P807 | 162,82 | 203 | 1,81343 | 0,28 | 0,01 | 0,00000 |
| P808 | 253,47 | 203 | 2,16918 | 11,32 | 0,35 | 0,00122 |
| P809 | 17,35 | 102 | 1,40859 | 1,24 | 0,15 | 0,00053 |
| P810 | 64,3 | 203 | 2,30669 | 0,00 | 0,00 | 0,00000 |
| P811 | 50,17 | 102 | 2,27904 | 2,04 | 0,25 | 0,00164 |
| P813 | 30,85 | 152 | 2,87417 | 15,55 | 0,86 | 0,01184 |
| P815 | 50,52 | 102 | 2,50894 | 17,27 | 2,11 | 0,11833 |
| P817 | 253,3 | 203 | 3,02304 | 8,36 | 0,26 | 0,00075 |
| P819 | 8,02 | 203 | 1,59678 | 8,38 | 0,26 | 0,00062 |
| P821 | 64,78 | 102 | 2,52641 | 0,19 | 0,02 | 0,00001 |
| P822 | 11,71 | 102 | 1,83788 | 1,28 | 0,16 | 0,00061 |
| P823 | 18,84 | 76 | 1,23208 | 0,24 | 0,05 | 0,00011 |
| P826 | 335,29 | 76 | 1,85746 | 1,06 | 0,23 | 0,00202 |
| P827 | 119,07 | 76 | 1,65543 | 0,57 | 0,13 | 0,00058 |
| P83 | 15,14 | 610 | 2,89079 | 121,63 | 0,42 | 0,00044 |
| P830 | 89,3 | 76 | 1,86206 | 0,28 | 0,06 | 0,00015 |
| P831 | 62,2 | 76 | 2,42316 | 3,54 | 0,78 | 0,02430 |
| P84 | 148,63 | 203 | 1,9338 | 0,50 | 0,02 | 0,00000 |

| Trecho | L (m) | D (mm) | ϵ (mm) | Q (L/s) | V (m/s) | ∇H |
|--------|----------|-----------|--------------------|------------|------------|------------|
| P840 | 235,28 | 203 | 1,9181 | 13,21 | 0,41 | 0,00160 |
| P841 | 347,83 | 76 | 2,09823 | 0,75 | 0,16 | 0,00107 |
| P842 | 64,41 | 52 | 2,01707 | 1,06 | 0,50 | 0,01591 |
| P844 | 12,49 | 102 | 1,21244 | 2,41 | 0,29 | 0,00185 |
| P846 | 94,84 | 203 | 1,64486 | 1,00 | 0,03 | 0,00001 |
| P847 | 68,63 | 152 | 2,21287 | 1,37 | 0,08 | 0,00009 |
| P85 | 36,6 | 76 | 3,14322 | 0,69 | 0,15 | 0,00107 |
| P850 | 241,13 | 101,6 | 1,26863 | 2,02 | 0,25 | 0,00136 |
| P851 | 228,78 | 76 | 0,85494 | 0,97 | 0,21 | 0,00133 |
| P852 | 40,39 | 203 | 1,58324 | 1,55 | 0,05 | 0,00002 |
| P853 | 295,68 | 203 | 0,99951 | 7,01 | 0,22 | 0,00039 |
| P855 | 37,88 | 102 | 1,16639 | 0,77 | 0,09 | 0,00020 |
| P858 | 195,38 | 102 | 1,22996 | 1,30 | 0,16 | 0,00056 |
| P859 | 90,81 | 152 | 2,02742 | 5,50 | 0,30 | 0,00133 |
| P86 | 161 | 305 | 1,358 | 37,01 | 0,51 | 0,00130 |
| P861 | 110,79 | 152 | 2,35059 | 0,93 | 0,05 | 0,00004 |
| P866 | 17,37 | 102 | 2,16435 | 1,53 | 0,19 | 0,00092 |
| P87 | 80,03 | 203 | 2,85846 | 2,35 | 0,07 | 0,00006 |
| P871 | 48,15 | 102 | 2,18049 | 0,67 | 0,08 | 0,00018 |
| P880 | 112,84 | 76 | 2,43446 | 0,44 | 0,10 | 0,00040 |
| P889 | 15,72 | 203 | 2,31539 | 2,64 | 0,08 | 0,00007 |
| P89 | 104,3 | 152 | 2,76906 | 2,20 | 0,12 | 0,00025 |
| P892 | 30,39 | 254 | 3,14667 | 92,32 | 1,82 | 0,02730 |
| P9 | 49,95 | 254 | 3,28304 | 44,36 | 0,88 | 0,00643 |
| P90 | 98,94 | 102 | 3,47797 | 1,99 | 0,24 | 0,00183 |
| P91 | 572,34 | 102 | 2,06909 | 0,45 | 0,05 | 0,00008 |
| P914 | 38,61 | 203 | 2,20808 | 0,00 | 0,00 | 0,00000 |
| P915 | 10,58 | 152 | 3,01801 | 17,51 | 0,97 | 0,01528 |
| P92 | 63,12 | 203 | 2,56331 | 0,44 | 0,01 | 0,00000 |
| P924 | 82,38 | 254 | 2,9438 | 1,76 | 0,03 | 0,00001 |
| P927 | 348,88 | 406 | 2,50061 | 0,08 | 0,00 | 0,00000 |
| P929 | 83,31 | 203 | 2,25636 | 0,00 | 0,00 | 0,00000 |
| P930 | 78,95 | 203 | 2,3392 | 0,00 | 0,00 | 0,00000 |
| P931 | 248,4 | 203 | 2,38834 | 0,00 | 0,00 | 0,00000 |
| P932 | 381,56 | 203 | 2,48169 | 0,00 | 0,00 | 0,00000 |
| P933 | 130,54 | 305 | 2,35034 | 53,63 | 0,73 | 0,00317 |
| P934 | 18,46 | 254 | 1,68828 | 53,63 | 1,06 | 0,00755 |
| P935 | 152,13 | 305 | 1,81759 | 37,58 | 0,51 | 0,00145 |
| P937 | 198,09 | 254 | 2,95177 | 16,04 | 0,32 | 0,00082 |
| P938 | 168,95 | 254 | 2,94308 | 13,48 | 0,27 | 0,00058 |
| P939 | 248,76 | 152 | 2,00527 | 0,39 | 0,02 | 0,00001 |
| P94 | 51,35 | 305 | 0,10033 | 0,06 | 0,00 | 0,00000 |
| P940 | 187,99 | 152 | 1,85159 | 0,30 | 0,02 | 0,00000 |
| P941 | 142,58 | 152 | 2,7276 | 0,04 | 0,00 | 0,00000 |
| P942 | 85,08 | 152 | 2,54183 | 0,68 | 0,04 | 0,00003 |
| P943 | 84,21 | 76 | 2,40191 | 0,47 | 0,10 | 0,00045 |
| P944 | 59,58 | 254 | 2,59647 | 2,09 | 0,04 | 0,00002 |

| Trecho | L (m) | D (mm) | ϵ (mm) | Q (L/s) | V (m/s) | ∇H |
|--------|----------|-----------|--------------------|------------|------------|------------|
| P946 | 143,03 | 102 | 1,90532 | 0,26 | 0,03 | 0,00002 |
| P947 | 122,43 | 152 | 2,8406 | 0,86 | 0,05 | 0,00004 |
| P948 | 74,71 | 152 | 1,60664 | 2,14 | 0,12 | 0,00020 |
| P949 | 24,39 | 254 | 2,14177 | 2,79 | 0,06 | 0,00002 |
| P95 | 50,7 | 305 | 1,00905 | 0,44 | 0,01 | 0,00000 |
| P951 | 338,8 | 254 | 2,05263 | 13,20 | 0,26 | 0,00050 |
| P953 | 495,66 | 254 | 2,46216 | 9,37 | 0,18 | 0,00027 |
| P954 | 294,07 | 203 | 2,75857 | 2,13 | 0,07 | 0,00005 |
| P955 | 131,74 | 102 | 2,47202 | 0,35 | 0,04 | 0,00006 |
| P956 | 115,17 | 152 | 3,21687 | 1,08 | 0,06 | 0,00007 |
| P957 | 51,05 | 152 | 1,90134 | 0,01 | 0,00 | 0,00000 |
| P958 | 122,41 | 102 | 1,58645 | 0,22 | 0,03 | 0,00001 |
| P959 | 123,42 | 102 | 1,89829 | 0,28 | 0,03 | 0,00003 |
| P96 | 53,72 | 254 | 2,35228 | 91,54 | 1,81 | 0,02433 |
| P961 | 234,55 | 203 | 2,45123 | 5,77 | 0,18 | 0,00034 |
| P962 | 49,83 | 152 | 2,2271 | 0,77 | 0,04 | 0,00003 |
| P963 | 93,54 | 203 | 2,45666 | 7,76 | 0,24 | 0,00061 |
| P964 | 129,91 | 152 | 1,9844 | 2,59 | 0,14 | 0,00030 |
| P965 | 135,06 | 203 | 2,08652 | 4,60 | 0,14 | 0,00021 |
| P966 | 31,32 | 203 | 2,58961 | 1,31 | 0,04 | 0,00002 |
| P967 | 207,54 | 203 | 2,60729 | 0,05 | 0,00 | 0,00000 |
| P968 | 68,17 | 102 | 2,77056 | 0,02 | 0,00 | 0,00000 |
| P969 | 149,16 | 203 | 2,42424 | 0,65 | 0,02 | 0,00001 |
| P97 | 24,41 | 610 | 2,30861 | 121,76 | 0,42 | 0,00041 |
| P970 | 165,04 | 203 | 2,35702 | 2,51 | 0,08 | 0,00007 |
| P971 | 136,94 | 152 | 2,7955 | 2,64 | 0,15 | 0,00035 |
| P972 | 219,42 | 152 | 2,58254 | 2,50 | 0,14 | 0,00031 |
| P973 | 164,68 | 203 | 3,055 | 6,16 | 0,19 | 0,00041 |
| P974 | 186,4 | 203 | 3,02038 | 5,13 | 0,16 | 0,00029 |
| P975 | 159,56 | 152 | 2,93216 | 2,10 | 0,12 | 0,00023 |
| P976 | 83,33 | 76 | 2,5591 | 1,50 | 0,33 | 0,00450 |
| P977 | 45,98 | 102 | 1,71301 | 0,79 | 0,10 | 0,00024 |
| P978 | 178,97 | 76 | 2,75035 | 2,65 | 0,58 | 0,01439 |
| P98 | 174,53 | 610 | 3,0629 | 122,20 | 0,42 | 0,00045 |
| P981 | 36,19 | 76 | 2,69049 | 3,84 | 0,85 | 0,02985 |
| P982 | 87,24 | 203 | 1,8855 | 1,80 | 0,06 | 0,00003 |
| P983 | 180,2 | 101,6 | 2,17656 | 3,89 | 0,48 | 0,00590 |
| P984 | 16,03 | 101,6 | 1,42596 | 1,27 | 0,16 | 0,00057 |
| P986 | 229,54 | 101,6 | 2,38831 | 0,60 | 0,07 | 0,00016 |
| P987 | 94,56 | 101,6 | 1,97812 | 0,78 | 0,10 | 0,00025 |
| P988 | 9,74 | 101,6 | 1,70924 | 2,78 | 0,34 | 0,00279 |
| P989 | 91,59 | 51 | 2,60891 | 0,38 | 0,18 | 0,00256 |
| P99 | 452,37 | 508 | 1,96792 | 94,29 | 0,47 | 0,00063 |
| P990 | 78,87 | 102 | 2,44534 | 1,49 | 0,18 | 0,00091 |
| P991 | 20,25 | 203 | 2,95021 | 23,30 | 0,72 | 0,00568 |
| P992 | 69,15 | 203 | 2,67181 | 21,97 | 0,68 | 0,00489 |
| P993 | 63,52 | 203 | 2,68979 | 19,75 | 0,61 | 0,00396 |

| Trecho | L (m) | D (mm) | ϵ (mm) | Q (L/s) | V (m/s) | ∇H |
|---------------|------------------|-------------------|---------------------------------------|--------------------|--------------------|------------------------------|
| P994 | 115,39 | 203 | 2,56385 | 16,70 | 0,52 | 0,00279 |
| P995 | 228,99 | 152 | 2,59002 | 23,75 | 1,31 | 0,02650 |
| P996 | 10,22 | 203 | 2,49865 | 65,35 | 2,02 | 0,04188 |
| P997 | 154,87 | 203 | 1,96883 | 41,97 | 1,30 | 0,01598 |
| P998 | 107,98 | 203 | 2,23181 | 42,92 | 1,33 | 0,01743 |
| P999 | 81,67 | 254 | 3,197 | 42,25 | 0,83 | 0,00578 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

**APÊNDICE F – Gabarito referente aos trechos para perdas de carga calculadas por
Hazen-Williams – Rede C-Town: Battle of Calibration (2012)**

| Trecho | L (m) | D (mm) | C (m ^{0,367} /s) | Q (L/s) | V (m/s) | ∇H | K _w (m/dia) |
|--------|----------|-----------|------------------------------|------------|------------|---------|---------------------------|
| P1 | 52,9 | 203 | 72,4549266 | 1,34 | 0,04 | 0,00004 | -0,731 |
| P10 | 79,23 | 76 | 108,0095074 | 2,27 | 0,5 | 0,00656 | -0,624 |
| P100 | 107,88 | 406 | 76,51422883 | 118,24 | 0,91 | 0,00536 | -0,44 |
| P1000 | 109,27 | 203 | 76,94614787 | 41,44 | 1,28 | 0,02225 | -0,852 |
| P101 | 243,37 | 254 | 84,20845169 | 0,65 | 0,01 | 0 | -0,243 |
| P1016 | 164,77 | 305 | 85,23817366 | 33,83 | 0,46 | 0,00174 | -0,931 |
| P102 | 1280,3 | 508 | 92,94722922 | 91,96 | 0,45 | 0,00079 | -0,113 |
| P1022 | 200,76 | 102 | 99,58078005 | 0,21 | 0,03 | 0,00002 | -0,678 |
| P1023 | 136,34 | 102 | 95,68850653 | 1,46 | 0,18 | 0,00087 | -0,977 |
| P1024 | 375,62 | 102 | 89,62069894 | 3,9 | 0,48 | 0,00602 | -0,515 |
| P1025 | 39,18 | 76 | 97,77659267 | 4,13 | 0,91 | 0,02394 | -0,506 |
| P1026 | 45,61 | 76 | 88,45039526 | 2,77 | 0,61 | 0,01369 | -0,255 |
| P1027 | 82,32 | 51 | 92,0106009 | 0,8 | 0,39 | 0,00902 | -0,776 |
| P1028 | 9,57 | 51 | 86,99339612 | 0,01 | 0 | 0 | -0,967 |
| P1029 | 122,62 | 76 | 91,33959845 | 1,02 | 0,22 | 0,00203 | -0,703 |
| P103 | 35,98 | 254 | 79,37099717 | 2,02 | 0,04 | 0,00003 | -0,629 |
| P1030 | 95,25 | 76 | 104,6083303 | 2,12 | 0,47 | 0,00614 | -0,785 |
| P1031 | 188,28 | 152 | 84,37414232 | 14,41 | 0,79 | 0,01086 | -0,546 |
| P1032 | 143,29 | 152 | 98,43095137 | 13,27 | 0,73 | 0,007 | -0,217 |
| P1033 | 128,79 | 152 | 84,68939593 | 13,11 | 0,72 | 0,00905 | -0,209 |
| P1034 | 52,87 | 203 | 97,41854735 | 0,66 | 0,02 | 0,00001 | -0,424 |
| P1035 | 122,47 | 152 | 97,7581413 | 4,45 | 0,25 | 0,00094 | -0,577 |
| P1036 | 83,33 | 203 | 74,29791874 | 12,19 | 0,38 | 0,00246 | -0,968 |
| P1039 | 121,38 | 203 | 92,14229573 | 7,2 | 0,22 | 0,00062 | -0,104 |
| P104 | 33,11 | 203 | 99,88658284 | 0,45 | 0,01 | 0 | -0,105 |
| P1040 | 29,45 | 152 | 94,68876721 | 3,64 | 0,2 | 0,00068 | -0,529 |
| P1041 | 307,54 | 102 | 112,5081558 | 3,19 | 0,39 | 0,00273 | -0,45 |
| P1042 | 84,54 | 152 | 76,15024112 | 2,73 | 0,15 | 0,0006 | -0,715 |
| P1044 | 65,8 | 203 | 100,2182444 | 5,93 | 0,18 | 0,00037 | -0,028 |
| P1045 | 68,63 | 203 | 118,82139 | 6,36 | 0,2 | 0,00031 | -0,178 |
| P106 | 270,38 | 102 | 63,55113264 | 1,02 | 0,12 | 0,00094 | -0,532 |
| P107 | 357 | 203 | 80,50983232 | 2,56 | 0,08 | 0,00012 | -0,267 |
| P108 | 183,53 | 203 | 78,72048108 | 0,43 | 0,01 | 0 | -0,516 |
| P109 | 218,52 | 203 | 76,89340854 | 3,46 | 0,11 | 0,00022 | -0,28 |
| P11 | 83,45 | 101,6 | 96,83442437 | 1,18 | 0,15 | 0,00058 | -0,872 |
| P110 | 425,83 | 508 | 98,99414116 | 96,97 | 0,48 | 0,00077 | -0,941 |
| P111 | 126,36 | 152 | 72,41174834 | 0,55 | 0,03 | 0,00003 | -0,555 |
| P112 | 646,98 | 305 | 68,60087459 | 1,84 | 0,03 | 0,00001 | -0,502 |
| P113 | 310,73 | 152 | 85,35380111 | 3,96 | 0,22 | 0,00097 | -0,035 |
| P115 | 99,88 | 102 | 91,23151293 | 9,91 | 1,21 | 0,0328 | -0,577 |
| P116 | 204,54 | 152 | 93,47394033 | 1,13 | 0,06 | 0,00008 | -0,276 |
| P117 | 104 | 102 | 67,96195457 | 4,57 | 0,56 | 0,01349 | -0,097 |
| P118 | 115,91 | 102 | 84,66525677 | 1,92 | 0,24 | 0,00181 | -0,938 |
| P119 | 64,88 | 305 | 78,1411898 | 0,3 | 0 | 0 | -0,363 |
| P12 | 85,24 | 406 | 89,66261184 | 105,29 | 0,81 | 0,00322 | -0,865 |
| P120 | 91,4 | 102 | 88,38904641 | 4,14 | 0,51 | 0,00689 | -0,806 |
| P121 | 42,23 | 152 | 100,3675691 | 0,54 | 0,03 | 0,00002 | -0,49 |

| Trecho | L (m) | D (mm) | C (m ^{0,367} /s) | Q (L/s) | V (m/s) | ∇H | K _w (m/dia) |
|--------|----------|-----------|------------------------------|------------|------------|---------|---------------------------|
| P122 | 45,06 | 305 | 78,97804998 | 11,11 | 0,15 | 0,00025 | -0,333 |
| P123 | 51,21 | 152 | 61,06139089 | 2,74 | 0,15 | 0,00091 | -0,819 |
| P124 | 99,09 | 102 | 78,83034804 | 0,93 | 0,11 | 0,00054 | -0,822 |
| P125 | 193,35 | 508 | 84,73893721 | 5,73 | 0,03 | 0,00001 | -0,924 |
| P126 | 109,6 | 76 | 89,73794074 | 0,99 | 0,22 | 0,00199 | -0,271 |
| P127 | 87,22 | 102 | 73,67740117 | 1,49 | 0,18 | 0,00146 | -0,794 |
| P128 | 165,63 | 102 | 90,94829628 | 0,97 | 0,12 | 0,00045 | -0,42 |
| P129 | 79,59 | 102 | 78,06619059 | 0,72 | 0,09 | 0,00034 | -0,645 |
| P13 | 62,56 | 406 | 83,04378688 | 111,37 | 0,86 | 0,00412 | -0,667 |
| P130 | 56,79 | 76 | 70,70724159 | 1,54 | 0,34 | 0,00699 | -0,924 |
| P131 | 86,5 | 76 | 74,72670795 | 0,37 | 0,08 | 0,00046 | -0,077 |
| P132 | 67,35 | 76 | 88,54168235 | 1,14 | 0,25 | 0,00265 | -0,45 |
| P134 | 68,79 | 76 | 78,56802703 | 1,69 | 0,37 | 0,00685 | -0,602 |
| P136 | 241,77 | 102 | 75,73324573 | 1,79 | 0,22 | 0,00195 | -0,799 |
| P138 | 19,28 | 254 | 72,48528099 | 42,86 | 0,85 | 0,00888 | -0,642 |
| P139 | 73,66 | 406 | 68,718495 | 104,81 | 0,81 | 0,00523 | -0,628 |
| P14 | 151,39 | 406 | 72,00911504 | 112,45 | 0,87 | 0,00546 | -0,33 |
| P140 | 222,3 | 102 | 107,8347395 | 1,13 | 0,14 | 0,00043 | -0,811 |
| P141 | 169,94 | 102 | 103,7880571 | 1,94 | 0,24 | 0,00126 | -0,764 |
| P142 | 16,61 | 152,4 | 85,39068455 | 3,4 | 0,19 | 0,00072 | -0,13 |
| P144 | 130,79 | 76 | 99,91906661 | 0 | 0 | 0 | -0,713 |
| P147 | 60,08 | 203 | 92,837036 | 0,86 | 0,03 | 0,00001 | -0,335 |
| P148 | 561,69 | 305 | 96,43940809 | 33,83 | 0,46 | 0,00138 | -0,912 |
| P15 | 395,29 | 406 | 90,48302153 | 113,36 | 0,88 | 0,00363 | -0,612 |
| P150 | 93,19 | 152 | 103,1527295 | 0,6 | 0,03 | 0,00002 | -0,707 |
| P154 | 170,64 | 152 | 108,8315571 | 15,24 | 0,84 | 0,00752 | -0,259 |
| P155 | 59,38 | 101,6 | 105,7092049 | 5,89 | 0,73 | 0,0097 | -0,74 |
| P156 | 80,34 | 102 | 110,8685183 | 0,49 | 0,06 | 0,00009 | -0,547 |
| P157 | 232,93 | 102 | 102,9010036 | 2,82 | 0,34 | 0,00256 | -0,564 |
| P158 | 69,88 | 76 | 105,0723995 | 1,03 | 0,23 | 0,0016 | -0,502 |
| P159 | 118,78 | 203 | 80,14718268 | 2,92 | 0,09 | 0,00015 | -0,715 |
| P16 | 252,34 | 102 | 97,24831268 | 4,61 | 0,56 | 0,00705 | -0,462 |
| P160 | 68,68 | 76 | 104,6278726 | 2,1 | 0,46 | 0,00602 | -0,251 |
| P161 | 40,31 | 76 | 90,01325959 | 3,52 | 0,78 | 0,02076 | -0,293 |
| P162 | 190,67 | 152 | 98,76064267 | 24,09 | 1,33 | 0,02101 | -0,281 |
| P163 | 67,74 | 203 | 94,23019998 | 1,54 | 0,05 | 0,00003 | -0,767 |
| P165 | 143,81 | 305 | 92,93426098 | 33,8 | 0,46 | 0,00148 | -0,438 |
| P166 | 235 | 101,6 | 93,60266001 | 3,42 | 0,42 | 0,00445 | -0,867 |
| P17 | 32,42 | 508 | 77,28134214 | 81,34 | 0,4 | 0,00088 | -0,171 |
| P174 | 278,59 | 102 | 89,32071004 | 1,36 | 0,17 | 0,00086 | -0,789 |
| P177 | 56,8 | 102 | 100,6056442 | 1,12 | 0,14 | 0,00048 | -0,59 |
| P18 | 283,3 | 508 | 100,3 | 77,62 | 0,38 | 0,0005 | -0,183 |
| P184 | 59,38 | 101,6 | 95,91470923 | 7,87 | 0,97 | 0,01986 | -0,022 |
| P19 | 750,87 | 508 | 97,7 | 12,74 | 0,06 | 0,00002 | -0,477 |
| P195 | 144,33 | 76 | 80,6314204 | 1,44 | 0,32 | 0,00486 | -0,47 |
| P2 | 295,25 | 203 | 62,04782884 | 5,26 | 0,16 | 0,00072 | -0,55 |
| P20 | 579,67 | 508 | 89,67250259 | 27,1 | 0,13 | 0,00009 | -0,032 |

| Trecho | L (m) | D (mm) | C (m ^{0,367} /s) | Q (L/s) | V (m/s) | ∇H | K _w (m/dia) |
|--------|----------|-----------|------------------------------|------------|------------|---------|---------------------------|
| P201 | 102,19 | 76 | 96,62781785 | 1,21 | 0,27 | 0,0025 | -0,366 |
| P21 | 176,48 | 406 | 86,69368007 | 51,72 | 0,4 | 0,00092 | -0,122 |
| P211 | 202,33 | 76 | 84,05170372 | 0,89 | 0,2 | 0,00184 | -0,042 |
| P215 | 140,76 | 254 | 81,42351414 | 31,04 | 0,61 | 0,00394 | -0,476 |
| P218 | 54,55 | 102 | 81,77139586 | 1,01 | 0,12 | 0,00059 | -0,163 |
| P219 | 67,98 | 102 | 86,8360308 | 0,51 | 0,06 | 0,00015 | -0,29 |
| P22 | 567,3 | 406 | 81,11362312 | 117,88 | 0,91 | 0,00478 | -0,723 |
| P220 | 68,33 | 76 | 93,73758011 | 1,06 | 0,23 | 0,00209 | -0,235 |
| P223 | 108,98 | 203 | 93,21702289 | 1,08 | 0,03 | 0,00002 | -0,872 |
| P225 | 120,77 | 102 | 92,68551418 | 0,13 | 0,02 | 0,00001 | -0,365 |
| P228 | 42,72 | 76 | 99,28890046 | 1,64 | 0,36 | 0,00419 | -0,305 |
| P23 | 316,91 | 508 | 77,16263034 | 116,33 | 0,57 | 0,00172 | -0,371 |
| P230 | 114,61 | 76 | 77,39533937 | 1,62 | 0,36 | 0,0065 | -0,773 |
| P231 | 12,21 | 76 | 98,41544449 | 1,15 | 0,25 | 0,0022 | -0,779 |
| P233 | 58,66 | 76 | 97,29593266 | 0,84 | 0,19 | 0,00127 | -0,994 |
| P234 | 41,63 | 76 | 87,20981831 | 1,69 | 0,37 | 0,00567 | -0,305 |
| P235 | 92,74 | 76 | 84,32189979 | 5,33 | 1,17 | 0,05037 | -0,166 |
| P237 | 12,01 | 305 | 5,0585 | 49,87 | 0,68 | 0,66762 | -0,315 |
| P238 | 12,59 | 304,8 | 104,739957 | 49,87 | 0,68 | 0,00245 | -0,988 |
| P24 | 71,05 | 508 | 88,62083113 | 97,64 | 0,48 | 0,00096 | -0,382 |
| P241 | 49,46 | 102 | 114,8367119 | 0,79 | 0,1 | 0,0002 | -0,169 |
| P242 | 25,06 | 152,4 | 99,0149834 | 2,53 | 0,14 | 0,00032 | -0,375 |
| P243 | 57,08 | 203,2 | 82,79621449 | 5,56 | 0,17 | 0,00047 | -0,791 |
| P245 | 18,65 | 152,4 | 120,3989086 | 33,62 | 1,84 | 0,02665 | -0,667 |
| P246 | 56,94 | 152,4 | 121,5967586 | 20,6 | 1,13 | 0,01056 | -0,481 |
| P248 | 6,96 | 152,4 | 110,0672989 | 18,71 | 1,03 | 0,01063 | -0,083 |
| P249 | 28,43 | 51 | 85,38083927 | 0,84 | 0,41 | 0,01115 | -0,028 |
| P25 | 4,3 | 508 | 74,37733692 | 109,75 | 0,54 | 0,00165 | -0,038 |
| P251 | 11,49 | 152 | 103,73326 | 17,35 | 0,96 | 0,01045 | -0,494 |
| P252 | 135,44 | 305 | 82,30042619 | 49,87 | 0,68 | 0,00381 | -0,713 |
| P255 | 76,14 | 51 | 71,46719262 | 0,17 | 0,08 | 0,00084 | -0,426 |
| P256 | 55,17 | 305 | 94,85911557 | 49,87 | 0,68 | 0,00293 | -0,33 |
| P258 | 79,53 | 102 | 75,51228399 | 0,04 | 0 | 0 | -0,179 |
| P259 | 136,09 | 102 | 83,09359309 | 0,22 | 0,03 | 0,00003 | -0,561 |
| P26 | 22,94 | 508 | 88,00750201 | 5,45 | 0,03 | 0 | -0,282 |
| P264 | 11,73 | 101,6 | 112,505063 | 0,72 | 0,09 | 0,00018 | -0,17 |
| P266 | 55,29 | 101,6 | 107,0557801 | 1,76 | 0,22 | 0,00101 | -0,302 |
| P267 | 344,62 | 152,4 | 95,59127017 | 0,38 | 0,02 | 0,00001 | -0,935 |
| P268 | 146,46 | 152,4 | 86,83782705 | 2,58 | 0,14 | 0,00042 | -0,446 |
| P27 | 163,63 | 254 | 69,10553047 | 2,4 | 0,05 | 0,00005 | -0,831 |
| P270 | 88,36 | 101,6 | 92,76968792 | 1,09 | 0,13 | 0,00055 | -0,773 |
| P272 | 143,88 | 102 | 73,95290985 | 1,93 | 0,24 | 0,00235 | -0,227 |
| P275 | 172,96 | 152,4 | 98,1648787 | 0,95 | 0,05 | 0,00005 | -0,483 |
| P28 | 117,42 | 152 | 88,26665116 | 1,16 | 0,06 | 0,00009 | -0,641 |
| P280 | 333,4 | 203 | 88,34304078 | 0 | 0 | 0 | -0,866 |
| P282 | 131,93 | 102 | 86,72041921 | 3,93 | 0,48 | 0,00648 | -0,595 |
| P284 | 198,97 | 76,2 | 89,12500159 | 1,1 | 0,24 | 0,00243 | -0,479 |

| Trecho | L (m) | D (mm) | C (m ^{0,367} /s) | Q (L/s) | V (m/s) | ∇H | K _w (m/dia) |
|--------|----------|-----------|------------------------------|------------|------------|---------|---------------------------|
| P285 | 130,71 | 76,2 | 90,18255066 | 0,11 | 0,02 | 0,00003 | -0,043 |
| P286 | 155,58 | 101,6 | 90,00536972 | 0,46 | 0,06 | 0,00011 | -0,112 |
| P287 | 45,12 | 254 | 78,34930836 | 31,04 | 0,61 | 0,00423 | -0,557 |
| P288 | 226,74 | 76,2 | 85,05269358 | 1,97 | 0,43 | 0,00773 | -0,45 |
| P29 | 20,51 | 152 | 89,48380518 | 1,02 | 0,06 | 0,00007 | -0,632 |
| P290 | 46,28 | 76,2 | 89,4448254 | 0,42 | 0,09 | 0,0004 | -0,788 |
| P291 | 132,94 | 305 | 107,0799731 | 49,87 | 0,68 | 0,00234 | -0,064 |
| P292 | 13,54 | 305 | 97,26629793 | 49,87 | 0,68 | 0,0028 | -0,709 |
| P293 | 125,2 | 305 | 92,15913275 | 49,87 | 0,68 | 0,00309 | -0,46 |
| P294 | 101,2 | 102 | 79,96510184 | 1,99 | 0,24 | 0,00214 | -0,568 |
| P295 | 133,23 | 76 | 72,40920176 | 5,23 | 1,15 | 0,06464 | -0,749 |
| P296 | 231,87 | 76 | 82,95723709 | 2,49 | 0,55 | 0,01272 | -0,26 |
| P297 | 42,53 | 406 | 73 | 89,64 | 0,69 | 0,0035 | -0,278 |
| P298 | 40,11 | 305 | 84,55106971 | 64,98 | 0,89 | 0,00592 | -0,697 |
| P299 | 61,51 | 102 | 87,70989261 | 3,31 | 0,4 | 0,00462 | -0,437 |
| P3 | 136,52 | 300 | 73,64913862 | 10,14 | 0,14 | 0,00027 | -0,908 |
| P30 | 40,89 | 254 | 86,70955075 | 2,34 | 0,05 | 0,00003 | -0,871 |
| P301 | 45,31 | 305 | 85,18923941 | 64,19 | 0,88 | 0,00571 | -0,083 |
| P302 | 178,28 | 305 | 80,34022293 | 63,9 | 0,87 | 0,00631 | -0,386 |
| P303 | 131,94 | 76 | 88,33454494 | 1,06 | 0,23 | 0,00231 | -0,893 |
| P304 | 268,74 | 101,6 | 89,39267725 | 0,59 | 0,07 | 0,00019 | -0,12 |
| P305 | 43,41 | 203 | 90,79931312 | 0 | 0 | 0 | -0,864 |
| P307 | 47,3 | 305 | 60,51223799 | 61,16 | 0,84 | 0,00983 | -0,691 |
| P308 | 334,57 | 305 | 88,07717274 | 49,87 | 0,68 | 0,00336 | -0,682 |
| P309 | 128,8 | 101,6 | 94,95597676 | 0,99 | 0,12 | 0,00044 | -0,338 |
| P31 | 144,67 | 152 | 108,7731191 | 1,75 | 0,1 | 0,00014 | -0,976 |
| P310 | 9 | 610 | 87,26802597 | 119,5 | 0,41 | 0,00059 | -0,838 |
| P316 | 11,62 | 610 | 70,45194642 | 119,5 | 0,41 | 0,00088 | -0,651 |
| P319 | 10,54 | 610 | 76,59274096 | 0 | 0 | 0 | -0,126 |
| P32 | 84,44 | 152 | 103,5584403 | 2,49 | 0,14 | 0,00029 | -0,268 |
| P320 | 11,47 | 610 | 76,51881041 | 119,5 | 0,41 | 0,00075 | -0,67 |
| P322 | 11,5 | 610 | 89,43312359 | 119,5 | 0,41 | 0,00056 | -0,989 |
| P323 | 11,47 | 610 | 84,68719833 | 0 | 0 | 0 | -0,193 |
| P329 | 134,52 | 152 | 100,1835818 | 2,95 | 0,16 | 0,00042 | -0,792 |
| P33 | 22,81 | 254 | 73,03598003 | 0,29 | 0,01 | 0 | -0,264 |
| P330 | 66,79 | 76 | 96,42287802 | 1,39 | 0,31 | 0,00326 | -0,965 |
| P331 | 93,46 | 51 | 93,19325097 | 0,57 | 0,28 | 0,00465 | -0,105 |
| P336 | 182,99 | 152 | 92,1736733 | 2,51 | 0,14 | 0,00036 | -0,512 |
| P337 | 20,49 | 305 | 5,6181 | 6,71 | 0,09 | 0,01338 | -0,73 |
| P338 | 74,38 | 76 | 100,3553057 | 0,22 | 0,05 | 0,0001 | -0,612 |
| P339 | 307,49 | 102 | 88,65301931 | 1,29 | 0,16 | 0,00079 | -0,63 |
| P34 | 98 | 508 | 78,50596539 | 96,13 | 0,47 | 0,00117 | -0,226 |
| P340 | 96,21 | 305 | 101,082424 | 21,38 | 0,29 | 0,00054 | -0,738 |
| P341 | 189,74 | 305 | 94,6355163 | 19,87 | 0,27 | 0,00054 | -0,819 |
| P343 | 111,65 | 152 | 100,2909021 | 3,43 | 0,19 | 0,00055 | -0,813 |
| P344 | 45,26 | 152 | 85,90916474 | 7,78 | 0,43 | 0,00335 | -0,495 |
| P346 | 54,91 | 51 | 93,91341161 | 0,08 | 0,04 | 0,00013 | -0,229 |

| Trecho | L (m) | D (mm) | C (m ^{0,367} /s) | Q (L/s) | V (m/s) | ∇H | K _w (m/dia) |
|--------|----------|-----------|------------------------------|------------|------------|---------|---------------------------|
| P347 | 385,56 | 305 | 96,23520379 | 4,25 | 0,06 | 0,00003 | -0,468 |
| P348 | 42,47 | 305 | 88,72950781 | 2,94 | 0,04 | 0,00002 | -0,348 |
| P349 | 39,12 | 305 | 97,01243523 | 0,1 | 0 | 0 | -0,228 |
| P35 | 64,56 | 152 | 84,3826461 | 0,12 | 0,01 | 0 | -0,915 |
| P350 | 400,16 | 203 | 99,85976755 | 0,8 | 0,02 | 0,00001 | -0,339 |
| P37 | 180,61 | 203 | 97,80387751 | 0,22 | 0,01 | 0 | -0,184 |
| P372 | 6,42 | 101,6 | 113,1146519 | 7,86 | 0,97 | 0,01462 | -0,355 |
| P374 | 15,83 | 254 | 91,91560418 | 0 | 0 | 0 | -0,317 |
| P375 | 7,79 | 254 | 75,48935679 | 0 | 0 | 0 | -0,17 |
| P376 | 6,64 | 254 | 102,6856466 | 0 | 0 | 0 | -0,21 |
| P378 | 6,47 | 254 | 112,4496521 | 0 | 0 | 0 | -0,582 |
| P379 | 6,43 | 254 | 101,7753453 | 49,87 | 0,98 | 0,00627 | -0,029 |
| P38 | 169,49 | 76 | 106,4650405 | 0,73 | 0,16 | 0,00083 | -0,653 |
| P380 | 4,79 | 254 | 87,81324875 | 49,87 | 0,98 | 0,00824 | -0,829 |
| P381 | 5,53 | 304,8 | 119,20713 | 49,87 | 0,68 | 0,00193 | -0,954 |
| P383 | 19,56 | 152 | 80,14926659 | 6,01 | 0,33 | 0,00236 | -0,028 |
| P384 | 26,14 | 76 | 101,9126563 | 4,33 | 0,96 | 0,02421 | -0,324 |
| P385 | 106,53 | 305 | 76,02373041 | 20,93 | 0,29 | 0,00088 | -0,018 |
| P386 | 8,12 | 152 | 79,90108822 | 11,85 | 0,65 | 0,00837 | -0,191 |
| P39 | 190,12 | 102 | 95,4375542 | 0,35 | 0,04 | 0,00006 | -0,364 |
| P397 | 13,16 | 203,2 | 87,42718755 | 64,92 | 2 | 0,04015 | -0,623 |
| P398 | 6,75 | 203,2 | 91,05042408 | 30,23 | 0,93 | 0,00904 | -0,188 |
| P399 | 9,71 | 203,2 | 81,41362338 | 30,23 | 0,93 | 0,01112 | -0,61 |
| P40 | 143,64 | 102 | 107,9143544 | 5,23 | 0,64 | 0,00736 | -0,9 |
| P402 | 6,12 | 203,2 | 89,1549467 | 0 | 0 | 0 | -0,458 |
| P403 | 6,86 | 152,4 | 111,4725023 | 34,69 | 1,9 | 0,03257 | -0,944 |
| P409 | 26,38 | 152,4 | 89,89786692 | 34,69 | 1,9 | 0,04851 | -0,774 |
| P410 | 7,7 | 203,2 | 85,6676939 | 0 | 0 | 0 | -0,252 |
| P42 | 32,93 | 152 | 114,9190666 | 6,44 | 0,35 | 0,00138 | -0,279 |
| P424 | 27,8 | 203,2 | 124,9856956 | 30,23 | 0,93 | 0,00503 | -0,447 |
| P43 | 36,18 | 203 | 88,53730832 | 0,35 | 0,01 | 0 | -0,195 |
| P44 | 247,65 | 152 | 115,1681772 | 13,85 | 0,76 | 0,00567 | -0,183 |
| P443 | 67,31 | 305 | 85,57602477 | 60,65 | 0,83 | 0,00509 | -0,96 |
| P445 | 7,8 | 254 | 86,21060196 | 81,74 | 1,61 | 0,02129 | -0,939 |
| P446 | 31,15 | 254 | 102,1976464 | 0 | 0 | 0 | -0,333 |
| P450 | 19,47 | 254 | 96,96505055 | 0 | 0 | 0 | -0,712 |
| P46 | 70,86 | 102 | 112,662633 | 0,15 | 0,02 | 0,00001 | -0,864 |
| P465 | 18,2 | 254 | 86,56539928 | 80,9 | 1,6 | 0,02073 | -0,881 |
| P467 | 15,17 | 254 | 96,15411097 | 80,9 | 1,6 | 0,01707 | -0,307 |
| P468 | 31,29 | 254 | 105,2733756 | 49,87 | 0,98 | 0,00589 | -0,268 |
| P48 | 28,98 | 152 | 113,5196498 | 5,68 | 0,31 | 0,00112 | -0,855 |
| P482 | 321,89 | 152 | 78,90389206 | 2,6 | 0,14 | 0,00052 | -0,603 |
| P484 | 336,57 | 203 | 79,98 | 23,45 | 0,72 | 0,00722 | -0,707 |
| P49 | 134,92 | 152 | 121,7050339 | 0,93 | 0,05 | 0,00003 | -0,88 |
| P492 | 157,32 | 101,6 | 114,1136636 | 0,33 | 0,04 | 0,00004 | -0,682 |
| P5 | 588,97 | 406 | 83,56188054 | 7,35 | 0,06 | 0,00003 | -0,417 |
| P500 | 24,23 | 203 | 112,6227522 | 0,54 | 0,02 | 0 | -0,901 |

| Trecho | L (m) | D (mm) | C (m ^{0,367} /s) | Q (L/s) | V (m/s) | ∇H | K _w (m/dia) |
|--------|----------|-----------|------------------------------|------------|------------|---------|---------------------------|
| P501 | 11,32 | 152,4 | 111,4535058 | 1,62 | 0,09 | 0,00011 | -0,821 |
| P502 | 9,19 | 76,2 | 99,5945589 | 1,57 | 0,34 | 0,00381 | -0,372 |
| P51 | 57,47 | 102 | 92,23786036 | 3,39 | 0,41 | 0,00441 | -0,325 |
| P510 | 193,37 | 102 | 104,9547114 | 0 | 0 | 0 | -0,039 |
| P52 | 83,26 | 102 | 89,65416834 | 1,69 | 0,21 | 0,00128 | -0,539 |
| P524 | 170,54 | 305 | 96,22781415 | 1,05 | 0,01 | 0 | -0,345 |
| P527 | 149,04 | 305 | 73,12421582 | 5,88 | 0,08 | 0,00009 | -0,498 |
| P529 | 212,31 | 102 | 103,917751 | 1,28 | 0,16 | 0,00058 | -0,221 |
| P53 | 10,32 | 203 | 87,56071617 | 30,23 | 0,93 | 0,00977 | -0,565 |
| P54 | 111,67 | 51 | 92,39787511 | 1,18 | 0,58 | 0,01825 | -0,571 |
| P55 | 99,86 | 76 | 87,65298441 | 1,33 | 0,29 | 0,00358 | -0,807 |
| P57 | 288,77 | 152 | 99,59669568 | 24,72 | 1,36 | 0,02169 | -0,919 |
| P58 | 503,91 | 102 | 100,8491608 | 8,77 | 1,07 | 0,02171 | -0,96 |
| P596 | 76,39 | 76 | 112,8056283 | 1,25 | 0,27 | 0,00199 | -0,12 |
| P597 | 79,68 | 102 | 101,1211685 | 0,7 | 0,09 | 0,0002 | -0,233 |
| P6 | 199,39 | 152 | 94,64505119 | 0,3 | 0,02 | 0,00001 | -0,168 |
| P609 | 86,07 | 76 | 111,6336079 | 2,21 | 0,49 | 0,00588 | -0,418 |
| P610 | 206,58 | 76 | 95,7997832 | 0 | 0 | 0 | -0,274 |
| P63 | 165,95 | 254 | 88,72727612 | 3,69 | 0,07 | 0,00007 | -0,288 |
| P633 | 173,88 | 152 | 119,1332558 | 7,83 | 0,43 | 0,00185 | -0,892 |
| P64 | 126,63 | 203 | 80,24772732 | 2,84 | 0,09 | 0,00014 | -0,885 |
| P65 | 164,93 | 102 | 101,9472625 | 2,89 | 0,35 | 0,00272 | -0,383 |
| P67 | 330,24 | 203 | 74,11384494 | 2,29 | 0,07 | 0,00011 | -0,767 |
| P670 | 54,41 | 152 | 98,70407263 | 0 | 0 | 0 | -0,296 |
| P671 | 62,97 | 152 | 94,83787887 | 0 | 0 | 0 | -0,613 |
| P68 | 302,74 | 305 | 83,22085413 | 1,64 | 0,02 | 0,00001 | -0,536 |
| P69 | 103,63 | 152 | 72,35176717 | 6,7 | 0,37 | 0,00349 | -0,15 |
| P697 | 88,89 | 102 | 97,76254098 | 0 | 0 | 0 | -0,517 |
| P7 | 60,22 | 508 | 78,45371492 | 103,53 | 0,51 | 0,00134 | -0,413 |
| P70 | 88,36 | 152 | 72,84389475 | 3,02 | 0,17 | 0,00079 | -0,222 |
| P71 | 419,4 | 254 | 84,7287395 | 0,63 | 0,01 | 0 | -0,574 |
| P72 | 247,46 | 305 | 85,0356826 | 3,8 | 0,05 | 0,00003 | -0,333 |
| P724 | 92,72 | 152 | 96,70704964 | 0,48 | 0,03 | 0,00002 | -0,703 |
| P725 | 117,32 | 152 | 105,2924295 | 1,1 | 0,06 | 0,00006 | -0,495 |
| P752 | 70,36 | 152 | 106,1657491 | 0,2 | 0,01 | 0 | -0,21 |
| P753 | 71,91 | 152 | 89,52407649 | 0,11 | 0,01 | 0 | -0,738 |
| P754 | 92,49 | 51 | 84,82770733 | 0 | 0 | 0 | -0,125 |
| P755 | 47,12 | 305 | 114,1298526 | 1,06 | 0,01 | 0 | -0,37 |
| P756 | 41,66 | 305 | 107,9166509 | 1,19 | 0,02 | 0 | -0,682 |
| P757 | 568,43 | 305 | 99,83133104 | 2,12 | 0,03 | 0,00001 | -0,551 |
| P758 | 102,21 | 305 | 93,35734311 | 3,31 | 0,05 | 0,00002 | -0,437 |
| P759 | 97,19 | 152 | 104,4350261 | 2,4 | 0,13 | 0,00026 | -0,654 |
| P760 | 88,54 | 152 | 101,8544486 | 2,67 | 0,15 | 0,00034 | -0,338 |
| P761 | 171,27 | 152 | 96,99210802 | 3,24 | 0,18 | 0,00053 | -0,858 |
| P763 | 387,59 | 305 | 112,2055437 | 2,43 | 0,03 | 0,00001 | -0,702 |
| P766 | 37,85 | 152 | 95,03726284 | 2,05 | 0,11 | 0,00024 | -0,495 |
| P767 | 227,5 | 305 | 109,3148967 | 4,98 | 0,07 | 0,00003 | -0,69 |

| Trecho | L (m) | D (mm) | C (m ^{0,367} /s) | Q (L/s) | V (m/s) | ∇H | K _w (m/dia) |
|--------|----------|-----------|------------------------------|------------|------------|---------|---------------------------|
| P768 | 217,03 | 254 | 116,5115918 | 1,16 | 0,02 | 0 | -0,414 |
| P769 | 154,26 | 305 | 110,6185664 | 5,77 | 0,08 | 0,00004 | -0,35 |
| P771 | 69,36 | 203 | 99,63218871 | 0,58 | 0,02 | 0,00001 | -0,496 |
| P772 | 215,02 | 305 | 85,80309439 | 7,36 | 0,1 | 0,0001 | -0,603 |
| P775 | 129,42 | 203 | 108,382028 | 0,48 | 0,01 | 0 | -0,993 |
| P776 | 421,07 | 102 | 114,3497002 | 0,24 | 0,03 | 0,00002 | -0,373 |
| P777 | 402,31 | 305 | 111,7656211 | 7,87 | 0,11 | 0,00007 | -0,97 |
| P779 | 524,49 | 203 | 87,90984792 | 8,61 | 0,27 | 0,00095 | -0,342 |
| P780 | 153,56 | 203 | 104,9547114 | 0 | 0 | 0 | -0,25 |
| P781 | 130,18 | 152 | 90,91406861 | 5,51 | 0,3 | 0,00159 | -0,546 |
| P783 | 674,96 | 203 | 115,0802063 | 10,54 | 0,33 | 0,00084 | -0,253 |
| P784 | 88,96 | 102 | 98,4320195 | 0,4 | 0,05 | 0,00007 | -0,302 |
| P785 | 184,71 | 102 | 89,6475285 | 0,93 | 0,11 | 0,00043 | -0,894 |
| P786 | 166,27 | 203 | 110,0001555 | 10,69 | 0,33 | 0,00093 | -0,975 |
| P787 | 127,08 | 102 | 130,1224074 | 20,49 | 2,51 | 0,06524 | -0,831 |
| P788 | 107,85 | 152 | 113,9140977 | 8,57 | 0,47 | 0,00238 | -0,913 |
| P789 | 285,95 | 203 | 74,96865627 | 13,45 | 0,42 | 0,00291 | -0,418 |
| P791 | 82,5 | 152 | 115,9461135 | 6,73 | 0,37 | 0,00147 | -0,091 |
| P794 | 39,04 | 203 | 123,9466201 | 6,45 | 0,2 | 0,00029 | -0,25 |
| P795 | 129,41 | 203 | 97,7802756 | 5,15 | 0,16 | 0,0003 | -0,155 |
| P796 | 22,42 | 203 | 89,87622094 | 0 | 0 | 0 | -0,089 |
| P797 | 21,64 | 102 | 117,0541964 | 1,12 | 0,14 | 0,00036 | -0,541 |
| P798 | 684,07 | 203 | 116,0879492 | 4,61 | 0,14 | 0,00018 | -0,136 |
| P8 | 11,35 | 406 | 76,077444 | 96,11 | 0,74 | 0,00369 | -0,865 |
| P800 | 15,93 | 203 | 109,6676101 | 1,7 | 0,05 | 0,00003 | -0,778 |
| P801 | 9,47 | 203 | 104,4688588 | 0,23 | 0,01 | 0 | -0,284 |
| P804 | 68,27 | 102 | 103,0053454 | 3,02 | 0,37 | 0,0029 | -0,752 |
| P805 | 96,57 | 152 | 114,5601573 | 3,67 | 0,2 | 0,00049 | -0,512 |
| P806 | 32,51 | 152 | 103,8989922 | 4,01 | 0,22 | 0,00069 | -0,925 |
| P807 | 162,82 | 203 | 100,1492592 | 0,28 | 0,01 | 0 | -0,508 |
| P808 | 253,47 | 203 | 92,06420424 | 11,23 | 0,35 | 0,00142 | -0,28 |
| P809 | 17,35 | 102 | 109,3502993 | 1,24 | 0,15 | 0,0005 | -0,596 |
| P810 | 64,3 | 203 | 88,93896444 | 0 | 0 | 0 | -0,861 |
| P811 | 50,17 | 102 | 89,56723202 | 2,04 | 0,25 | 0,00181 | -0,957 |
| P813 | 30,85 | 152 | 76,0415565 | 15,46 | 0,85 | 0,015 | -0,404 |
| P815 | 50,52 | 102 | 84,34217359 | 17,22 | 2,11 | 0,10553 | -0,483 |
| P817 | 253,3 | 203 | 72,65810772 | 7,64 | 0,24 | 0,00108 | -0,4 |
| P819 | 8,02 | 203 | 105,0732947 | 7,73 | 0,24 | 0,00056 | -0,07 |
| P821 | 64,78 | 102 | 83,94520189 | 0,19 | 0,02 | 0,00002 | -0,438 |
| P822 | 11,71 | 102 | 99,59355845 | 1,28 | 0,16 | 0,00063 | -0,894 |
| P823 | 18,84 | 76 | 113,3617729 | 0,26 | 0,06 | 0,00011 | -0,767 |
| P826 | 335,29 | 76 | 99,14858764 | 1,04 | 0,23 | 0,00181 | -0,135 |
| P827 | 119,07 | 76 | 103,740183 | 0,67 | 0,15 | 0,00073 | -0,803 |
| P83 | 15,14 | 610 | 75,66382855 | 118,7 | 0,41 | 0,00076 | -0,357 |
| P830 | 89,3 | 76 | 99,04404122 | 0,18 | 0,04 | 0,00007 | -0,92 |
| P831 | 62,2 | 76 | 86,2917659 | 3,46 | 0,76 | 0,02173 | -0,786 |
| P84 | 148,63 | 203 | 97,41353032 | 0,5 | 0,02 | 0 | -0,853 |

| Trecho | L (m) | D (mm) | C (m ^{0,367} /s) | Q (L/s) | V (m/s) | ∇H | K _w (m/dia) |
|--------|----------|-----------|------------------------------|------------|------------|---------|---------------------------|
| P840 | 235,28 | 203 | 97,77044222 | 13,12 | 0,41 | 0,0017 | -0,846 |
| P841 | 347,83 | 76 | 93,67657919 | 0,79 | 0,17 | 0,0012 | -0,056 |
| P842 | 64,41 | 52 | 95,52120444 | 1,13 | 0,53 | 0,01446 | -0,575 |
| P844 | 12,49 | 102 | 113,808278 | 2,56 | 0,31 | 0,00177 | -0,131 |
| P846 | 94,84 | 203 | 103,9804942 | 1,11 | 0,03 | 0,00002 | -0,502 |
| P847 | 68,63 | 152 | 91,07111508 | 1,47 | 0,08 | 0,00014 | -0,555 |
| P85 | 36,6 | 76 | 69,9267053 | 0,69 | 0,15 | 0,00163 | -0,232 |
| P850 | 241,13 | 101,6 | 112,5310973 | 2,09 | 0,26 | 0,00127 | -0,032 |
| P851 | 228,78 | 76 | 121,9332034 | 1,04 | 0,23 | 0,00124 | -0,956 |
| P852 | 40,39 | 203 | 105,3809228 | 1,77 | 0,05 | 0,00004 | -0,365 |
| P853 | 295,68 | 203 | 118,6474037 | 7,7 | 0,24 | 0,00044 | -0,181 |
| P855 | 37,88 | 102 | 114,8547426 | 0,77 | 0,09 | 0,00019 | -0,224 |
| P858 | 195,38 | 102 | 113,4099875 | 1,3 | 0,16 | 0,00051 | -0,495 |
| P859 | 90,81 | 152 | 95,28589543 | 5,5 | 0,3 | 0,00146 | -0,9 |
| P86 | 161 | 305 | 110,5 | 33,26 | 0,46 | 0,00104 | -0,543 |
| P861 | 110,79 | 152 | 87,94104359 | 0,93 | 0,05 | 0,00006 | -0,899 |
| P866 | 17,37 | 102 | 92,17383193 | 1,53 | 0,19 | 0,00102 | -0,301 |
| P87 | 80,03 | 203 | 76,39854111 | 1,83 | 0,06 | 0,00007 | -0,012 |
| P871 | 48,15 | 102 | 91,80712367 | 0,67 | 0,08 | 0,00022 | -0,802 |
| P880 | 112,84 | 76 | 86,03497853 | 0,44 | 0,1 | 0,00048 | -0,166 |
| P889 | 15,72 | 203 | 88,74112608 | 2,64 | 0,08 | 0,0001 | -0,695 |
| P89 | 104,3 | 152 | 78,43046596 | 2,06 | 0,11 | 0,00034 | -0,029 |
| P892 | 30,39 | 254 | 69,84847395 | 83,56 | 1,65 | 0,03275 | -0,831 |
| P9 | 49,95 | 254 | 66,74918886 | 43,89 | 0,87 | 0,01081 | -0,789 |
| P90 | 98,94 | 102 | 62,31894921 | 1,85 | 0,23 | 0,00297 | -0,782 |
| P91 | 572,34 | 102 | 94,33889253 | 0,45 | 0,05 | 0,0001 | -0,924 |
| P914 | 38,61 | 203 | 91,1800276 | 0 | 0 | 0 | -0,513 |
| P915 | 10,58 | 152 | 72,77251422 | 17,46 | 0,96 | 0,02038 | -0,208 |
| P92 | 63,12 | 203 | 83,1066216 | 0,96 | 0,03 | 0,00002 | -0,966 |
| P924 | 82,38 | 254 | 74,45899818 | 1,76 | 0,03 | 0,00002 | -0,182 |
| P927 | 348,88 | 406 | 84,53153832 | 0,08 | 0 | 0 | -0,318 |
| P929 | 83,31 | 203 | 90,08263129 | 0 | 0 | 0 | -0,911 |
| P930 | 78,95 | 203 | 88,2 | 0 | 0 | 0 | -0,414 |
| P931 | 248,4 | 203 | 87,08307229 | 0 | 0 | 0 | -0,761 |
| P932 | 381,56 | 203 | 84,96153948 | 0 | 0 | 0 | -0,89 |
| P933 | 130,54 | 305 | 87,94687626 | 49,87 | 0,68 | 0,00337 | -0,104 |
| P934 | 18,46 | 254 | 102,9935452 | 49,87 | 0,98 | 0,00613 | -0,451 |
| P935 | 152,13 | 305 | 100,0547405 | 33,83 | 0,46 | 0,00129 | -0,795 |
| P937 | 198,09 | 254 | 74,27786438 | 16,04 | 0,32 | 0,00138 | -0,036 |
| P938 | 168,95 | 254 | 74,4754521 | 13,48 | 0,27 | 0,00099 | -0,111 |
| P939 | 248,76 | 152 | 95,78927854 | 0,37 | 0,02 | 0,00001 | -0,357 |
| P94 | 51,35 | 305 | 139,0834768 | 0,08 | 0 | 0 | -0,04 |
| P940 | 187,99 | 152 | 99,28214747 | 0,28 | 0,02 | 0,00001 | -0,985 |
| P941 | 142,58 | 152 | 79,37276275 | 0,04 | 0 | 0 | -0,521 |
| P942 | 85,08 | 152 | 83,59468263 | 0,7 | 0,04 | 0,00004 | -0,061 |
| P943 | 84,21 | 76 | 86,77484454 | 0,47 | 0,1 | 0,00053 | -0,288 |
| P944 | 59,58 | 254 | 82,35304046 | 2,08 | 0,04 | 0,00003 | -0,915 |

| Trecho | L (m) | D (mm) | C (m ^{0,367} /s) | Q (L/s) | V (m/s) | ∇H | K _w (m/dia) |
|--------|----------|-----------|------------------------------|------------|------------|---------|---------------------------|
| P946 | 143,03 | 102 | 98,06099167 | 0,27 | 0,03 | 0,00004 | -0,485 |
| P947 | 122,43 | 152 | 76,80448613 | 0,91 | 0,05 | 0,00008 | -0,162 |
| P948 | 74,71 | 152 | 104,8490736 | 2,32 | 0,13 | 0,00025 | -0,455 |
| P949 | 24,39 | 254 | 92,68704895 | 2,79 | 0,06 | 0,00004 | -0,873 |
| P95 | 50,7 | 305 | 118,4307393 | 0,46 | 0,01 | 0 | -0,177 |
| P951 | 338,8 | 254 | 94,71306209 | 13,2 | 0,26 | 0,00061 | -0,665 |
| P953 | 495,66 | 254 | 85,4054411 | 9,37 | 0,18 | 0,00039 | -0,991 |
| P954 | 294,07 | 203 | 78,6689048 | 1,95 | 0,06 | 0,00007 | -0,655 |
| P955 | 131,74 | 102 | 85,18129613 | 0,36 | 0,04 | 0,00008 | -0,741 |
| P956 | 115,17 | 152 | 68,25287125 | 0,89 | 0,05 | 0,00009 | -0,899 |
| P957 | 51,05 | 152 | 98,15140681 | 0,07 | 0 | 0 | -0,866 |
| P958 | 122,41 | 102 | 105,3080501 | 0,35 | 0,04 | 0,00005 | -0,292 |
| P959 | 123,42 | 102 | 98,22065346 | 0,23 | 0,03 | 0,00003 | -0,387 |
| P96 | 53,72 | 254 | 87,90275096 | 82,78 | 1,63 | 0,02103 | -0,452 |
| P961 | 234,55 | 203 | 85,65392299 | 5,27 | 0,16 | 0,0004 | -0,501 |
| P962 | 49,83 | 152 | 90,74777544 | 0,77 | 0,04 | 0,00004 | -0,028 |
| P963 | 93,54 | 203 | 85,5303454 | 7,78 | 0,24 | 0,00083 | -0,783 |
| P964 | 129,91 | 152 | 96,26374712 | 2,48 | 0,14 | 0,00033 | -0,525 |
| P965 | 135,06 | 203 | 93,94273938 | 4,73 | 0,15 | 0,00028 | -0,559 |
| P966 | 31,32 | 203 | 82,50879936 | 1,56 | 0,05 | 0,00004 | -0,899 |
| P967 | 207,54 | 203 | 82,10707555 | 0,19 | 0,01 | 0 | -0,591 |
| P968 | 68,17 | 102 | 78,39635991 | 0,02 | 0 | 0 | -0,189 |
| P969 | 149,16 | 203 | 86,26720664 | 0,41 | 0,01 | 0 | -0,57 |
| P97 | 24,41 | 610 | 88,89531663 | 118,83 | 0,41 | 0,00056 | -0,91 |
| P970 | 165,04 | 203 | 87,79507815 | 2,34 | 0,07 | 0,00009 | -0,012 |
| P971 | 136,94 | 152 | 77,82946049 | 2,53 | 0,14 | 0,0005 | -0,462 |
| P972 | 219,42 | 152 | 82,66945023 | 2,41 | 0,13 | 0,00041 | -0,039 |
| P973 | 164,68 | 203 | 71,9318762 | 5,54 | 0,17 | 0,00061 | -0,443 |
| P974 | 186,4 | 203 | 72,71874828 | 4,64 | 0,14 | 0,00043 | -0,956 |
| P975 | 159,56 | 152 | 74,72359293 | 1,96 | 0,11 | 0,00034 | -0,326 |
| P976 | 83,33 | 76 | 83,20228114 | 1,5 | 0,33 | 0,00491 | -0,551 |
| P977 | 45,98 | 102 | 102,4316821 | 0,79 | 0,1 | 0,00025 | -0,314 |
| P978 | 178,97 | 76 | 78,85562406 | 2,65 | 0,58 | 0,01564 | -0,991 |
| P98 | 174,53 | 610 | 71,75234195 | 119,27 | 0,41 | 0,00084 | -0,558 |
| P981 | 36,19 | 76 | 80,21622813 | 3,84 | 0,85 | 0,03017 | -0,334 |
| P982 | 87,24 | 203 | 98,51140755 | 1,8 | 0,06 | 0,00004 | -0,304 |
| P983 | 180,2 | 101,6 | 91,89644795 | 3,88 | 0,48 | 0,0058 | -0,161 |
| P984 | 16,03 | 101,6 | 108,9554876 | 1,26 | 0,16 | 0,00053 | -0,558 |
| P986 | 229,54 | 101,6 | 87,08395905 | 0,59 | 0,07 | 0,0002 | -0,429 |
| P987 | 94,56 | 101,6 | 96,40637069 | 0,8 | 0,1 | 0,00028 | -0,205 |
| P988 | 9,74 | 101,6 | 102,5172429 | 2,79 | 0,34 | 0,00258 | -0,392 |
| P989 | 91,59 | 51 | 82,07033197 | 0,44 | 0,22 | 0,00369 | -0,193 |
| P99 | 452,37 | 508 | 96,63823156 | 91,69 | 0,45 | 0,00073 | -0,336 |
| P990 | 78,87 | 102 | 85,78766419 | 1,56 | 0,19 | 0,0012 | -0,183 |
| P991 | 20,25 | 203 | 74,3133426 | 23,92 | 0,74 | 0,00858 | -0,488 |
| P992 | 69,15 | 203 | 80,64075409 | 22,59 | 0,7 | 0,00663 | -0,546 |
| P993 | 63,52 | 203 | 80,23202717 | 20,37 | 0,63 | 0,00553 | -0,415 |

| Trecho | L (m) | D (mm) | C (m^{0,367}/s) | Q (L/s) | V (m/s) | ∇H | K_w (m/dia) |
|---------------|------------------|-------------------|------------------------------------|--------------------|--------------------|-----------|----------------------------------|
| P994 | 115,39 | 203 | 83,09435479 | 17,48 | 0,54 | 0,0039 | -0,735 |
| P995 | 228,99 | 152 | 82,49961346 | 23,89 | 1,32 | 0,02887 | -0,054 |
| P996 | 10,22 | 203 | 84,57606945 | 65,99 | 2,04 | 0,04422 | -0,181 |
| P997 | 154,87 | 203 | 96,61744961 | 42,47 | 1,31 | 0,01528 | -0,89 |
| P998 | 107,98 | 203 | 90,64077339 | 43,42 | 1,34 | 0,01792 | -0,915 |
| P999 | 81,67 | 254 | 68,70464794 | 41,78 | 0,82 | 0,00936 | -0,09 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE G – Gabarito referente aos nós para perdas de carga calculadas por Darcy-Weisbach – Rede C-Town: Battle of Calibration (2012)

| Nó | Consumo (L/s) | Cota do Terreno (m) | Carga Hidráulica (m) | Pressão (m) |
|-----------|--------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------|
| J511 | 0,95 | 105,08 | 135,85 | 30,77 |
| J411 | 0,72 | 8,95 | 71,75 | 62,8 |
| J414 | 0,78 | 34,36 | 68,67 | 34,31 |
| J415 | 0 | 65 | 140,98 | 75,98 |
| J416 | 0 | 42,6 | 140,89 | 98,29 |
| J417 | 1,04 | 37,38 | 67,36 | 29,98 |
| J418 | 0 | 37,39 | 66,75 | 29,36 |
| J419 | 0 | 40,5 | 66,23 | 25,73 |
| J310 | 1,01 | 51,84 | 105,43 | 53,59 |
| J311 | 0,88 | 55,95 | 105,45 | 49,5 |
| J312 | 0,06 | 68,48 | 105,06 | 36,58 |
| J313 | 0,51 | 67,66 | 105,05 | 37,39 |
| J314 | 1,16 | 14,94 | 71,37 | 56,43 |
| J315 | 1,06 | 16,03 | 71,22 | 55,19 |
| J316 | 0,5 | 12,98 | 71,68 | 58,7 |
| J318 | 1,19 | 53,67 | 104,96 | 51,29 |
| J319 | 1,08 | 39,29 | 104,96 | 65,67 |
| J210 | 0,08 | 7,01 | 71,99 | 64,98 |
| J211 | 1,28 | 11,27 | 72,05 | 60,78 |
| J212 | 0,49 | 7,87 | 71,96 | 64,09 |
| J214 | 0,71 | 8,67 | 71,82 | 63,15 |
| J217 | 1,03 | 10,98 | 71,64 | 60,66 |
| J218 | 0,07 | 7,68 | 72 | 64,32 |
| J219 | 0,84 | 52 | 112,69 | 60,69 |
| J110 | 0,63 | 15,92 | 73,01 | 57,09 |
| J420 | 0 | 39,99 | 66,41 | 26,42 |
| J421 | 0,84 | 37,09 | 67,18 | 30,09 |
| J422 | 0 | 38,81 | 66,75 | 27,94 |
| J1153 | 0,35 | 22,14 | 70,8 | 48,66 |
| J1154 | 0,38 | 14,61 | 71,11 | 56,5 |
| J1155 | 1,12 | 15,54 | 71,03 | 55,49 |
| J425 | 0 | 64,42 | 140,46 | 76,04 |
| J426 | 0 | 72,71 | 140,1 | 67,39 |
| J1157 | 1,33 | 22,21 | 70,8 | 48,59 |
| J427 | 0 | 67,65 | 140,85 | 73,2 |
| J1158 | 0,31 | 28,25 | 70,99 | 42,74 |
| J428 | 0,93 | 16,2 | 59,24 | 43,04 |
| J429 | 1,32 | 12,56 | 59,41 | 46,85 |
| J320 | 0,3 | 46,73 | 105,83 | 59,1 |
| J321 | 0,66 | 44,59 | 105,74 | 61,15 |
| J322 | 0,13 | 48,02 | 105,74 | 57,72 |
| J324 | 1,24 | 42,38 | 105,74 | 63,36 |
| J1056 | 0,91 | 7,64 | 71,77 | 64,13 |
| J327 | 0,02 | 49,68 | 106 | 56,32 |
| J1058 | 0,77 | 13,58 | 65,68 | 52,1 |
| J328 | 0,12 | 45,69 | 106,19 | 60,5 |
| J329 | 0,13 | 44,05 | 112,17 | 68,12 |

| Nó | Consumo (L/s) | Cota do Terreno (m) | Carga Hidráulica (m) | Pressão (m) |
|-----------|--------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------|
| J220 | 1,13 | 80 | 112,59 | 32,59 |
| J221 | 0,35 | 97,07 | 105 | 7,93 |
| J225 | 0,06 | 13,33 | 71,52 | 58,19 |
| J226 | 0,4 | 11,1 | 71,2 | 60,1 |
| J50 | 0,47 | 71,8 | 104,78 | 32,98 |
| J51 | 0,37 | 77,42 | 104,78 | 27,36 |
| J53 | 1,35 | 85 | 109,66 | 24,66 |
| J54 | 1,39 | 80 | 109,4 | 29,4 |
| J128 | 0,54 | 85,26 | 131,69 | 46,43 |
| J55 | 0,39 | 71 | 109,79 | 38,79 |
| J129 | 0,22 | 62,85 | 130,61 | 67,76 |
| J56 | 0,23 | 72 | 109,93 | 37,93 |
| J57 | 0,92 | 59 | 110,51 | 51,51 |
| J58 | 0,58 | 76 | 109,78 | 33,78 |
| J59 | 0,59 | 57 | 110,83 | 53,83 |
| J1160 | 0,96 | 24,91 | 66,51 | 41,6 |
| J1161 | 0,44 | 25,25 | 66,47 | 41,22 |
| J431 | 0,85 | 16,9 | 67,28 | 50,38 |
| J432 | 0,28 | 19,88 | 67,12 | 47,24 |
| J433 | 0,25 | 27,35 | 70,12 | 42,77 |
| J434 | 0,78 | 16,48 | 71,41 | 54,93 |
| J435 | 0,11 | 12,15 | 68,22 | 56,07 |
| J436 | 0,62 | 17,68 | 59,67 | 41,99 |
| J438 | 1,22 | 10,43 | 71,65 | 61,22 |
| J1169 | 0,38 | 55,42 | 105,06 | 49,64 |
| J439 | 1,06 | 17,78 | 58,95 | 41,17 |
| J330 | 0,47 | 58,25 | 105,4 | 47,15 |
| J331 | 0,36 | 59,26 | 105,38 | 46,12 |
| J332 | 1,07 | 44,18 | 64,3 | 20,12 |
| J333 | 0,85 | 25,7 | 68,2 | 42,5 |
| J334 | 0,84 | 29,28 | 68,12 | 38,84 |
| J335 | 0,58 | 25,08 | 68,43 | 43,35 |
| J336 | 0,13 | 23,81 | 69,09 | 45,28 |
| J337 | 0,75 | 22,11 | 72,54 | 50,43 |
| J231 | 0,86 | 71,9 | 110,01 | 38,11 |
| J232 | 1,13 | 69,81 | 110,01 | 40,2 |
| J233 | 0 | 74,23 | 137,39 | 63,16 |
| J234 | 0,02 | 64,06 | 136,55 | 72,49 |
| J236 | 0,77 | 58 | 111,52 | 53,52 |
| J237 | 1,3 | 73,14 | 111,52 | 38,38 |
| J130 | 0,58 | 54,52 | 94,52 | 40 |
| J131 | 0,91 | 88,05 | 131,82 | 43,77 |
| J132 | 0,68 | 74,55 | 134,13 | 59,58 |
| J133 | 0,69 | 69,58 | 134,09 | 64,51 |
| J60 | 0,66 | 55 | 112,03 | 57,03 |
| J134 | 0,48 | 80,7 | 136,13 | 55,43 |
| J135 | 0,55 | 70 | 136,33 | 66,33 |

| Nó | Consumo (L/s) | Cota do Terreno (m) | Carga Hidráulica (m) | Pressão (m) |
|-----------|--------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------|
| J62 | 0,38 | 60 | 110,81 | 50,81 |
| J64 | 0,08 | 82 | 109,65 | 27,65 |
| J65 | 0,35 | 82 | 109,65 | 27,65 |
| J66 | 1,39 | 72 | 111,38 | 39,38 |
| J67 | 0,09 | 81 | 109,78 | 28,78 |
| J68 | 0,55 | 73 | 108,94 | 35,94 |
| J69 | 0,52 | 71 | 108,92 | 37,92 |
| J1170 | 0,71 | 54,54 | 105,06 | 50,52 |
| J441 | 0 | 69 | 140,93 | 71,93 |
| J444 | 0,64 | 29,46 | 71,11 | 41,65 |
| J341 | 0,35 | 14,89 | 71,06 | 56,17 |
| J344 | 0,91 | 54,7 | 105,06 | 50,36 |
| J345 | 0,79 | 49,97 | 105,05 | 55,08 |
| J347 | 0,23 | 54,4 | 105,06 | 50,66 |
| J348 | 1,17 | 62,18 | 109,99 | 47,81 |
| J349 | 0,81 | 36,41 | 110,04 | 73,63 |
| J241 | 0,72 | 70 | 112,83 | 42,83 |
| J242 | 0,55 | 65 | 112,83 | 47,83 |
| J243 | 0,15 | 60 | 112,82 | 52,82 |
| J244 | 1,11 | 70 | 112,2 | 42,2 |
| J245 | 0,65 | 71 | 112,81 | 41,81 |
| J246 | 1,07 | 55 | 111,64 | 56,64 |
| J247 | 0,85 | 57 | 112,13 | 55,13 |
| J248 | 1,18 | 54 | 112,14 | 58,14 |
| J249 | 0,03 | 50 | 113,65 | 63,65 |
| J142 | 0,28 | 5,53 | 71,88 | 66,35 |
| J143 | 0,1 | 6,3 | 71,87 | 65,57 |
| J70 | 0,15 | 70 | 108,92 | 38,92 |
| J144 | 0,45 | 4,17 | 71,82 | 67,65 |
| J71 | 0,18 | 77 | 109,32 | 32,32 |
| J72 | 0 | 75 | 109,19 | 34,19 |
| J73 | 0,76 | 80 | 109,35 | 29,35 |
| J74 | 0,93 | 75 | 109,19 | 34,19 |
| J76 | 0,77 | 70 | 108,83 | 38,83 |
| J77 | 1,17 | 76 | 109,2 | 33,2 |
| J78 | 0,1 | 60,56 | 104,69 | 44,13 |
| J350 | 0,28 | 33,82 | 105,35 | 71,53 |
| J351 | 0,84 | 25,51 | 110,03 | 84,52 |
| J352 | 0,56 | 47,55 | 111,1 | 63,55 |
| J353 | 0,44 | 22,64 | 110,52 | 87,88 |
| J354 | 0,19 | 18,68 | 110,51 | 91,83 |
| J355 | 0,87 | 28,87 | 108,01 | 79,14 |
| J358 | 1,15 | 22,3 | 105,43 | 83,13 |
| J359 | 0,66 | 17,57 | 105,06 | 87,49 |
| J250 | 0,13 | 67 | 112,9 | 45,9 |
| J251 | 1,02 | 75,19 | 137,71 | 62,52 |
| J252 | 0,54 | 83,82 | 137,71 | 53,89 |

| Nó | Consumo (L/s) | Cota do Terreno (m) | Carga Hidráulica (m) | Pressão (m) |
|-----------|--------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------|
| J253 | 0,62 | 74,69 | 131,59 | 56,9 |
| J254 | 0,66 | 74,59 | 131,58 | 56,99 |
| J257 | 0,28 | 105,58 | 137,61 | 32,03 |
| J154 | 0,44 | 43,69 | 76,26 | 32,57 |
| J155 | 0,13 | 44,41 | 76,25 | 31,84 |
| J82 | 0,73 | 70,87 | 104,78 | 33,91 |
| J156 | 0,23 | 56,16 | 76,34 | 20,18 |
| J83 | 1,15 | 61,07 | 105,14 | 44,07 |
| J84 | 0,14 | 43,82 | 125,3 | 81,48 |
| J85 | 0,63 | 45 | 118,16 | 73,16 |
| J159 | 0,37 | 37,41 | 75,84 | 38,43 |
| J86 | 1,24 | 50 | 112,8 | 62,8 |
| J87 | 1,07 | 42,63 | 125,97 | 83,34 |
| J89 | 0,37 | 68,29 | 131,6 | 63,31 |
| J360 | 0,84 | 20,71 | 104,72 | 84,01 |
| J361 | 0,32 | 26,67 | 108,95 | 82,28 |
| J362 | 0,11 | 43,66 | 112,31 | 68,65 |
| J363 | 0 | 72,23 | 139,04 | 66,81 |
| J364 | 0 | 65 | 138,59 | 73,59 |
| J365 | 1,06 | 29,83 | 71,06 | 41,23 |
| J366 | 0,4 | 14,46 | 71,19 | 56,73 |
| J1208 | 0,29 | 42,74 | 112,47 | 69,73 |
| J367 | 0,65 | 13,6 | 71,11 | 57,51 |
| J369 | 0,34 | 20,27 | 71,09 | 50,82 |
| J160 | 0,46 | 43,69 | 76,25 | 32,56 |
| J161 | 0,06 | 22,81 | 73,42 | 50,61 |
| J162 | 0,65 | 36,88 | 73,42 | 36,54 |
| J163 | 0,28 | 16,2 | 73,43 | 57,23 |
| J164 | 1,16 | 17,34 | 73,42 | 56,08 |
| J91 | 0,79 | 64,09 | 131,59 | 67,5 |
| J165 | 1,02 | 16,69 | 73,43 | 56,74 |
| J166 | 1,25 | 23,95 | 73,42 | 49,47 |
| J167 | 0,45 | 23,91 | 73,42 | 49,51 |
| J94 | 0,79 | 30,75 | 104,76 | 74,01 |
| J95 | 0,11 | 22,56 | 73,01 | 50,45 |
| J96 | 0,85 | 30 | 73 | 43 |
| J97 | 0,55 | 34,19 | 72,98 | 38,79 |
| J976 | 1,29 | 6,3 | 71,87 | 65,57 |
| J571 | 0,15 | 77,11 | 135,96 | 58,85 |
| J572 | 1,24 | 76,4 | 135,95 | 59,55 |
| J573 | 0,84 | 81,62 | 131,63 | 50,01 |
| J574 | 0,47 | 67,36 | 131,56 | 64,2 |
| J575 | 0,2 | 75,27 | 135,18 | 59,91 |
| J576 | 0,65 | 80,8 | 136,07 | 55,27 |
| J370 | 0,3 | 20,46 | 71,06 | 50,6 |
| J371 | 0 | 68,81 | 138,42 | 69,61 |
| J372 | 0,18 | 23,2 | 71,68 | 48,48 |

| Nó | Consumo (L/s) | Cota do Terreno (m) | Carga Hidráulica (m) | Pressão (m) |
|-----------|--------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------|
| J373 | 0,04 | 27,22 | 71,68 | 44,46 |
| J374 | 0,46 | 13,7 | 71,7 | 58 |
| J375 | 0,74 | 22,72 | 71,7 | 48,98 |
| J376 | 1,24 | 12,18 | 71,5 | 59,32 |
| J377 | 0,72 | 13,12 | 71,68 | 58,56 |
| J1219 | 0,55 | 14,48 | 73,08 | 58,6 |
| J379 | 1,14 | 10,25 | 71,03 | 60,78 |
| J171 | 1,11 | 8,81 | 73,16 | 64,35 |
| J172 | 0,9 | 6,25 | 73,21 | 66,96 |
| J173 | 0,97 | 13 | 73,42 | 60,42 |
| J174 | 1,34 | 6,11 | 73,26 | 67,15 |
| J175 | 0,46 | 6,84 | 73,26 | 66,42 |
| J177 | 0,67 | 13,14 | 73,37 | 60,23 |
| J179 | 0,56 | 15,01 | 73,08 | 58,07 |
| J580 | 0,94 | 113,08 | 135,85 | 22,77 |
| J486 | 0,24 | 86,11 | 133,01 | 46,9 |
| J487 | 0,57 | 79 | 132,51 | 53,51 |
| J488 | 0,73 | 89,16 | 133,93 | 44,77 |
| J489 | 1,1 | 85,02 | 133,01 | 47,99 |
| J381 | 0,67 | 36,02 | 110,03 | 74,01 |
| J1223 | 0,58 | 3,48 | 71,99 | 68,51 |
| J382 | 0,63 | 70,42 | 110,04 | 39,62 |
| J384 | 0 | 42,51 | 112,56 | 70,05 |
| J385 | 0 | 76,6 | 137,87 | 61,27 |
| J180 | 0,66 | 8,77 | 73,16 | 64,39 |
| J181 | 0,92 | 10,94 | 73,39 | 62,45 |
| J1024 | 1,19 | 5,83 | 71,88 | 66,05 |
| J183 | 0,5 | 13,28 | 73,16 | 59,88 |
| J1025 | 0,41 | 8,61 | 71,88 | 63,27 |
| J186 | 0,39 | 9,38 | 73,13 | 63,75 |
| J187 | 0,2 | 9,81 | 73,16 | 63,35 |
| J188 | 0,71 | 8,51 | 73,08 | 64,57 |
| J189 | 0,3 | 7,58 | 73,08 | 65,5 |
| J490 | 0,79 | 103,84 | 133,95 | 30,11 |
| J491 | 0,49 | 76,93 | 135,93 | 59 |
| J492 | 1,18 | 94,67 | 132,85 | 38,18 |
| J493 | 0,64 | 77,62 | 133,57 | 55,95 |
| J494 | 0,26 | 112,76 | 135,87 | 23,11 |
| J495 | 0,92 | 91,15 | 136 | 44,85 |
| J496 | 1,01 | 106,34 | 135,93 | 29,59 |
| J497 | 0,83 | 112,63 | 135,87 | 23,24 |
| J498 | 1,05 | 90,12 | 136,05 | 45,93 |
| J500 | 0,22 | 75,52 | 135,55 | 60,03 |
| J499 | 1,09 | 72,24 | 135,56 | 63,32 |
| J501 | 0,27 | 80,97 | 135,79 | 54,82 |
| J502 | 1,29 | 80,99 | 135,59 | 54,6 |
| J503 | 0,09 | 99,65 | 135,84 | 36,19 |

| Nó | Consumo (L/s) | Cota do Terreno (m) | Carga Hidráulica (m) | Pressão (m) |
|-----------|--------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------|
| J504 | 0,08 | 66,71 | 135,56 | 68,85 |
| J394 | 0 | 70,53 | 140,93 | 70,4 |
| J509 | 0,51 | 99,94 | 135,84 | 35,9 |
| J399 | 0 | 75 | 140,93 | 65,93 |
| J401 | 0 | 70 | 140,93 | 70,93 |
| J406 | 0 | 71,74 | 140,93 | 69,19 |
| J295 | 0,22 | 56,42 | 104,68 | 48,26 |
| J407 | 0 | 68 | 140,93 | 72,93 |
| J296 | 0,89 | 30,91 | 104,36 | 73,45 |
| J408 | 0,72 | 7,93 | 71,9 | 63,97 |
| J297 | 0,7 | 99,05 | 105 | 5,95 |
| J298 | 0,27 | 77,46 | 105,03 | 27,57 |
| J191 | 0,63 | 5,76 | 73,08 | 67,32 |
| J303 | 0,93 | 50,42 | 104,95 | 54,53 |
| J192 | 1,01 | 12,4 | 73,78 | 61,38 |
| J193 | 0,54 | 12,99 | 73,78 | 60,79 |
| J305 | 1,12 | 47,11 | 104,93 | 57,82 |
| J194 | 1 | 13,46 | 73,42 | 59,96 |
| J195 | 0,12 | 15,39 | 73,08 | 57,69 |
| J196 | 0,85 | 13,35 | 73,43 | 60,08 |
| J308 | 0,96 | 33,24 | 67,2 | 33,96 |
| J198 | 0,02 | 18,54 | 71,11 | 52,57 |
| J200 | 0,58 | 15,75 | 71,11 | 55,36 |
| J199 | 0,54 | 16,26 | 71,12 | 54,86 |
| J201 | 0,37 | 44,86 | 64,73 | 19,87 |
| J202 | 1,33 | 10,41 | 71,71 | 61,3 |
| J203 | 1,08 | 11,03 | 71,53 | 60,5 |
| J204 | 0,94 | 21,51 | 69,09 | 47,58 |
| J205 | 0,56 | 16,66 | 71,13 | 54,47 |
| J206 | 0,99 | 14,12 | 71,11 | 56,99 |
| J207 | 0,37 | 18,86 | 71,08 | 52,22 |
| J208 | 0,48 | 11,25 | 72,29 | 61,04 |
| J101 | 0,58 | 28,65 | 72,73 | 44,08 |
| J102 | 1,27 | 46,96 | 72,96 | 26 |
| J109 | 0,16 | 17,47 | 72,73 | 55,26 |
| J1 | 0,87 | 16,82 | 73,43 | 56,61 |
| J2 | 0,47 | 11,97 | 73,09 | 61,12 |
| J3 | 0,14 | 29,02 | 66,49 | 37,47 |
| J4 | 0,25 | 20,88 | 66,52 | 45,64 |
| J5 | 0,1 | 22,75 | 66,94 | 44,19 |
| J6 | 0,58 | 15,25 | 65,69 | 50,44 |
| J7 | 1,29 | 24,91 | 65,89 | 40,98 |
| J8 | 0,73 | 31,17 | 66,15 | 34,98 |
| J9 | 0,66 | 31,89 | 66,39 | 34,5 |
| J10 | 1,31 | 14,62 | 60,48 | 45,86 |
| J11 | 0,29 | 18,43 | 71,16 | 52,73 |
| J12 | 0,51 | 29,27 | 69,84 | 40,57 |

| Nó | Consumo (L/s) | Cota do Terreno (m) | Carga Hidráulica (m) | Pressão (m) |
|-----------|--------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------|
| J13 | 0,53 | 32,04 | 69,5 | 37,46 |
| J14 | 0 | 37,91 | 66,75 | 28,84 |
| J15 | 0 | 102,84 | 140,93 | 38,09 |
| J16 | 0 | 88,89 | 140,93 | 52,04 |
| J17 | 0 | 82,75 | 140,93 | 58,18 |
| J18 | 0 | 84,96 | 140,93 | 55,97 |
| J19 | 0 | 90,94 | 140,93 | 49,99 |
| J20 | 0 | 80 | 140,93 | 60,93 |
| J21 | 0 | 80 | 140,93 | 60,93 |
| J22 | 0 | 82,74 | 137,65 | 54,91 |
| J23 | 0 | 75,96 | 138,01 | 62,05 |
| J25 | 0,09 | 94,13 | 137,3 | 43,17 |
| J26 | 1,02 | 76,35 | 137,31 | 60,96 |
| J27 | 0,94 | 82,08 | 137,3 | 55,22 |
| J28 | 0,67 | 45 | 84,96 | 39,96 |
| J29 | 0,21 | 49 | 84,98 | 35,98 |
| J30 | 0,3 | 72,01 | 137,3 | 65,29 |
| J31 | 0,44 | 69,78 | 137,31 | 67,53 |
| J32 | 1,06 | 45 | 84,96 | 39,96 |
| J33 | 0,07 | 48 | 84,96 | 36,96 |
| J34 | 0,7 | 50 | 84,97 | 34,97 |
| J35 | 1,02 | 67,78 | 137,31 | 69,53 |
| J36 | 1,08 | 51,08 | 84,98 | 33,9 |
| J37 | 0,44 | 66,19 | 137,44 | 71,25 |
| J38 | 1,31 | 47 | 84,96 | 37,96 |
| J24 | 1,08 | 34,53 | 72,75 | 38,22 |
| J39 | 0,91 | 45,88 | 73,3 | 27,42 |
| J40 | 1,22 | 12,8 | 71,75 | 58,95 |
| J123 | 1,27 | 38,41 | 104,76 | 66,35 |
| J140 | 0,61 | 39,94 | 104,76 | 64,82 |
| J141 | 0,18 | 41,45 | 104,76 | 63,31 |
| J157 | 1,39 | 31,49 | 104,76 | 73,27 |
| J158 | 1,16 | 25,88 | 104,76 | 78,88 |
| J168 | 1,01 | 40,21 | 104,77 | 64,56 |
| J170 | 0,58 | 46,87 | 104,77 | 57,9 |
| J176 | 0,02 | 50,64 | 104,78 | 54,14 |
| J178 | 0,24 | 58,87 | 104,78 | 45,91 |
| J184 | 0,24 | 56,09 | 104,78 | 48,69 |
| J185 | 0,74 | 43,71 | 104,81 | 61,1 |
| J190 | 0,59 | 58,49 | 105,19 | 46,7 |
| J197 | 0,15 | 41,86 | 105,79 | 63,93 |
| J213 | 0,4 | 52,07 | 105,19 | 53,12 |
| J215 | 0,93 | 75,76 | 105,13 | 29,37 |
| J216 | 1,23 | 53,06 | 105,95 | 52,89 |
| J227 | 0,72 | 52,89 | 105,65 | 52,76 |
| J238 | 0,27 | 44,16 | 105,52 | 61,36 |
| J239 | 1,3 | 43,49 | 105,51 | 62,02 |

| Nó | Consumo (L/s) | Cota do Terreno (m) | Carga Hidráulica (m) | Pressão (m) |
|-----------|--------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------|
| J255 | 0,54 | 35,31 | 105,47 | 70,16 |
| J256 | 0 | 40 | 105,52 | 65,52 |
| J258 | 1,12 | 51,24 | 105,65 | 54,41 |
| J260 | 0,32 | 32,53 | 105,35 | 72,82 |
| J265 | 0,65 | 50,87 | 105,28 | 54,41 |
| J266 | 0,34 | 39,83 | 105,33 | 65,5 |
| J267 | 1,09 | 22,31 | 110,51 | 88,2 |
| J61 | 0,87 | 72 | 108,93 | 36,93 |
| J92 | 0,53 | 72 | 108,83 | 36,83 |
| J268 | 0,48 | 69,68 | 104,69 | 35,01 |
| J278 | 1,16 | 104,29 | 133,63 | 29,34 |
| J281 | 0,79 | 83,72 | 133,51 | 49,79 |
| J283 | 1,25 | 94,06 | 133,52 | 39,46 |
| J284 | 0,7 | 77,38 | 133,5 | 56,12 |
| J136 | 0,44 | 81,8 | 131,61 | 49,81 |
| J137 | 1,17 | 9,11 | 73,16 | 64,05 |
| J145 | 0,38 | 47,46 | 104,76 | 57,3 |
| J118 | 0,37 | 75 | 109,78 | 34,78 |
| J52 | 0,22 | 54,7 | 109,99 | 55,29 |
| J81 | 0,47 | 50 | 84,92 | 34,92 |
| J88 | 0 | 45 | 85 | 40 |
| J90 | 1 | 84 | 137,71 | 53,71 |
| J93 | 3,4 | 65 | 137,43 | 72,43 |
| J147 | 0,38 | 68 | 135,95 | 67,95 |
| J148 | 0,95 | 50 | 94,47 | 44,47 |
| J149 | 0,55 | 40 | 94,47 | 54,47 |
| J150 | 1,09 | 60 | 94,43 | 34,43 |
| J151 | 1 | 60 | 131,09 | 71,09 |
| J152 | 0,59 | 32 | 80,25 | 48,25 |
| J153 | 0,11 | 60 | 131,09 | 71,09 |
| J169 | 0,55 | 42 | 82 | 40 |
| J182 | 0,46 | 40 | 81,99 | 41,99 |
| J222 | 0,96 | 32 | 80,29 | 48,29 |
| J224 | 0,42 | 37 | 80,28 | 43,28 |
| J230 | 0,99 | 30 | 104,86 | 74,86 |
| J235 | 0,19 | 53 | 104,92 | 51,92 |
| J240 | 0,8 | 87 | 135,84 | 48,84 |
| J269 | 0 | 56 | 76,35 | 20,35 |
| J273 | 0 | 56 | 76,35 | 20,35 |
| J274 | 0 | 56 | 76,35 | 20,35 |
| J276 | 0 | 56 | 58,99 | 2,99 |
| J280 | 0 | 56 | 58,99 | 2,99 |
| J285 | 0 | 56 | 58,99 | 2,99 |
| J287 | 0 | 40 | 66,18 | 26,18 |
| J288 | 0 | 40 | 66,18 | 26,18 |
| J289 | 0 | 40 | 66,13 | 26,13 |
| J290 | 0 | 40 | 66,09 | 26,09 |

| Nó | Consumo (L/s) | Cota do Terreno (m) | Carga Hidráulica (m) | Pressão (m) |
|-------------|--------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------|
| J291 | 0 | 65 | 140,99 | 75,99 |
| J292 | 0 | 40 | 105,52 | 65,52 |
| J299 | 0 | 40 | 66,18 | 26,18 |
| J300 | 0 | 40 | 66,18 | 26,18 |
| J301 | 0 | 44 | 63,78 | 19,78 |
| J302 | 0 | 44 | 63,72 | 19,72 |
| J304 | 0 | 44 | 127,6 | 83,6 |
| J306 | 0 | 44 | 127,31 | 83,31 |
| J307 | 0 | 44 | 63,63 | 19,63 |
| J309 | 0 | 44 | 63,63 | 19,63 |
| J317 | 0 | 44 | 112,74 | 68,74 |
| J323 | 0 | 44 | 112,74 | 68,74 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE H – Gabarito referente aos nós para perdas de carga calculadas por Hazen-Williams – Rede C-Town: Battle of Calibration (2012)

| Nó | Consumo (L/s) | Cota do Terreno (m) | Carga Hidráulica (m) | Pressão (m) | Concentração de cloro (mg/L) |
|--------------|----------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| J511 | 0,95 | 105,08 | 135,54 | 30,47 | 0,82 |
| J411 | 0,72 | 8,95 | 72 | 63,05 | 1,59 |
| J414 | 0,78 | 34,36 | 68,42 | 34,06 | 1,43 |
| J415 | 0 | 65 | 148,86 | 83,86 | 1,05 |
| J416 | 0 | 42,6 | 140,81 | 98,21 | 1,03 |
| J417 | 1,04 | 37,38 | 67,29 | 29,91 | 1,43 |
| J418 | 0 | 37,39 | 66,75 | 29,36 | 0 |
| J419 | 0 | 40,5 | 66,3 | 25,8 | 1,27 |
| J310 | 1,01 | 51,84 | 105,33 | 53,49 | 0,94 |
| J311 | 0,88 | 55,95 | 105,36 | 49,41 | 0,93 |
| J312 | 0,06 | 68,48 | 104,91 | 36,43 | 0,74 |
| J313 | 0,51 | 67,66 | 104,9 | 37,24 | 0,71 |
| J314 | 1,16 | 14,94 | 71,43 | 56,49 | 1,39 |
| J315 | 1,06 | 16,03 | 71,29 | 55,26 | 1,31 |
| J316 | 0,5 | 12,98 | 71,76 | 58,78 | 1,14 |
| J318 | 1,19 | 53,67 | 104,79 | 51,12 | 0,88 |
| J319 | 1,08 | 39,29 | 104,79 | 65,5 | 0,78 |
| J210 | 0,08 | 7,01 | 72,25 | 65,24 | 0 |
| J211 | 1,28 | 11,27 | 72,35 | 61,08 | 1,58 |
| J212 | 0,49 | 7,87 | 72,22 | 64,35 | 1,54 |
| J214 | 0,71 | 8,67 | 72,06 | 63,39 | 1,51 |
| J217 | 1,03 | 10,98 | 71,68 | 60,7 | 1,49 |
| J218 | 0,07 | 7,68 | 72,27 | 64,59 | 1,57 |
| J219 | 0,84 | 52 | 112,67 | 60,67 | 0,83 |
| J110 | 0,63 | 15,92 | 73,5 | 57,58 | 1,64 |
| J420 | 0 | 39,99 | 66,49 | 26,5 | 1,34 |
| J421 | 0,84 | 37,09 | 67,13 | 30,04 | 1,37 |
| J422 | 0 | 38,81 | 66,75 | 27,94 | 1,33 |
| J1153 | 0,35 | 22,14 | 70,63 | 48,49 | 1,11 |
| J1154 | 0,38 | 14,61 | 71,06 | 56,45 | 1,43 |
| J1155 | 1,12 | 15,54 | 70,97 | 55,43 | 1,4 |
| J425 | 0 | 64,42 | 140,39 | 75,97 | 1,18 |
| J426 | 0 | 72,71 | 140,08 | 67,37 | 0,63 |
| J1157 | 1,33 | 22,21 | 70,63 | 48,42 | 1,17 |
| J427 | 0 | 67,65 | 140,78 | 73,13 | 1,03 |
| J1158 | 0,31 | 28,25 | 70,91 | 42,66 | 1,16 |
| J428 | 0,93 | 16,2 | 58,92 | 42,72 | 1,15 |
| J429 | 1,32 | 12,56 | 59,14 | 46,58 | 1,21 |
| J320 | 0,3 | 46,73 | 105,76 | 59,03 | 1 |
| J321 | 0,66 | 44,59 | 105,67 | 61,08 | 0,99 |
| J322 | 0,13 | 48,02 | 105,67 | 57,65 | 0,92 |
| J324 | 1,24 | 42,38 | 105,66 | 63,28 | 0,9 |
| J1056 | 0,91 | 7,64 | 72,01 | 64,37 | 1,52 |
| J327 | 0,02 | 49,68 | 106,04 | 56,36 | 0,99 |
| J1058 | 0,77 | 13,58 | 65,6 | 52,02 | 0,69 |
| J328 | 0,12 | 45,69 | 106,22 | 60,53 | 1,03 |
| J329 | 0,13 | 44,05 | 111,55 | 67,5 | 1,07 |

| Nó | Consumo (L/s) | Cota do Terreno (m) | Carga Hidráulica (m) | Pressão (m) | Concentração de cloro (mg/L) |
|--------------|--------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------|---|
| J220 | 1,13 | 80 | 112,57 | 32,57 | 0,67 |
| J221 | 0,35 | 97,07 | 104,85 | 7,78 | 0,74 |
| J225 | 0,06 | 13,33 | 71,54 | 58,21 | 1,07 |
| J226 | 0,4 | 11,1 | 71,09 | 59,99 | 0,96 |
| J50 | 0,47 | 71,8 | 104,64 | 32,84 | 0,72 |
| J51 | 0,37 | 77,42 | 104,64 | 27,22 | 0,67 |
| J53 | 1,35 | 85 | 109,94 | 24,94 | 0,86 |
| J54 | 1,39 | 80 | 109,75 | 29,75 | 0,82 |
| J128 | 0,54 | 85,26 | 131,42 | 46,16 | 0,6 |
| J55 | 0,39 | 71 | 110,08 | 39,08 | 0,61 |
| J129 | 0,22 | 62,85 | 130,48 | 67,63 | 0,5 |
| J56 | 0,23 | 72 | 110,23 | 38,23 | 0,65 |
| J57 | 0,92 | 59 | 110,73 | 51,73 | 0,68 |
| J58 | 0,58 | 76 | 110,07 | 34,07 | 0,57 |
| J59 | 0,59 | 57 | 111,04 | 54,04 | 0,75 |
| J1160 | 0,96 | 24,91 | 66,65 | 41,74 | 1,3 |
| J1161 | 0,44 | 25,25 | 66,59 | 41,34 | 1,19 |
| J431 | 0,85 | 16,9 | 67,49 | 50,59 | 1,49 |
| J432 | 0,28 | 19,88 | 67,28 | 47,4 | 1,38 |
| J433 | 0,25 | 27,35 | 70,23 | 42,88 | 1,55 |
| J434 | 0,78 | 16,48 | 71,61 | 55,13 | 1,55 |
| J435 | 0,11 | 12,15 | 68,89 | 56,74 | 1,53 |
| J436 | 0,62 | 17,68 | 59,42 | 41,74 | 1,32 |
| J438 | 1,22 | 10,43 | 71,85 | 61,42 | 1,58 |
| J1169 | 0,38 | 55,42 | 108,78 | 53,36 | 0,78 |
| J439 | 1,06 | 17,78 | 58,62 | 40,84 | 0,94 |
| J330 | 0,47 | 58,25 | 105,3 | 47,05 | 0,92 |
| J331 | 0,36 | 59,26 | 105,27 | 46,01 | 0,83 |
| J332 | 1,07 | 44,18 | 63,56 | 19,38 | 1,08 |
| J333 | 0,85 | 25,7 | 67,58 | 41,88 | 1,4 |
| J334 | 0,84 | 29,28 | 67,5 | 38,22 | 1,32 |
| J335 | 0,58 | 25,08 | 67,81 | 42,73 | 1,48 |
| J336 | 0,13 | 23,81 | 68,33 | 44,52 | 1,59 |
| J337 | 0,75 | 22,11 | 73,01 | 50,9 | 1,63 |
| J231 | 0,86 | 71,9 | 109,64 | 37,74 | 0,91 |
| J232 | 1,13 | 69,81 | 109,64 | 39,83 | 0,96 |
| J233 | 0 | 74,23 | 137,24 | 63,01 | 0,86 |
| J234 | 0,02 | 64,06 | 136,46 | 72,4 | 0,77 |
| J236 | 0,77 | 58 | 111,56 | 53,56 | 0,82 |
| J237 | 1,3 | 73,14 | 111,56 | 38,42 | 0,74 |
| J130 | 0,58 | 54,52 | 94,52 | 40 | 0,56 |
| J131 | 0,91 | 88,05 | 131,62 | 43,57 | 0,62 |
| J132 | 0,68 | 74,55 | 134,24 | 59,69 | 0,61 |
| J133 | 0,69 | 69,58 | 134,18 | 64,6 | 0,62 |
| J60 | 0,66 | 55 | 112,09 | 57,09 | 0,85 |
| J134 | 0,48 | 80,7 | 136,08 | 55,38 | 0,74 |
| J135 | 0,55 | 70 | 136,25 | 66,25 | 0,75 |

| Nó | Consumo (L/s) | Cota do Terreno (m) | Carga Hidráulica (m) | Pressão (m) | Concentração de cloro (mg/L) |
|-------|---------------|---------------------|----------------------|-------------|------------------------------|
| J62 | 0,38 | 60 | 111,02 | 51,02 | 0,7 |
| J64 | 0,08 | 82 | 109,92 | 27,92 | 0,83 |
| J65 | 0,35 | 82 | 109,92 | 27,92 | 0,81 |
| J66 | 1,39 | 72 | 111,48 | 39,48 | 0,95 |
| J67 | 0,09 | 81 | 110,07 | 29,07 | 0,85 |
| J68 | 0,55 | 73 | 109,29 | 36,29 | 0,69 |
| J69 | 0,52 | 71 | 109,26 | 38,26 | 0,62 |
| J1170 | 0,71 | 54,54 | 108,78 | 54,24 | 0,77 |
| J441 | 0 | 69 | 140,85 | 71,85 | 1,03 |
| J444 | 0,64 | 29,46 | 71,08 | 41,62 | 1,32 |
| J341 | 0,35 | 14,89 | 70,75 | 55,86 | 1,46 |
| J344 | 0,91 | 54,7 | 108,78 | 54,08 | 0,76 |
| J345 | 0,79 | 49,97 | 108,77 | 58,8 | 0,73 |
| J347 | 0,23 | 54,4 | 108,78 | 54,38 | 0,75 |
| J348 | 1,17 | 62,18 | 109,61 | 47,43 | 0,88 |
| J349 | 0,81 | 36,41 | 109,66 | 73,25 | 1,1 |
| J241 | 0,72 | 70 | 112,78 | 42,78 | 0,88 |
| J242 | 0,55 | 65 | 112,78 | 47,78 | 0,94 |
| J243 | 0,15 | 60 | 112,77 | 52,77 | 0,83 |
| J244 | 1,11 | 70 | 112,16 | 42,16 | 0,82 |
| J245 | 0,65 | 71 | 112,76 | 41,76 | 0,96 |
| J246 | 1,07 | 55 | 111,67 | 56,67 | 0,86 |
| J247 | 0,85 | 57 | 112,08 | 55,08 | 0,7 |
| J248 | 1,18 | 54 | 112,08 | 58,08 | 0,88 |
| J249 | 0,03 | 50 | 113,43 | 63,43 | 0,92 |
| J142 | 0,28 | 5,53 | 72,13 | 66,6 | 1,11 |
| J143 | 0,1 | 6,3 | 72,12 | 65,82 | 0 |
| J70 | 0,15 | 70 | 109,26 | 39,26 | 0,6 |
| J144 | 0,45 | 4,17 | 72,06 | 67,89 | 0 |
| J71 | 0,18 | 77 | 109,67 | 32,67 | 0,79 |
| J72 | 0 | 75 | 109,53 | 34,53 | 0,63 |
| J73 | 0,76 | 80 | 109,7 | 29,7 | 0,81 |
| J74 | 0,93 | 75 | 109,53 | 34,53 | 0,54 |
| J76 | 0,77 | 70 | 109,18 | 39,18 | 0,59 |
| J77 | 1,17 | 76 | 109,54 | 33,54 | 0,74 |
| J78 | 0,1 | 60,56 | 104,53 | 43,97 | 0,62 |
| J350 | 0,28 | 33,82 | 109,05 | 75,23 | 0,85 |
| J351 | 0,84 | 25,51 | 109,66 | 84,15 | 1,03 |
| J352 | 0,56 | 47,55 | 110,71 | 63,16 | 1,13 |
| J353 | 0,44 | 22,64 | 110,11 | 87,47 | 1,06 |
| J354 | 0,19 | 18,68 | 110,1 | 91,42 | 0,9 |
| J355 | 0,87 | 28,87 | 107,73 | 78,86 | 0,95 |
| J358 | 1,15 | 22,3 | 104,93 | 82,63 | 0,87 |
| J359 | 0,66 | 17,57 | 104,52 | 86,95 | 0,76 |
| J250 | 0,13 | 67 | 112,83 | 45,83 | 0,94 |
| J251 | 1,02 | 75,19 | 137,45 | 62,26 | 0,91 |
| J252 | 0,54 | 83,82 | 137,45 | 53,63 | 0,83 |

| Nó | Consumo (L/s) | Cota do Terreno (m) | Carga Hidráulica (m) | Pressão (m) | Concentração de cloro (mg/L) |
|-----------|----------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| J253 | 0,62 | 74,69 | 131,3 | 56,61 | 0,56 |
| J254 | 0,66 | 74,59 | 131,3 | 56,71 | 0,54 |
| J257 | 0,28 | 105,58 | 137,28 | 31,7 | 0,89 |
| J154 | 0,44 | 43,69 | 77,88 | 34,19 | 1,91 |
| J155 | 0,13 | 44,41 | 77,87 | 33,46 | 1,88 |
| J82 | 0,73 | 70,87 | 104,64 | 33,77 | 0,83 |
| J156 | 0,23 | 56,16 | 78,03 | 21,87 | 1,92 |
| J83 | 1,15 | 61,07 | 105 | 43,93 | 0,9 |
| J84 | 0,14 | 43,82 | 123,7 | 79,88 | 1,08 |
| J85 | 0,63 | 45 | 117,44 | 72,44 | 0,99 |
| J159 | 0,37 | 37,41 | 77,28 | 39,87 | 1,86 |
| J86 | 1,24 | 50 | 112,76 | 62,76 | 0,85 |
| J87 | 1,07 | 42,63 | 124,2 | 81,57 | 1,04 |
| J89 | 0,37 | 68,29 | 131,29 | 63 | 0,55 |
| J360 | 0,84 | 20,71 | 104,21 | 83,5 | 0,77 |
| J361 | 0,32 | 26,67 | 108,57 | 81,9 | 0,98 |
| J362 | 0,11 | 43,66 | 111,67 | 68,01 | 1,11 |
| J363 | 0 | 72,23 | 138,95 | 66,72 | 0,96 |
| J364 | 0 | 65 | 138,44 | 73,44 | 0,94 |
| J365 | 1,06 | 29,83 | 71,01 | 41,18 | 1,19 |
| J366 | 0,4 | 14,46 | 71,18 | 56,72 | 1,45 |
| J1208 | 0,29 | 42,74 | 111,89 | 69,15 | 1,09 |
| J367 | 0,65 | 13,6 | 71,06 | 57,46 | 1,31 |
| J369 | 0,34 | 20,27 | 71,06 | 50,79 | 1,29 |
| J160 | 0,46 | 43,69 | 77,86 | 34,17 | 1,86 |
| J161 | 0,06 | 22,81 | 74,01 | 51,2 | 1,49 |
| J162 | 0,65 | 36,88 | 74,01 | 37,13 | 1,18 |
| J163 | 0,28 | 16,2 | 74,02 | 57,82 | 1,68 |
| J164 | 1,16 | 17,34 | 74,01 | 56,67 | 1,48 |
| J91 | 0,79 | 64,09 | 131,28 | 67,19 | 0,53 |
| J165 | 1,02 | 16,69 | 74,02 | 57,33 | 1,63 |
| J166 | 1,25 | 23,95 | 74,01 | 50,06 | 1,45 |
| J167 | 0,45 | 23,91 | 74,01 | 50,1 | 1,41 |
| J94 | 0,79 | 30,75 | 108,32 | 77,57 | 0,53 |
| J95 | 0,11 | 22,56 | 73,5 | 50,94 | 1,54 |
| J96 | 0,85 | 30 | 73,49 | 43,49 | 1,45 |
| J97 | 0,55 | 34,19 | 73,47 | 39,28 | 1,33 |
| J976 | 1,29 | 6,3 | 72,12 | 65,82 | 0 |
| J571 | 0,15 | 77,11 | 135,86 | 58,75 | 0,7 |
| J572 | 1,24 | 76,4 | 135,86 | 59,46 | 0,69 |
| J573 | 0,84 | 81,62 | 131,34 | 49,72 | 0,58 |
| J574 | 0,47 | 67,36 | 131,25 | 63,89 | 0,52 |
| J575 | 0,2 | 75,27 | 135,18 | 59,91 | 0,68 |
| J576 | 0,65 | 80,8 | 136,01 | 55,21 | 0,73 |
| J370 | 0,3 | 20,46 | 71 | 50,54 | 1,21 |
| J371 | 0 | 68,81 | 138,28 | 69,47 | 0,93 |
| J372 | 0,18 | 23,2 | 71,78 | 48,58 | 1,21 |

| Nó | Consumo (L/s) | Cota do Terreno (m) | Carga Hidráulica (m) | Pressão (m) | Concentração de cloro (mg/L) |
|-----------|----------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| J373 | 0,04 | 27,22 | 71,78 | 44,56 | 1,07 |
| J374 | 0,46 | 13,7 | 71,81 | 58,11 | 1,04 |
| J375 | 0,74 | 22,72 | 71,82 | 49,1 | 1,21 |
| J376 | 1,24 | 12,18 | 71,49 | 59,31 | 1,05 |
| J377 | 0,72 | 13,12 | 71,79 | 58,67 | 0,94 |
| J1219 | 0,55 | 14,48 | 73,62 | 59,14 | 1,19 |
| J379 | 1,14 | 10,25 | 70,91 | 60,66 | 0,91 |
| J171 | 1,11 | 8,81 | 73,66 | 64,85 | 1,25 |
| J172 | 0,9 | 6,25 | 73,71 | 67,46 | 1,37 |
| J173 | 0,97 | 13 | 74 | 61 | 1,75 |
| J174 | 1,34 | 6,11 | 73,75 | 67,64 | 1,42 |
| J175 | 0,46 | 6,84 | 73,75 | 66,91 | 1,47 |
| J177 | 0,67 | 13,14 | 73,95 | 60,81 | 1,75 |
| J179 | 0,56 | 15,01 | 73,62 | 58,61 | 1,67 |
| J580 | 0,94 | 113,08 | 135,55 | 22,47 | 0,62 |
| J486 | 0,24 | 86,11 | 133,03 | 46,92 | 0,51 |
| J487 | 0,57 | 79 | 132,6 | 53,6 | 0,5 |
| J488 | 0,73 | 89,16 | 133,78 | 44,62 | 0,6 |
| J489 | 1,1 | 85,02 | 133,03 | 48,01 | 0,57 |
| J381 | 0,67 | 36,02 | 109,66 | 73,64 | 1,05 |
| J1223 | 0,58 | 3,48 | 72,25 | 68,77 | 1,26 |
| J382 | 0,63 | 70,42 | 109,66 | 39,24 | 0,97 |
| J384 | 0 | 42,51 | 111,99 | 69,48 | 1,17 |
| J385 | 0 | 76,6 | 137,72 | 61,12 | 0,91 |
| J180 | 0,66 | 8,77 | 73,66 | 64,89 | 1,56 |
| J181 | 0,92 | 10,94 | 73,97 | 63,03 | 1,66 |
| J1024 | 1,19 | 5,83 | 72,14 | 66,31 | 1,55 |
| J183 | 0,5 | 13,28 | 73,66 | 60,38 | 1,42 |
| J1025 | 0,41 | 8,61 | 72,14 | 63,53 | 1,61 |
| J186 | 0,39 | 9,38 | 73,64 | 64,26 | 1,25 |
| J187 | 0,2 | 9,81 | 73,66 | 63,85 | 1,65 |
| J188 | 0,71 | 8,51 | 73,61 | 65,1 | 1,03 |
| J189 | 0,3 | 7,58 | 73,61 | 66,03 | 1 |
| J490 | 0,79 | 103,84 | 133,79 | 29,95 | 0,65 |
| J491 | 0,49 | 76,93 | 135,82 | 58,89 | 0,7 |
| J492 | 1,18 | 94,67 | 132,79 | 38,12 | 0,62 |
| J493 | 0,64 | 77,62 | 133,62 | 56 | 0,61 |
| J494 | 0,26 | 112,76 | 135,83 | 23,07 | 0,68 |
| J495 | 0,92 | 91,15 | 135,95 | 44,8 | 0,67 |
| J496 | 1,01 | 106,34 | 135,89 | 29,55 | 0,69 |
| J497 | 0,83 | 112,63 | 135,56 | 22,93 | 0,66 |
| J498 | 1,05 | 90,12 | 135,99 | 45,87 | 0,74 |
| J500 | 0,22 | 75,52 | 135,26 | 59,74 | 0,58 |
| J499 | 1,09 | 72,24 | 135,27 | 63,03 | 0,7 |
| J501 | 0,27 | 80,97 | 135,49 | 54,52 | 0,76 |
| J502 | 1,29 | 80,99 | 135,25 | 54,26 | 0,57 |
| J503 | 0,09 | 99,65 | 135,54 | 35,9 | 0,84 |

| Nó | Consumo (L/s) | Cota do Terreno (m) | Carga Hidráulica (m) | Pressão (m) | Concentração de cloro (mg/L) |
|-----------|----------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| J504 | 0,08 | 66,71 | 135,26 | 68,55 | 0,66 |
| J394 | 0 | 70,53 | 140,85 | 70,32 | 0 |
| J509 | 0,51 | 99,94 | 135,55 | 35,61 | 0,86 |
| J399 | 0 | 75 | 140,85 | 65,85 | 0 |
| J401 | 0 | 70 | 140,85 | 70,85 | 0 |
| J406 | 0 | 71,74 | 140,85 | 69,11 | 0 |
| J295 | 0,22 | 56,42 | 104,53 | 48,11 | 0,55 |
| J407 | 0 | 68 | 140,85 | 72,85 | 0 |
| J296 | 0,89 | 30,91 | 104,15 | 73,24 | 0,54 |
| J408 | 0,72 | 7,93 | 72,17 | 64,24 | 1,61 |
| J297 | 0,7 | 99,05 | 104,85 | 5,8 | 0,8 |
| J298 | 0,27 | 77,46 | 104,88 | 27,42 | 0,71 |
| J191 | 0,63 | 5,76 | 73,61 | 67,85 | 0 |
| J303 | 0,93 | 50,42 | 104,78 | 54,36 | 0,86 |
| J192 | 1,01 | 12,4 | 74,57 | 62,17 | 1,8 |
| J193 | 0,54 | 12,99 | 74,57 | 61,58 | 1,7 |
| J305 | 1,12 | 47,11 | 104,75 | 57,64 | 0,81 |
| J194 | 1 | 13,46 | 74,02 | 60,56 | 1,75 |
| J195 | 0,12 | 15,39 | 73,62 | 58,23 | 1,2 |
| J196 | 0,85 | 13,35 | 74,02 | 60,67 | 1,75 |
| J308 | 0,96 | 33,24 | 66,38 | 33,14 | 1,25 |
| J198 | 0,02 | 18,54 | 71,06 | 52,52 | 0,9 |
| J200 | 0,58 | 15,75 | 71,06 | 55,31 | 1,18 |
| J199 | 0,54 | 16,26 | 71,08 | 54,82 | 1,35 |
| J201 | 0,37 | 44,86 | 64,02 | 19,16 | 1,14 |
| J202 | 1,33 | 10,41 | 71,89 | 61,48 | 1,45 |
| J203 | 1,08 | 11,03 | 71,51 | 60,48 | 1,46 |
| J204 | 0,94 | 21,51 | 68,32 | 46,81 | 1,36 |
| J205 | 0,56 | 16,66 | 71,1 | 54,44 | 1,4 |
| J206 | 0,99 | 14,12 | 71,06 | 56,94 | 1,27 |
| J207 | 0,37 | 18,86 | 71,02 | 52,16 | 1,23 |
| J208 | 0,48 | 11,25 | 72,73 | 61,48 | 1,6 |
| J101 | 0,58 | 28,65 | 73,18 | 44,53 | 0,82 |
| J102 | 1,27 | 46,96 | 73,43 | 26,47 | 1,06 |
| J109 | 0,16 | 17,47 | 73,17 | 55,7 | 1,62 |
| J1 | 0,87 | 16,82 | 74,02 | 57,2 | 1,67 |
| J2 | 0,47 | 11,97 | 73,62 | 61,65 | 1,22 |
| J3 | 0,14 | 29,02 | 66,6 | 37,58 | 1,25 |
| J4 | 0,25 | 20,88 | 66,54 | 45,66 | 1,1 |
| J5 | 0,1 | 22,75 | 67,02 | 44,27 | 1,22 |
| J6 | 0,58 | 15,25 | 65,6 | 50,35 | 0,69 |
| J7 | 1,29 | 24,91 | 65,84 | 40,93 | 0,94 |
| J8 | 0,73 | 31,17 | 66,1 | 34,93 | 0,94 |
| J9 | 0,66 | 31,89 | 66,44 | 34,55 | 0,97 |
| J10 | 1,31 | 14,62 | 60,28 | 45,66 | 1,36 |
| J11 | 0,29 | 18,43 | 71,35 | 52,92 | 1,55 |
| J12 | 0,51 | 29,27 | 69,76 | 40,49 | 1,49 |

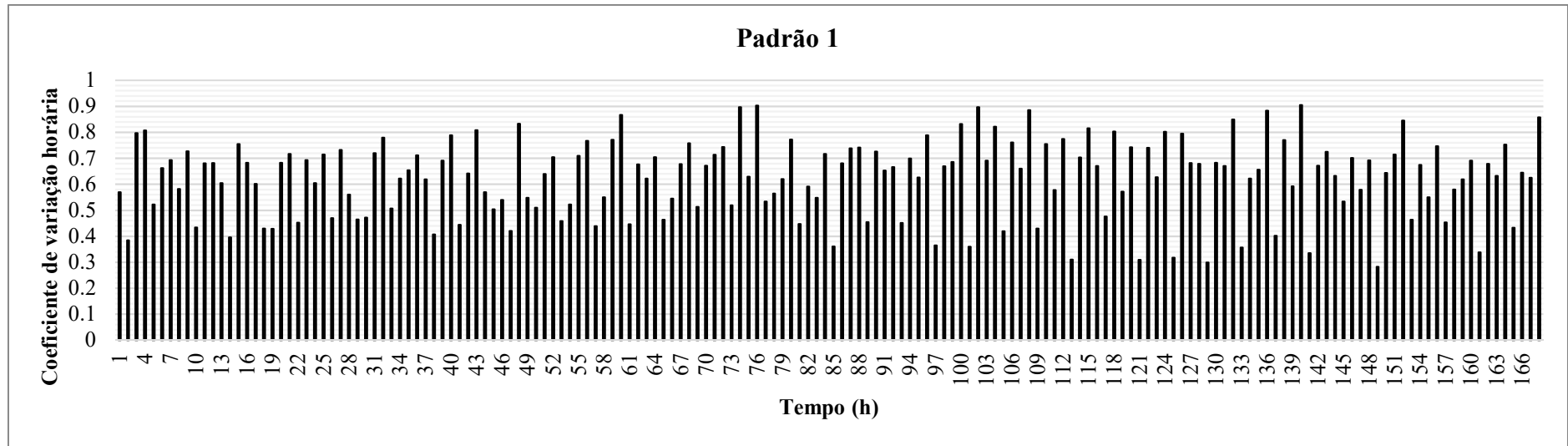
| Nó | Consumo (L/s) | Cota do Terreno (m) | Carga Hidráulica (m) | Pressão (m) | Concentração de cloro (mg/L) |
|-------------|----------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| J13 | 0,53 | 32,04 | 69,42 | 37,38 | 1,47 |
| J14 | 0 | 37,91 | 66,75 | 28,84 | 1,31 |
| J15 | 0 | 102,84 | 140,85 | 38,01 | 0 |
| J16 | 0 | 88,89 | 140,85 | 51,96 | 0 |
| J17 | 0 | 82,75 | 140,85 | 58,1 | 0 |
| J18 | 0 | 84,96 | 140,85 | 55,89 | 0 |
| J19 | 0 | 90,94 | 140,85 | 49,91 | 0 |
| J20 | 0 | 80 | 140,85 | 60,85 | 0 |
| J21 | 0 | 80 | 140,85 | 60,85 | 0 |
| J22 | 0 | 82,74 | 137,53 | 54,79 | 0,88 |
| J23 | 0 | 75,96 | 137,84 | 61,88 | 0,94 |
| J25 | 0,09 | 94,13 | 136,88 | 42,75 | 0,52 |
| J26 | 1,02 | 76,35 | 136,88 | 60,53 | 0,62 |
| J27 | 0,94 | 82,08 | 136,88 | 54,8 | 0,54 |
| J28 | 0,67 | 45 | 84,94 | 39,94 | 0,52 |
| J29 | 0,21 | 49 | 84,97 | 35,97 | 0,63 |
| J30 | 0,3 | 72,01 | 136,88 | 64,87 | 0,44 |
| J31 | 0,44 | 69,78 | 136,88 | 67,1 | 0,65 |
| J32 | 1,06 | 45 | 84,95 | 39,95 | 0,62 |
| J33 | 0,07 | 48 | 84,94 | 36,94 | 0,4 |
| J34 | 0,7 | 50 | 84,95 | 34,95 | 0,51 |
| J35 | 1,02 | 67,78 | 136,88 | 69,1 | 0,66 |
| J36 | 1,08 | 51,08 | 84,97 | 33,89 | 0,66 |
| J37 | 0,44 | 66,19 | 137,08 | 70,89 | 0,82 |
| J38 | 1,31 | 47 | 84,94 | 37,94 | 0,46 |
| J24 | 1,08 | 34,53 | 73,26 | 38,73 | 1,65 |
| J39 | 0,91 | 45,88 | 74,09 | 28,21 | 1,67 |
| J40 | 1,22 | 12,8 | 71,89 | 59,09 | 1,25 |
| J123 | 1,27 | 38,41 | 108,31 | 69,9 | 0,37 |
| J140 | 0,61 | 39,94 | 108,31 | 68,37 | 0,37 |
| J141 | 0,18 | 41,45 | 108,31 | 66,86 | 0,41 |
| J157 | 1,39 | 31,49 | 108,32 | 76,83 | 0,46 |
| J158 | 1,16 | 25,88 | 108,32 | 82,44 | 0,44 |
| J168 | 1,01 | 40,21 | 108,33 | 68,12 | 0,55 |
| J170 | 0,58 | 46,87 | 108,33 | 61,46 | 0,51 |
| J176 | 0,02 | 50,64 | 108,35 | 57,71 | 0,61 |
| J178 | 0,24 | 58,87 | 108,35 | 49,48 | 0,51 |
| J184 | 0,24 | 56,09 | 108,34 | 52,25 | 0,26 |
| J185 | 0,74 | 43,71 | 108,38 | 64,67 | 0,74 |
| J190 | 0,59 | 58,49 | 108,88 | 50,39 | 0,84 |
| J197 | 0,15 | 41,86 | 109,44 | 67,58 | 0,93 |
| J213 | 0,4 | 52,07 | 108,87 | 56,8 | 0,74 |
| J215 | 0,93 | 75,76 | 108,8 | 33,04 | 0,65 |
| J216 | 1,23 | 53,06 | 109,6 | 56,54 | 1,01 |
| J227 | 0,72 | 52,89 | 109,34 | 56,45 | 0,95 |
| J238 | 0,27 | 44,16 | 109,22 | 65,06 | 0,96 |
| J239 | 1,3 | 43,49 | 109,21 | 65,72 | 0,94 |

| Nó | Consumo (L/s) | Cota do Terreno (m) | Carga Hidráulica (m) | Pressão (m) | Concentração de cloro (mg/L) |
|-----------|----------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| J255 | 0,54 | 35,31 | 109,17 | 73,86 | 0,91 |
| J256 | 0 | 40 | 109,22 | 69,22 | 1,09 |
| J258 | 1,12 | 51,24 | 109,33 | 58,09 | 0,93 |
| J260 | 0,32 | 32,53 | 109,05 | 76,52 | 0,9 |
| J265 | 0,65 | 50,87 | 108,98 | 58,11 | 0,82 |
| J266 | 0,34 | 39,83 | 109,03 | 69,2 | 0,87 |
| J267 | 1,09 | 22,31 | 110,1 | 87,79 | 1 |
| J61 | 0,87 | 72 | 109,27 | 37,27 | 0,69 |
| J92 | 0,53 | 72 | 109,19 | 37,19 | 0,6 |
| J268 | 0,48 | 69,68 | 104,53 | 34,85 | 0,55 |
| J278 | 1,16 | 104,29 | 133,28 | 28,99 | 0,54 |
| J281 | 0,79 | 83,72 | 133,16 | 49,44 | 0,46 |
| J283 | 1,25 | 94,06 | 133,17 | 39,11 | 0,46 |
| J284 | 0,7 | 77,38 | 133,15 | 55,77 | 0,43 |
| J136 | 0,44 | 81,8 | 131,32 | 49,52 | 0,57 |
| J137 | 1,17 | 9,11 | 73,67 | 64,56 | 1,64 |
| J145 | 0,38 | 47,46 | 108,31 | 60,85 | 0 |
| J118 | 0,37 | 75 | 110,07 | 35,07 | 0,57 |
| J52 | 0,22 | 54,7 | 109,61 | 54,91 | 0,87 |
| J81 | 0,47 | 50 | 84,89 | 34,89 | 0,47 |
| J88 | 0 | 45 | 85 | 40 | 0,66 |
| J90 | 1 | 84 | 137,45 | 53,45 | 0,85 |
| J93 | 3,4 | 65 | 137,06 | 72,06 | 0,81 |
| J147 | 0,38 | 68 | 135,86 | 67,86 | 0,49 |
| J148 | 0,95 | 50 | 94,45 | 44,45 | 0,44 |
| J149 | 0,55 | 40 | 94,46 | 54,46 | 0,53 |
| J150 | 1,09 | 60 | 94,41 | 34,41 | 0,47 |
| J151 | 1 | 60 | 130,77 | 70,77 | 0,45 |
| J152 | 0,59 | 32 | 80,2 | 48,2 | 0,38 |
| J153 | 0,11 | 60 | 130,77 | 70,77 | 0,42 |
| J169 | 0,55 | 42 | 82 | 40 | 0,5 |
| J182 | 0,46 | 40 | 81,98 | 41,98 | 0,45 |
| J222 | 0,96 | 32 | 80,25 | 48,25 | 0,45 |
| J224 | 0,42 | 37 | 80,23 | 43,23 | 0,41 |
| J230 | 0,99 | 30 | 104,69 | 74,69 | 0,72 |
| J235 | 0,19 | 53 | 104,74 | 51,74 | 0,8 |
| J240 | 0,8 | 87 | 135,54 | 48,54 | 0,47 |
| J269 | 0 | 56 | 78,04 | 22,04 | 1,96 |
| J273 | 0 | 56 | 78,04 | 22,04 | 1,97 |
| J274 | 0 | 56 | 78,04 | 22,04 | 0 |
| J276 | 0 | 56 | 58,99 | 2,99 | 0 |
| J280 | 0 | 56 | 58,99 | 2,99 | 1,98 |
| J285 | 0 | 56 | 58,98 | 2,98 | 1,96 |
| J287 | 0 | 40 | 66,31 | 26,31 | 1,28 |
| J288 | 0 | 40 | 66,31 | 26,31 | 1,13 |
| J289 | 0 | 40 | 66,27 | 26,27 | 1,26 |
| J290 | 0 | 40 | 66,23 | 26,23 | 1,21 |

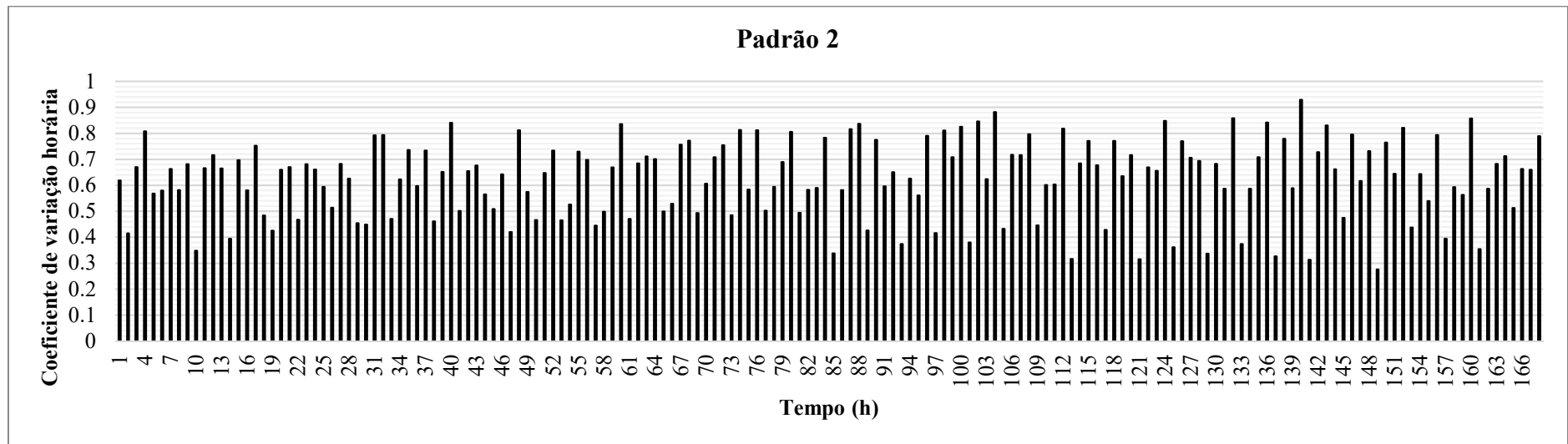
| Nó | Consumo (L/s) | Cota do Terreno (m) | Carga Hidráulica (m) | Pressão (m) | Concentração de cloro (mg/L) |
|-------------|--------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------|---|
| J291 | 0 | 65 | 148,87 | 83,87 | 1,14 |
| J292 | 0 | 40 | 109,22 | 69,22 | 1,1 |
| J299 | 0 | 40 | 66,31 | 26,31 | 1,1 |
| J300 | 0 | 40 | 66,31 | 26,31 | 1,11 |
| J301 | 0 | 44 | 63,04 | 19,04 | 1,04 |
| J302 | 0 | 44 | 62,97 | 18,97 | 1,02 |
| J304 | 0 | 44 | 125,7 | 81,7 | 1,04 |
| J306 | 0 | 44 | 125,48 | 81,48 | 1,08 |
| J307 | 0 | 44 | 62,87 | 18,87 | 1,11 |
| J309 | 0 | 44 | 62,87 | 18,87 | 0 |
| J317 | 0 | 44 | 112,13 | 68,13 | 1,15 |
| J323 | 0 | 44 | 112,13 | 68,13 | 0 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

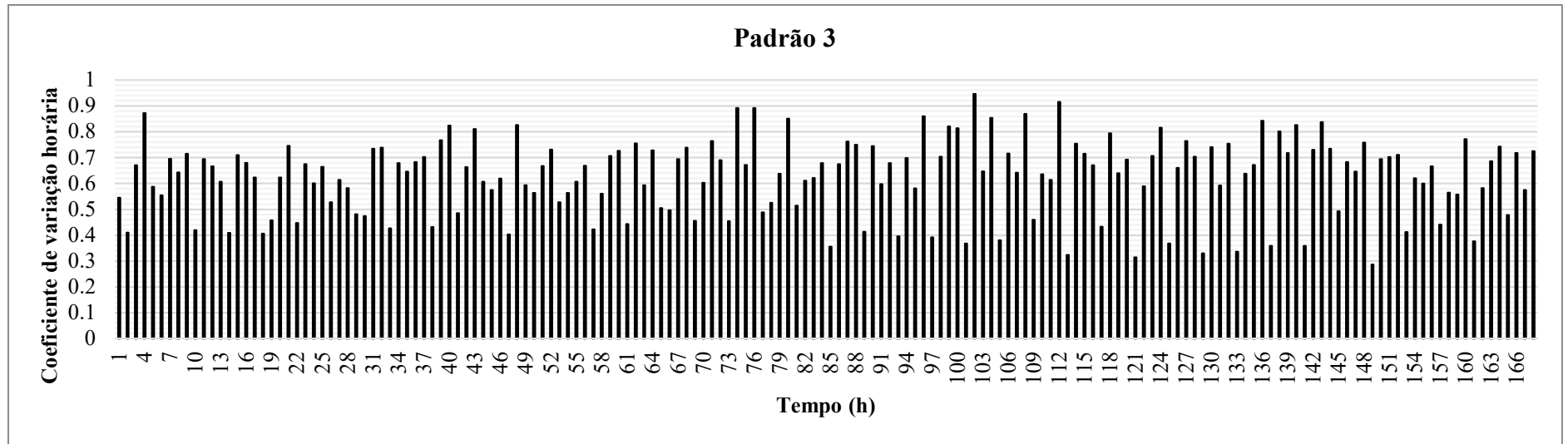
APÊNDICE I – Padrões de variação horária de consumo – Rede C-Town.



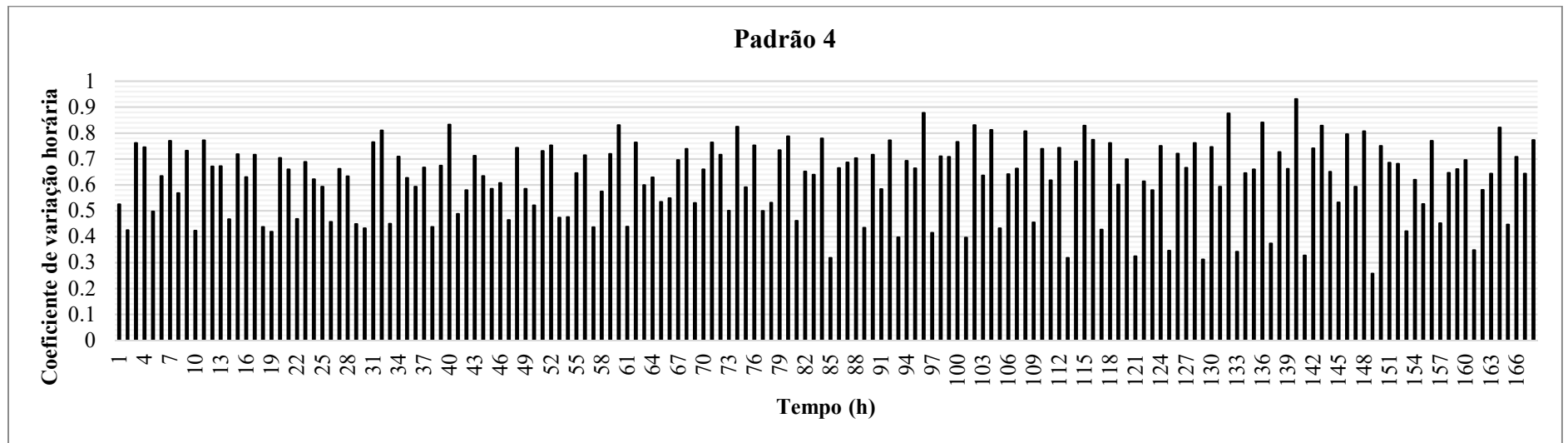
Fonte: Elaborado pelo autor



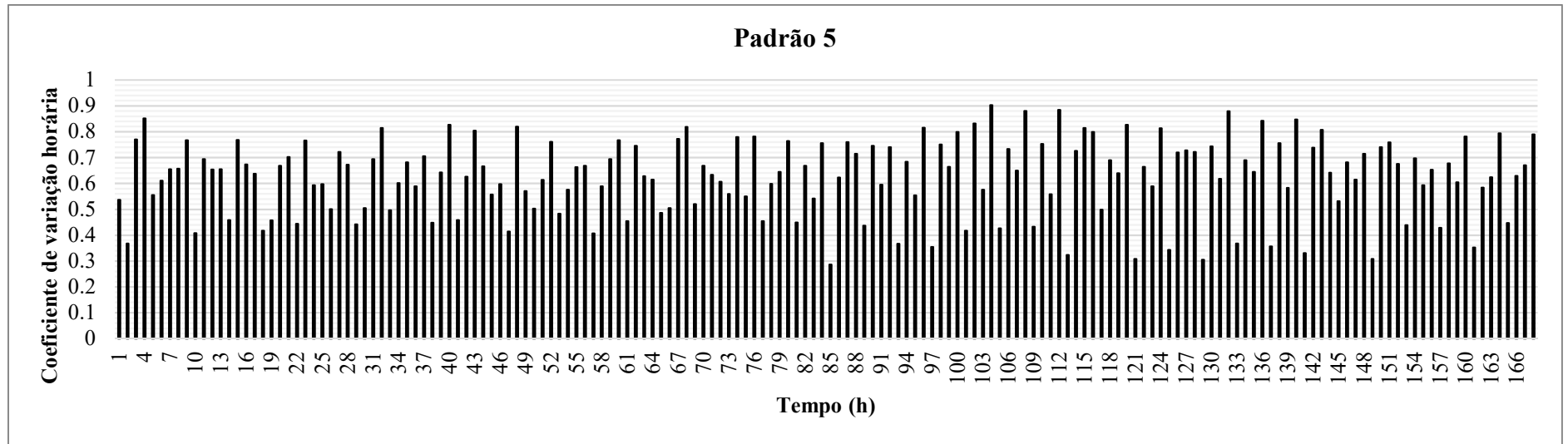
Fonte: Elaborado pelo autor



Fonte: Elaborado pelo autor



Fonte: Elaborado pelo autor



Fonte: Elaborado pelo autor

**APÊNDICE J – Gabarito referente aos trechos para perdas de carga calculadas por
Darcy-Weisbach – Rede MIGHA**

| Trecho | L (m) | D (mm) | ϵ (mm) | Q (L/s) | V (m/s) | ∇H |
|---------------|------------------|-------------------|---------------------------------------|--------------------|--------------------|------------------------------|
| 1 | 60 | 54,6 | 0,1079 | 0,19 | 0,08 | 0,00027 |
| 2 | 45 | 54,6 | 0,2755 | 0,31 | 0,13 | 0,00067 |
| 3 | 60 | 54,6 | 0,807 | 0,14 | 0,06 | 0,00015 |
| 4 | 60 | 54,6 | 0,2371 | 0,25 | 0,11 | 0,00045 |
| 5 | 45 | 54,6 | 0,7998 | 0,29 | 0,12 | 0,00071 |
| 6 | 60 | 54,6 | 0,8165 | 0,21 | 0,09 | 0,00042 |
| 7 | 60 | 54,6 | 0,9545 | 0,24 | 0,1 | 0,00051 |
| 8 | 45 | 54,6 | 0,6606 | 0,32 | 0,14 | 0,00084 |
| 9 | 60 | 54,6 | 0,939 | 0,21 | 0,09 | 0,00042 |
| 10 | 60 | 54,6 | 0,6423 | 0,45 | 0,19 | 0,00159 |
| 11 | 45 | 54,6 | 0,4804 | 0,39 | 0,17 | 0,00112 |
| 12 | 60 | 54,6 | 0,9486 | 0,4 | 0,17 | 0,00138 |
| 13 | 60 | 54,6 | 0,5227 | 0,63 | 0,27 | 0,00285 |
| 14 | 45 | 54,6 | 0,3804 | 0,49 | 0,21 | 0,00163 |
| 15 | 60 | 54,6 | 0,349 | 0,62 | 0,26 | 0,00247 |
| 16 | 60 | 54,6 | 0,7661 | 0,92 | 0,39 | 0,00651 |
| 17 | 45 | 54,6 | 0,0931 | 0,57 | 0,24 | 0,00174 |
| 18 | 60 | 54,6 | 0,9763 | 0,87 | 0,37 | 0,00643 |
| 19 | 60 | 54,6 | 0,9533 | 1,08 | 0,46 | 0,00962 |
| 20 | 45 | 54,6 | 0,8889 | 0,42 | 0,18 | 0,00149 |
| 21 | 60 | 54,6 | 0,4163 | 1,24 | 0,53 | 0,00981 |
| 22 | 60 | 54,6 | 0,3961 | 1,38 | 0,59 | 0,01187 |
| 23 | 45 | 54,6 | 0,2476 | 0,57 | 0,24 | 0,00198 |
| 24 | 60 | 54,6 | 0,8984 | 1,2 | 0,51 | 0,01151 |
| 25 | 60 | 54,6 | 0,1048 | 1,72 | 0,74 | 0,01379 |
| 26 | 45 | 54,6 | 0,6863 | 0,88 | 0,38 | 0,00587 |
| 27 | 60 | 54,6 | 0,7722 | 1,19 | 0,51 | 0,01087 |
| 28 | 60 | 68,2 | 0,0978 | 2,35 | 0,64 | 0,00797 |
| 29 | 45 | 54,6 | 0,604 | 0,77 | 0,33 | 0,00438 |
| 30 | 60 | 54,6 | 0,3311 | 1,23 | 0,52 | 0,00909 |
| 31 | 60 | 77,2 | 0,1113 | 3,01 | 0,64 | 0,00696 |
| 32 | 45 | 54,6 | 0,3428 | 0,53 | 0,23 | 0,00185 |
| 33 | 60 | 54,6 | 0,3405 | 1,21 | 0,52 | 0,00886 |
| 34 | 60 | 77,2 | 0,1638 | 3,34 | 0,71 | 0,00903 |
| 35 | 45 | 54,6 | 0,9942 | 0,44 | 0,19 | 0,00172 |
| 36 | 60 | 54,6 | 0,3366 | 1,23 | 0,52 | 0,00913 |
| 37 | 60 | 77,2 | 0,0688 | 3,78 | 0,81 | 0,01 |
| 38 | 45 | 54,6 | 0,4909 | 0,45 | 0,19 | 0,00149 |
| 39 | 60 | 54,6 | 0,6447 | 1,31 | 0,56 | 0,01241 |
| 40 | 60 | 77,2 | 0,1018 | 3,31 | 0,71 | 0,0082 |
| 41 | 45 | 54,6 | 0,8023 | 0,16 | 0,07 | 0,00022 |
| 42 | 60 | 68,2 | 0,0789 | 2,26 | 0,62 | 0,00725 |
| 43 | 60 | 77,2 | 0,3481 | 2,95 | 0,63 | 0,00833 |
| 44 | 45 | 54,6 | 0,7494 | 0,53 | 0,22 | 0,00221 |
| 45 | 60 | 54,6 | 0,4258 | 1,24 | 0,53 | 0,00983 |
| 46 | 60 | 68,2 | 0,2116 | 2,31 | 0,63 | 0,00884 |

| Trecho | L (m) | D (mm) | ϵ (mm) | Q (L/s) | V (m/s) | VH |
|---------------|------------------|-------------------|---------------------------------------|--------------------|--------------------|-----------|
| 47 | 45 | 54,6 | 0,0689 | 0,7 | 0,3 | 0,00249 |
| 48 | 60 | 54,6 | 0,9922 | 1,04 | 0,44 | 0,00905 |
| 49 | 60 | 54,6 | 0,8955 | 1,51 | 0,65 | 0,01822 |
| 50 | 45 | 54,6 | 0,6907 | 0,29 | 0,12 | 0,00071 |
| 51 | 60 | 54,6 | 0,8014 | 1,43 | 0,61 | 0,01583 |
| 52 | 60 | 54,6 | 0,5013 | 1,6 | 0,68 | 0,01689 |
| 53 | 45 | 54,6 | 0,2999 | 0,29 | 0,12 | 0,0006 |
| 54 | 60 | 54,6 | 0,3627 | 1,67 | 0,72 | 0,01697 |
| 55 | 60 | 54,6 | 0,3213 | 1,48 | 0,63 | 0,01288 |
| 56 | 45 | 54,6 | 0,5964 | 0,13 | 0,06 | 0,00011 |
| 57 | 60 | 54,6 | 0,5635 | 1,38 | 0,59 | 0,01325 |
| 58 | 60 | 54,6 | 0,2283 | 1,5 | 0,64 | 0,01224 |
| 59 | 45 | 54,6 | 0,9025 | 0,08 | 0,04 | 0,00004 |
| 60 | 60 | 54,6 | 0,0944 | 1,63 | 0,7 | 0,01229 |
| 61 | 60 | 54,6 | 0,4616 | 1,57 | 0,67 | 0,01602 |
| 62 | 45 | 54,6 | 0,4401 | 0,02 | 0,01 | 0,00001 |
| 63 | 60 | 54,6 | 0,3409 | 1,64 | 0,7 | 0,01605 |
| 64 | 60 | 54,6 | 0,8548 | 1,53 | 0,66 | 0,01849 |
| 65 | 45 | 54,6 | 0,5949 | 0,07 | 0,03 | 0,00003 |
| 66 | 60 | 54,6 | 0,836 | 1,54 | 0,66 | 0,01851 |
| 67 | 60 | 54,6 | 0,5287 | 1,26 | 0,54 | 0,01088 |
| 68 | 45 | 54,6 | 0,869 | 0,1 | 0,04 | 0,00005 |
| 69 | 60 | 54,6 | 0,0988 | 1,52 | 0,65 | 0,01081 |
| 70 | 60 | 54,6 | 0,7057 | 1,08 | 0,46 | 0,00868 |
| 71 | 45 | 54,6 | 0,0882 | 0,01 | 0 | 0 |
| 72 | 60 | 54,6 | 0,1745 | 1,29 | 0,55 | 0,00872 |
| 73 | 60 | 54,6 | 0,5016 | 0,97 | 0,42 | 0,00648 |
| 74 | 45 | 54,6 | 0,6094 | 0,06 | 0,03 | 0,00003 |
| 75 | 60 | 54,6 | 0,7478 | 0,92 | 0,39 | 0,00646 |
| 76 | 60 | 54,6 | 0,0827 | 0,77 | 0,33 | 0,00298 |
| 77 | 45 | 54,6 | 0,351 | 0,22 | 0,09 | 0,00038 |
| 78 | 60 | 54,6 | 0,7858 | 0,64 | 0,27 | 0,00328 |
| 79 | 60 | 54,6 | 0,146 | 0,53 | 0,23 | 0,00161 |
| 80 | 45 | 54,6 | 0,4592 | 0,13 | 0,05 | 0,0001 |
| 81 | 60 | 54,6 | 0,3338 | 0,46 | 0,19 | 0,0014 |
| 82 | 60 | 54,6 | 0,7534 | 0,2 | 0,08 | 0,00035 |
| 83 | 45 | 54,6 | 0,8612 | 0 | 0 | 0 |
| 84 | 60 | 54,6 | 0,6792 | 0,18 | 0,08 | 0,00028 |
| 85 | 45 | 54,6 | 0,109 | 0,28 | 0,12 | 0,00052 |
| 86 | 45 | 54,6 | 0,6342 | 0,61 | 0,26 | 0,00281 |
| 87 | 60 | 54,6 | 0,6831 | 0,15 | 0,06 | 0,00018 |
| 88 | 45 | 54,6 | 0,8765 | 0,64 | 0,27 | 0,0034 |
| 89 | 60 | 54,6 | 0,7417 | 0,07 | 0,03 | 0,00003 |
| 90 | 45 | 54,6 | 0,9057 | 0,69 | 0,3 | 0,00398 |
| 91 | 60 | 54,6 | 0,7128 | 0,04 | 0,02 | 0,00002 |
| 92 | 45 | 54,6 | 0,8343 | 0,85 | 0,36 | 0,00575 |
| 93 | 60 | 54,6 | 0,2482 | 0,1 | 0,04 | 0,00005 |

| Trecho | L (m) | D (mm) | ϵ (mm) | Q (L/s) | V (m/s) | VH |
|---------------|------------------|-------------------|---------------------------------------|--------------------|--------------------|-----------|
| 94 | 45 | 54,6 | 0,5301 | 1,05 | 0,45 | 0,00754 |
| 95 | 60 | 54,6 | 0,6508 | 0,38 | 0,16 | 0,00113 |
| 96 | 45 | 54,6 | 0,2891 | 1,09 | 0,46 | 0,00699 |
| 97 | 60 | 54,6 | 0,5899 | 0,98 | 0,42 | 0,00684 |
| 98 | 45 | 54,6 | 0,3089 | 0,6 | 0,26 | 0,00231 |
| 99 | 60 | 54,6 | 0,7488 | 1,33 | 0,57 | 0,01332 |
| 100 | 45 | 54,6 | 0,9444 | 0,83 | 0,35 | 0,00574 |
| 101 | 60 | 68,2 | 0,0827 | 2,53 | 0,69 | 0,00894 |
| 102 | 45 | 54,6 | 0,3342 | 1,18 | 0,5 | 0,00838 |
| 103 | 60 | 77,2 | 0,2913 | 3,12 | 0,67 | 0,00889 |
| 104 | 45 | 54,6 | 0,6096 | 0,97 | 0,41 | 0,00672 |
| 105 | 60 | 77,2 | 0,6125 | 3,05 | 0,65 | 0,01034 |
| 106 | 45 | 54,6 | 0,5884 | 1,13 | 0,48 | 0,00909 |
| 107 | 60 | 77,2 | 0,1287 | 3 | 0,64 | 0,00708 |
| 108 | 45 | 54,6 | 0,2008 | 1,11 | 0,47 | 0,00672 |
| 109 | 60 | 68,2 | 0,6237 | 2,24 | 0,61 | 0,01091 |
| 110 | 45 | 54,6 | 0,5204 | 0,96 | 0,41 | 0,00636 |
| 111 | 60 | 54,6 | 0,2966 | 1,48 | 0,63 | 0,01267 |
| 112 | 45 | 54,6 | 0,8681 | 0,57 | 0,24 | 0,00269 |
| 113 | 60 | 54,6 | 0,8252 | 1,34 | 0,57 | 0,01404 |
| 114 | 45 | 54,6 | 0,9314 | 0,11 | 0,05 | 0,00006 |
| 115 | 60 | 77,2 | 0,2805 | 2,92 | 0,62 | 0,00777 |
| 116 | 45 | 54,6 | 0,4247 | 0,09 | 0,04 | 0,00004 |
| 117 | 60 | 77,2 | 0,4572 | 2,98 | 0,64 | 0,00912 |
| 118 | 45 | 54,6 | 0,3639 | 0,79 | 0,34 | 0,00397 |
| 119 | 60 | 68,2 | 0,7097 | 2,39 | 0,65 | 0,01282 |
| 120 | 45 | 54,6 | 0,7576 | 0,65 | 0,28 | 0,00333 |
| 121 | 60 | 54,6 | 0,581 | 1,59 | 0,68 | 0,01745 |
| 122 | 45 | 54,6 | 0,3935 | 0,68 | 0,29 | 0,00308 |
| 123 | 60 | 54,6 | 0,3806 | 1,48 | 0,63 | 0,01344 |
| 124 | 45 | 54,6 | 0,3793 | 0,22 | 0,09 | 0,00038 |
| 125 | 60 | 54,6 | 0,9499 | 1,32 | 0,57 | 0,01432 |
| 126 | 45 | 54,6 | 0,4807 | 0,09 | 0,04 | 0,00004 |
| 127 | 60 | 54,6 | 0,083 | 1,92 | 0,82 | 0,0163 |
| 128 | 45 | 54,6 | 0,0897 | 0,15 | 0,06 | 0,00016 |
| 129 | 60 | 54,6 | 0,5845 | 1,63 | 0,7 | 0,01843 |
| 130 | 45 | 54,6 | 0,5397 | 0,02 | 0,01 | 0,00001 |
| 131 | 60 | 54,6 | 0,2129 | 1,42 | 0,61 | 0,01093 |
| 132 | 45 | 54,6 | 0,1434 | 0,18 | 0,08 | 0,00023 |
| 133 | 60 | 54,6 | 0,7807 | 1,07 | 0,46 | 0,00888 |
| 134 | 45 | 54,6 | 0,4073 | 0,04 | 0,02 | 0,00002 |
| 135 | 60 | 54,6 | 0,1458 | 1,1 | 0,47 | 0,0063 |
| 136 | 45 | 54,6 | 0,3389 | 0,32 | 0,14 | 0,00071 |
| 137 | 60 | 54,6 | 0,322 | 0,78 | 0,33 | 0,0038 |
| 138 | 45 | 54,6 | 0,137 | 0,15 | 0,06 | 0,00015 |
| 139 | 60 | 54,6 | 0,5252 | 0,36 | 0,15 | 0,00097 |
| 140 | 45 | 54,6 | 0,1494 | 0,07 | 0,03 | 0,00004 |

| Trecho | L (m) | D (mm) | ϵ (mm) | Q (L/s) | V (m/s) | VH |
|---------------|------------------|-------------------|---------------------------------------|--------------------|--------------------|-----------|
| 141 | 60 | 54,6 | 0,5925 | 0,15 | 0,07 | 0,00019 |
| 142 | 45 | 54,6 | 0,6592 | 0,61 | 0,26 | 0,00284 |
| 143 | 45 | 54,6 | 0,2967 | 0,97 | 0,42 | 0,00569 |
| 144 | 60 | 54,6 | 0,75 | 0,09 | 0,04 | 0,00004 |
| 145 | 45 | 54,6 | 0,8561 | 0,92 | 0,39 | 0,00684 |
| 146 | 60 | 54,6 | 0,061 | 0,4 | 0,17 | 0,0009 |
| 147 | 45 | 54,6 | 0,8897 | 1,06 | 0,45 | 0,00913 |
| 148 | 60 | 54,6 | 0,7739 | 0,46 | 0,2 | 0,00173 |
| 149 | 45 | 54,6 | 0,4921 | 1,4 | 0,6 | 0,01308 |
| 150 | 60 | 54,6 | 0,3405 | 0,67 | 0,29 | 0,00291 |
| 151 | 45 | 54,6 | 0,6746 | 1,73 | 0,74 | 0,02156 |
| 152 | 60 | 54,6 | 0,3952 | 0,9 | 0,38 | 0,00523 |
| 153 | 45 | 54,6 | 0,38 | 1,54 | 0,66 | 0,01454 |
| 154 | 60 | 54,6 | 0,9884 | 1,21 | 0,52 | 0,0121 |
| 155 | 45 | 54,6 | 0,1145 | 1,9 | 0,81 | 0,01683 |
| 156 | 60 | 77,2 | 0,549 | 3,29 | 0,7 | 0,0116 |
| 157 | 45 | 54,6 | 0,2027 | 1,52 | 0,65 | 0,01227 |
| 158 | 60 | 77,2 | 0,5097 | 3,43 | 0,73 | 0,01236 |
| 159 | 45 | 54,6 | 0,3144 | 1,18 | 0,5 | 0,00834 |
| 160 | 60 | 77,2 | 0,6438 | 3,25 | 0,69 | 0,01183 |
| 161 | 45 | 54,6 | 0,8301 | 0,92 | 0,39 | 0,0067 |
| 162 | 60 | 77,2 | 0,72 | 3,15 | 0,67 | 0,01157 |
| 163 | 45 | 54,6 | 0,9142 | 0,77 | 0,33 | 0,00494 |
| 164 | 60 | 77,2 | 0,1036 | 3,35 | 0,71 | 0,0084 |
| 165 | 45 | 54,6 | 0,3369 | 0,54 | 0,23 | 0,00194 |
| 166 | 60 | 77,2 | 0,9139 | 3,24 | 0,69 | 0,01316 |
| 167 | 45 | 54,6 | 0,9695 | 0,92 | 0,39 | 0,00712 |
| 168 | 60 | 77,2 | 0,1094 | 3,41 | 0,73 | 0,00879 |
| 169 | 45 | 54,6 | 0,2775 | 1,12 | 0,48 | 0,00728 |
| 170 | 60 | 68,2 | 0,3997 | 2,71 | 0,74 | 0,01392 |
| 171 | 45 | 54,6 | 0,4349 | 0,33 | 0,14 | 0,00081 |
| 172 | 60 | 68,2 | 0,718 | 2,36 | 0,65 | 0,01262 |
| 173 | 45 | 54,6 | 0,1957 | 0,12 | 0,05 | 0,00008 |
| 174 | 60 | 77,2 | 0,3927 | 3,14 | 0,67 | 0,00967 |
| 175 | 45 | 54,6 | 0,2529 | 0,18 | 0,08 | 0,00026 |
| 176 | 60 | 77,2 | 0,445 | 3,54 | 0,76 | 0,01268 |
| 177 | 45 | 54,6 | 0,429 | 0,69 | 0,29 | 0,0032 |
| 178 | 60 | 77,2 | 0,4706 | 3,86 | 0,83 | 0,01525 |
| 179 | 45 | 54,6 | 0,2575 | 0,58 | 0,25 | 0,00208 |
| 180 | 60 | 77,2 | 0,0851 | 4,5 | 0,96 | 0,01427 |
| 181 | 45 | 54,6 | 0,8271 | 0,94 | 0,4 | 0,00695 |
| 182 | 60 | 77,2 | 0,1115 | 3,78 | 0,81 | 0,01067 |
| 183 | 45 | 54,6 | 0,5903 | 0,08 | 0,03 | 0,00004 |
| 184 | 60 | 54,6 | 0,2039 | 2,04 | 0,87 | 0,02154 |
| 185 | 45 | 54,6 | 0,0781 | 0,14 | 0,06 | 0,00011 |
| 186 | 60 | 54,6 | 0,6423 | 1,6 | 0,68 | 0,01832 |
| 187 | 45 | 54,6 | 0,6023 | 0,16 | 0,07 | 0,00022 |

| Trecho | L (m) | D (mm) | ϵ (mm) | Q (L/s) | V (m/s) | VH |
|---------------|------------------|-------------------|---------------------------------------|--------------------|--------------------|-----------|
| 188 | 60 | 54,6 | 0,183 | 1,46 | 0,63 | 0,01118 |
| 189 | 45 | 54,6 | 0,0663 | 0,01 | 0,01 | 0,00001 |
| 190 | 60 | 54,6 | 0,6694 | 1,09 | 0,46 | 0,00872 |
| 191 | 45 | 54,6 | 0,2704 | 0,07 | 0,03 | 0,00003 |
| 192 | 60 | 54,6 | 0,8709 | 0,88 | 0,38 | 0,00632 |
| 193 | 45 | 54,6 | 0,47 | 0,17 | 0,07 | 0,00025 |
| 194 | 60 | 54,6 | 0,3366 | 0,75 | 0,32 | 0,00359 |
| 195 | 45 | 54,6 | 0,6174 | 0,11 | 0,05 | 0,00006 |
| 196 | 60 | 54,6 | 0,9405 | 0,37 | 0,16 | 0,0012 |
| 197 | 45 | 54,6 | 0,0899 | 0,1 | 0,04 | 0,00005 |
| 198 | 60 | 54,6 | 0,1129 | 0,16 | 0,07 | 0,00019 |
| 199 | 45 | 54,6 | 0,4079 | 0,91 | 0,39 | 0,00539 |
| 200 | 45 | 54,6 | 0,6987 | 0,89 | 0,38 | 0,00594 |
| 201 | 60 | 54,6 | 0,4747 | 0,23 | 0,1 | 0,00043 |
| 202 | 45 | 54,6 | 0,109 | 1,13 | 0,48 | 0,00627 |
| 203 | 60 | 54,6 | 0,2592 | 0,42 | 0,18 | 0,00114 |
| 204 | 45 | 54,6 | 0,3814 | 1,1 | 0,47 | 0,00768 |
| 205 | 60 | 54,6 | 0,7096 | 0,6 | 0,26 | 0,00279 |
| 206 | 45 | 54,6 | 0,3397 | 1,43 | 0,61 | 0,01228 |
| 207 | 60 | 54,6 | 0,5382 | 0,96 | 0,41 | 0,00636 |
| 208 | 45 | 77,2 | 0,1463 | 4,09 | 0,87 | 0,01302 |
| 209 | 60 | 54,6 | 0,1489 | 1,05 | 0,45 | 0,00579 |
| 210 | 45 | 77,2 | 0,7611 | 3,78 | 0,81 | 0,01677 |
| 211 | 60 | 54,6 | 0,3729 | 1,22 | 0,52 | 0,00929 |
| 212 | 45 | 68,2 | 0,5103 | 2,3 | 0,63 | 0,01085 |
| 213 | 60 | 77,2 | 0,3458 | 4,13 | 0,88 | 0,01604 |
| 214 | 45 | 54,6 | 0,1362 | 1,59 | 0,68 | 0,01241 |
| 215 | 60 | 77,2 | 0,8705 | 3,01 | 0,64 | 0,01118 |
| 216 | 45 | 54,6 | 0,5509 | 1,34 | 0,57 | 0,01236 |
| 217 | 60 | 77,2 | 0,8429 | 3,12 | 0,67 | 0,01187 |
| 218 | 45 | 54,6 | 0,2646 | 1,32 | 0,57 | 0,00996 |
| 219 | 60 | 77,2 | 0,6918 | 3,42 | 0,73 | 0,01337 |
| 220 | 45 | 54,6 | 0,9182 | 0,88 | 0,38 | 0,00642 |
| 221 | 60 | 77,2 | 0,3525 | 3,41 | 0,73 | 0,01105 |
| 222 | 45 | 54,6 | 0,5653 | 0,99 | 0,42 | 0,00687 |
| 223 | 60 | 77,2 | 0,3815 | 3,64 | 0,78 | 0,01283 |
| 224 | 45 | 54,6 | 0,1064 | 0,8 | 0,34 | 0,00332 |
| 225 | 60 | 77,2 | 0,7423 | 3,12 | 0,67 | 0,01145 |
| 226 | 45 | 54,6 | 0,6222 | 1,1 | 0,47 | 0,00878 |
| 227 | 60 | 77,2 | 0,0674 | 3,75 | 0,8 | 0,00982 |
| 228 | 45 | 54,6 | 0,9013 | 1,21 | 0,52 | 0,01187 |
| 229 | 60 | 77,2 | 0,131 | 3,65 | 0,78 | 0,01029 |
| 230 | 45 | 54,6 | 0,9355 | 0,76 | 0,32 | 0,00482 |
| 231 | 60 | 68,2 | 0,9581 | 2,46 | 0,67 | 0,01496 |
| 232 | 45 | 54,6 | 0,7878 | 0,71 | 0,3 | 0,00404 |
| 233 | 60 | 68,2 | 0,874 | 2,35 | 0,64 | 0,01327 |
| 234 | 45 | 54,6 | 0,0646 | 1,44 | 0,62 | 0,00925 |

| Trecho | L (m) | D (mm) | ϵ (mm) | Q (L/s) | V (m/s) | VH |
|---------------|------------------|-------------------|---------------------------------------|--------------------|--------------------|-----------|
| 235 | 60 | 68,2 | 0,5615 | 2,32 | 0,64 | 0,01134 |
| 236 | 45 | 54,6 | 0,4753 | 0,03 | 0,01 | 0,00002 |
| 237 | 60 | 54,6 | 0,5517 | 1,77 | 0,75 | 0,02122 |
| 238 | 45 | 54,6 | 0,0987 | 0,7 | 0,3 | 0,00261 |
| 239 | 60 | 54,6 | 0,3318 | 1,45 | 0,62 | 0,01261 |
| 240 | 45 | 54,6 | 0,5391 | 0,45 | 0,19 | 0,00154 |
| 241 | 60 | 54,6 | 0,2757 | 1,93 | 0,82 | 0,02074 |
| 242 | 45 | 54,6 | 0,8295 | 0,16 | 0,07 | 0,00021 |
| 243 | 60 | 54,6 | 0,2548 | 1,76 | 0,75 | 0,01701 |
| 244 | 45 | 54,6 | 0,1044 | 0,28 | 0,12 | 0,0005 |
| 245 | 60 | 54,6 | 0,6958 | 1,26 | 0,54 | 0,01171 |
| 246 | 45 | 54,6 | 0,8952 | 0,12 | 0,05 | 0,00009 |
| 247 | 60 | 54,6 | 0,0844 | 1,33 | 0,57 | 0,00829 |
| 248 | 45 | 54,6 | 0,2376 | 0,06 | 0,02 | 0,00003 |
| 249 | 60 | 54,6 | 0,1636 | 1,1 | 0,47 | 0,00636 |
| 250 | 45 | 54,6 | 0,9767 | 0,01 | 0,01 | 0,00001 |
| 251 | 60 | 54,6 | 0,8286 | 0,67 | 0,29 | 0,00362 |
| 252 | 45 | 54,6 | 0,6887 | 0,11 | 0,05 | 0,00007 |
| 253 | 60 | 54,6 | 0,3393 | 0,43 | 0,18 | 0,00125 |
| 254 | 45 | 54,6 | 0,5685 | 0,12 | 0,05 | 0,00007 |
| 255 | 60 | 54,6 | 0,3245 | 0,16 | 0,07 | 0,00019 |
| 256 | 45 | 54,6 | 0,3389 | 0,93 | 0,4 | 0,00542 |
| 257 | 45 | 54,6 | 0,6695 | 0,9 | 0,38 | 0,00604 |
| 258 | 60 | 54,6 | 0,1625 | 0,36 | 0,15 | 0,0008 |
| 259 | 45 | 54,6 | 0,4112 | 1,05 | 0,45 | 0,00708 |
| 260 | 60 | 54,6 | 0,4571 | 0,52 | 0,22 | 0,00192 |
| 261 | 45 | 54,6 | 0,4234 | 1,15 | 0,49 | 0,00849 |
| 262 | 60 | 54,6 | 0,1041 | 0,87 | 0,37 | 0,00384 |
| 263 | 45 | 54,6 | 0,1605 | 1,51 | 0,65 | 0,01163 |
| 264 | 60 | 54,6 | 0,7766 | 1,06 | 0,45 | 0,00871 |
| 265 | 45 | 100 | 0,3036 | 6,62 | 0,84 | 0,01015 |
| 266 | 60 | 54,6 | 0,8335 | 0,76 | 0,33 | 0,00468 |
| 267 | 45 | 100 | 0,0978 | 6,91 | 0,88 | 0,0089 |
| 268 | 60 | 54,6 | 0,6159 | 1,2 | 0,51 | 0,01023 |
| 269 | 45 | 54,6 | 0,5141 | 1,44 | 0,61 | 0,01387 |
| 270 | 60 | 77,2 | 0,3589 | 3,59 | 0,77 | 0,01232 |
| 271 | 45 | 68,2 | 0,493 | 2,46 | 0,67 | 0,0122 |
| 272 | 60 | 77,2 | 0,5995 | 3,36 | 0,72 | 0,01244 |
| 273 | 45 | 54,6 | 0,1062 | 1,92 | 0,82 | 0,01691 |
| 274 | 60 | 77,2 | 0,3071 | 3 | 0,64 | 0,00834 |
| 275 | 45 | 54,6 | 0,0779 | 1,57 | 0,67 | 0,01111 |
| 276 | 60 | 77,2 | 0,3712 | 4,31 | 0,92 | 0,01772 |
| 277 | 45 | 54,6 | 0,1049 | 1,38 | 0,59 | 0,00904 |
| 278 | 60 | 77,2 | 0,3653 | 3,63 | 0,77 | 0,0126 |
| 279 | 45 | 54,6 | 0,9864 | 1,13 | 0,48 | 0,01062 |
| 280 | 60 | 77,2 | 0,5415 | 3,3 | 0,71 | 0,01165 |
| 281 | 45 | 54,6 | 0,0766 | 1,7 | 0,72 | 0,01278 |

| Trecho | L (m) | D (mm) | ϵ (mm) | Q (L/s) | V (m/s) | VH |
|---------------|------------------|-------------------|---------------------------------------|--------------------|--------------------|-----------|
| 282 | 60 | 77,2 | 0,6433 | 2,95 | 0,63 | 0,00983 |
| 283 | 45 | 54,6 | 0,5849 | 1,26 | 0,54 | 0,01121 |
| 284 | 60 | 68,2 | 0,6209 | 2,25 | 0,62 | 0,011 |
| 285 | 45 | 54,6 | 0,7055 | 0,28 | 0,12 | 0,00066 |
| 286 | 60 | 54,6 | 0,9494 | 1,5 | 0,64 | 0,01821 |
| 287 | 45 | 54,6 | 0,4248 | 0,81 | 0,35 | 0,00435 |
| 288 | 60 | 68,2 | 0,8567 | 2,26 | 0,62 | 0,01219 |
| 289 | 45 | 54,6 | 0,7319 | 0,91 | 0,39 | 0,00626 |
| 290 | 60 | 68,2 | 0,5391 | 2,39 | 0,65 | 0,01184 |
| 291 | 45 | 54,6 | 0,4693 | 1,13 | 0,48 | 0,00854 |
| 292 | 60 | 68,2 | 0,2557 | 2,37 | 0,65 | 0,00963 |
| 293 | 45 | 54,6 | 0,8945 | 0,09 | 0,04 | 0,00004 |
| 294 | 60 | 54,6 | 0,869 | 1,88 | 0,8 | 0,02766 |
| 295 | 45 | 54,6 | 0,398 | 0,11 | 0,05 | 0,00007 |
| 296 | 60 | 54,6 | 0,1019 | 1,65 | 0,7 | 0,01263 |
| 297 | 45 | 54,6 | 0,3794 | 0,41 | 0,18 | 0,0012 |
| 298 | 60 | 54,6 | 0,6948 | 1,72 | 0,73 | 0,02159 |
| 299 | 45 | 54,6 | 0,1039 | 0,09 | 0,04 | 0,00004 |
| 300 | 60 | 54,6 | 0,1983 | 1,76 | 0,75 | 0,01614 |
| 301 | 45 | 54,6 | 0,603 | 0,06 | 0,02 | 0,00003 |
| 302 | 60 | 54,6 | 0,1307 | 1,55 | 0,66 | 0,01166 |
| 303 | 45 | 54,6 | 0,1597 | 0,11 | 0,05 | 0,00007 |
| 304 | 60 | 54,6 | 0,3708 | 1,15 | 0,49 | 0,00826 |
| 305 | 45 | 54,6 | 0,5154 | 0,12 | 0,05 | 0,00008 |
| 306 | 60 | 54,6 | 0,9565 | 0,88 | 0,38 | 0,00648 |
| 307 | 45 | 54,6 | 0,9039 | 0,01 | 0 | 0 |
| 308 | 60 | 54,6 | 0,4776 | 0,72 | 0,31 | 0,00355 |
| 309 | 45 | 54,6 | 0,6939 | 0,16 | 0,07 | 0,00021 |
| 310 | 60 | 54,6 | 0,1897 | 0,48 | 0,21 | 0,00142 |
| 311 | 45 | 54,6 | 0,0739 | 0,15 | 0,06 | 0,00015 |
| 312 | 60 | 54,6 | 0,4865 | 0,14 | 0,06 | 0,00015 |
| 313 | 45 | 54,6 | 0,7301 | 0,85 | 0,36 | 0,00556 |
| 314 | 45 | 54,6 | 0,1819 | 0,99 | 0,42 | 0,00529 |
| 315 | 60 | 54,6 | 0,4017 | 0,33 | 0,14 | 0,00077 |
| 316 | 45 | 54,6 | 0,3435 | 1,06 | 0,45 | 0,00693 |
| 317 | 60 | 54,6 | 0,8641 | 0,62 | 0,26 | 0,00315 |
| 318 | 45 | 54,6 | 0,24 | 1,19 | 0,51 | 0,00798 |
| 319 | 60 | 54,6 | 0,2766 | 0,88 | 0,38 | 0,00464 |
| 320 | 45 | 68,2 | 0,8438 | 2,07 | 0,57 | 0,01018 |
| 321 | 60 | 54,6 | 0,3052 | 1,33 | 0,57 | 0,01037 |
| 322 | 45 | 100 | 0,7708 | 8,84 | 1,12 | 0,02299 |
| 323 | 60 | 54,6 | 0,4715 | 1,48 | 0,63 | 0,01429 |
| 324 | 45 | 100 | 0,9412 | 9,64 | 1,23 | 0,02907 |
| 325 | 60 | 156,4 | 0,0633 | 18,36 | 0,96 | 0,00567 |
| 326 | 45 | 54,6 | 0,8164 | 1,44 | 0,62 | 0,01611 |
| 327 | 60 | 100 | 0,6832 | 8,81 | 1,12 | 0,02204 |
| 328 | 45 | 68,2 | 0,5008 | 2,34 | 0,64 | 0,01116 |

| Trecho | L (m) | D (mm) | ϵ (mm) | Q (L/s) | V (m/s) | VH |
|---------------|------------------|-------------------|---------------------------------------|--------------------|--------------------|-----------|
| 329 | 60 | 100 | 0,3436 | 8,27 | 1,05 | 0,01615 |
| 330 | 45 | 77,2 | 0,3639 | 3,39 | 0,72 | 0,01104 |
| 331 | 60 | 100 | 0,0642 | 6,91 | 0,88 | 0,00842 |
| 332 | 45 | 54,6 | 0,4575 | 1,12 | 0,48 | 0,00823 |
| 333 | 60 | 77,2 | 0,7835 | 4,09 | 0,87 | 0,01983 |
| 334 | 45 | 54,6 | 0,4032 | 1,3 | 0,56 | 0,01073 |
| 335 | 60 | 77,2 | 0,1023 | 3,81 | 0,81 | 0,01073 |
| 336 | 45 | 54,6 | 0,7812 | 1,04 | 0,44 | 0,00835 |
| 337 | 60 | 77,2 | 0,51 | 3,58 | 0,77 | 0,01344 |
| 338 | 45 | 54,6 | 0,6345 | 1,16 | 0,49 | 0,00965 |
| 339 | 60 | 77,2 | 0,0672 | 3,55 | 0,76 | 0,00885 |
| 340 | 45 | 54,6 | 0,7937 | 0,77 | 0,33 | 0,00473 |
| 341 | 60 | 77,2 | 0,8691 | 3,46 | 0,74 | 0,01468 |
| 342 | 45 | 54,6 | 0,6102 | 1,3 | 0,56 | 0,012 |
| 343 | 60 | 77,2 | 0,1836 | 3,96 | 0,85 | 0,01276 |
| 344 | 45 | 54,6 | 0,4764 | 1,2 | 0,51 | 0,00955 |
| 345 | 60 | 77,2 | 0,9215 | 3,35 | 0,71 | 0,01403 |
| 346 | 45 | 54,6 | 0,4305 | 1,18 | 0,5 | 0,00903 |
| 347 | 60 | 68,2 | 0,2182 | 2,73 | 0,75 | 0,01223 |
| 348 | 45 | 54,6 | 0,8447 | 0,9 | 0,39 | 0,00654 |
| 349 | 60 | 68,2 | 0,4702 | 2,4 | 0,66 | 0,01149 |
| 350 | 45 | 54,6 | 0,1813 | 0,06 | 0,02 | 0,00003 |
| 351 | 60 | 54,6 | 0,947 | 2,01 | 0,86 | 0,03259 |
| 352 | 45 | 54,6 | 0,335 | 0,25 | 0,11 | 0,00048 |
| 353 | 60 | 54,6 | 0,5035 | 1,35 | 0,58 | 0,01226 |
| 354 | 45 | 54,6 | 0,4262 | 0,11 | 0,05 | 0,00007 |
| 355 | 60 | 54,6 | 0,9218 | 1,65 | 0,71 | 0,022 |
| 356 | 45 | 54,6 | 0,0941 | 0,05 | 0,02 | 0,00002 |
| 357 | 60 | 54,6 | 0,8339 | 1,44 | 0,61 | 0,0161 |
| 358 | 45 | 54,6 | 0,9101 | 0,12 | 0,05 | 0,00009 |
| 359 | 60 | 54,6 | 0,4946 | 1,32 | 0,56 | 0,01158 |
| 360 | 45 | 54,6 | 0,776 | 0,09 | 0,04 | 0,00004 |
| 361 | 60 | 54,6 | 0,6397 | 1,07 | 0,46 | 0,00829 |
| 362 | 45 | 54,6 | 0,6291 | 0,03 | 0,01 | 0,00002 |
| 363 | 60 | 54,6 | 0,6274 | 0,95 | 0,4 | 0,00652 |
| 364 | 45 | 54,6 | 0,1163 | 0,03 | 0,01 | 0,00001 |
| 365 | 60 | 54,6 | 0,3156 | 0,75 | 0,32 | 0,00353 |
| 366 | 45 | 54,6 | 0,6335 | 0,05 | 0,02 | 0,00002 |
| 367 | 60 | 54,6 | 0,8819 | 0,41 | 0,18 | 0,00144 |
| 368 | 45 | 54,6 | 0,6598 | 0,15 | 0,06 | 0,00018 |
| 369 | 60 | 54,6 | 0,1724 | 0,19 | 0,08 | 0,00026 |
| 370 | 45 | 54,6 | 0,4991 | 0,88 | 0,38 | 0,00532 |
| 371 | 45 | 54,6 | 0,0626 | 0,95 | 0,4 | 0,00428 |
| 372 | 60 | 54,6 | 0,1844 | 0,35 | 0,15 | 0,00078 |
| 373 | 45 | 54,6 | 0,0739 | 1,06 | 0,45 | 0,0053 |
| 374 | 60 | 54,6 | 0,0911 | 0,88 | 0,38 | 0,00391 |
| 375 | 45 | 54,6 | 0,9867 | 0,98 | 0,42 | 0,00802 |

| Trecho | L (m) | D (mm) | ϵ (mm) | Q (L/s) | V (m/s) | VH |
|---------------|------------------|-------------------|---------------------------------------|--------------------|--------------------|-----------|
| 376 | 60 | 54,6 | 0,1472 | 1,14 | 0,49 | 0,00668 |
| 377 | 45 | 68,2 | 0,3632 | 2,25 | 0,62 | 0,00947 |
| 378 | 60 | 54,6 | 0,9957 | 1,17 | 0,5 | 0,01146 |
| 379 | 45 | 204,2 | 0,0919 | 28,89 | 0,88 | 0,00367 |
| 380 | 60 | 54,6 | 0,226 | 1,35 | 0,57 | 0,00993 |
| 381 | 45 | 54,6 | 0,5028 | 0,2 | 0,09 | 0,00032 |
| 382 | 60 | 100 | 0,601 | 5,42 | 0,69 | 0,00818 |
| 383 | 45 | 54,6 | 0,7805 | 1,01 | 0,43 | 0,00797 |
| 384 | 60 | 100 | 0,3526 | 8,28 | 1,05 | 0,0163 |
| 385 | 45 | 54,6 | 0,7595 | 1,2 | 0,51 | 0,01101 |
| 386 | 60 | 100 | 0,2041 | 8,13 | 1,03 | 0,01387 |
| 387 | 45 | 54,6 | 0,3762 | 0,69 | 0,29 | 0,00312 |
| 388 | 60 | 100 | 0,4662 | 7,48 | 0,95 | 0,01435 |
| 389 | 45 | 54,6 | 0,0984 | 1,17 | 0,5 | 0,00661 |
| 390 | 60 | 100 | 0,938 | 7,4 | 0,94 | 0,01721 |
| 391 | 45 | 54,6 | 0,1511 | 1,2 | 0,51 | 0,00746 |
| 392 | 60 | 100 | 0,0732 | 7,53 | 0,96 | 0,01009 |
| 393 | 45 | 54,6 | 0,4952 | 1,32 | 0,56 | 0,01158 |
| 394 | 60 | 100 | 0,095 | 7,49 | 0,95 | 0,01035 |
| 395 | 45 | 54,6 | 0,2191 | 1,21 | 0,52 | 0,00807 |
| 396 | 60 | 100 | 0,1086 | 7,83 | 1 | 0,01148 |
| 397 | 45 | 54,6 | 0,8299 | 1,43 | 0,61 | 0,01596 |
| 398 | 60 | 100 | 0,0735 | 6,99 | 0,89 | 0,00877 |
| 399 | 45 | 54,6 | 0,556 | 1,01 | 0,43 | 0,00717 |
| 400 | 60 | 77,2 | 0,3801 | 4,49 | 0,96 | 0,01935 |
| 401 | 45 | 54,6 | 0,6657 | 0,71 | 0,3 | 0,00382 |
| 402 | 60 | 77,2 | 0,9711 | 3,61 | 0,77 | 0,01654 |
| 403 | 45 | 54,6 | 0,2428 | 1,15 | 0,49 | 0,0075 |
| 404 | 60 | 77,2 | 0,0787 | 3,64 | 0,78 | 0,00947 |
| 405 | 45 | 54,6 | 0,3529 | 0,81 | 0,35 | 0,0042 |
| 406 | 60 | 68,2 | 0,4764 | 2,65 | 0,72 | 0,01397 |
| 407 | 45 | 54,6 | 0,2383 | 0,6 | 0,26 | 0,0022 |
| 408 | 60 | 54,6 | 0,8675 | 2,19 | 0,93 | 0,03739 |
| 409 | 45 | 54,6 | 0,3667 | 0,67 | 0,28 | 0,00289 |
| 410 | 60 | 77,2 | 0,06 | 3,48 | 0,74 | 0,00843 |
| 411 | 45 | 54,6 | 0,8154 | 0,07 | 0,03 | 0,00004 |
| 412 | 60 | 54,6 | 0,7356 | 1,8 | 0,77 | 0,02419 |
| 413 | 45 | 54,6 | 0,6931 | 0,09 | 0,04 | 0,00004 |
| 414 | 60 | 54,6 | 0,9426 | 1,4 | 0,6 | 0,01604 |
| 415 | 45 | 54,6 | 0,4477 | 0,13 | 0,05 | 0,0001 |
| 416 | 60 | 54,6 | 0,2867 | 1,41 | 0,6 | 0,01154 |
| 417 | 45 | 54,6 | 0,7343 | 0,01 | 0 | 0 |
| 418 | 60 | 54,6 | 0,6545 | 1,07 | 0,46 | 0,00837 |
| 419 | 45 | 54,6 | 0,7138 | 0,21 | 0,09 | 0,00038 |
| 420 | 60 | 54,6 | 0,8998 | 0,91 | 0,39 | 0,0068 |
| 421 | 45 | 54,6 | 0,0701 | 0,19 | 0,08 | 0,00026 |
| 422 | 60 | 54,6 | 0,9892 | 0,63 | 0,27 | 0,00343 |

| Trecho | L (m) | D (mm) | ϵ (mm) | Q (L/s) | V (m/s) | VH |
|---------------|------------------|-------------------|---------------------------------------|--------------------|--------------------|-----------|
| 423 | 45 | 54,6 | 0,7532 | 0,15 | 0,07 | 0,0002 |
| 424 | 60 | 54,6 | 0,5827 | 0,43 | 0,18 | 0,0014 |
| 425 | 45 | 54,6 | 0,5168 | 0,15 | 0,07 | 0,00019 |
| 426 | 60 | 54,6 | 0,8517 | 0,17 | 0,07 | 0,00025 |
| 427 | 45 | 54,6 | 0,7563 | 0,74 | 0,32 | 0,00428 |
| 428 | 45 | 54,6 | 0,9955 | 0,6 | 0,26 | 0,0031 |
| 429 | 60 | 54,6 | 0,955 | 0,45 | 0,19 | 0,00173 |
| 430 | 45 | 54,6 | 0,4967 | 0,96 | 0,41 | 0,00628 |
| 431 | 60 | 54,6 | 0,1952 | 1,07 | 0,46 | 0,00629 |
| 432 | 45 | 54,6 | 0,4729 | 1,16 | 0,5 | 0,00898 |
| 433 | 60 | 68,2 | 0,1922 | 2,32 | 0,63 | 0,0087 |
| 434 | 45 | 68,2 | 0,5919 | 2,33 | 0,64 | 0,01154 |
| 435 | 60 | 77,2 | 0,6026 | 3,49 | 0,75 | 0,01338 |
| 436 | 45 | 204,2 | 0,1527 | 35,92 | 1,1 | 0,006 |
| 437 | 60 | 54,6 | 0,8353 | 0,85 | 0,36 | 0,00578 |
| 438 | 45 | 77,2 | 0,078 | 3,06 | 0,65 | 0,00683 |
| 439 | 60 | 100 | 0,7113 | 5,09 | 0,65 | 0,00756 |
| 440 | 45 | 54,6 | 0,9712 | 0,98 | 0,42 | 0,008 |
| 441 | 60 | 100 | 0,1843 | 8,68 | 1,11 | 0,01542 |
| 442 | 45 | 54,6 | 0,3233 | 0,7 | 0,3 | 0,00311 |
| 443 | 60 | 100 | 0,6032 | 7,99 | 1,02 | 0,01754 |
| 444 | 45 | 54,6 | 0,1194 | 0,79 | 0,34 | 0,00329 |
| 445 | 60 | 100 | 0,3494 | 7,73 | 0,98 | 0,01421 |
| 446 | 45 | 54,6 | 0,4841 | 1,41 | 0,6 | 0,01321 |
| 447 | 60 | 100 | 0,0892 | 7,3 | 0,93 | 0,00977 |
| 448 | 45 | 54,6 | 0,6087 | 1,27 | 0,54 | 0,0115 |
| 449 | 60 | 100 | 0,7972 | 6,15 | 0,78 | 0,01137 |
| 450 | 45 | 54,6 | 0,142 | 1,78 | 0,76 | 0,01539 |
| 451 | 60 | 100 | 0,4286 | 5,4 | 0,69 | 0,00743 |
| 452 | 45 | 54,6 | 0,8557 | 0,56 | 0,24 | 0,00264 |
| 453 | 60 | 77,2 | 0,9109 | 4,12 | 0,88 | 0,02105 |
| 454 | 45 | 54,6 | 0,8196 | 0,87 | 0,37 | 0,00601 |
| 455 | 60 | 77,2 | 0,7015 | 3,64 | 0,78 | 0,01525 |
| 456 | 45 | 54,6 | 0,1103 | 0,35 | 0,15 | 0,00073 |
| 457 | 60 | 77,2 | 0,1079 | 4,42 | 0,94 | 0,01429 |
| 458 | 45 | 54,6 | 0,2179 | 0,97 | 0,42 | 0,00533 |
| 459 | 60 | 77,2 | 0,5447 | 3,5 | 0,75 | 0,0131 |
| 460 | 45 | 54,6 | 0,7826 | 0,16 | 0,07 | 0,00023 |
| 461 | 60 | 68,2 | 0,8144 | 2,38 | 0,65 | 0,01329 |
| 462 | 45 | 54,6 | 0,8893 | 0,35 | 0,15 | 0,00109 |
| 463 | 60 | 68,2 | 0,4933 | 2,57 | 0,7 | 0,01333 |
| 464 | 45 | 54,6 | 0,6651 | 0,69 | 0,29 | 0,0036 |
| 465 | 60 | 54,6 | 0,8235 | 2,15 | 0,92 | 0,03551 |
| 466 | 45 | 54,6 | 0,6803 | 1,01 | 0,43 | 0,00757 |
| 467 | 60 | 54,6 | 0,9249 | 1,44 | 0,62 | 0,01681 |
| 468 | 45 | 54,6 | 0,7428 | 0,48 | 0,2 | 0,00182 |
| 469 | 60 | 54,6 | 0,3934 | 1,8 | 0,77 | 0,01988 |

| Trecho | L (m) | D (mm) | ϵ (mm) | Q (L/s) | V (m/s) | VH |
|---------------|------------------|-------------------|---------------------------------------|--------------------|--------------------|-----------|
| 470 | 45 | 54,6 | 0,8696 | 0,26 | 0,11 | 0,00061 |
| 471 | 60 | 54,6 | 0,0662 | 1,81 | 0,77 | 0,01423 |
| 472 | 45 | 54,6 | 0,3314 | 0,06 | 0,03 | 0,00003 |
| 473 | 60 | 54,6 | 0,2893 | 1,44 | 0,62 | 0,01201 |
| 474 | 45 | 54,6 | 0,1719 | 0,01 | 0 | 0 |
| 475 | 60 | 54,6 | 0,7046 | 1,06 | 0,45 | 0,00835 |
| 476 | 45 | 54,6 | 0,7704 | 0,33 | 0,14 | 0,00092 |
| 477 | 60 | 54,6 | 0,9514 | 0,95 | 0,41 | 0,00749 |
| 478 | 45 | 54,6 | 0,0646 | 0,24 | 0,1 | 0,00037 |
| 479 | 60 | 54,6 | 0,3167 | 0,69 | 0,3 | 0,00302 |
| 480 | 45 | 54,6 | 0,1662 | 0,26 | 0,11 | 0,00045 |
| 481 | 60 | 54,6 | 0,8039 | 0,42 | 0,18 | 0,00146 |
| 482 | 45 | 54,6 | 0,4115 | 0,13 | 0,06 | 0,00012 |
| 483 | 60 | 54,6 | 0,6356 | 0 | 0 | 0 |
| 484 | 45 | 54,6 | 0,1083 | 0,58 | 0,25 | 0,00183 |
| 485 | 45 | 54,6 | 0,73 | 0,23 | 0,1 | 0,00046 |
| 486 | 60 | 54,6 | 0,7106 | 0,44 | 0,19 | 0,00158 |
| 487 | 45 | 54,6 | 0,2119 | 0,02 | 0,01 | 0,00001 |
| 488 | 60 | 54,6 | 0,7475 | 0,88 | 0,37 | 0,00594 |
| 489 | 45 | 54,6 | 0,5254 | 0,25 | 0,11 | 0,0005 |
| 490 | 60 | 54,6 | 0,9134 | 1,06 | 0,45 | 0,00909 |
| 491 | 45 | 100 | 0,5331 | 5,22 | 0,67 | 0,00736 |
| 492 | 60 | 54,6 | 0,9485 | 1,51 | 0,64 | 0,01852 |
| 493 | 45 | 204,2 | 0,6293 | 42,12 | 1,29 | 0,01116 |
| 494 | 60 | 100 | 0,0735 | 6,94 | 0,88 | 0,00863 |
| 495 | 45 | 100 | 0,9225 | 6,91 | 0,88 | 0,01495 |
| 496 | 60 | 156,4 | 0,0992 | 16,18 | 0,84 | 0,00471 |
| 497 | 45 | 54,6 | 0,1299 | 0,55 | 0,23 | 0,00171 |
| 498 | 60 | 100 | 0,8995 | 9,06 | 1,15 | 0,02535 |
| 499 | 45 | 54,6 | 0,5867 | 0,77 | 0,33 | 0,00432 |
| 500 | 60 | 100 | 0,2576 | 8,41 | 1,07 | 0,01559 |
| 501 | 45 | 54,6 | 0,4713 | 0,7 | 0,3 | 0,00336 |
| 502 | 60 | 100 | 0,514 | 7,53 | 0,96 | 0,01493 |
| 503 | 45 | 54,6 | 0,2636 | 0,5 | 0,21 | 0,00158 |
| 504 | 60 | 100 | 0,3833 | 6,73 | 0,86 | 0,0111 |
| 505 | 45 | 54,6 | 0,1014 | 0,76 | 0,32 | 0,00297 |
| 506 | 60 | 100 | 0,5832 | 6,13 | 0,78 | 0,01033 |
| 507 | 45 | 54,6 | 0,0963 | 0,72 | 0,31 | 0,00273 |
| 508 | 60 | 100 | 0,5618 | 5,28 | 0,67 | 0,00761 |
| 509 | 45 | 54,6 | 0,3248 | 0,34 | 0,14 | 0,0008 |
| 510 | 60 | 77,2 | 0,6843 | 4,46 | 0,95 | 0,02249 |
| 511 | 45 | 54,6 | 0,3993 | 0,15 | 0,06 | 0,00016 |
| 512 | 60 | 77,2 | 0,4769 | 3,92 | 0,84 | 0,01573 |
| 513 | 45 | 54,6 | 0,6075 | 0,32 | 0,14 | 0,00084 |
| 514 | 60 | 77,2 | 0,768 | 3,57 | 0,76 | 0,01505 |
| 515 | 45 | 54,6 | 0,7705 | 0,11 | 0,05 | 0,00006 |
| 516 | 60 | 77,2 | 0,2976 | 3,69 | 0,79 | 0,01242 |

| Trecho | L (m) | D (mm) | ϵ (mm) | Q (L/s) | V (m/s) | VH |
|---------------|------------------|-------------------|---------------------------------------|--------------------|--------------------|-----------|
| 517 | 45 | 54,6 | 0,0912 | 0,61 | 0,26 | 0,00201 |
| 518 | 60 | 77,2 | 0,4793 | 3,39 | 0,72 | 0,01183 |
| 519 | 45 | 54,6 | 0,5199 | 0,19 | 0,08 | 0,00029 |
| 520 | 60 | 68,2 | 0,7268 | 2,54 | 0,7 | 0,01461 |
| 521 | 45 | 54,6 | 0,1365 | 0,24 | 0,1 | 0,00039 |
| 522 | 60 | 54,6 | 0,8721 | 2,13 | 0,91 | 0,03543 |
| 523 | 45 | 54,6 | 0,927 | 0,4 | 0,17 | 0,0014 |
| 524 | 60 | 54,6 | 0,4971 | 1,66 | 0,71 | 0,01815 |
| 525 | 45 | 54,6 | 0,6692 | 0,2 | 0,09 | 0,00036 |
| 526 | 60 | 54,6 | 0,2961 | 1,83 | 0,78 | 0,0191 |
| 527 | 45 | 54,6 | 0,4813 | 0,14 | 0,06 | 0,00014 |
| 528 | 60 | 54,6 | 0,1228 | 1,7 | 0,73 | 0,01385 |
| 529 | 45 | 54,6 | 0,066 | 0,2 | 0,08 | 0,00026 |
| 530 | 60 | 54,6 | 0,9257 | 1,23 | 0,53 | 0,01232 |
| 531 | 45 | 54,6 | 0,7902 | 0,07 | 0,03 | 0,00003 |
| 532 | 60 | 54,6 | 0,4973 | 1,1 | 0,47 | 0,00812 |
| 533 | 45 | 54,6 | 0,4189 | 0,07 | 0,03 | 0,00003 |
| 534 | 60 | 54,6 | 0,5926 | 1,03 | 0,44 | 0,00749 |
| 535 | 45 | 54,6 | 0,3182 | 0,15 | 0,06 | 0,00016 |
| 536 | 60 | 54,6 | 0,0926 | 0,75 | 0,32 | 0,00293 |
| 537 | 45 | 54,6 | 0,0678 | 0,22 | 0,1 | 0,00033 |
| 538 | 60 | 54,6 | 0,749 | 0,4 | 0,17 | 0,00133 |
| 539 | 45 | 54,6 | 0,6158 | 0,05 | 0,02 | 0,00002 |
| 540 | 60 | 54,6 | 0,1335 | 0,18 | 0,08 | 0,00023 |
| 541 | 45 | 54,6 | 0,1837 | 0,32 | 0,13 | 0,00065 |
| 542 | 36,8958 | 252 | 0,1368 | 65,56 | 1,31 | 0,00645 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

**APÊNDICE K – Gabarito referente aos trechos para perdas de carga calculadas por
Hazen-Williams – Rede MIGHA**

| Trecho | L (m) | D (mm) | C (m ^{0,367} /s) | Q (L/s) | V (m/s) | ∇H | K _w (m/dia) |
|--------|----------|-----------|------------------------------|------------|------------|---------|---------------------------|
| 1 | 60 | 54,6 | 70 | 0,12 | 0,05 | 0,00032 | -0,731 |
| 2 | 45 | 54,6 | 85 | 0,28 | 0,12 | 0,00104 | -0,624 |
| 3 | 60 | 54,6 | 133 | 0,18 | 0,08 | 0,00021 | -0,44 |
| 4 | 60 | 54,6 | 81 | 0,14 | 0,06 | 0,00034 | -0,852 |
| 5 | 45 | 54,6 | 132 | 0,42 | 0,18 | 0,00101 | -0,243 |
| 6 | 60 | 54,6 | 133 | 0,24 | 0,10 | 0,00036 | -0,931 |
| 7 | 60 | 54,6 | 146 | 0,27 | 0,11 | 0,00035 | -0,113 |
| 8 | 45 | 54,6 | 119 | 0,39 | 0,17 | 0,00108 | -0,678 |
| 9 | 60 | 54,6 | 145 | 0,24 | 0,1 | 0,00031 | -0,977 |
| 10 | 60 | 54,6 | 118 | 0,56 | 0,24 | 0,00207 | -0,515 |
| 11 | 45 | 54,6 | 103 | 0,5 | 0,21 | 0,00217 | -0,506 |
| 12 | 60 | 54,6 | 145 | 0,52 | 0,22 | 0,00124 | -0,255 |
| 13 | 60 | 54,6 | 107 | 0,85 | 0,36 | 0,00537 | -0,776 |
| 14 | 45 | 54,6 | 94 | 0,51 | 0,22 | 0,00269 | -0,967 |
| 15 | 60 | 54,6 | 91 | 0,69 | 0,29 | 0,00498 | -0,703 |
| 16 | 60 | 54,6 | 129 | 1,15 | 0,49 | 0,00676 | -0,629 |
| 17 | 45 | 54,6 | 68 | 0,56 | 0,24 | 0,00584 | -0,785 |
| 18 | 60 | 54,6 | 148 | 1,05 | 0,45 | 0,0044 | -0,546 |
| 19 | 60 | 54,6 | 146 | 1,31 | 0,56 | 0,00683 | -0,217 |
| 20 | 45 | 54,6 | 140 | 0,03 | 0,01 | 0,00001 | -0,209 |
| 21 | 60 | 54,6 | 97 | 1,14 | 0,49 | 0,01121 | -0,424 |
| 22 | 60 | 54,6 | 96 | 1,16 | 0,5 | 0,01183 | -0,577 |
| 23 | 45 | 54,6 | 82 | 0,05 | 0,02 | 0,00005 | -0,968 |
| 24 | 60 | 54,6 | 141 | 1,7 | 0,73 | 0,01178 | -0,104 |
| 25 | 60 | 54,6 | 69 | 1 | 0,43 | 0,01638 | -0,105 |
| 26 | 45 | 54,6 | 122 | 0,86 | 0,37 | 0,00433 | -0,529 |
| 27 | 60 | 54,6 | 129 | 1,65 | 0,71 | 0,01317 | -0,45 |
| 28 | 60 | 68,2 | 69 | 1,59 | 0,44 | 0,01325 | -0,715 |
| 29 | 45 | 54,6 | 114 | 0,86 | 0,37 | 0,00492 | -0,028 |
| 30 | 60 | 54,6 | 90 | 1,14 | 0,49 | 0,01281 | -0,178 |
| 31 | 60 | 77,2 | 70 | 2,34 | 0,5 | 0,01439 | -0,532 |
| 32 | 45 | 54,6 | 91 | 0,38 | 0,16 | 0,00168 | -0,267 |
| 33 | 60 | 54,6 | 91 | 1,33 | 0,57 | 0,01682 | -0,516 |
| 34 | 60 | 77,2 | 75 | 2,53 | 0,54 | 0,01457 | -0,28 |
| 35 | 45 | 54,6 | 149 | 0,05 | 0,02 | 0,00002 | -0,872 |
| 36 | 60 | 54,6 | 90 | 1,28 | 0,54 | 0,01584 | -0,941 |
| 37 | 60 | 77,2 | 66 | 2,47 | 0,53 | 0,01768 | -0,555 |
| 38 | 45 | 54,6 | 104 | 0,09 | 0,04 | 0,00009 | -0,502 |
| 39 | 60 | 54,6 | 118 | 1,77 | 0,76 | 0,0176 | -0,035 |
| 40 | 60 | 77,2 | 69 | 2,54 | 0,54 | 0,01714 | -0,577 |
| 41 | 45 | 54,6 | 132 | 0,15 | 0,06 | 0,00015 | -0,276 |
| 42 | 60 | 68,2 | 67 | 1,78 | 0,49 | 0,01709 | -0,097 |
| 43 | 60 | 77,2 | 91 | 2,49 | 0,53 | 0,00989 | -0,938 |
| 44 | 45 | 54,6 | 127 | 0,72 | 0,31 | 0,0029 | -0,363 |
| 45 | 60 | 54,6 | 98 | 1,21 | 0,51 | 0,01218 | -0,865 |
| 46 | 60 | 68,2 | 79 | 1,66 | 0,45 | 0,01109 | -0,806 |
| 47 | 45 | 54,6 | 66 | 0,03 | 0,01 | 0,00003 | -0,49 |

| Trecho | L (m) | D (mm) | C (m ^{0,367} /s) | Q (L/s) | V (m/s) | ∇H | K _w (m/dia) |
|--------|----------|-----------|------------------------------|------------|------------|---------|---------------------------|
| 48 | 60 | 54,6 | 149 | 1,55 | 0,66 | 0,0089 | -0,333 |
| 49 | 60 | 54,6 | 141 | 1,58 | 0,68 | 0,0103 | -0,819 |
| 50 | 45 | 54,6 | 122 | 0,25 | 0,11 | 0,00044 | -0,822 |
| 51 | 60 | 54,6 | 132 | 1,46 | 0,62 | 0,00999 | -0,924 |
| 52 | 60 | 54,6 | 105 | 1,63 | 0,69 | 0,01869 | -0,271 |
| 53 | 45 | 54,6 | 87 | 0,08 | 0,04 | 0,00011 | -0,794 |
| 54 | 60 | 54,6 | 93 | 1,45 | 0,62 | 0,01894 | -0,42 |
| 55 | 60 | 54,6 | 89 | 1,3 | 0,56 | 0,01674 | -0,645 |
| 56 | 45 | 54,6 | 114 | 0,21 | 0,09 | 0,00035 | -0,667 |
| 57 | 60 | 54,6 | 111 | 1,61 | 0,69 | 0,01655 | -0,924 |
| 58 | 60 | 54,6 | 81 | 1,4 | 0,6 | 0,02272 | -0,077 |
| 59 | 45 | 54,6 | 141 | 0,41 | 0,17 | 0,00083 | -0,45 |
| 60 | 60 | 54,6 | 68 | 1,16 | 0,5 | 0,02236 | -0,602 |
| 61 | 60 | 54,6 | 102 | 1,79 | 0,77 | 0,02359 | -0,799 |
| 62 | 45 | 54,6 | 100 | 0,05 | 0,02 | 0,00003 | -0,642 |
| 63 | 60 | 54,6 | 91 | 1,62 | 0,69 | 0,02423 | -0,628 |
| 64 | 60 | 54,6 | 137 | 1,73 | 0,74 | 0,01275 | -0,33 |
| 65 | 45 | 54,6 | 114 | 0,16 | 0,07 | 0,00023 | -0,811 |
| 66 | 60 | 54,6 | 135 | 1,69 | 0,72 | 0,01256 | -0,764 |
| 67 | 60 | 54,6 | 108 | 1,69 | 0,72 | 0,01906 | -0,13 |
| 68 | 45 | 54,6 | 138 | 0,14 | 0,06 | 0,00012 | -0,713 |
| 69 | 60 | 54,6 | 69 | 1,09 | 0,47 | 0,01933 | -0,335 |
| 70 | 60 | 54,6 | 124 | 1,26 | 0,54 | 0,00855 | -0,912 |
| 71 | 45 | 54,6 | 68 | 0,23 | 0,1 | 0,00112 | -0,612 |
| 72 | 60 | 54,6 | 76 | 0,81 | 0,35 | 0,0093 | -0,707 |
| 73 | 60 | 54,6 | 105 | 0,92 | 0,39 | 0,00649 | -0,259 |
| 74 | 45 | 54,6 | 115 | 0,2 | 0,08 | 0,00032 | -0,74 |
| 75 | 60 | 54,6 | 127 | 1,06 | 0,45 | 0,00589 | -0,547 |
| 76 | 60 | 54,6 | 67 | 0,45 | 0,19 | 0,00395 | -0,564 |
| 77 | 45 | 54,6 | 92 | 0,07 | 0,03 | 0,00006 | -0,502 |
| 78 | 60 | 54,6 | 131 | 0,85 | 0,36 | 0,00376 | -0,715 |
| 79 | 60 | 54,6 | 73 | 0,36 | 0,16 | 0,00229 | -0,462 |
| 80 | 45 | 54,6 | 101 | 0,01 | 0,01 | 0 | -0,251 |
| 81 | 60 | 54,6 | 90 | 0,44 | 0,19 | 0,00224 | -0,293 |
| 82 | 60 | 54,6 | 128 | 0,17 | 0,07 | 0,00021 | -0,281 |
| 83 | 45 | 54,6 | 138 | 0,03 | 0,01 | 0 | -0,767 |
| 84 | 60 | 54,6 | 121 | 0,16 | 0,07 | 0,00021 | -0,438 |
| 85 | 45 | 54,6 | 70 | 0,21 | 0,09 | 0,00089 | -0,867 |
| 86 | 45 | 54,6 | 117 | 0,57 | 0,24 | 0,00216 | -0,171 |
| 87 | 60 | 54,6 | 121 | 0,17 | 0,07 | 0,00022 | -0,789 |
| 88 | 45 | 54,6 | 139 | 0,78 | 0,33 | 0,00287 | -0,59 |
| 89 | 60 | 54,6 | 127 | 0,16 | 0,07 | 0,00017 | -0,183 |
| 90 | 45 | 54,6 | 142 | 0,86 | 0,37 | 0,00327 | -0,022 |
| 91 | 60 | 54,6 | 124 | 0 | 0 | 0 | -0,477 |
| 92 | 45 | 54,6 | 135 | 0,91 | 0,39 | 0,00398 | -0,47 |
| 93 | 60 | 54,6 | 82 | 0,22 | 0,09 | 0,00071 | -0,55 |
| 94 | 45 | 54,6 | 108 | 1,17 | 0,5 | 0,00962 | -0,032 |

| Trecho | L (m) | D (mm) | C (m ^{0,367} /s) | Q (L/s) | V (m/s) | ∇H | K _w (m/dia) |
|--------|----------|-----------|------------------------------|------------|------------|---------|---------------------------|
| 95 | 60 | 54,6 | 119 | 0,32 | 0,14 | 0,00075 | -0,366 |
| 96 | 45 | 54,6 | 86 | 0,81 | 0,35 | 0,00745 | -0,122 |
| 97 | 60 | 54,6 | 113 | 0,95 | 0,41 | 0,00603 | -0,042 |
| 98 | 45 | 54,6 | 88 | 0,76 | 0,32 | 0,00633 | -0,476 |
| 99 | 60 | 54,6 | 127 | 1,55 | 0,66 | 0,01206 | -0,163 |
| 100 | 45 | 54,6 | 145 | 0,27 | 0,12 | 0,00038 | -0,29 |
| 101 | 60 | 68,2 | 67 | 1,73 | 0,47 | 0,01625 | -0,723 |
| 102 | 45 | 54,6 | 90 | 0,6 | 0,25 | 0,00386 | -0,235 |
| 103 | 60 | 77,2 | 86 | 2,43 | 0,52 | 0,01055 | -0,872 |
| 104 | 45 | 54,6 | 115 | 1,27 | 0,54 | 0,0099 | -0,365 |
| 105 | 60 | 77,2 | 115 | 2,86 | 0,61 | 0,00828 | -0,305 |
| 106 | 45 | 54,6 | 113 | 0,91 | 0,39 | 0,00556 | -0,371 |
| 107 | 60 | 77,2 | 72 | 2,88 | 0,62 | 0,02007 | -0,773 |
| 108 | 45 | 54,6 | 78 | 1,02 | 0,44 | 0,01373 | -0,779 |
| 109 | 60 | 68,2 | 116 | 2,27 | 0,62 | 0,00972 | -0,994 |
| 110 | 45 | 54,6 | 107 | 0,55 | 0,24 | 0,00244 | -0,305 |
| 111 | 60 | 54,6 | 87 | 1,61 | 0,69 | 0,02607 | -0,166 |
| 112 | 45 | 54,6 | 138 | 0,2 | 0,08 | 0,00023 | -0,315 |
| 113 | 60 | 54,6 | 134 | 2,08 | 0,89 | 0,01875 | -0,988 |
| 114 | 45 | 54,6 | 144 | 0,45 | 0,19 | 0,00097 | -0,382 |
| 115 | 60 | 77,2 | 85 | 2,54 | 0,54 | 0,01162 | -0,169 |
| 116 | 45 | 54,6 | 98 | 0,16 | 0,07 | 0,00029 | -0,375 |
| 117 | 60 | 77,2 | 101 | 2,69 | 0,57 | 0,00941 | -0,791 |
| 118 | 45 | 54,6 | 93 | 0,5 | 0,21 | 0,0026 | -0,667 |
| 119 | 60 | 68,2 | 124 | 2,22 | 0,61 | 0,00825 | -0,481 |
| 120 | 45 | 54,6 | 128 | 0,89 | 0,38 | 0,00424 | -0,083 |
| 121 | 60 | 54,6 | 112 | 1,69 | 0,72 | 0,01771 | -0,028 |
| 122 | 45 | 54,6 | 95 | 0,06 | 0,02 | 0,00004 | -0,038 |
| 123 | 60 | 54,6 | 94 | 1,5 | 0,64 | 0,0197 | -0,494 |
| 124 | 45 | 54,6 | 94 | 1 | 0,43 | 0,0093 | -0,713 |
| 125 | 60 | 54,6 | 145 | 2,03 | 0,87 | 0,01542 | -0,426 |
| 126 | 45 | 54,6 | 103 | 0,23 | 0,1 | 0,00051 | -0,33 |
| 127 | 60 | 54,6 | 67 | 1,36 | 0,58 | 0,03082 | -0,179 |
| 128 | 45 | 54,6 | 68 | 0,19 | 0,08 | 0,00079 | -0,561 |
| 129 | 60 | 54,6 | 113 | 1,47 | 0,63 | 0,01354 | -0,282 |
| 130 | 45 | 54,6 | 109 | 0,31 | 0,13 | 0,00082 | -0,17 |
| 131 | 60 | 54,6 | 79 | 1,25 | 0,53 | 0,01935 | -0,302 |
| 132 | 45 | 54,6 | 73 | 0,21 | 0,09 | 0,0008 | -0,935 |
| 133 | 60 | 54,6 | 130 | 1,28 | 0,55 | 0,00808 | -0,446 |
| 134 | 45 | 54,6 | 97 | 0,23 | 0,1 | 0,00057 | -0,831 |
| 135 | 60 | 54,6 | 73 | 0,66 | 0,28 | 0,00692 | -0,773 |
| 136 | 45 | 54,6 | 91 | 0,39 | 0,17 | 0,00171 | -0,227 |
| 137 | 60 | 54,6 | 89 | 0,65 | 0,28 | 0,00461 | -0,483 |
| 138 | 45 | 54,6 | 72 | 0,01 | 0 | 0 | -0,641 |
| 139 | 60 | 54,6 | 107 | 0,33 | 0,14 | 0,00097 | -0,866 |
| 140 | 45 | 54,6 | 73 | 0,04 | 0,02 | 0,00004 | -0,595 |
| 141 | 60 | 54,6 | 113 | 0,16 | 0,07 | 0,00023 | -0,479 |

| Trecho | L (m) | D (mm) | C (m ^{0,367} /s) | Q (L/s) | V (m/s) | ∇H | K _w (m/dia) |
|--------|----------|-----------|------------------------------|------------|------------|---------|---------------------------|
| 142 | 45 | 54,6 | 119 | 0,58 | 0,25 | 0,00217 | -0,043 |
| 143 | 45 | 54,6 | 87 | 0,82 | 0,35 | 0,0075 | -0,112 |
| 144 | 60 | 54,6 | 128 | 0,07 | 0,03 | 0,00004 | -0,557 |
| 145 | 45 | 54,6 | 137 | 1,19 | 0,51 | 0,00636 | -0,45 |
| 146 | 60 | 54,6 | 65 | 0,17 | 0,07 | 0,00069 | -0,632 |
| 147 | 45 | 54,6 | 140 | 1,31 | 0,56 | 0,00733 | -0,788 |
| 148 | 60 | 54,6 | 130 | 0,35 | 0,15 | 0,00073 | -0,064 |
| 149 | 45 | 54,6 | 104 | 1,3 | 0,55 | 0,01247 | -0,709 |
| 150 | 60 | 54,6 | 91 | 0,54 | 0,23 | 0,00314 | -0,46 |
| 151 | 45 | 54,6 | 121 | 1,88 | 0,8 | 0,01868 | -0,568 |
| 152 | 60 | 54,6 | 96 | 0,64 | 0,27 | 0,00391 | -0,749 |
| 153 | 45 | 54,6 | 94 | 1,51 | 0,65 | 0,02008 | -0,26 |
| 154 | 60 | 54,6 | 149 | 1,13 | 0,48 | 0,00498 | -0,278 |
| 155 | 45 | 54,6 | 70 | 1,03 | 0,44 | 0,01711 | -0,697 |
| 156 | 60 | 77,2 | 109 | 3,63 | 0,78 | 0,01429 | -0,437 |
| 157 | 45 | 54,6 | 78 | 1,08 | 0,46 | 0,01516 | -0,908 |
| 158 | 60 | 77,2 | 106 | 3,97 | 0,85 | 0,01771 | -0,871 |
| 159 | 45 | 54,6 | 88 | 1,09 | 0,46 | 0,01227 | -0,083 |
| 160 | 60 | 77,2 | 118 | 3,69 | 0,79 | 0,01271 | -0,386 |
| 161 | 45 | 54,6 | 135 | 1,29 | 0,55 | 0,00767 | -0,893 |
| 162 | 60 | 77,2 | 125 | 3,75 | 0,8 | 0,01173 | -0,12 |
| 163 | 45 | 54,6 | 142 | 0,69 | 0,3 | 0,0022 | -0,864 |
| 164 | 60 | 77,2 | 69 | 3,06 | 0,65 | 0,02418 | -0,691 |
| 165 | 45 | 54,6 | 90 | 0,57 | 0,24 | 0,00357 | -0,682 |
| 166 | 60 | 77,2 | 142 | 3,62 | 0,77 | 0,00869 | -0,338 |
| 167 | 45 | 54,6 | 147 | 1,12 | 0,48 | 0,00501 | -0,976 |
| 168 | 60 | 77,2 | 70 | 3,16 | 0,67 | 0,02499 | -0,838 |
| 169 | 45 | 54,6 | 85 | 0,76 | 0,33 | 0,0068 | -0,651 |
| 170 | 60 | 68,2 | 96 | 2,57 | 0,7 | 0,01741 | -0,126 |
| 171 | 45 | 54,6 | 99 | 0,76 | 0,33 | 0,00513 | -0,268 |
| 172 | 60 | 68,2 | 125 | 2,84 | 0,78 | 0,01287 | -0,67 |
| 173 | 45 | 54,6 | 78 | 0,49 | 0,21 | 0,00353 | -0,989 |
| 174 | 60 | 77,2 | 95 | 2,7 | 0,58 | 0,01061 | -0,193 |
| 175 | 45 | 54,6 | 83 | 0,16 | 0,07 | 0,00041 | -0,792 |
| 176 | 60 | 77,2 | 100 | 2,84 | 0,61 | 0,01059 | -0,264 |
| 177 | 45 | 54,6 | 99 | 0,85 | 0,36 | 0,0063 | -0,965 |
| 178 | 60 | 77,2 | 102 | 3,27 | 0,7 | 0,01329 | -0,105 |
| 179 | 45 | 54,6 | 83 | 0,63 | 0,27 | 0,00501 | -0,512 |
| 180 | 60 | 77,2 | 68 | 2,77 | 0,59 | 0,02067 | -0,73 |
| 181 | 45 | 54,6 | 134 | 0,45 | 0,19 | 0,00112 | -0,612 |
| 182 | 60 | 77,2 | 70 | 2,67 | 0,57 | 0,01834 | -0,63 |
| 183 | 45 | 54,6 | 113 | 0,46 | 0,2 | 0,00157 | -0,226 |
| 184 | 60 | 54,6 | 78 | 1,57 | 0,67 | 0,03049 | -0,738 |
| 185 | 45 | 54,6 | 67 | 0,23 | 0,1 | 0,0011 | -0,819 |
| 186 | 60 | 54,6 | 118 | 1,66 | 0,71 | 0,01554 | -0,813 |
| 187 | 45 | 54,6 | 114 | 0,07 | 0,03 | 0,00005 | -0,495 |
| 188 | 60 | 54,6 | 76 | 1,17 | 0,5 | 0,01856 | -0,229 |

| Trecho | L (m) | D (mm) | C (m ^{0,367} /s) | Q (L/s) | V (m/s) | ∇H | K _w (m/dia) |
|--------|----------|-----------|------------------------------|------------|------------|---------|---------------------------|
| 189 | 45 | 54,6 | 66 | 0,28 | 0,12 | 0,00172 | -0,468 |
| 190 | 60 | 54,6 | 120 | 1,28 | 0,55 | 0,00933 | -0,348 |
| 191 | 45 | 54,6 | 84 | 0,06 | 0,02 | 0,00006 | -0,228 |
| 192 | 60 | 54,6 | 138 | 1,11 | 0,48 | 0,00558 | -0,915 |
| 193 | 45 | 54,6 | 102 | 0,21 | 0,09 | 0,00045 | -0,339 |
| 194 | 60 | 54,6 | 90 | 0,63 | 0,27 | 0,00431 | -0,184 |
| 195 | 45 | 54,6 | 116 | 0,06 | 0,03 | 0,00004 | -0,355 |
| 196 | 60 | 54,6 | 145 | 0,53 | 0,23 | 0,00127 | -0,317 |
| 197 | 45 | 54,6 | 68 | 0,08 | 0,03 | 0,00015 | -0,17 |
| 198 | 60 | 54,6 | 70 | 0,13 | 0,06 | 0,00037 | -0,21 |
| 199 | 45 | 54,6 | 97 | 0,9 | 0,38 | 0,00717 | -0,582 |
| 200 | 45 | 54,6 | 123 | 1,28 | 0,55 | 0,00892 | -0,029 |
| 201 | 60 | 54,6 | 103 | 0,08 | 0,03 | 0,00008 | -0,653 |
| 202 | 45 | 54,6 | 70 | 0,94 | 0,4 | 0,01424 | -0,829 |
| 203 | 60 | 54,6 | 83 | 0,5 | 0,22 | 0,0033 | -0,954 |
| 204 | 45 | 54,6 | 94 | 1,37 | 0,59 | 0,01672 | -0,028 |
| 205 | 60 | 54,6 | 124 | 0,66 | 0,28 | 0,00259 | -0,324 |
| 206 | 45 | 54,6 | 91 | 1,45 | 0,62 | 0,01962 | -0,018 |
| 207 | 60 | 54,6 | 108 | 0,85 | 0,36 | 0,00532 | -0,191 |
| 208 | 45 | 77,2 | 73 | 3,9 | 0,83 | 0,03425 | -0,364 |
| 209 | 60 | 54,6 | 73 | 1 | 0,43 | 0,01489 | -0,623 |
| 210 | 45 | 77,2 | 128 | 4,18 | 0,89 | 0,01373 | -0,188 |
| 211 | 60 | 54,6 | 94 | 1,53 | 0,65 | 0,02037 | -0,61 |
| 212 | 45 | 68,2 | 106 | 1,63 | 0,45 | 0,00622 | -0,9 |
| 213 | 60 | 77,2 | 91 | 3,63 | 0,78 | 0,01992 | -0,458 |
| 214 | 45 | 54,6 | 72 | 1,06 | 0,45 | 0,0171 | -0,944 |
| 215 | 60 | 77,2 | 138 | 3,7 | 0,79 | 0,00955 | -0,774 |
| 216 | 45 | 54,6 | 110 | 1,39 | 0,59 | 0,01282 | -0,252 |
| 217 | 60 | 77,2 | 136 | 4,81 | 1,03 | 0,01592 | -0,279 |
| 218 | 45 | 54,6 | 84 | 0,82 | 0,35 | 0,00786 | -0,447 |
| 219 | 60 | 77,2 | 122 | 4,24 | 0,91 | 0,01545 | -0,195 |
| 220 | 45 | 54,6 | 143 | 1,47 | 0,63 | 0,00873 | -0,183 |
| 221 | 60 | 77,2 | 92 | 4,02 | 0,86 | 0,02353 | -0,96 |
| 222 | 45 | 54,6 | 111 | 0,38 | 0,16 | 0,00114 | -0,939 |
| 223 | 60 | 77,2 | 94 | 3,14 | 0,67 | 0,01438 | -0,333 |
| 224 | 45 | 54,6 | 70 | 1,12 | 0,48 | 0,0197 | -0,712 |
| 225 | 60 | 77,2 | 127 | 3,69 | 0,79 | 0,01106 | -0,864 |
| 226 | 45 | 54,6 | 116 | 1,37 | 0,58 | 0,01124 | -0,881 |
| 227 | 60 | 77,2 | 66 | 2,9 | 0,62 | 0,02376 | -0,307 |
| 228 | 45 | 54,6 | 141 | 0,73 | 0,31 | 0,00245 | -0,268 |
| 229 | 60 | 77,2 | 72 | 2,84 | 0,61 | 0,01946 | -0,855 |
| 230 | 45 | 54,6 | 144 | 0,86 | 0,37 | 0,00321 | -0,603 |
| 231 | 60 | 68,2 | 146 | 2,9 | 0,8 | 0,01004 | -0,707 |
| 232 | 45 | 54,6 | 131 | 0,81 | 0,34 | 0,00339 | -0,88 |
| 233 | 60 | 68,2 | 139 | 2,83 | 0,77 | 0,01046 | -0,682 |
| 234 | 45 | 54,6 | 66 | 0,47 | 0,2 | 0,00441 | -0,417 |
| 235 | 60 | 68,2 | 111 | 2,49 | 0,68 | 0,01252 | -0,901 |

| Trecho | L (m) | D (mm) | C (m ^{0,367} /s) | Q (L/s) | V (m/s) | ∇H | K _w (m/dia) |
|--------|----------|-----------|------------------------------|------------|------------|---------|---------------------------|
| 236 | 45 | 54,6 | 103 | 0,65 | 0,28 | 0,0035 | -0,821 |
| 237 | 60 | 54,6 | 110 | 1,83 | 0,78 | 0,02135 | -0,372 |
| 238 | 45 | 54,6 | 69 | 0,54 | 0,23 | 0,00533 | -0,325 |
| 239 | 60 | 54,6 | 90 | 1,63 | 0,7 | 0,02496 | -0,039 |
| 240 | 45 | 54,6 | 109 | 0,6 | 0,26 | 0,00274 | -0,539 |
| 241 | 60 | 54,6 | 85 | 1,52 | 0,65 | 0,02444 | -0,345 |
| 242 | 45 | 54,6 | 135 | 0,55 | 0,23 | 0,00157 | -0,498 |
| 243 | 60 | 54,6 | 83 | 1,29 | 0,55 | 0,01877 | -0,221 |
| 244 | 45 | 54,6 | 69 | 0,29 | 0,13 | 0,0017 | -0,565 |
| 245 | 60 | 54,6 | 123 | 1,76 | 0,75 | 0,0161 | -0,571 |
| 246 | 45 | 54,6 | 141 | 0,11 | 0,05 | 0,00007 | -0,807 |
| 247 | 60 | 54,6 | 68 | 0,78 | 0,33 | 0,01067 | -0,919 |
| 248 | 45 | 54,6 | 81 | 0,17 | 0,07 | 0,00047 | -0,96 |
| 249 | 60 | 54,6 | 75 | 0,62 | 0,27 | 0,00588 | -0,12 |
| 250 | 45 | 54,6 | 148 | 0,31 | 0,13 | 0,00045 | -0,233 |
| 251 | 60 | 54,6 | 135 | 0,86 | 0,37 | 0,00363 | -0,168 |
| 252 | 45 | 54,6 | 122 | 0,13 | 0,06 | 0,00014 | -0,418 |
| 253 | 60 | 54,6 | 91 | 0,39 | 0,17 | 0,00171 | -0,274 |
| 254 | 45 | 54,6 | 111 | 0,06 | 0,03 | 0,00004 | -0,288 |
| 255 | 60 | 54,6 | 89 | 0,15 | 0,06 | 0,0003 | -0,892 |
| 256 | 45 | 54,6 | 91 | 0,94 | 0,4 | 0,00887 | -0,885 |
| 257 | 45 | 54,6 | 120 | 1,06 | 0,45 | 0,00655 | -0,383 |
| 258 | 60 | 54,6 | 75 | 0,22 | 0,09 | 0,00084 | -0,767 |
| 259 | 45 | 54,6 | 97 | 0,88 | 0,38 | 0,00694 | -0,296 |
| 260 | 60 | 54,6 | 101 | 0,64 | 0,27 | 0,00359 | -0,613 |
| 261 | 45 | 54,6 | 98 | 1,58 | 0,68 | 0,02019 | -0,536 |
| 262 | 60 | 54,6 | 69 | 0,86 | 0,37 | 0,01252 | -0,15 |
| 263 | 45 | 54,6 | 74 | 1,48 | 0,63 | 0,02993 | -0,517 |
| 264 | 60 | 54,6 | 130 | 1,63 | 0,7 | 0,01263 | -0,413 |
| 265 | 45 | 100 | 87 | 6,68 | 0,85 | 0,01899 | -0,222 |
| 266 | 60 | 54,6 | 135 | 1,2 | 0,51 | 0,00668 | -0,574 |
| 267 | 45 | 100 | 69 | 6,5 | 0,83 | 0,02772 | -0,333 |
| 268 | 60 | 54,6 | 115 | 1,51 | 0,65 | 0,01383 | -0,703 |
| 269 | 45 | 54,6 | 106 | 1,96 | 0,84 | 0,02583 | -0,495 |
| 270 | 60 | 77,2 | 92 | 3,81 | 0,81 | 0,02134 | -0,21 |
| 271 | 45 | 68,2 | 104 | 2,93 | 0,8 | 0,01911 | -0,738 |
| 272 | 60 | 77,2 | 114 | 3,84 | 0,82 | 0,01459 | -0,125 |
| 273 | 45 | 54,6 | 70 | 1,11 | 0,47 | 0,01934 | -0,37 |
| 274 | 60 | 77,2 | 88 | 3,09 | 0,66 | 0,01575 | -0,682 |
| 275 | 45 | 54,6 | 67 | 0,85 | 0,36 | 0,01276 | -0,551 |
| 276 | 60 | 77,2 | 93 | 3,76 | 0,8 | 0,02038 | -0,437 |
| 277 | 45 | 54,6 | 69 | 0,86 | 0,37 | 0,0124 | -0,654 |
| 278 | 60 | 77,2 | 93 | 4,08 | 0,87 | 0,0238 | -0,338 |
| 279 | 45 | 54,6 | 149 | 1,58 | 0,68 | 0,00927 | -0,858 |
| 280 | 60 | 77,2 | 109 | 3,96 | 0,85 | 0,01672 | -0,702 |
| 281 | 45 | 54,6 | 67 | 0,59 | 0,25 | 0,0066 | -0,495 |
| 282 | 60 | 77,2 | 118 | 3,75 | 0,8 | 0,01307 | -0,69 |

| Trecho | L (m) | D (mm) | C (m ^{0,367} /s) | Q (L/s) | V (m/s) | ∇H | K _w (m/dia) |
|--------|----------|-----------|------------------------------|------------|------------|---------|---------------------------|
| 283 | 45 | 54,6 | 113 | 1,56 | 0,67 | 0,01514 | -0,414 |
| 284 | 60 | 68,2 | 116 | 3,1 | 0,85 | 0,01736 | -0,35 |
| 285 | 45 | 54,6 | 123 | 1,06 | 0,45 | 0,00625 | -0,496 |
| 286 | 60 | 54,6 | 145 | 2,69 | 1,15 | 0,02613 | -0,603 |
| 287 | 45 | 54,6 | 98 | 0,94 | 0,4 | 0,00772 | -0,993 |
| 288 | 60 | 68,2 | 137 | 2,56 | 0,7 | 0,00894 | -0,373 |
| 289 | 45 | 54,6 | 126 | 0,69 | 0,29 | 0,0027 | -0,97 |
| 290 | 60 | 68,2 | 109 | 2,62 | 0,72 | 0,01422 | -0,342 |
| 291 | 45 | 54,6 | 102 | 0,06 | 0,03 | 0,00005 | -0,25 |
| 292 | 60 | 68,2 | 83 | 2,01 | 0,55 | 0,01451 | -0,546 |
| 293 | 45 | 54,6 | 141 | 0,7 | 0,3 | 0,00229 | -0,253 |
| 294 | 60 | 54,6 | 138 | 2,2 | 0,94 | 0,01967 | -0,302 |
| 295 | 45 | 54,6 | 96 | 0,53 | 0,23 | 0,00279 | -0,894 |
| 296 | 60 | 54,6 | 69 | 1,35 | 0,58 | 0,02877 | -0,975 |
| 297 | 45 | 54,6 | 94 | 0,58 | 0,25 | 0,00336 | -0,831 |
| 298 | 60 | 54,6 | 123 | 1,97 | 0,84 | 0,01982 | -0,913 |
| 299 | 45 | 54,6 | 69 | 0,17 | 0,07 | 0,00063 | -0,418 |
| 300 | 60 | 54,6 | 78 | 1,28 | 0,55 | 0,02083 | -0,091 |
| 301 | 45 | 54,6 | 114 | 0,43 | 0,18 | 0,00136 | -0,25 |
| 302 | 60 | 54,6 | 72 | 1,08 | 0,46 | 0,01759 | -0,155 |
| 303 | 45 | 54,6 | 74 | 0,04 | 0,02 | 0,00003 | -0,089 |
| 304 | 60 | 54,6 | 93 | 1,01 | 0,43 | 0,00967 | -0,541 |
| 305 | 45 | 54,6 | 106 | 0,32 | 0,14 | 0,00091 | -0,136 |
| 306 | 60 | 54,6 | 146 | 1,13 | 0,48 | 0,00517 | -0,865 |
| 307 | 45 | 54,6 | 141 | 0,09 | 0,04 | 0,00005 | -0,778 |
| 308 | 60 | 54,6 | 103 | 0,72 | 0,31 | 0,00427 | -0,284 |
| 309 | 45 | 54,6 | 122 | 0,14 | 0,06 | 0,00016 | -0,752 |
| 310 | 60 | 54,6 | 77 | 0,34 | 0,15 | 0,00187 | -0,512 |
| 311 | 45 | 54,6 | 67 | 0,08 | 0,04 | 0,00018 | -0,925 |
| 312 | 60 | 54,6 | 104 | 0,18 | 0,08 | 0,00031 | -0,508 |
| 313 | 45 | 54,6 | 126 | 1,01 | 0,43 | 0,00553 | -0,28 |
| 314 | 45 | 54,6 | 76 | 0,88 | 0,38 | 0,01098 | -0,596 |
| 315 | 60 | 54,6 | 96 | 0,36 | 0,16 | 0,00138 | -0,861 |
| 316 | 45 | 54,6 | 91 | 1,02 | 0,44 | 0,01026 | -0,957 |
| 317 | 60 | 54,6 | 138 | 0,8 | 0,34 | 0,00305 | -0,404 |
| 318 | 45 | 54,6 | 82 | 1,05 | 0,45 | 0,01318 | -0,483 |
| 319 | 60 | 54,6 | 85 | 1,16 | 0,49 | 0,0147 | -0,4 |
| 320 | 45 | 68,2 | 136 | 2,16 | 0,59 | 0,00663 | -0,07 |
| 321 | 60 | 54,6 | 87 | 0,84 | 0,36 | 0,00772 | -0,438 |
| 322 | 45 | 100 | 129 | 9,65 | 1,23 | 0,01811 | -0,894 |
| 323 | 60 | 54,6 | 102 | 1,42 | 0,61 | 0,0153 | -0,767 |
| 324 | 45 | 100 | 145 | 9,13 | 1,16 | 0,01315 | -0,135 |
| 325 | 60 | 156,4 | 66 | 15,74 | 0,82 | 0,01755 | -0,803 |
| 326 | 45 | 54,6 | 133 | 2,22 | 0,95 | 0,02152 | -0,357 |
| 327 | 60 | 100 | 121 | 8,2 | 1,04 | 0,01506 | -0,92 |
| 328 | 45 | 68,2 | 105 | 2,43 | 0,67 | 0,0133 | -0,786 |
| 329 | 60 | 100 | 91 | 7,33 | 0,93 | 0,02075 | -0,853 |

| Trecho | L (m) | D (mm) | C (m ^{0,367} /s) | Q (L/s) | V (m/s) | ∇H | K _w (m/dia) |
|--------|----------|-----------|------------------------------|------------|------------|---------|---------------------------|
| 330 | 45 | 77,2 | 93 | 1,93 | 0,41 | 0,00592 | -0,846 |
| 331 | 60 | 100 | 66 | 5,39 | 0,69 | 0,02129 | -0,056 |
| 332 | 45 | 54,6 | 101 | 1,4 | 0,6 | 0,01522 | -0,575 |
| 333 | 60 | 77,2 | 131 | 4,22 | 0,9 | 0,01341 | -0,131 |
| 334 | 45 | 54,6 | 96 | 0,98 | 0,42 | 0,00867 | -0,502 |
| 335 | 60 | 77,2 | 69 | 3,35 | 0,72 | 0,02872 | -0,555 |
| 336 | 45 | 54,6 | 130 | 1,63 | 0,7 | 0,01266 | -0,232 |
| 337 | 60 | 77,2 | 106 | 3,46 | 0,74 | 0,01373 | -0,032 |
| 338 | 45 | 54,6 | 117 | 0,1 | 0,04 | 0,00009 | -0,956 |
| 339 | 60 | 77,2 | 66 | 2,81 | 0,6 | 0,02249 | -0,365 |
| 340 | 45 | 54,6 | 131 | 1,42 | 0,61 | 0,00969 | -0,181 |
| 341 | 60 | 77,2 | 138 | 3,83 | 0,82 | 0,01016 | -0,224 |
| 342 | 45 | 54,6 | 115 | 1,18 | 0,5 | 0,0087 | -0,495 |
| 343 | 60 | 77,2 | 77 | 3,61 | 0,77 | 0,02687 | -0,9 |
| 344 | 45 | 54,6 | 103 | 1,26 | 0,54 | 0,01201 | -0,543 |
| 345 | 60 | 77,2 | 143 | 3,11 | 0,66 | 0,00646 | -0,899 |
| 346 | 45 | 54,6 | 99 | 0,38 | 0,16 | 0,00144 | -0,301 |
| 347 | 60 | 68,2 | 80 | 2,44 | 0,67 | 0,02215 | -0,012 |
| 348 | 45 | 54,6 | 136 | 0,51 | 0,22 | 0,00134 | -0,802 |
| 349 | 60 | 68,2 | 102 | 2,48 | 0,68 | 0,01458 | -0,166 |
| 350 | 45 | 54,6 | 76 | 0,11 | 0,05 | 0,00025 | -0,695 |
| 351 | 60 | 54,6 | 145 | 2,36 | 1,01 | 0,02049 | -0,029 |
| 352 | 45 | 54,6 | 90 | 0,38 | 0,16 | 0,0017 | -0,831 |
| 353 | 60 | 54,6 | 105 | 2,01 | 0,86 | 0,02768 | -0,789 |
| 354 | 45 | 54,6 | 98 | 0,15 | 0,06 | 0,00026 | -0,782 |
| 355 | 60 | 54,6 | 143 | 2,35 | 1,01 | 0,0209 | -0,924 |
| 356 | 45 | 54,6 | 68 | 0,22 | 0,1 | 0,00106 | -0,513 |
| 357 | 60 | 54,6 | 135 | 2,18 | 0,93 | 0,02022 | -0,208 |
| 358 | 45 | 54,6 | 142 | 0,04 | 0,02 | 0,00001 | -0,966 |
| 359 | 60 | 54,6 | 105 | 1,61 | 0,69 | 0,01839 | -0,182 |
| 360 | 45 | 54,6 | 130 | 0,33 | 0,14 | 0,00067 | -0,318 |
| 361 | 60 | 54,6 | 118 | 1,24 | 0,53 | 0,00917 | -0,911 |
| 362 | 45 | 54,6 | 117 | 0,16 | 0,07 | 0,00022 | -0,414 |
| 363 | 60 | 54,6 | 116 | 0,93 | 0,4 | 0,00551 | -0,761 |
| 364 | 45 | 54,6 | 70 | 0,03 | 0,01 | 0,00002 | -0,89 |
| 365 | 60 | 54,6 | 88 | 0,63 | 0,27 | 0,00446 | -0,104 |
| 366 | 45 | 54,6 | 117 | 0,14 | 0,06 | 0,00016 | -0,451 |
| 367 | 60 | 54,6 | 139 | 0,6 | 0,25 | 0,00173 | -0,795 |
| 368 | 45 | 54,6 | 119 | 0,12 | 0,05 | 0,00011 | -0,036 |
| 369 | 60 | 54,6 | 76 | 0,17 | 0,07 | 0,00051 | -0,111 |
| 370 | 45 | 54,6 | 105 | 1,18 | 0,5 | 0,01027 | -0,357 |
| 371 | 45 | 54,6 | 66 | 0,7 | 0,3 | 0,00923 | -0,04 |
| 372 | 60 | 54,6 | 77 | 0,54 | 0,23 | 0,00437 | -0,985 |
| 373 | 45 | 54,6 | 67 | 0,93 | 0,4 | 0,0151 | -0,521 |
| 374 | 60 | 54,6 | 68 | 0,64 | 0,27 | 0,00746 | -0,061 |
| 375 | 45 | 54,6 | 149 | 1,61 | 0,69 | 0,00955 | -0,288 |
| 376 | 60 | 54,6 | 73 | 0,83 | 0,35 | 0,01054 | -0,915 |

| Trecho | L (m) | D (mm) | C (m ^{0,367} /s) | Q (L/s) | V (m/s) | ∇H | K _w (m/dia) |
|--------|----------|-----------|------------------------------|------------|------------|---------|---------------------------|
| 377 | 45 | 68,2 | 93 | 1,91 | 0,52 | 0,01068 | -0,485 |
| 378 | 60 | 54,6 | 150 | 1,53 | 0,65 | 0,00857 | -0,162 |
| 379 | 45 | 204,2 | 68 | 27,04 | 0,83 | 0,01233 | -0,455 |
| 380 | 60 | 54,6 | 80 | 1,16 | 0,5 | 0,01653 | -0,873 |
| 381 | 45 | 54,6 | 105 | 1,7 | 0,72 | 0,02017 | -0,177 |
| 382 | 60 | 100 | 114 | 6,73 | 0,86 | 0,01167 | -0,665 |
| 383 | 45 | 54,6 | 130 | 1,47 | 0,63 | 0,01038 | -0,991 |
| 384 | 60 | 100 | 92 | 7,72 | 0,98 | 0,02241 | -0,655 |
| 385 | 45 | 54,6 | 128 | 0,71 | 0,3 | 0,00281 | -0,741 |
| 386 | 60 | 100 | 78 | 7,16 | 0,91 | 0,02642 | -0,899 |
| 387 | 45 | 54,6 | 94 | 0,87 | 0,37 | 0,00721 | -0,866 |
| 388 | 60 | 100 | 102 | 7,61 | 0,97 | 0,01799 | -0,292 |
| 389 | 45 | 54,6 | 69 | 0,87 | 0,37 | 0,01263 | -0,387 |
| 390 | 60 | 100 | 144 | 7,54 | 0,96 | 0,00934 | -0,452 |
| 391 | 45 | 54,6 | 74 | 1,22 | 0,52 | 0,02093 | -0,501 |
| 392 | 60 | 100 | 67 | 5,64 | 0,72 | 0,02249 | -0,028 |
| 393 | 45 | 54,6 | 105 | 1,3 | 0,55 | 0,0123 | -0,783 |
| 394 | 60 | 100 | 69 | 5,48 | 0,7 | 0,0202 | -0,525 |
| 395 | 45 | 54,6 | 80 | 1,26 | 0,54 | 0,01937 | -0,559 |
| 396 | 60 | 100 | 70 | 5,09 | 0,65 | 0,01719 | -0,899 |
| 397 | 45 | 54,6 | 135 | 1,37 | 0,58 | 0,00848 | -0,591 |
| 398 | 60 | 100 | 67 | 5,05 | 0,64 | 0,01832 | -0,189 |
| 399 | 45 | 54,6 | 110 | 1 | 0,43 | 0,00693 | -0,57 |
| 400 | 60 | 77,2 | 94 | 4,51 | 0,96 | 0,02803 | -0,91 |
| 401 | 45 | 54,6 | 120 | 0,72 | 0,31 | 0,00321 | -0,012 |
| 402 | 60 | 77,2 | 147 | 3,88 | 0,83 | 0,00925 | -0,462 |
| 403 | 45 | 54,6 | 82 | 0,72 | 0,31 | 0,0066 | -0,039 |
| 404 | 60 | 77,2 | 67 | 2,65 | 0,57 | 0,01961 | -0,443 |
| 405 | 45 | 54,6 | 92 | 0,69 | 0,29 | 0,00486 | -0,956 |
| 406 | 60 | 68,2 | 103 | 2,62 | 0,72 | 0,01589 | -0,326 |
| 407 | 45 | 54,6 | 81 | 0,12 | 0,05 | 0,00026 | -0,551 |
| 408 | 60 | 54,6 | 138 | 2,47 | 1,05 | 0,02433 | -0,314 |
| 409 | 45 | 54,6 | 93 | 0,84 | 0,36 | 0,0068 | -0,991 |
| 410 | 60 | 77,2 | 65 | 2,76 | 0,59 | 0,02238 | -0,558 |
| 411 | 45 | 54,6 | 133 | 0,24 | 0,1 | 0,00034 | -0,334 |
| 412 | 60 | 54,6 | 126 | 2,32 | 0,99 | 0,02575 | -0,304 |
| 413 | 45 | 54,6 | 122 | 0,09 | 0,04 | 0,00006 | -0,161 |
| 414 | 60 | 54,6 | 145 | 2,36 | 1,01 | 0,02053 | -0,558 |
| 415 | 45 | 54,6 | 100 | 0,15 | 0,06 | 0,00025 | -0,429 |
| 416 | 60 | 54,6 | 86 | 1,33 | 0,57 | 0,01853 | -0,205 |
| 417 | 45 | 54,6 | 126 | 0,04 | 0,02 | 0,00001 | -0,392 |
| 418 | 60 | 54,6 | 119 | 1,24 | 0,53 | 0,00897 | -0,193 |
| 419 | 45 | 54,6 | 124 | 0,12 | 0,05 | 0,00011 | -0,336 |
| 420 | 60 | 54,6 | 141 | 1,14 | 0,49 | 0,0056 | -0,183 |
| 421 | 45 | 54,6 | 66 | 0,06 | 0,02 | 0,00009 | -0,488 |
| 422 | 60 | 54,6 | 149 | 1,05 | 0,45 | 0,00431 | -0,546 |
| 423 | 45 | 54,6 | 128 | 0,17 | 0,07 | 0,0002 | -0,415 |

| Trecho | L (m) | D (mm) | C (m ^{0,367} /s) | Q (L/s) | V (m/s) | ∇H | K _w (m/dia) |
|--------|----------|-----------|------------------------------|------------|------------|---------|---------------------------|
| 424 | 60 | 54,6 | 112 | 0,51 | 0,22 | 0,00195 | -0,846 |
| 425 | 45 | 54,6 | 107 | 0,1 | 0,04 | 0,00011 | -0,056 |
| 426 | 60 | 54,6 | 137 | 0,28 | 0,12 | 0,00044 | -0,575 |
| 427 | 45 | 54,6 | 128 | 1 | 0,43 | 0,00524 | -0,131 |
| 428 | 45 | 54,6 | 150 | 0,79 | 0,34 | 0,00253 | -0,502 |
| 429 | 60 | 54,6 | 146 | 0,47 | 0,2 | 0,00103 | -0,555 |
| 430 | 45 | 54,6 | 105 | 0,9 | 0,38 | 0,00618 | -0,232 |
| 431 | 60 | 54,6 | 78 | 0,87 | 0,37 | 0,01019 | -0,032 |
| 432 | 45 | 54,6 | 103 | 1,13 | 0,48 | 0,00985 | -0,956 |
| 433 | 60 | 68,2 | 77 | 1,78 | 0,49 | 0,0133 | -0,365 |
| 434 | 45 | 68,2 | 113 | 2,53 | 0,69 | 0,0125 | -0,181 |
| 435 | 60 | 77,2 | 114 | 3,23 | 0,69 | 0,01055 | -0,224 |
| 436 | 45 | 204,2 | 74 | 35,19 | 1,07 | 0,01717 | -0,495 |
| 437 | 60 | 54,6 | 135 | 2,17 | 0,93 | 0,02004 | -0,9 |
| 438 | 45 | 77,2 | 67 | 2,69 | 0,57 | 0,02017 | -0,543 |
| 439 | 60 | 100 | 124 | 6,52 | 0,83 | 0,00942 | -0,899 |
| 440 | 45 | 54,6 | 147 | 1,02 | 0,44 | 0,00422 | -0,301 |
| 441 | 60 | 100 | 77 | 8,14 | 1,04 | 0,03437 | -0,012 |
| 442 | 45 | 54,6 | 89 | 1,31 | 0,56 | 0,01697 | -0,802 |
| 443 | 60 | 100 | 114 | 8,21 | 1,05 | 0,01686 | -0,166 |
| 444 | 45 | 54,6 | 71 | 0,98 | 0,42 | 0,01512 | -0,695 |
| 445 | 60 | 100 | 91 | 7,06 | 0,9 | 0,01938 | -0,029 |
| 446 | 45 | 54,6 | 104 | 0,92 | 0,39 | 0,00666 | -0,831 |
| 447 | 60 | 100 | 68 | 6,14 | 0,78 | 0,02567 | -0,789 |
| 448 | 45 | 54,6 | 115 | 1,17 | 0,5 | 0,0086 | -0,782 |
| 449 | 60 | 100 | 132 | 7,57 | 0,96 | 0,01105 | -0,924 |
| 450 | 45 | 54,6 | 73 | 1,04 | 0,44 | 0,01591 | -0,513 |
| 451 | 60 | 100 | 99 | 6,63 | 0,84 | 0,01472 | -0,208 |
| 452 | 45 | 54,6 | 137 | 1,41 | 0,6 | 0,00871 | -0,966 |
| 453 | 60 | 77,2 | 142 | 6,06 | 1,3 | 0,0226 | -0,182 |
| 454 | 45 | 54,6 | 134 | 1,03 | 0,44 | 0,00507 | -0,318 |
| 455 | 60 | 77,2 | 123 | 5,05 | 1,08 | 0,02105 | -0,911 |
| 456 | 45 | 54,6 | 70 | 0,59 | 0,25 | 0,00599 | -0,414 |
| 457 | 60 | 77,2 | 70 | 3,31 | 0,71 | 0,02734 | -0,761 |
| 458 | 45 | 54,6 | 80 | 0,28 | 0,12 | 0,00118 | -0,89 |
| 459 | 60 | 77,2 | 109 | 3,68 | 0,79 | 0,01463 | -0,104 |
| 460 | 45 | 54,6 | 130 | 0,7 | 0,3 | 0,00263 | -0,451 |
| 461 | 60 | 68,2 | 133 | 3,49 | 0,95 | 0,01675 | -0,795 |
| 462 | 45 | 54,6 | 140 | 0,53 | 0,23 | 0,00137 | -0,036 |
| 463 | 60 | 68,2 | 104 | 2,73 | 0,75 | 0,01683 | -0,111 |
| 464 | 45 | 54,6 | 120 | 0,17 | 0,07 | 0,00022 | -0,357 |
| 465 | 60 | 54,6 | 134 | 2,44 | 1,04 | 0,02519 | -0,04 |
| 466 | 45 | 54,6 | 121 | 0,4 | 0,17 | 0,00104 | -0,985 |
| 467 | 60 | 54,6 | 143 | 2,41 | 1,03 | 0,02177 | -0,521 |
| 468 | 45 | 54,6 | 127 | 0,28 | 0,12 | 0,00051 | -0,061 |
| 469 | 60 | 54,6 | 95 | 1,77 | 0,75 | 0,02615 | -0,288 |
| 470 | 45 | 54,6 | 138 | 0,97 | 0,41 | 0,0043 | -0,915 |

| Trecho | L (m) | D (mm) | C (m ^{0,367} /s) | Q (L/s) | V (m/s) | ∇H | K _w (m/dia) |
|--------|----------|-----------|------------------------------|------------|------------|---------|---------------------------|
| 471 | 60 | 54,6 | 66 | 1,17 | 0,5 | 0,02413 | -0,485 |
| 472 | 45 | 54,6 | 90 | 0,08 | 0,03 | 0,00009 | -0,162 |
| 473 | 60 | 54,6 | 86 | 1,2 | 0,51 | 0,01538 | -0,455 |
| 474 | 45 | 54,6 | 75 | 0,09 | 0,04 | 0,00017 | -0,873 |
| 475 | 60 | 54,6 | 123 | 1,27 | 0,54 | 0,00877 | -0,177 |
| 476 | 45 | 54,6 | 129 | 0,05 | 0,02 | 0,00002 | -0,665 |
| 477 | 60 | 54,6 | 146 | 1,2 | 0,51 | 0,00574 | -0,991 |
| 478 | 45 | 54,6 | 66 | 0,32 | 0,14 | 0,00215 | -0,655 |
| 479 | 60 | 54,6 | 89 | 0,74 | 0,32 | 0,0059 | -0,741 |
| 480 | 45 | 54,6 | 75 | 0,24 | 0,1 | 0,00104 | -0,899 |
| 481 | 60 | 54,6 | 132 | 0,45 | 0,19 | 0,00112 | -0,866 |
| 482 | 45 | 54,6 | 97 | 0,2 | 0,08 | 0,00044 | -0,292 |
| 483 | 60 | 54,6 | 117 | 0,04 | 0,02 | 0,00001 | -0,387 |
| 484 | 45 | 54,6 | 70 | 0,64 | 0,27 | 0,00699 | -0,452 |
| 485 | 45 | 54,6 | 126 | 0,65 | 0,28 | 0,00244 | -0,501 |
| 486 | 60 | 54,6 | 124 | 0,48 | 0,2 | 0,00142 | -0,028 |
| 487 | 45 | 54,6 | 79 | 0,24 | 0,1 | 0,00093 | -0,783 |
| 488 | 60 | 54,6 | 127 | 1,33 | 0,57 | 0,00906 | -0,525 |
| 489 | 45 | 54,6 | 107 | 0,06 | 0,02 | 0,00004 | -0,559 |
| 490 | 60 | 54,6 | 142 | 1,78 | 0,76 | 0,01257 | -0,899 |
| 491 | 45 | 100 | 108 | 3,84 | 0,49 | 0,00457 | -0,591 |
| 492 | 60 | 54,6 | 145 | 1,92 | 0,82 | 0,01401 | -0,189 |
| 493 | 45 | 204,2 | 117 | 44,14 | 1,35 | 0,01119 | -0,57 |
| 494 | 60 | 100 | 67 | 5,97 | 0,76 | 0,025 | -0,91 |
| 495 | 45 | 100 | 143 | 4,57 | 0,58 | 0,00375 | -0,012 |
| 496 | 60 | 156,4 | 69 | 15,12 | 0,79 | 0,01499 | -0,462 |
| 497 | 45 | 54,6 | 72 | 1,34 | 0,57 | 0,02631 | -0,039 |
| 498 | 60 | 100 | 141 | 10,34 | 1,32 | 0,01745 | -0,443 |
| 499 | 45 | 54,6 | 113 | 0,5 | 0,21 | 0,00182 | -0,956 |
| 500 | 60 | 100 | 83 | 8,9 | 1,13 | 0,03523 | -0,326 |
| 501 | 45 | 54,6 | 102 | 0,39 | 0,17 | 0,00143 | -0,551 |
| 502 | 60 | 100 | 106 | 8,3 | 1,06 | 0,01968 | -0,314 |
| 503 | 45 | 54,6 | 84 | 0,73 | 0,31 | 0,00643 | -0,991 |
| 504 | 60 | 100 | 94 | 7,8 | 0,99 | 0,02192 | -0,558 |
| 505 | 45 | 54,6 | 69 | 0,47 | 0,2 | 0,00401 | -0,334 |
| 506 | 60 | 100 | 112 | 6,97 | 0,89 | 0,01286 | -0,304 |
| 507 | 45 | 54,6 | 69 | 0,71 | 0,3 | 0,00874 | -0,161 |
| 508 | 60 | 100 | 111 | 6,4 | 0,82 | 0,01118 | -0,558 |
| 509 | 45 | 54,6 | 89 | 0,64 | 0,27 | 0,00452 | -0,429 |
| 510 | 60 | 77,2 | 122 | 5,59 | 1,19 | 0,02576 | -0,205 |
| 511 | 45 | 54,6 | 96 | 0,47 | 0,2 | 0,00218 | -0,392 |
| 512 | 60 | 77,2 | 103 | 4,75 | 1,02 | 0,02607 | -0,193 |
| 513 | 45 | 54,6 | 115 | 1,2 | 0,51 | 0,00894 | -0,336 |
| 514 | 60 | 77,2 | 129 | 5,02 | 1,07 | 0,01901 | -0,183 |
| 515 | 45 | 54,6 | 129 | 0,21 | 0,09 | 0,0003 | -0,488 |
| 516 | 60 | 77,2 | 87 | 3,62 | 0,77 | 0,02155 | -0,546 |
| 517 | 45 | 54,6 | 68 | 0,2 | 0,09 | 0,00089 | -0,415 |

| Trecho | L (m) | D (mm) | C (m^{0,367}/s) | Q (L/s) | V (m/s) | ∇H | K_w (m/dia) |
|---------------|------------------|-------------------|------------------------------------|--------------------|--------------------|-----------|----------------------------------|
| 518 | 60 | 77,2 | 103 | 3,63 | 0,78 | 0,01587 | -0,039 |
| 519 | 45 | 54,6 | 107 | 0,49 | 0,21 | 0,00195 | -0,443 |
| 520 | 60 | 68,2 | 125 | 3,2 | 0,88 | 0,01603 | -0,956 |
| 521 | 45 | 54,6 | 72 | 0,4 | 0,17 | 0,00274 | -0,326 |
| 522 | 60 | 54,6 | 138 | 2,48 | 1,06 | 0,0246 | -0,551 |
| 523 | 45 | 54,6 | 143 | 0,01 | 0 | 0 | -0,314 |
| 524 | 60 | 54,6 | 105 | 1,86 | 0,79 | 0,02382 | -0,991 |
| 525 | 45 | 54,6 | 120 | 0,06 | 0,02 | 0,00003 | -0,558 |
| 526 | 60 | 54,6 | 87 | 1,62 | 0,69 | 0,02617 | -0,334 |
| 527 | 45 | 54,6 | 103 | 0,69 | 0,29 | 0,00394 | -0,304 |
| 528 | 60 | 54,6 | 71 | 1,34 | 0,57 | 0,02706 | -0,161 |
| 529 | 45 | 54,6 | 66 | 0,24 | 0,1 | 0,00128 | -0,558 |
| 530 | 60 | 54,6 | 143 | 1,7 | 0,73 | 0,01146 | -0,429 |
| 531 | 45 | 54,6 | 131 | 0,2 | 0,09 | 0,00027 | -0,205 |
| 532 | 60 | 54,6 | 105 | 1,13 | 0,48 | 0,00953 | -0,392 |
| 533 | 45 | 54,6 | 98 | 0,15 | 0,06 | 0,00026 | -0,193 |
| 534 | 60 | 54,6 | 113 | 0,93 | 0,4 | 0,00575 | -0,336 |
| 535 | 45 | 54,6 | 89 | 0,05 | 0,02 | 0,00004 | -0,183 |
| 536 | 60 | 54,6 | 68 | 0,57 | 0,25 | 0,00607 | -0,488 |
| 537 | 45 | 54,6 | 66 | 0,17 | 0,07 | 0,00066 | -0,546 |
| 538 | 60 | 54,6 | 127 | 0,32 | 0,14 | 0,00066 | -0,415 |
| 539 | 45 | 54,6 | 115 | 0,02 | 0,01 | 0,00001 | -0,183 |
| 540 | 60 | 54,6 | 72 | 0,15 | 0,07 | 0,00048 | -0,488 |
| 541 | 45 | 54,6 | 77 | 0,35 | 0,15 | 0,00192 | -0,546 |
| 542 | 36,8958 | 252 | 72 | 65,56 | 1,31 | 0,02053 | -0,415 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE L – Gabarito referente aos nós para perdas de carga calculadas por Darcy-Weisbach – Rede MIGHA

| Nó | Consumo (L/s) | Cota do Terreno (m) | Carga Hidráulica (m) | Pressão (m) |
|-----------|--------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------|
| 1 | 0,0892 | 196,2317 | 259,14 | 62,91 |
| 2 | 0,253 | 192,3587 | 259,12 | 66,77 |
| 3 | 0,2283 | 194,2377 | 259,15 | 64,92 |
| 4 | 0,1845 | 204,7611 | 259,16 | 54,4 |
| 5 | 0,303 | 201,039 | 259,1 | 58,06 |
| 6 | 0,3583 | 196,7379 | 259,13 | 62,39 |
| 7 | 0,103 | 204,033 | 259,07 | 55,03 |
| 8 | 0,1883 | 202,7741 | 259,1 | 56,33 |
| 9 | 0,2103 | 210,0382 | 258,97 | 48,93 |
| 10 | 0,2383 | 207,8164 | 259,02 | 51,2 |
| 11 | 0,203 | 212,8374 | 258,8 | 45,96 |
| 12 | 0,2983 | 209,1728 | 258,87 | 49,7 |
| 13 | 0,403 | 206,9856 | 258,41 | 51,42 |
| 14 | 0,1583 | 206,8305 | 258,49 | 51,66 |
| 15 | 0,1203 | 205,0612 | 257,83 | 52,77 |
| 16 | 0,2283 | 205,5789 | 257,9 | 52,32 |
| 17 | 0,2203 | 203,459 | 257,12 | 53,66 |
| 18 | 0,2683 | 204,4865 | 257,21 | 52,72 |
| 19 | 0,2603 | 202,3357 | 256,29 | 53,96 |
| 20 | 0,2543 | 203,1863 | 256,56 | 53,37 |
| 21 | 0,1103 | 205,4851 | 255,81 | 50,33 |
| 22 | 0,2113 | 205,5964 | 256,01 | 50,41 |
| 23 | 0,2 | 205,2457 | 255,4 | 50,15 |
| 24 | 0,583 | 206,6014 | 255,48 | 48,88 |
| 25 | 0,003 | 205,8884 | 254,85 | 48,97 |
| 26 | 0,583 | 206,3547 | 254,93 | 48,58 |
| 27 | 0,0203 | 208,5845 | 254,25 | 45,67 |
| 28 | 0,4583 | 207,8757 | 254,19 | 46,31 |
| 29 | 0,2 | 211,6469 | 253,76 | 42,12 |
| 30 | 0,6183 | 209,1264 | 253,75 | 44,63 |
| 31 | 0,1103 | 209,96 | 253,26 | 43,3 |
| 32 | 0,83 | 208,1 | 253,16 | 45,06 |
| 33 | 0,103 | 210,7852 | 252,73 | 41,95 |
| 34 | 0,2183 | 212,2317 | 252,62 | 40,39 |
| 35 | 0,208 | 215,1202 | 251,64 | 36,52 |
| 36 | 0,253 | 215,9537 | 251,67 | 35,72 |
| 37 | 0,4103 | 218,8893 | 250,62 | 31,74 |
| 38 | 0,6483 | 219,4331 | 250,65 | 31,22 |
| 39 | 0,1103 | 224,44 | 249,85 | 25,41 |
| 40 | 0,3 | 224 | 249,86 | 25,86 |
| 41 | 0,01 | 223,5 | 249,12 | 25,62 |
| 42 | 0,13 | 225,6295 | 249,12 | 23,49 |
| 43 | 0,0203 | 222 | 248,16 | 26,16 |
| 44 | 0,2083 | 224,5178 | 248,16 | 23,64 |
| 45 | 0,2003 | 222,5 | 247,05 | 24,55 |
| 46 | 0,243 | 224,4395 | 247,05 | 22,61 |
| 47 | 0,29 | 222,5 | 246,39 | 23,89 |

| Nó | Consumo (L/s) | Cota do Terreno (m) | Carga Hidráulica (m) | Pressão (m) |
|-----------|--------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------|
| 48 | 0,11 | 224,3312 | 246,4 | 22,07 |
| 49 | 0,11 | 221,5776 | 245,87 | 24,3 |
| 50 | 0,19 | 222,5 | 245,87 | 23,37 |
| 51 | 0,273 | 220,9947 | 245,48 | 24,49 |
| 52 | 0,17 | 221,4232 | 245,49 | 24,06 |
| 53 | 0,017 | 220,1 | 245,31 | 25,21 |
| 54 | 0,09 | 220,1 | 245,29 | 25,19 |
| 55 | 0,203 | 220,1 | 245,21 | 25,11 |
| 56 | 0,2583 | 220,9642 | 245,21 | 24,24 |
| 57 | 0,2 | 220,7147 | 245,19 | 24,47 |
| 58 | 0,1 | 220,1 | 245,19 | 25,09 |
| 59 | 0,583 | 203,3357 | 259,28 | 55,94 |
| 60 | 0,15 | 204,1212 | 259,29 | 55,17 |
| 61 | 0,25 | 198,9319 | 259,28 | 60,35 |
| 62 | 0,23 | 204,163 | 259,28 | 55,12 |
| 63 | 0,28 | 207,6017 | 259,28 | 51,68 |
| 64 | 0,08 | 208,7227 | 259,21 | 50,49 |
| 65 | 0,1 | 207,0181 | 258,8 | 51,78 |
| 66 | 0,1 | 206,8282 | 258 | 51,17 |
| 67 | 0,1 | 205,5986 | 257,47 | 51,87 |
| 68 | 0,07 | 204,4309 | 256,93 | 52,5 |
| 69 | 0 | 206,5618 | 256,31 | 49,75 |
| 70 | 0,4 | 208,4117 | 255,89 | 47,48 |
| 71 | 0,2 | 208,1533 | 255,23 | 47,08 |
| 72 | 0,1 | 209,0391 | 254,47 | 45,43 |
| 73 | 0,11 | 208,5119 | 253,63 | 45,12 |
| 74 | 0,16 | 208,1 | 253,17 | 45,07 |
| 75 | 0,8 | 213,1819 | 252,62 | 39,44 |
| 76 | 0,2 | 216,549 | 251,85 | 35,3 |
| 77 | 0,15 | 220,2191 | 250,8 | 30,58 |
| 78 | 0,05 | 224 | 250 | 26 |
| 79 | 0,12 | 226,5029 | 249,14 | 22,63 |
| 80 | 0,12 | 226,6727 | 248,16 | 21,49 |
| 81 | 0,19 | 226,6127 | 247,05 | 20,44 |
| 82 | 0,21 | 227,32 | 246,4 | 19,08 |
| 83 | 0,13 | 224,1159 | 245,86 | 21,75 |
| 84 | 0,3 | 222 | 245,49 | 23,49 |
| 85 | 0,9111 | 221 | 245,26 | 24,26 |
| 86 | 0,243 | 220,8055 | 245,2 | 24,39 |
| 87 | 0,125 | 220,0711 | 245,19 | 25,12 |
| 88 | 0,2183 | 197,66 | 259,54 | 61,88 |
| 89 | 0,1145 | 198,804 | 259,53 | 60,73 |
| 90 | 0,2683 | 198,3742 | 259,59 | 61,22 |
| 91 | 0,2533 | 202,8314 | 259,69 | 56,86 |
| 92 | 0,2533 | 207,6339 | 259,87 | 52,23 |
| 93 | 0,2573 | 209,7978 | 260,18 | 50,38 |
| 94 | 0,1583 | 208,725 | 259,46 | 50,73 |

| Nó | Consumo (L/s) | Cota do Terreno (m) | Carga Hidráulica (m) | Pressão (m) |
|-----------|--------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------|
| 95 | 0,2589 | 208,5063 | 258,76 | 50,25 |
| 96 | 0,2586 | 207,2433 | 258,02 | 50,78 |
| 97 | 0,2513 | 205,8391 | 257,31 | 51,47 |
| 98 | 0,213 | 207,3815 | 256,61 | 49,23 |
| 99 | 0,213 | 210,6398 | 256,11 | 45,47 |
| 100 | 0,273 | 210,5347 | 255,32 | 44,79 |
| 101 | 0,583 | 209,9456 | 254,79 | 44,85 |
| 102 | 0,33 | 208,1 | 253,96 | 45,86 |
| 103 | 0,1111 | 208,9885 | 253,2 | 44,21 |
| 104 | 0,2323 | 214,5928 | 252,62 | 38,03 |
| 105 | 0,209 | 217,3029 | 251,86 | 34,56 |
| 106 | 0,1183 | 220,9033 | 250,95 | 30,04 |
| 107 | 0,1113 | 224,4012 | 250,09 | 25,69 |
| 108 | 0,0983 | 228,4581 | 249,45 | 20,99 |
| 109 | 0,0583 | 229,229 | 248,16 | 18,93 |
| 110 | 0,1583 | 228,5396 | 247,06 | 18,52 |
| 111 | 0,2583 | 229,3456 | 246,39 | 17,04 |
| 112 | 0,3383 | 226,8263 | 245,86 | 19,04 |
| 113 | 0,253 | 224,2504 | 245,48 | 21,23 |
| 114 | 0,2 | 222,8 | 245,27 | 22,47 |
| 115 | 0,2 | 221,1893 | 245,2 | 24,01 |
| 116 | 0,15 | 219,1703 | 245,18 | 26,01 |
| 117 | 0,2 | 199,2804 | 259,8 | 60,52 |
| 118 | 0,15 | 202,5748 | 259,78 | 57,2 |
| 119 | 0,1 | 198,9603 | 259,87 | 60,91 |
| 120 | 0,4 | 202,4759 | 260,04 | 57,56 |
| 121 | 0,183 | 207,8633 | 260,42 | 52,56 |
| 122 | 0,2513 | 211,9342 | 260,77 | 48,83 |
| 123 | 0,2183 | 210,7408 | 260,21 | 49,47 |
| 124 | 0,2581 | 210,1748 | 259,25 | 49,07 |
| 125 | 0,7583 | 209,0132 | 258,58 | 49,56 |
| 126 | 0,2783 | 207,3836 | 257,87 | 50,48 |
| 127 | 0,2573 | 209,7777 | 257,06 | 47,29 |
| 128 | 0,2587 | 214,4169 | 256,4 | 41,98 |
| 129 | 0,6583 | 215,2463 | 255,63 | 40,38 |
| 130 | 0,2683 | 211,7014 | 254,94 | 43,24 |
| 131 | 0,2563 | 208,1 | 254,35 | 46,25 |
| 132 | 0,2586 | 211,259 | 253,74 | 42,48 |
| 133 | 0,1583 | 215,524 | 252,84 | 37,31 |
| 134 | 0,2183 | 218,7164 | 252,04 | 33,33 |
| 135 | 0,2513 | 222 | 251,36 | 29,36 |
| 136 | 0,2581 | 225,5183 | 250,09 | 24,57 |
| 137 | 0,1183 | 229,5204 | 249,33 | 19,81 |
| 138 | 0,2113 | 230,1827 | 248,09 | 17,9 |
| 139 | 0,2511 | 230,0122 | 247,07 | 17,05 |
| 140 | 0,2583 | 230,1726 | 246,36 | 16,19 |
| 141 | 0,2283 | 229,9567 | 245,87 | 15,91 |

| Nó | Consumo (L/s) | Cota do Terreno (m) | Carga Hidráulica (m) | Pressão (m) |
|-----------|--------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------|
| 142 | 0,2523 | 226,8015 | 245,49 | 18,68 |
| 143 | 0,2582 | 225,091 | 245,27 | 20,18 |
| 144 | 0,2283 | 223,4 | 245,19 | 21,79 |
| 145 | 0,1225 | 220,8284 | 245,18 | 24,35 |
| 146 | 0,2522 | 201,4214 | 260,08 | 58,65 |
| 147 | 0,3845 | 206,0346 | 260,03 | 53,99 |
| 148 | 0,3583 | 201,7223 | 260,19 | 58,47 |
| 149 | 0,2383 | 203,7515 | 260,42 | 56,67 |
| 150 | 0,2533 | 209,385 | 260,94 | 51,56 |
| 151 | 0,2583 | 215,7129 | 261,23 | 45,51 |
| 152 | 0,3383 | 213,3759 | 260,61 | 47,24 |
| 153 | 0,2333 | 212,4626 | 259,87 | 47,41 |
| 154 | 0,2533 | 210,4518 | 259,13 | 48,67 |
| 155 | 0,1583 | 208,7042 | 258,63 | 49,92 |
| 156 | 0,2283 | 211,3047 | 257,56 | 46,26 |
| 157 | 0,2533 | 219,7467 | 256,81 | 37,06 |
| 158 | 0,2584 | 221,0157 | 256,11 | 35,09 |
| 159 | 0,1583 | 213,6165 | 255,52 | 41,9 |
| 160 | 0,2683 | 211,0598 | 254,86 | 43,8 |
| 161 | 0,2573 | 213,1401 | 253,77 | 40,63 |
| 162 | 0,2588 | 216,4442 | 253,03 | 36,59 |
| 163 | 0,2993 | 220,16 | 252,32 | 32,16 |
| 164 | 0,2599 | 223 | 251,75 | 28,75 |
| 165 | 0,2589 | 226,5796 | 250,09 | 23,51 |
| 166 | 0,2983 | 230,6615 | 249,33 | 18,67 |
| 167 | 0,2593 | 231,235 | 248,03 | 16,8 |
| 168 | 0,2544 | 231,4394 | 247,06 | 15,63 |
| 169 | 0,4583 | 231,7088 | 246,37 | 14,66 |
| 170 | 0,2483 | 231,8322 | 245,87 | 14,04 |
| 171 | 0,2543 | 230,7079 | 245,48 | 14,77 |
| 172 | 0,2584 | 228,193 | 245,27 | 17,08 |
| 173 | 0,4483 | 225,532 | 245,18 | 19,65 |
| 174 | 0,1445 | 223,2 | 245,17 | 21,97 |
| 175 | 0,2546 | 203,3522 | 260,31 | 56,96 |
| 176 | 0,1845 | 206,1254 | 260,27 | 54,14 |
| 177 | 0,2583 | 205,783 | 260,5 | 54,72 |
| 178 | 0,2333 | 207,335 | 260,78 | 53,45 |
| 179 | 0,3333 | 212,5199 | 261,4 | 48,88 |
| 180 | 0,2222 | 221,1 | 262,26 | 41,16 |
| 181 | 0,1111 | 215,7467 | 261,92 | 46,17 |
| 182 | 0,1122 | 214,2873 | 260,6 | 46,31 |
| 183 | 0,2211 | 211,7221 | 259,63 | 47,91 |
| 184 | 0,1133 | 208,8014 | 259,12 | 50,32 |
| 185 | 0,3311 | 212,4137 | 257,93 | 45,52 |
| 186 | 0,1313 | 222,6137 | 257,29 | 34,68 |
| 187 | 0,3131 | 225,986 | 256,48 | 30,5 |
| 188 | 0,1465 | 215,1028 | 255,95 | 40,85 |

| Nó | Consumo (L/s) | Cota do Terreno (m) | Carga Hidráulica (m) | Pressão (m) |
|-----------|--------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------|
| 189 | 0,1583 | 212,2519 | 255,07 | 42,82 |
| 190 | 0,3213 | 215,3529 | 254,31 | 38,95 |
| 191 | 0,1283 | 217,7576 | 253,46 | 35,71 |
| 192 | 0,2983 | 221,6905 | 252,73 | 31,04 |
| 193 | 0,2999 | 224 | 252,04 | 28,04 |
| 194 | 0,1111 | 227,4311 | 250,09 | 22,65 |
| 195 | 0,11 | 231,1189 | 249,35 | 18,23 |
| 196 | 0,2583 | 232,0264 | 248,03 | 16 |
| 197 | 0,2583 | 232,4719 | 247,06 | 14,59 |
| 198 | 0,2583 | 232,7913 | 246,37 | 13,58 |
| 199 | 0,0183 | 233,8037 | 245,87 | 12,07 |
| 200 | 0,0183 | 233,1 | 245,48 | 12,38 |
| 201 | 0,1183 | 231,01 | 245,27 | 14,26 |
| 202 | 0,1183 | 227,9443 | 245,18 | 17,24 |
| 203 | 0,1845 | 225,4381 | 245,17 | 19,73 |
| 204 | 0,1883 | 208,5089 | 260,51 | 52 |
| 205 | 0,1845 | 206,222 | 260,46 | 54,24 |
| 206 | 0,1583 | 208,1243 | 260,74 | 52,62 |
| 207 | 0,2183 | 211,1685 | 261,14 | 49,97 |
| 208 | 0,2513 | 218,4755 | 261,83 | 43,35 |
| 209 | 0,2581 | 224 | 262,42 | 38,42 |
| 210 | 0 | 217,9531 | 261,93 | 43,98 |
| 211 | 0,1183 | 216,0048 | 260,96 | 44,95 |
| 212 | 0,1483 | 213,2592 | 260,12 | 46,86 |
| 213 | 0,1783 | 212,5401 | 259,26 | 46,72 |
| 214 | 0,113 | 217,118 | 258,23 | 41,11 |
| 215 | 0,1113 | 222,7878 | 257,63 | 34,84 |
| 216 | 0,1233 | 221,6972 | 257 | 35,31 |
| 217 | 0,1893 | 215,4343 | 256,32 | 40,88 |
| 218 | 0,1983 | 212,7536 | 255,79 | 43,04 |
| 219 | 0,2223 | 215,6752 | 254,63 | 38,95 |
| 220 | 0,2283 | 219,2551 | 253,64 | 34,38 |
| 221 | 0 | 222,7 | 253,07 | 30,37 |
| 222 | 0 | 224,7437 | 252,23 | 27,49 |
| 223 | 0 | 228,1603 | 249,99 | 21,83 |
| 224 | 0 | 231,2464 | 249,48 | 18,23 |
| 225 | 0 | 232,5115 | 248,03 | 15,52 |
| 226 | 0,1583 | 233,8076 | 247,07 | 13,26 |
| 227 | 0,1583 | 233,1 | 246,37 | 13,27 |
| 228 | 0,1583 | 233,967 | 245,87 | 11,9 |
| 229 | 0,1583 | 233,1 | 245,46 | 12,36 |
| 230 | 0,1583 | 233,2617 | 245,26 | 12 |
| 231 | 0,1583 | 230,1677 | 245,17 | 15,01 |
| 232 | 0,1845 | 226,6541 | 245,16 | 18,5 |
| 233 | 0,2583 | 213,1144 | 260,65 | 47,53 |
| 234 | 0,1845 | 207,5389 | 260,54 | 53 |
| 235 | 0,2583 | 212,9671 | 261,02 | 48,06 |

| Nó | Consumo (L/s) | Cota do Terreno (m) | Carga Hidráulica (m) | Pressão (m) |
|-----------|--------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------|
| 236 | 0,2583 | 216,0005 | 261,55 | 45,54 |
| 237 | 0,2583 | 226,3123 | 262,35 | 36,04 |
| 238 | 0,2583 | 227,7785 | 262,69 | 34,92 |
| 239 | 0,2583 | 221,9705 | 262,24 | 40,27 |
| 240 | 0,2583 | 218,4392 | 261,32 | 42,88 |
| 241 | 0,3333 | 215,1815 | 260,26 | 45,08 |
| 242 | 0,3333 | 215,2832 | 259,41 | 44,13 |
| 243 | 0,2333 | 226,0413 | 258,82 | 32,78 |
| 244 | 0,2333 | 220,5658 | 258,14 | 37,58 |
| 245 | 0,2333 | 217,6758 | 257,7 | 40,02 |
| 246 | 0,2443 | 214,6283 | 256,43 | 41,81 |
| 247 | 0,2483 | 213,1514 | 255,52 | 42,37 |
| 248 | 0,243 | 216,7827 | 254,66 | 37,88 |
| 249 | 0,2583 | 220,4166 | 253,88 | 33,46 |
| 250 | 0,2583 | 224,0058 | 253,08 | 29,07 |
| 251 | 0,2543 | 226,5121 | 252,28 | 25,77 |
| 252 | 0,2583 | 229,8294 | 250,15 | 20,32 |
| 253 | 0,2543 | 233,8074 | 249,14 | 15,33 |
| 254 | 0,2533 | 233,6136 | 247,95 | 14,33 |
| 255 | 0,2533 | 232,9137 | 247,09 | 14,18 |
| 256 | 0,2513 | 232,3304 | 246,37 | 14,04 |
| 257 | 0,183 | 231,5774 | 245,87 | 14,29 |
| 258 | 0,6583 | 232,9013 | 245,42 | 12,52 |
| 259 | 0,6583 | 233,1 | 245,24 | 12,14 |
| 260 | 0,9 | 231,5202 | 245,15 | 13,63 |
| 261 | 0,1845 | 226,5102 | 245,15 | 18,64 |
| 262 | 0,203 | 215,7985 | 260,67 | 44,87 |
| 263 | 0,1292 | 210,5366 | 260,57 | 50,03 |
| 264 | 0,203 | 217,6111 | 261,02 | 43,41 |
| 265 | 0,203 | 221,9266 | 261,57 | 39,64 |
| 266 | 0,203 | 234,3037 | 262,68 | 28,38 |
| 267 | 0,3337 | 235,6695 | 263,2 | 27,53 |
| 268 | 0,203 | 230,3065 | 262,91 | 32,61 |
| 269 | 0,103 | 221,6829 | 261,39 | 39,71 |
| 270 | 0,103 | 218,1657 | 260,46 | 42,29 |
| 271 | 0,103 | 217,673 | 259,56 | 41,89 |
| 272 | 0,1 | 221,7292 | 258,9 | 37,17 |
| 273 | 0,1 | 219,1923 | 258,28 | 39,08 |
| 274 | 0,1 | 216,4896 | 257,82 | 41,33 |
| 275 | 0,2 | 213,9346 | 256,47 | 42,54 |
| 276 | 0,2 | 213,3631 | 255,53 | 42,16 |
| 277 | 0,2 | 217,6008 | 254,62 | 37,02 |
| 278 | 0,2 | 221,5656 | 253,88 | 32,31 |
| 279 | 0,23 | 225,1874 | 253,17 | 27,98 |
| 280 | 0,23 | 228,3747 | 252,29 | 23,92 |
| 281 | 0,23 | 233,1 | 250,17 | 17,07 |
| 282 | 0,23 | 232,3184 | 249,08 | 16,76 |

| Nó | Consumo (L/s) | Cota do Terreno (m) | Carga Hidráulica (m) | Pressão (m) |
|------------|--------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------|
| 283 | 0,33 | 231,0125 | 247,93 | 16,92 |
| 284 | 0,33 | 229,5205 | 247,1 | 17,58 |
| 285 | 0,33 | 228,0908 | 246,36 | 18,27 |
| 286 | 0 | 228,8811 | 245,87 | 16,99 |
| 287 | 0,203 | 231,9638 | 245,42 | 13,46 |
| 288 | 0,203 | 233,1 | 245,25 | 12,15 |
| 289 | 0 | 230,5422 | 245,17 | 14,63 |
| 290 | 0,1292 | 225,1861 | 245,15 | 19,97 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE M – Gabarito referente aos nós para perdas de carga calculadas por Hazen-Williams – Rede MIGHA

| Nó | Consumo (L/s) | Cota do Terreno (m) | Carga Hidráulica (m) | Pressão (m) | Concentração de cloro (mg/L) |
|----|------------------|------------------------|-------------------------|----------------|------------------------------------|
| 1 | 0,0892 | 196,2317 | 256,75 | 60,52 | 0,49 |
| 2 | 0,253 | 192,3587 | 256,73 | 64,37 | 0,52 |
| 3 | 0,2283 | 194,2377 | 256,77 | 62,54 | 0,65 |
| 4 | 0,1845 | 204,7611 | 256,79 | 52,03 | 0,57 |
| 5 | 0,303 | 201,039 | 256,71 | 55,67 | 0,56 |
| 6 | 0,3583 | 196,7379 | 256,75 | 60,02 | 0,64 |
| 7 | 0,103 | 204,033 | 256,69 | 52,65 | 0,65 |
| 8 | 0,1883 | 202,7741 | 256,73 | 53,96 | 0,81 |
| 9 | 0,2103 | 210,0382 | 256,56 | 46,52 | 0,67 |
| 10 | 0,2383 | 207,8164 | 256,66 | 48,84 | 0,85 |
| 11 | 0,203 | 212,8374 | 256,24 | 43,4 | 0,68 |
| 12 | 0,2983 | 209,1728 | 256,36 | 47,19 | 0,99 |
| 13 | 0,403 | 206,9856 | 255,83 | 48,85 | 0,68 |
| 14 | 0,1583 | 206,8305 | 256,1 | 49,27 | 1 |
| 15 | 0,1203 | 205,0612 | 255,43 | 50,36 | 0,64 |
| 16 | 0,2283 | 205,5789 | 255,42 | 49,85 | 0,93 |
| 17 | 0,2203 | 203,459 | 254,72 | 51,26 | 0,57 |
| 18 | 0,2683 | 204,4865 | 254,72 | 50,23 | 0,89 |
| 19 | 0,2603 | 202,3357 | 253,73 | 51,4 | 0,62 |
| 20 | 0,2543 | 203,1863 | 253,93 | 50,74 | 0,8 |
| 21 | 0,1103 | 205,4851 | 252,94 | 47,45 | 0,61 |
| 22 | 0,2113 | 205,5964 | 253,16 | 47,56 | 0,73 |
| 23 | 0,2 | 205,2457 | 252,07 | 46,83 | 0,57 |
| 24 | 0,583 | 206,6014 | 252,15 | 45,55 | 0,64 |
| 25 | 0,003 | 205,8884 | 251,2 | 45,31 | 0,54 |
| 26 | 0,583 | 206,3547 | 251,2 | 44,85 | 0,52 |
| 27 | 0,0203 | 208,5845 | 250,14 | 41,56 | 0,49 |
| 28 | 0,4583 | 207,8757 | 250,14 | 42,27 | 0,51 |
| 29 | 0,2 | 211,6469 | 249,11 | 37,46 | 0,44 |
| 30 | 0,6183 | 209,1264 | 249,12 | 39,99 | 0,49 |
| 31 | 0,1103 | 209,96 | 248,52 | 38,56 | 0,39 |
| 32 | 0,83 | 208,1 | 248,39 | 40,29 | 0,39 |
| 33 | 0,103 | 210,7852 | 247,85 | 37,07 | 0,34 |
| 34 | 0,2183 | 212,2317 | 247,85 | 35,62 | 0,36 |
| 35 | 0,208 | 215,1202 | 247,23 | 32,11 | 0,28 |
| 36 | 0,253 | 215,9537 | 247,25 | 31,3 | 0,3 |
| 37 | 0,4103 | 218,8893 | 246,11 | 27,22 | 0,26 |
| 38 | 0,6483 | 219,4331 | 246,12 | 26,68 | 0,3 |
| 39 | 0,1103 | 224,44 | 245,11 | 20,67 | 0,22 |
| 40 | 0,3 | 224 | 245,12 | 21,12 | 0,25 |
| 41 | 0,01 | 223,5 | 243,75 | 20,25 | 0,22 |
| 42 | 0,13 | 225,6295 | 243,78 | 18,15 | 0,23 |
| 43 | 0,0203 | 222 | 242,33 | 20,33 | 0,18 |
| 44 | 0,2083 | 224,5178 | 242,33 | 17,81 | 0,2 |
| 45 | 0,2003 | 222,5 | 241,57 | 19,07 | 0,16 |
| 46 | 0,243 | 224,4395 | 241,58 | 17,14 | 0,17 |

| | | | | | |
|----|--------|----------|--------|-------|------|
| 47 | 0,29 | 222,5 | 240,42 | 17,92 | 0,16 |
| 48 | 0,11 | 224,3312 | 240,42 | 16,08 | 0,15 |
| 49 | 0,11 | 221,5776 | 239,91 | 18,33 | 0,13 |
| 50 | 0,19 | 222,5 | 239,86 | 17,36 | 0,13 |
| 51 | 0,273 | 220,9947 | 239,52 | 18,52 | 0,12 |
| 52 | 0,17 | 221,4232 | 239,5 | 18,08 | 0,12 |
| 53 | 0,017 | 220,1 | 239,28 | 19,18 | 0,11 |
| 54 | 0,09 | 220,1 | 239,28 | 19,18 | 0,1 |
| 55 | 0,203 | 220,1 | 239,14 | 19,04 | 0,1 |
| 56 | 0,2583 | 220,9642 | 239,14 | 18,18 | 0,09 |
| 57 | 0,2 | 220,7147 | 239,13 | 18,42 | 0,08 |
| 58 | 0,1 | 220,1 | 239,13 | 19,03 | 0,07 |
| 59 | 0,583 | 203,3357 | 256,87 | 53,54 | 0,73 |
| 60 | 0,15 | 204,1212 | 256,88 | 52,76 | 0,58 |
| 61 | 0,25 | 198,9319 | 256,88 | 57,95 | 0,77 |
| 62 | 0,23 | 204,163 | 256,88 | 52,72 | 0,91 |
| 63 | 0,28 | 207,6017 | 256,84 | 49,24 | 1 |
| 64 | 0,08 | 208,7227 | 256,79 | 48,07 | 1,15 |
| 65 | 0,1 | 207,0181 | 256,43 | 49,41 | 1,2 |
| 66 | 0,1 | 206,8282 | 255,71 | 48,88 | 1,1 |
| 67 | 0,1 | 205,5986 | 254,73 | 49,14 | 0,92 |
| 68 | 0,07 | 204,4309 | 254,1 | 49,67 | 0,85 |
| 69 | 0 | 206,5618 | 253,6 | 47,04 | 0,78 |
| 70 | 0,4 | 208,4117 | 252,4 | 43,99 | 0,69 |
| 71 | 0,2 | 208,1533 | 251,82 | 43,66 | 0,6 |
| 72 | 0,1 | 209,0391 | 250,25 | 41,21 | 0,55 |
| 73 | 0,11 | 208,5119 | 249,13 | 40,62 | 0,46 |
| 74 | 0,16 | 208,1 | 248,43 | 40,33 | 0,45 |
| 75 | 0,8 | 213,1819 | 247,87 | 34,68 | 0,4 |
| 76 | 0,2 | 216,549 | 247,37 | 30,82 | 0,37 |
| 77 | 0,15 | 220,2191 | 246,31 | 26,09 | 0,36 |
| 78 | 0,05 | 224 | 245,13 | 21,13 | 0,32 |
| 79 | 0,12 | 226,5029 | 244,2 | 17,7 | 0,29 |
| 80 | 0,12 | 226,6727 | 242,35 | 15,68 | 0,27 |
| 81 | 0,19 | 226,6127 | 241,54 | 14,93 | 0,24 |
| 82 | 0,21 | 227,32 | 240,38 | 13,06 | 0,2 |
| 83 | 0,13 | 224,1159 | 239,89 | 15,78 | 0,18 |
| 84 | 0,3 | 222 | 239,48 | 17,48 | 0,14 |
| 85 | 0,9111 | 221 | 239,2 | 18,2 | 0,12 |
| 86 | 0,243 | 220,8055 | 239,14 | 18,34 | 0,11 |
| 87 | 0,125 | 220,0711 | 239,13 | 19,06 | 0,08 |
| 88 | 0,2183 | 197,66 | 257,21 | 59,55 | 0,82 |
| 89 | 0,1145 | 198,804 | 257,21 | 58,4 | 0,66 |
| 90 | 0,2683 | 198,3742 | 257,17 | 58,79 | 0,86 |
| 91 | 0,2533 | 202,8314 | 257,21 | 54,38 | 1,08 |
| 92 | 0,2533 | 207,6339 | 257,4 | 49,77 | 1,21 |
| 93 | 0,2573 | 209,7978 | 257,64 | 47,84 | 1,37 |
| 94 | 0,1583 | 208,725 | 257,34 | 48,61 | 1,34 |
| 95 | 0,2589 | 208,5063 | 256,48 | 47,97 | 1,2 |

| | | | | | |
|-----|--------|----------|--------|-------|------|
| 96 | 0,2586 | 207,2433 | 255,42 | 48,17 | 1,01 |
| 97 | 0,2513 | 205,8391 | 254,65 | 48,81 | 0,95 |
| 98 | 0,213 | 207,3815 | 253,95 | 46,57 | 0,91 |
| 99 | 0,213 | 210,6398 | 252,5 | 41,86 | 0,81 |
| 100 | 0,273 | 210,5347 | 251,98 | 41,44 | 0,75 |
| 101 | 0,583 | 209,9456 | 250,48 | 40,53 | 0,63 |
| 102 | 0,33 | 208,1 | 249,43 | 41,33 | 0,58 |
| 103 | 0,1111 | 208,9885 | 248,66 | 39,67 | 0,52 |
| 104 | 0,2323 | 214,5928 | 248,03 | 33,43 | 0,48 |
| 105 | 0,209 | 217,3029 | 247,39 | 30,09 | 0,44 |
| 106 | 0,1183 | 220,9033 | 246,59 | 25,69 | 0,42 |
| 107 | 0,1113 | 224,4012 | 245,35 | 20,95 | 0,36 |
| 108 | 0,0983 | 228,4581 | 244,25 | 15,79 | 0,33 |
| 109 | 0,0583 | 229,229 | 242,42 | 13,19 | 0,27 |
| 110 | 0,1583 | 228,5396 | 241,49 | 12,95 | 0,22 |
| 111 | 0,2583 | 229,3456 | 240,38 | 11,03 | 0,21 |
| 112 | 0,3383 | 226,8263 | 239,82 | 12,99 | 0,19 |
| 113 | 0,253 | 224,2504 | 239,48 | 15,23 | 0,15 |
| 114 | 0,2 | 222,8 | 239,22 | 16,42 | 0,15 |
| 115 | 0,2 | 221,1893 | 239,15 | 17,96 | 0,14 |
| 116 | 0,15 | 219,1703 | 239,12 | 19,95 | 0,1 |
| 117 | 0,2 | 199,2804 | 257,61 | 58,33 | 0,84 |
| 118 | 0,15 | 202,5748 | 257,61 | 55,03 | 0,78 |
| 119 | 0,1 | 198,9603 | 257,81 | 58,85 | 0,97 |
| 120 | 0,4 | 202,4759 | 257,96 | 55,49 | 1,08 |
| 121 | 0,183 | 207,8633 | 258,28 | 50,42 | 1,23 |
| 122 | 0,2513 | 211,9342 | 259,18 | 47,24 | 1,47 |
| 123 | 0,2183 | 210,7408 | 257,95 | 47,21 | 1,42 |
| 124 | 0,2581 | 210,1748 | 256,76 | 46,58 | 1,27 |
| 125 | 0,7583 | 209,0132 | 256,19 | 47,17 | 1,1 |
| 126 | 0,2783 | 207,3836 | 255,23 | 47,85 | 1,03 |
| 127 | 0,2573 | 209,7777 | 254,3 | 44,53 | 0,98 |
| 128 | 0,2587 | 214,4169 | 252,89 | 38,48 | 0,83 |
| 129 | 0,6583 | 215,2463 | 252,03 | 36,78 | 0,76 |
| 130 | 0,2683 | 211,7014 | 251,37 | 39,66 | 0,67 |
| 131 | 0,2563 | 208,1 | 249,94 | 41,84 | 0,64 |
| 132 | 0,2586 | 211,259 | 248,77 | 37,51 | 0,57 |
| 133 | 0,1583 | 215,524 | 248,17 | 32,65 | 0,49 |
| 134 | 0,2183 | 218,7164 | 247,54 | 28,83 | 0,44 |
| 135 | 0,2513 | 222 | 246,79 | 24,79 | 0,38 |
| 136 | 0,2581 | 225,5183 | 245,51 | 19,99 | 0,37 |
| 137 | 0,1183 | 229,5204 | 244,01 | 14,49 | 0,35 |
| 138 | 0,2113 | 230,1827 | 242,55 | 12,36 | 0,3 |
| 139 | 0,2511 | 230,0122 | 241,42 | 11,41 | 0,26 |
| 140 | 0,2583 | 230,1726 | 240,45 | 10,28 | 0,23 |
| 141 | 0,2283 | 229,9567 | 239,81 | 9,86 | 0,19 |
| 142 | 0,2523 | 226,8015 | 239,46 | 12,66 | 0,18 |
| 143 | 0,2582 | 225,091 | 239,24 | 14,15 | 0,17 |
| 144 | 0,2283 | 223,4 | 239,14 | 15,74 | 0,15 |

| | | | | | |
|-----|--------|----------|--------|-------|------|
| 145 | 0,1225 | 220,8284 | 239,12 | 18,29 | 0,11 |
| 146 | 0,2522 | 201,4214 | 257,91 | 56,48 | 0,92 |
| 147 | 0,3845 | 206,0346 | 257,86 | 51,82 | 0,84 |
| 148 | 0,3583 | 201,7223 | 258,12 | 56,4 | 1,02 |
| 149 | 0,2383 | 203,7515 | 258,87 | 55,12 | 1,18 |
| 150 | 0,2533 | 209,385 | 259,63 | 50,25 | 1,36 |
| 151 | 0,2583 | 215,7129 | 260,03 | 44,32 | 1,53 |
| 152 | 0,3383 | 213,3759 | 259,2 | 45,83 | 1,53 |
| 153 | 0,2333 | 212,4626 | 257,92 | 45,46 | 1,39 |
| 154 | 0,2533 | 210,4518 | 257,05 | 46,59 | 1,24 |
| 155 | 0,1583 | 208,7042 | 256,1 | 47,4 | 1,1 |
| 156 | 0,2283 | 211,3047 | 254,88 | 43,57 | 1,01 |
| 157 | 0,2533 | 219,7467 | 253,45 | 33,7 | 0,94 |
| 158 | 0,2584 | 221,0157 | 252,45 | 31,43 | 0,87 |
| 159 | 0,1583 | 213,6165 | 251,66 | 38,05 | 0,77 |
| 160 | 0,2683 | 211,0598 | 250,62 | 39,56 | 0,74 |
| 161 | 0,2573 | 213,1401 | 249,05 | 35,91 | 0,64 |
| 162 | 0,2588 | 216,4442 | 248,52 | 32,07 | 0,59 |
| 163 | 0,2993 | 220,16 | 247,66 | 27,5 | 0,55 |
| 164 | 0,2599 | 223 | 246,79 | 23,79 | 0,51 |
| 165 | 0,2589 | 226,5796 | 245,61 | 19,03 | 0,47 |
| 166 | 0,2983 | 230,6615 | 243,89 | 13,22 | 0,37 |
| 167 | 0,2593 | 231,235 | 242,7 | 11,46 | 0,3 |
| 168 | 0,2544 | 231,4394 | 241,45 | 10,01 | 0,3 |
| 169 | 0,4583 | 231,7088 | 240,39 | 8,68 | 0,26 |
| 170 | 0,2483 | 231,8322 | 239,81 | 7,98 | 0,24 |
| 171 | 0,2543 | 230,7079 | 239,5 | 8,79 | 0,2 |
| 172 | 0,2584 | 228,193 | 239,25 | 11,05 | 0,19 |
| 173 | 0,4483 | 225,532 | 239,13 | 13,6 | 0,16 |
| 174 | 0,1445 | 223,2 | 239,11 | 15,91 | 0,12 |
| 175 | 0,2546 | 203,3522 | 258,4 | 55,05 | 1,06 |
| 176 | 0,1845 | 206,1254 | 258,32 | 52,19 | 0,93 |
| 177 | 0,2583 | 205,783 | 258,58 | 52,8 | 1,11 |
| 178 | 0,2333 | 207,335 | 259,47 | 52,13 | 1,25 |
| 179 | 0,3333 | 212,5199 | 259,93 | 47,41 | 1,4 |
| 180 | 0,2222 | 221,1 | 260,85 | 39,75 | 1,72 |
| 181 | 0,1111 | 215,7467 | 259,79 | 44,05 | 1,61 |
| 182 | 0,1122 | 214,2873 | 258,89 | 44,6 | 1,39 |
| 183 | 0,2211 | 211,7221 | 257,64 | 45,92 | 1,24 |
| 184 | 0,1133 | 208,8014 | 256,37 | 47,57 | 1,2 |
| 185 | 0,3311 | 212,4137 | 255,56 | 43,15 | 1,16 |
| 186 | 0,1313 | 222,6137 | 253,84 | 31,23 | 1,05 |
| 187 | 0,3131 | 225,986 | 253,02 | 27,03 | 1 |
| 188 | 0,1465 | 215,1028 | 251,67 | 36,56 | 0,91 |
| 189 | 0,1583 | 212,2519 | 251,06 | 38,81 | 0,85 |
| 190 | 0,3213 | 215,3529 | 249,45 | 34,09 | 0,73 |
| 191 | 0,1283 | 217,7576 | 249,06 | 31,3 | 0,65 |
| 192 | 0,2983 | 221,6905 | 247,73 | 26,04 | 0,65 |
| 193 | 0,2999 | 224 | 246,85 | 22,85 | 0,61 |

| | | | | | |
|-----|--------|----------|--------|-------|------|
| 194 | 0,1111 | 227,4311 | 245,62 | 18,19 | 0,6 |
| 195 | 0,11 | 231,1189 | 243,96 | 12,84 | 0,48 |
| 196 | 0,2583 | 232,0264 | 242,71 | 10,68 | 0,39 |
| 197 | 0,2583 | 232,4719 | 241,5 | 9,02 | 0,37 |
| 198 | 0,2583 | 232,7913 | 240,39 | 7,6 | 0,35 |
| 199 | 0,0183 | 233,8037 | 239,84 | 6,04 | 0,29 |
| 200 | 0,0183 | 233,1 | 239,51 | 6,41 | 0,25 |
| 201 | 0,1183 | 231,01 | 239,24 | 8,23 | 0,24 |
| 202 | 0,1183 | 227,9443 | 239,14 | 11,2 | 0,21 |
| 203 | 0,1845 | 225,4381 | 239,11 | 13,67 | 0,16 |
| 204 | 0,1883 | 208,5089 | 258,82 | 50,31 | 1,14 |
| 205 | 0,1845 | 206,222 | 258,55 | 52,33 | 0,98 |
| 206 | 0,1583 | 208,1243 | 259,26 | 51,14 | 1,21 |
| 207 | 0,2183 | 211,1685 | 259,9 | 48,73 | 1,35 |
| 208 | 0,2513 | 218,4755 | 260,41 | 41,93 | 1,5 |
| 209 | 0,2581 | 224 | 261,4 | 37,4 | 1,79 |
| 210 | 0 | 217,9531 | 260,7 | 42,75 | 1,62 |
| 211 | 0,1183 | 216,0048 | 259,36 | 43,35 | 1,49 |
| 212 | 0,1483 | 213,2592 | 257,77 | 44,51 | 1,34 |
| 213 | 0,1783 | 212,5401 | 256,69 | 44,15 | 1,29 |
| 214 | 0,113 | 217,118 | 256,13 | 39,01 | 1,21 |
| 215 | 0,1113 | 222,7878 | 254,78 | 31,99 | 1,17 |
| 216 | 0,1233 | 221,6972 | 253,57 | 31,87 | 1,08 |
| 217 | 0,1893 | 215,4343 | 252,54 | 37,1 | 0,97 |
| 218 | 0,1983 | 212,7536 | 251,44 | 38,69 | 0,93 |
| 219 | 0,2223 | 215,6752 | 249,76 | 34,08 | 0,8 |
| 220 | 0,2283 | 219,2551 | 249,2 | 29,95 | 0,74 |
| 221 | 0 | 222,7 | 248,03 | 25,33 | 0,68 |
| 222 | 0 | 224,7437 | 247,07 | 22,33 | 0,65 |
| 223 | 0 | 228,1603 | 245,61 | 17,45 | 0,59 |
| 224 | 0 | 231,2464 | 244,27 | 13,02 | 0,54 |
| 225 | 0 | 232,5115 | 242,72 | 10,21 | 0,5 |
| 226 | 0,1583 | 233,8076 | 241,49 | 7,69 | 0,43 |
| 227 | 0,1583 | 233,1 | 240,38 | 7,28 | 0,4 |
| 228 | 0,1583 | 233,967 | 239,84 | 5,88 | 0,37 |
| 229 | 0,1583 | 233,1 | 239,51 | 6,41 | 0,34 |
| 230 | 0,1583 | 233,2617 | 239,25 | 5,99 | 0,3 |
| 231 | 0,1583 | 230,1677 | 239,13 | 8,96 | 0,24 |
| 232 | 0,1845 | 226,6541 | 239,1 | 12,45 | 0,19 |
| 233 | 0,2583 | 213,1144 | 258,93 | 45,81 | 1,22 |
| 234 | 0,1845 | 207,5389 | 258,87 | 51,33 | 1,08 |
| 235 | 0,2583 | 212,9671 | 259,54 | 46,57 | 1,37 |
| 236 | 0,2583 | 216,0005 | 260,34 | 44,34 | 1,5 |
| 237 | 0,2583 | 226,3123 | 260,97 | 34,66 | 1,57 |
| 238 | 0,2583 | 227,7785 | 262,17 | 34,4 | 1,86 |
| 239 | 0,2583 | 221,9705 | 261,61 | 39,64 | 1,73 |
| 240 | 0,2583 | 218,4392 | 259,55 | 41,11 | 1,71 |
| 241 | 0,3333 | 215,1815 | 258,54 | 43,35 | 1,65 |
| 242 | 0,3333 | 215,2832 | 257,37 | 42,09 | 1,62 |

| | | | | | |
|-----|--------|----------|--------|-------|------|
| 243 | 0,2333 | 226,0413 | 255,83 | 29,79 | 1,39 |
| 244 | 0,2333 | 220,5658 | 255,17 | 34,6 | 1,24 |
| 245 | 0,2333 | 217,6758 | 254,29 | 36,61 | 1,2 |
| 246 | 0,2443 | 214,6283 | 252,93 | 38,3 | 1,15 |
| 247 | 0,2483 | 213,1514 | 251,67 | 38,52 | 0,98 |
| 248 | 0,243 | 216,7827 | 250,03 | 33,24 | 0,91 |
| 249 | 0,2583 | 220,4166 | 249,15 | 28,73 | 0,87 |
| 250 | 0,2583 | 224,0058 | 248,14 | 24,14 | 0,75 |
| 251 | 0,2543 | 226,5121 | 247,13 | 20,62 | 0,73 |
| 252 | 0,2583 | 229,8294 | 245,62 | 15,79 | 0,71 |
| 253 | 0,2543 | 233,8074 | 244,32 | 10,51 | 0,62 |
| 254 | 0,2533 | 233,6136 | 242,75 | 9,13 | 0,57 |
| 255 | 0,2533 | 232,9137 | 241,3 | 8,39 | 0,44 |
| 256 | 0,2513 | 232,3304 | 240,38 | 8,05 | 0,39 |
| 257 | 0,183 | 231,5774 | 239,85 | 8,27 | 0,37 |
| 258 | 0,6583 | 232,9013 | 239,51 | 6,6 | 0,3 |
| 259 | 0,6583 | 233,1 | 239,15 | 6,05 | 0,27 |
| 260 | 0,9 | 231,5202 | 239,08 | 7,56 | 0,23 |
| 261 | 0,1845 | 226,5102 | 239,09 | 12,57 | 0,18 |
| 262 | 0,203 | 215,7985 | 259,04 | 43,24 | 1,18 |
| 263 | 0,1292 | 210,5366 | 258,95 | 48,42 | 1,16 |
| 264 | 0,203 | 217,6111 | 259,58 | 41,97 | 1,33 |
| 265 | 0,203 | 221,9266 | 260,34 | 38,41 | 1,64 |
| 266 | 0,203 | 234,3037 | 261,18 | 26,87 | 1,74 |
| 267 | 0,3337 | 235,6695 | 262,68 | 27,01 | 1,94 |
| 268 | 0,203 | 230,3065 | 261,78 | 31,47 | 1,86 |
| 269 | 0,103 | 221,6829 | 260,73 | 39,05 | 1,74 |
| 270 | 0,103 | 218,1657 | 258,62 | 40,45 | 1,65 |
| 271 | 0,103 | 217,673 | 257,44 | 39,76 | 1,57 |
| 272 | 0,1 | 221,7292 | 256,12 | 34,39 | 1,45 |
| 273 | 0,1 | 219,1923 | 255,35 | 36,16 | 1,38 |
| 274 | 0,1 | 216,4896 | 254,68 | 38,19 | 1,28 |
| 275 | 0,2 | 213,9346 | 253,13 | 39,2 | 1,22 |
| 276 | 0,2 | 213,3631 | 251,57 | 38,21 | 1,15 |
| 277 | 0,2 | 217,6008 | 250,43 | 32,83 | 1,1 |
| 278 | 0,2 | 221,5656 | 249,14 | 27,57 | 0,99 |
| 279 | 0,23 | 225,1874 | 248,18 | 23 | 0,97 |
| 280 | 0,23 | 228,3747 | 247,22 | 18,85 | 0,82 |
| 281 | 0,23 | 233,1 | 245,75 | 12,65 | 0,71 |
| 282 | 0,23 | 232,3184 | 244,32 | 12 | 0,57 |
| 283 | 0,33 | 231,0125 | 242,75 | 11,73 | 0,52 |
| 284 | 0,33 | 229,5205 | 241,12 | 11,6 | 0,47 |
| 285 | 0,33 | 228,0908 | 240,43 | 12,34 | 0,42 |
| 286 | 0 | 228,8811 | 239,86 | 10,98 | 0,38 |
| 287 | 0,203 | 231,9638 | 239,52 | 7,55 | 0,35 |
| 288 | 0,203 | 233,1 | 239,15 | 6,05 | 0,32 |
| 289 | 0 | 230,5422 | 239,11 | 8,57 | 0,28 |
| 290 | 0,1292 | 225,1861 | 239,09 | 13,9 | 0,23 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

**APÊNDICE N – Arquivo “.inp” referente ao gabarito da rede Porto (2006)
Ramificada**

```

[TITLE]
Rede Porto Ramificada

[JUNCTIONS]
;ID      Elev      Demand      Pattern
2        100      0.74
3        113      2.04
4        109      0.56
5        102.5    2.3
6        105      0.56
7        100      0.45
8        95       1.67
9        95       0.37
10       85       0.74

[RESERVOIRS]
;ID      Head      Pattern
1        131.55

[TANKS]
;ID      Elevation  InitLevel  MinLevel  MaxLevel  Diameter  MinVol  VolCurve

[PIPES]
;ID      Node1      Node2      Length  Diameter  Roughness  MinorLoss  Status
5        1         2         400     125       148        0          Open ;
4        2         3         200     125       132        0          Open ;
3        3         5         200     125       141        0          Open ;
2        5         8         150     100       100        0          Open ;
1        8         10        200     60        112        0          Open ;
4-1     3         4         150     50        125        0          Open ;
3-1     5         6         150     50        138        0          Open ;
3-2     5         7         120     50        142        0          Open ;
2-1     8         9         100     50        98         0          Open ;

[PUMPS]
;ID      Node1      Node2      Parameters

[VALVES]
;ID      Node1      Node2      Diameter  Type  Setting  MinorLoss

[TAGS]

[DEMANDS]
;Junction  Demand      Pattern      Category

[STATUS]
;ID      Status/Setting

[PATTERNS]
;ID      Multipliers

[CURVES]
;ID      X-Value      Y-Value

[CONTROLS]

[RULES]

[ENERGY]

```

Rede Porto Ramificada

```

Global Efficiency 75
Global Price      0
Demand Charge    0

[EMITTERS]
;Junction          Coefficient

[QUALITY]
;Node              InitQual
1                  2

[SOURCES]
;Node              Type          Quality    Pattern

[REACTIONS]
;Type              Pipe/Tank     Coefficient
Wall               5              -0.55
Wall               4              -0.4
Wall               3              -0.31
Wall               2              -0.44
Wall               1              -0.33
Wall               4-1          -0.6
Wall               3-1          -0.53
Wall               3-2          -0.51
Wall               2-1          -0.48

[REACTIONS]
Order Bulk         1
Order Tank         1
Order Wall         1
Global Bulk        0
Global Wall        0
Limiting Potential 0
Roughness Correlation 0

[MIXING]
;Tank              Model

[TIMES]
Duration           24:00
Hydraulic Timestep 1:00
Quality Timestep   0:05
Pattern Timestep   1:00
Pattern Start      0:00
Report Timestep    1:00
Report Start       0:00
Start ClockTime    0:00
Statistic          None

[REPORT]
Status             No
Summary            No
Page               0

[OPTIONS]
Units              LPS
Headloss           H-W
Specific Gravity    1
    
```

Rede Porto Ramificada

```

Viscosity          1
Trials             40
Accuracy           0.001
CHECKFREQ         2
MAXCHECK          10
DAMPLIMIT         0
Unbalanced        Continue 10
Pattern           1
Demand Multiplier 1.0
Emitter Exponent  0.5
Quality           Chemical mg/L
Diffusivity       1
Tolerance         0.01

```

[COORDINATES]

```

;Node      X-Coord      Y-Coord
2          -2444.44     7981.48
3          -611.11     7981.48
4          -1425.93     6814.81
5          1092.59      7981.48
6          1092.59      8981.48
7          1092.59      6833.33
8          2518.52      7981.48
9          3333.33      8907.41
10         4629.63      7981.48
1         -4814.81      9222.22

```

[VERTICES]

```

;Link      X-Coord      Y-Coord

```

[LABELS]

```

;X-Coord      Y-Coord      Label & Anchor Node

```

[BACKDROP]

```

DIMENSIONS      0.00          0.00          10000.00          10000.00
UNITS           None
FILE
OFFSET         0.00          0.00

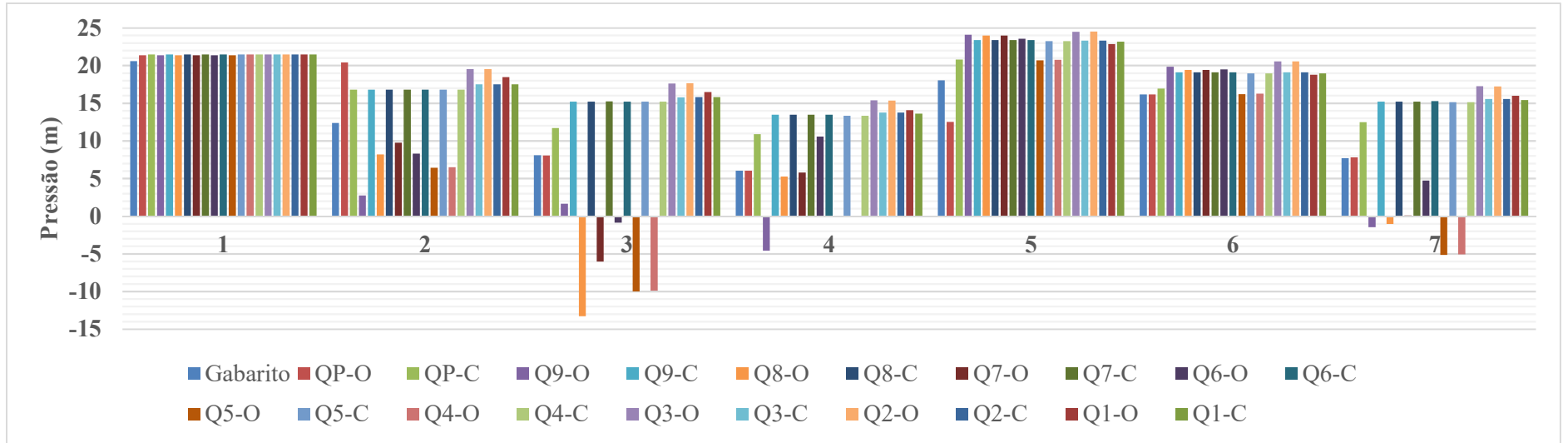
```

```

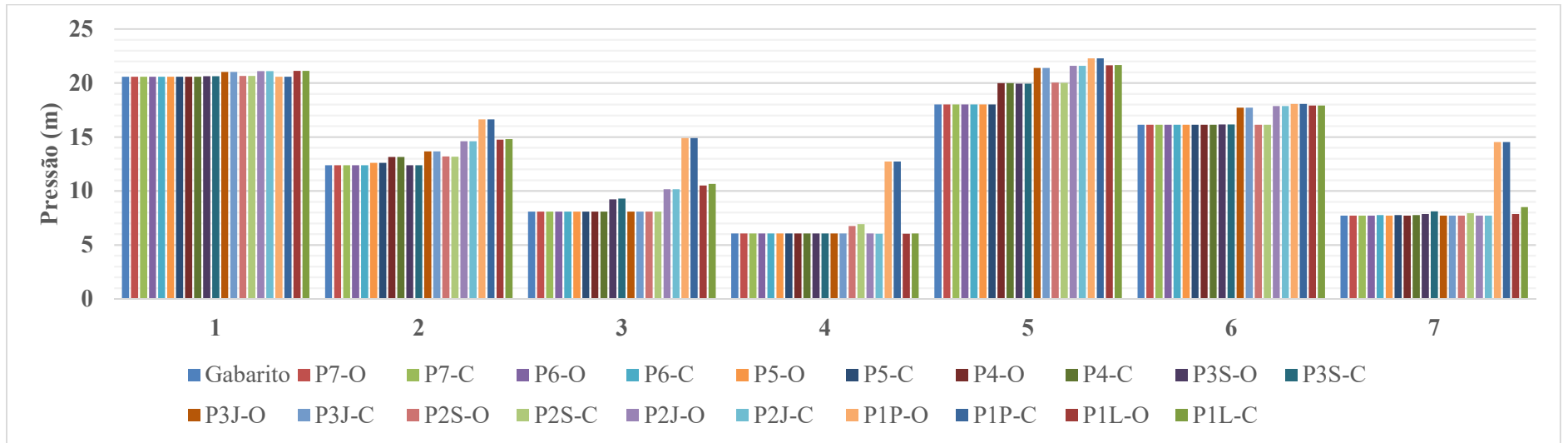
[END]

```

**APÊNDICE O – Pressões encontradas na Calibração do C de Hazen-Williams com C
inicial de 150 m^{0,367}/s: rede Porto (2006)**

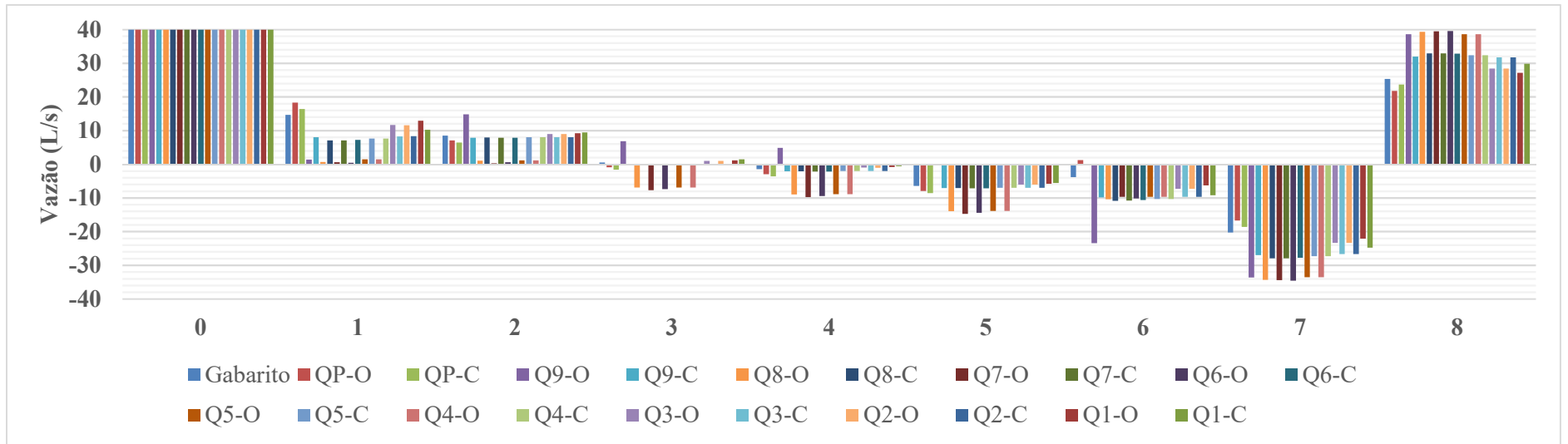


Fonte: Elaborado pelo autor

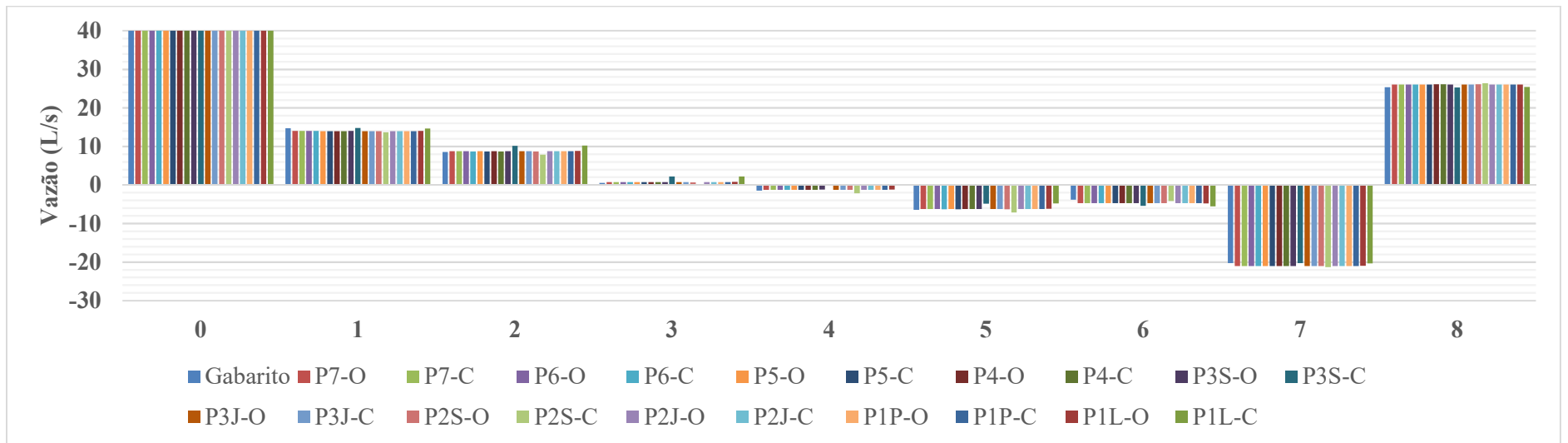


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE P – Vazões encontradas na Calibração do C de Hazen-Williams com C inicial de $150 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$: rede Porto (2006)

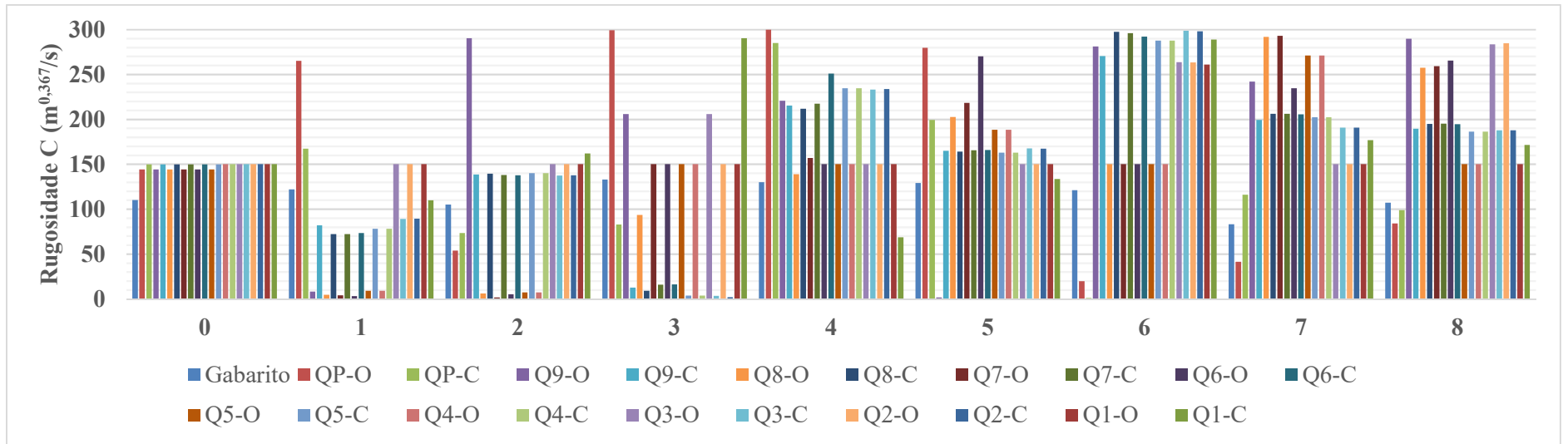


Fonte: Elaborado pelo autor

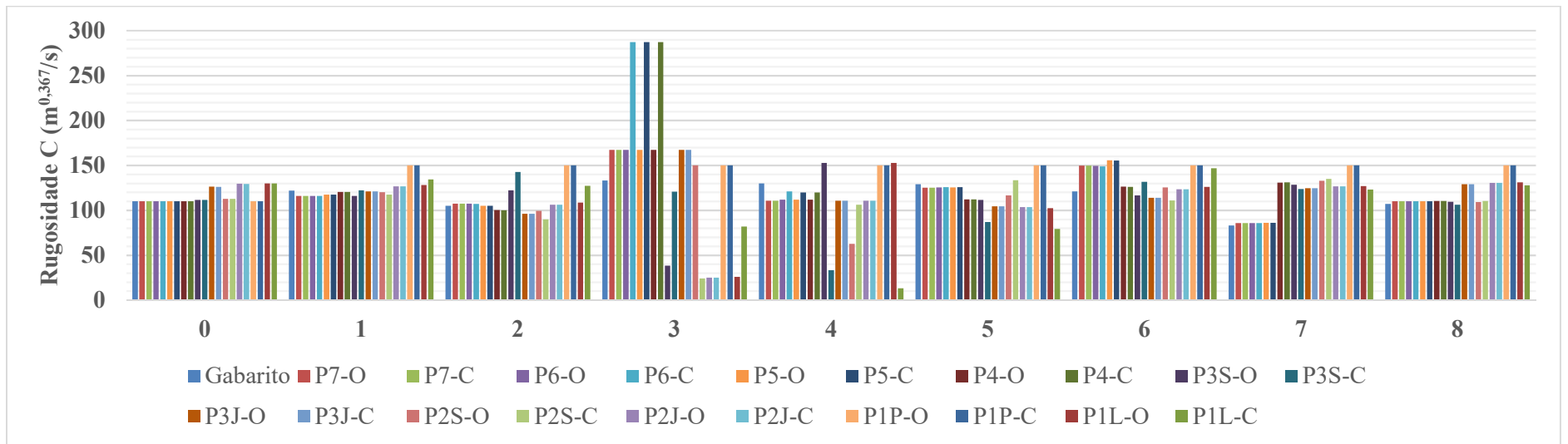


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE Q – Coeficientes de rugosidade encontrados na Calibração do C de Hazen-Williams com C inicial de $150 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$: rede Porto (2006)

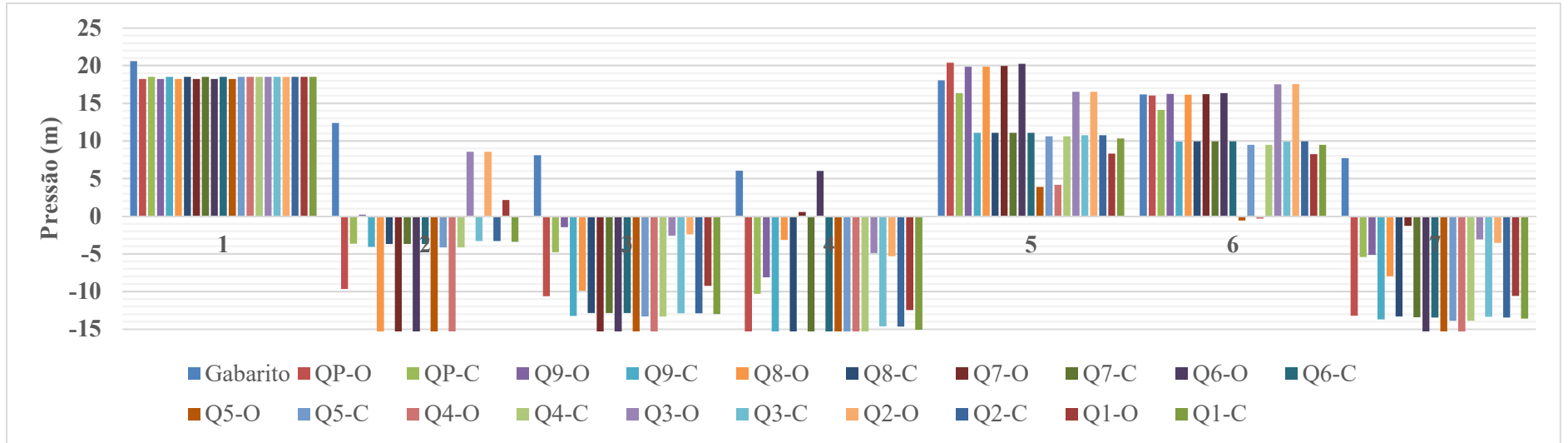


Fonte: Elaborado pelo autor

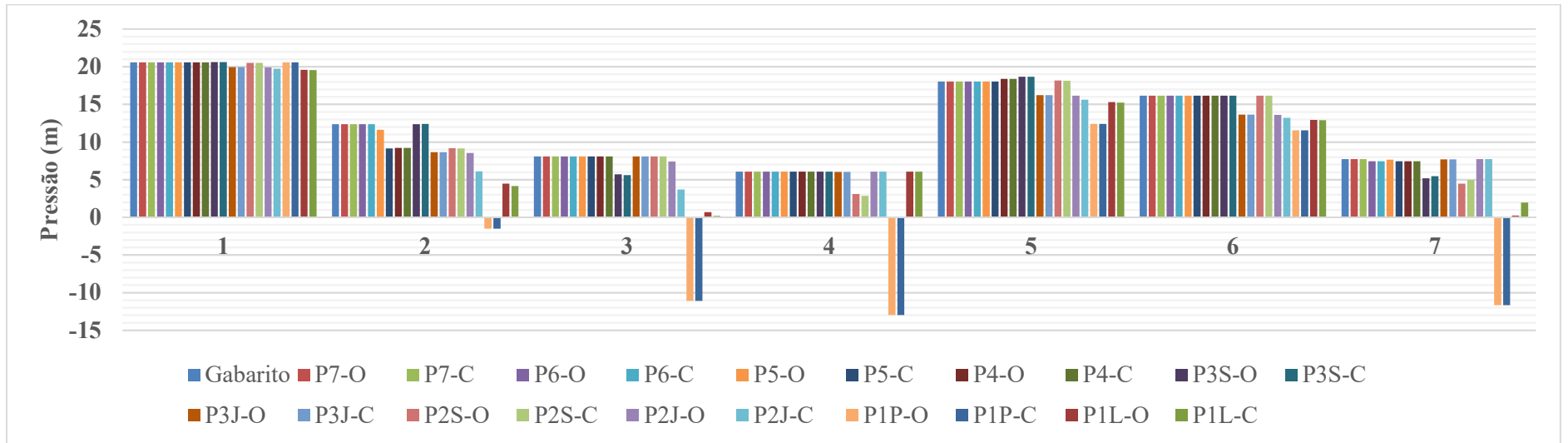


Fonte: Elaborado pelo autor

**APÊNDICE R – Pressões encontradas na Calibração do C de Hazen-Williams com C
inicial de $75 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$: rede Porto (2006)**

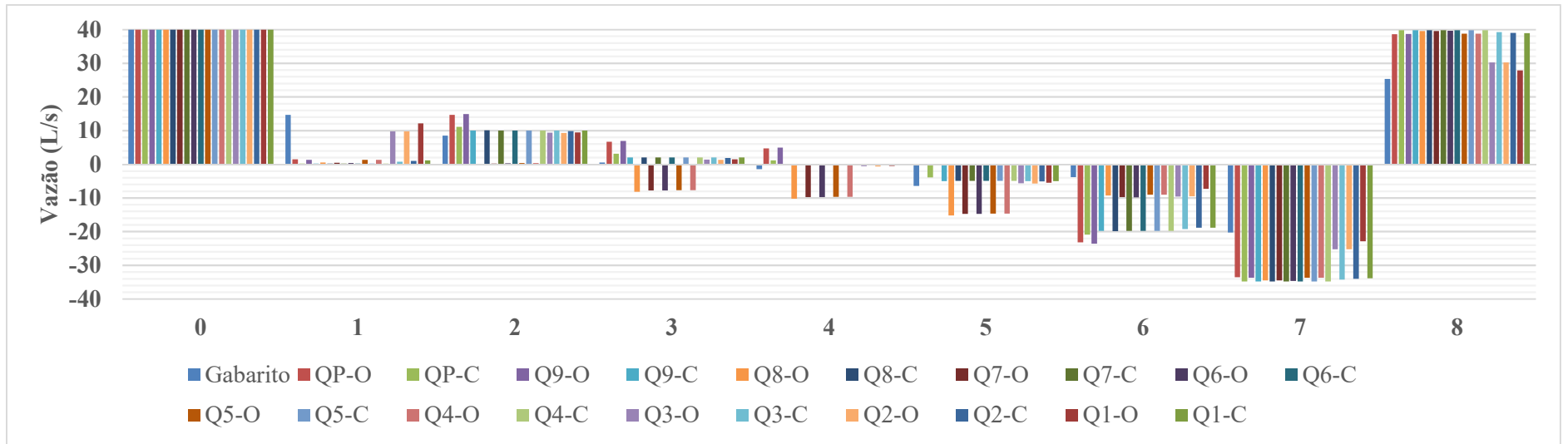


Fonte: Elaborado pelo autor

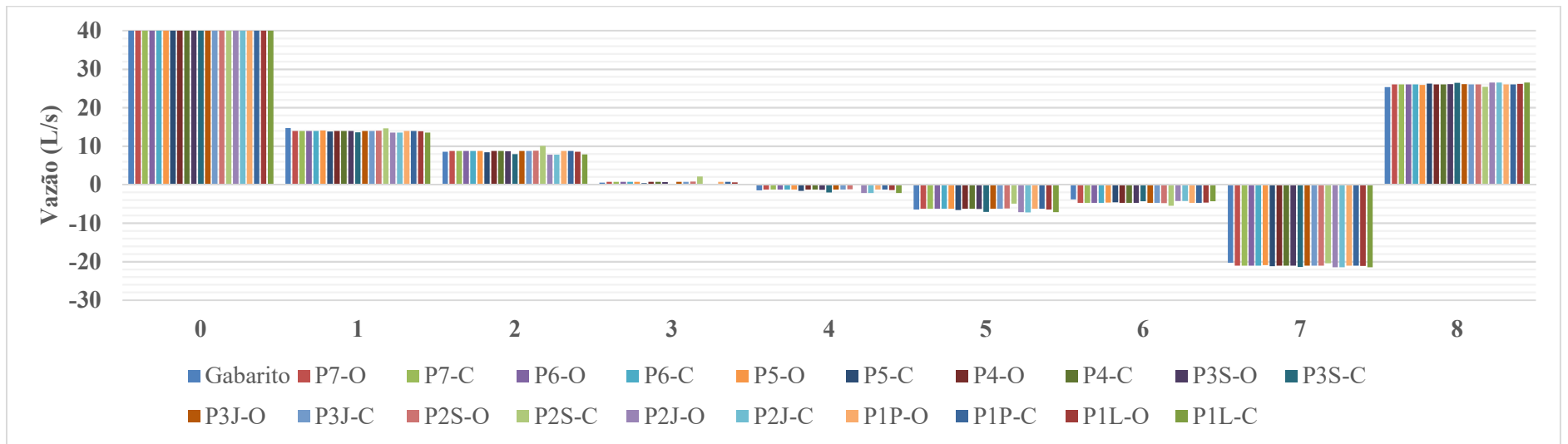


Fonte: Elaborado pelo autor

**APÊNDICE S – Vazões encontradas na Calibração do C de Hazen-Williams com C
inicial de $75 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$: rede Porto (2006)**

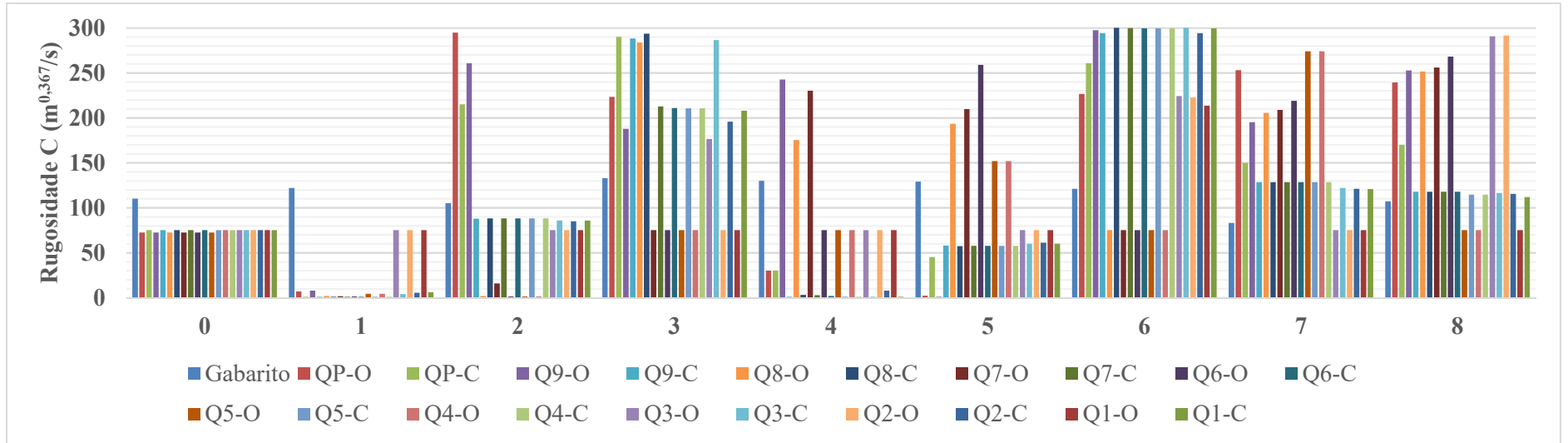


Fonte: Elaborado pelo autor

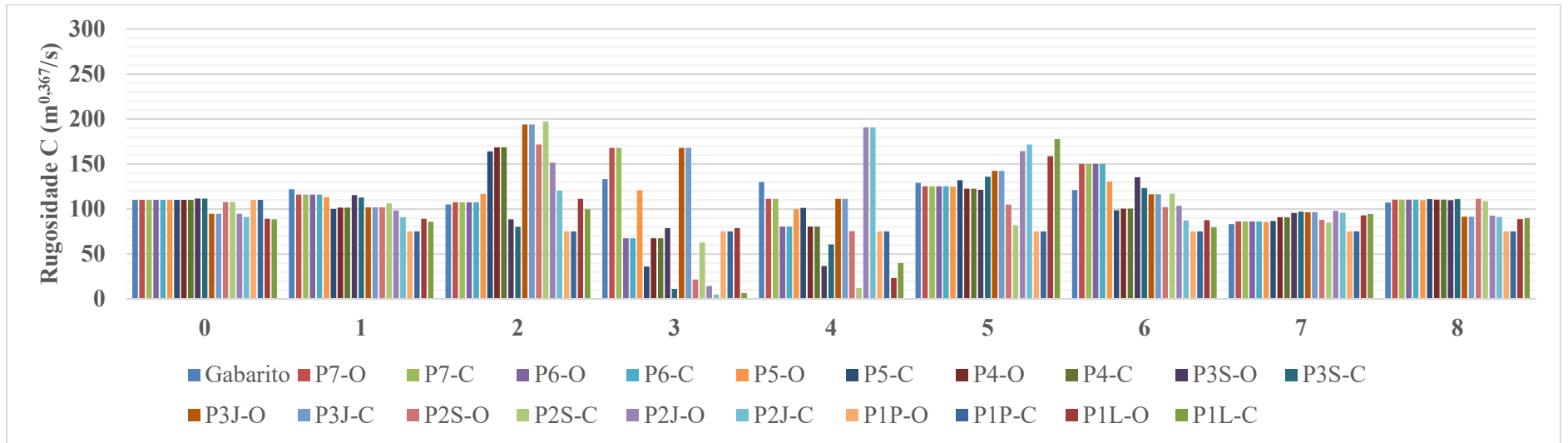


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE T – Coeficientes de rugosidade encontrados na Calibração do C de Hazen-Williams com C inicial de $75 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$: rede Porto (2006)

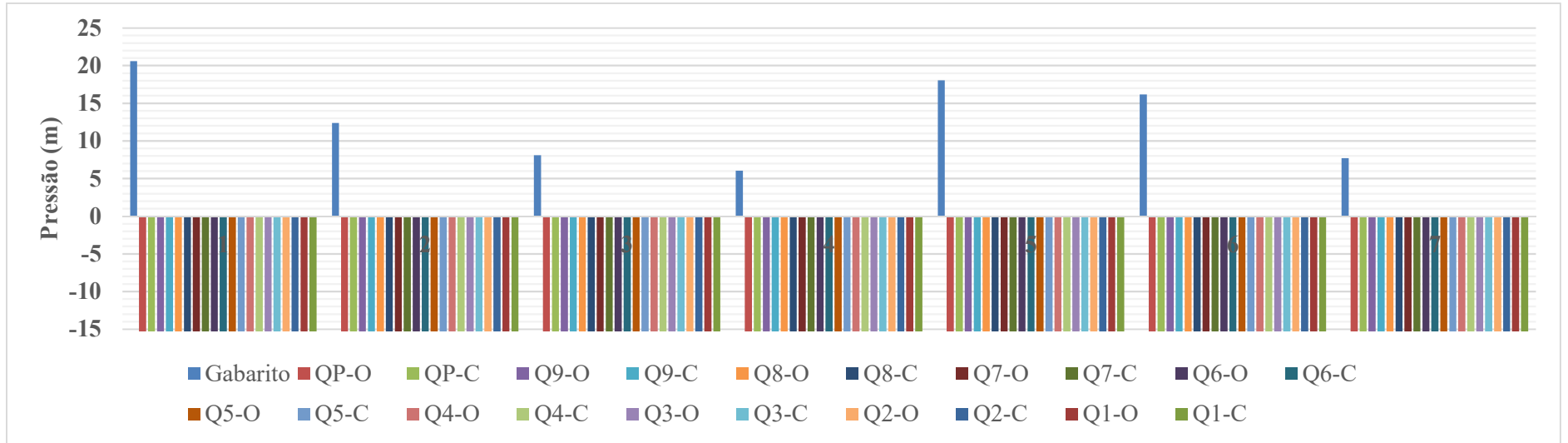


Fonte: Elaborado pelo autor

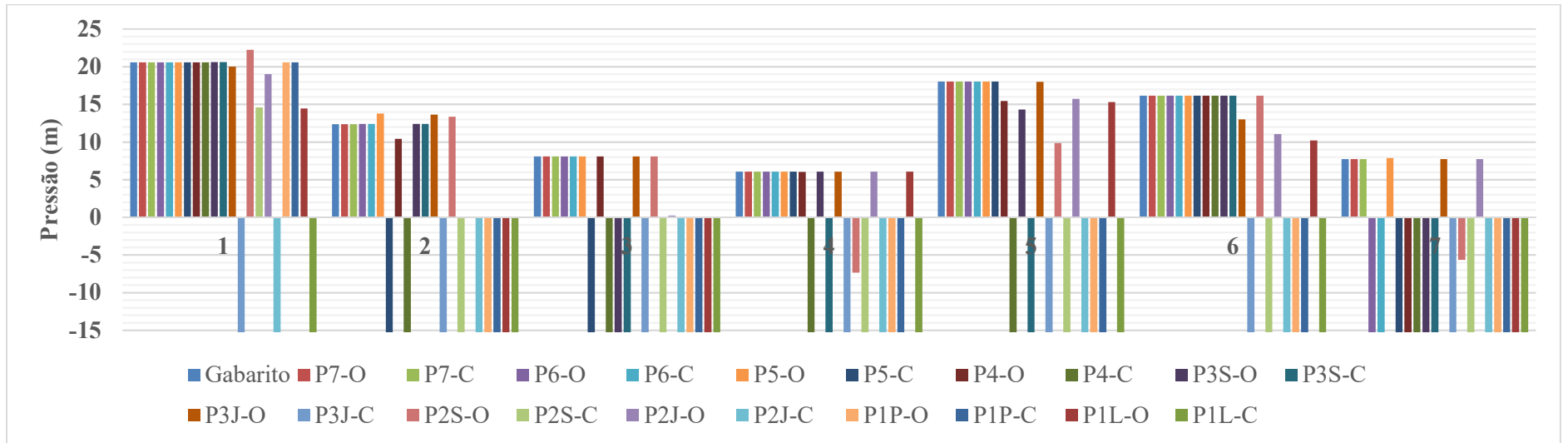


Fonte: Elaborado pelo autor

**APÊNDICE U – Pressões encontradas na Calibração do C de Hazen-Williams com C
inicial de $5 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$: rede Porto (2006)**

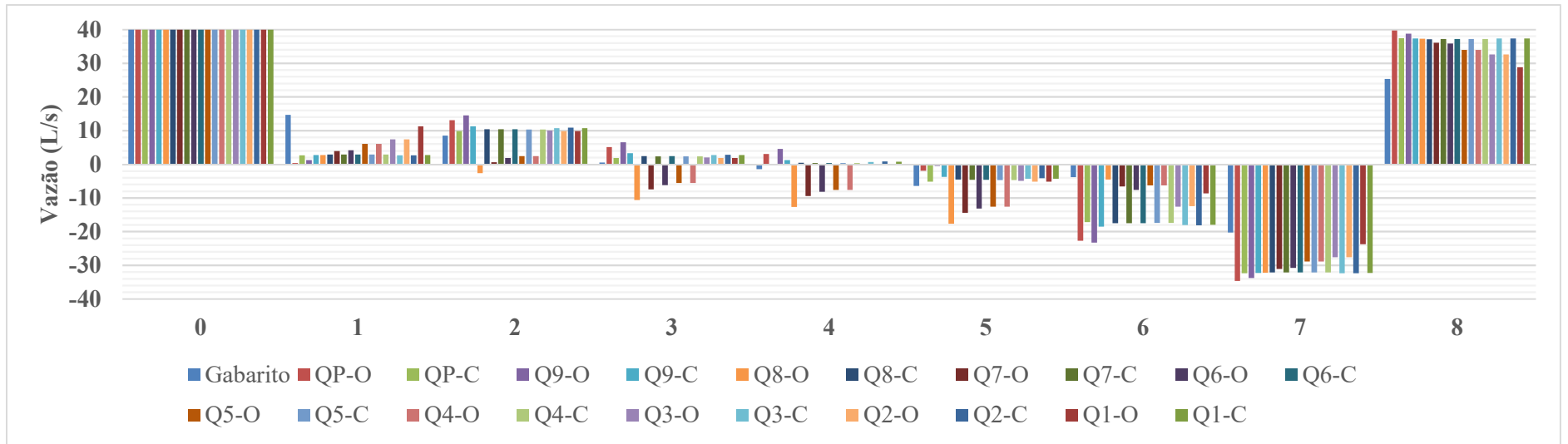


Fonte: Elaborado pelo autor

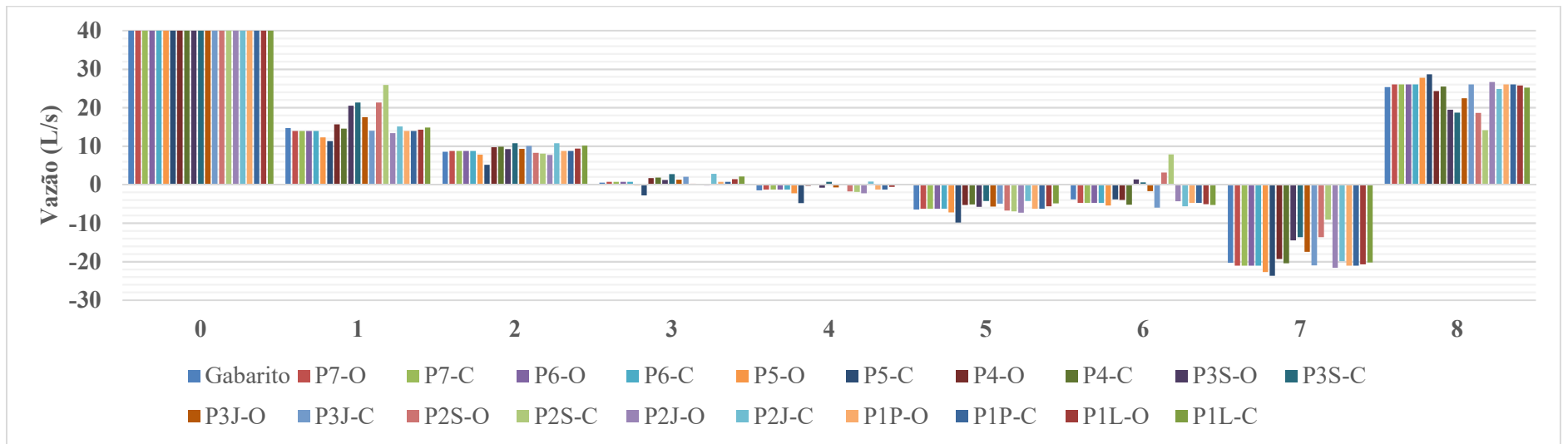


Fonte: Elaborado pelo autor

**APÊNDICE V – Vazões encontradas na Calibração do C de Hazen-Williams com C
inicial de $5 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$: rede Porto (2006)**

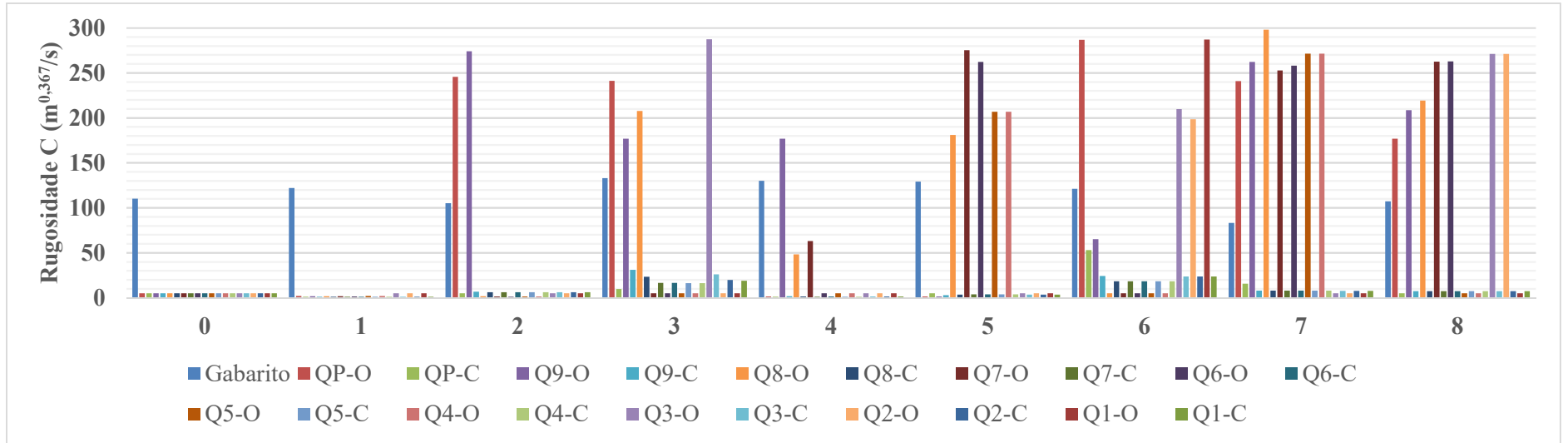


Fonte: Elaborado pelo autor

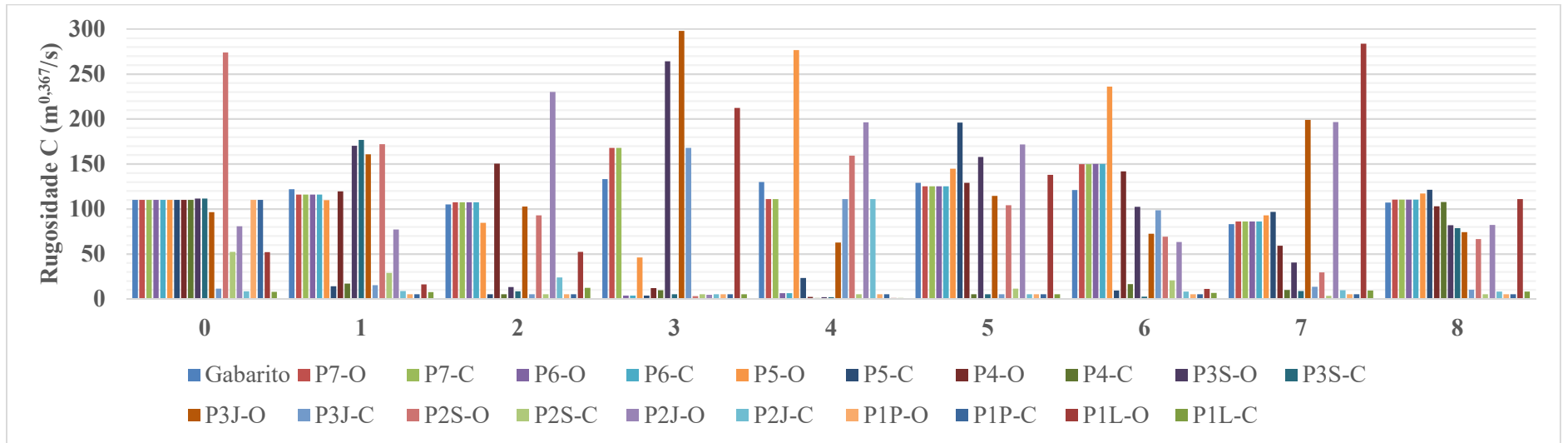


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE W – Coeficientes de rugosidade encontrados na Calibração do C de Hazen-Williams com C inicial de $5 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$: rede Porto (2006)

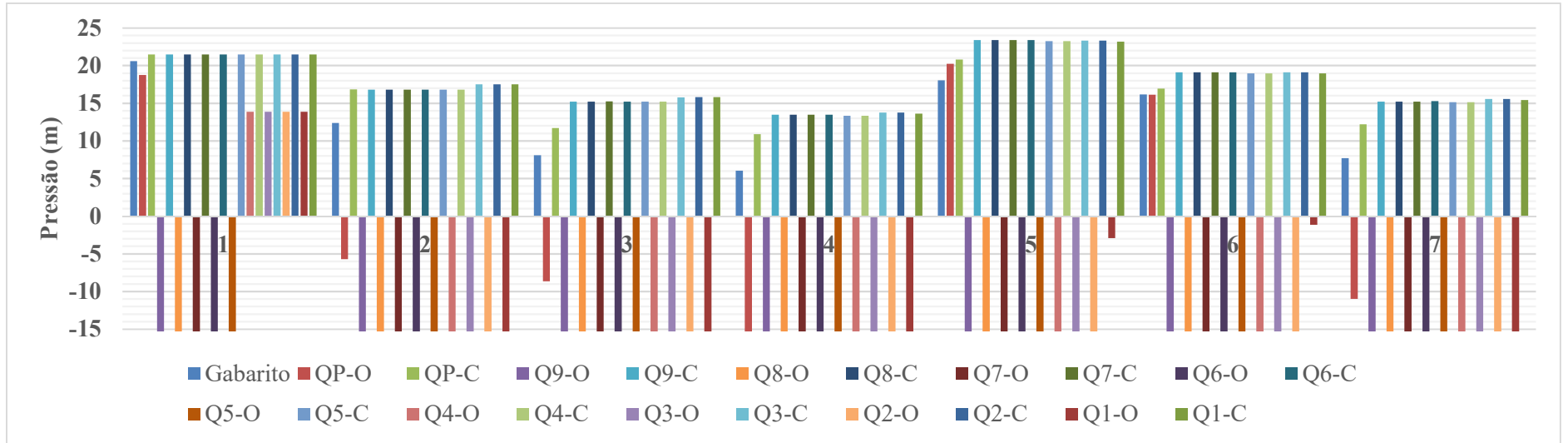


Fonte: Elaborado pelo autor

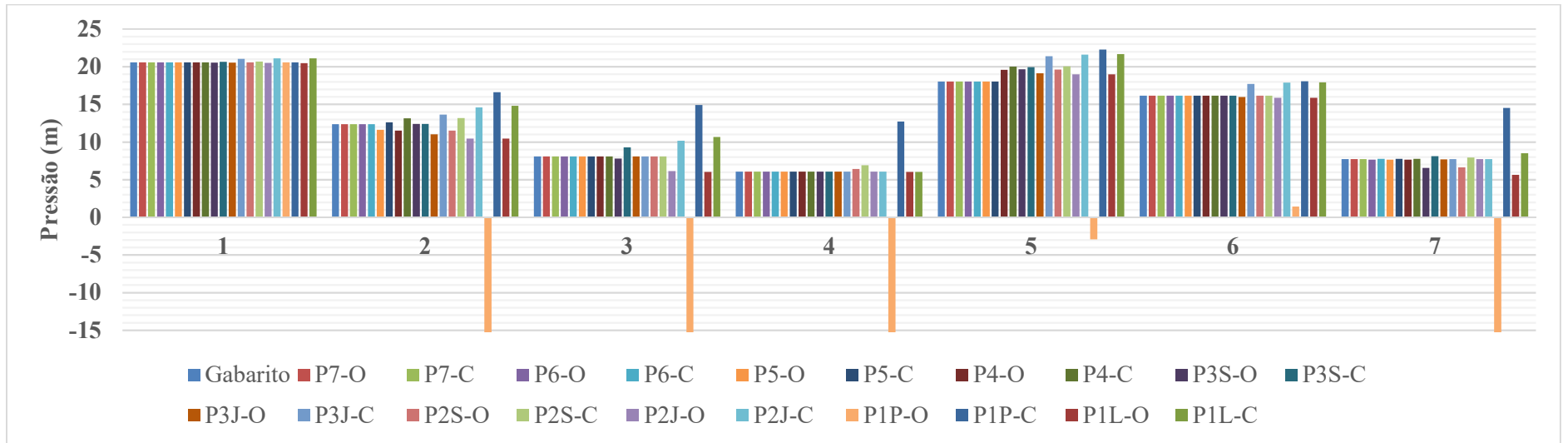


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE X – Pressões encontradas na Calibração do C de Hazen-Williams com C inicial calculado com uso da sub-rotina computacional: rede Porto (2006)

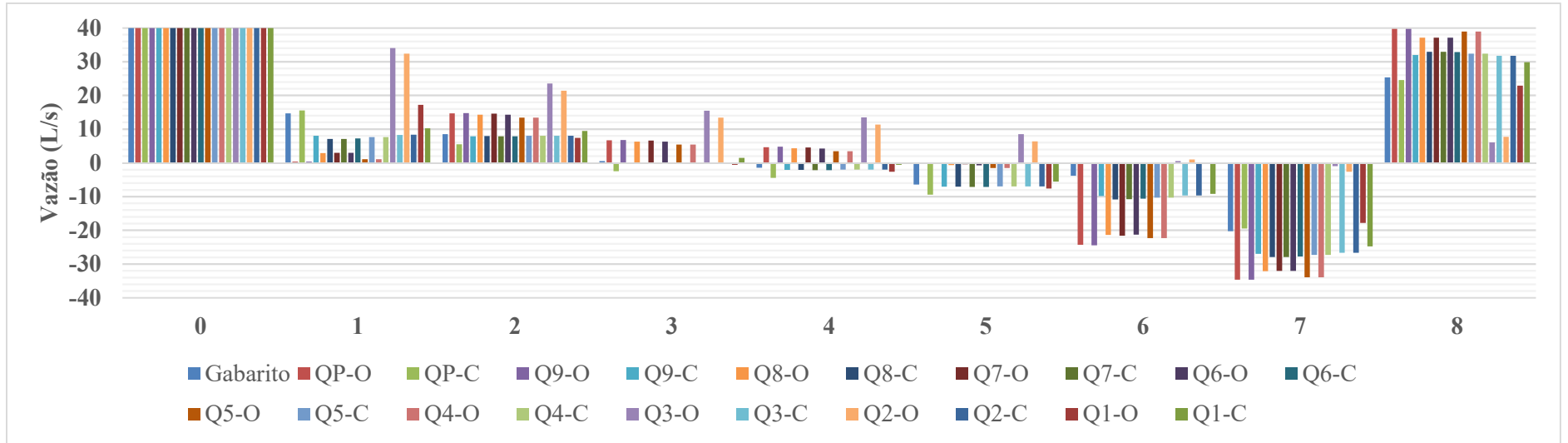


Fonte: Elaborado pelo autor

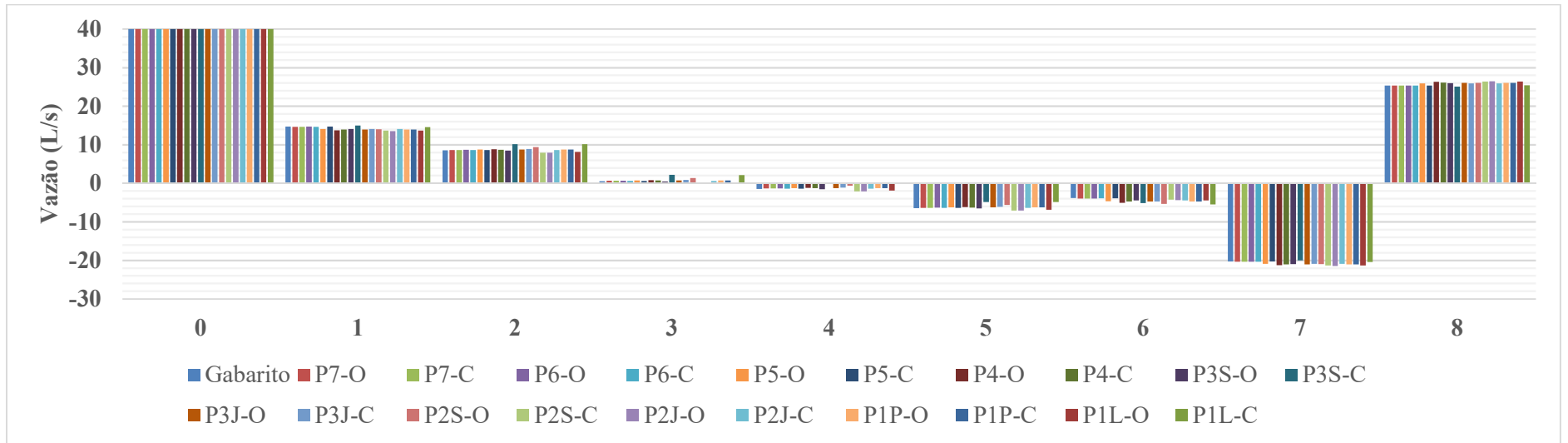


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE Y – Vazões encontradas na Calibração do C de Hazen-Williams com C inicial calculado com uso da sub-rotina computacional: rede Porto (2006)

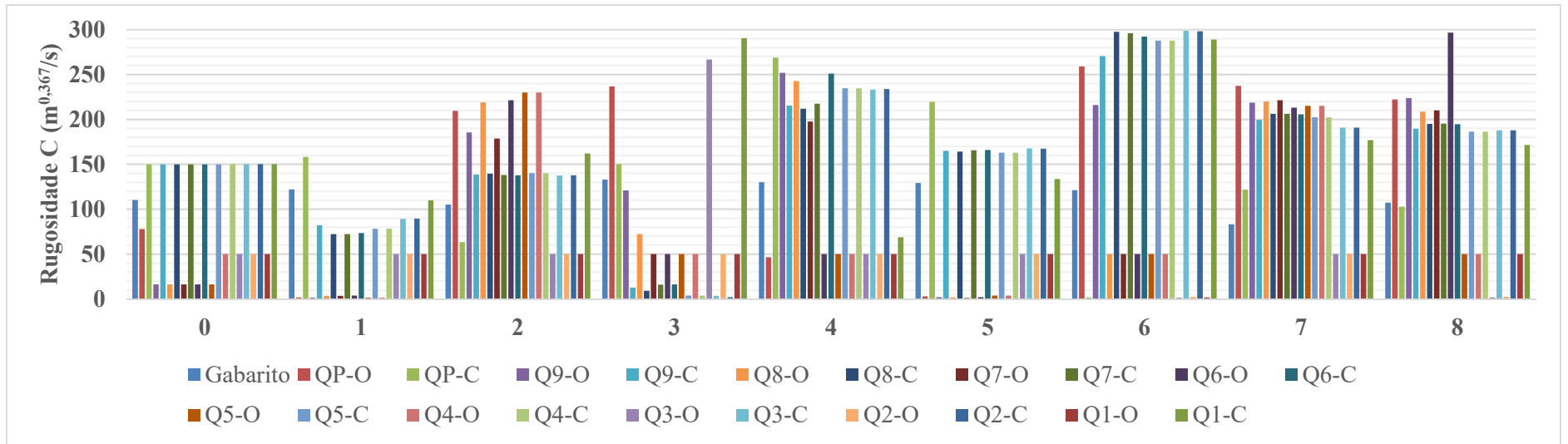


Fonte: Elaborado pelo autor

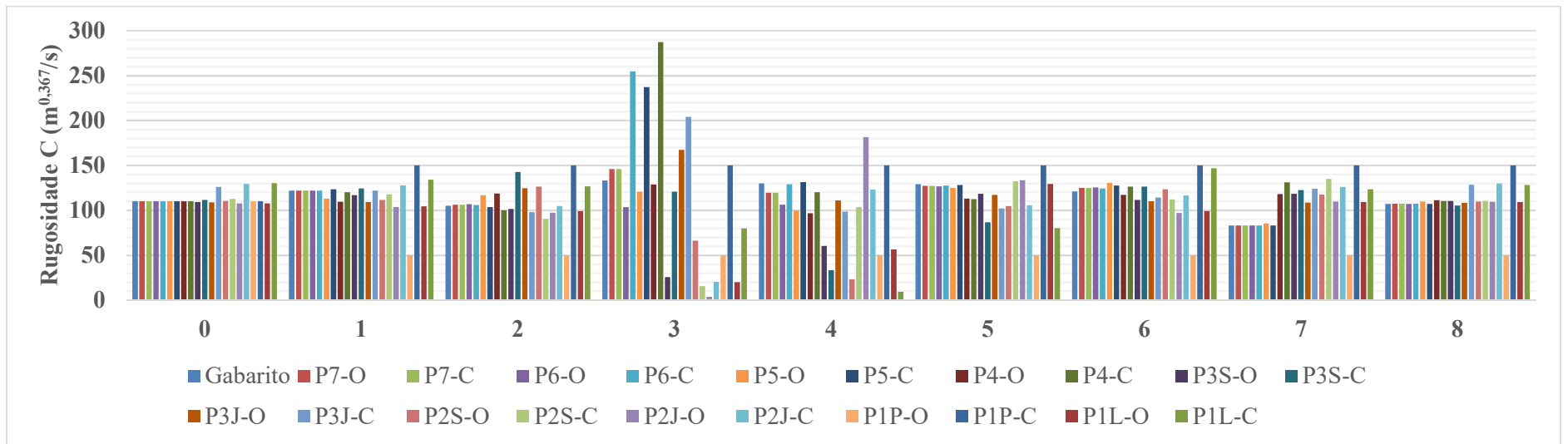


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE Z – Coeficientes de rugosidade encontrados na Calibração do C de Hazen-Williams com C inicial calculado com uso da sub-rotina computacional: rede Porto (2006)

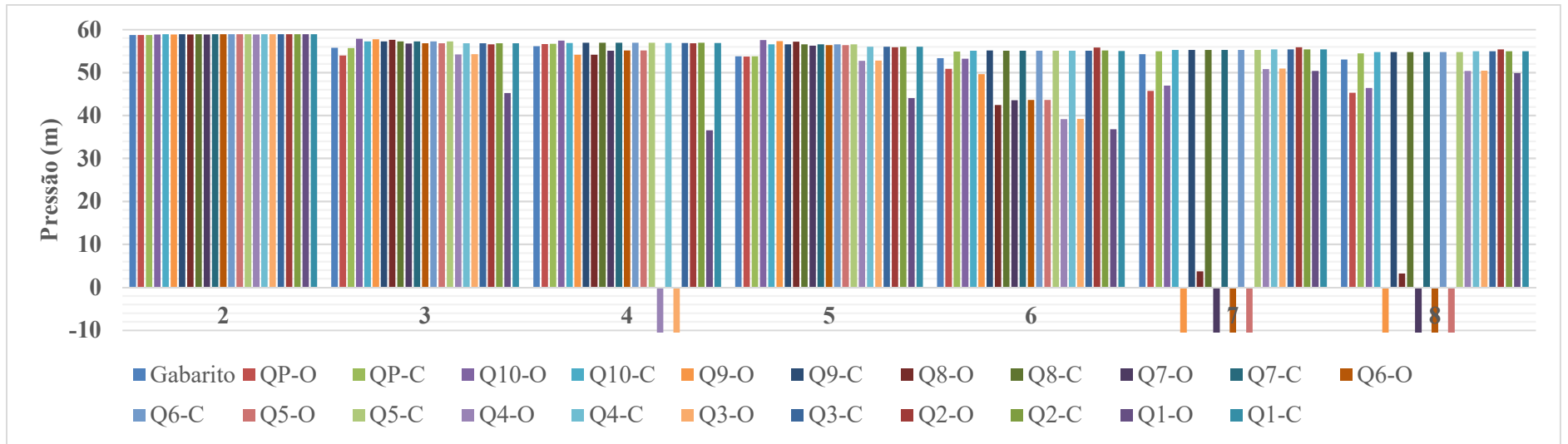


Fonte: Elaborado pelo autor

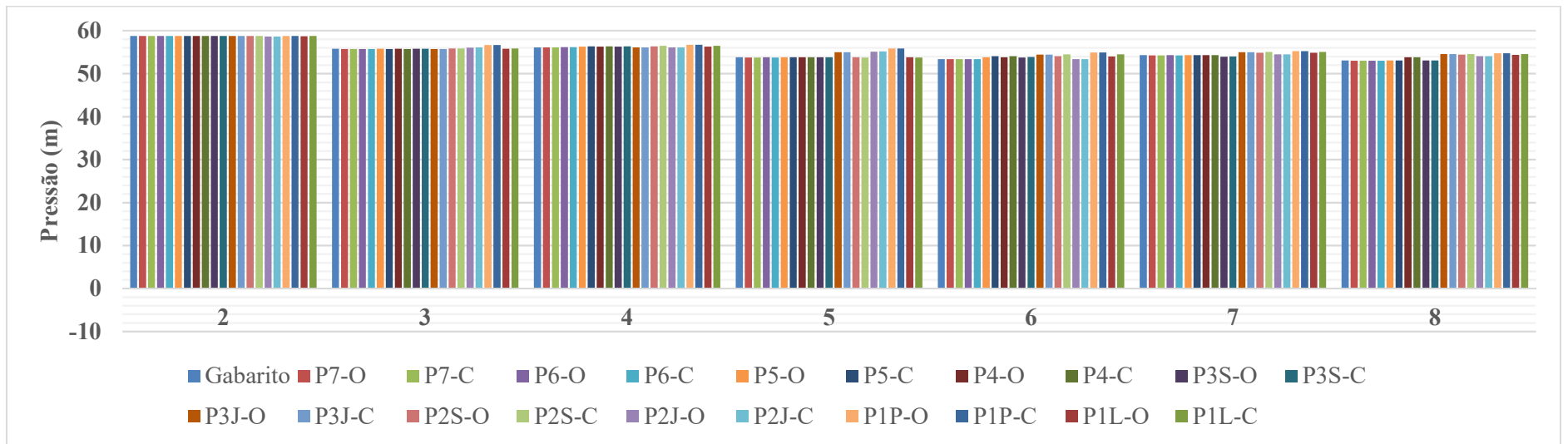


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE AA – Pressões encontradas na Calibração do C de Hazen-Williams com C inicial de $150 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

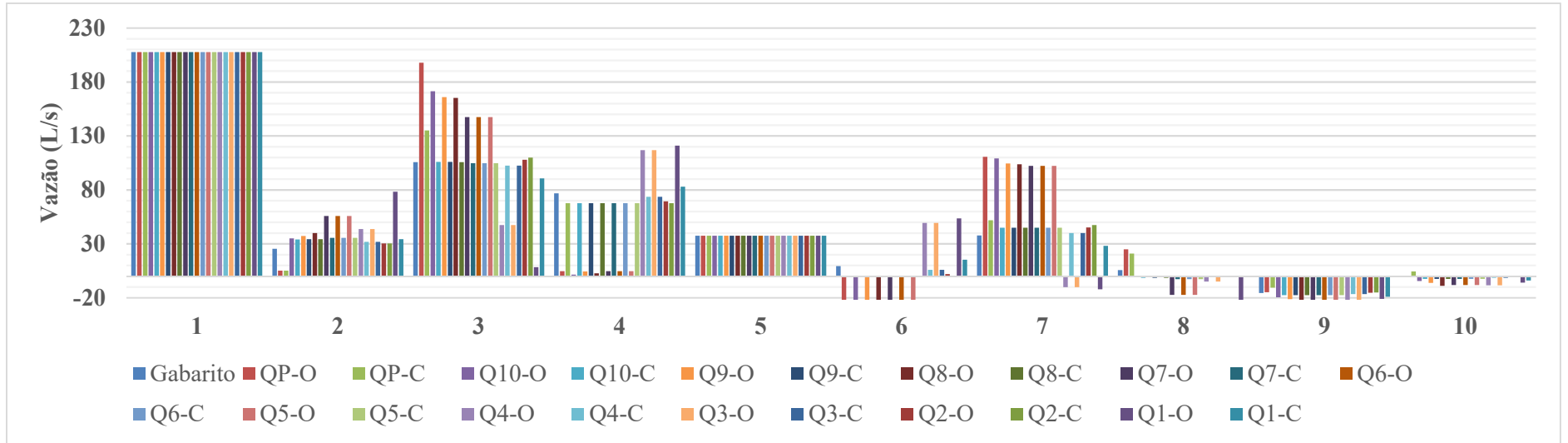


Fonte: Elaborado pelo autor

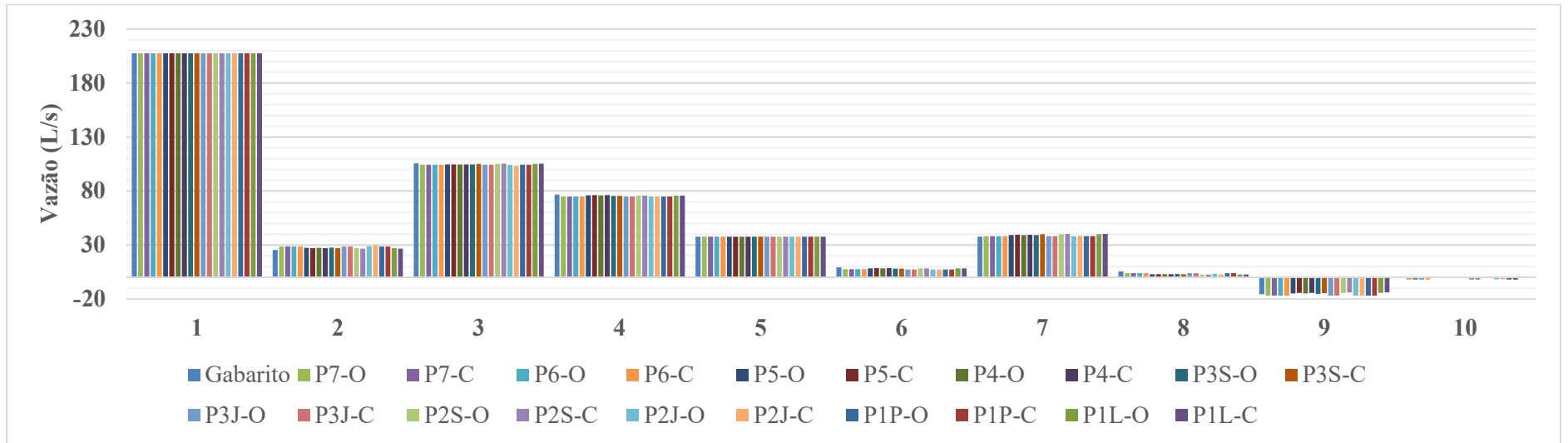


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE AB – Vazões encontradas na Calibração do C de Hazen-Williams com C inicial de 150 m^{0,367}/s: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

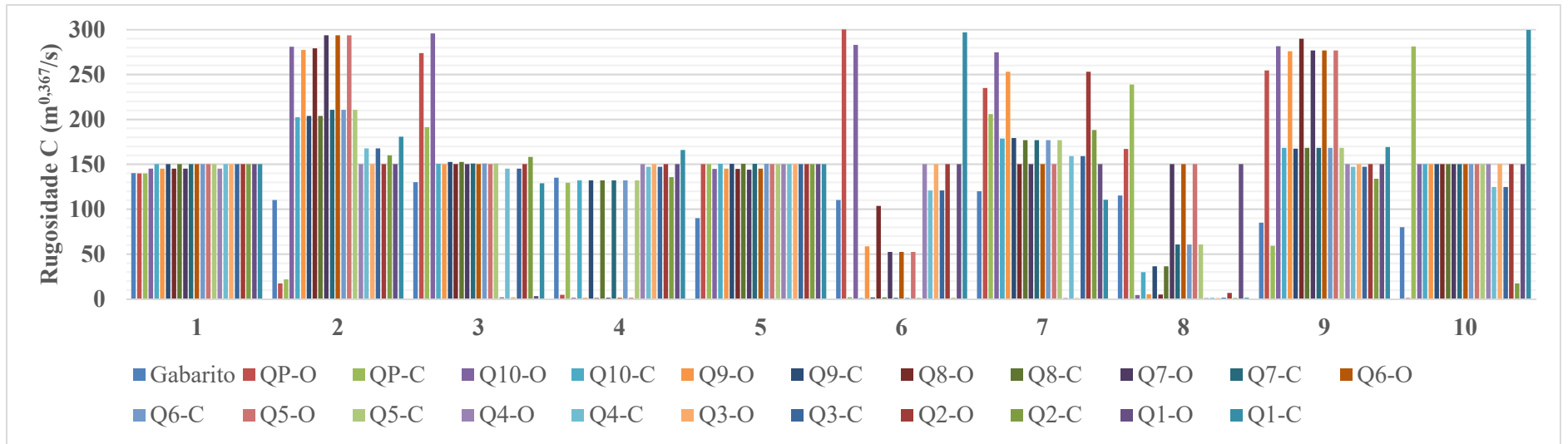


Fonte: Elaborado pelo autor

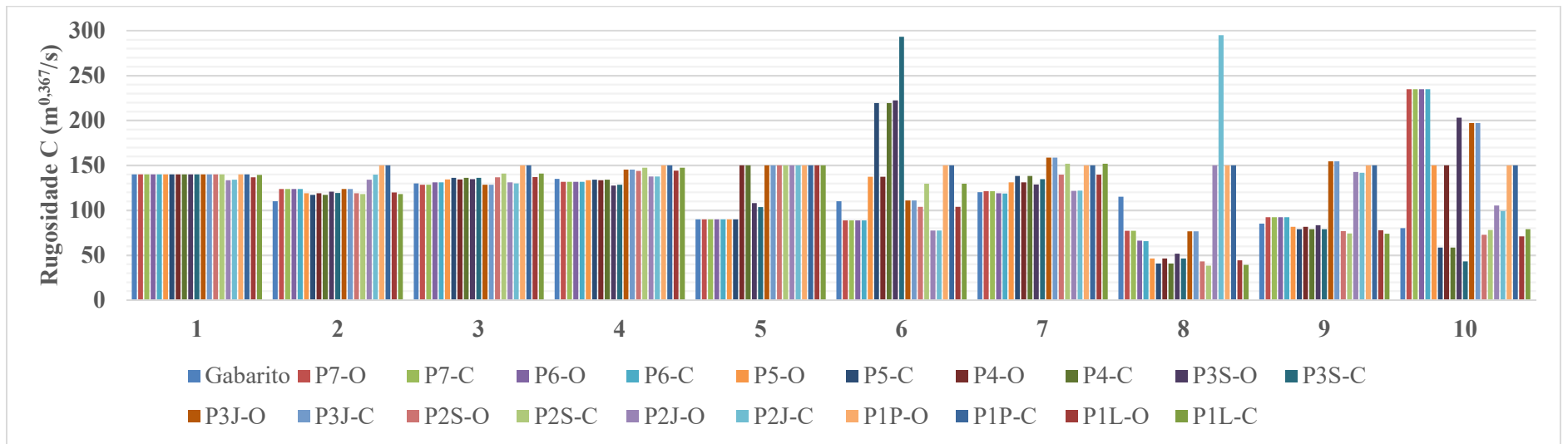


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE AC – Coeficientes de rugosidade encontrados na Calibração do C de Hazen-Williams com C inicial de $150 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

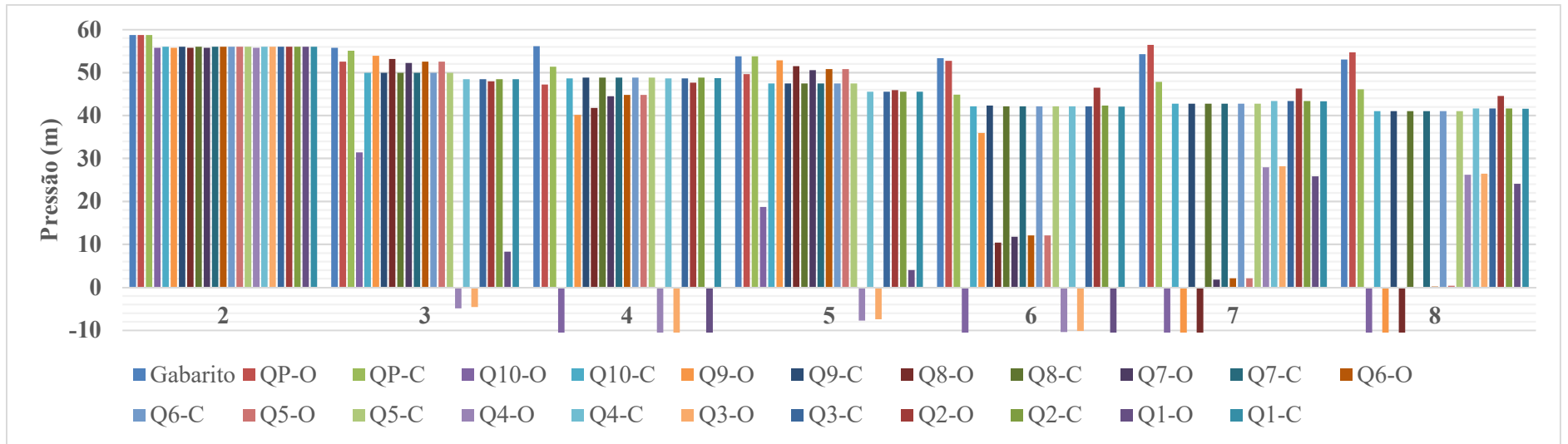


Fonte: Elaborado pelo autor

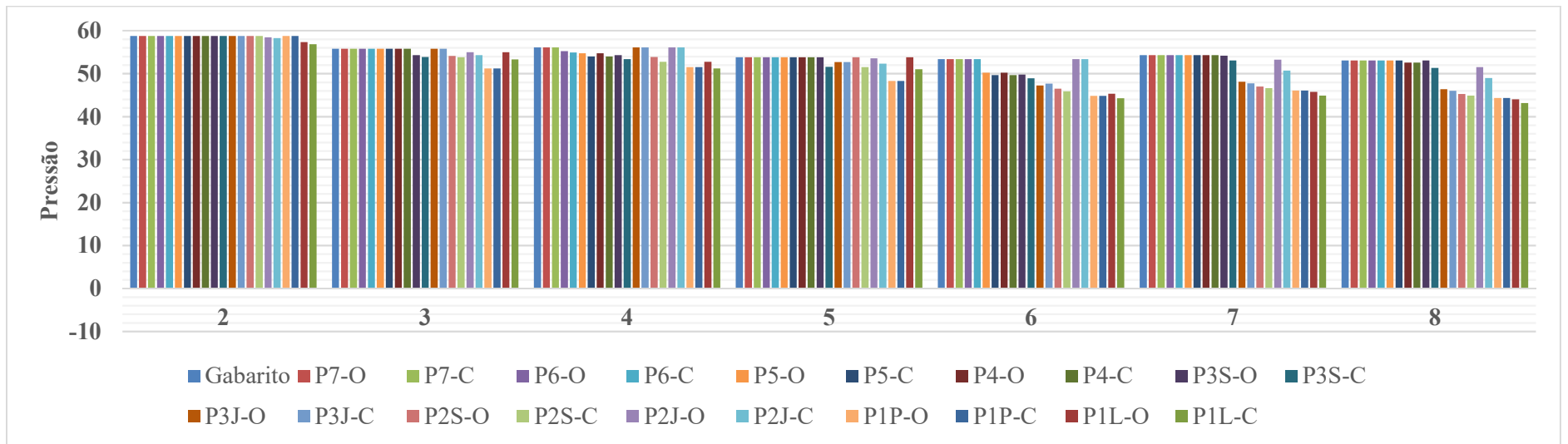


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE AD – Pressões encontradas na Calibração do C de Hazen-Williams com C inicial de 75 m^{0,367}/s: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

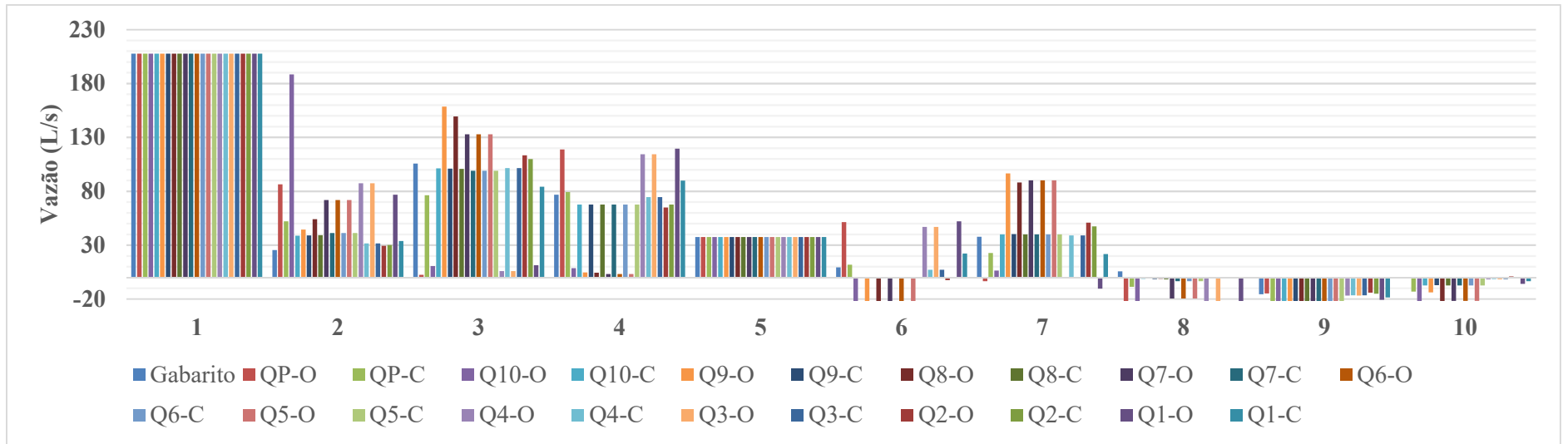


Fonte: Elaborado pelo autor

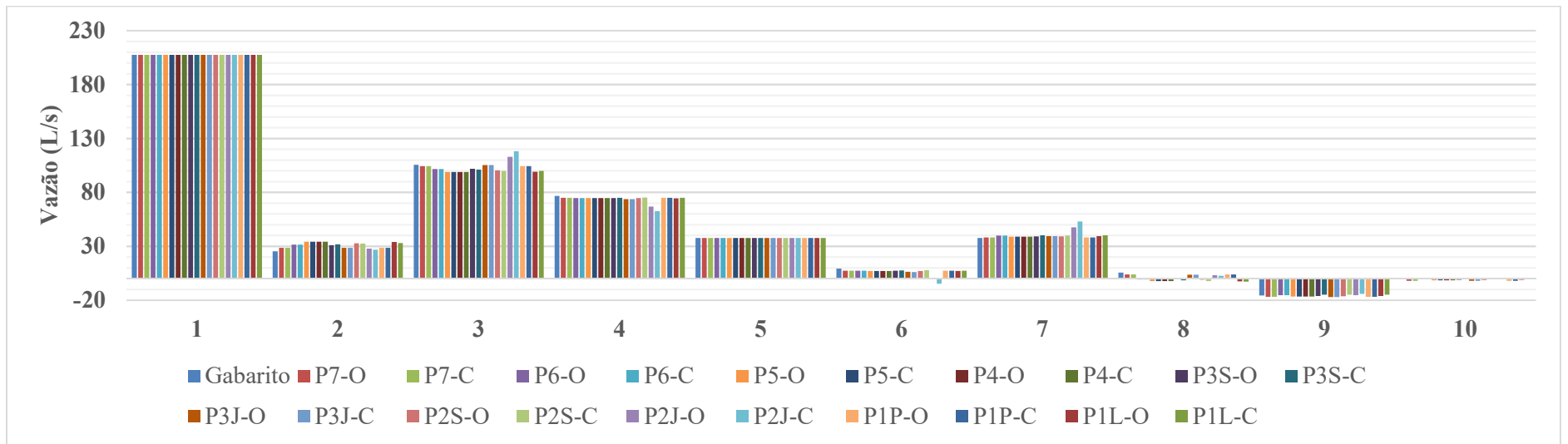


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE AE – Vazões encontradas na Calibração do C de Hazen-Williams com C inicial de 75 m^{0,367}/s: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

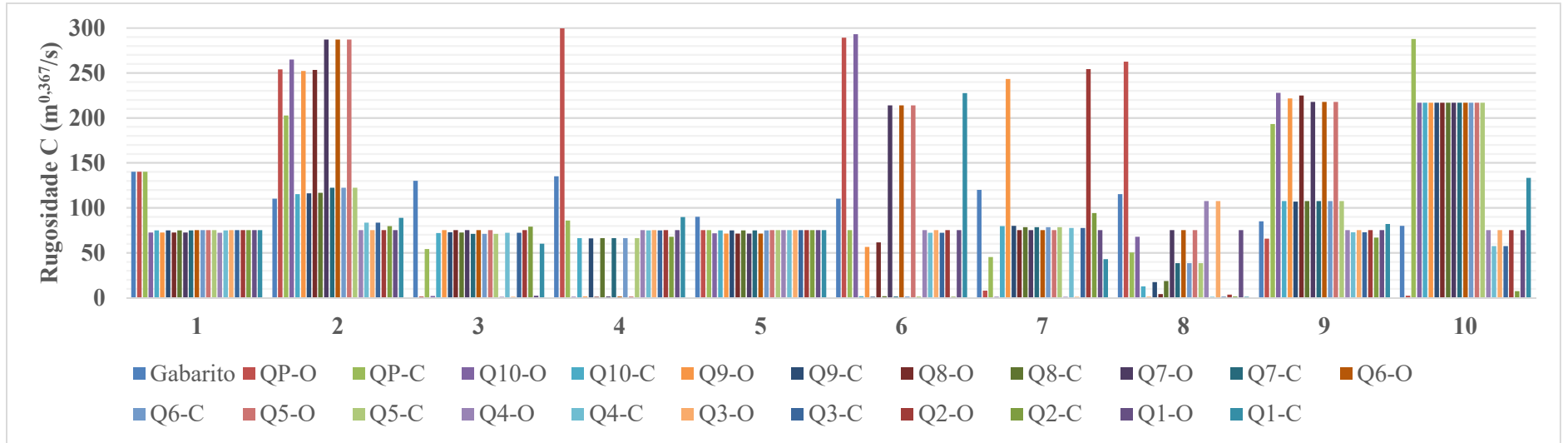


Fonte: Elaborado pelo autor

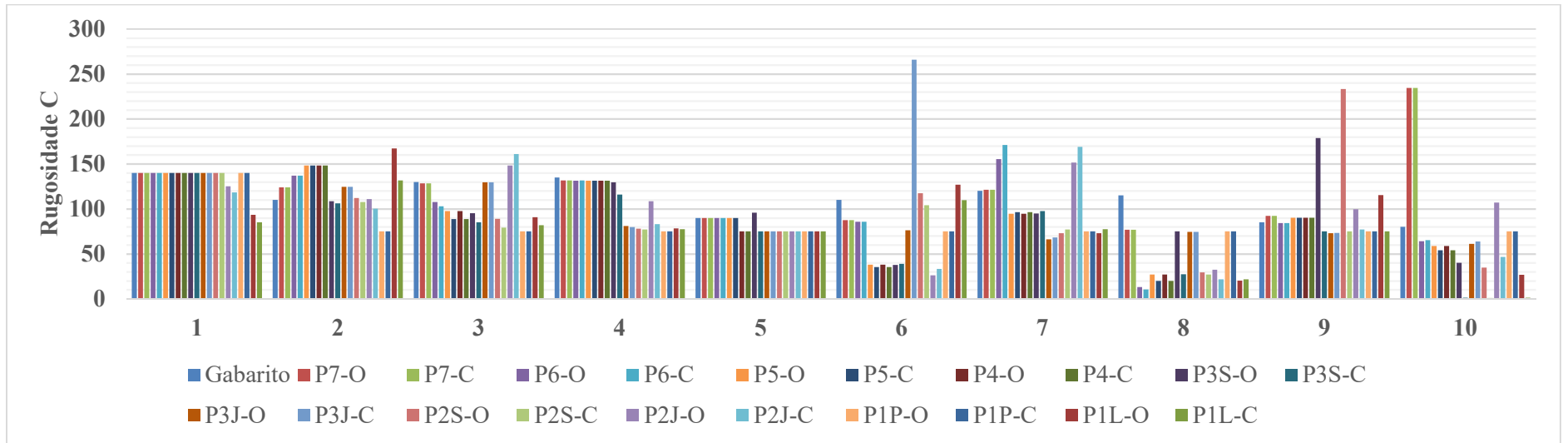


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE AF – Coeficientes de rugosidade encontrados na Calibração do C de Hazen-Williams com C inicial de $75 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

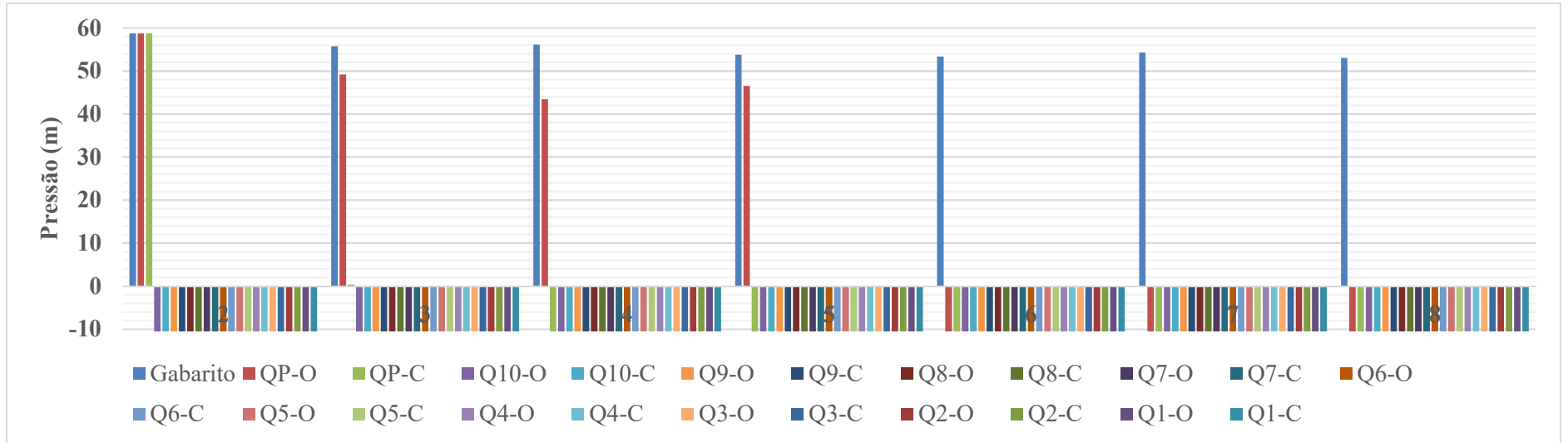


Fonte: Elaborado pelo autor

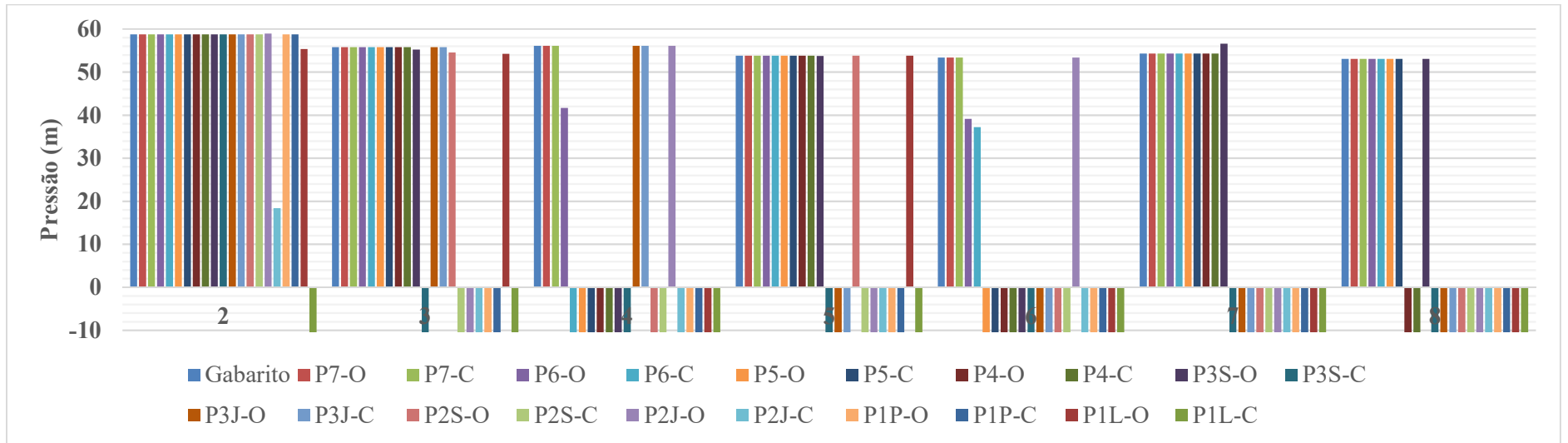


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE AG – Pressões encontradas na Calibração do C de Hazen-Williams com C inicial de 5 m^{0,367}/s: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

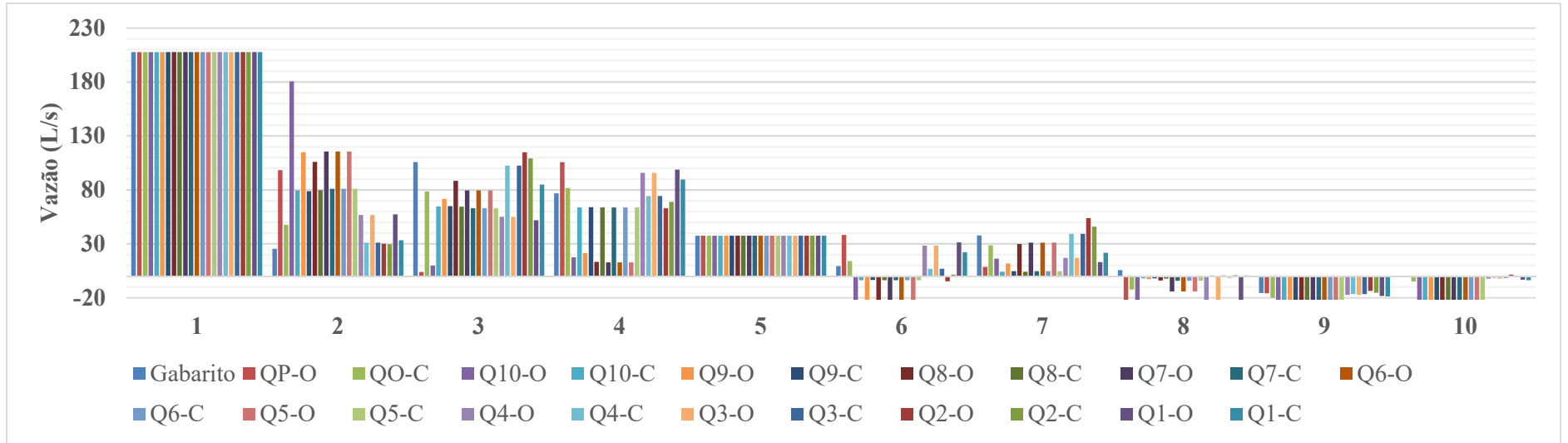


Fonte: Elaborado pelo autor

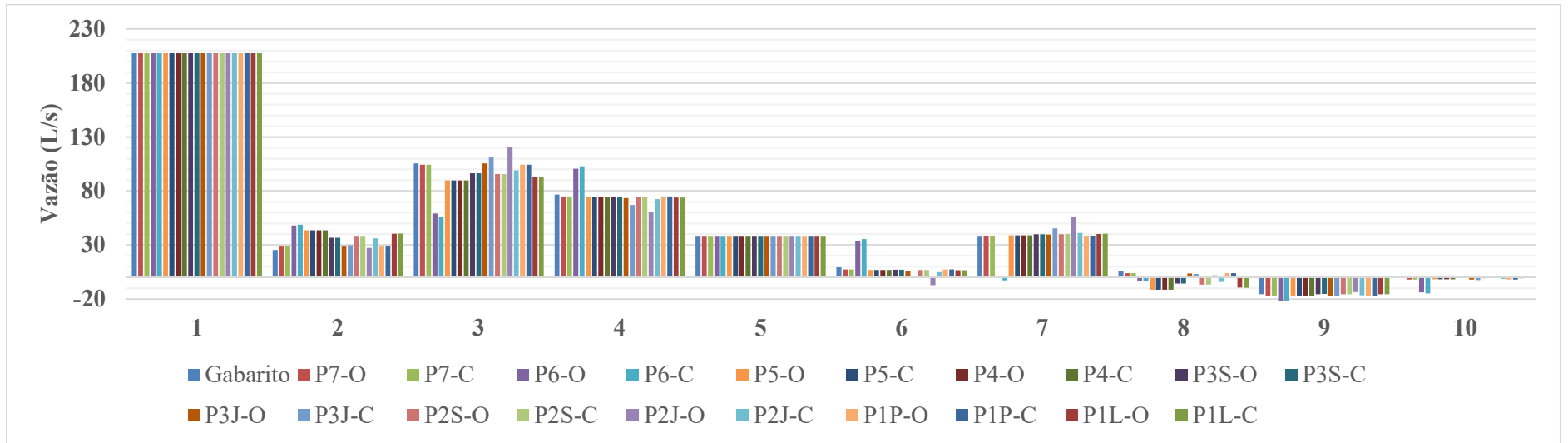


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE AH – Vazões encontradas na Calibração do C de Hazen-Williams com C inicial de 5 m^{0,367}/s: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

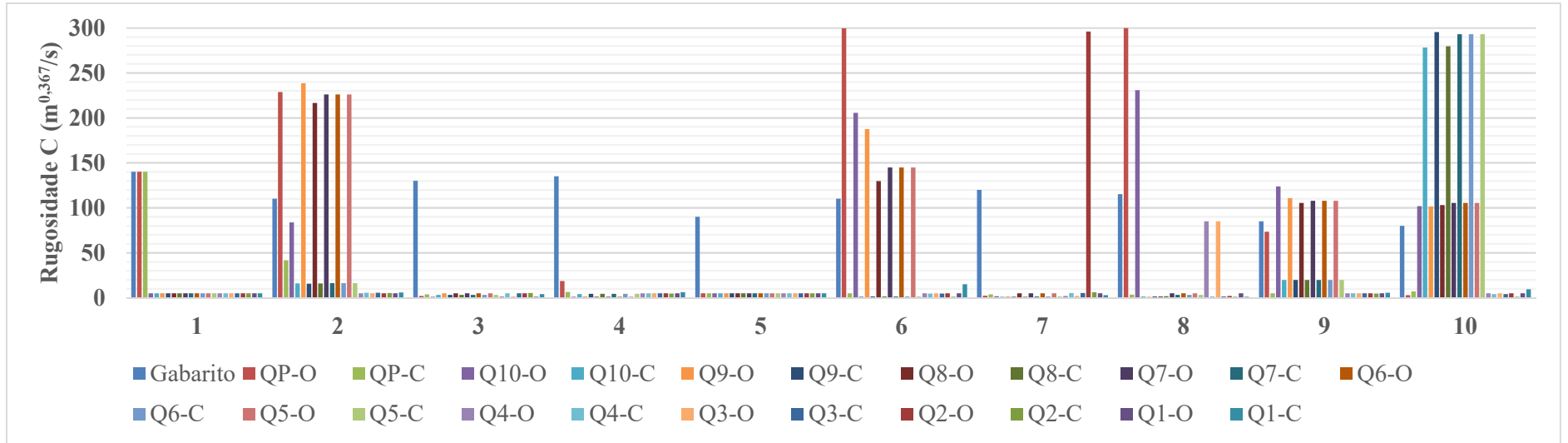


Fonte: Elaborado pelo autor

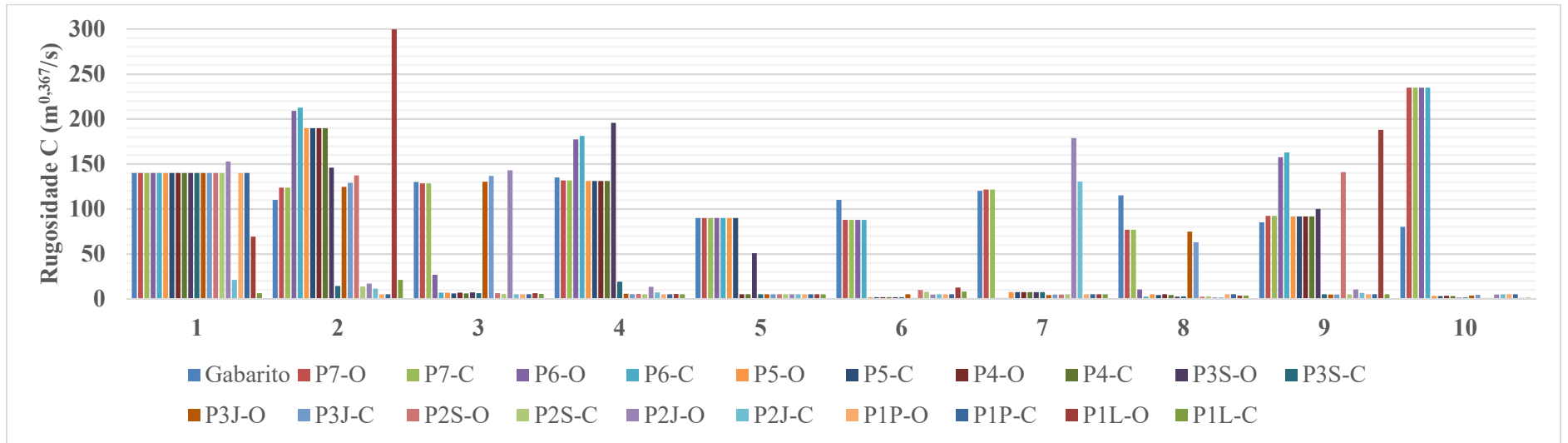


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE AI – Coeficientes de rugosidade encontrados na Calibração do C de Hazen-Williams com C inicial de $5 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

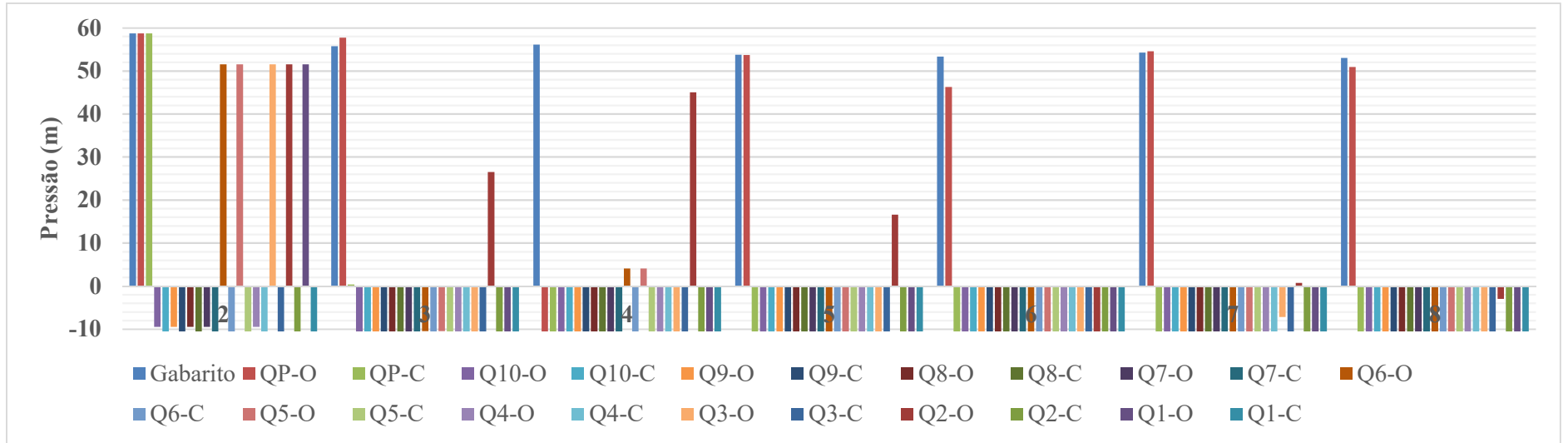


Fonte: Elaborado pelo autor

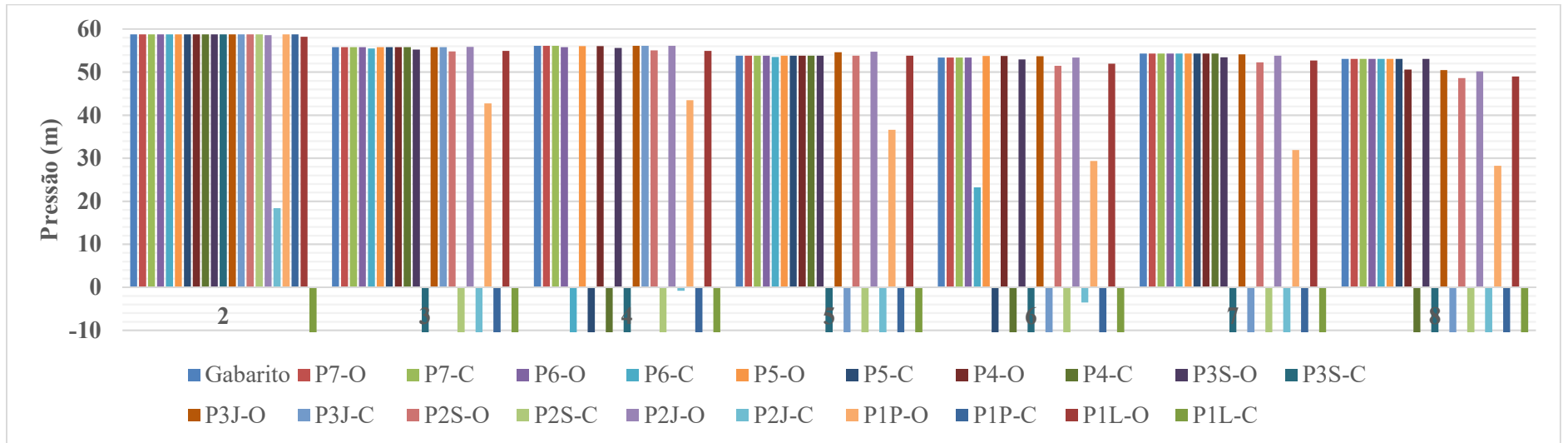


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE AJ – Pressões encontradas na Calibração do C de Hazen-Williams com C inicial calculado com uso da sub-rotina computacional: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

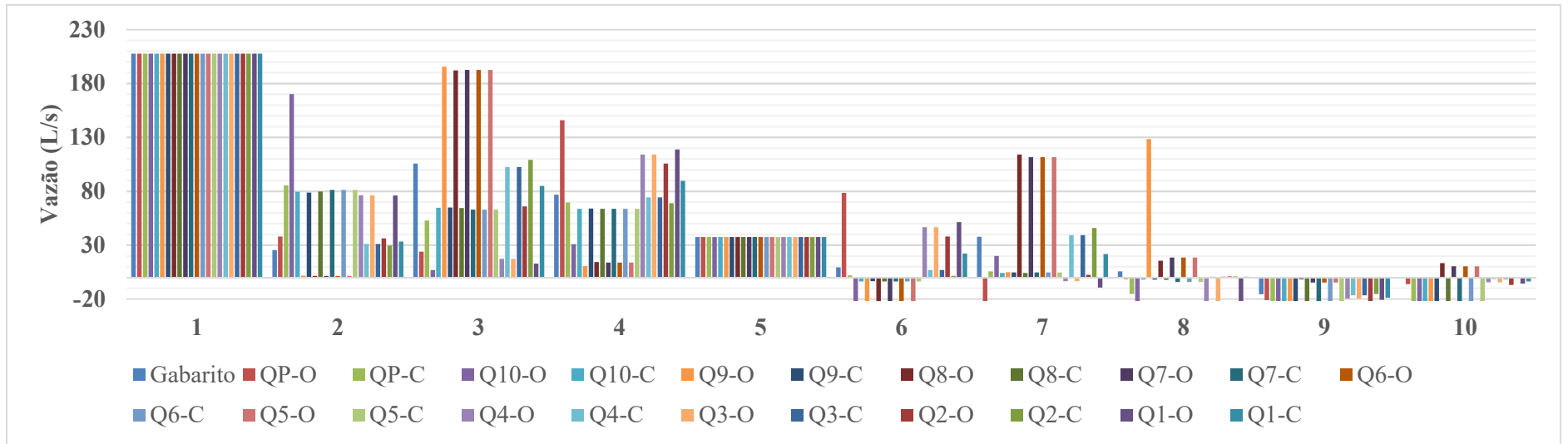


Fonte: Elaborado pelo autor

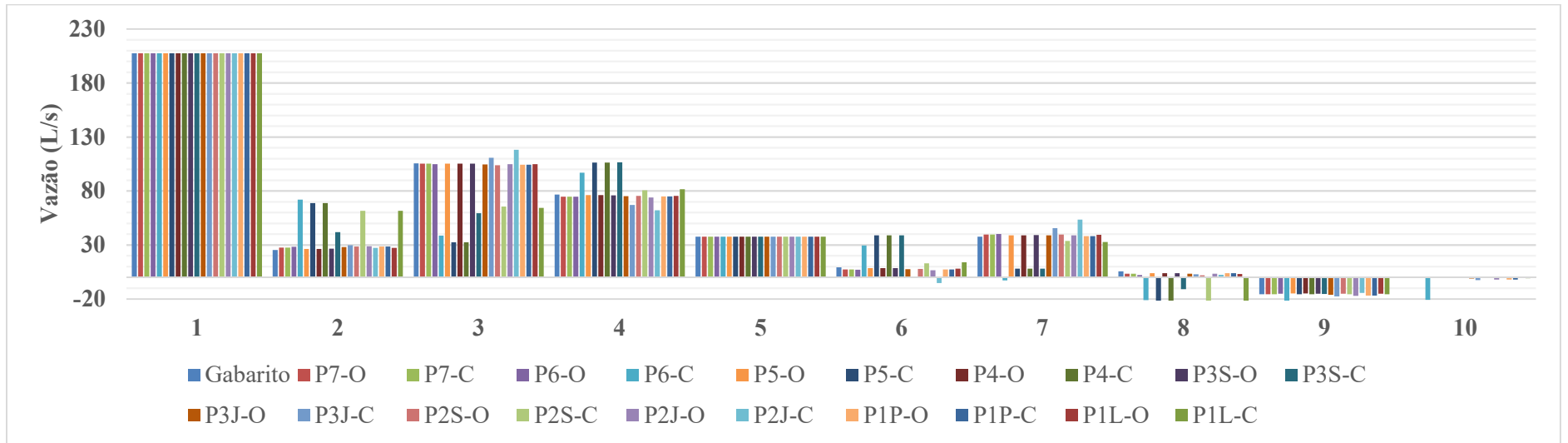


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE AK – Vazões encontradas na Calibração do C de Hazen-Williams com C inicial calculado com uso da sub-rotina computacional: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

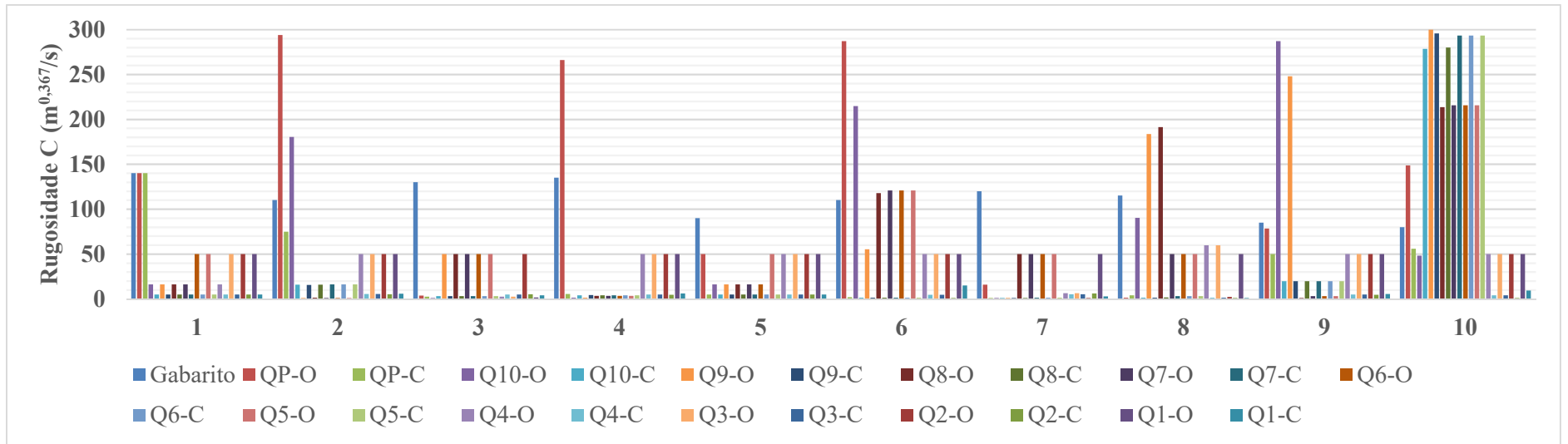


Fonte: Elaborado pelo autor

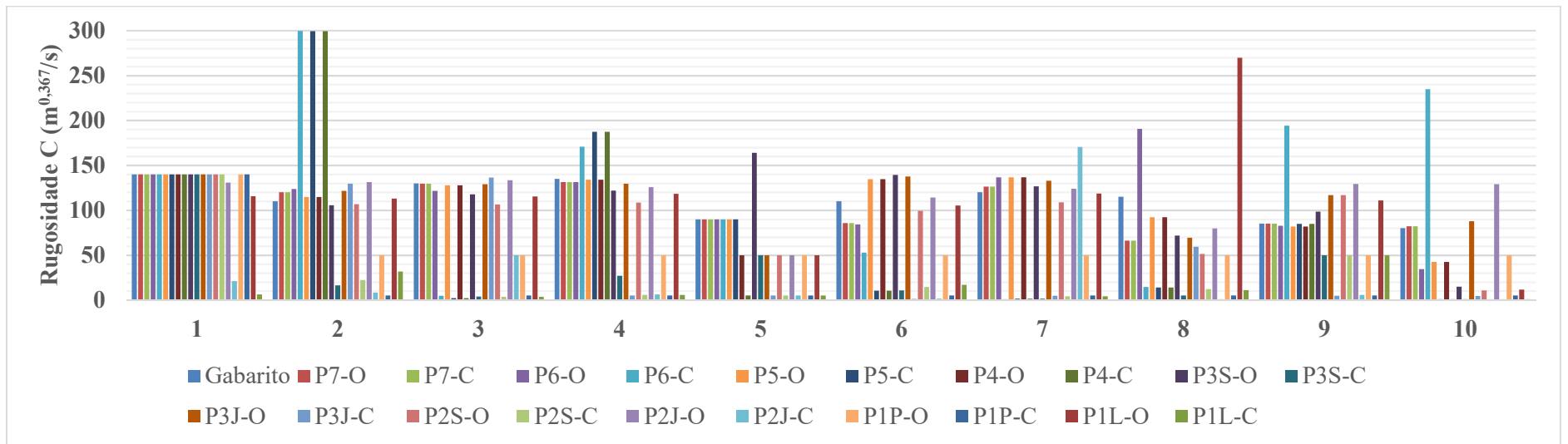


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE AL – Coeficientes de rugosidade encontrados na Calibração do C de Hazen-Williams com C inicial calculado com uso da sub-rotina computacional: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

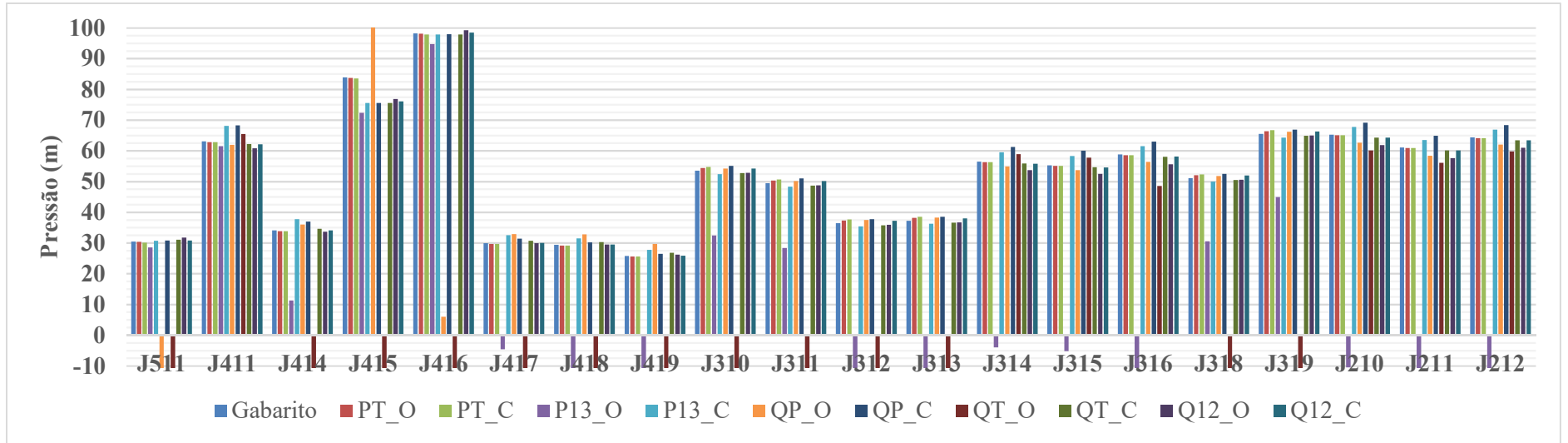


Fonte: Elaborado pelo autor

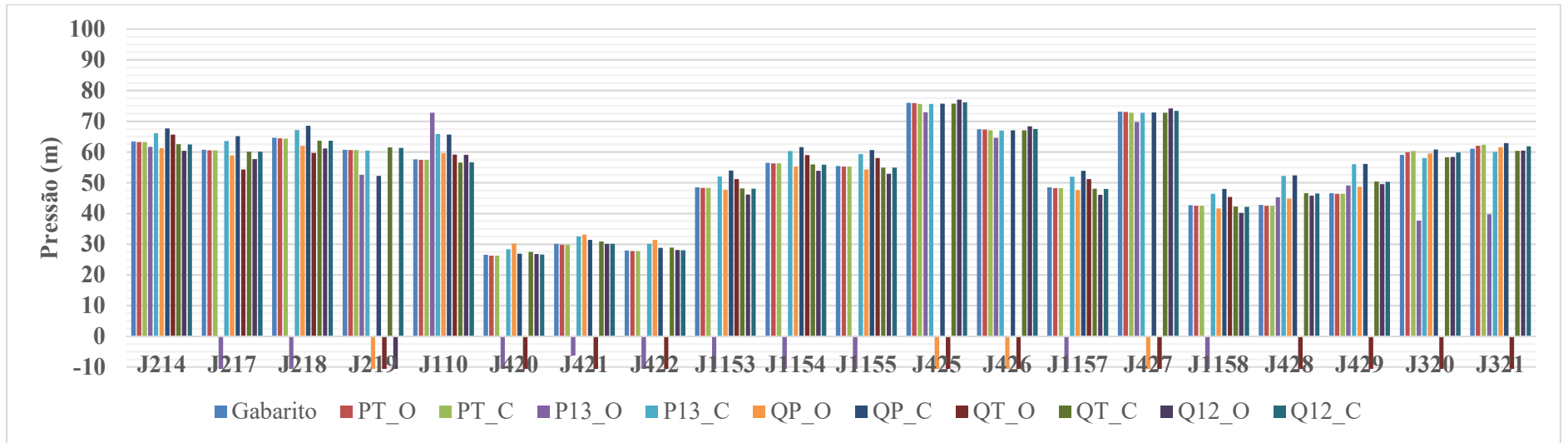


Fonte: Elaborado pelo autor

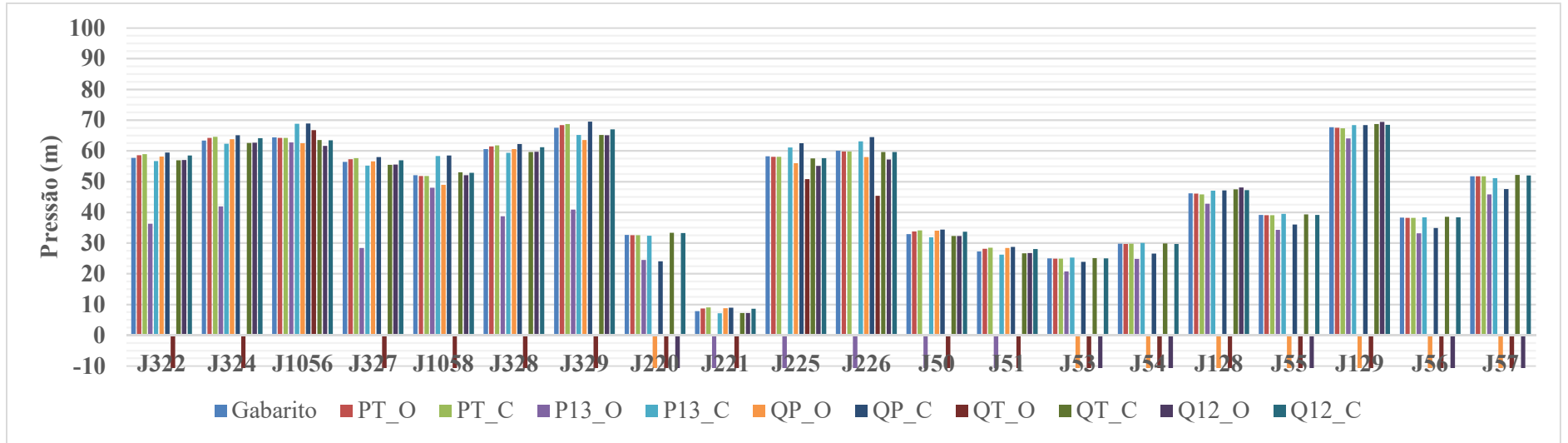
**APÊNDICE AM – Pressões encontradas na Calibração do C de Hazen-Williams com C
inicial de 100 m^{0,367}/s: rede C-Town**



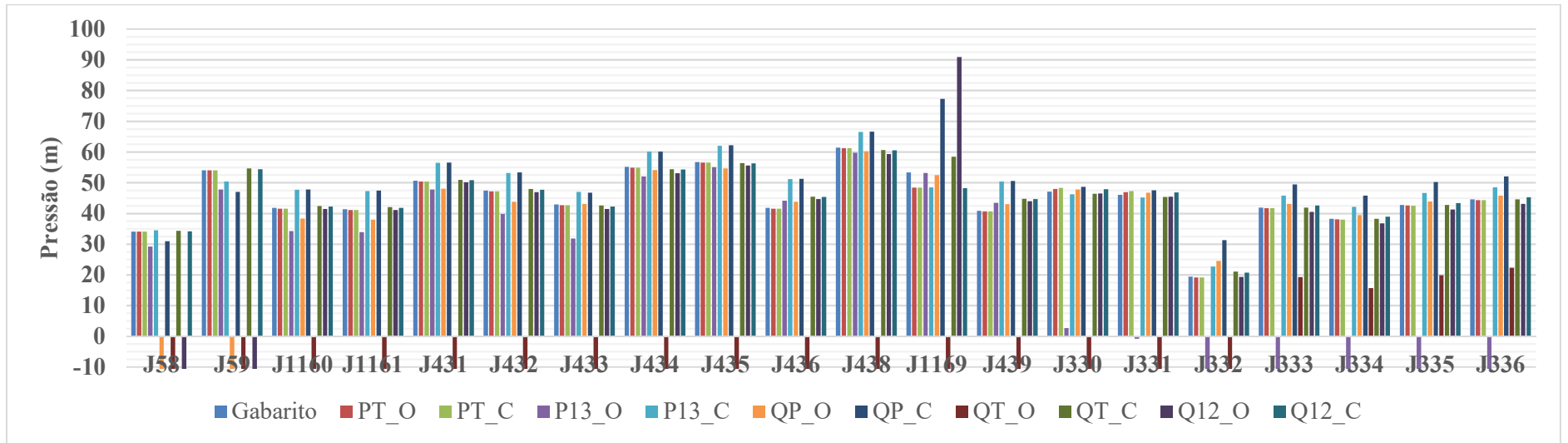
Fonte: Elaborado pelo autor



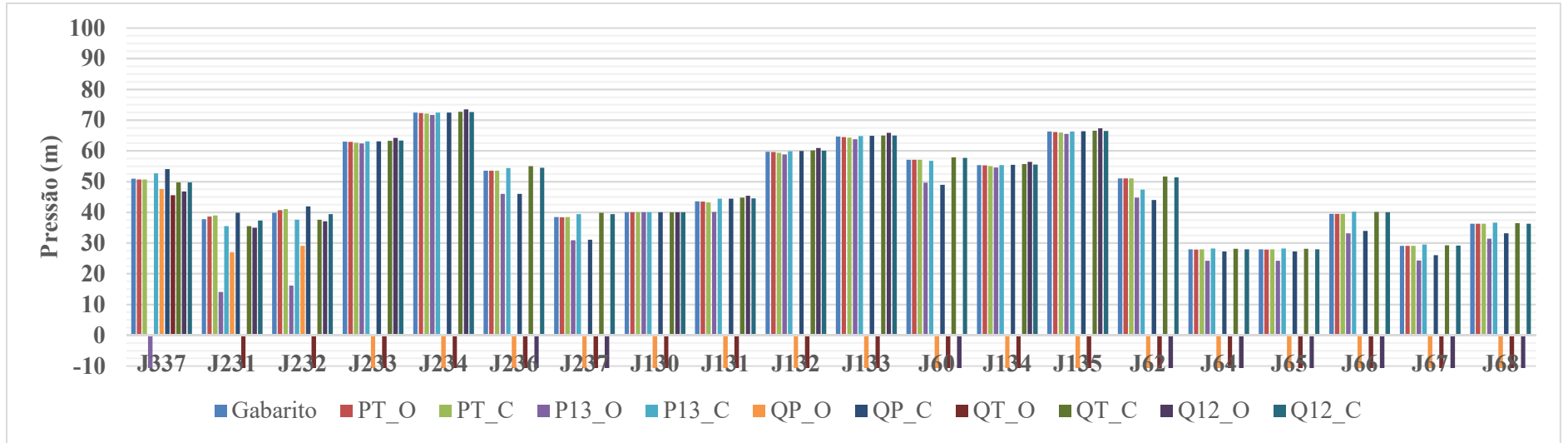
Fonte: Elaborado pelo autor



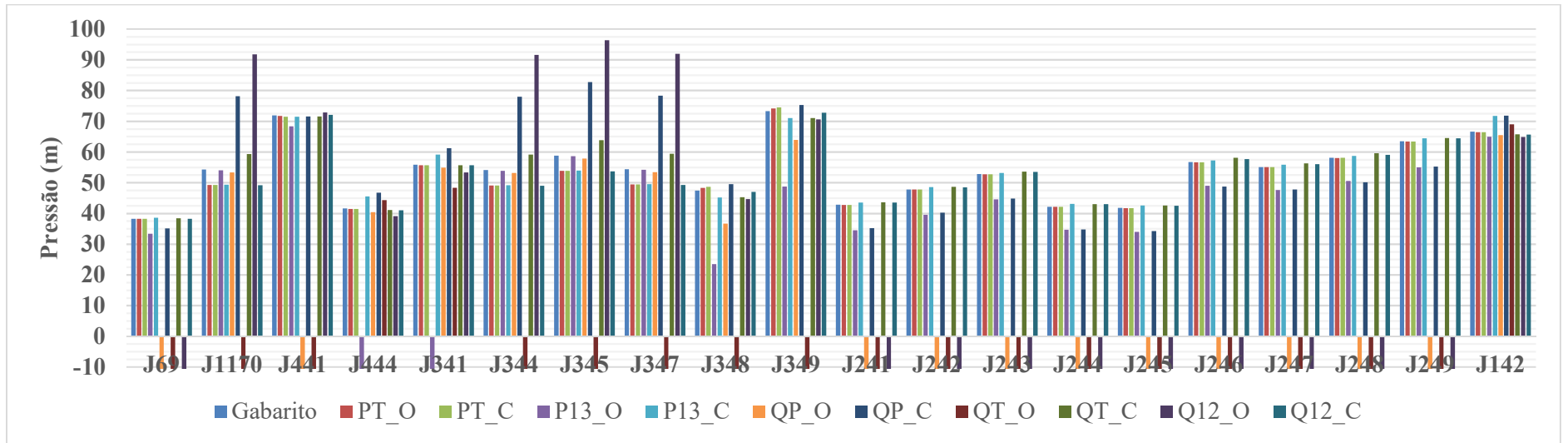
Fonte: Elaborado pelo autor



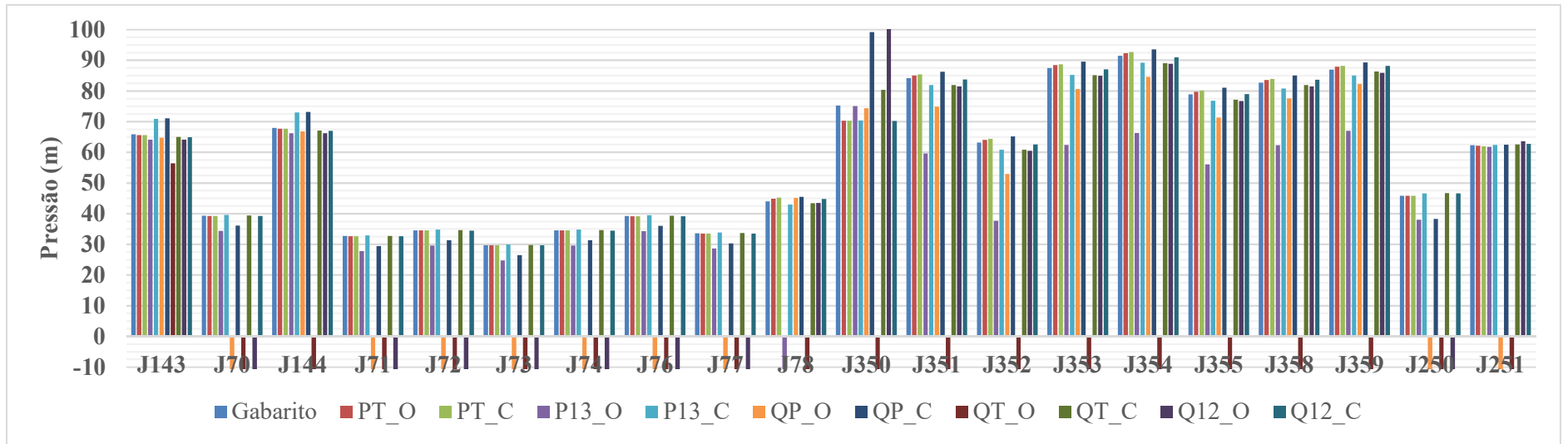
Fonte: Elaborado pelo autor



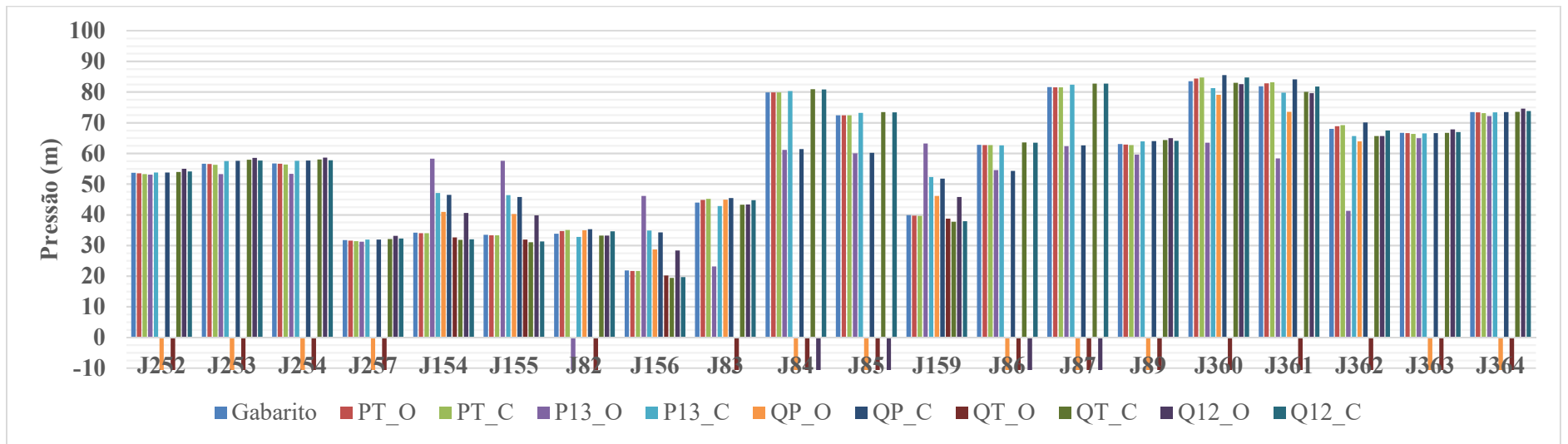
Fonte: Elaborado pelo autor



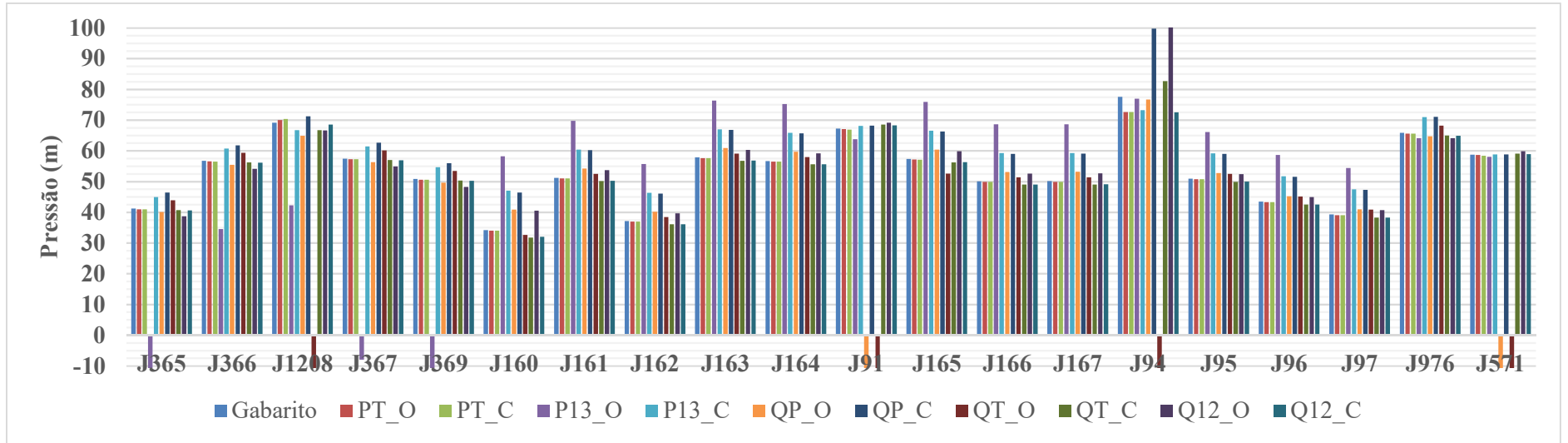
Fonte: Elaborado pelo autor



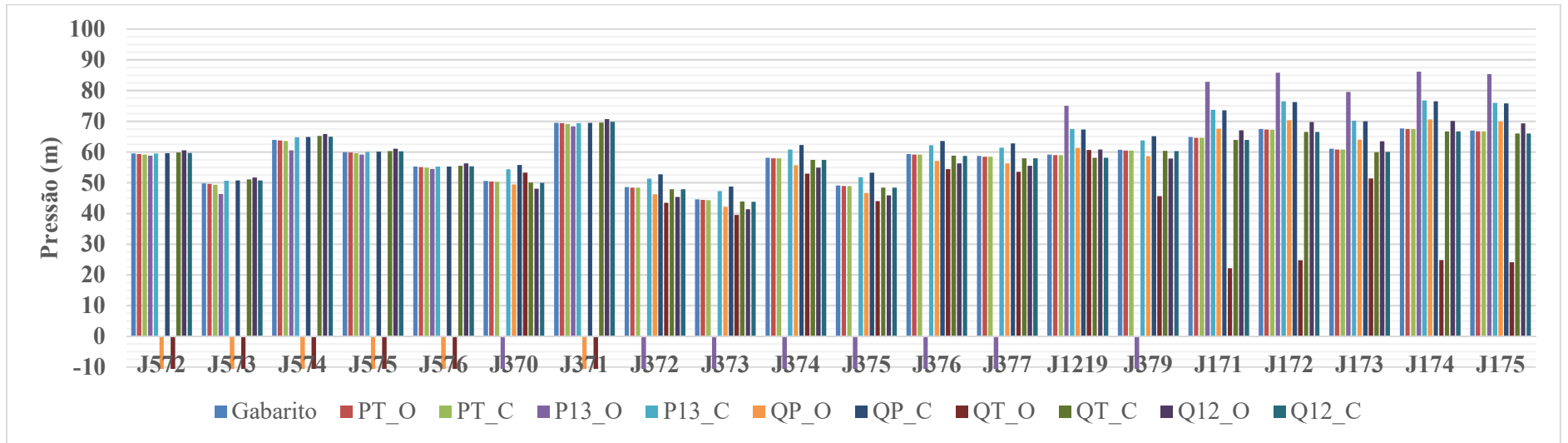
Fonte: Elaborado pelo autor



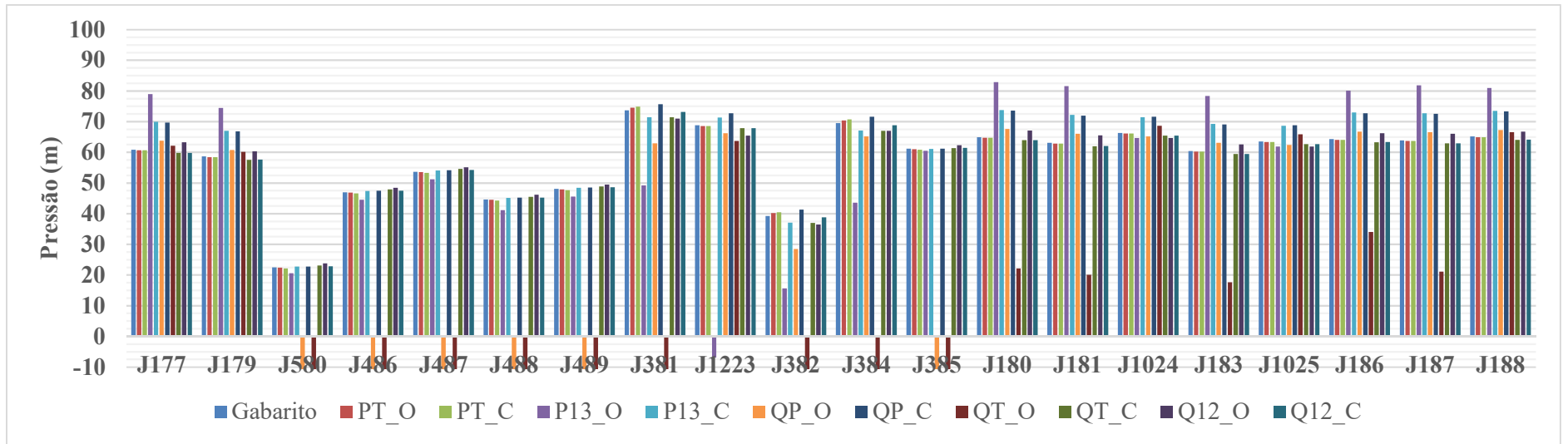
Fonte: Elaborado pelo autor



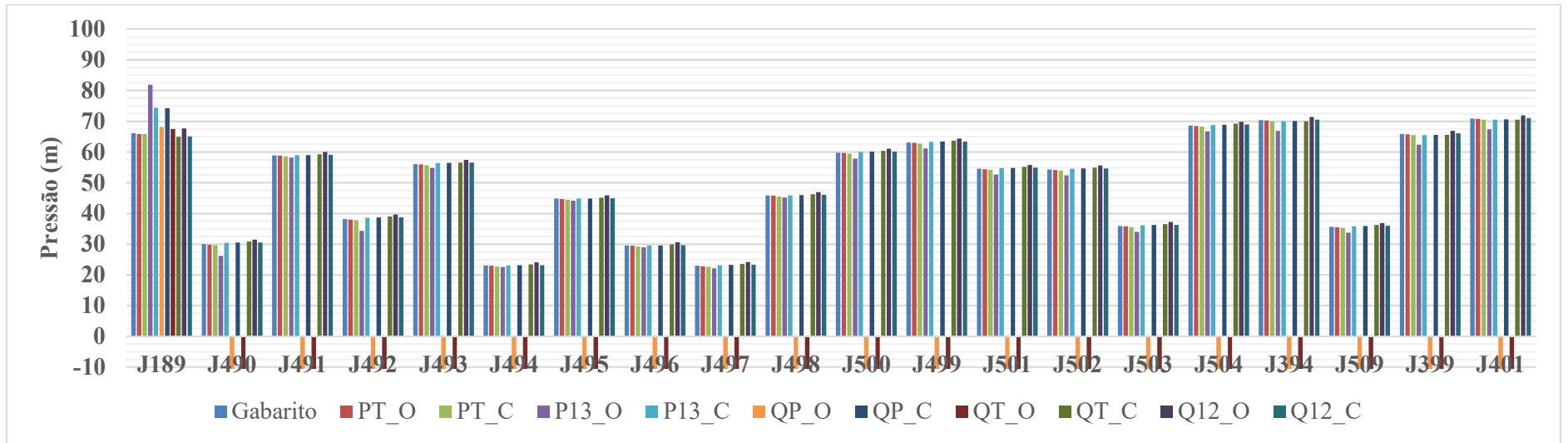
Fonte: Elaborado pelo autor



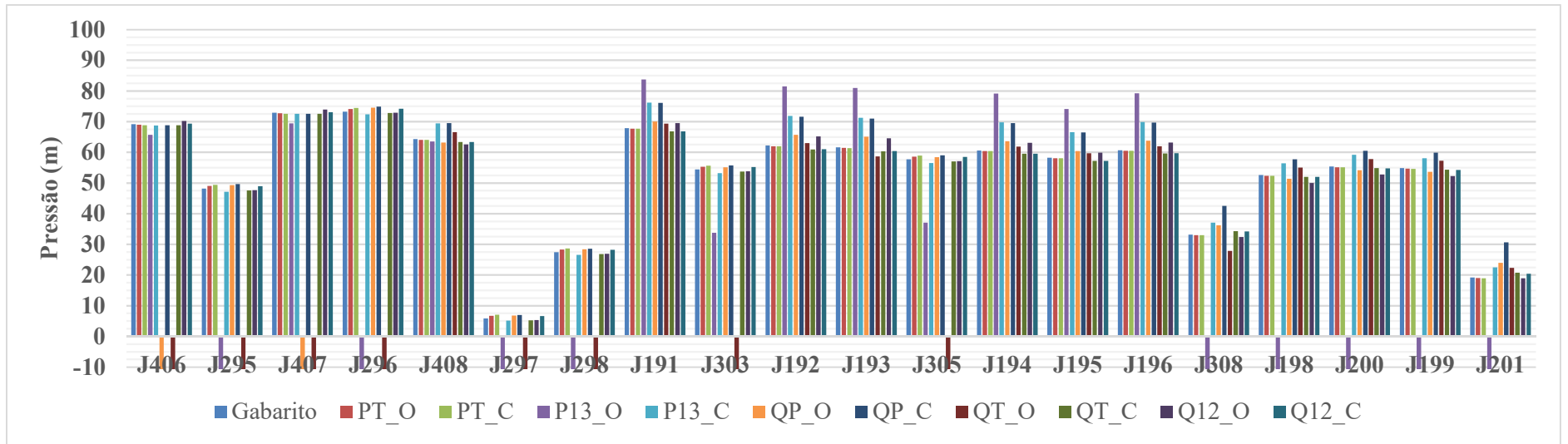
Fonte: Elaborado pelo autor



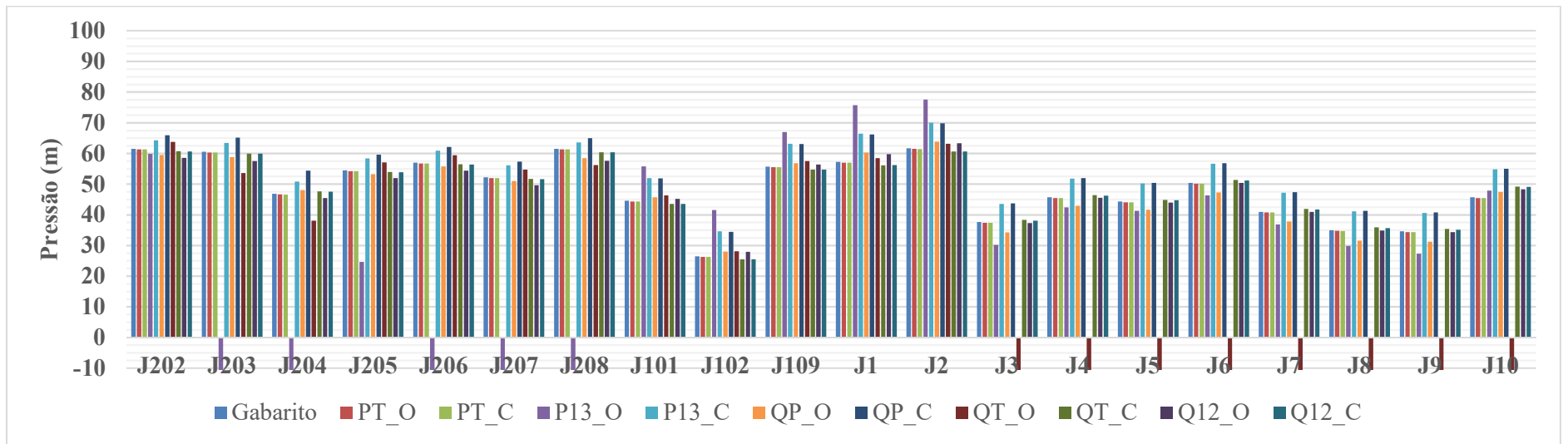
Fonte: Elaborado pelo autor



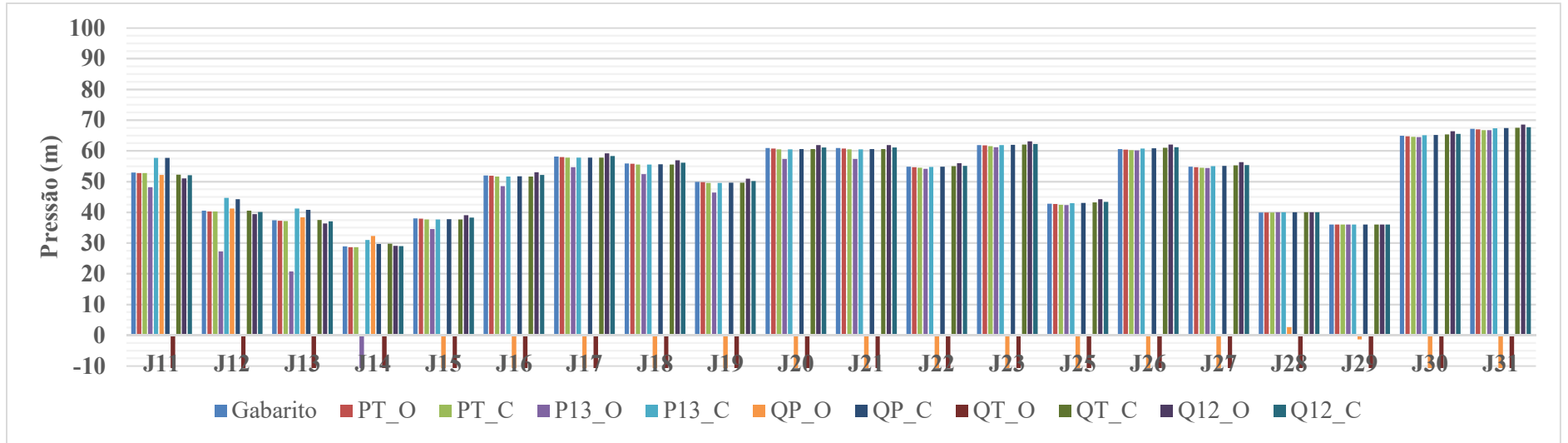
Fonte: Elaborado pelo autor



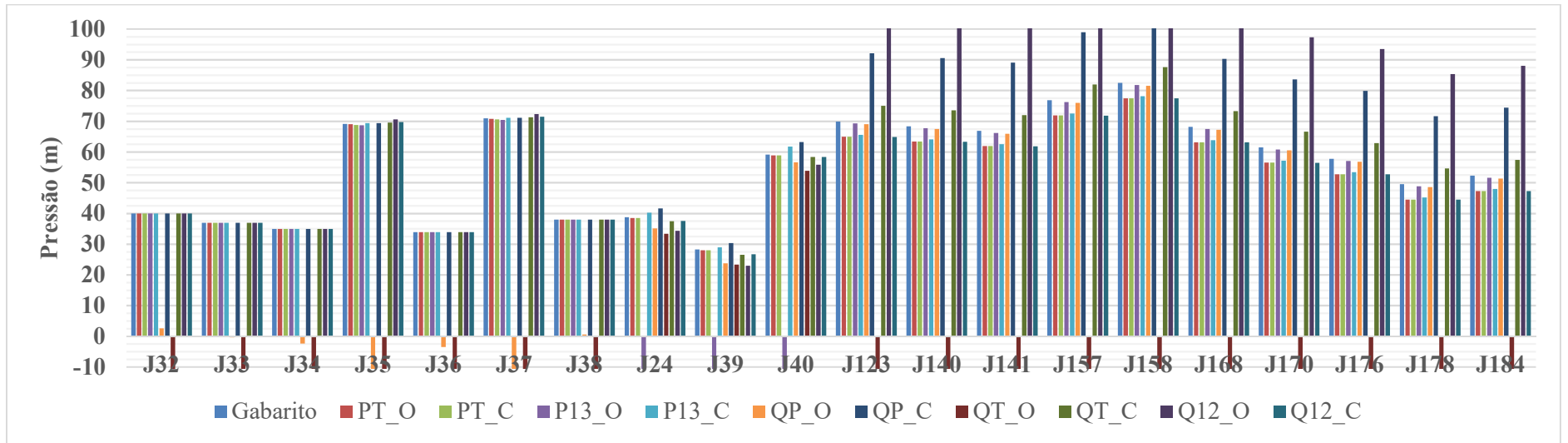
Fonte: Elaborado pelo autor



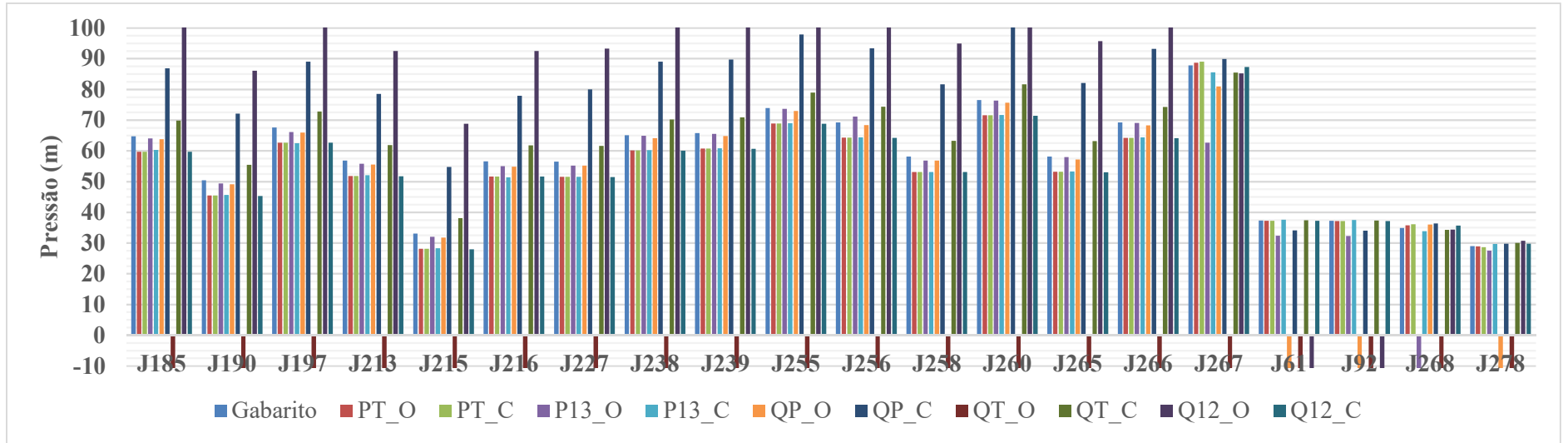
Fonte: Elaborado pelo autor



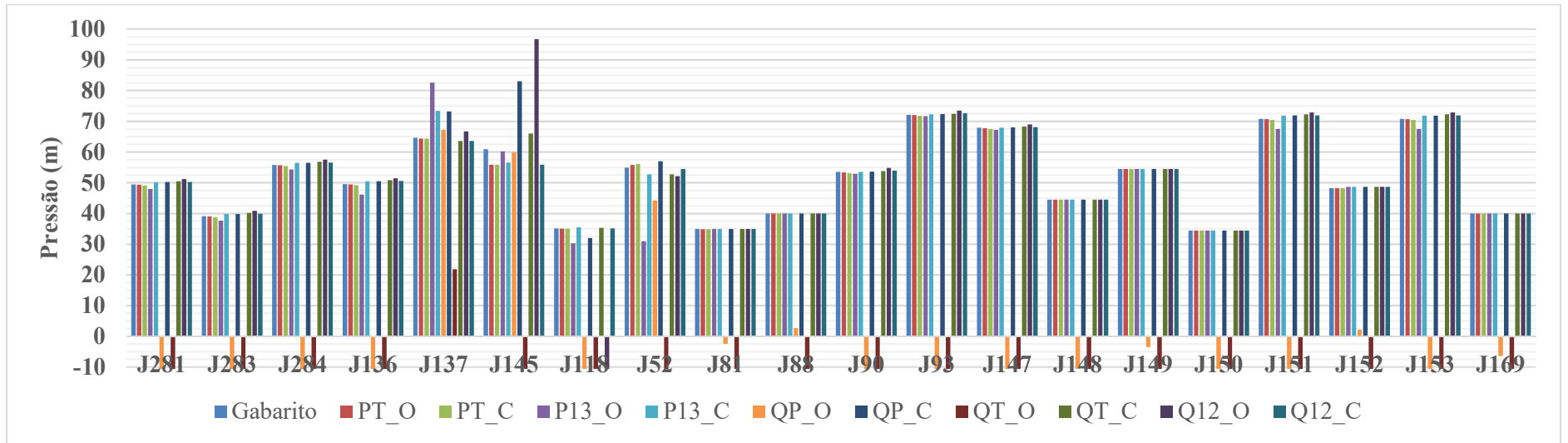
Fonte: Elaborado pelo autor



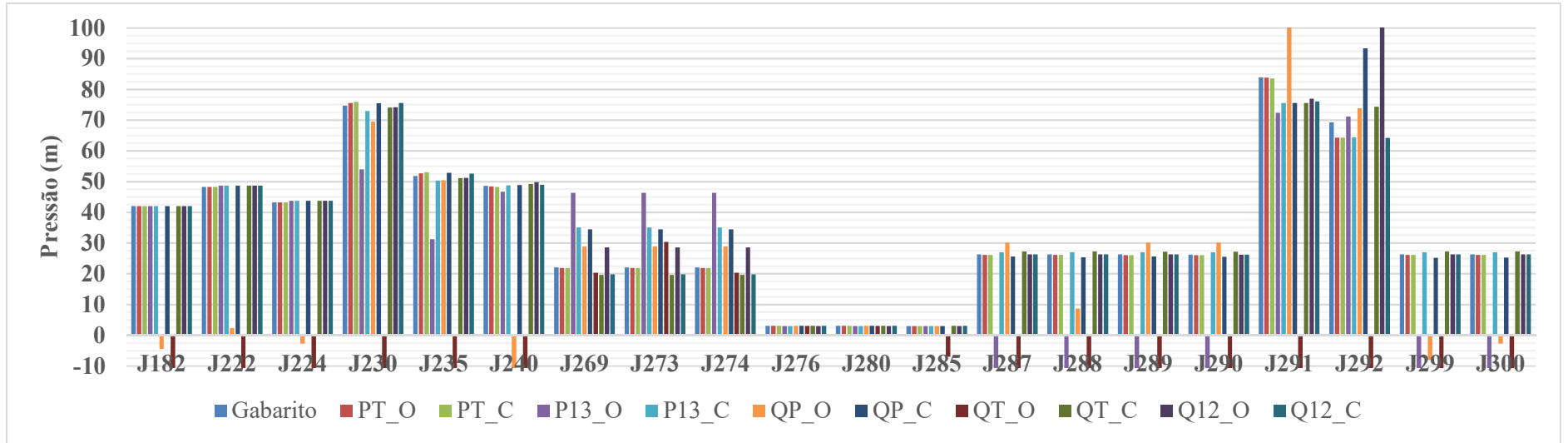
Fonte: Elaborado pelo autor



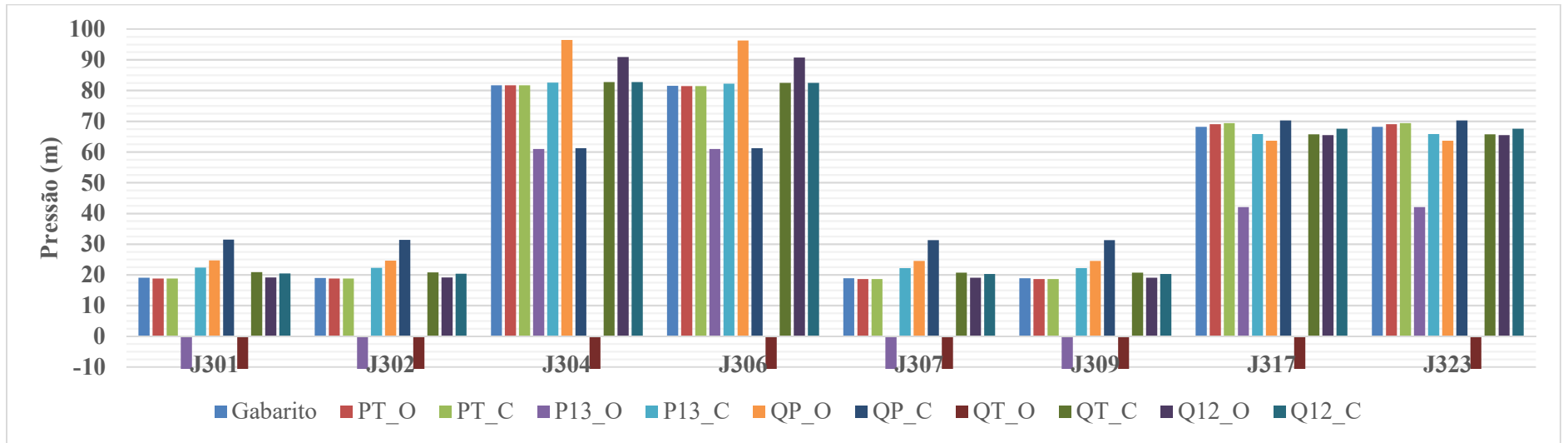
Fonte: Elaborado pelo autor



Fonte: Elaborado pelo autor

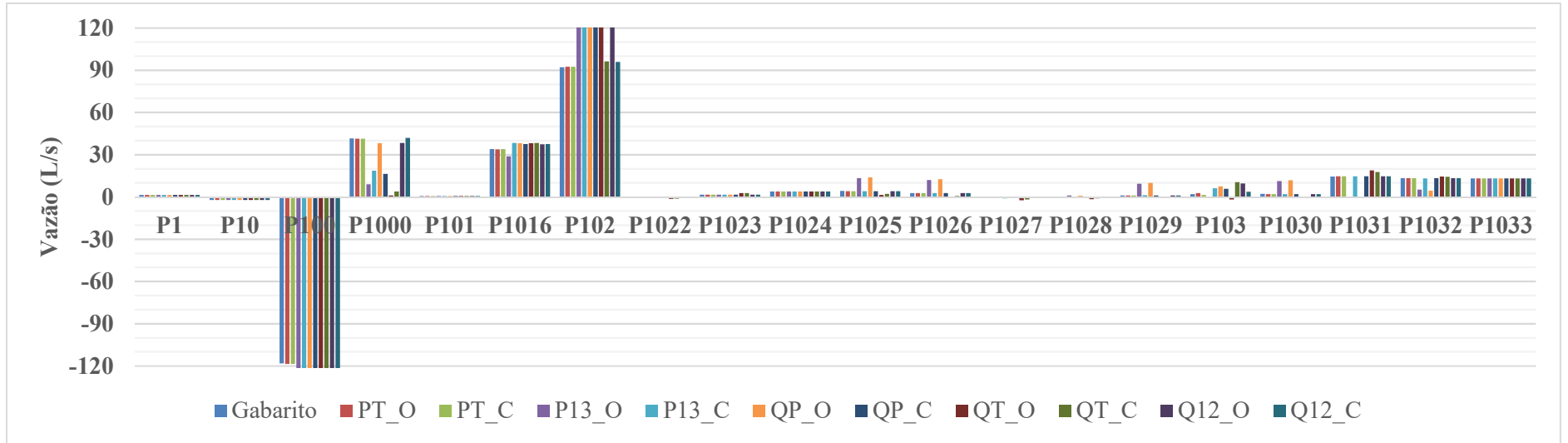


Fonte: Elaborado pelo autor

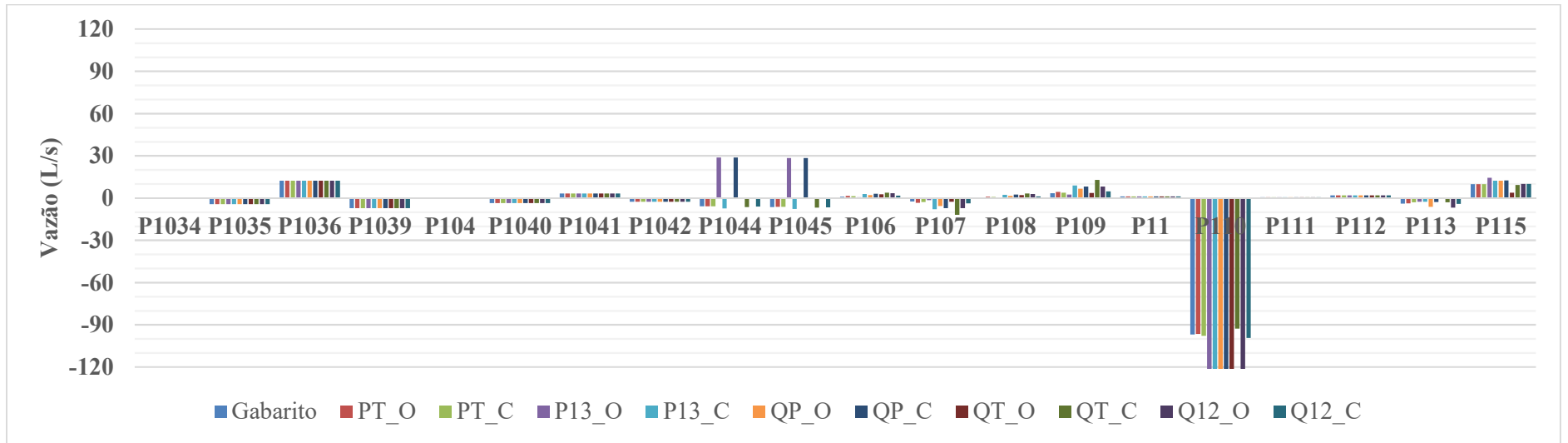


Fonte: Elaborado pelo autor

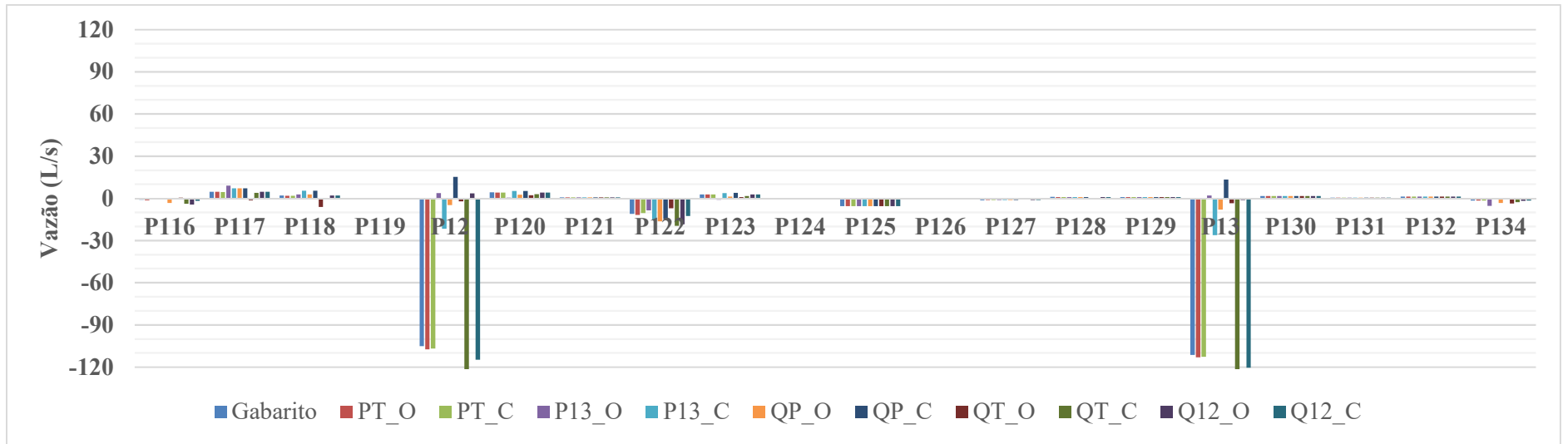
**APÊNDICE AN – Vazões encontradas na Calibração do C de Hazen-Williams com C
inicial de 100 m^{0,367}/s: rede C-Town**



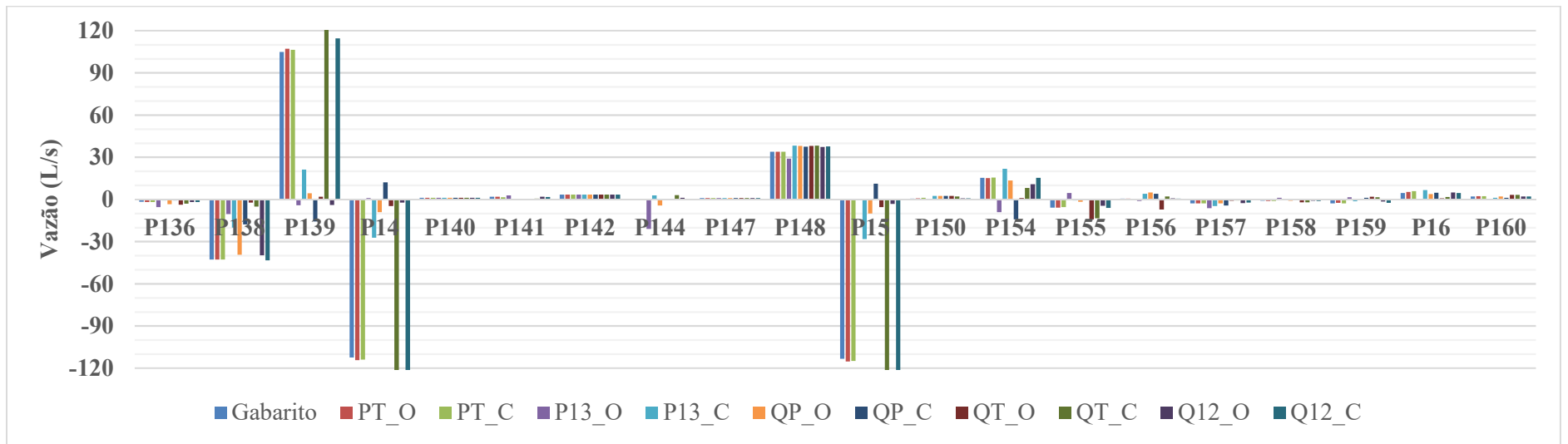
Fonte: Elaborado pelo autor



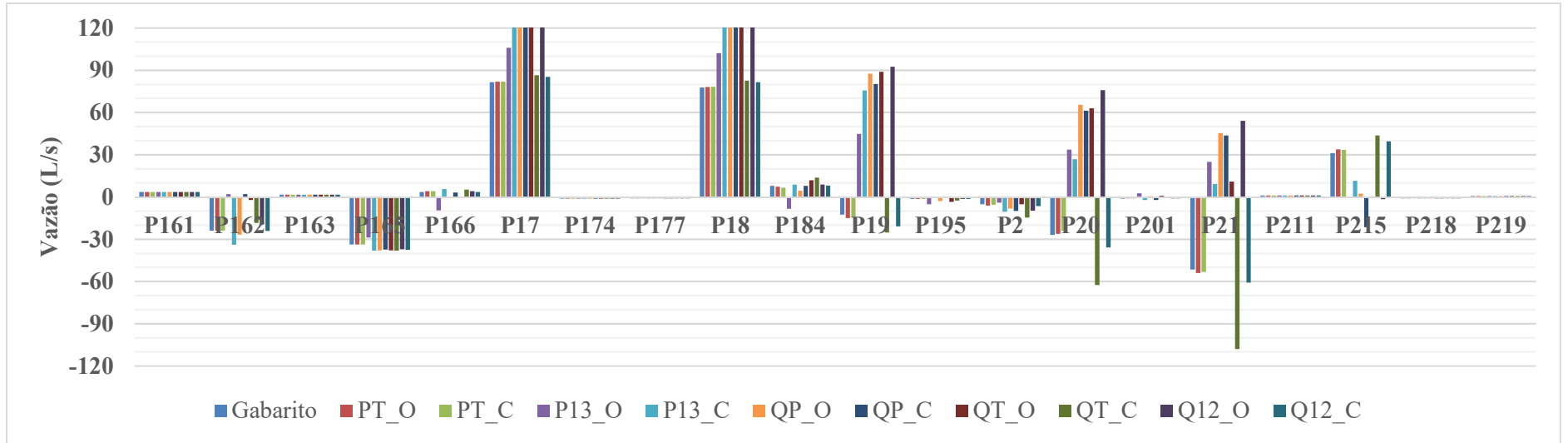
Fonte: Elaborado pelo autor



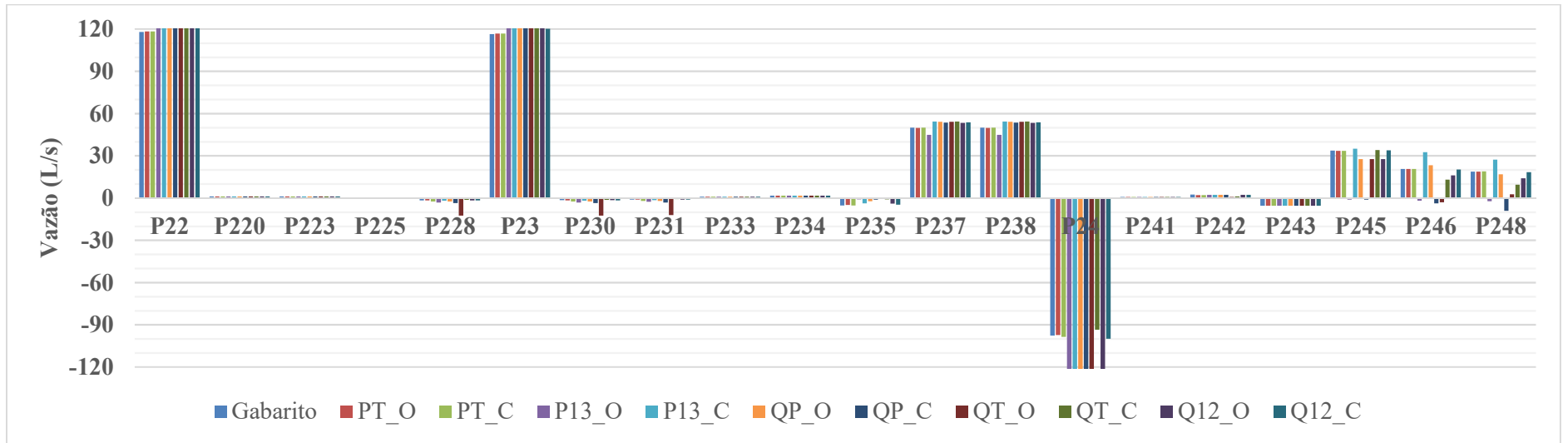
Fonte: Elaborado pelo autor



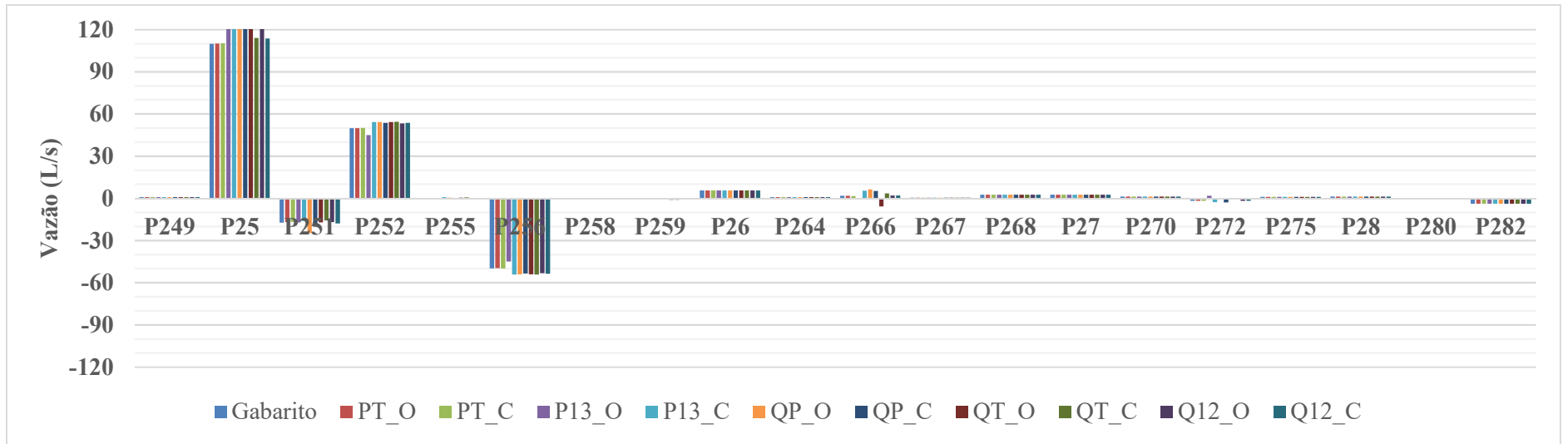
Fonte: Elaborado pelo autor



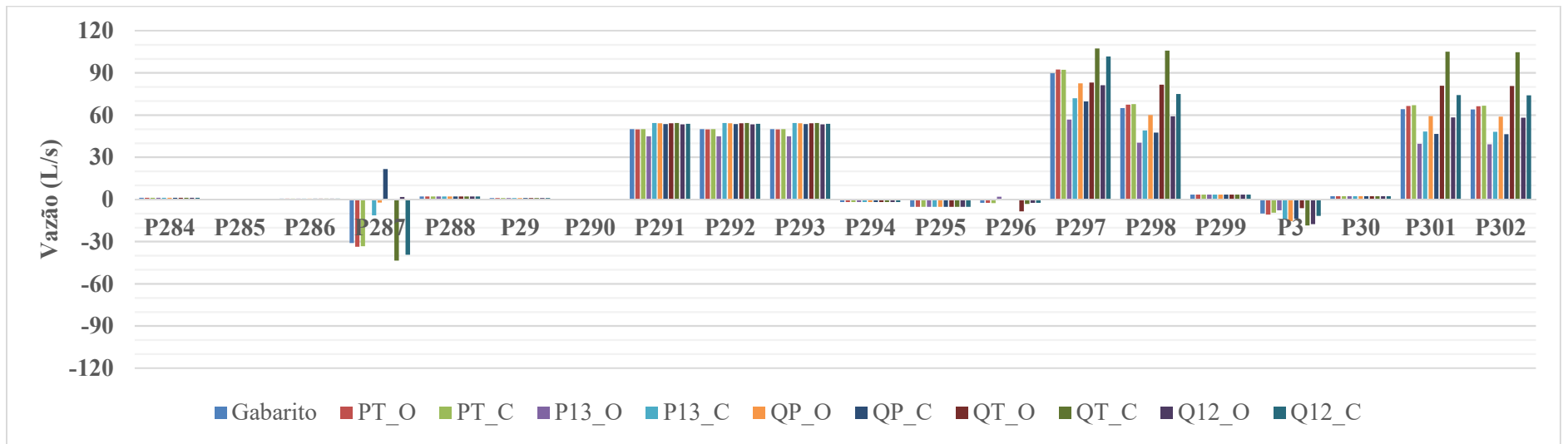
Fonte: Elaborado pelo autor



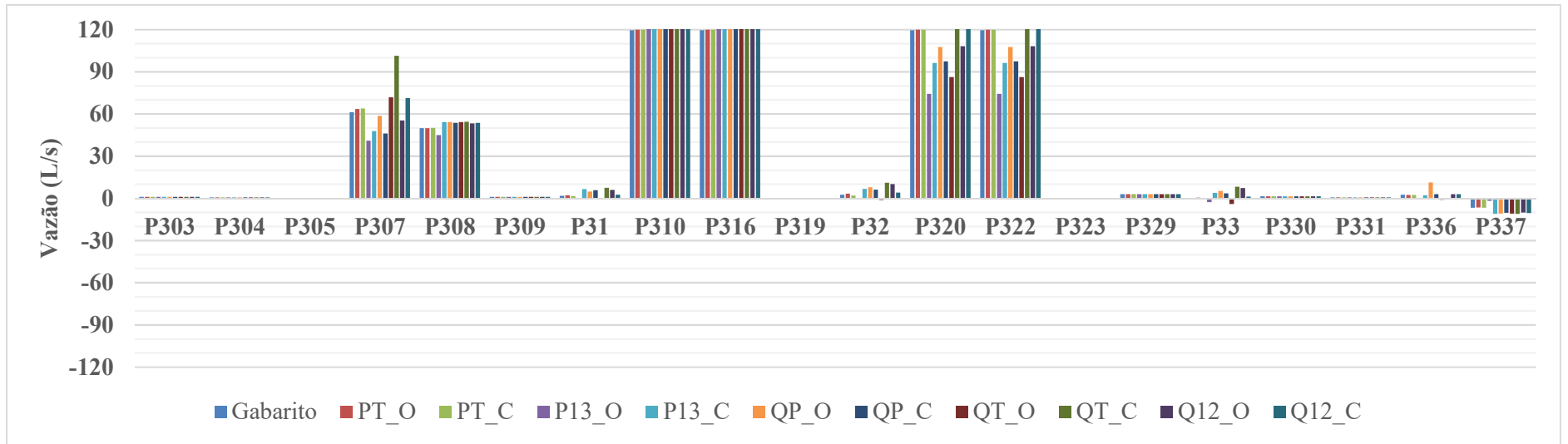
Fonte: Elaborado pelo autor



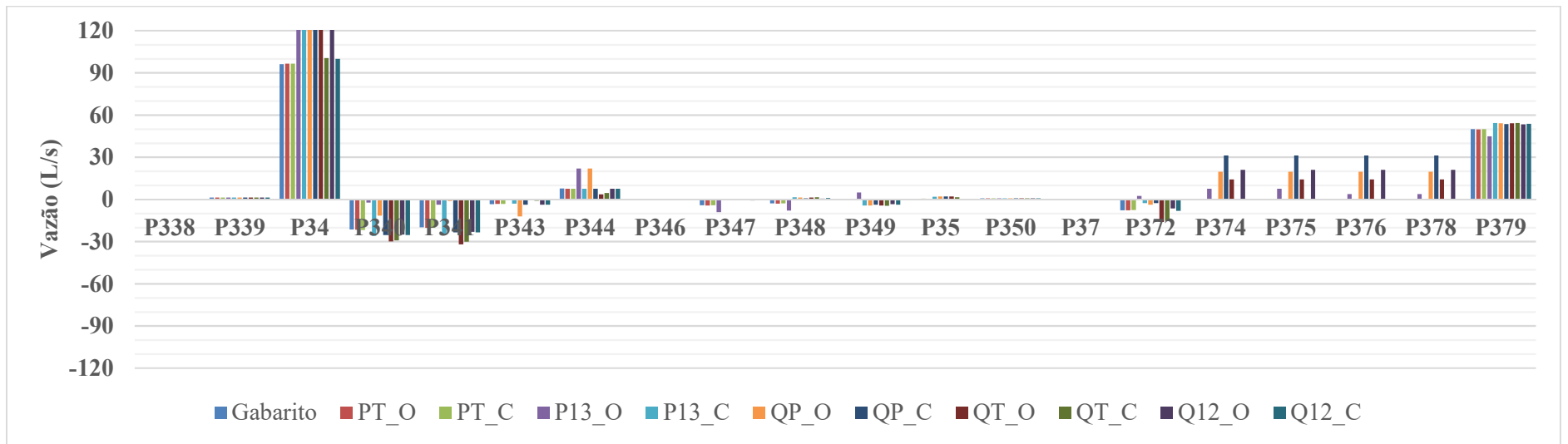
Fonte: Elaborado pelo autor



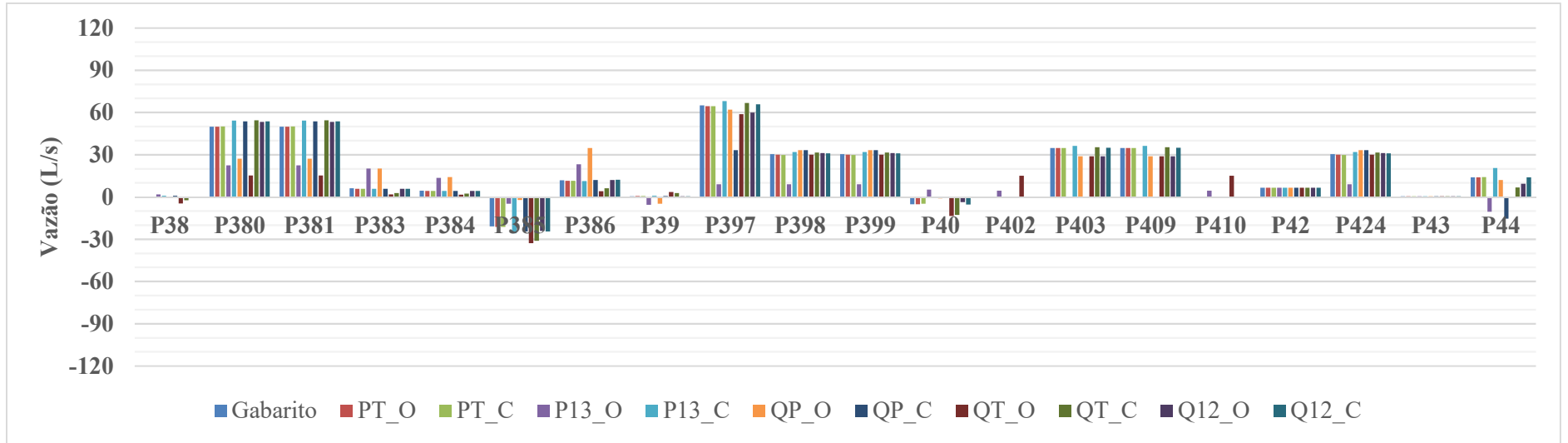
Fonte: Elaborado pelo autor



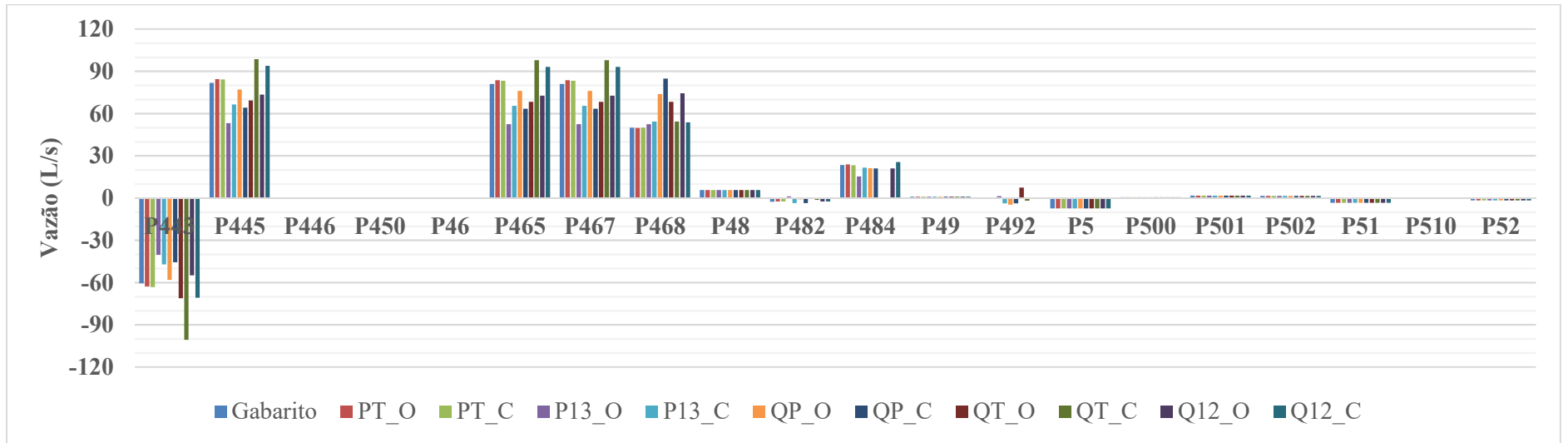
Fonte: Elaborado pelo autor



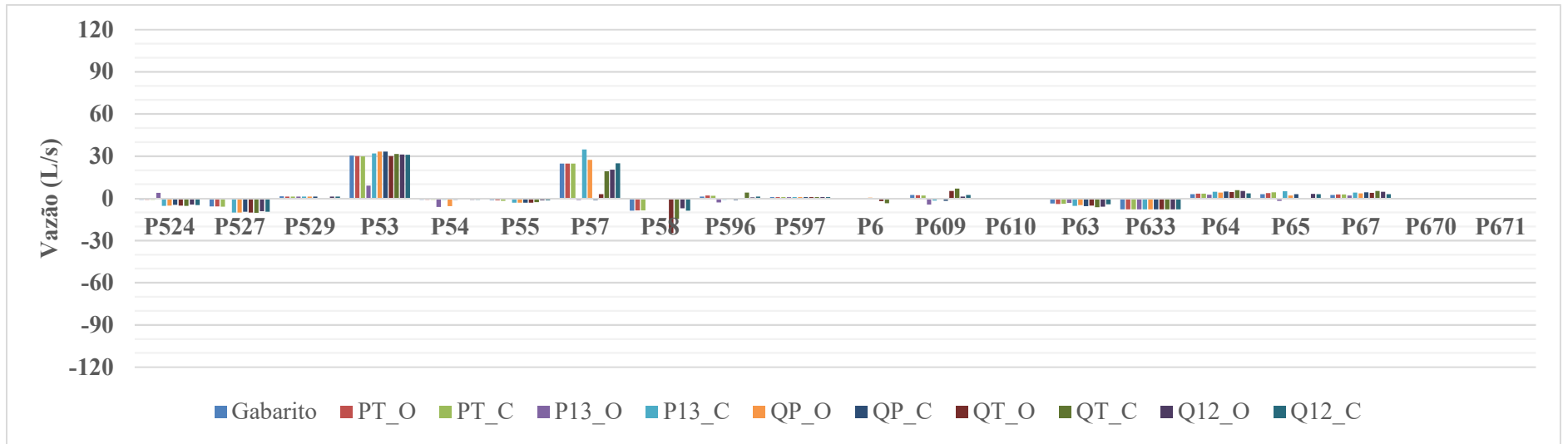
Fonte: Elaborado pelo autor



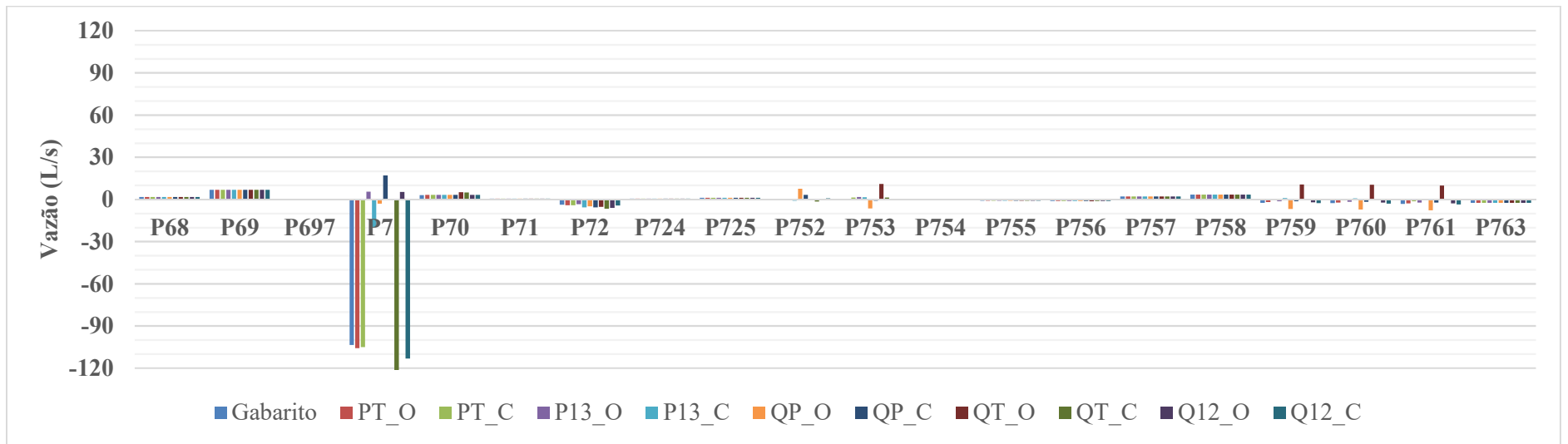
Fonte: Elaborado pelo autor



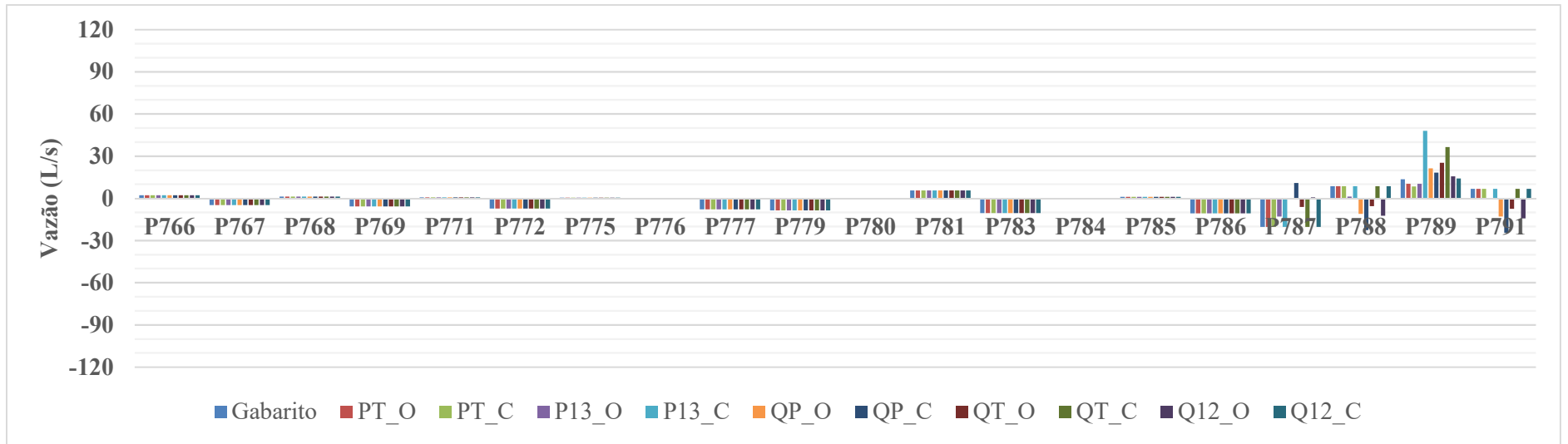
Fonte: Elaborado pelo autor



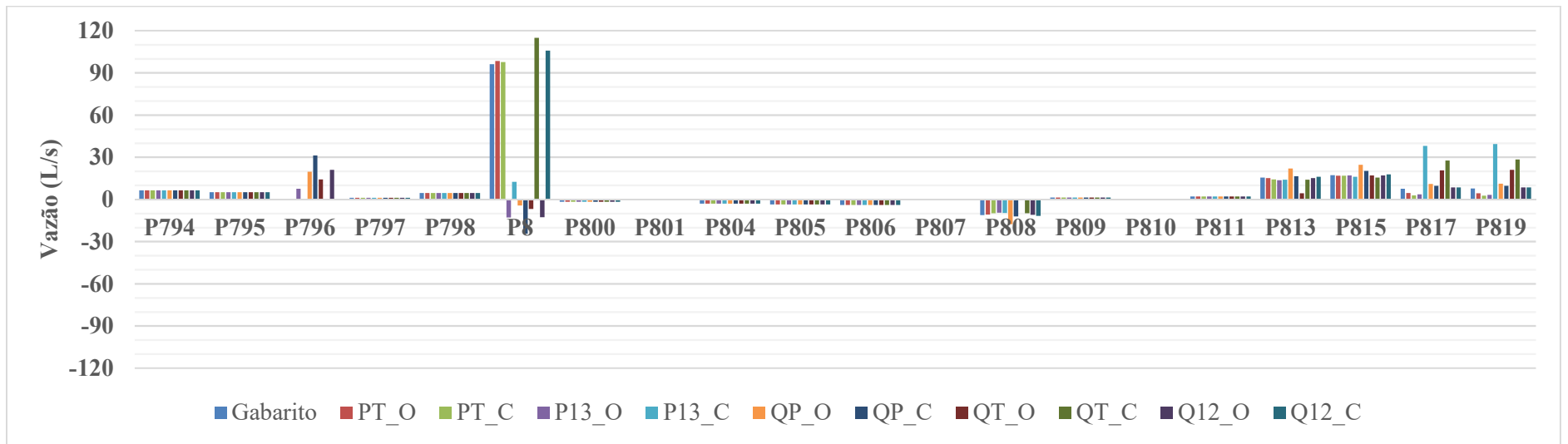
Fonte: Elaborado pelo autor



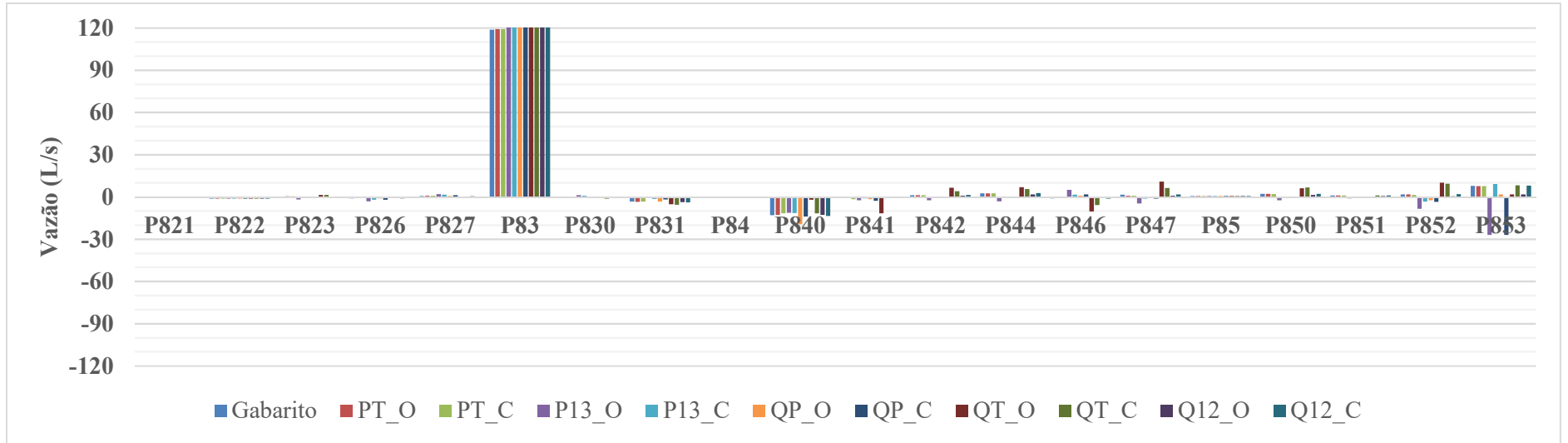
Fonte: Elaborado pelo autor



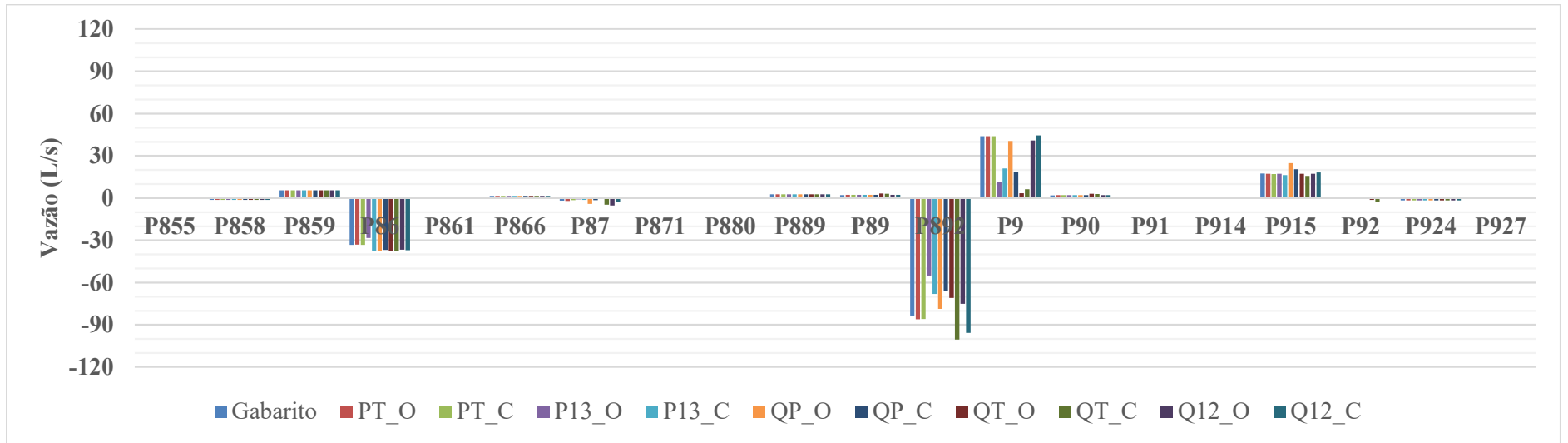
Fonte: Elaborado pelo autor



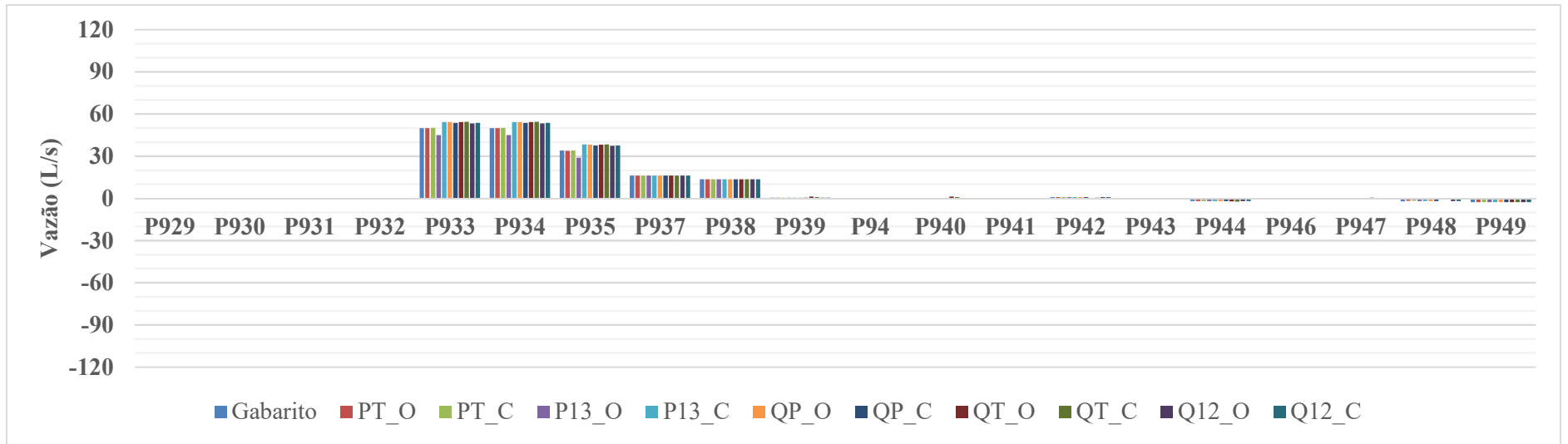
Fonte: Elaborado pelo autor



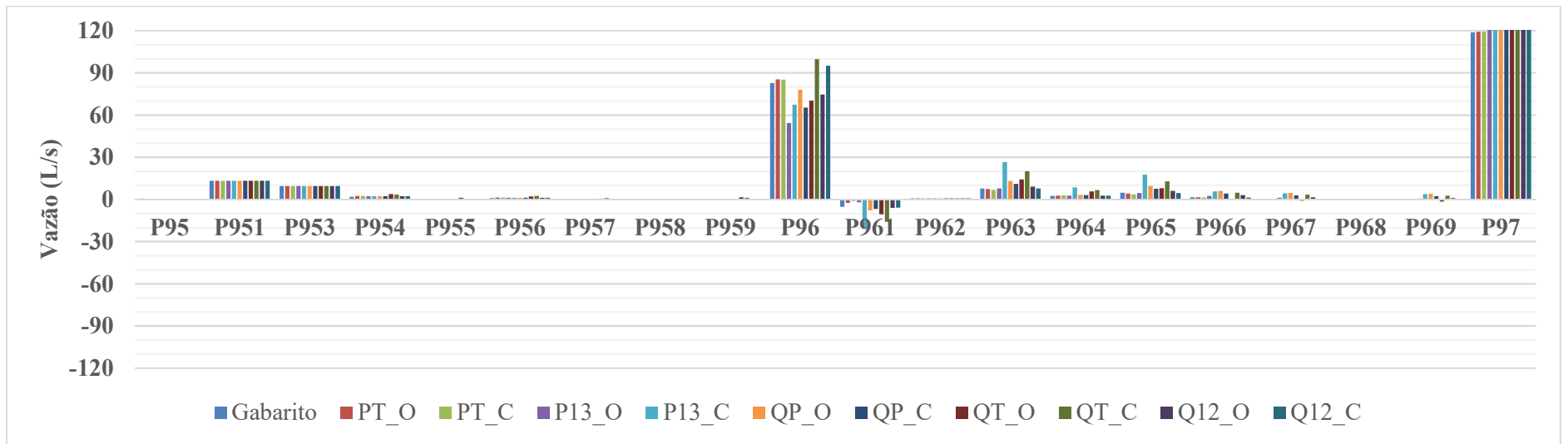
Fonte: Elaborado pelo autor



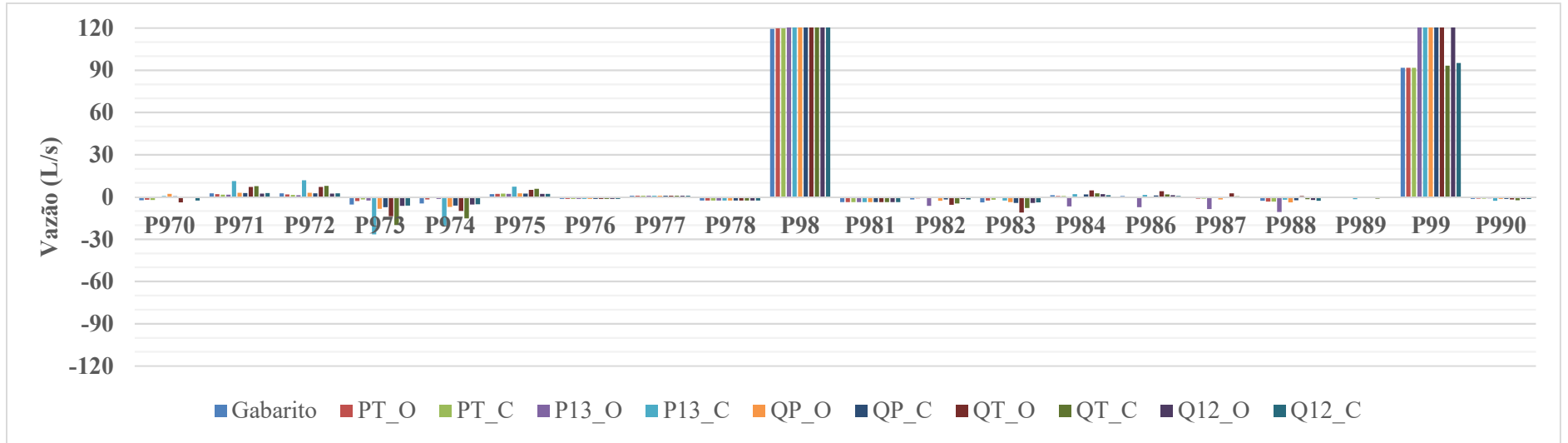
Fonte: Elaborado pelo autor



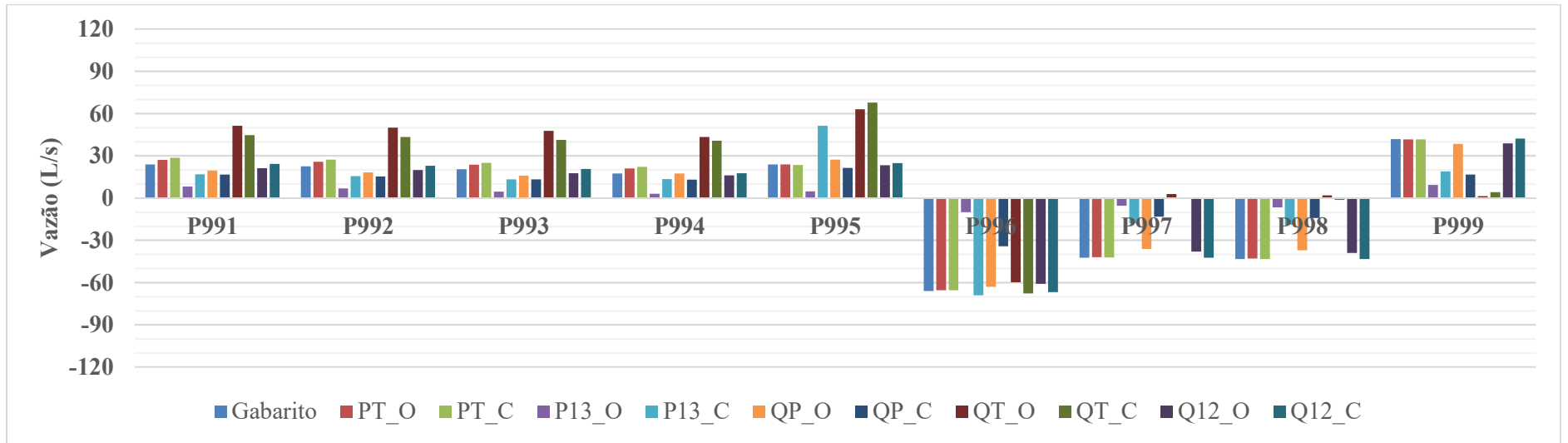
Fonte: Elaborado pelo autor



Fonte: Elaborado pelo autor

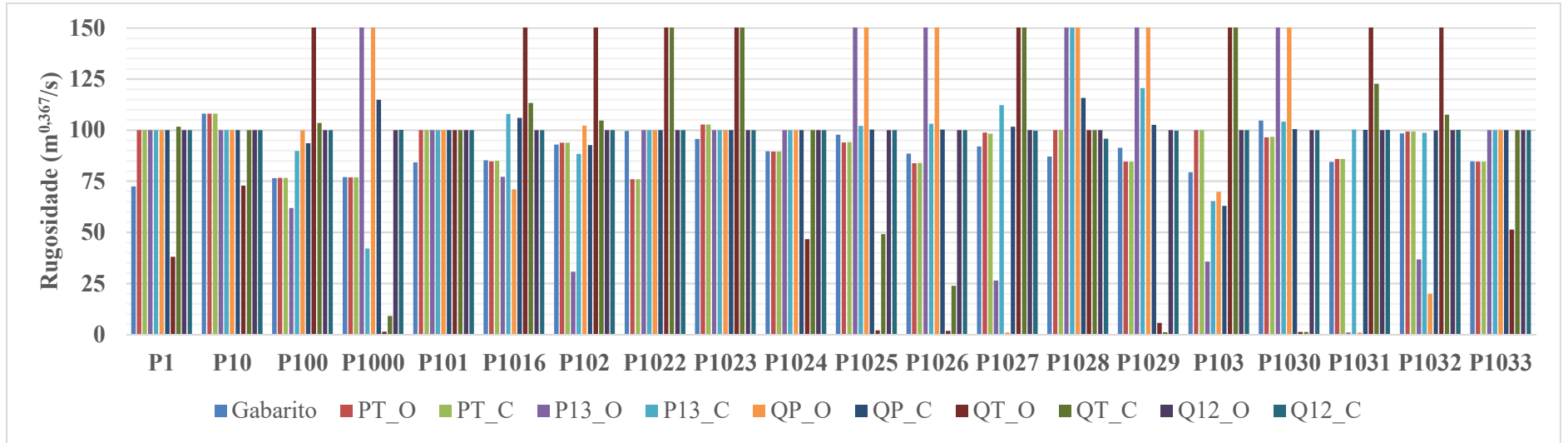


Fonte: Elaborado pelo autor

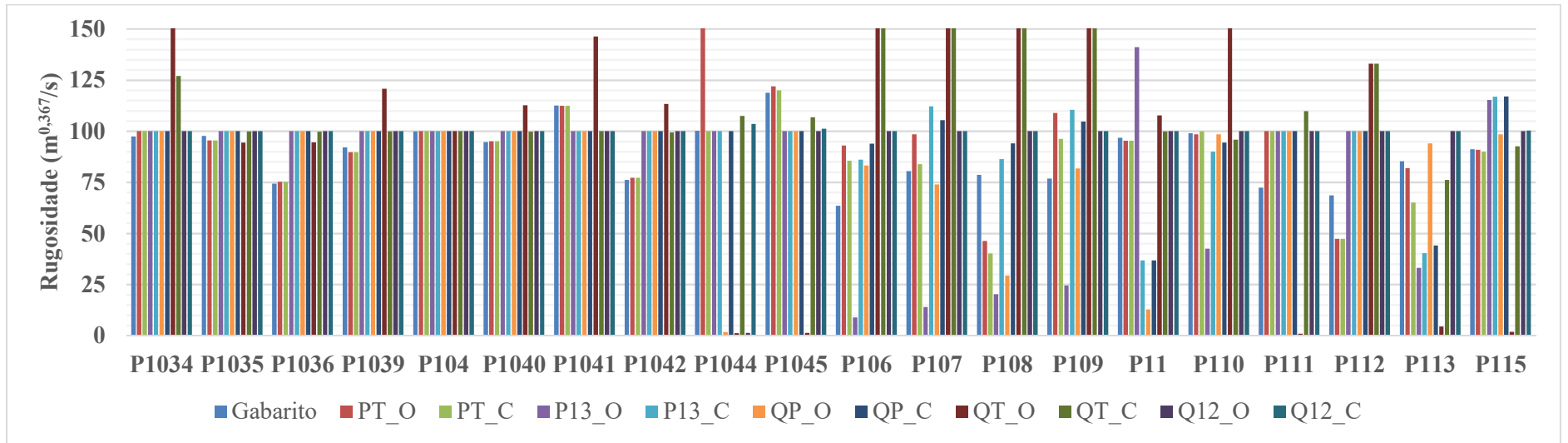


Fonte: Elaborado pelo autor

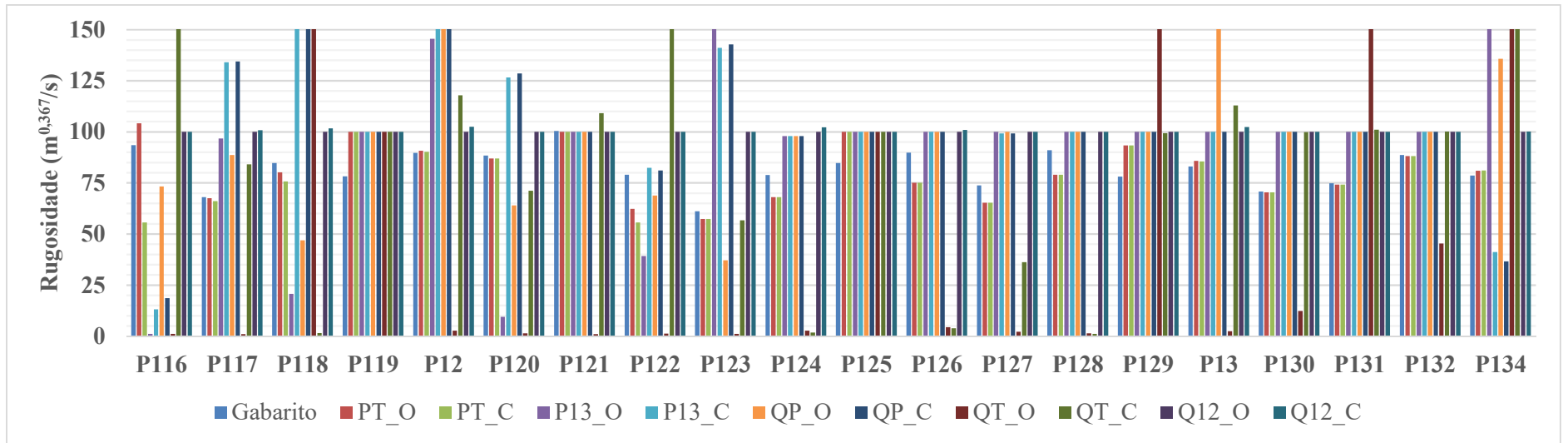
**APÊNDICE AO – Rugosidades C encontradas na Calibração do C de Hazen-Williams
com C inicial de $100 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$: rede C-Town**



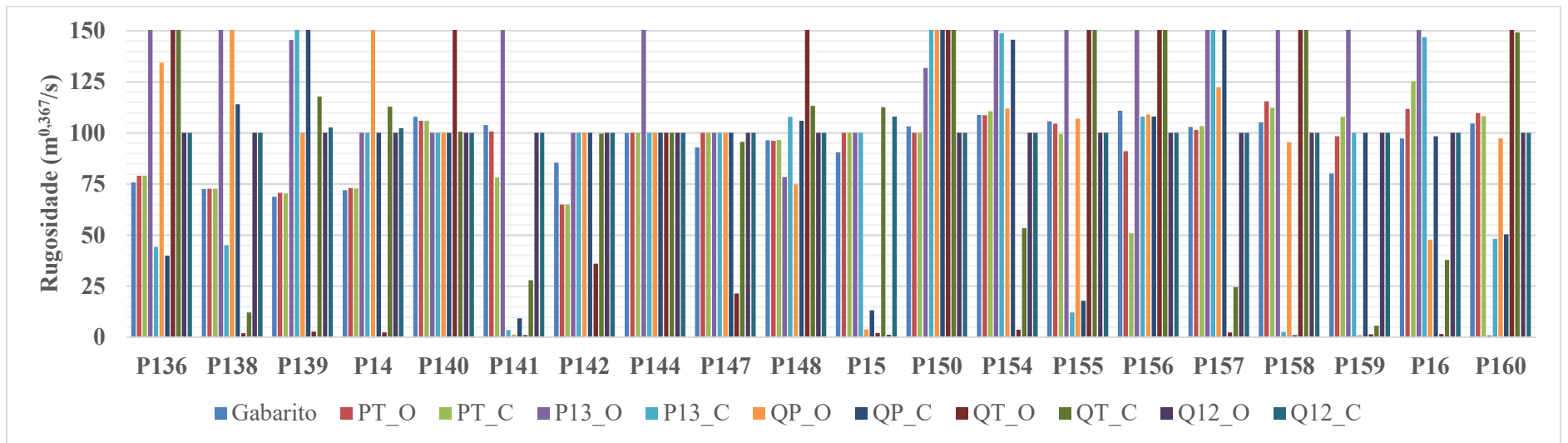
Fonte: Elaborado pelo autor



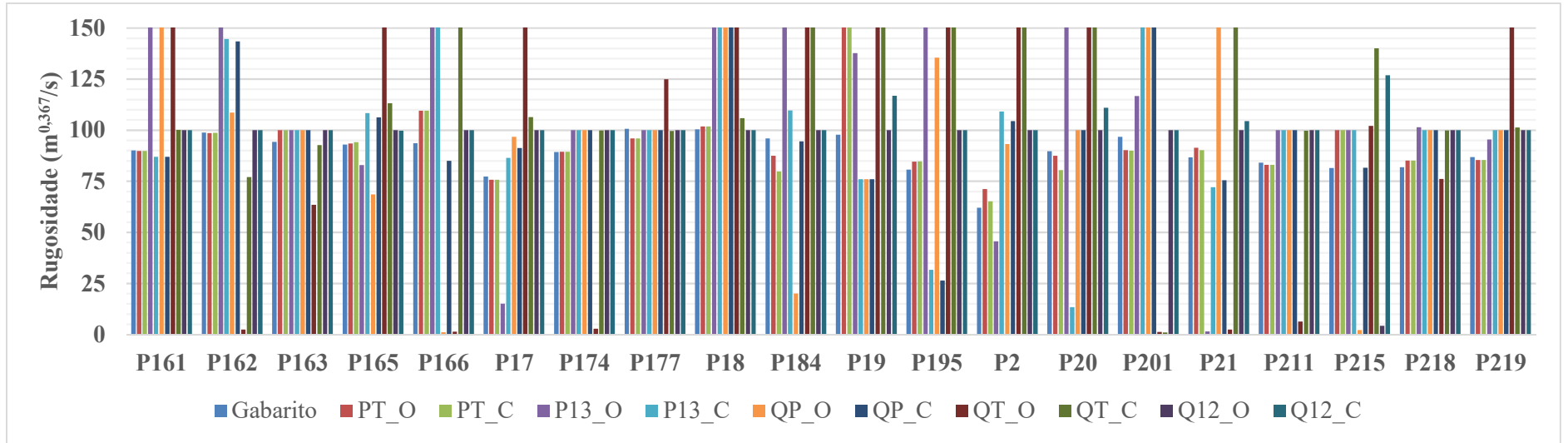
Fonte: Elaborado pelo autor



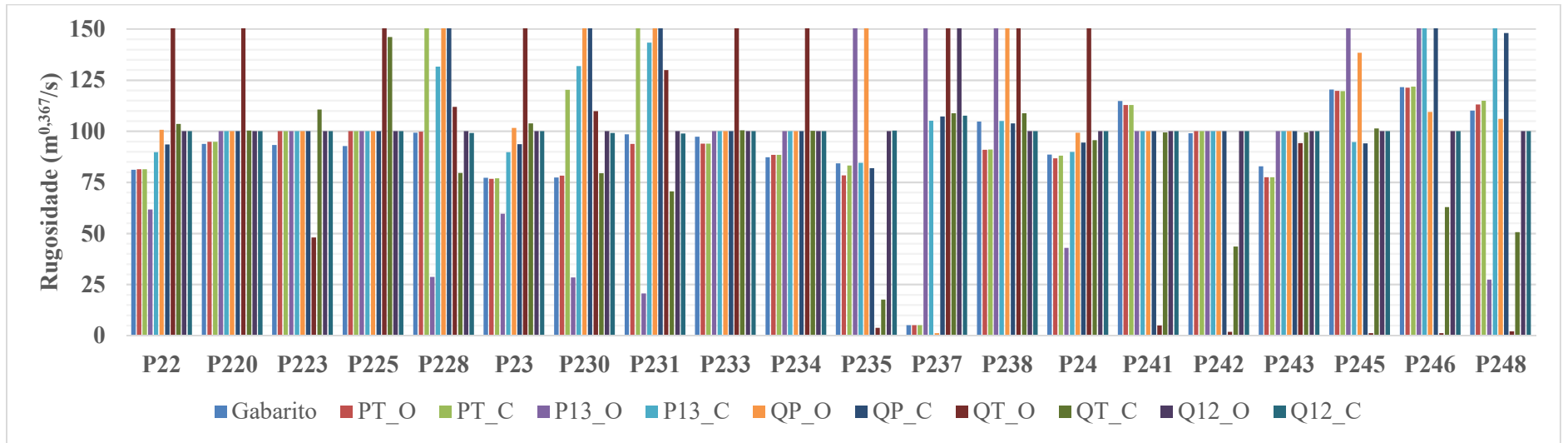
Fonte: Elaborado pelo autor



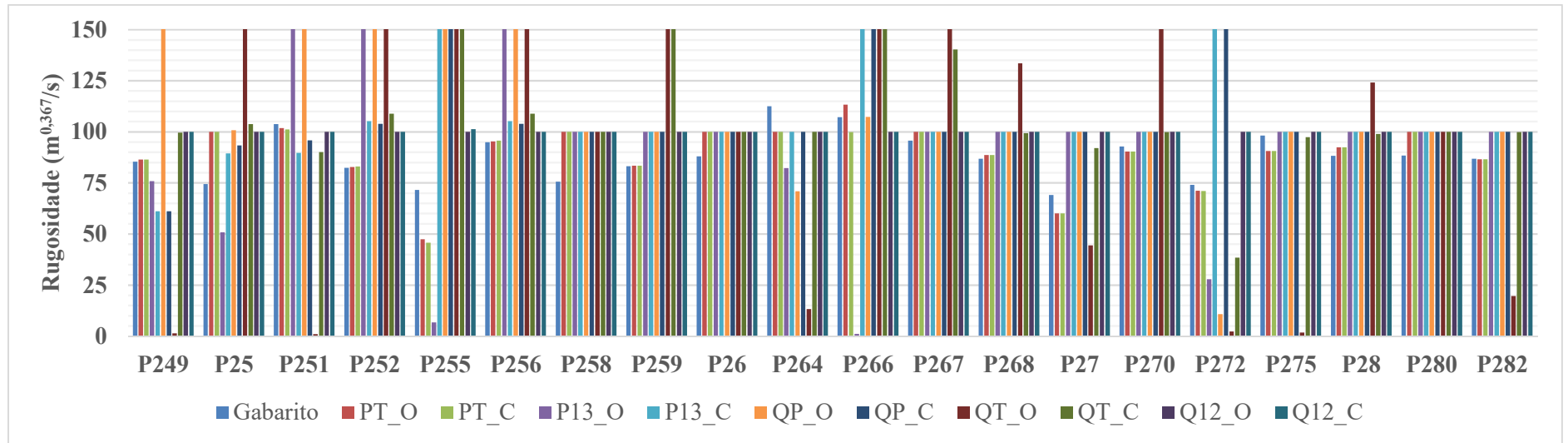
Fonte: Elaborado pelo autor



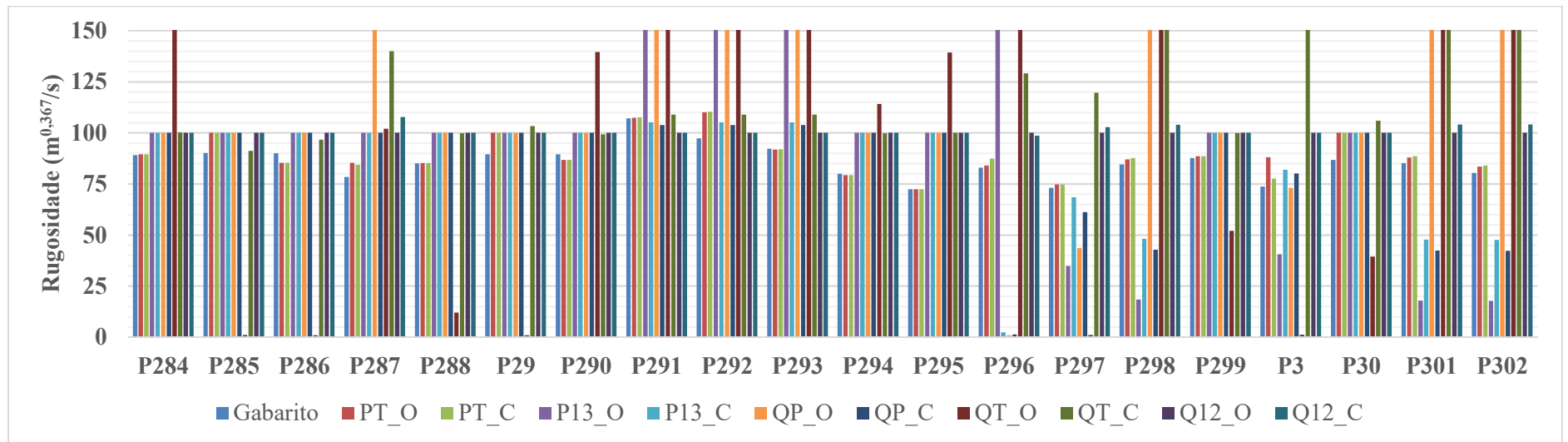
Fonte: Elaborado pelo autor



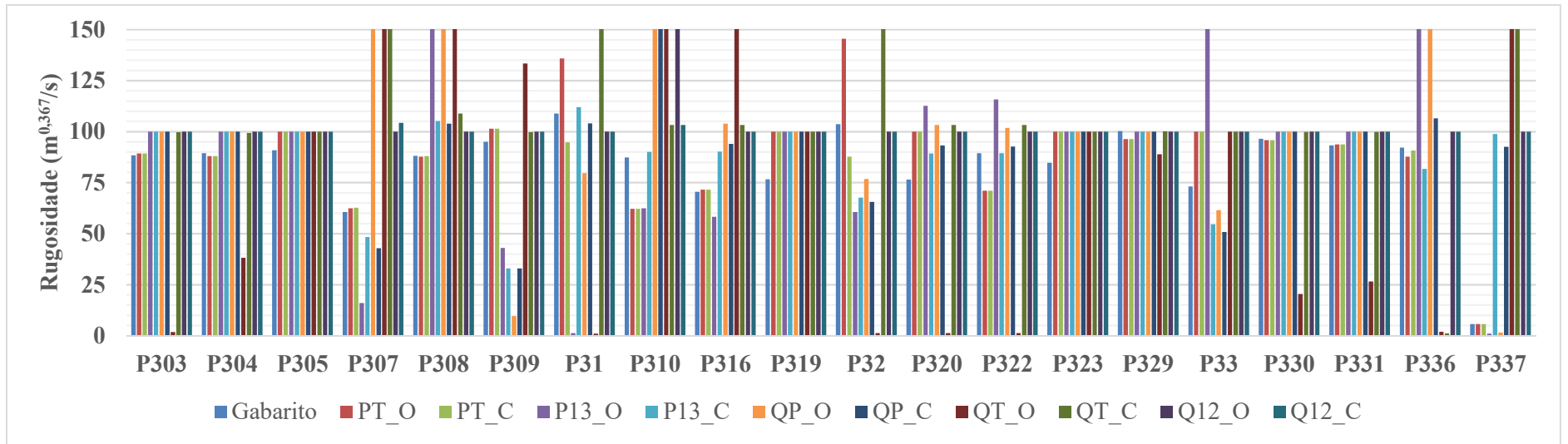
Fonte: Elaborado pelo autor



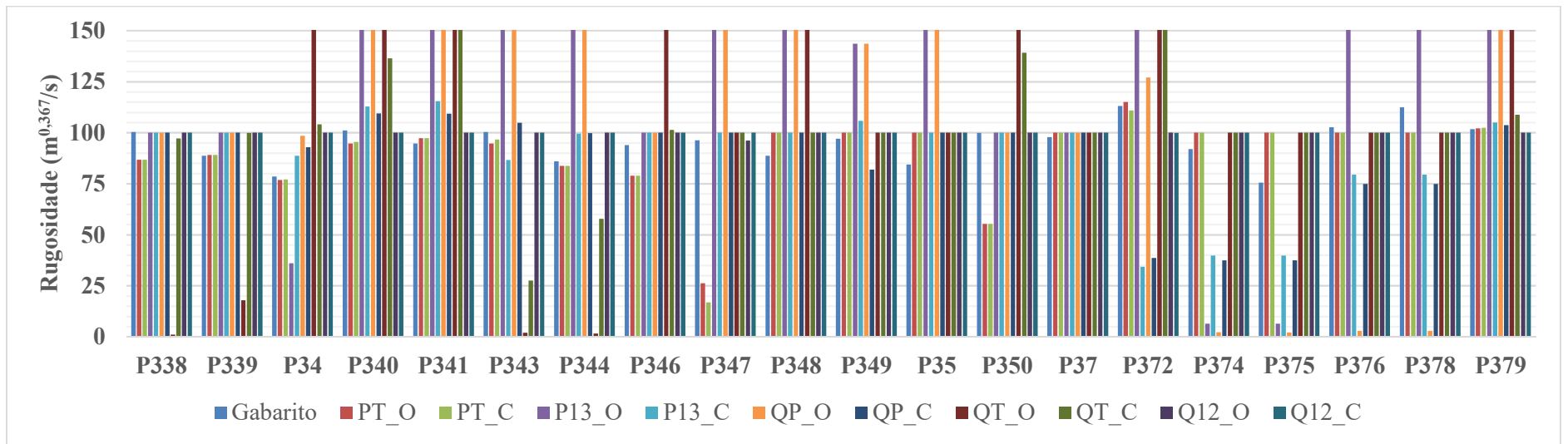
Fonte: Elaborado pelo autor



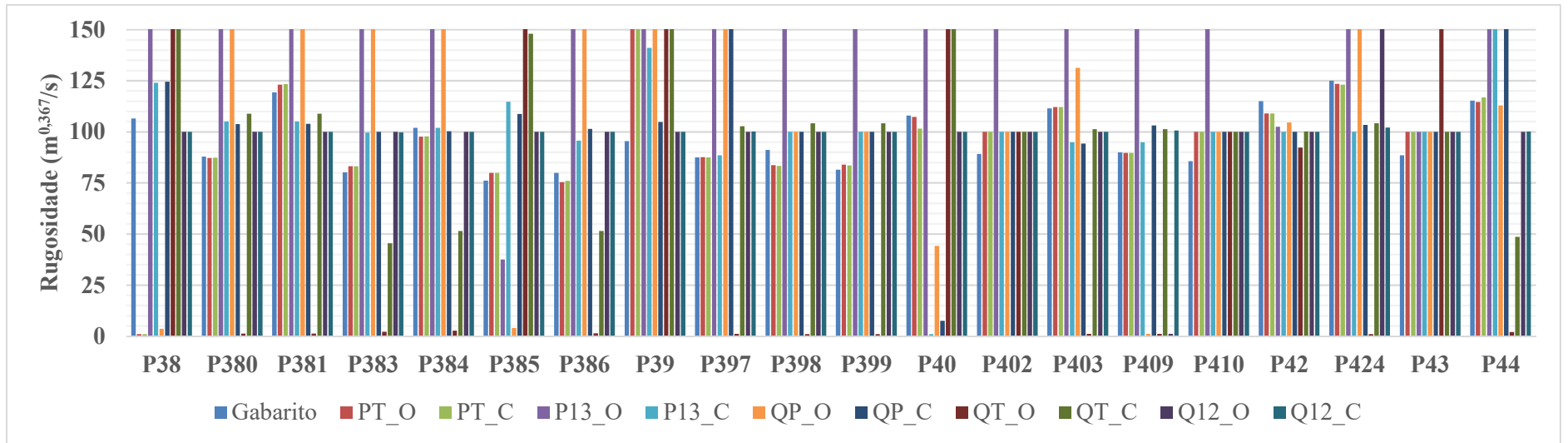
Fonte: Elaborado pelo autor



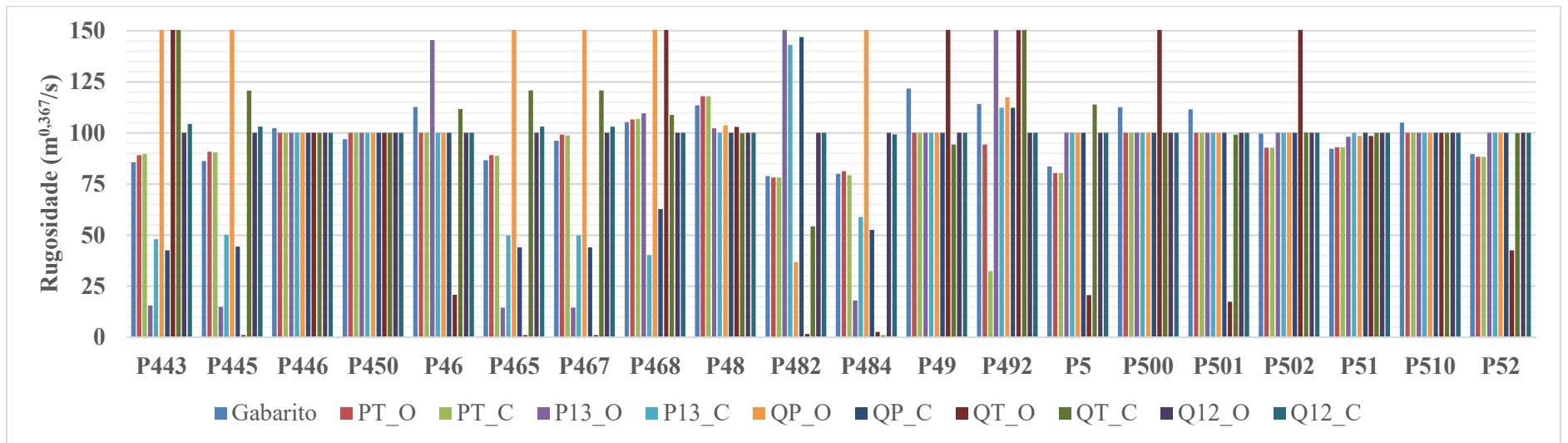
Fonte: Elaborado pelo autor



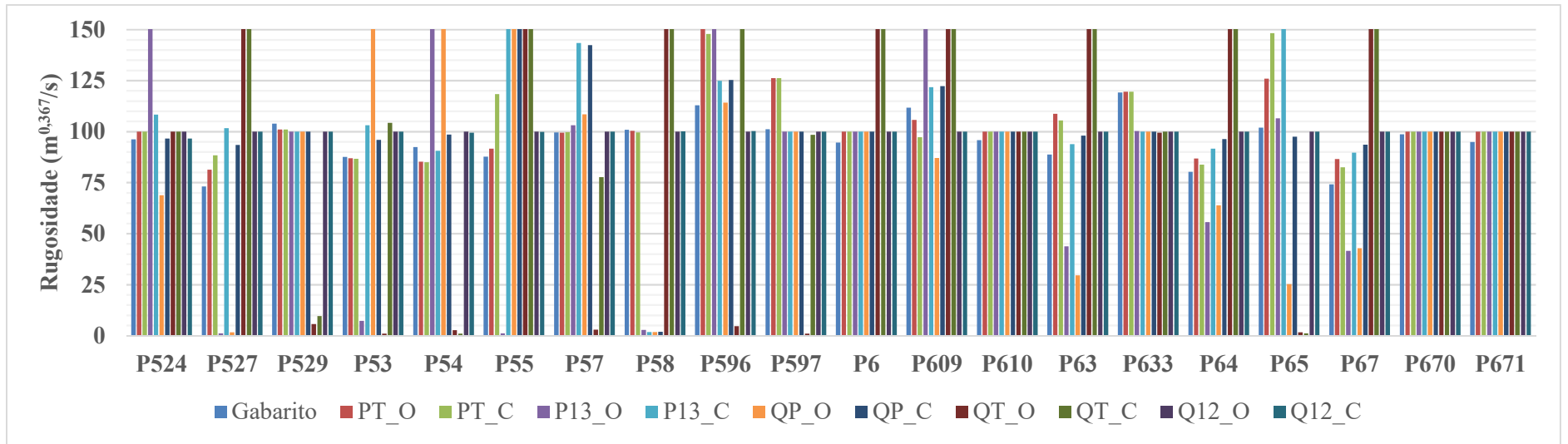
Fonte: Elaborado pelo autor



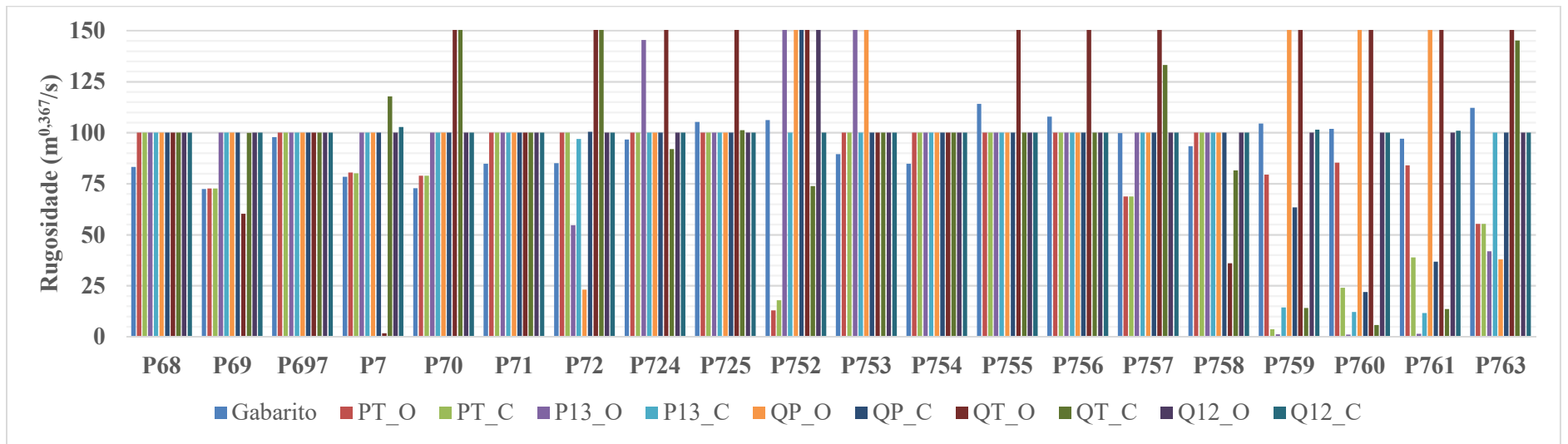
Fonte: Elaborado pelo autor



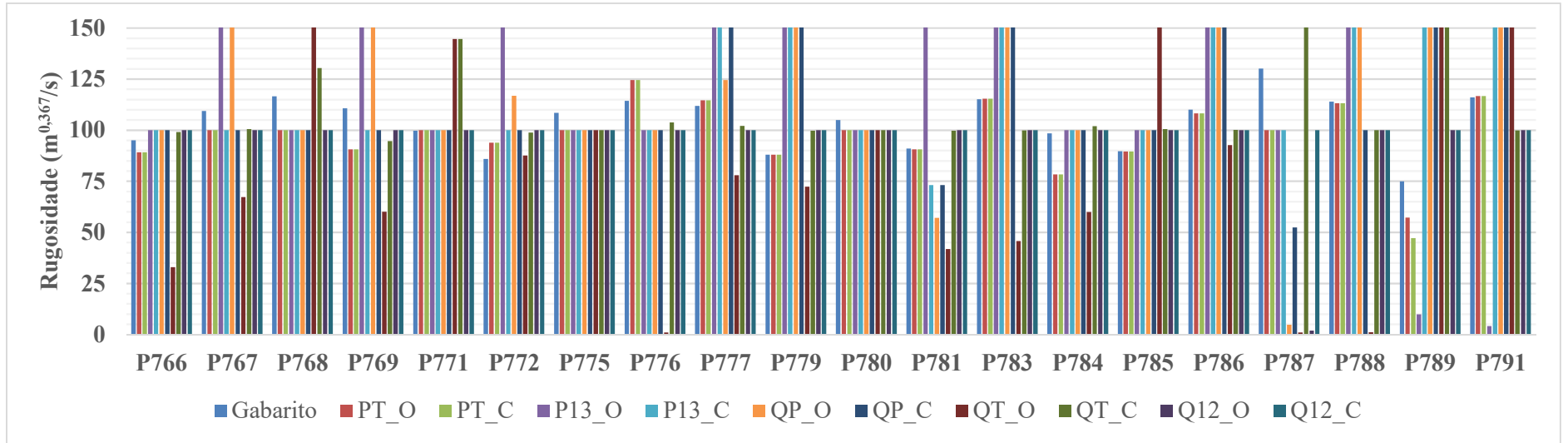
Fonte: Elaborado pelo autor



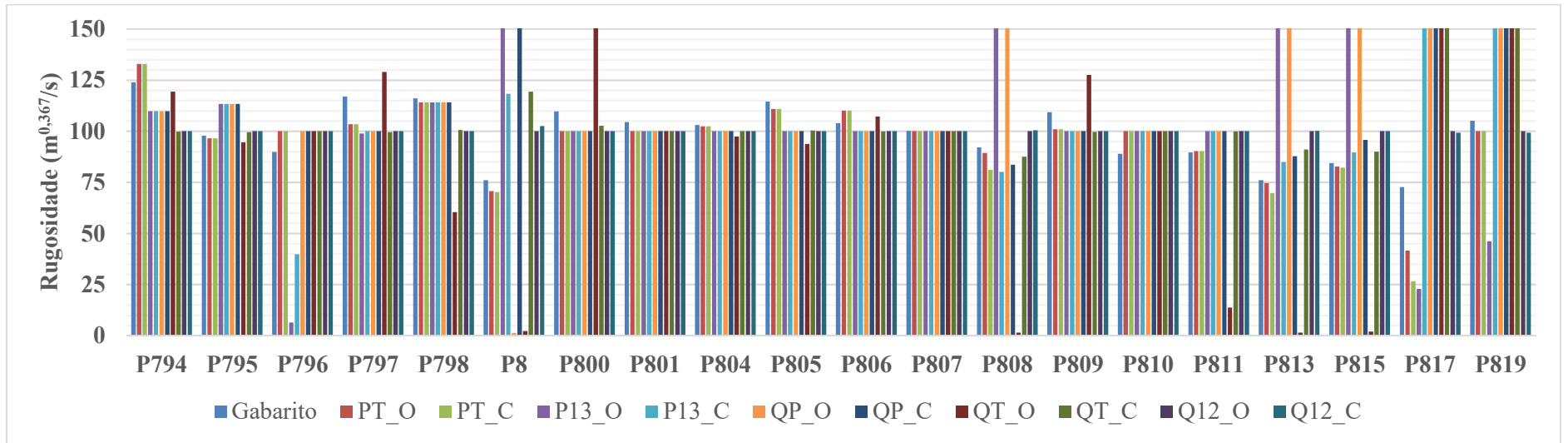
Fonte: Elaborado pelo autor



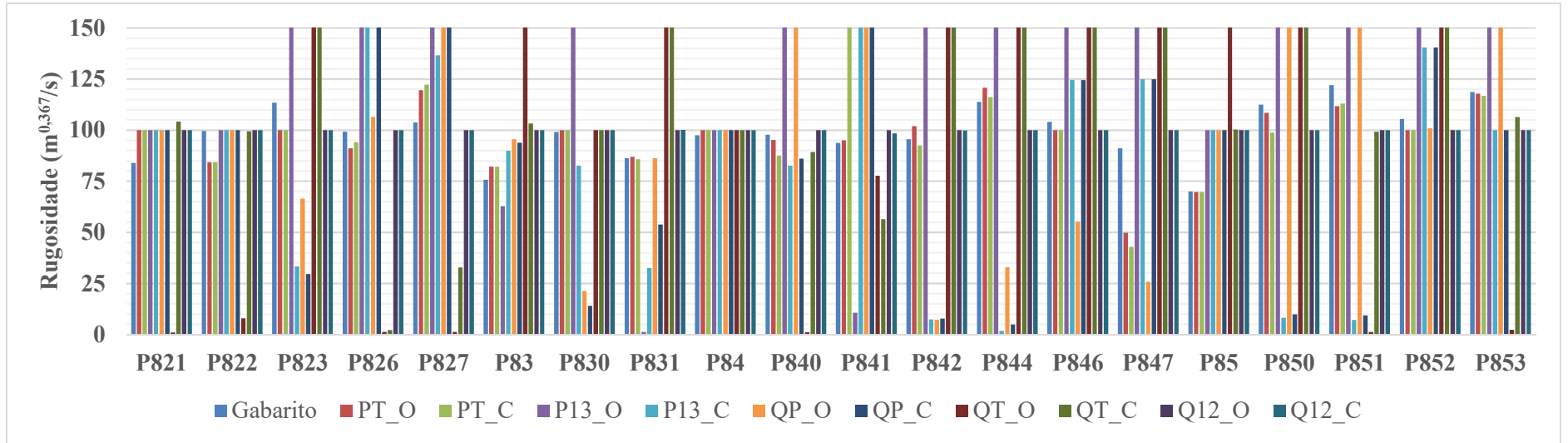
Fonte: Elaborado pelo autor



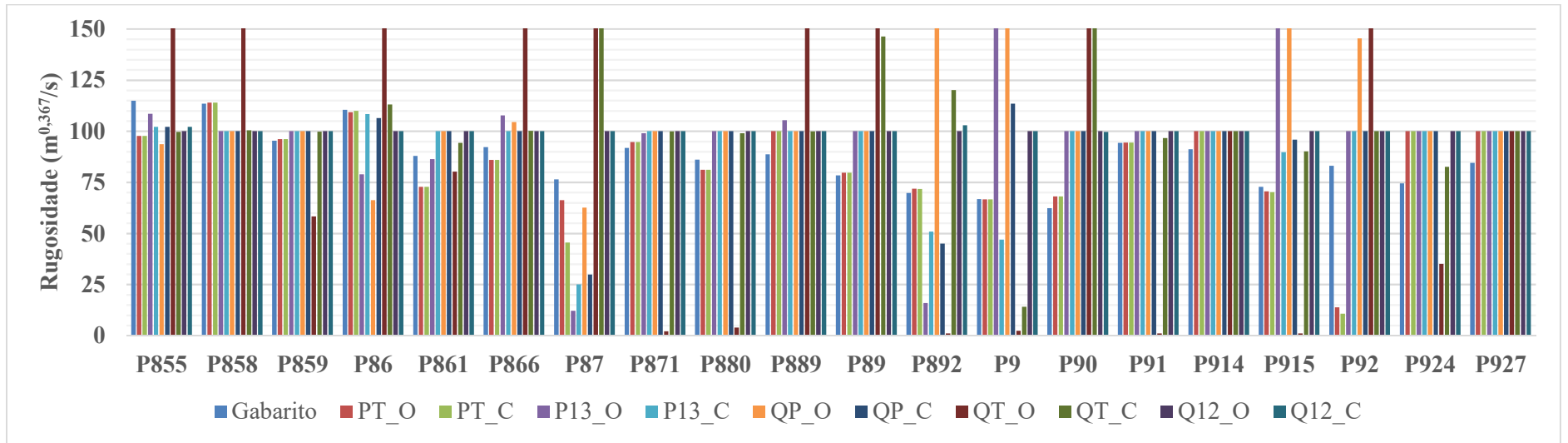
Fonte: Elaborado pelo autor



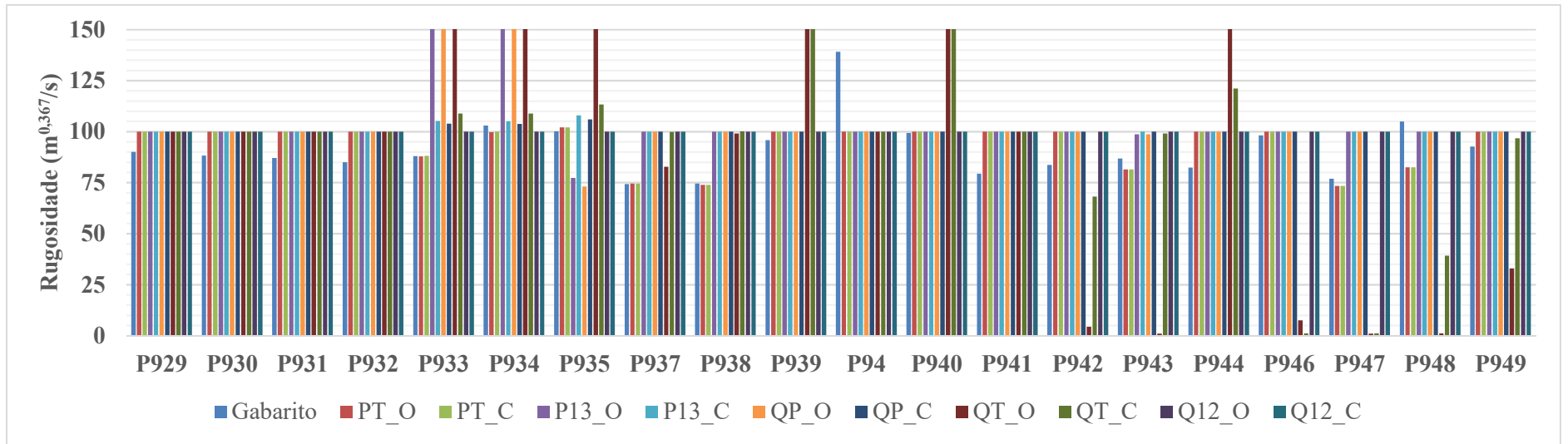
Fonte: Elaborado pelo autor



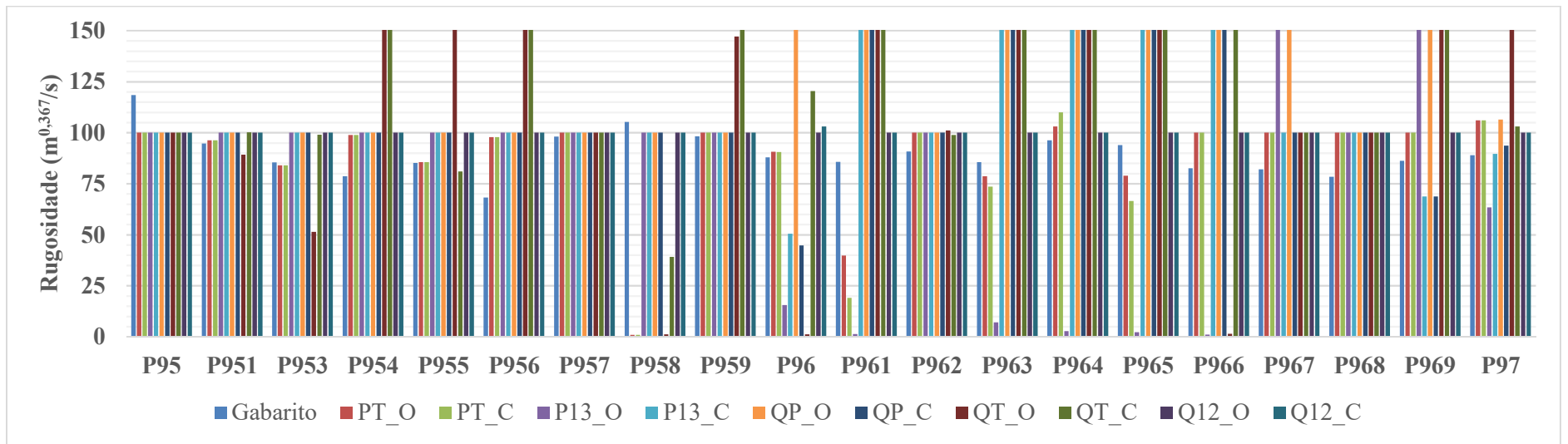
Fonte: Elaborado pelo autor



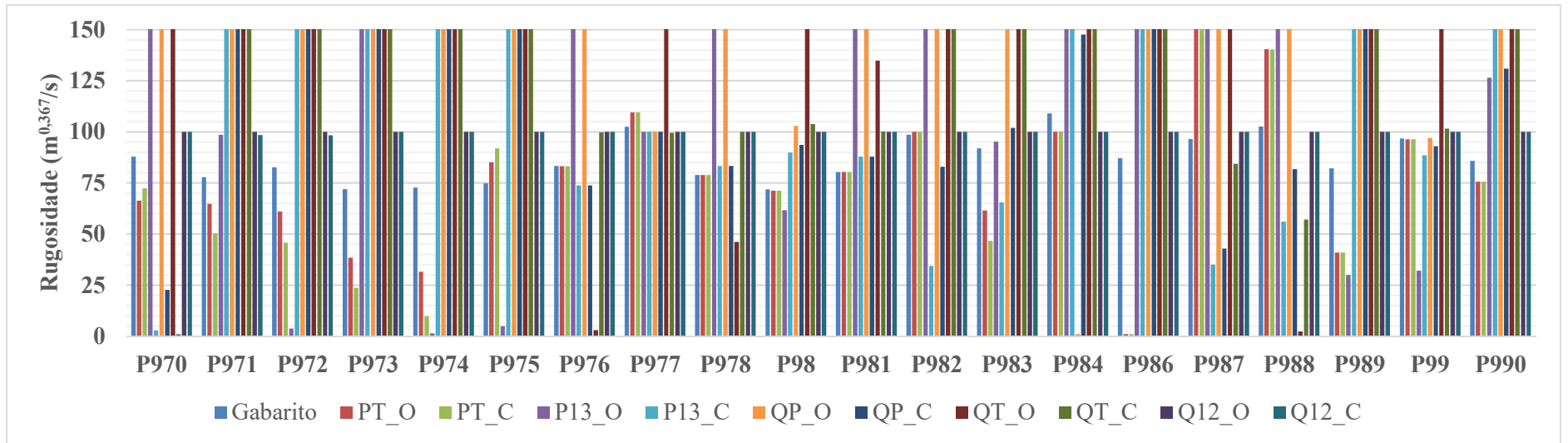
Fonte: Elaborado pelo autor



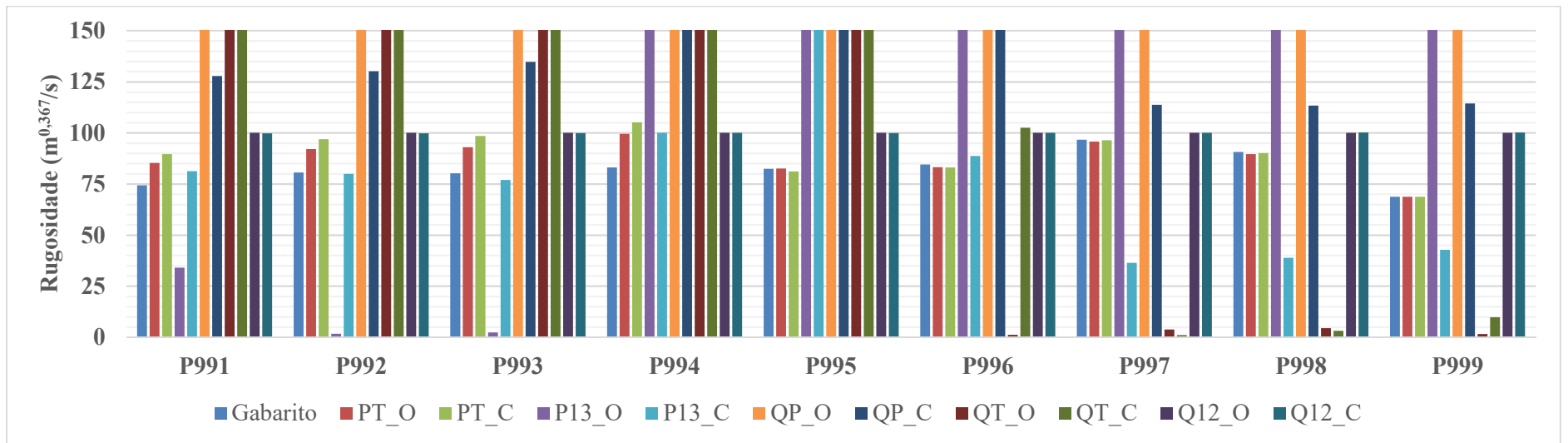
Fonte: Elaborado pelo autor



Fonte: Elaborado pelo autor

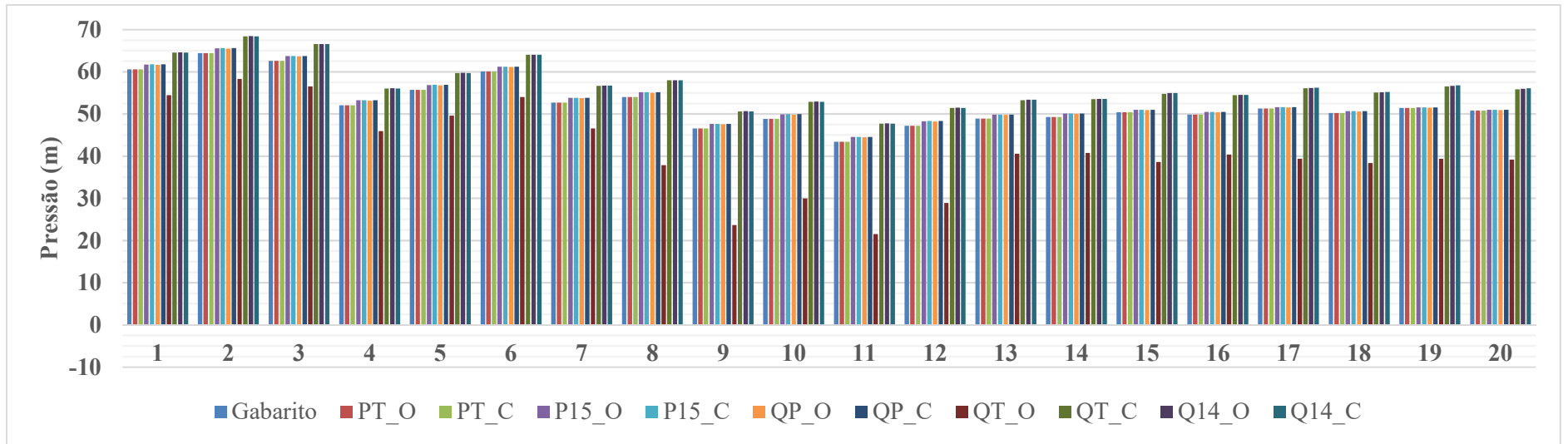


Fonte: Elaborado pelo autor

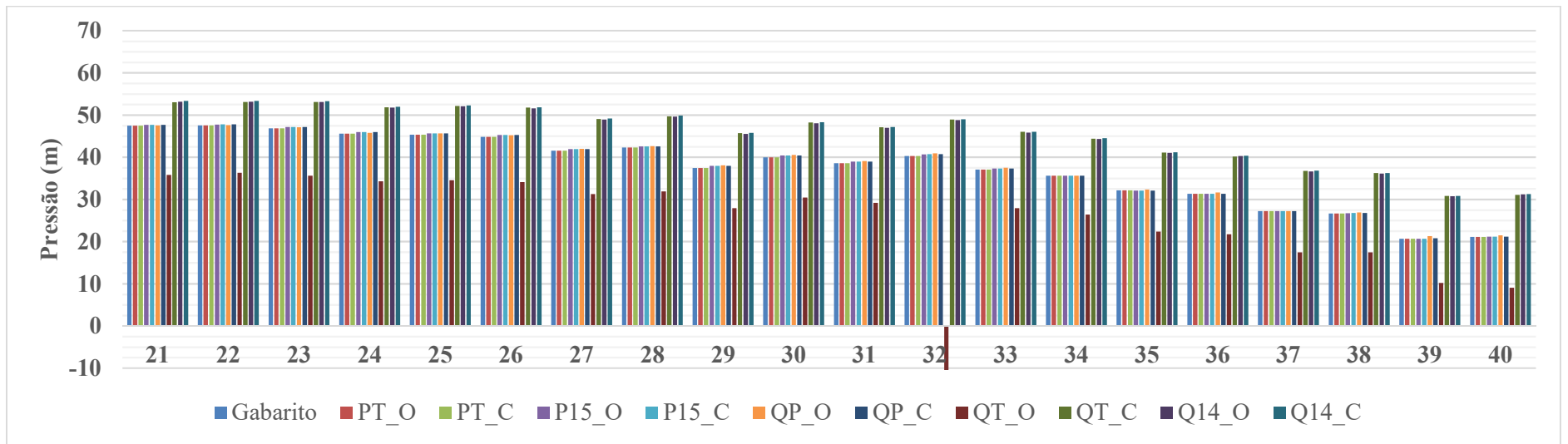


Fonte: Elaborado pelo autor

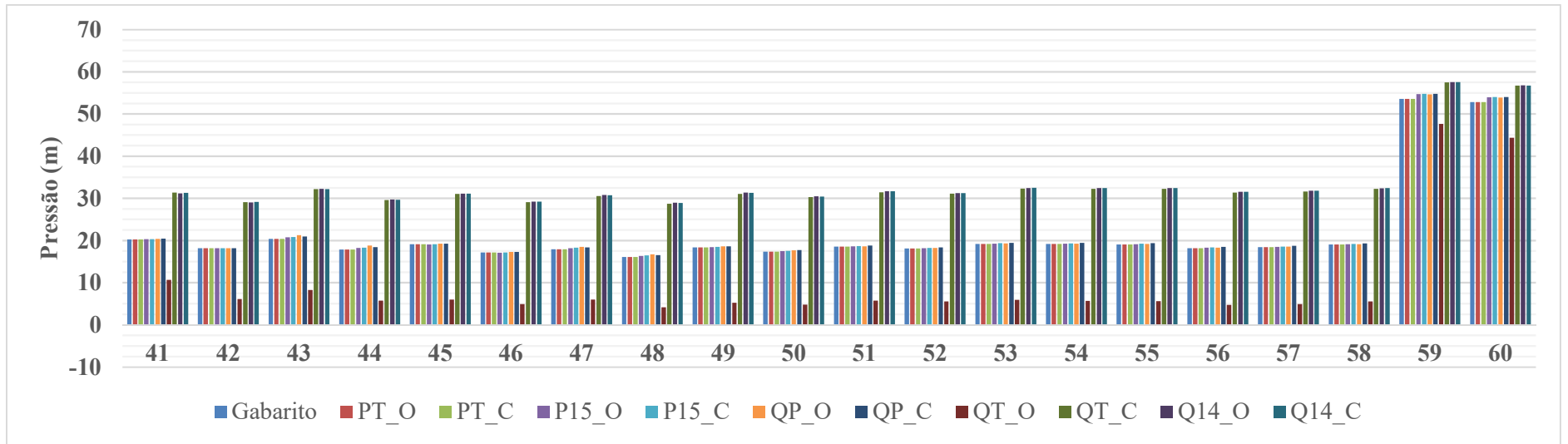
**APÊNDICE AP – Pressões encontradas na Calibração do C de Hazen-Williams com C
inicial de $150 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$: rede MIGHA**



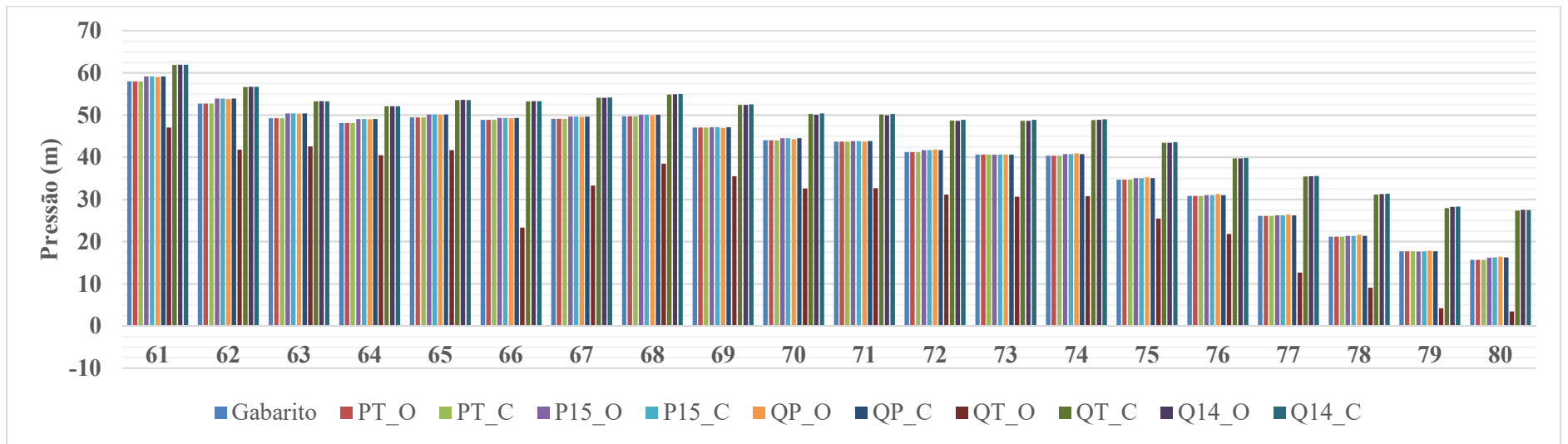
Fonte: Elaborado pelo autor



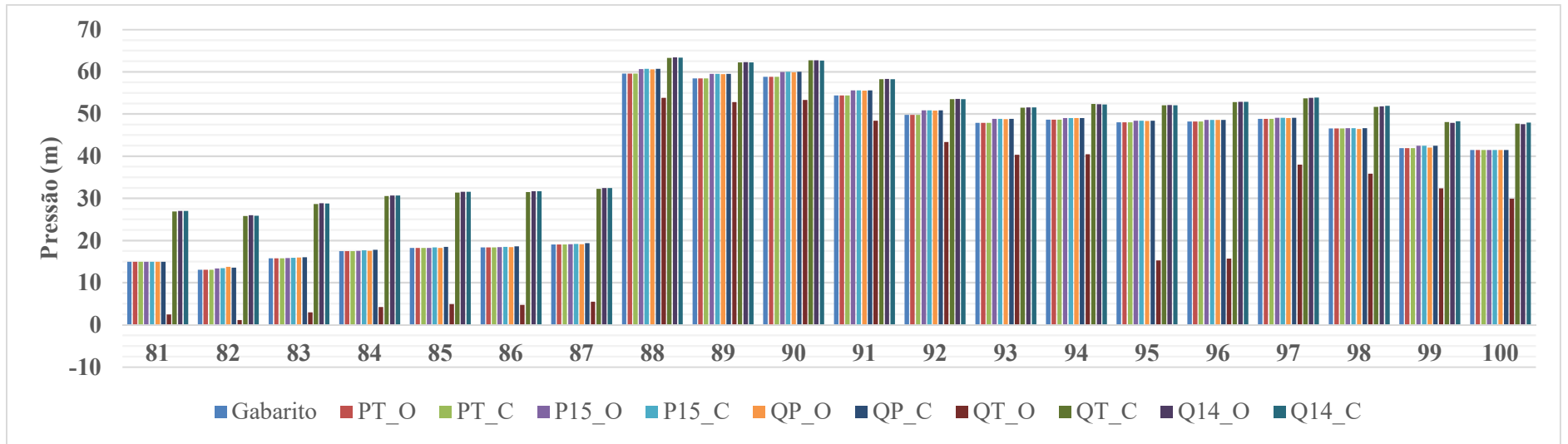
Fonte: Elaborado pelo autor



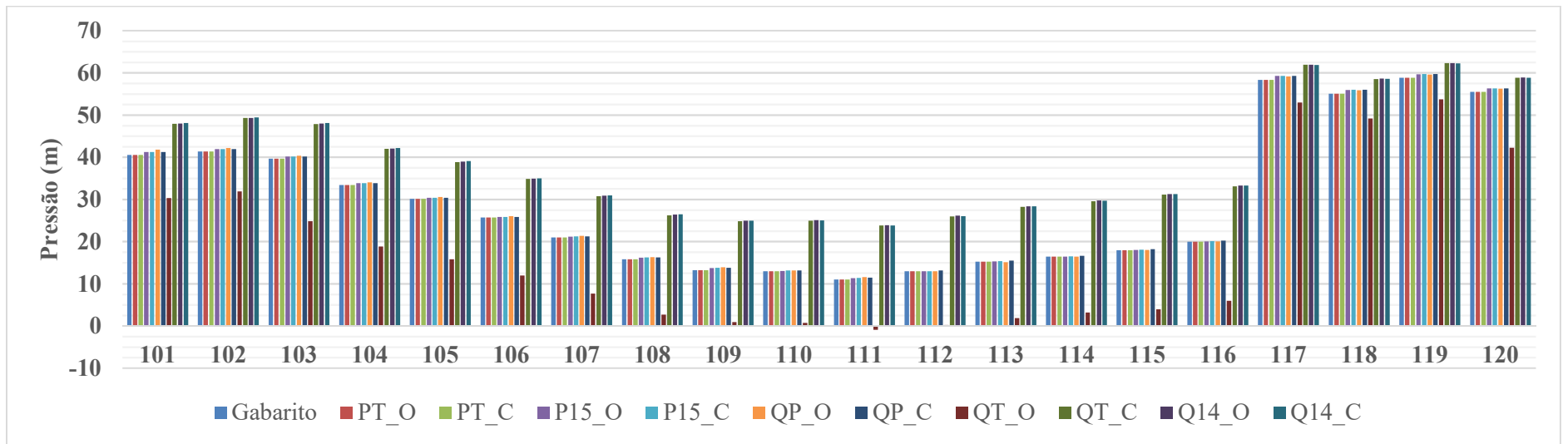
Fonte: Elaborado pelo autor



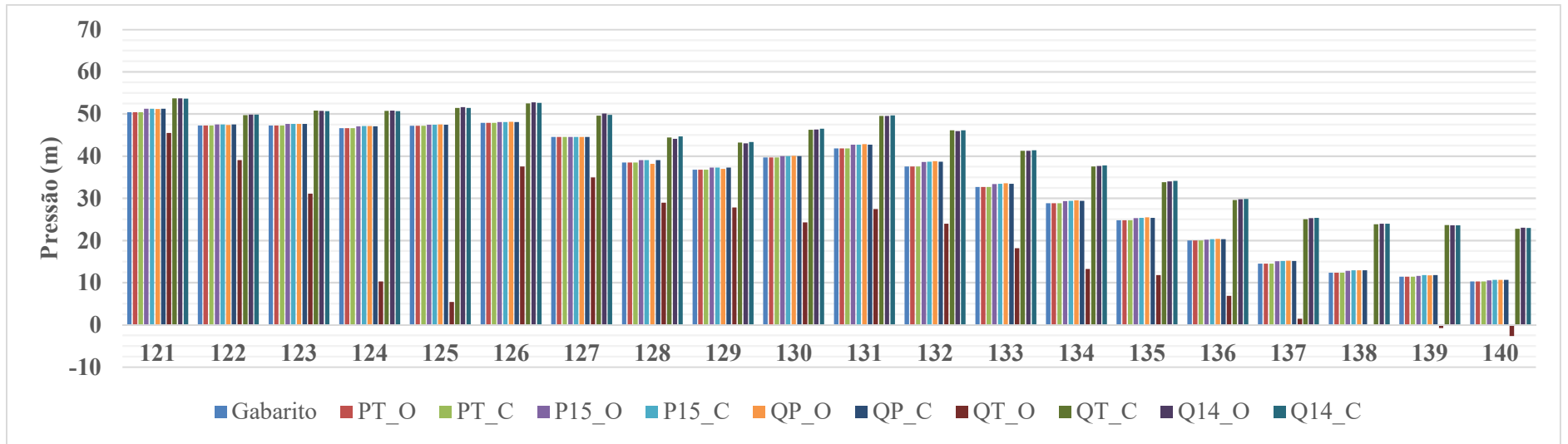
Fonte: Elaborado pelo autor



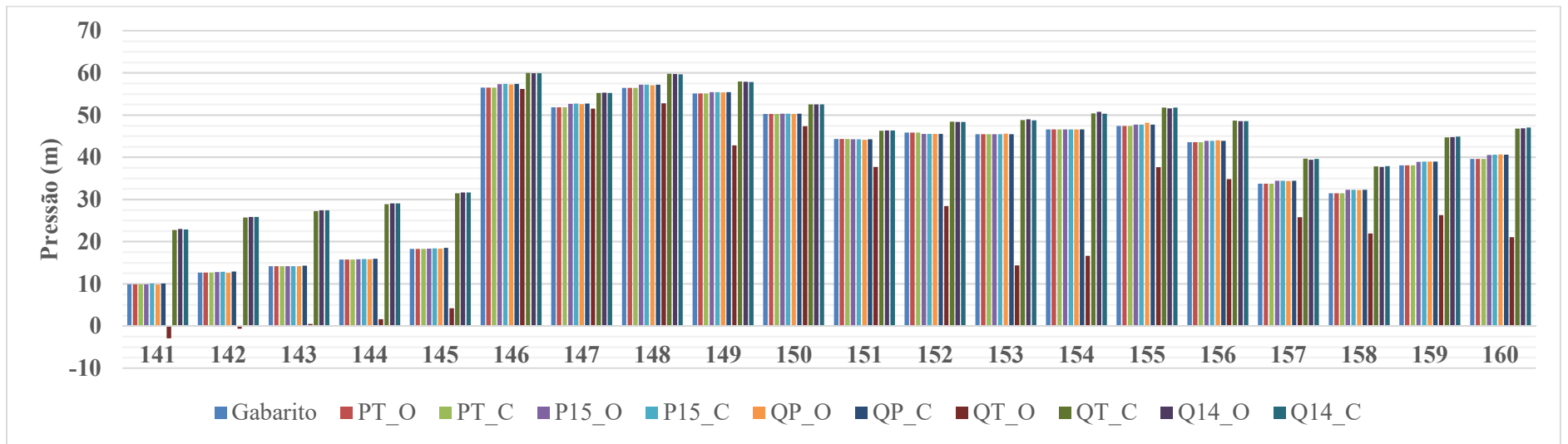
Fonte: Elaborado pelo autor



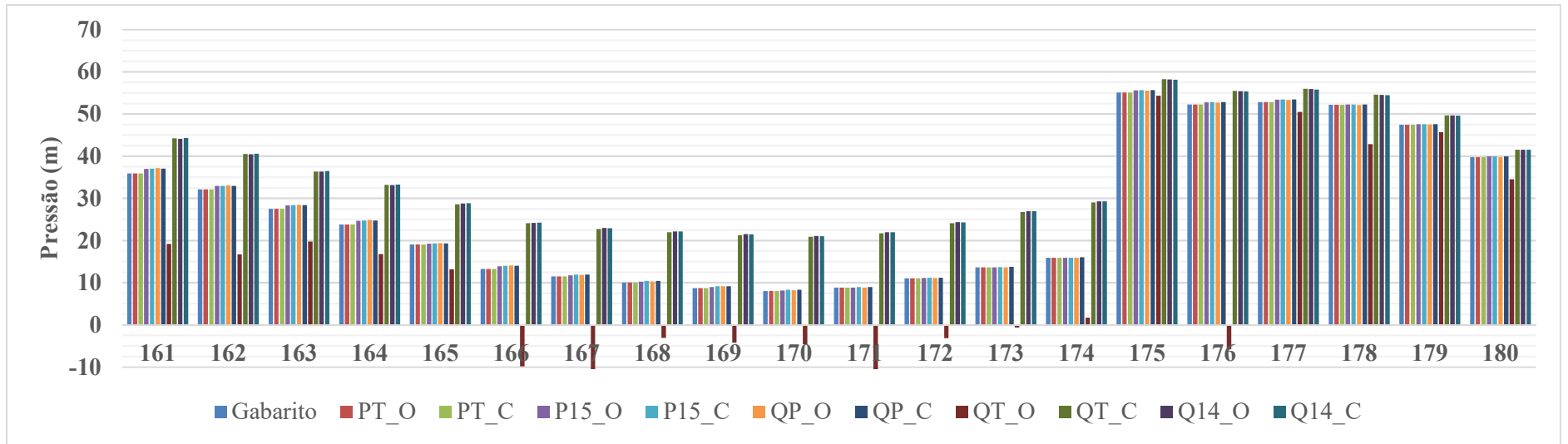
Fonte: Elaborado pelo autor



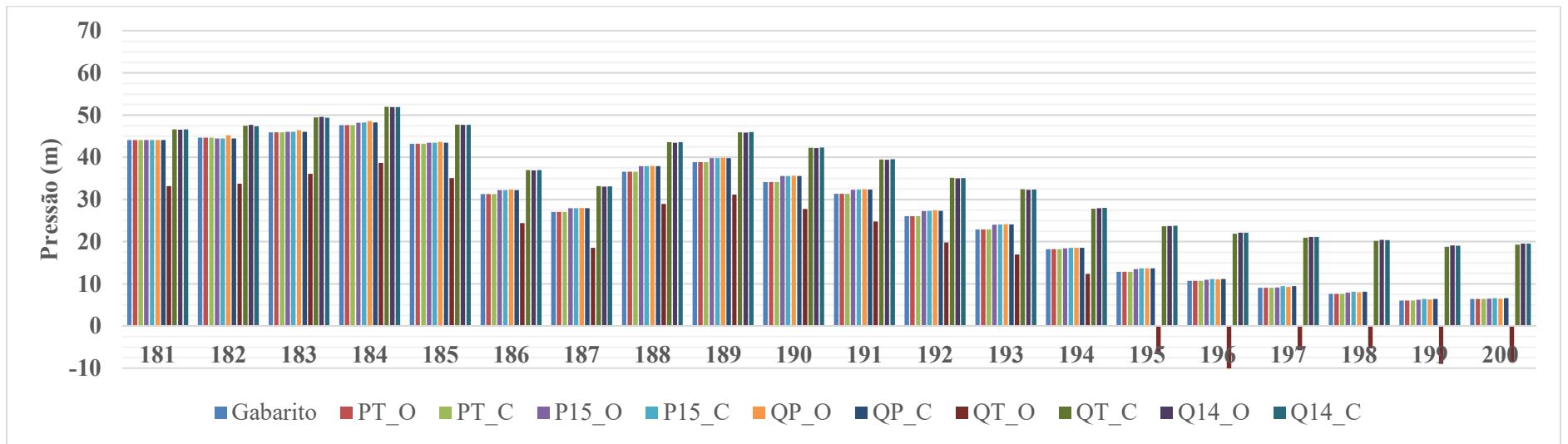
Fonte: Elaborado pelo autor



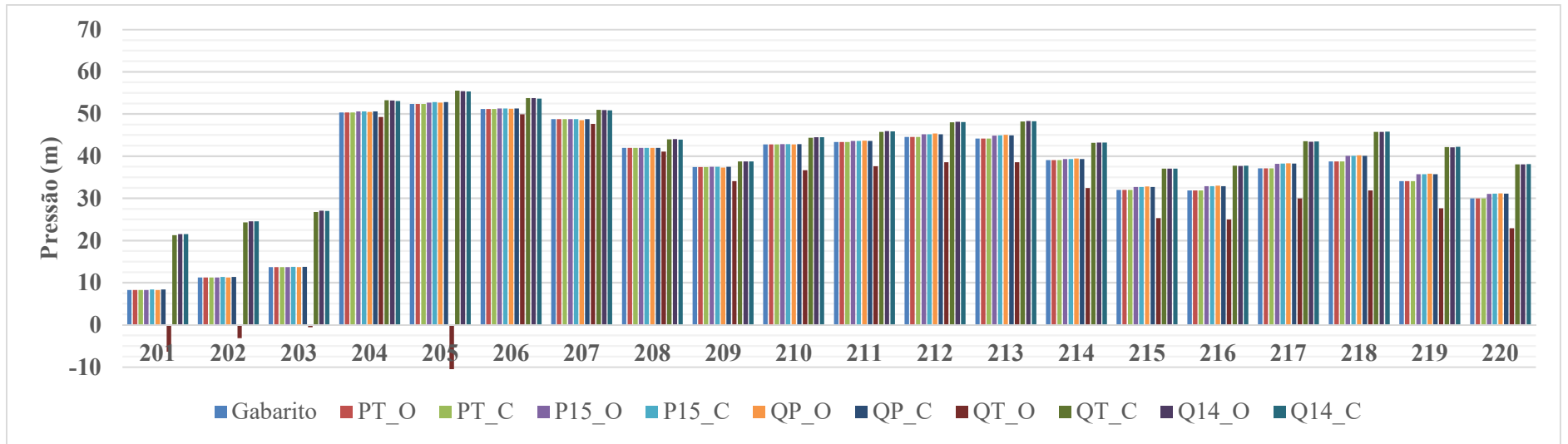
Fonte: Elaborado pelo autor



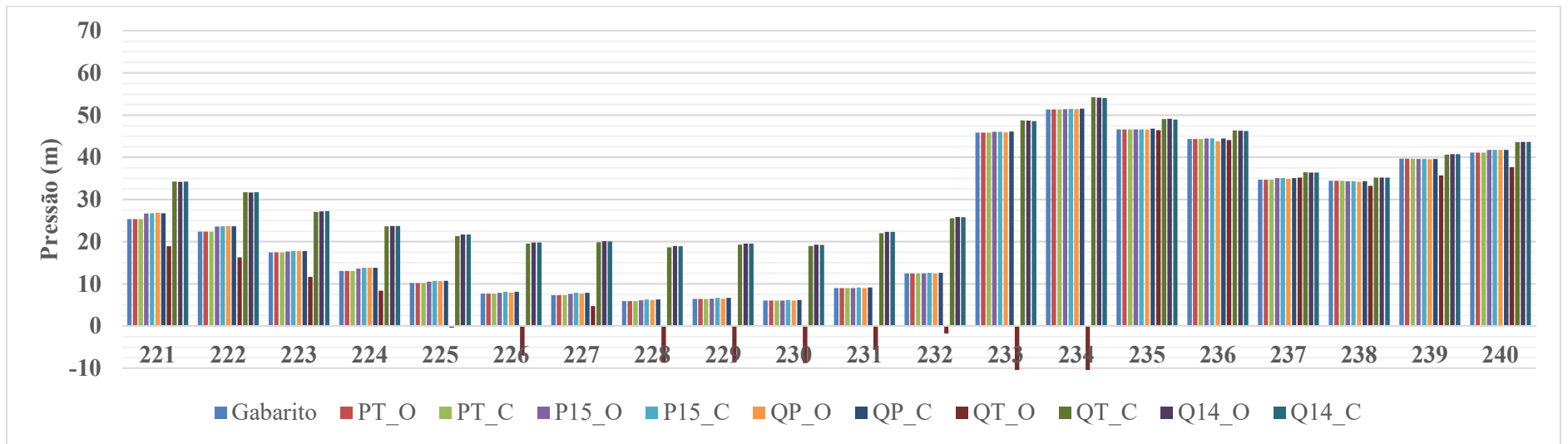
Fonte: Elaborado pelo autor



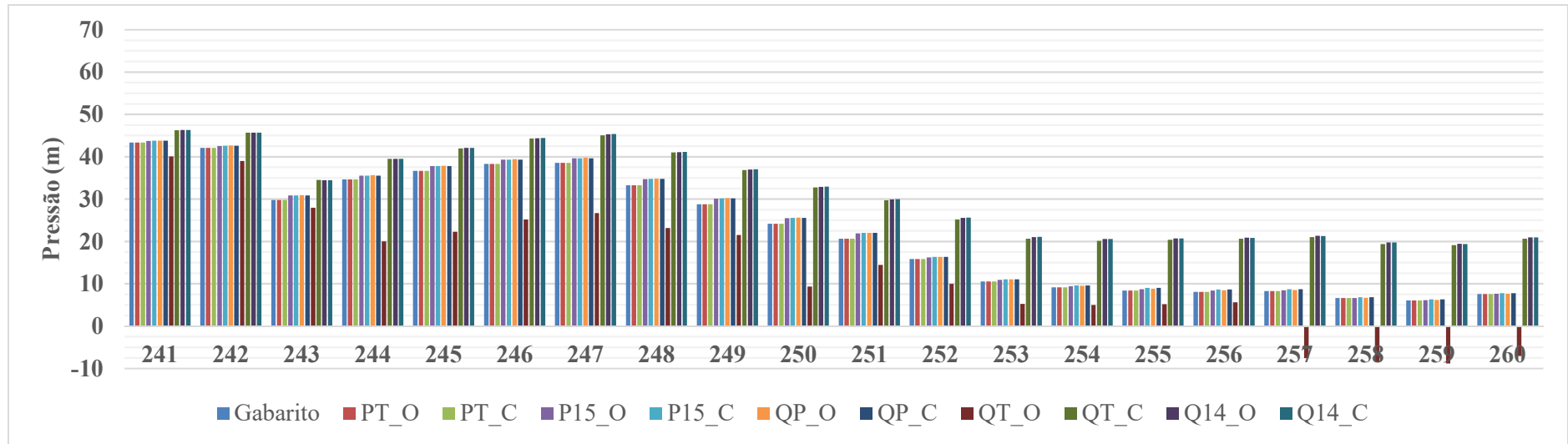
Fonte: Elaborado pelo autor



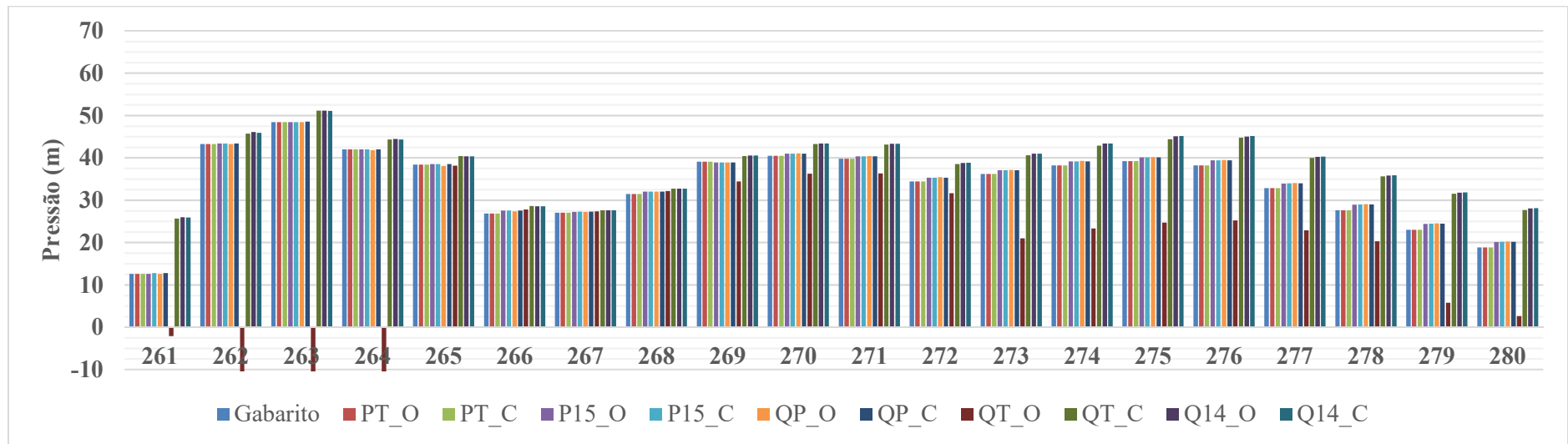
Fonte: Elaborado pelo autor



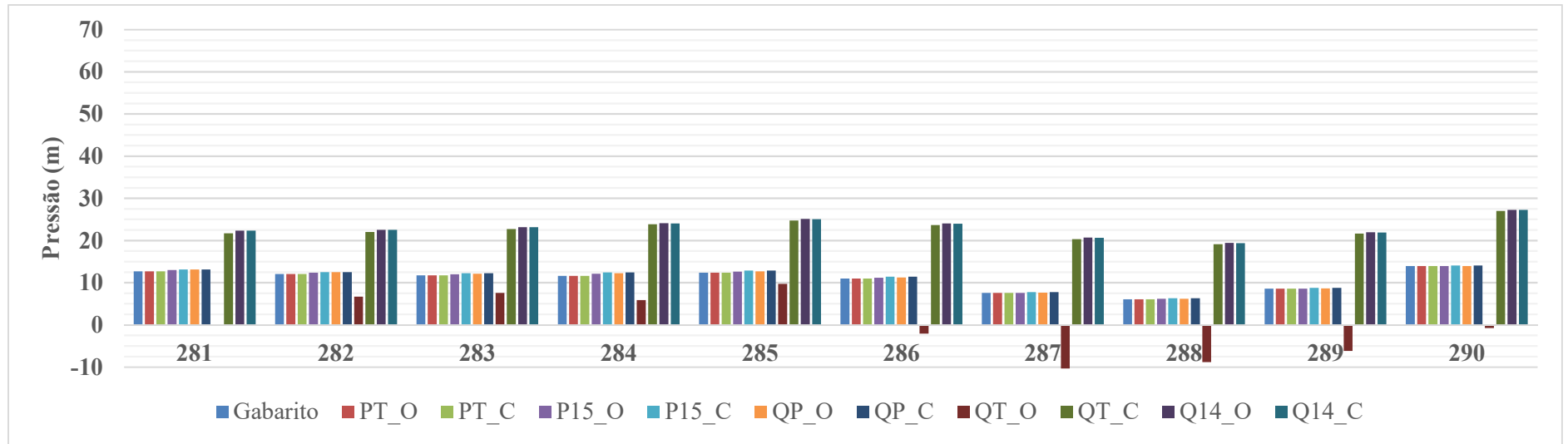
Fonte: Elaborado pelo autor



Fonte: Elaborado pelo autor

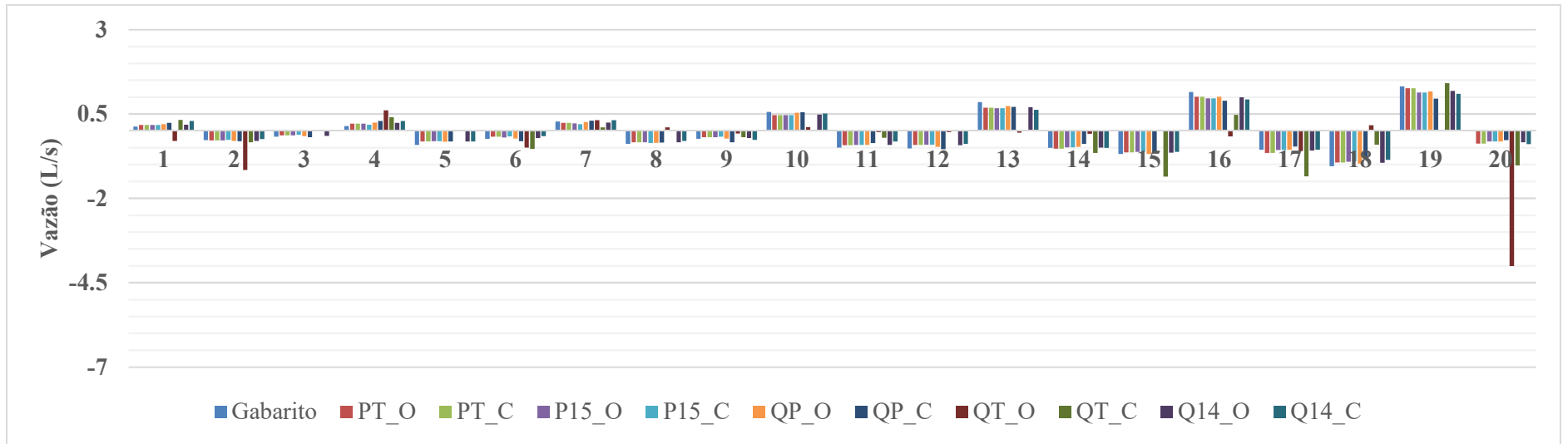


Fonte: Elaborado pelo autor

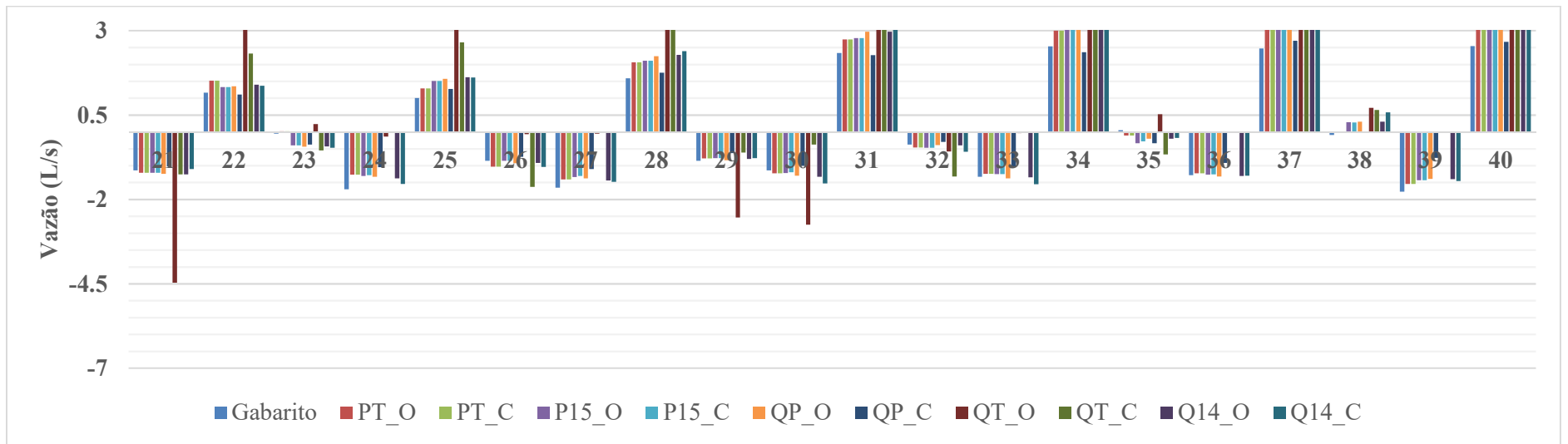


Fonte: Elaborado pelo autor

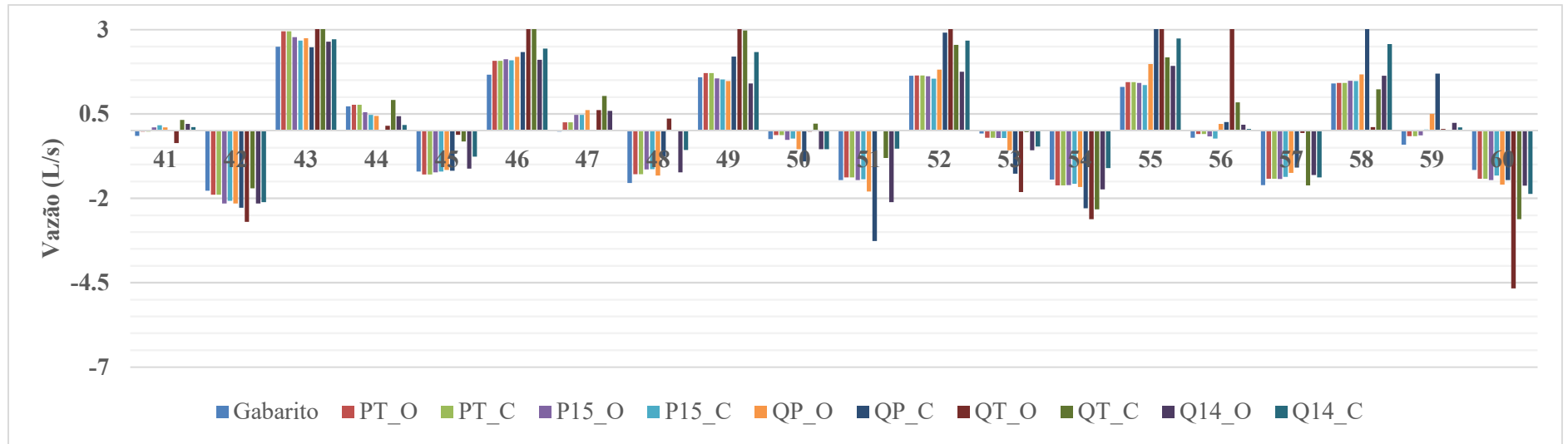
**APÊNDICE AQ – Vazões encontradas na Calibração do C de Hazen-Williams com C
inicial de $150 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$: rede MIGHA**



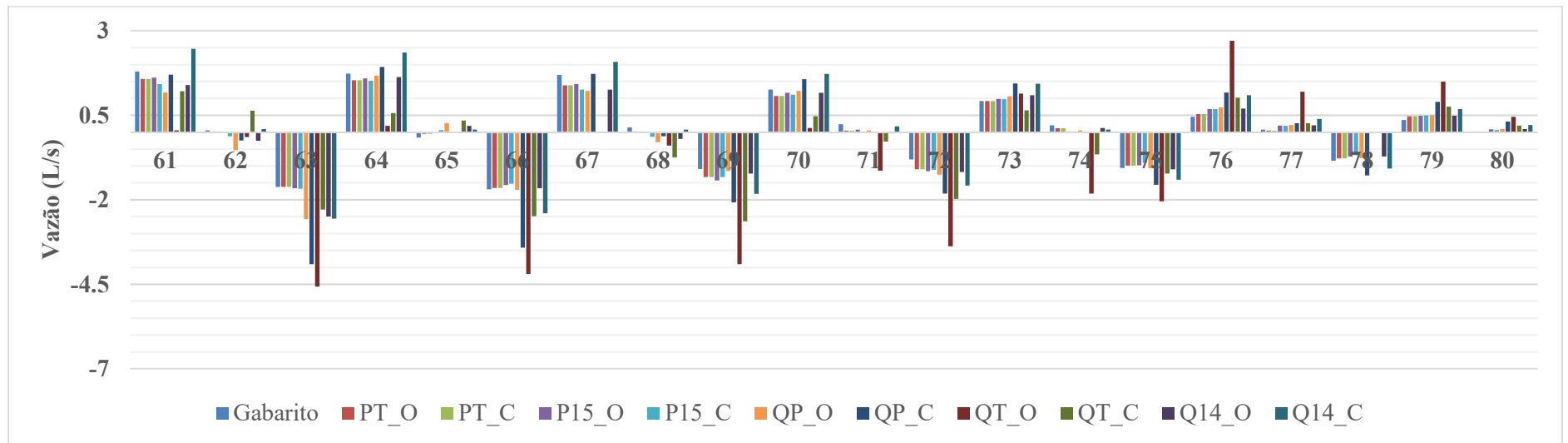
Fonte: Elaborado pelo autor



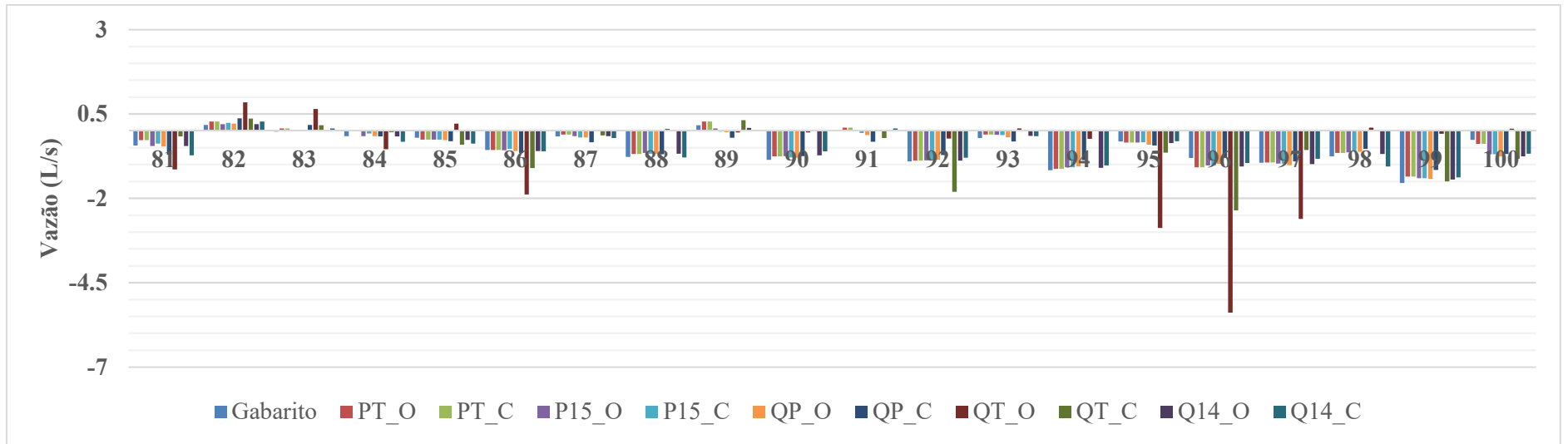
Fonte: Elaborado pelo autor



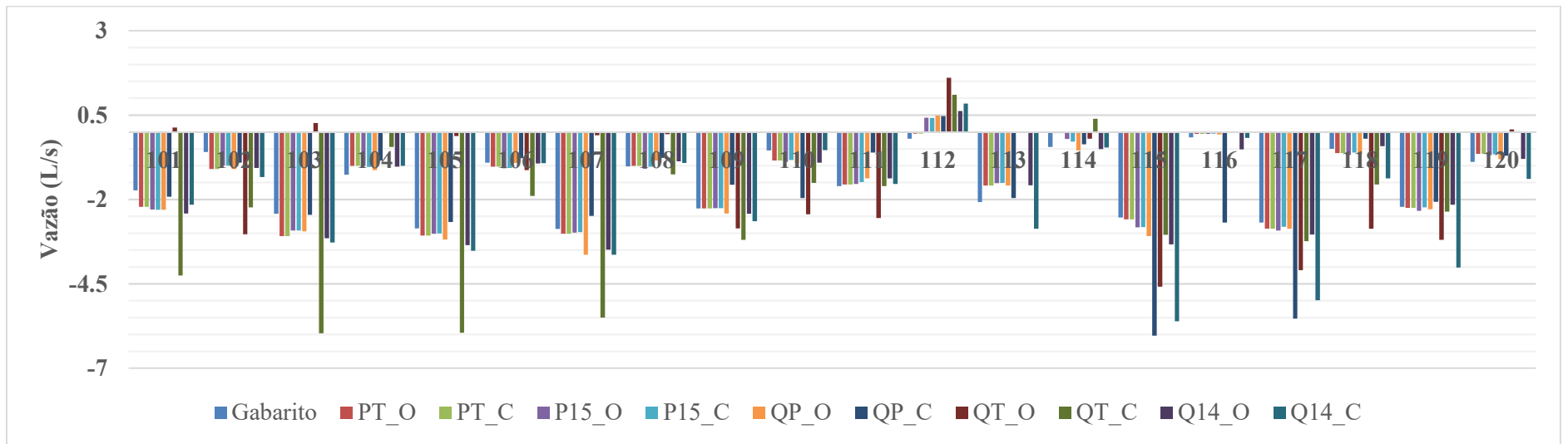
Fonte: Elaborado pelo autor



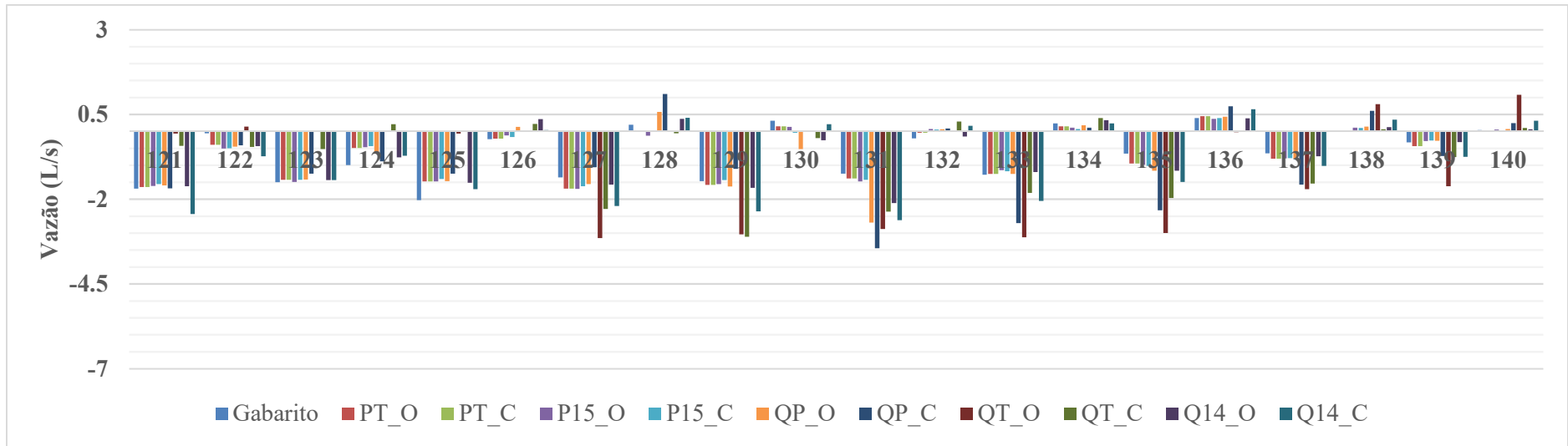
Fonte: Elaborado pelo autor



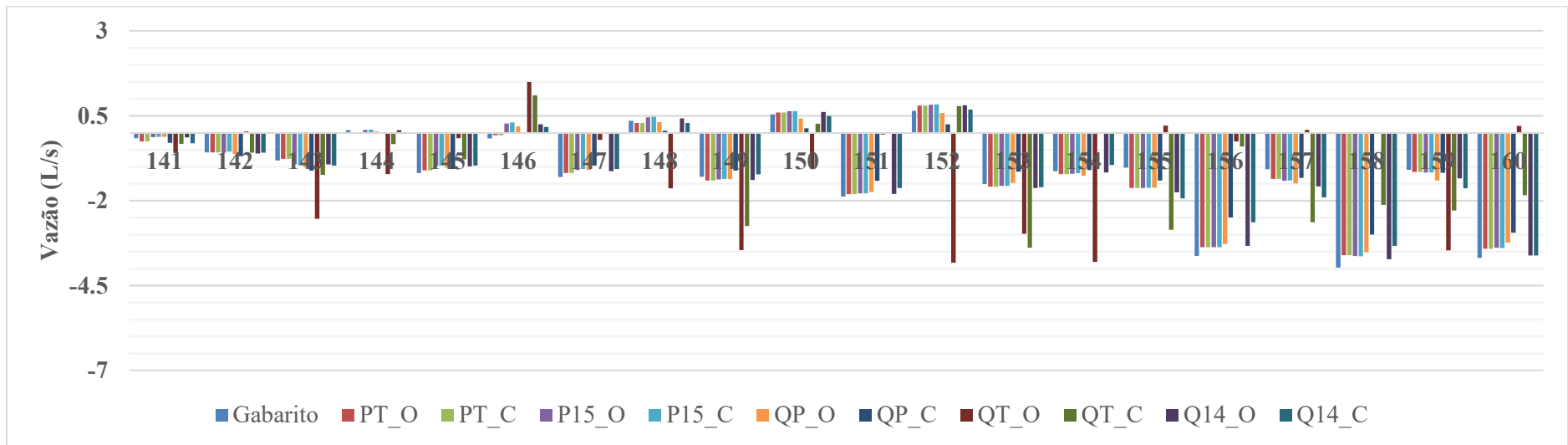
Fonte: Elaborado pelo autor



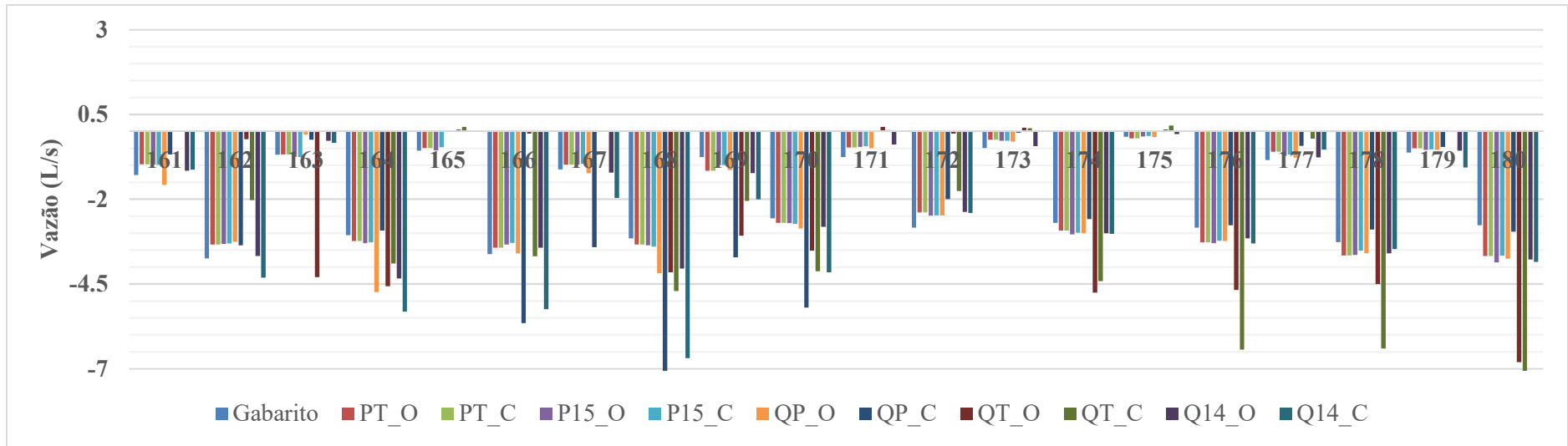
Fonte: Elaborado pelo autor



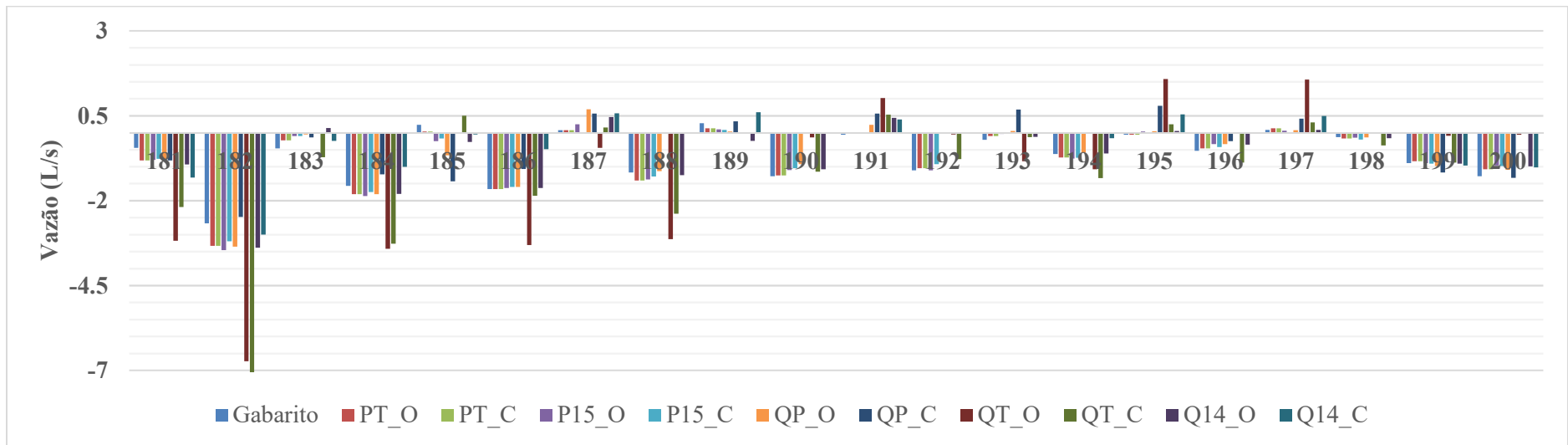
Fonte: Elaborado pelo autor



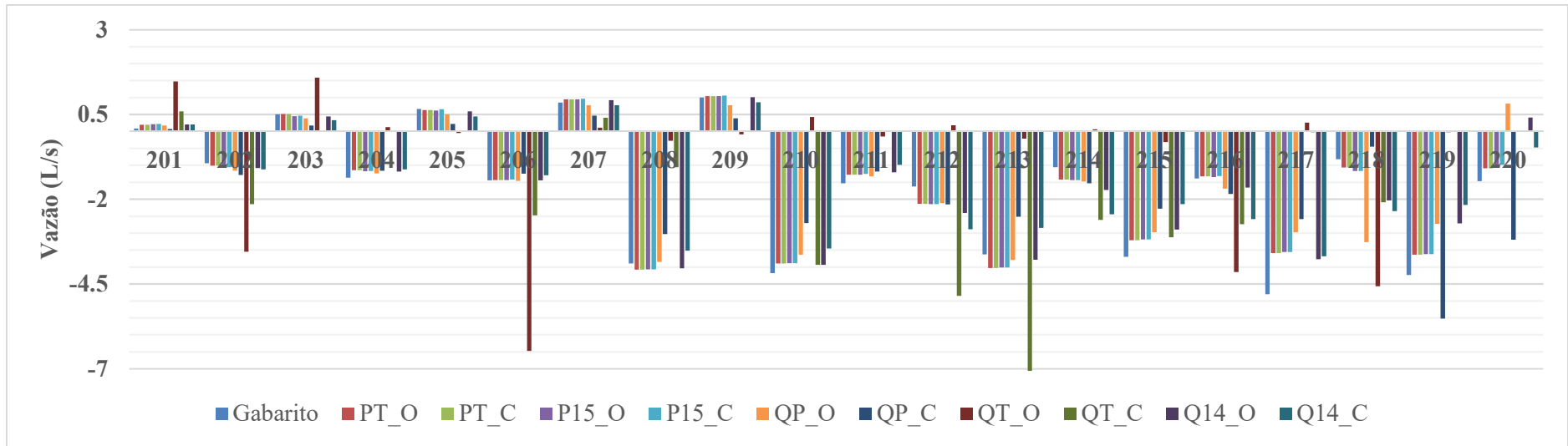
Fonte: Elaborado pelo autor



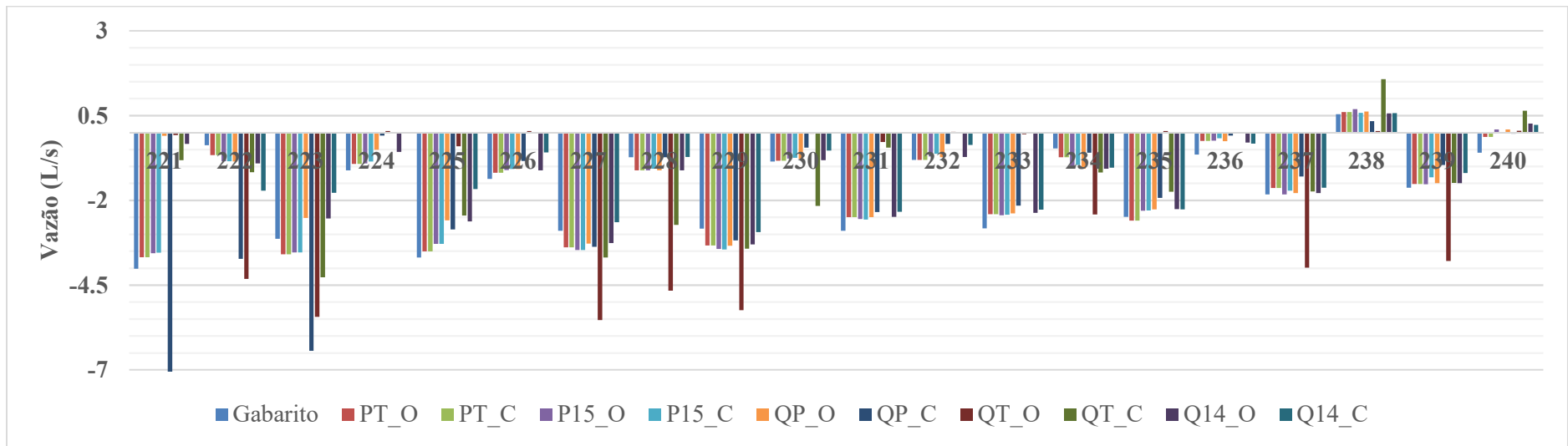
Fonte: Elaborado pelo autor



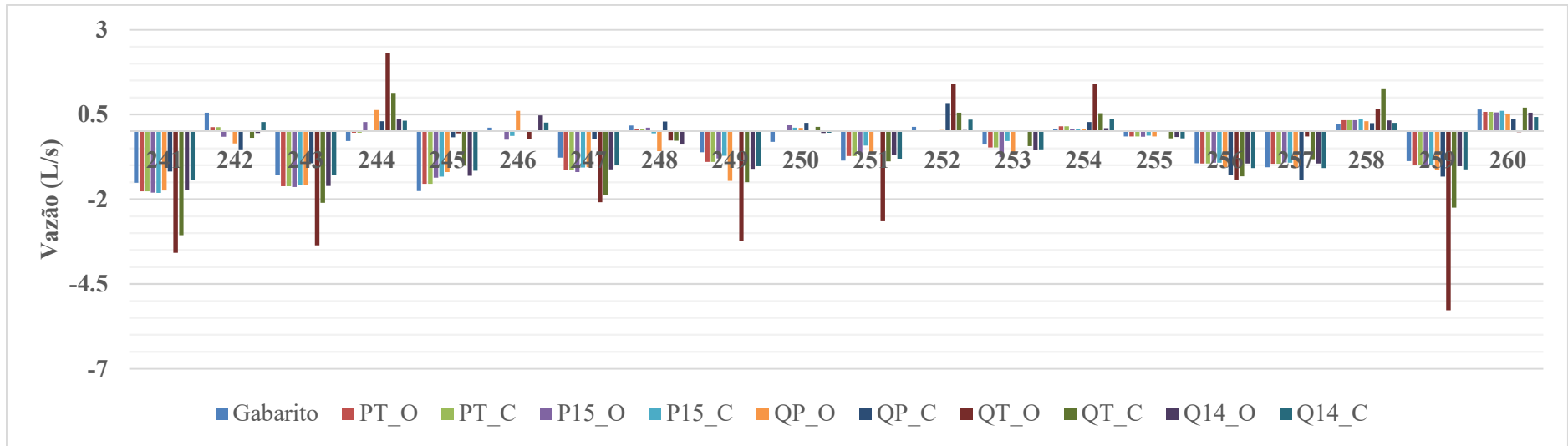
Fonte: Elaborado pelo autor



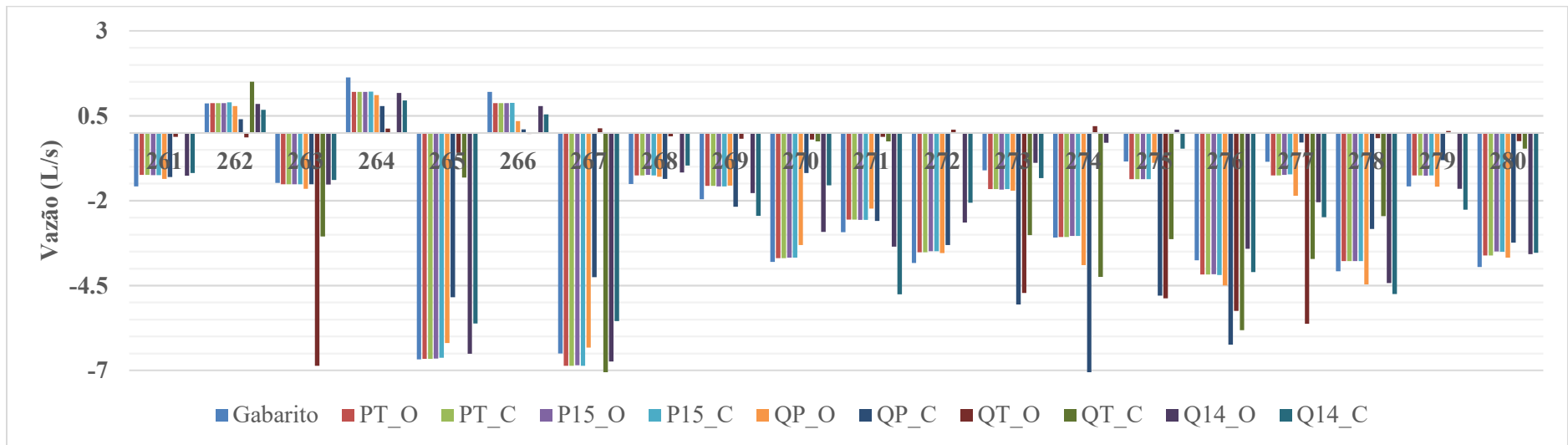
Fonte: Elaborado pelo autor



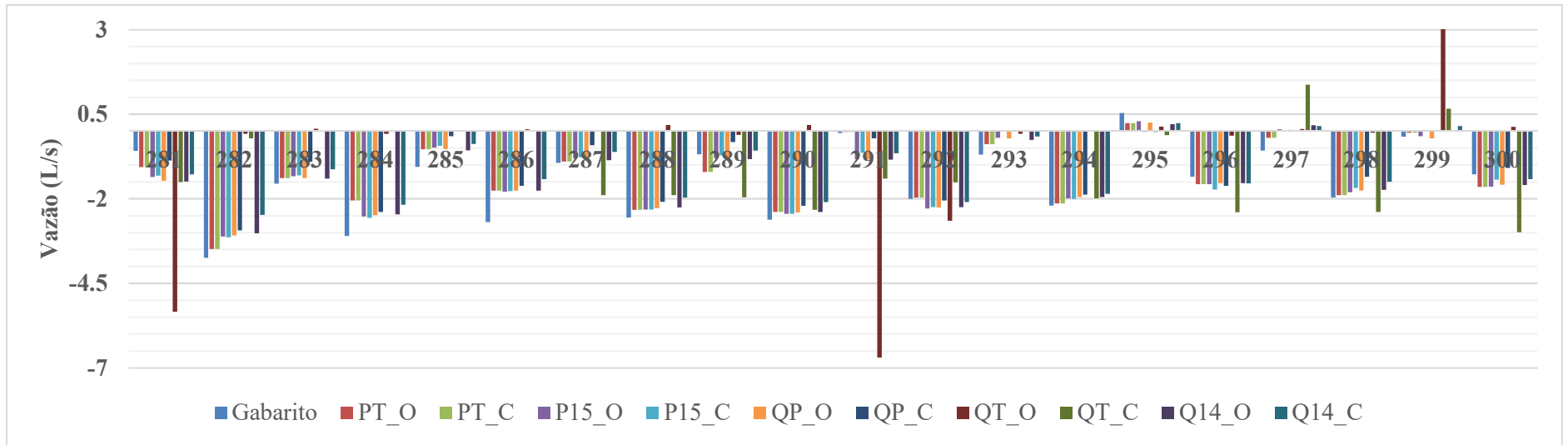
Fonte: Elaborado pelo autor



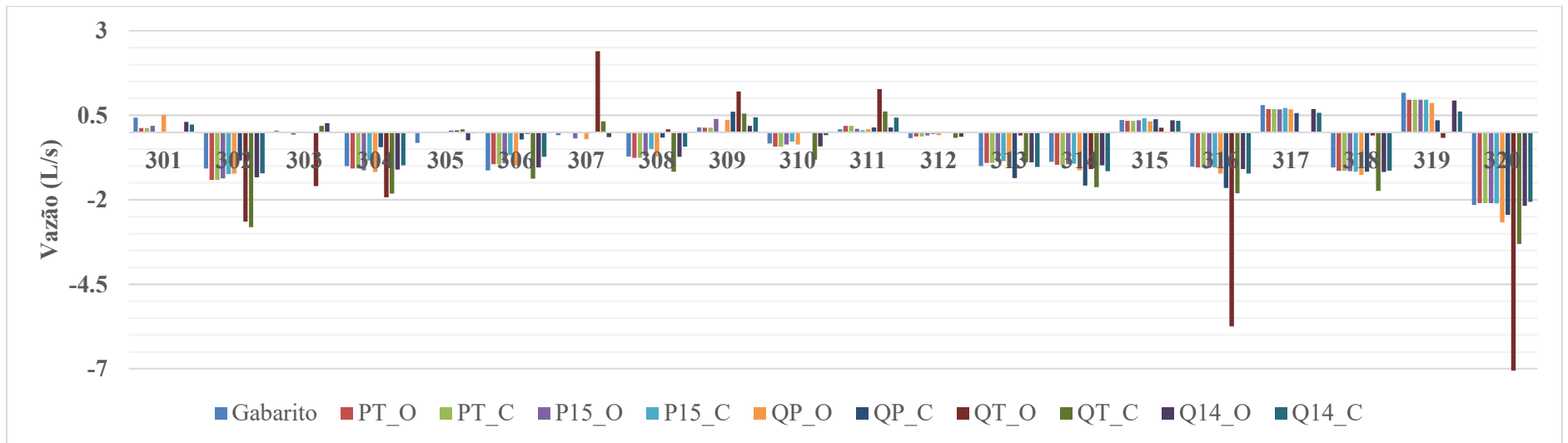
Fonte: Elaborado pelo autor



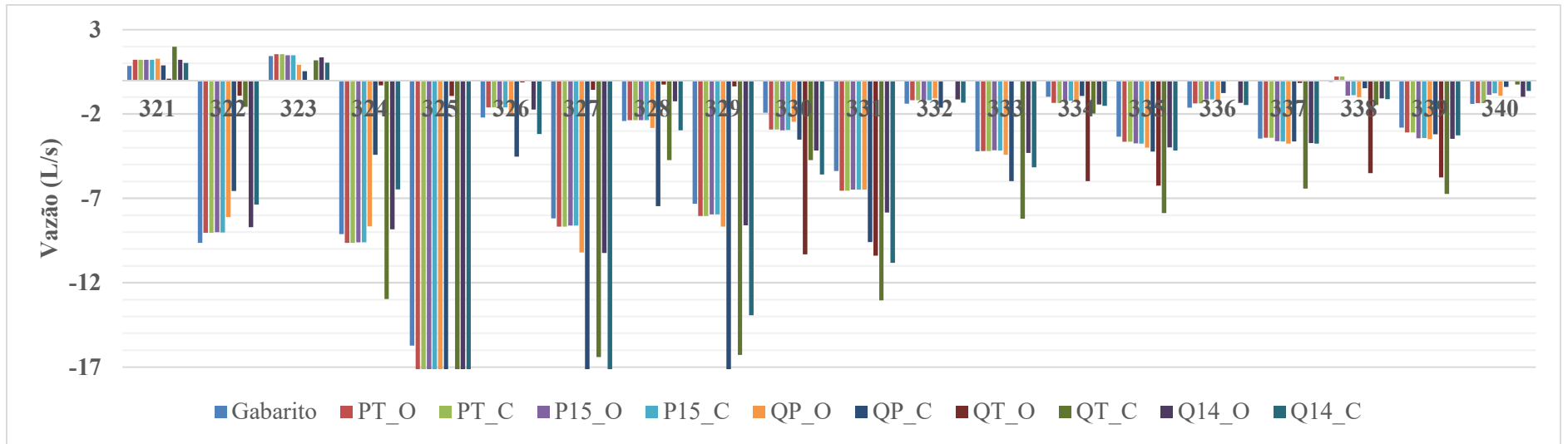
Fonte: Elaborado pelo autor



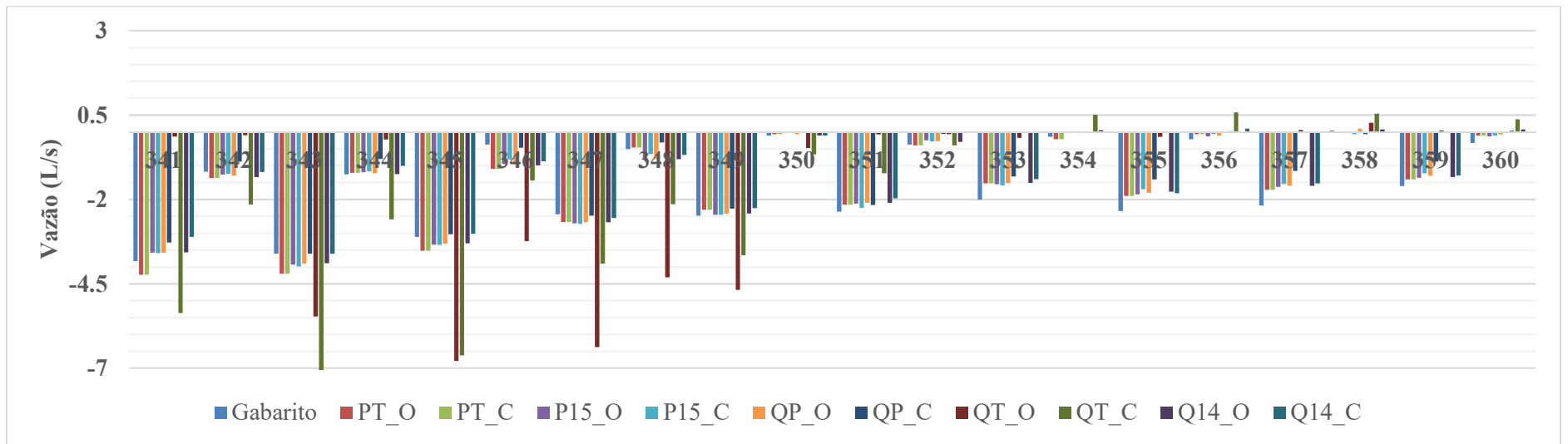
Fonte: Elaborado pelo autor



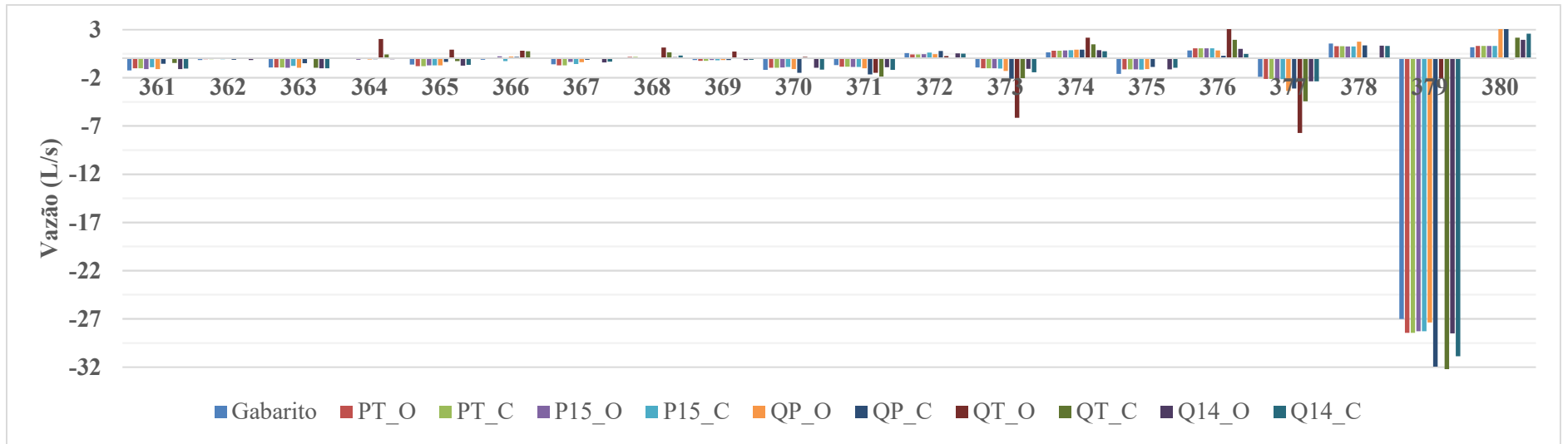
Fonte: Elaborado pelo autor



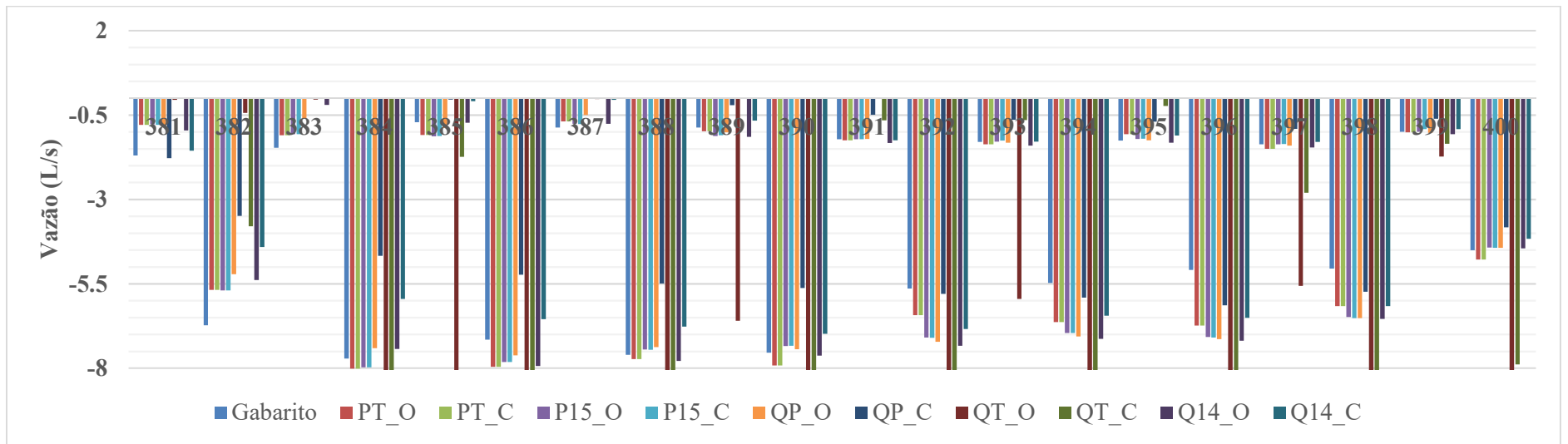
Fonte: Elaborado pelo autor



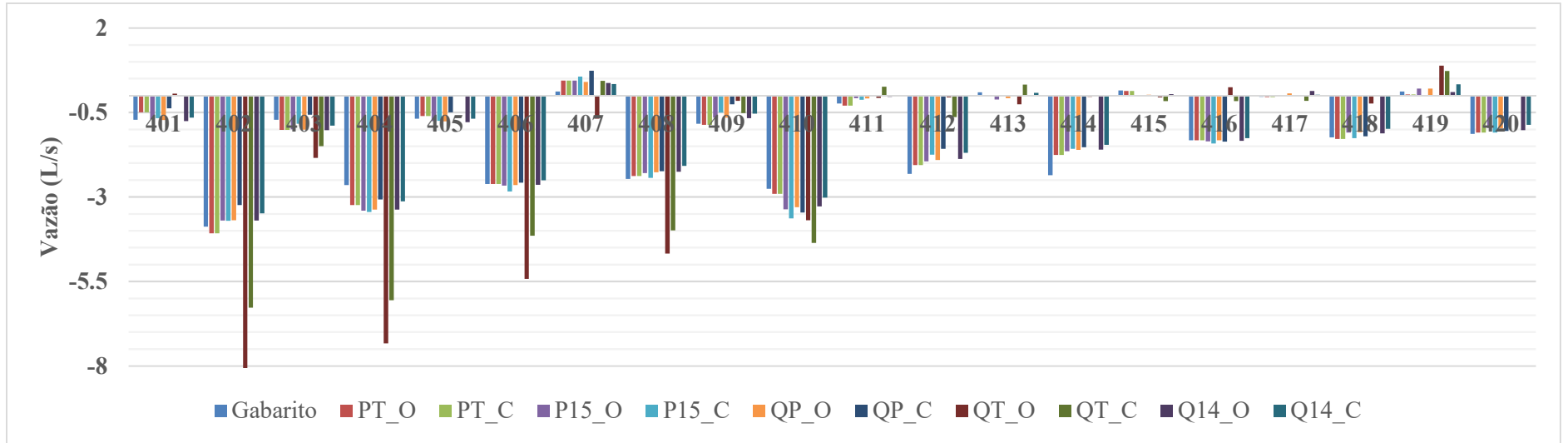
Fonte: Elaborado pelo autor



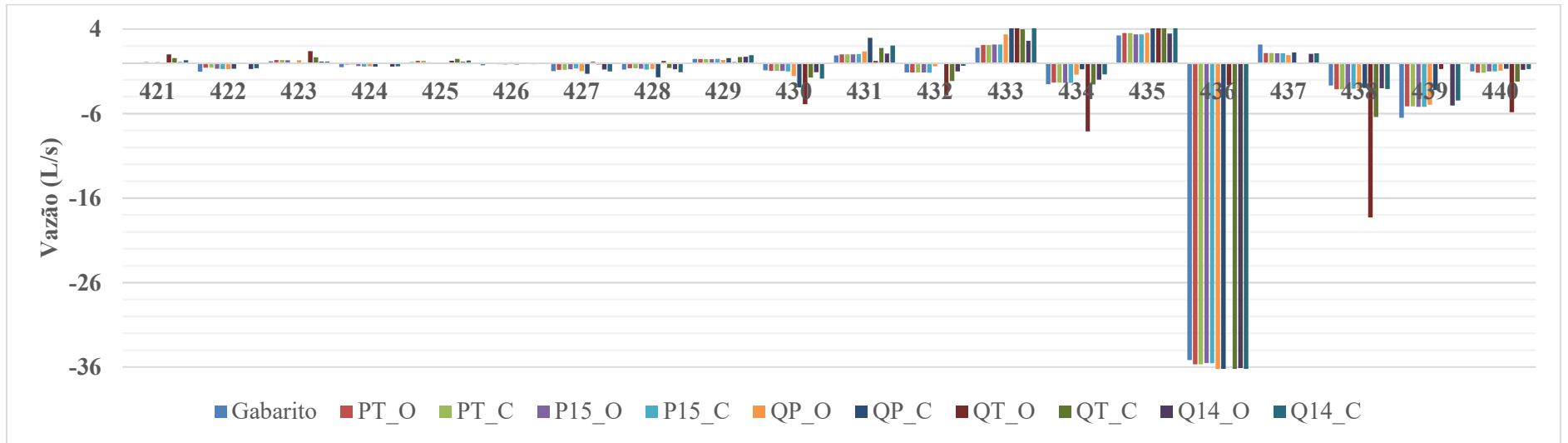
Fonte: Elaborado pelo autor



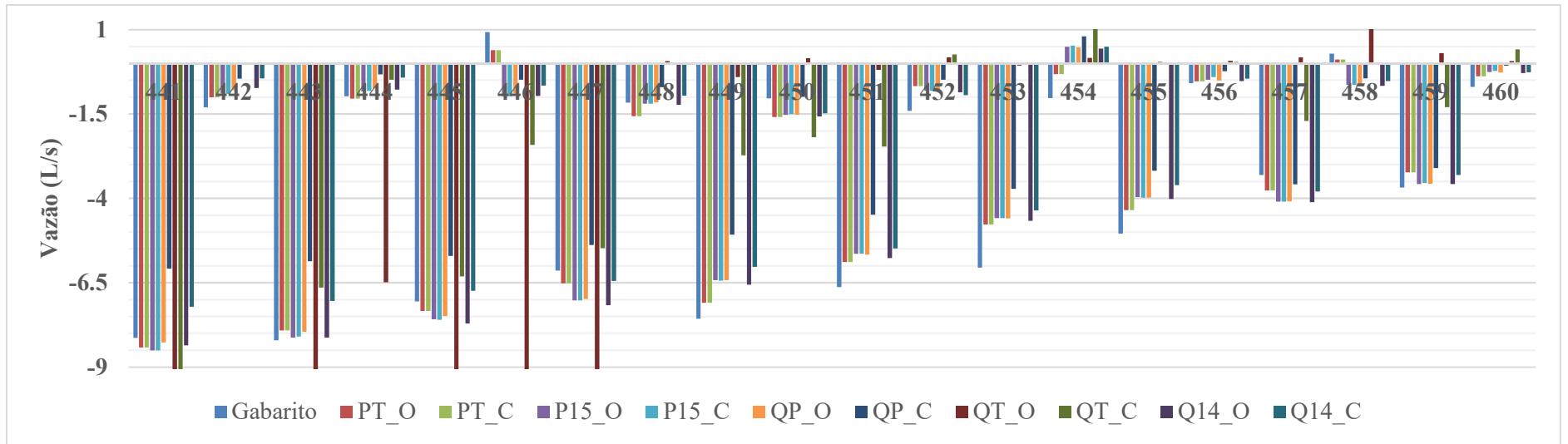
Fonte: Elaborado pelo autor



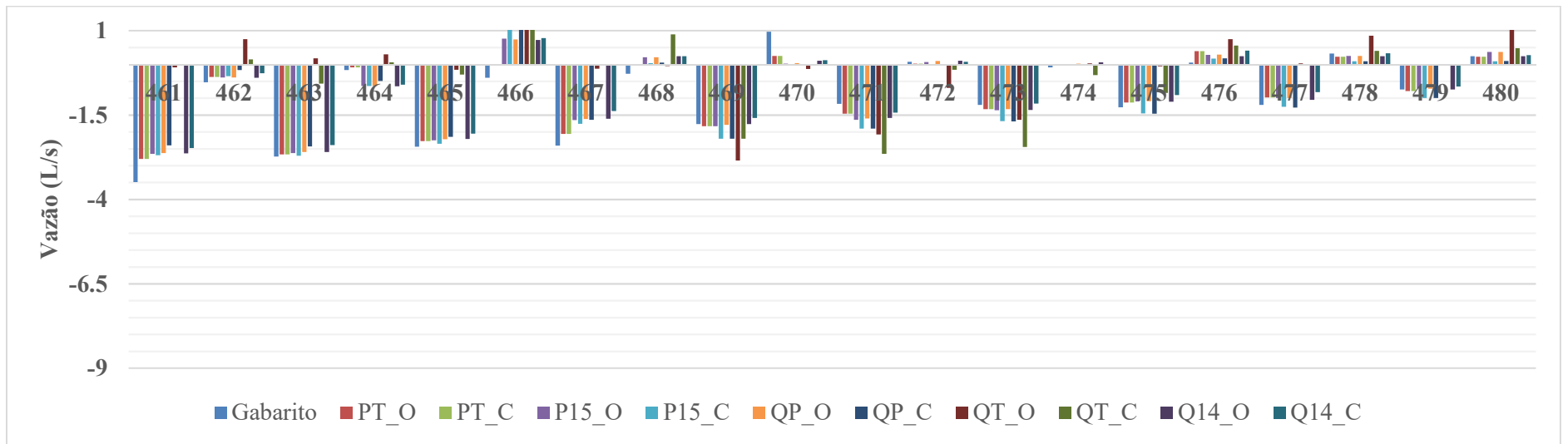
Fonte: Elaborado pelo autor



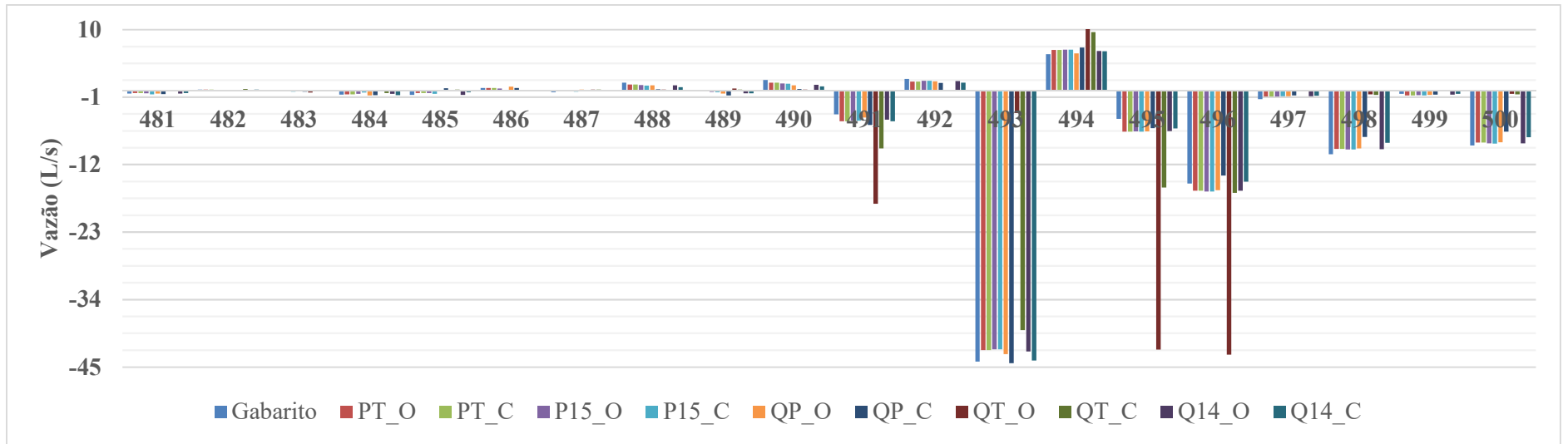
Fonte: Elaborado pelo autor



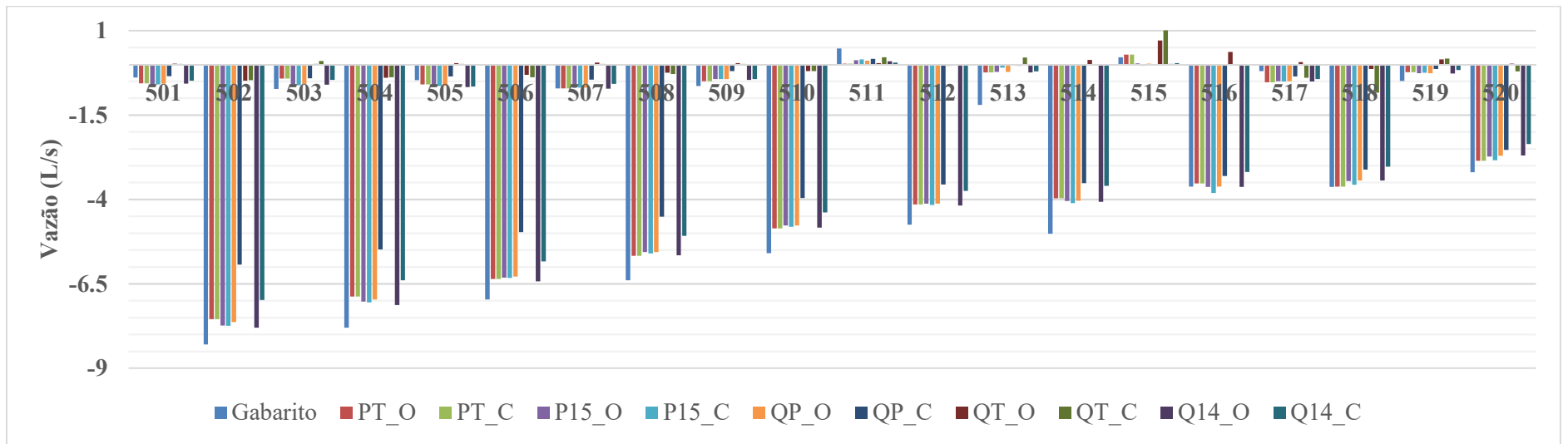
Fonte: Elaborado pelo autor



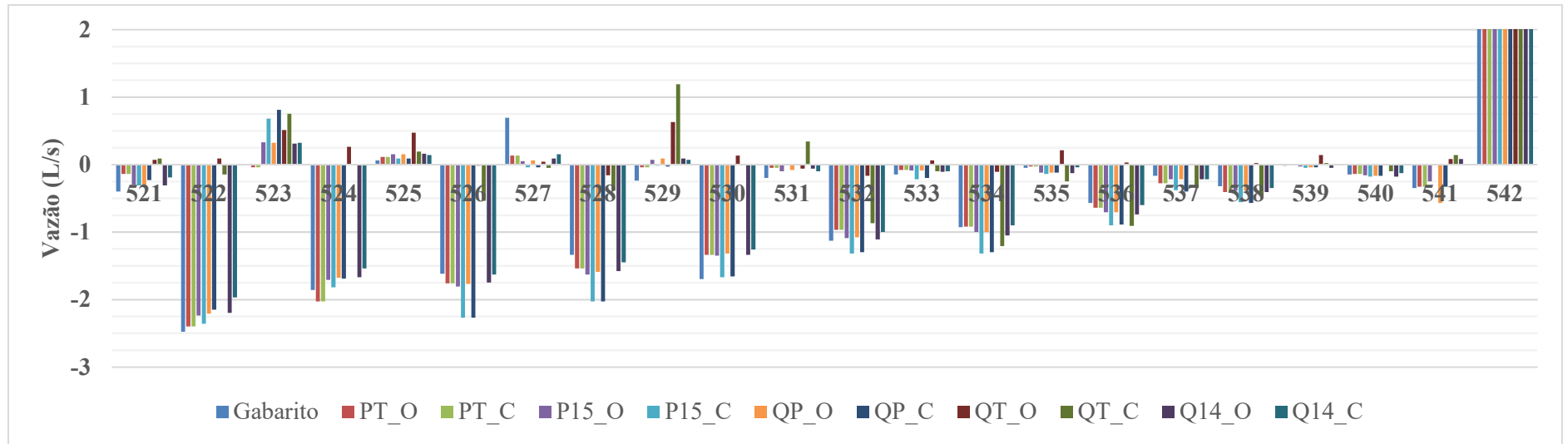
Fonte: Elaborado pelo autor



Fonte: Elaborado pelo autor

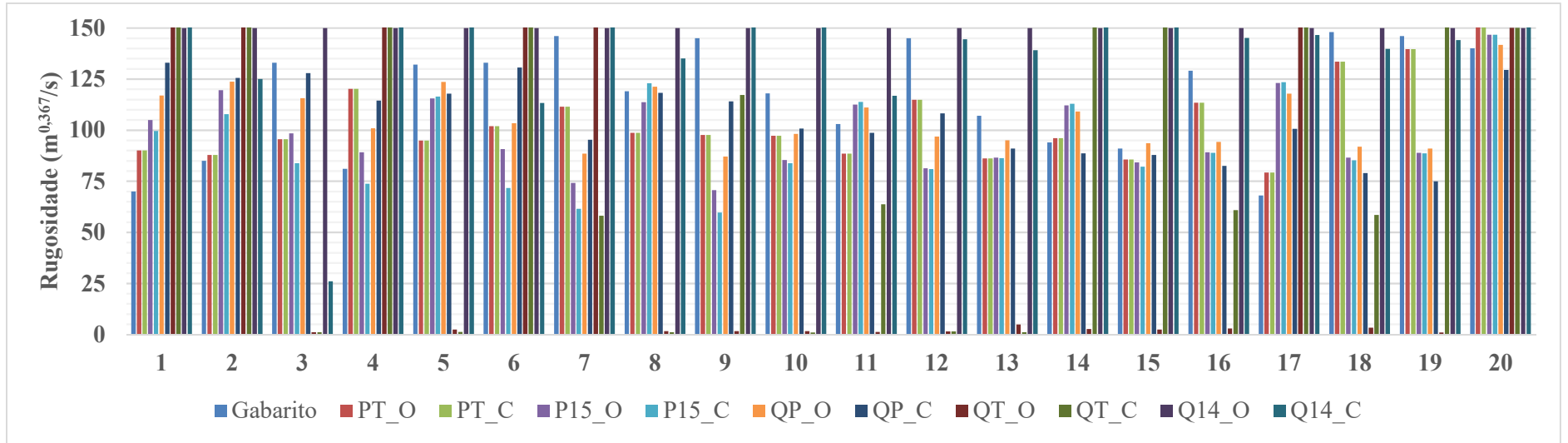


Fonte: Elaborado pelo autor

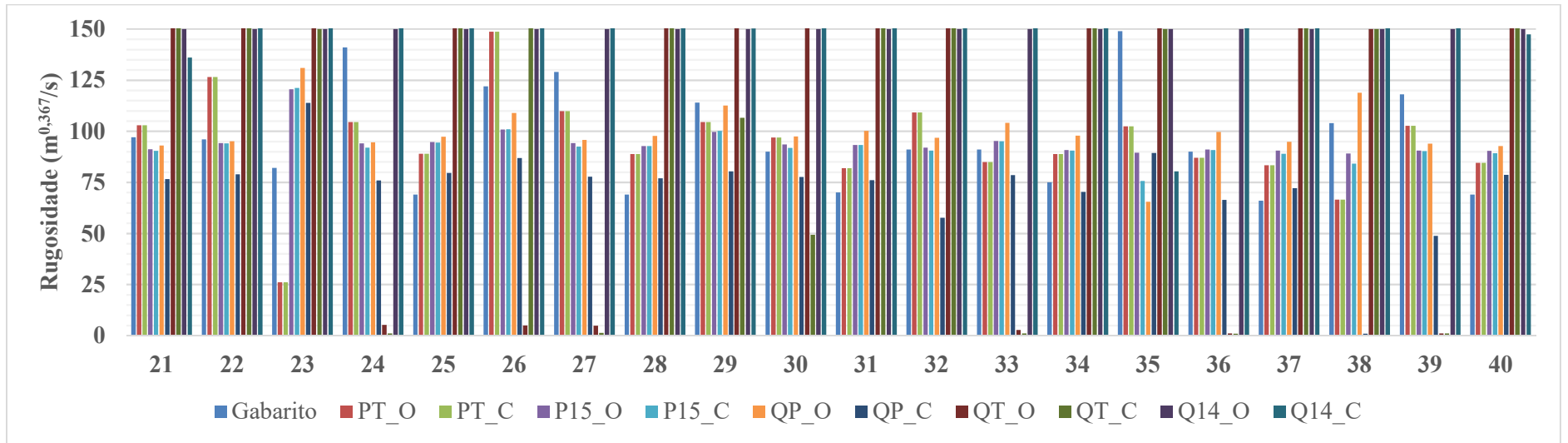


Fonte: Elaborado pelo autor

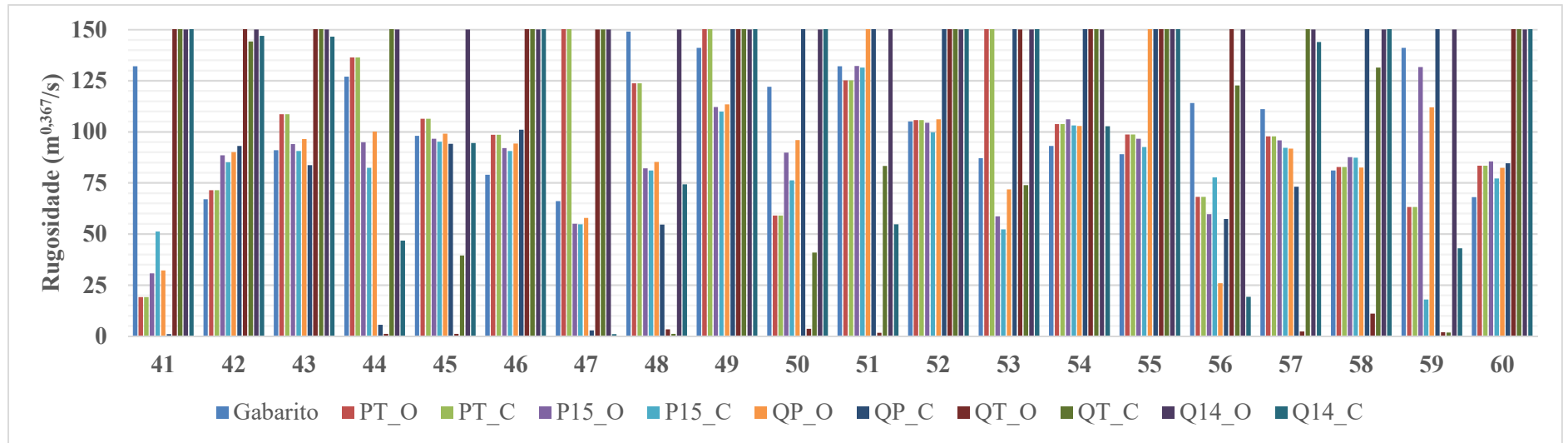
**APÊNDICE AR – Rugosidades C encontradas na Calibração do C de Hazen-Williams
com C inicial de $150 \text{ m}^{0,367}/\text{s}$: rede MIGHA**



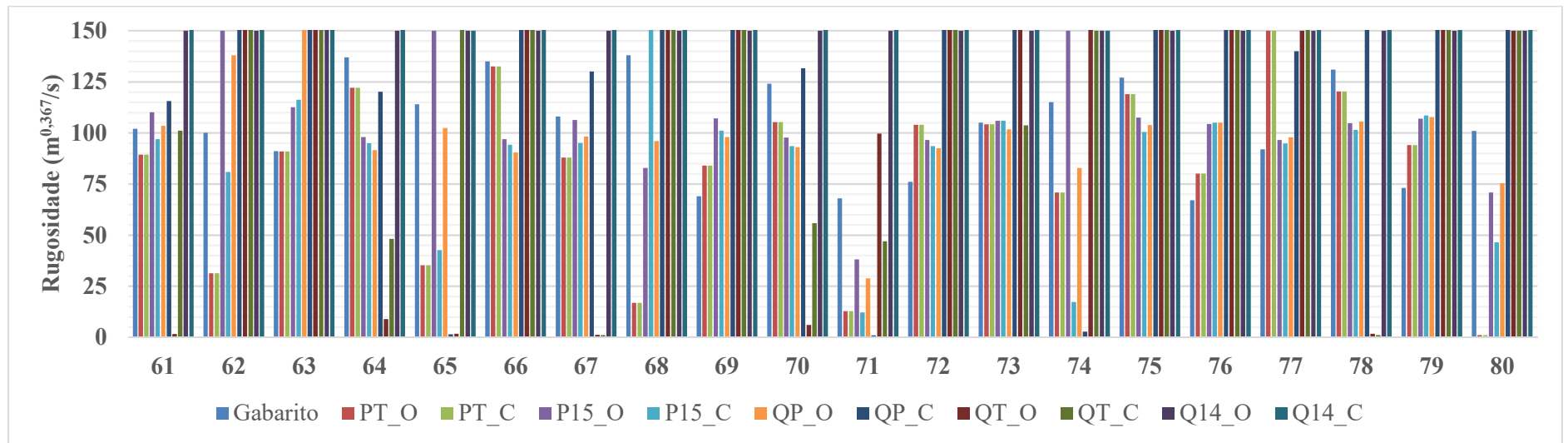
Fonte: Elaborado pelo autor



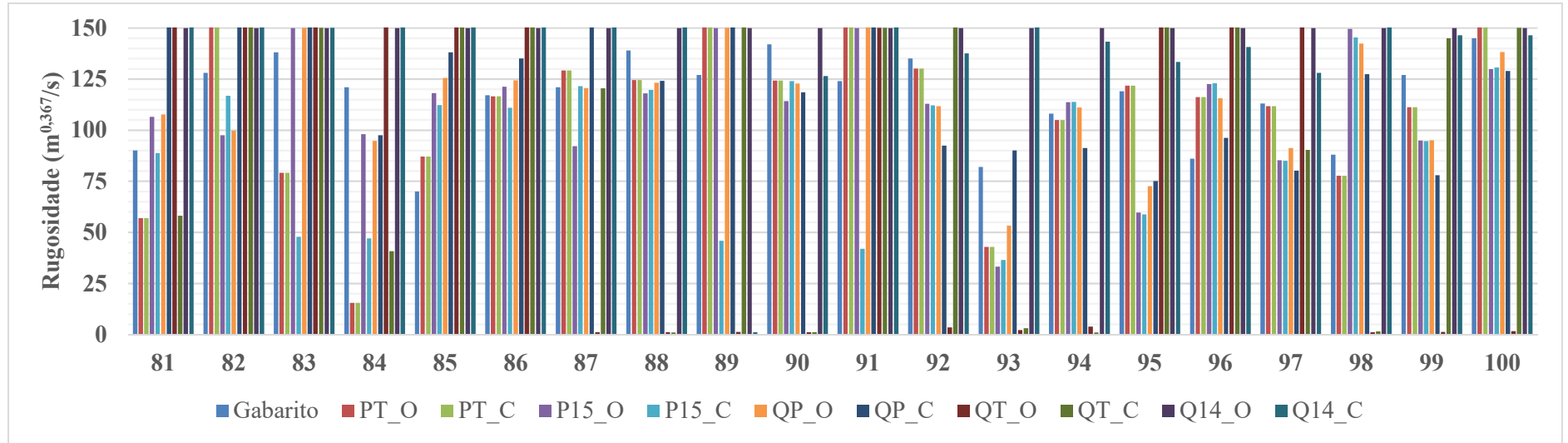
Fonte: Elaborado pelo autor



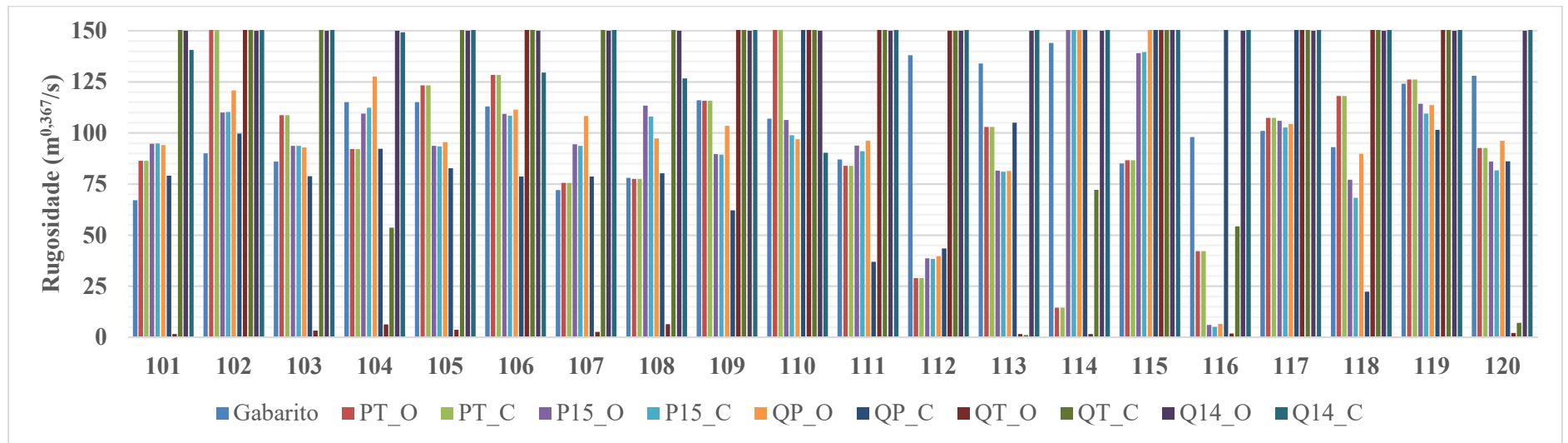
Fonte: Elaborado pelo autor



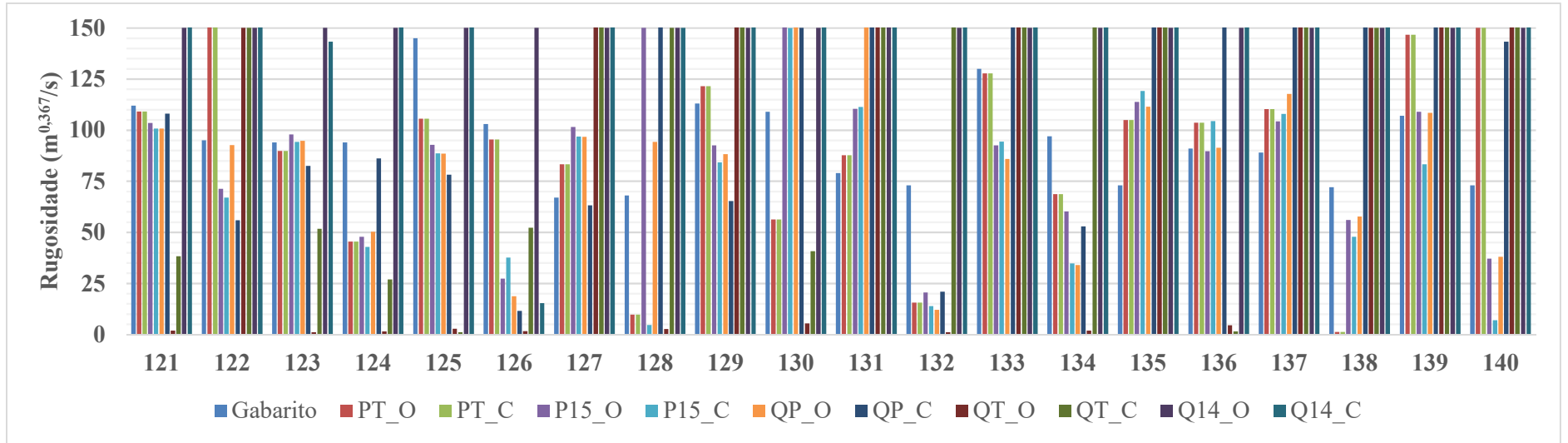
Fonte: Elaborado pelo autor



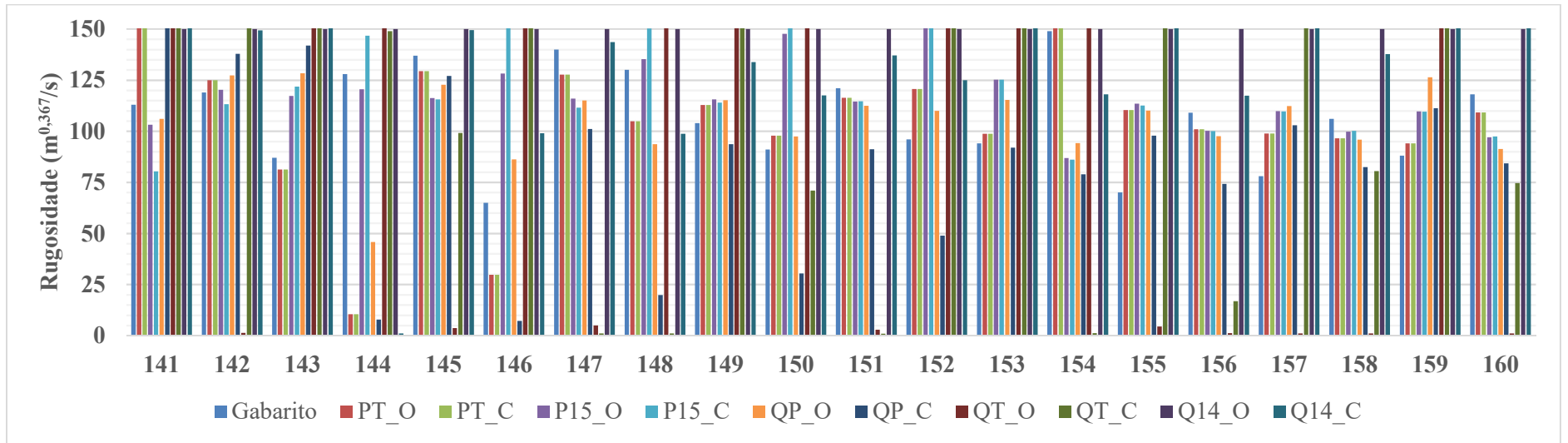
Fonte: Elaborado pelo autor



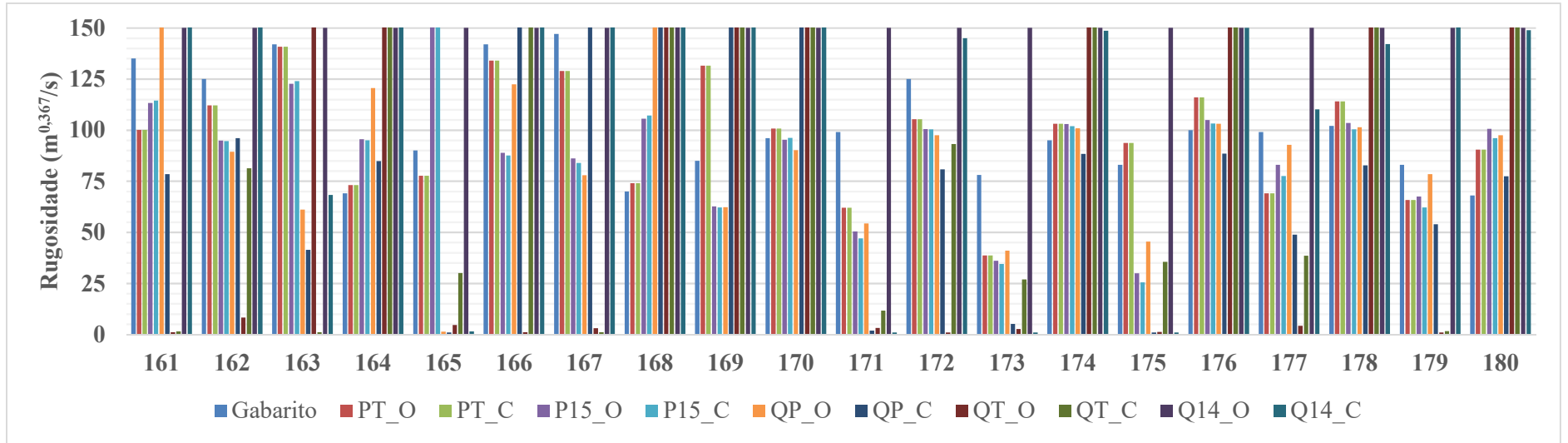
Fonte: Elaborado pelo autor



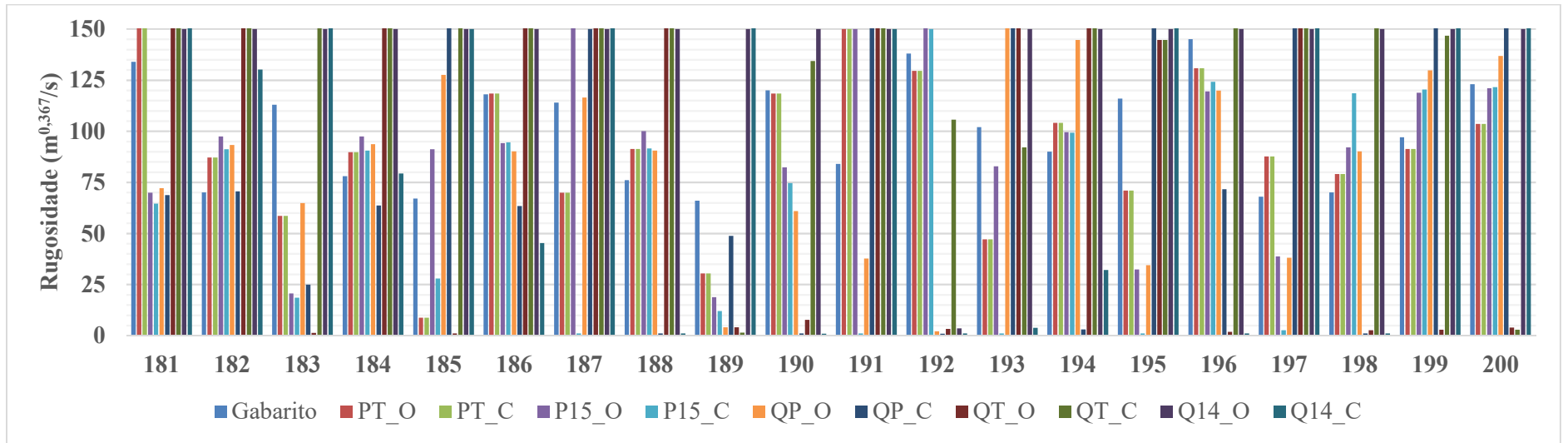
Fonte: Elaborado pelo autor



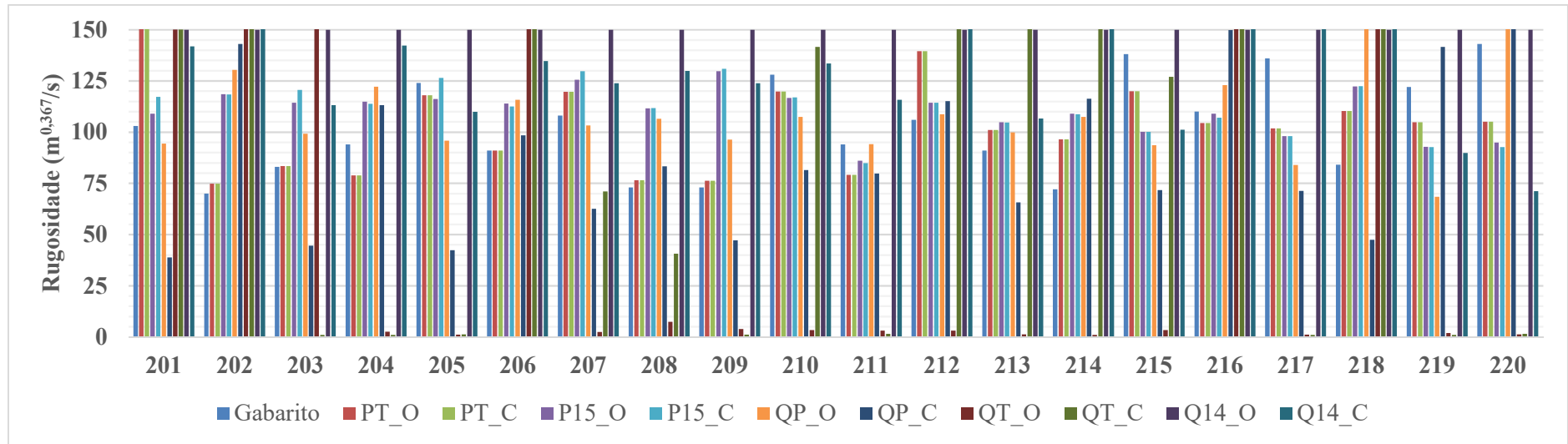
Fonte: Elaborado pelo autor



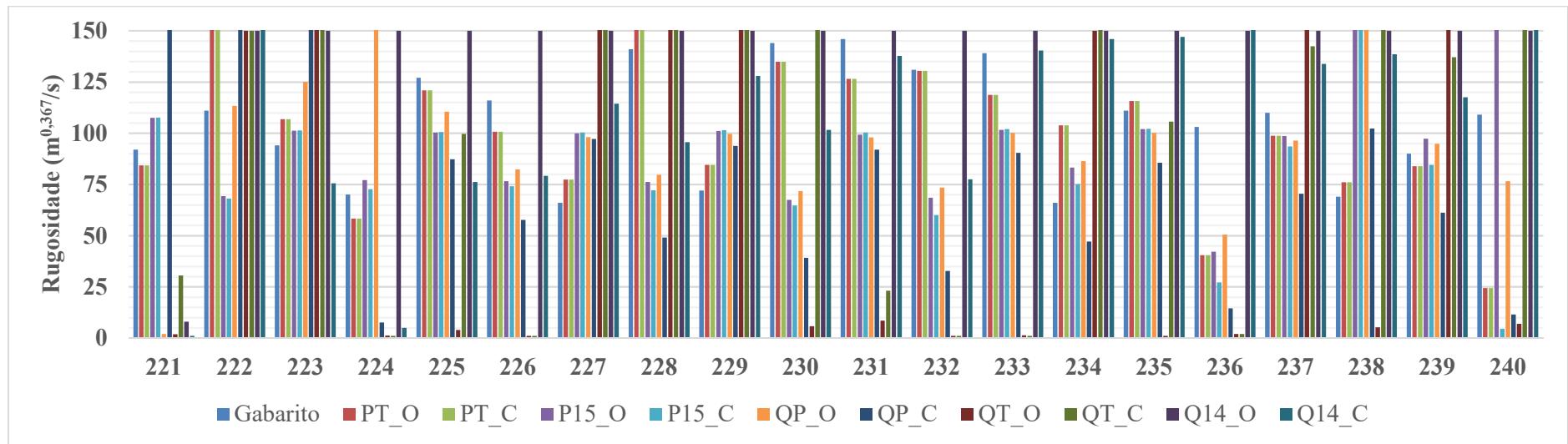
Fonte: Elaborado pelo autor



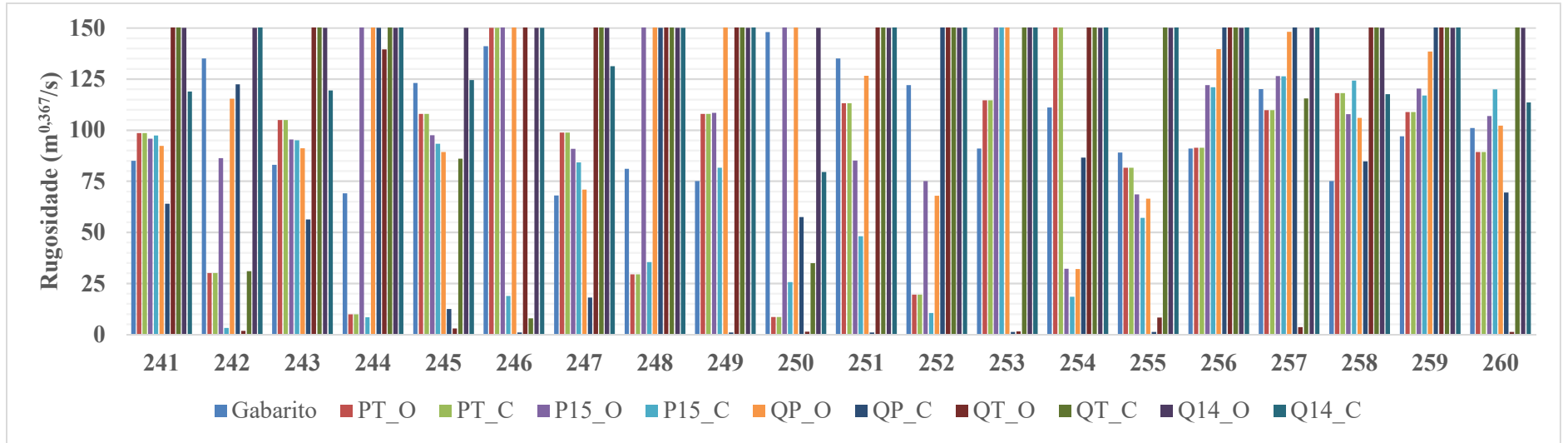
Fonte: Elaborado pelo autor



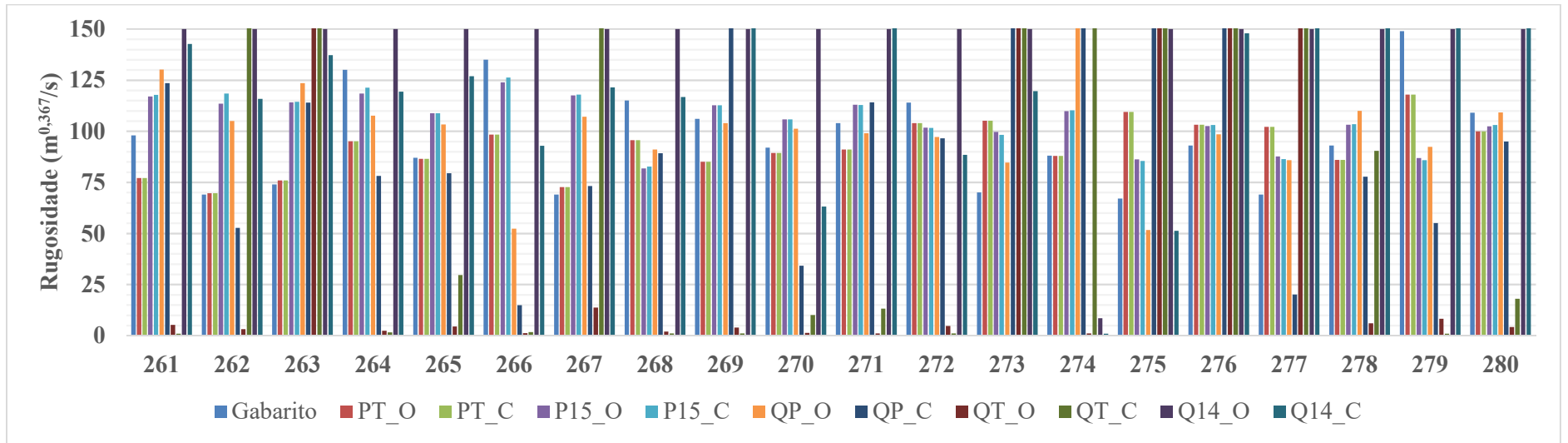
Fonte: Elaborado pelo autor



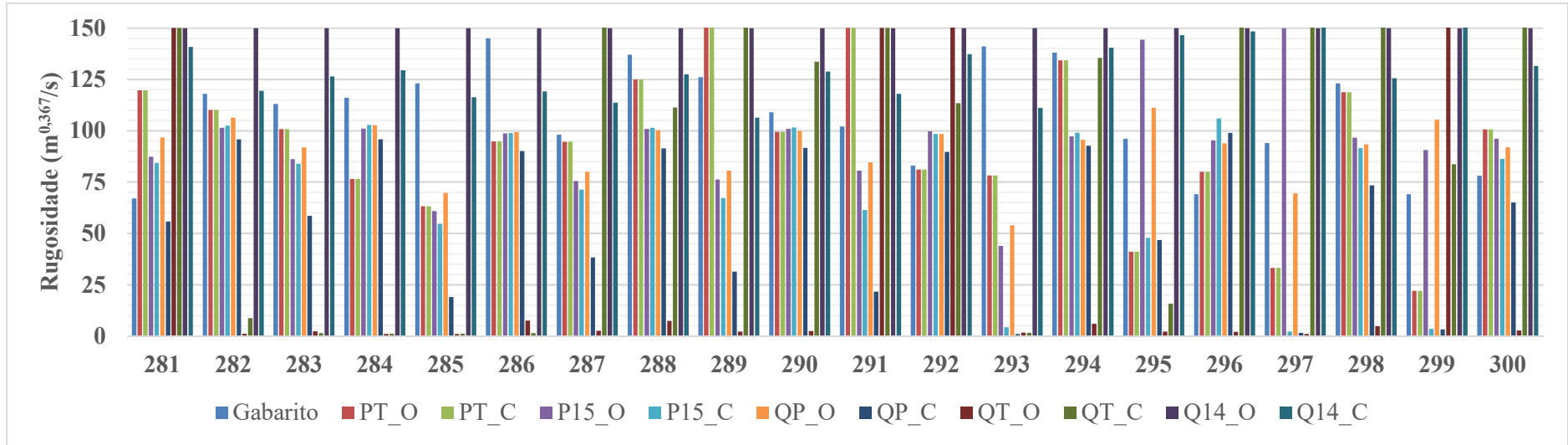
Fonte: Elaborado pelo autor



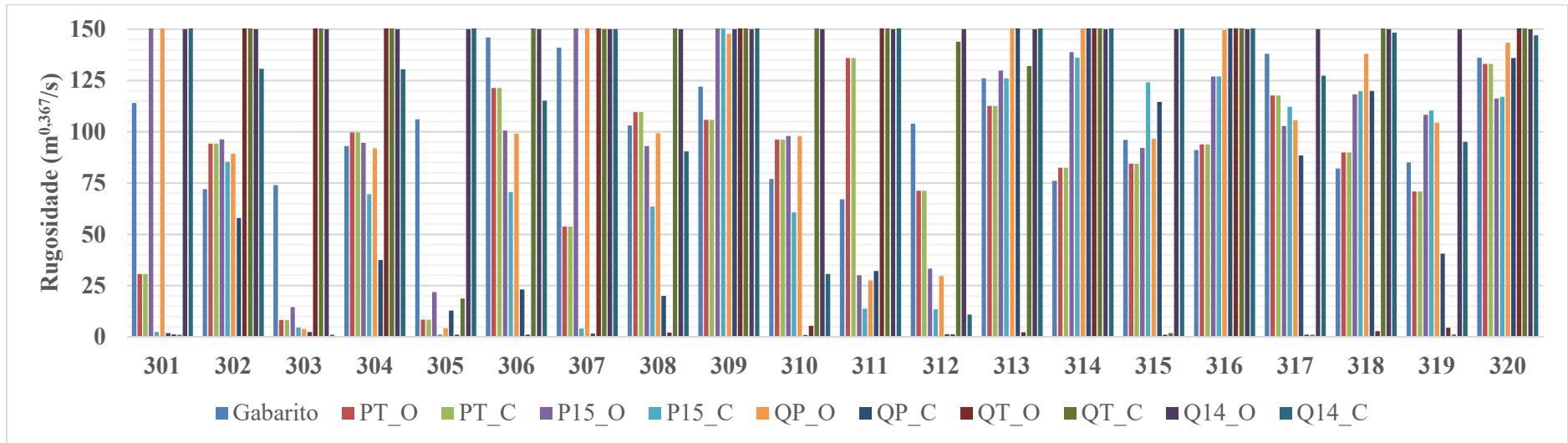
Fonte: Elaborado pelo autor



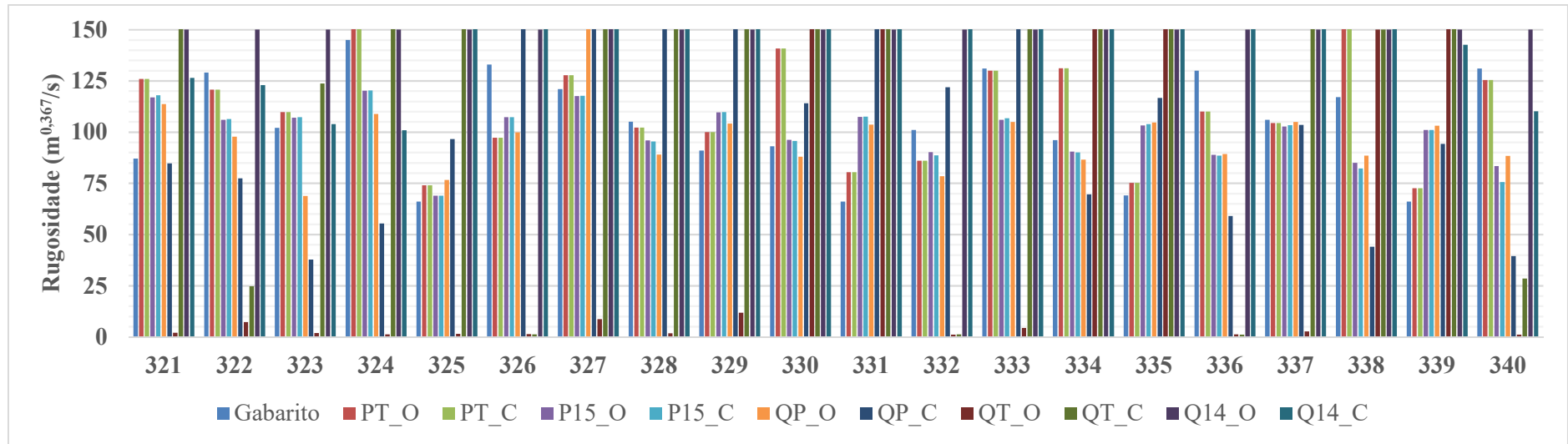
Fonte: Elaborado pelo autor



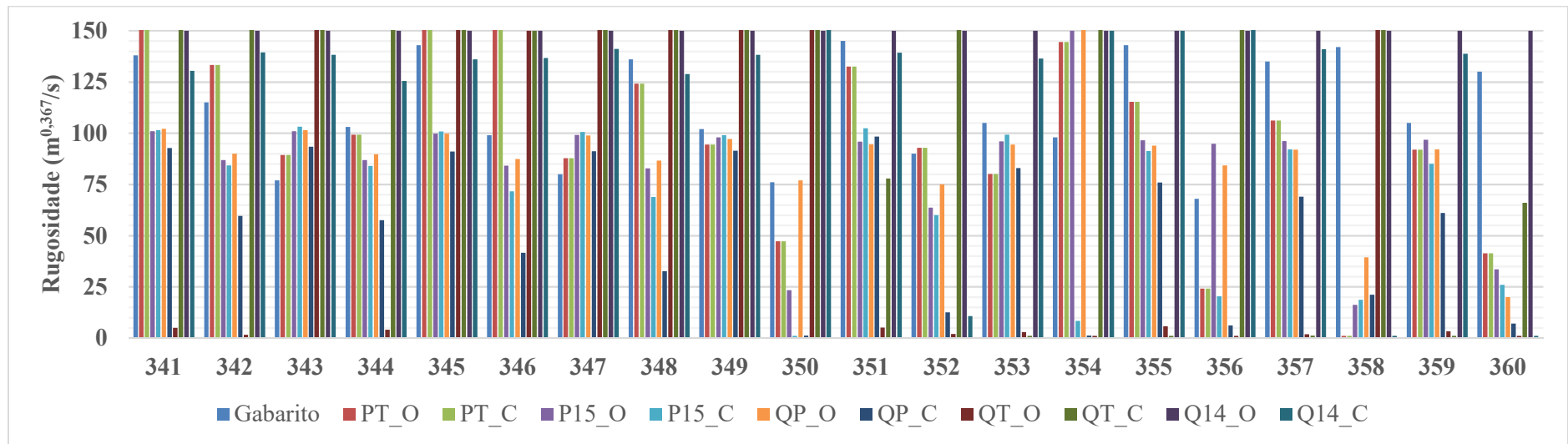
Fonte: Elaborado pelo autor



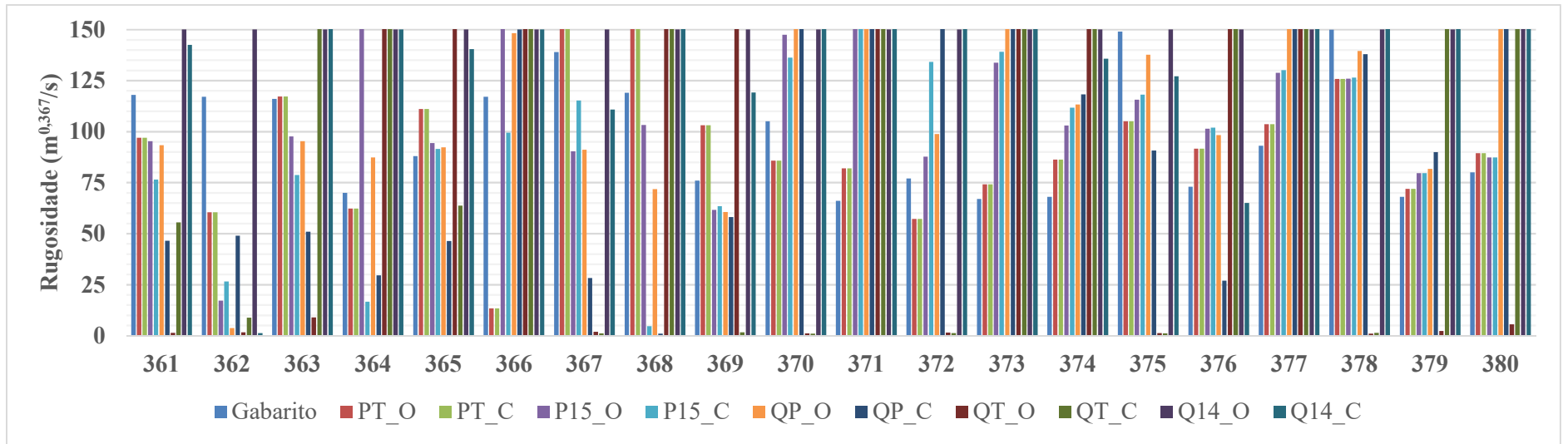
Fonte: Elaborado pelo autor



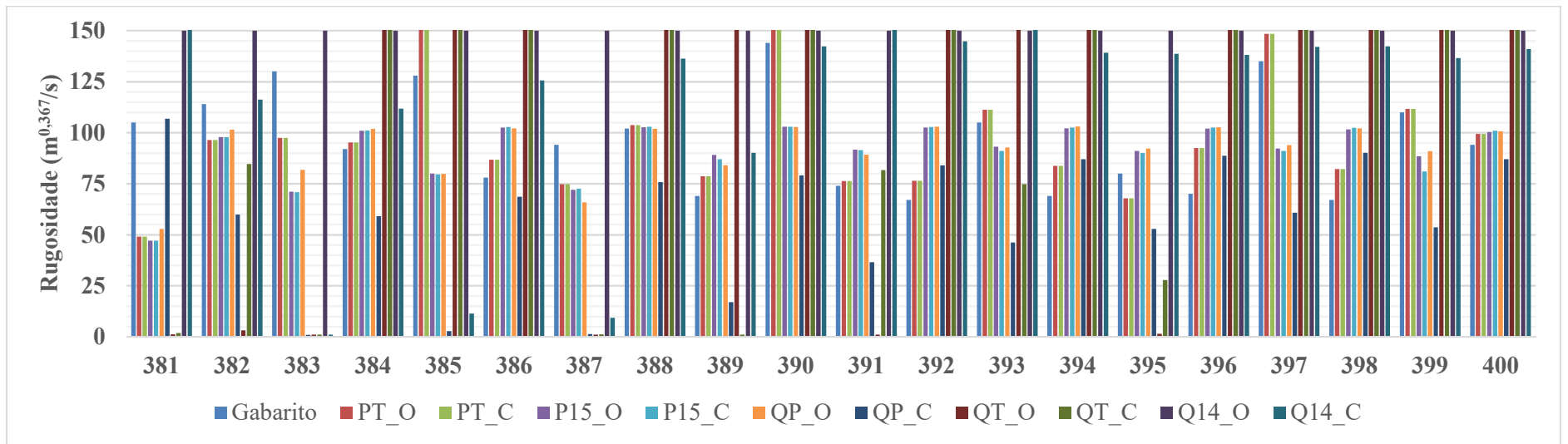
Fonte: Elaborado pelo autor



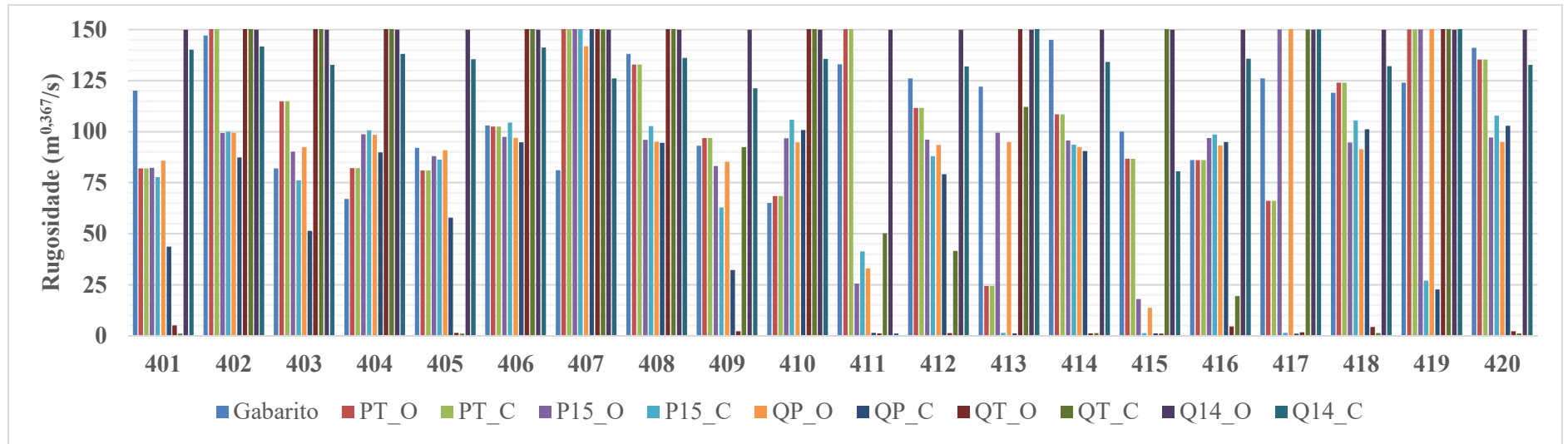
Fonte: Elaborado pelo autor



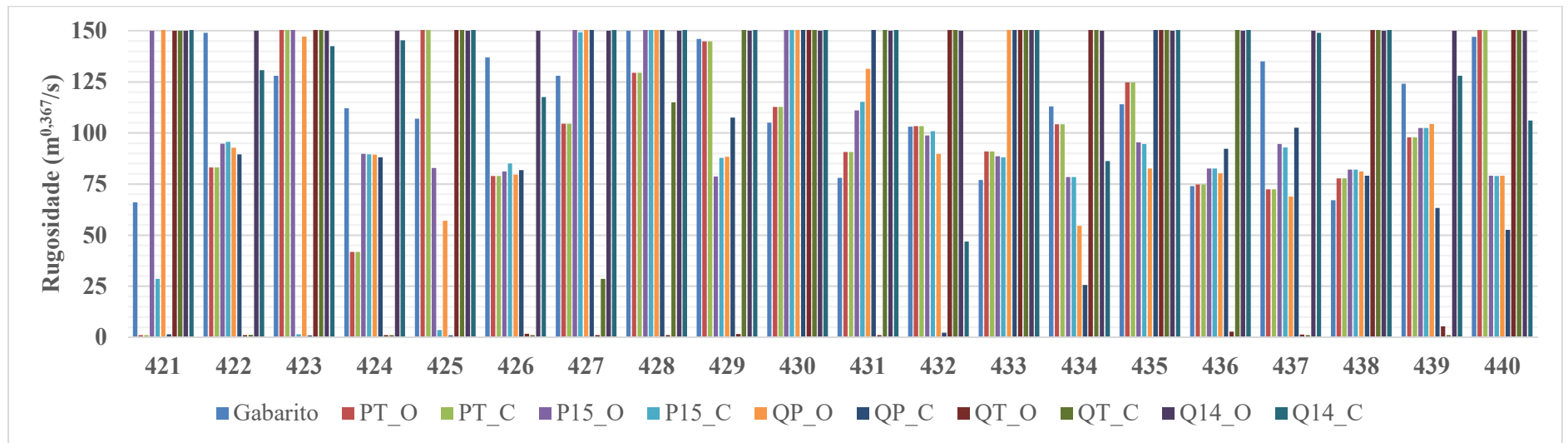
Fonte: Elaborado pelo autor



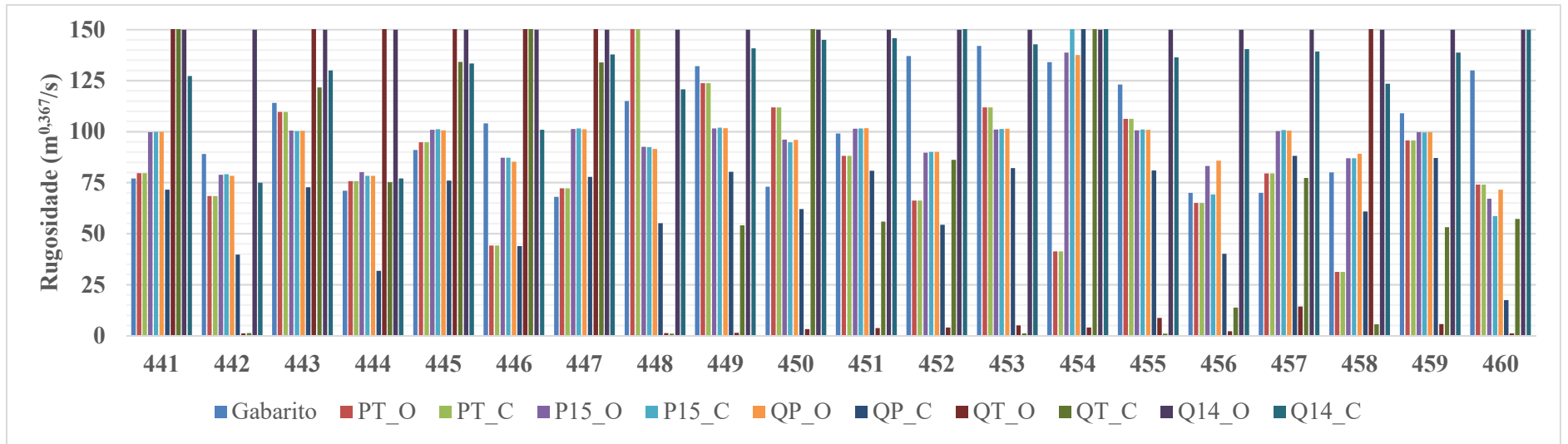
Fonte: Elaborado pelo autor



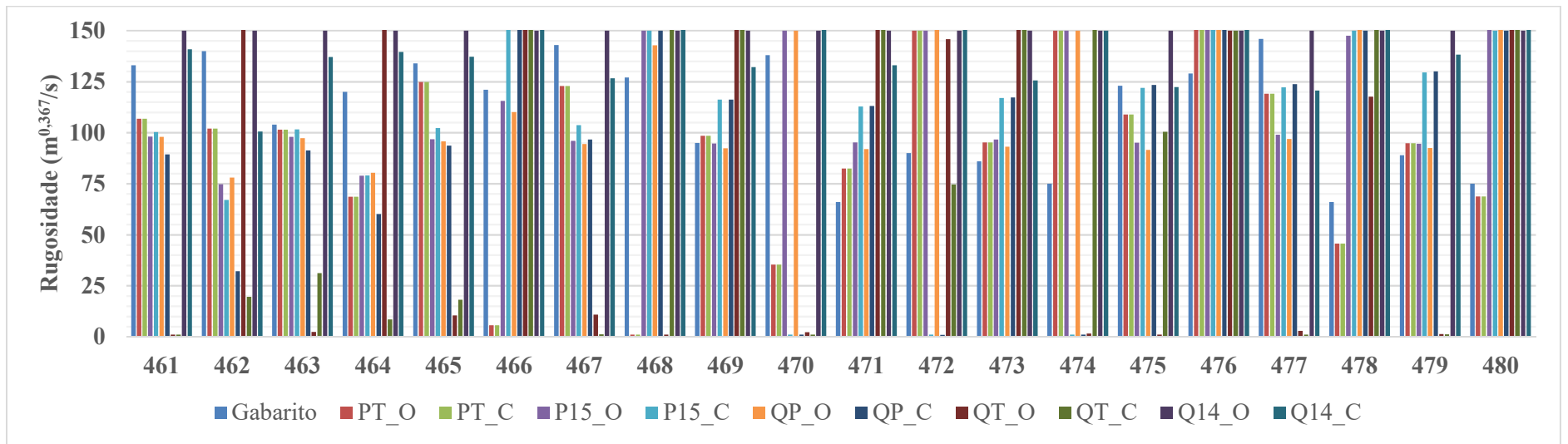
Fonte: Elaborado pelo autor



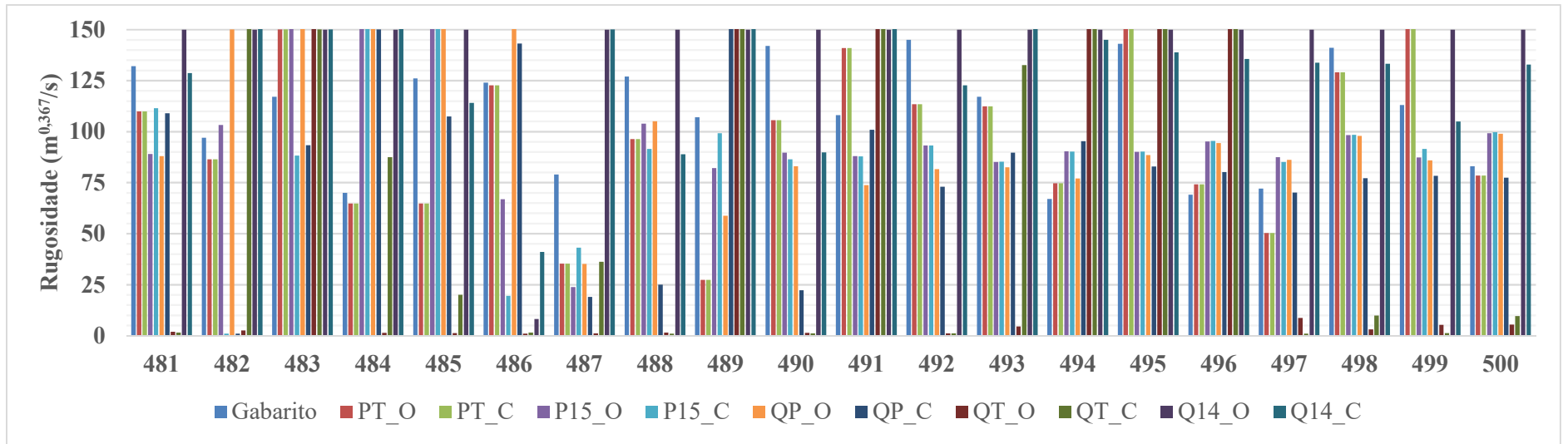
Fonte: Elaborado pelo autor



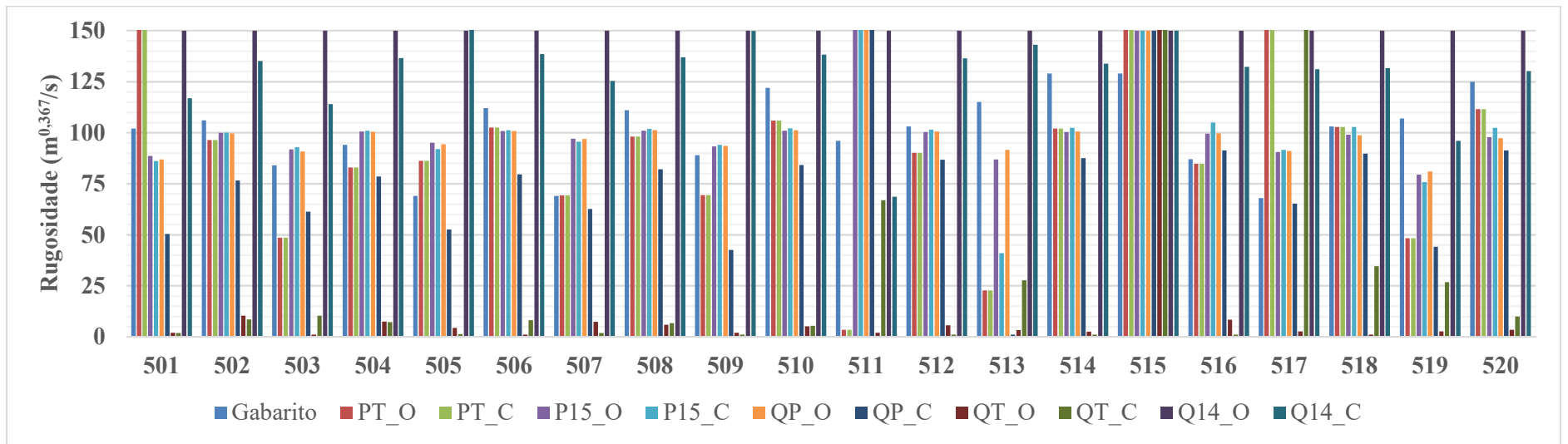
Fonte: Elaborado pelo autor



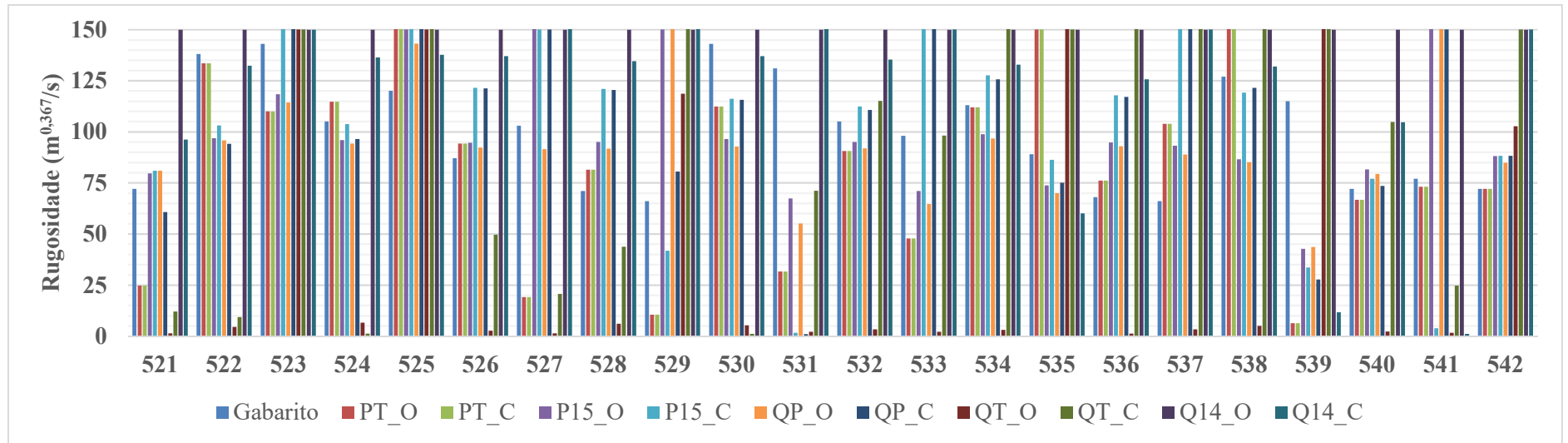
Fonte: Elaborado pelo autor



Fonte: Elaborado pelo autor

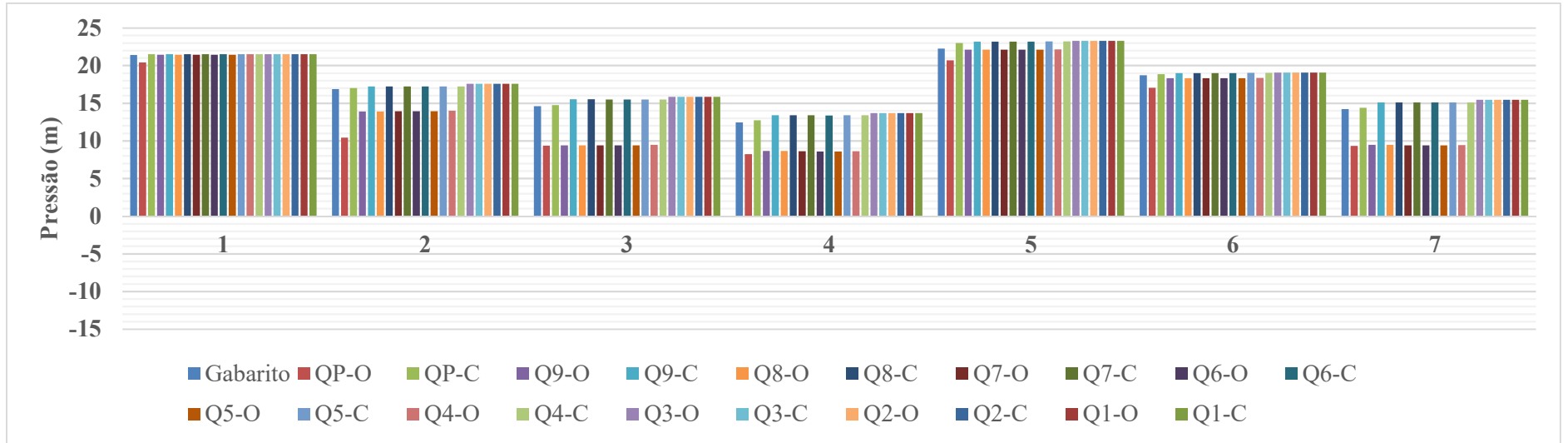


Fonte: Elaborado pelo autor

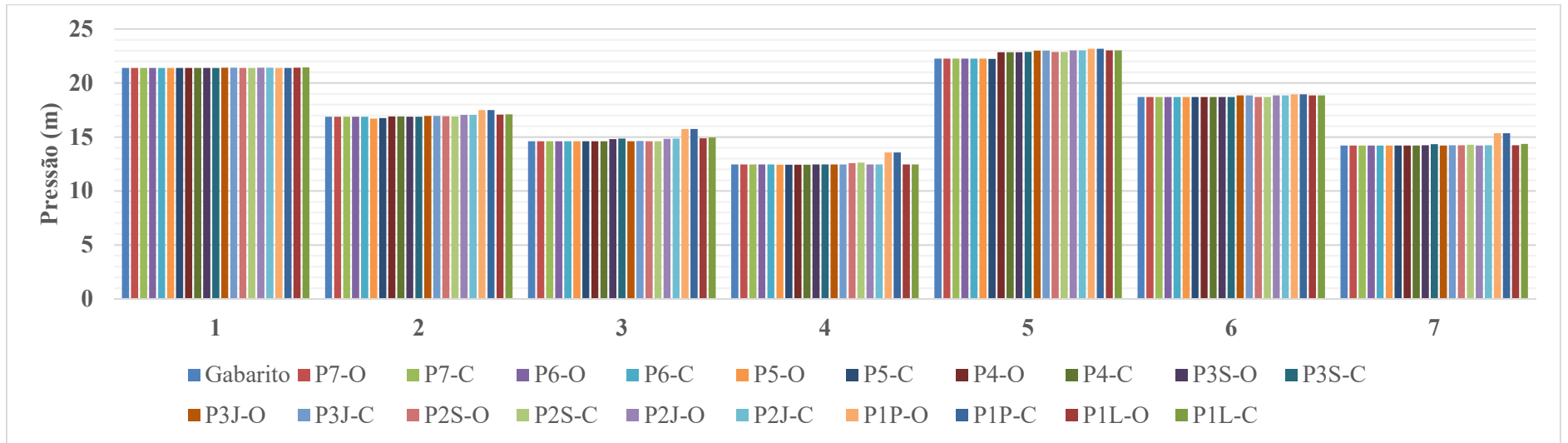


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE AS – Pressões encontradas na Calibração do fator de atrito de Darcy-Weisbach com rugosidade absoluta inicial de 0,006 mm: rede Porto (2006)

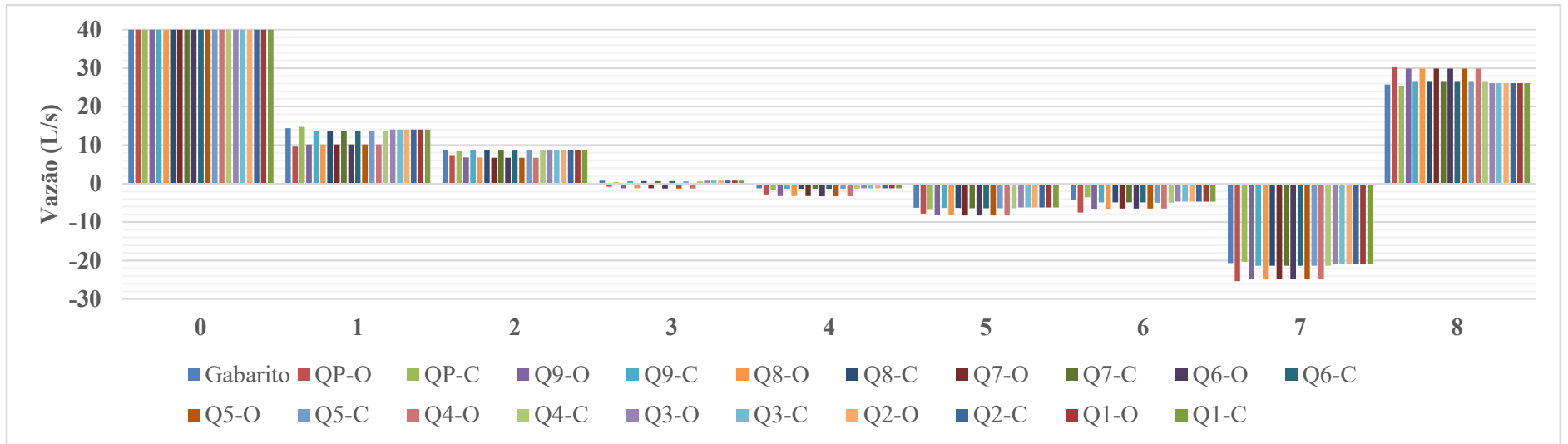


Fonte: Elaborado pelo autor

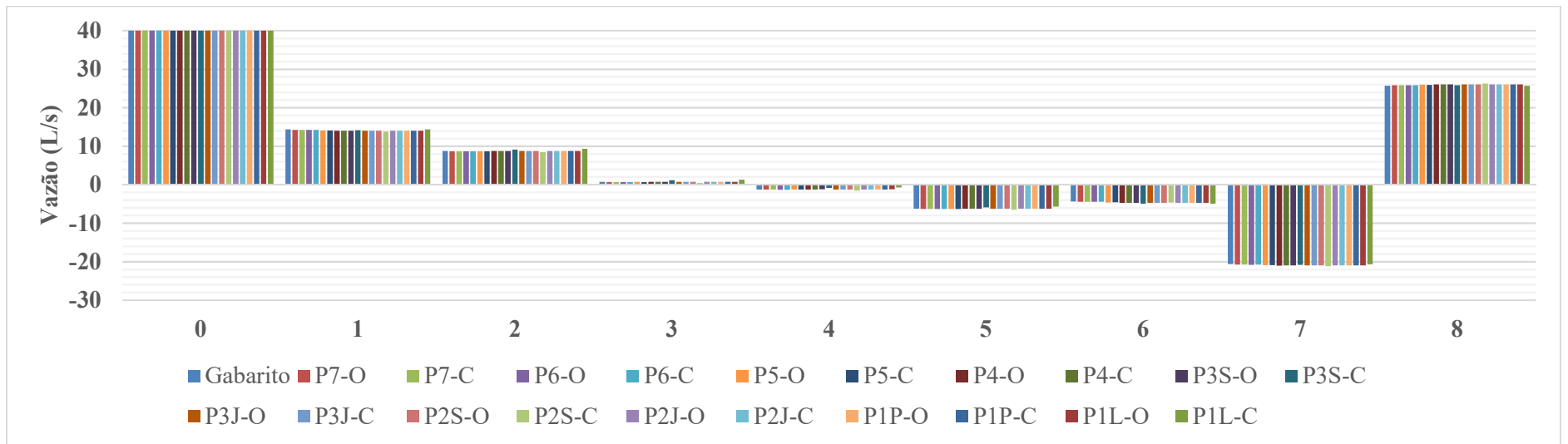


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE AT – Vazões encontradas na Calibração do fator de atrito de Darcy-Weisbach com rugosidade absoluta inicial de 0,006 mm: rede Porto (2006)

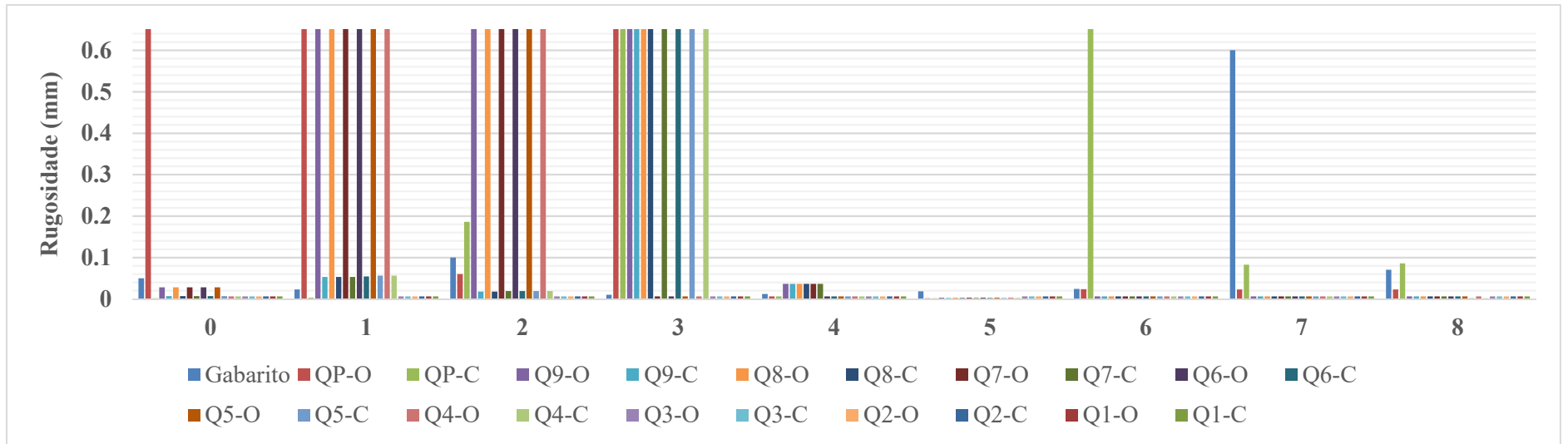


Fonte: Elaborado pelo autor

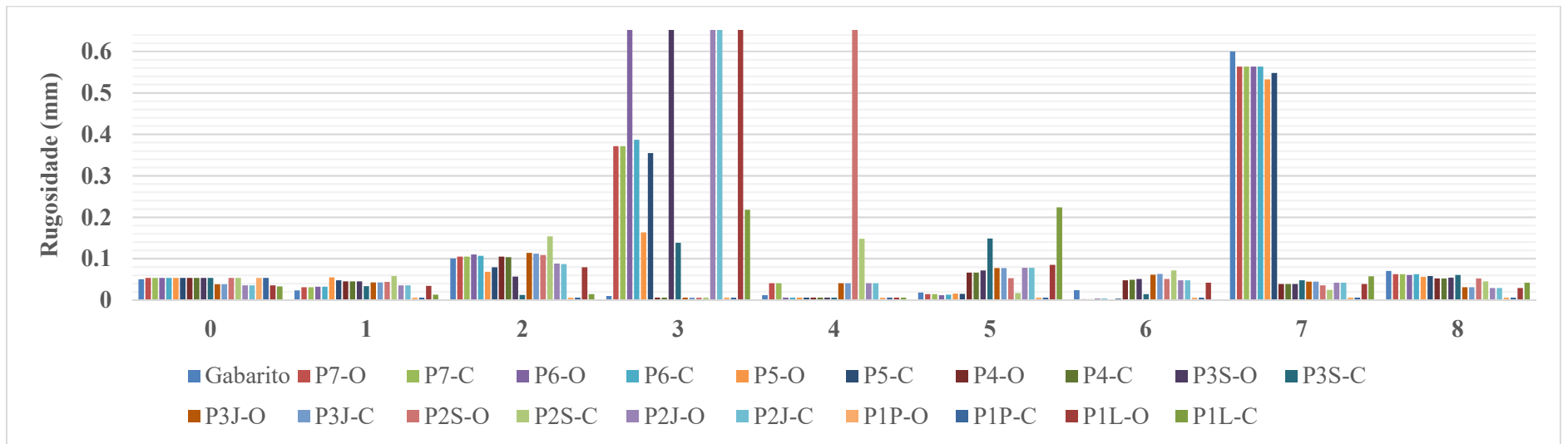


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE AU – Rugosidades absolutas encontradas na Calibração do fator de atrito de Darcy-Weisbach com rugosidade absoluta inicial de 0,006 mm: rede Porto (2006)

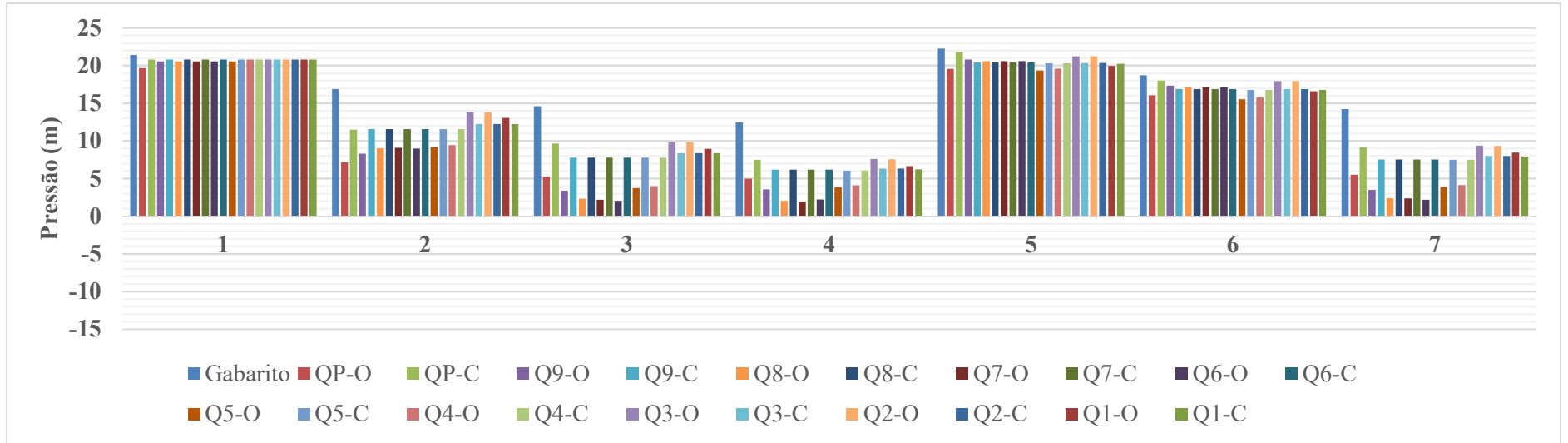


Fonte: Elaborado pelo autor

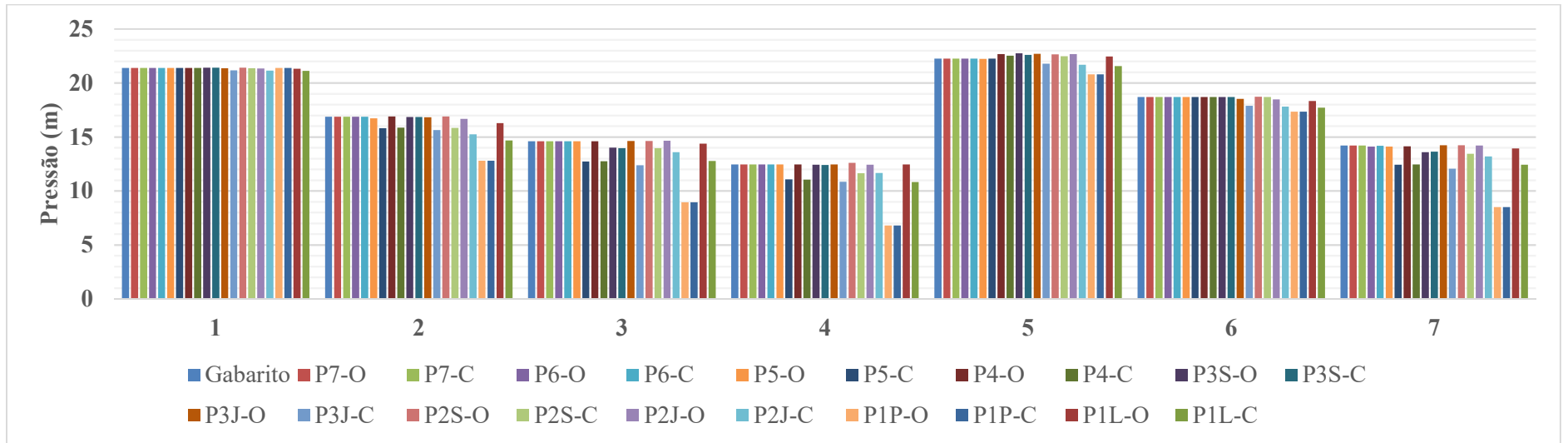


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE AV – Pressões encontradas na Calibração do fator de atrito de Darcy-Weisbach com rugosidade absoluta inicial de 0,6 mm: rede Porto (2006)

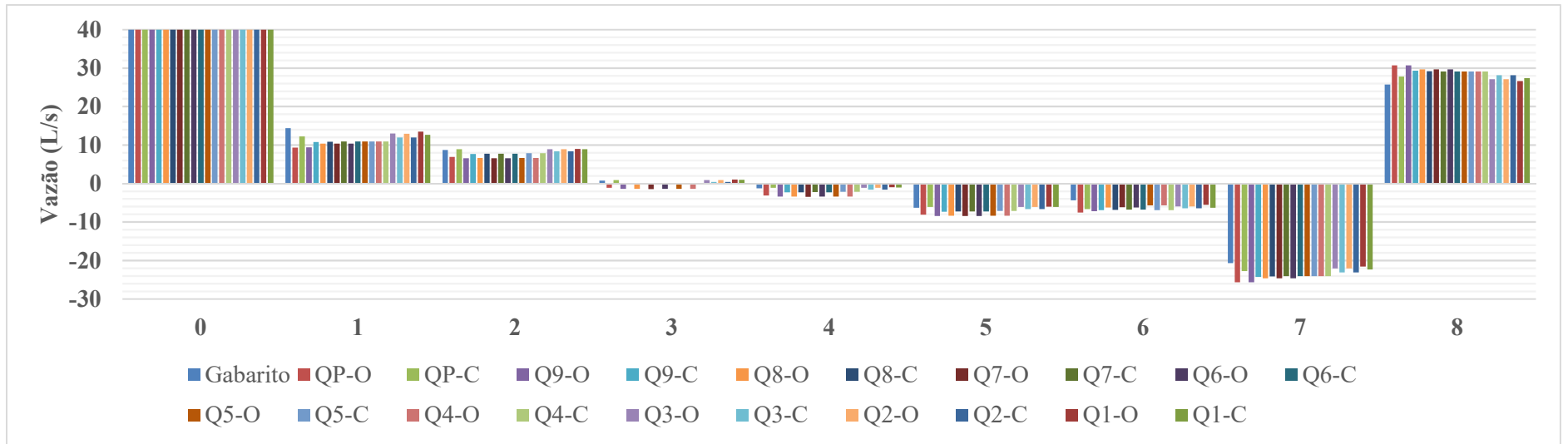


Fonte: Elaborado pelo autor

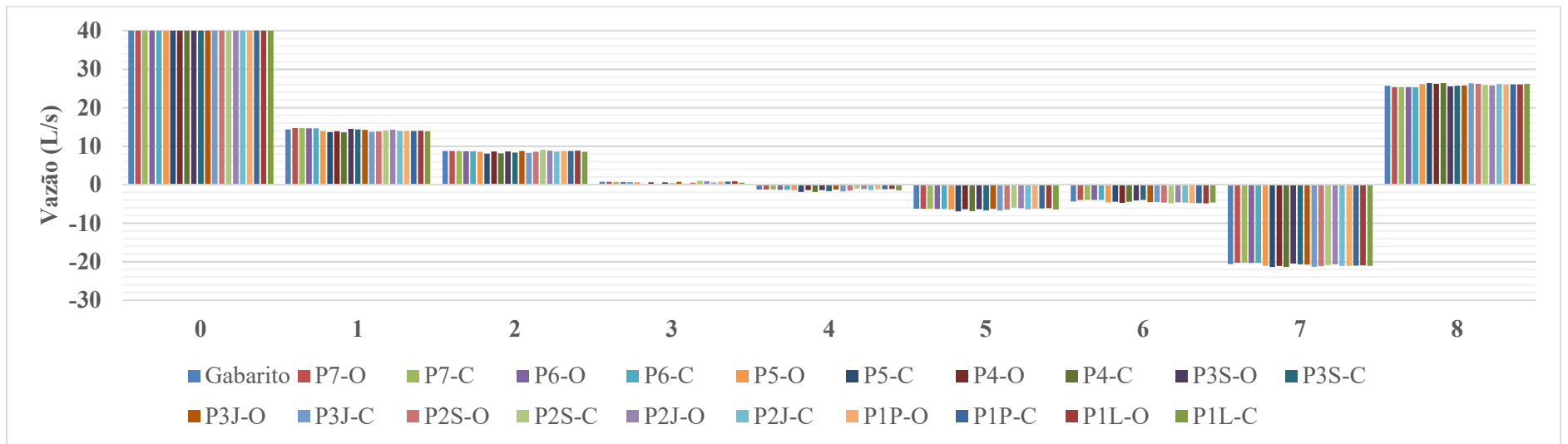


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE AW – Vazões encontradas na Calibração do fator de atrito de Darcy-Weisbach com rugosidade absoluta inicial de 0,6 mm: rede Porto (2006)

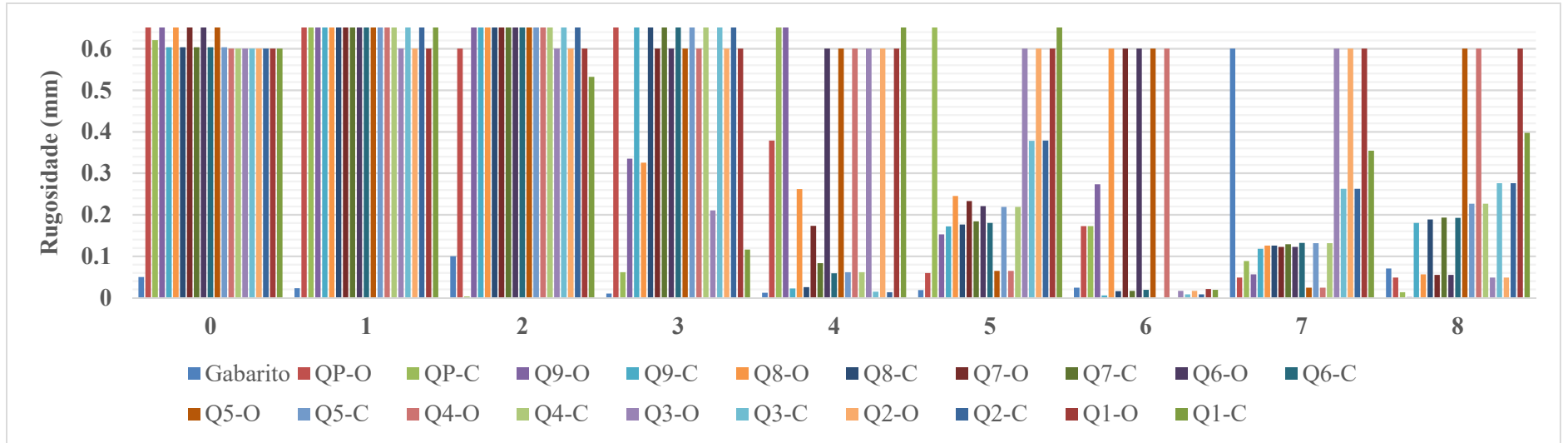


Fonte: Elaborado pelo autor

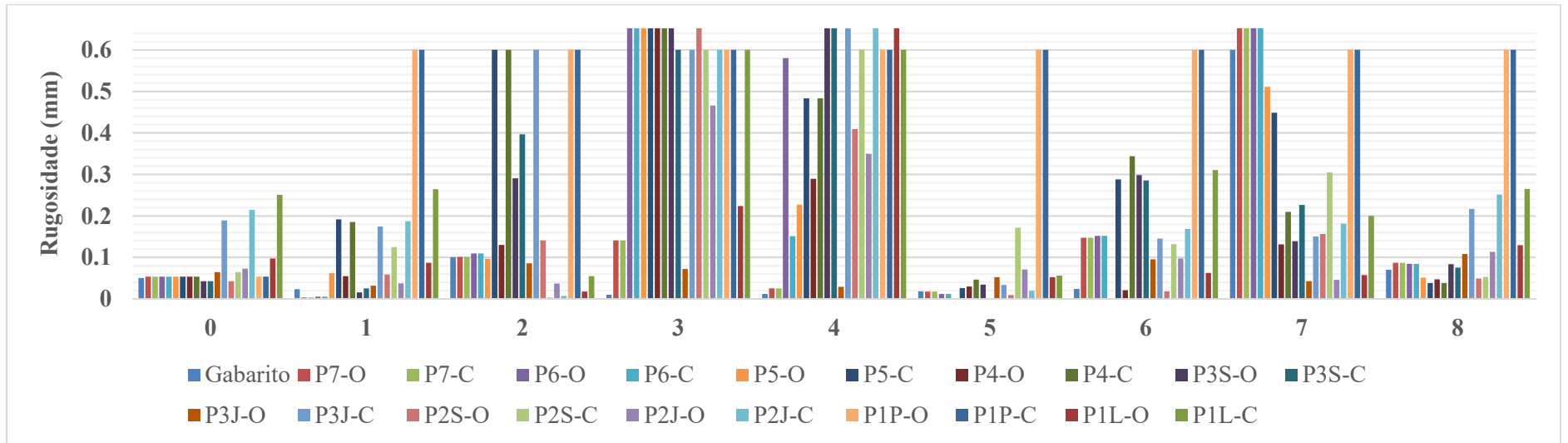


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE AX – Rugosidades absolutas encontradas na Calibração do fator de atrito de Darcy-Weisbach com rugosidade absoluta inicial de 0,6 mm: rede Porto (2006)

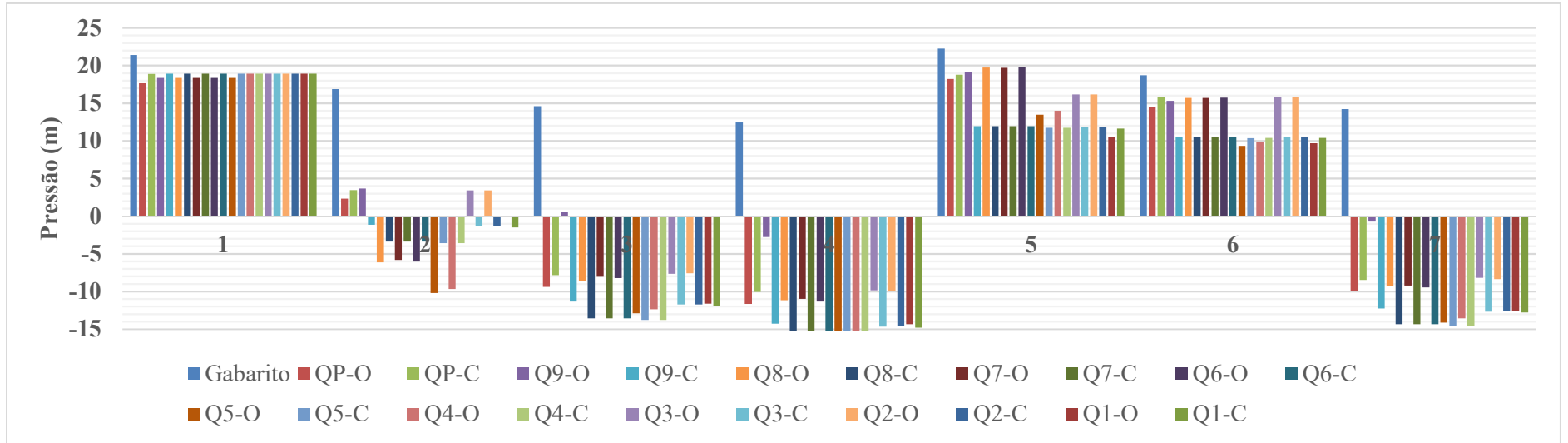


Fonte: Elaborado pelo autor

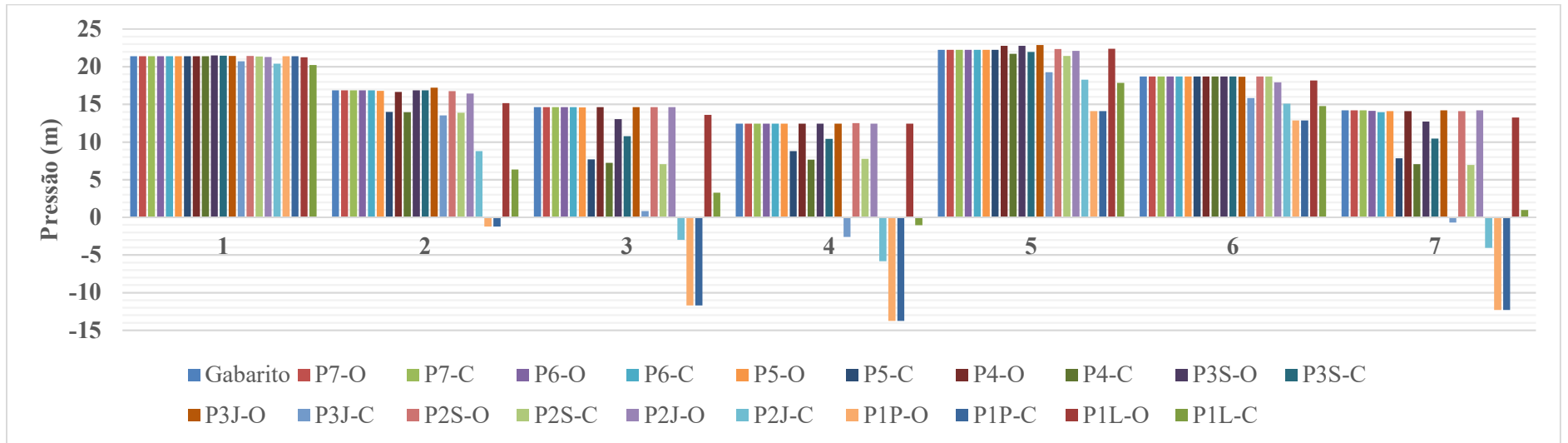


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE AY – Pressões encontradas na Calibração do fator de atrito de Darcy-Weisbach com rugosidade absoluta inicial de 6 mm: rede Porto (2006)

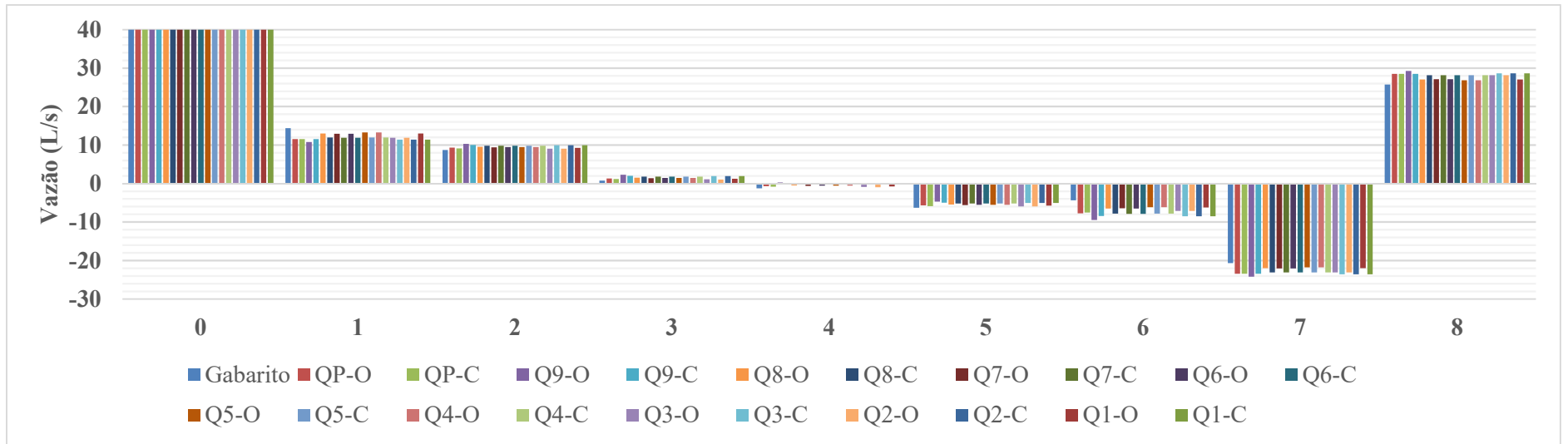


Fonte: Elaborado pelo autor

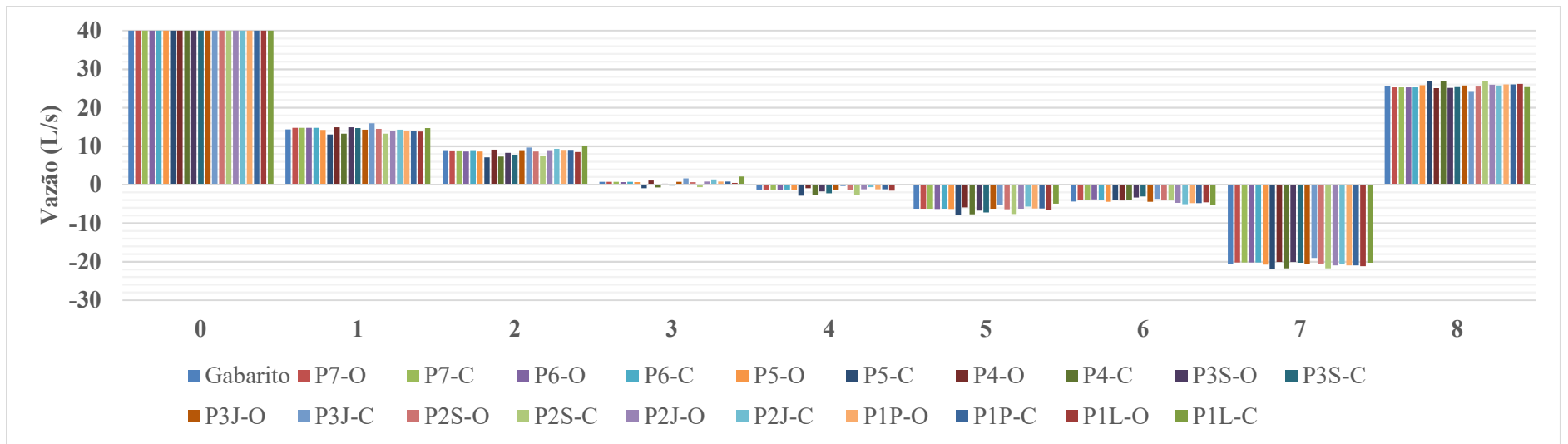


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE AZ – Vazões encontradas na Calibração do fator de atrito de Darcy-Weisbach com rugosidade absoluta inicial de 6 mm: rede Porto (2006)

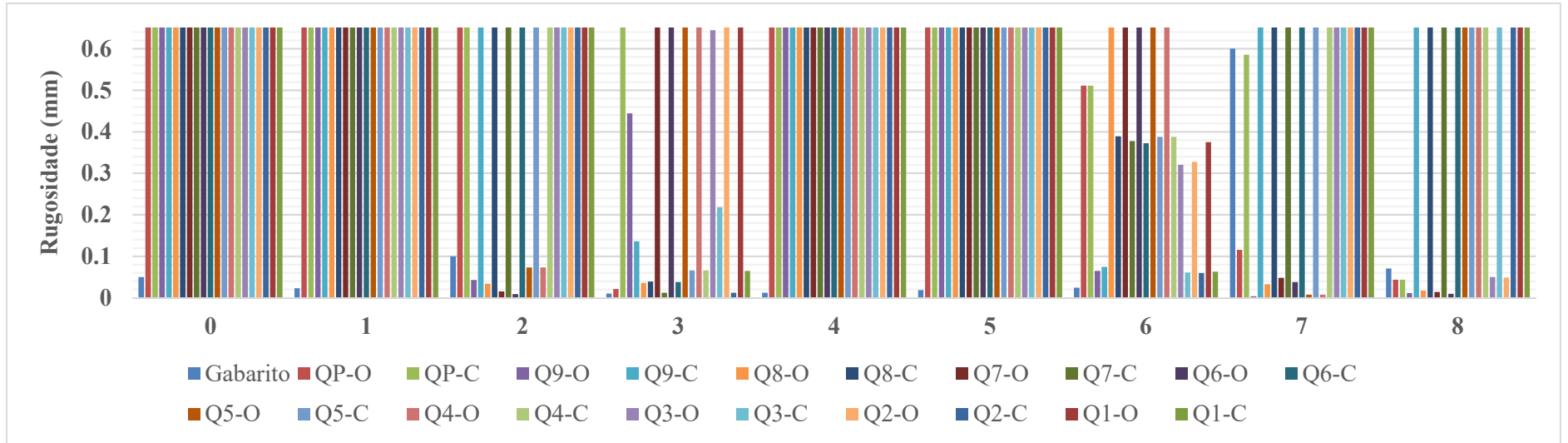


Fonte: Elaborado pelo autor

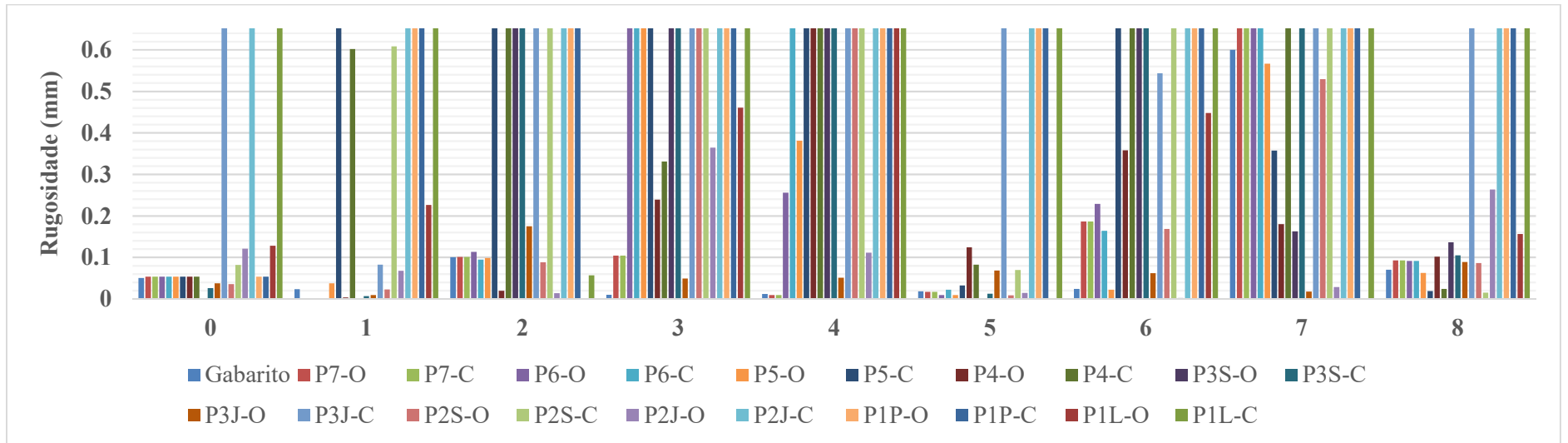


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE BA – Rugosidades absolutas encontradas na Calibração do fator de atrito de Darcy-Weisbach com rugosidade absoluta inicial de 6 mm: rede Porto (2006)

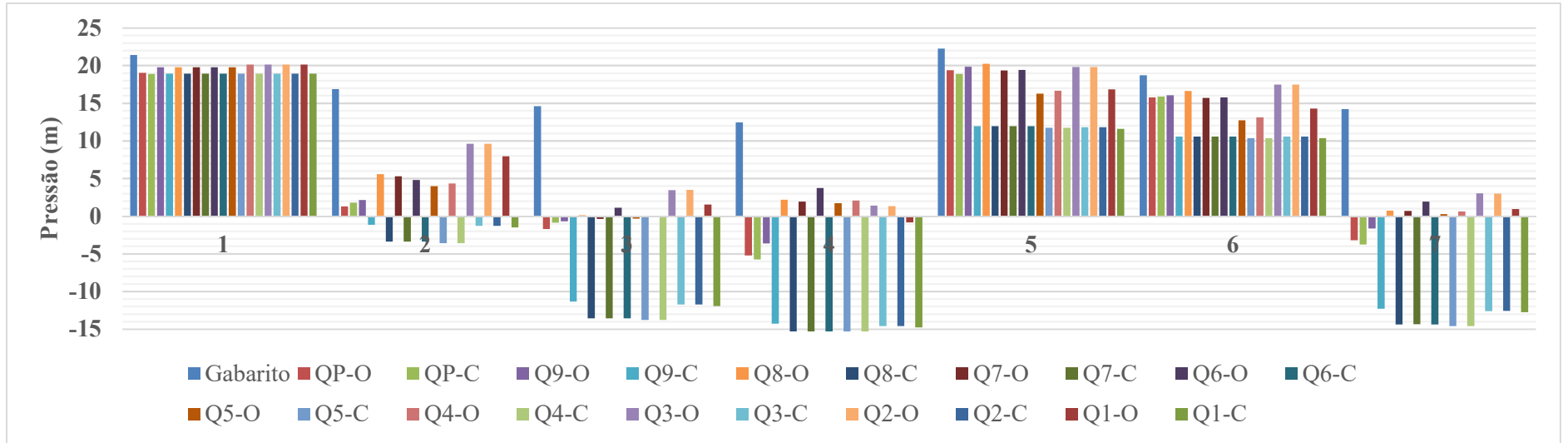


Fonte: Elaborado pelo autor

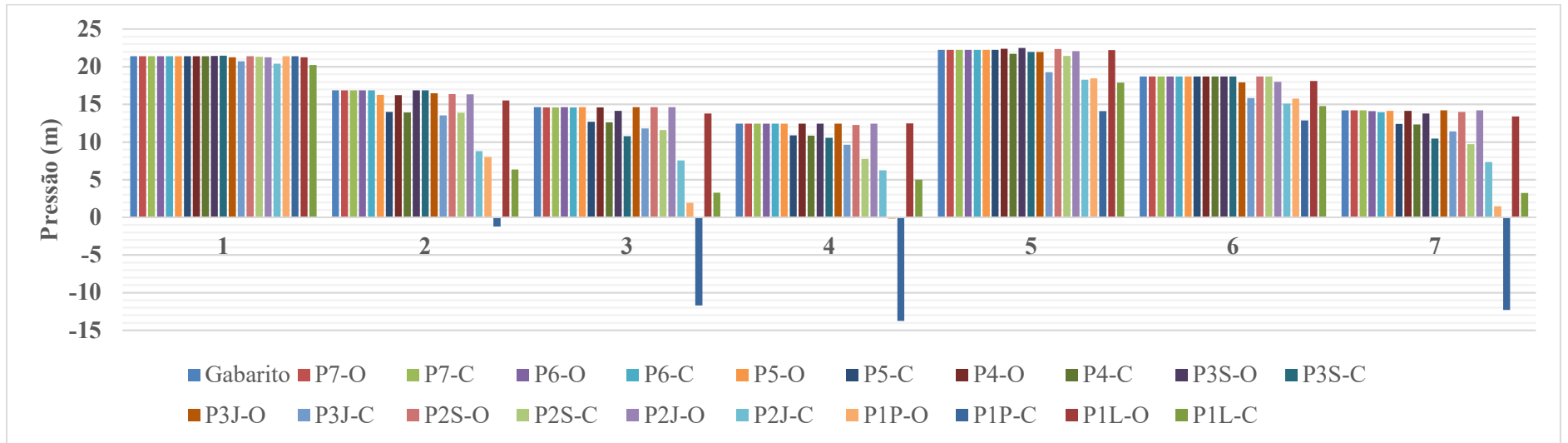


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE BB – Pressões encontradas na Calibração do fator de atrito de Darcy-Weisbach com rugosidade absoluta inicial calculada com o uso da sub-rotina computacional: rede Porto (2006)

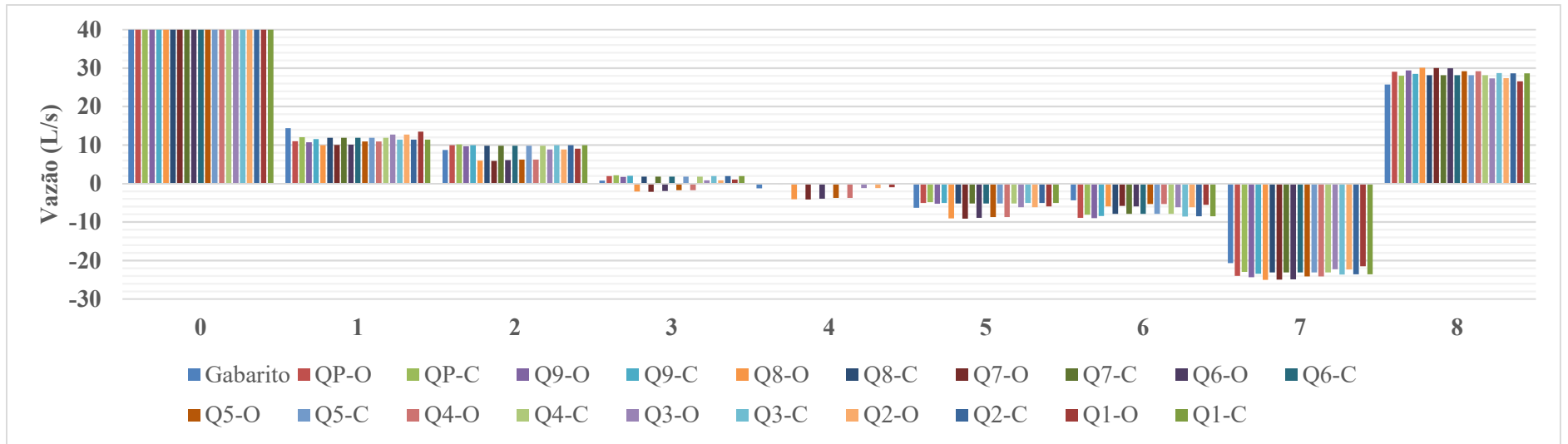


Fonte: Elaborado pelo autor

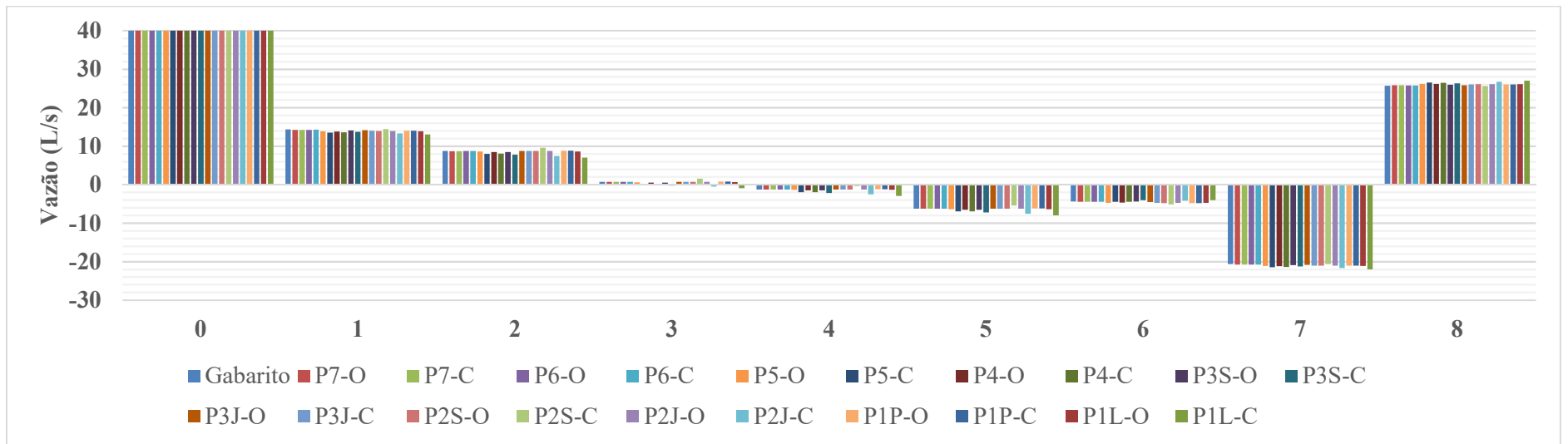


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE BC – Vazões encontradas na Calibração do fator de atrito de Darcy-Weisbach com rugosidade absoluta inicial calculada com o uso da sub-rotina computacional: rede Porto (2006)

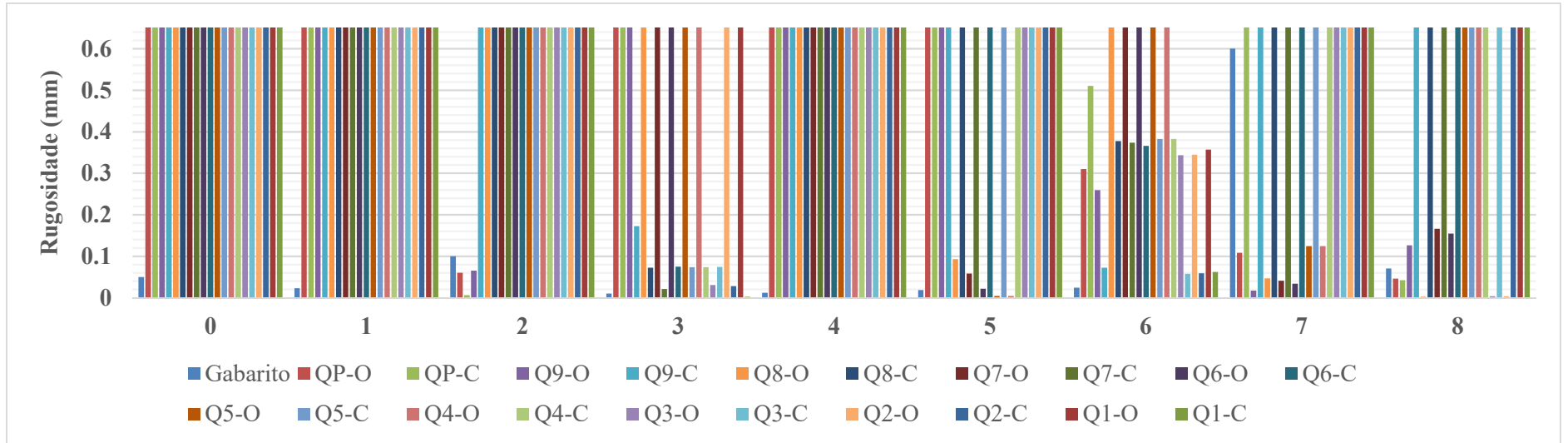


Fonte: Elaborado pelo autor

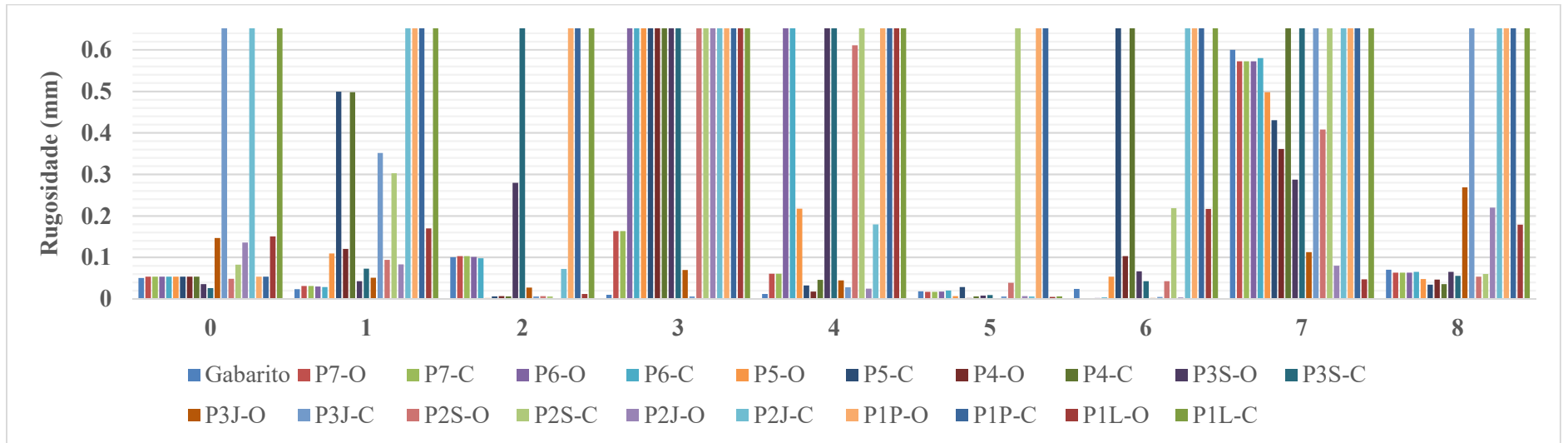


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE BD – Rugosidades absolutas encontradas na Calibração do fator de atrito de Darcy-Weisbach com rugosidade absoluta inicial calculada com o uso da sub-rotina computacional: rede Porto (2006)

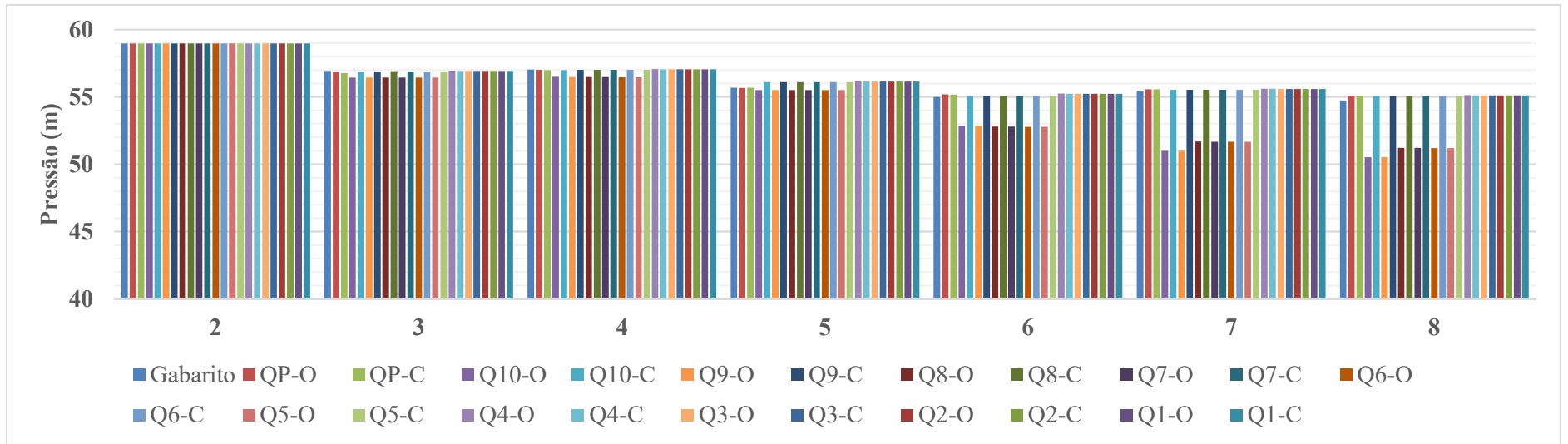


Fonte: Elaborado pelo autor

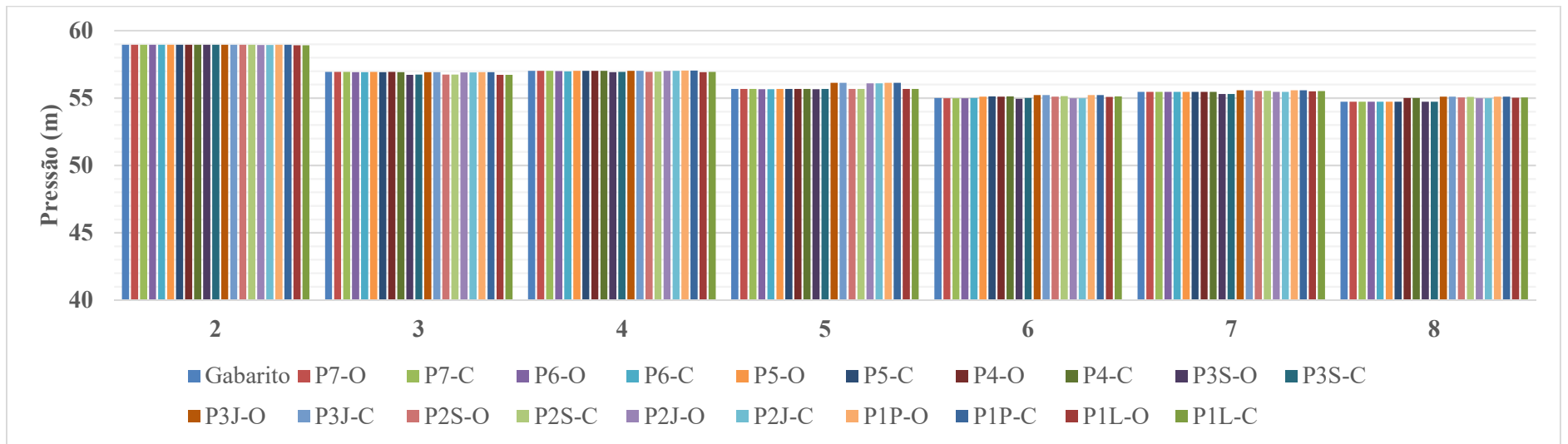


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE BE – Pressões encontradas na Calibração do fator de atrito de Darcy-Weisbach com rugosidade absoluta inicial de 0,006 mm: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

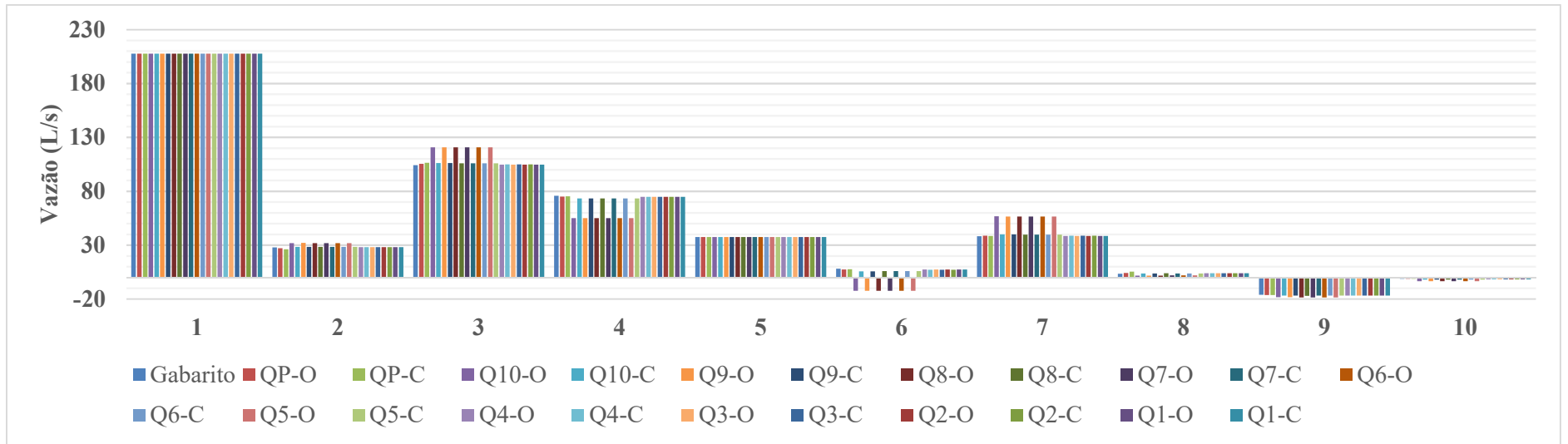


Fonte: Elaborado pelo autor

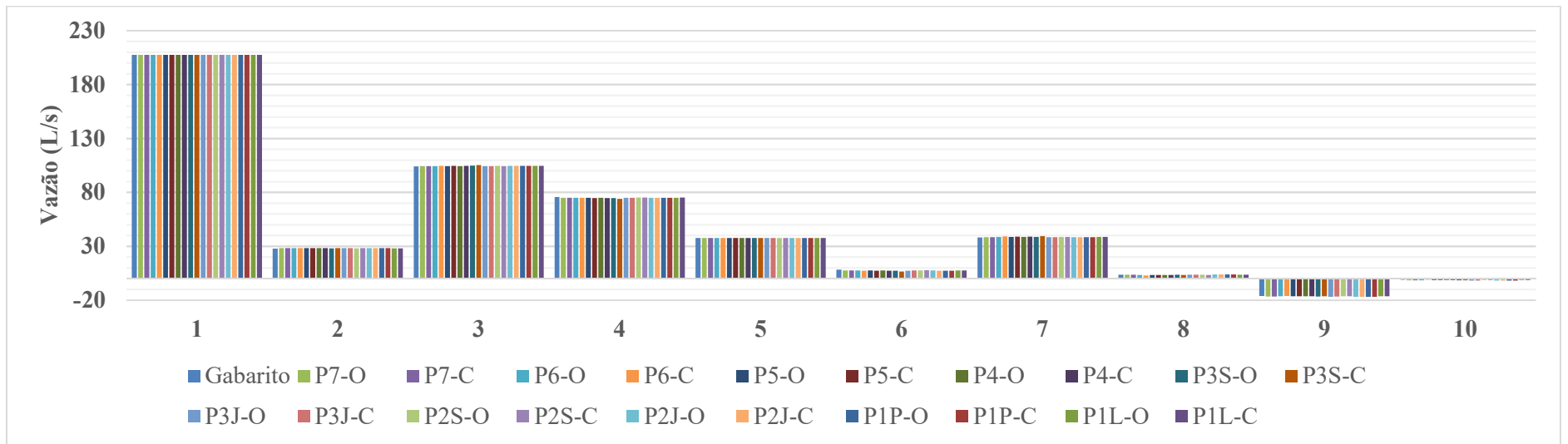


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE BF – Vazões encontradas na Calibração do fator de atrito de Darcy-Weisbach com rugosidade absoluta inicial de 0,006 mm: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

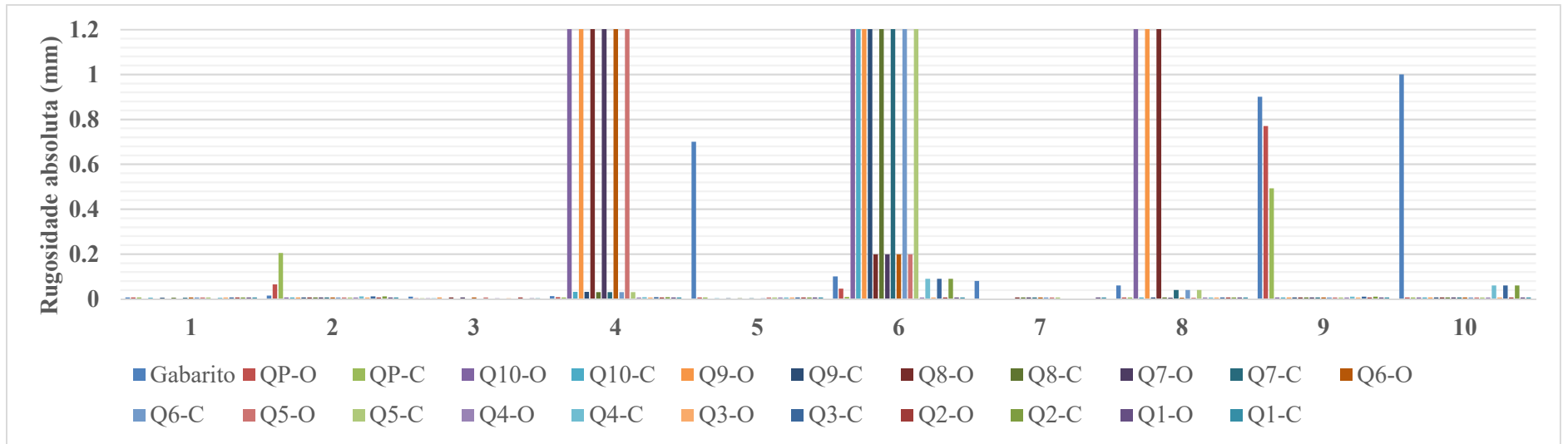


Fonte: Elaborado pelo autor

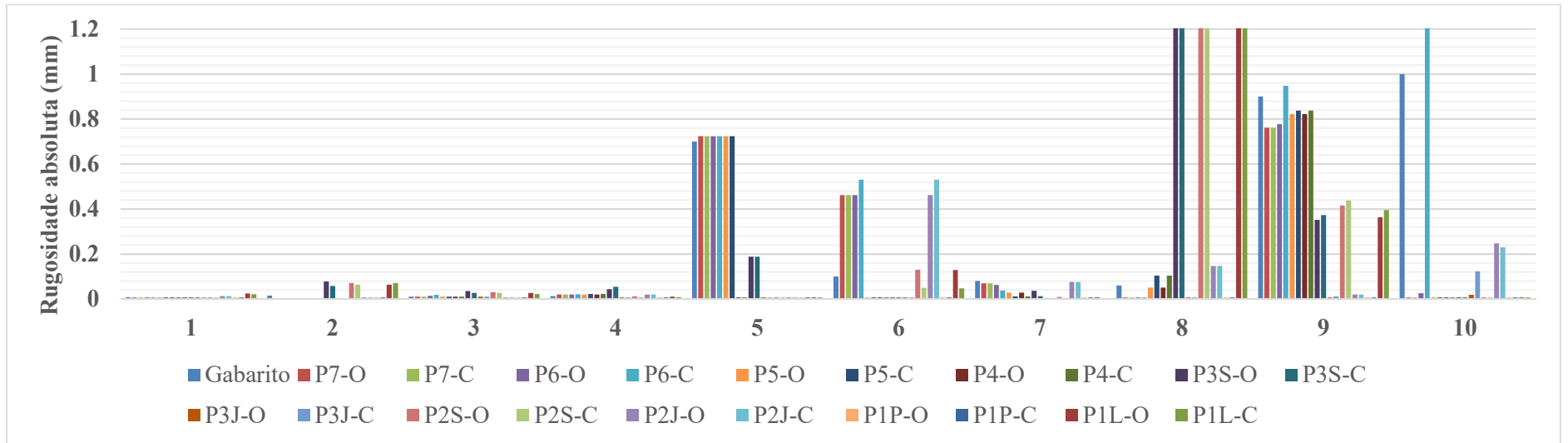


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE BG – Rugosidades absolutas encontradas na Calibração do fator de atrito de Darcy-Weisbach com rugosidade absoluta inicial de 0,006 mm: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

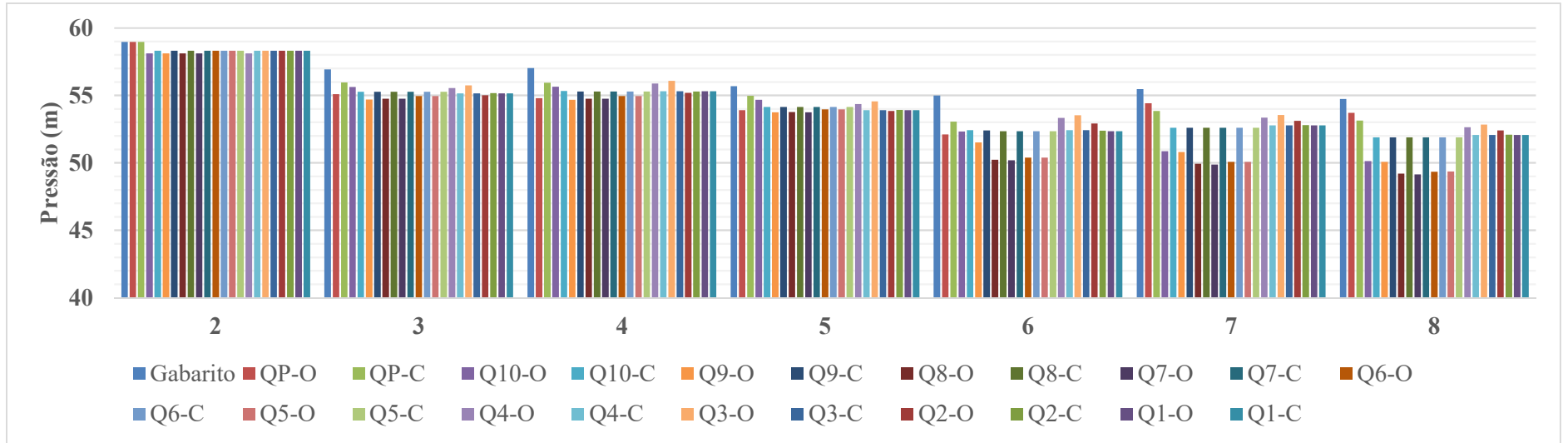


Fonte: Elaborado pelo autor

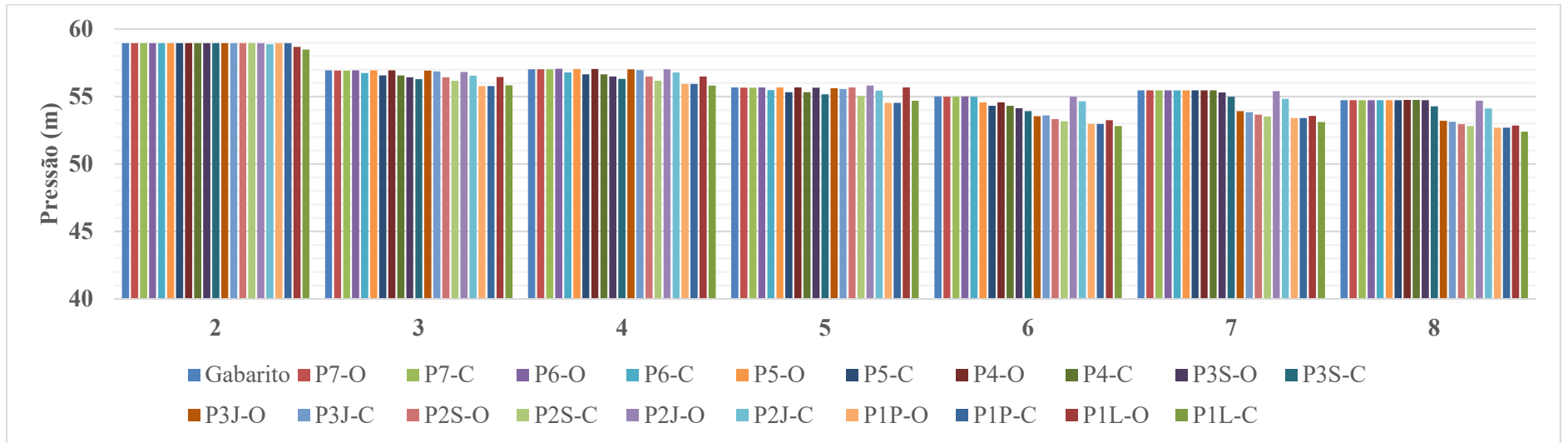


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE BH – Pressões encontradas na Calibração do fator de atrito de Darcy-Weisbach com rugosidade absoluta inicial de 0,6 mm: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

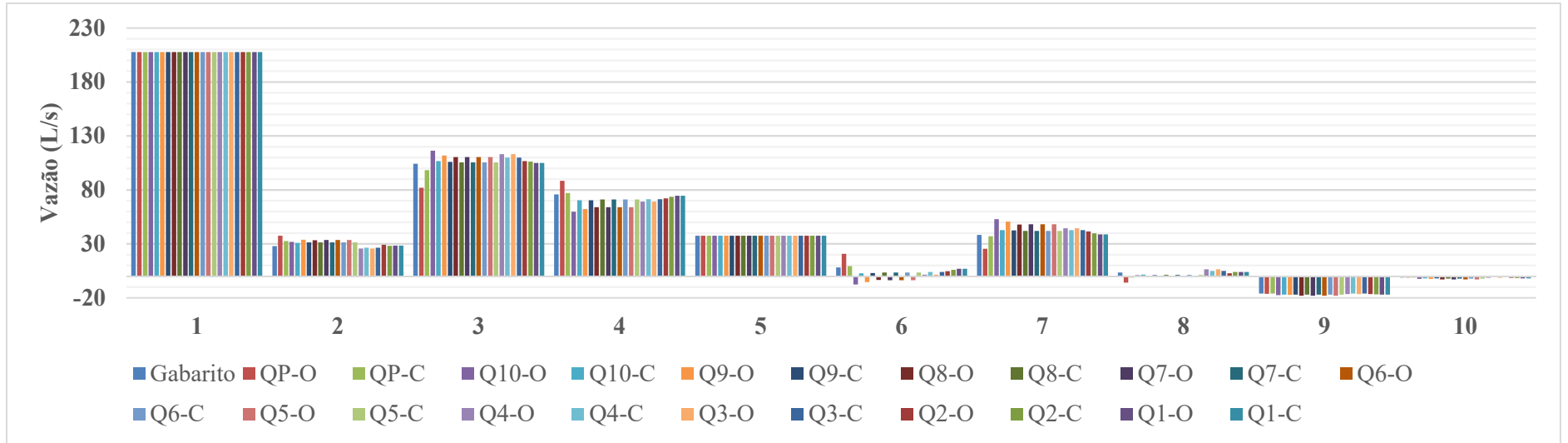


Fonte: Elaborado pelo autor

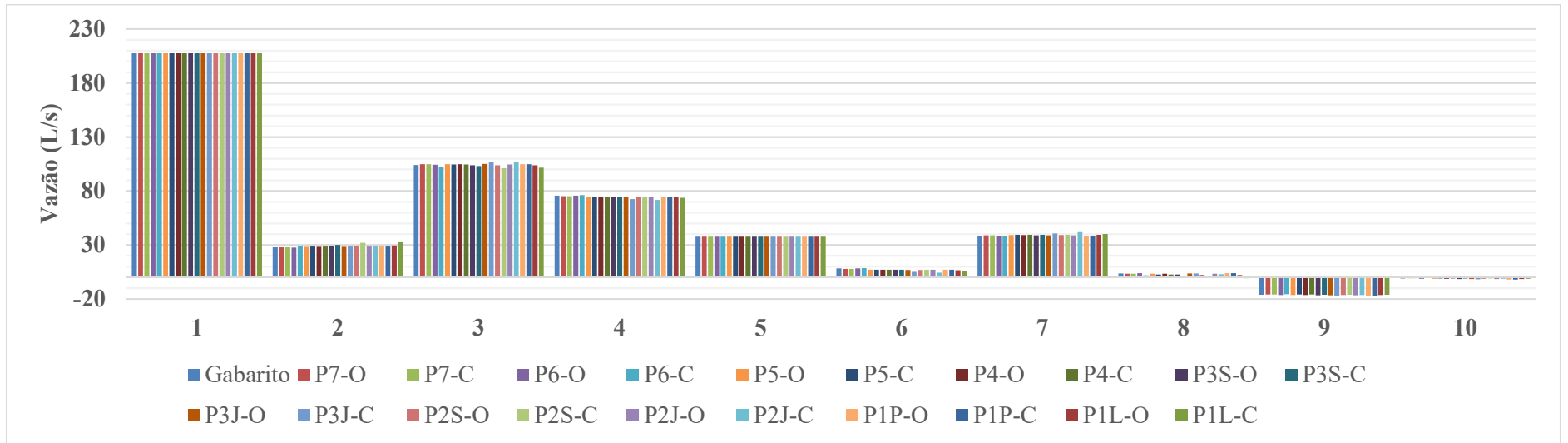


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE BI – Vazões encontradas na Calibração do fator de atrito de Darcy-Weisbach com rugosidade absoluta inicial de 0,6 mm: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

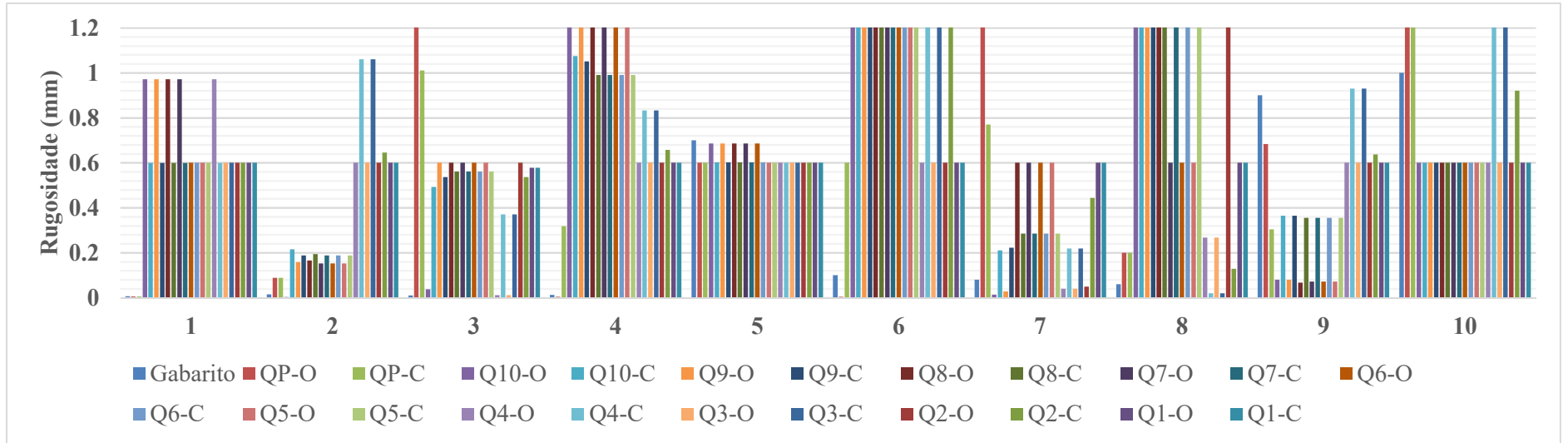


Fonte: Elaborado pelo autor

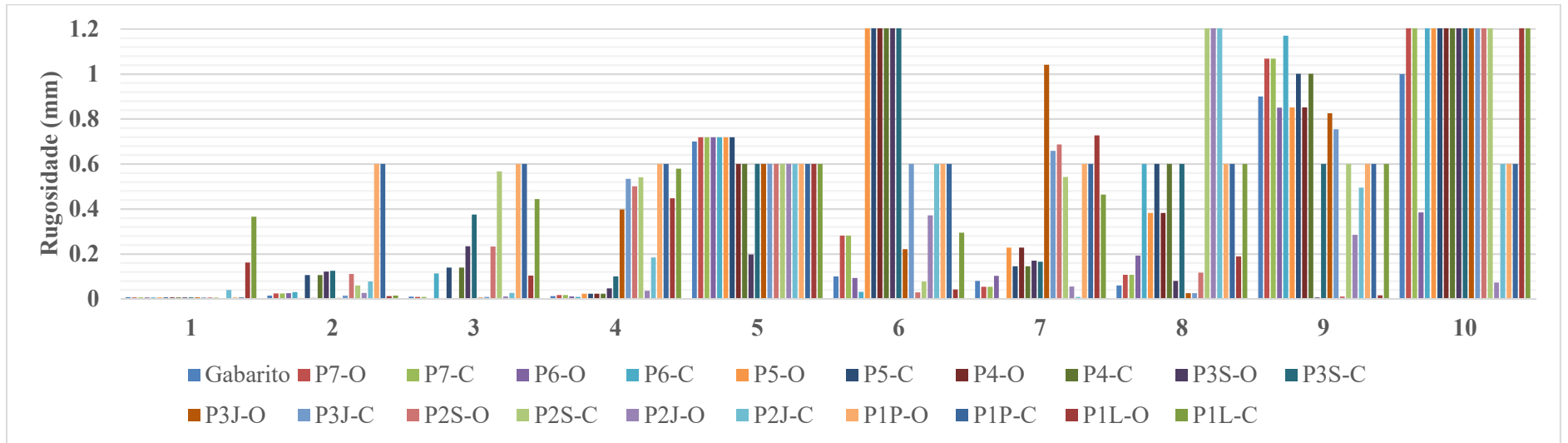


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE BJ – Rugosidades absolutas encontradas na Calibração do fator de atrito de Darcy-Weisbach com rugosidade absoluta inicial de 0,6 mm: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

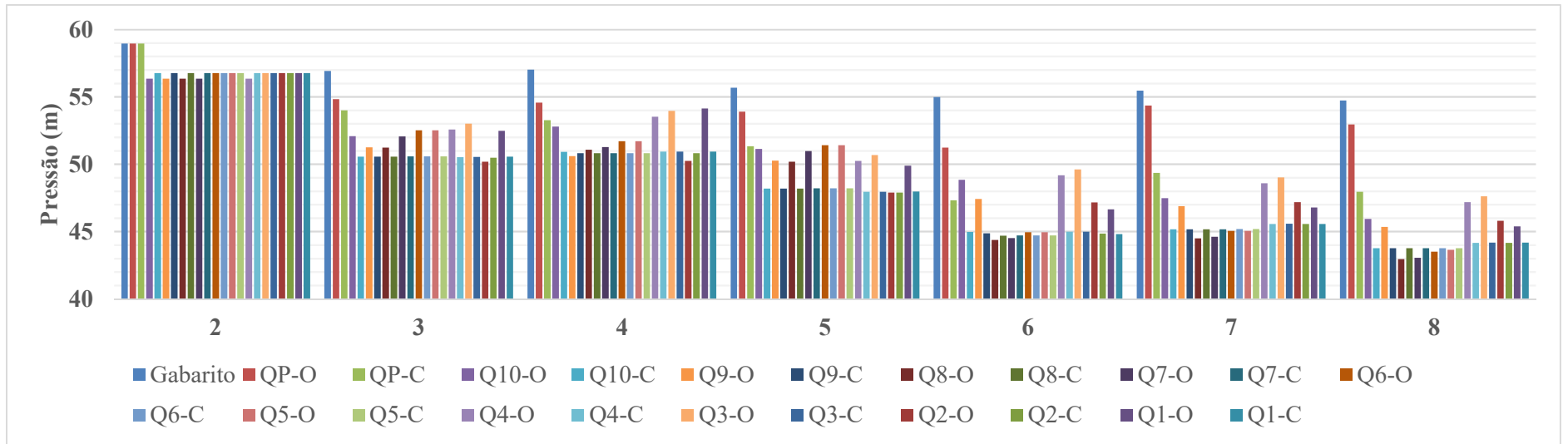


Fonte: Elaborado pelo autor

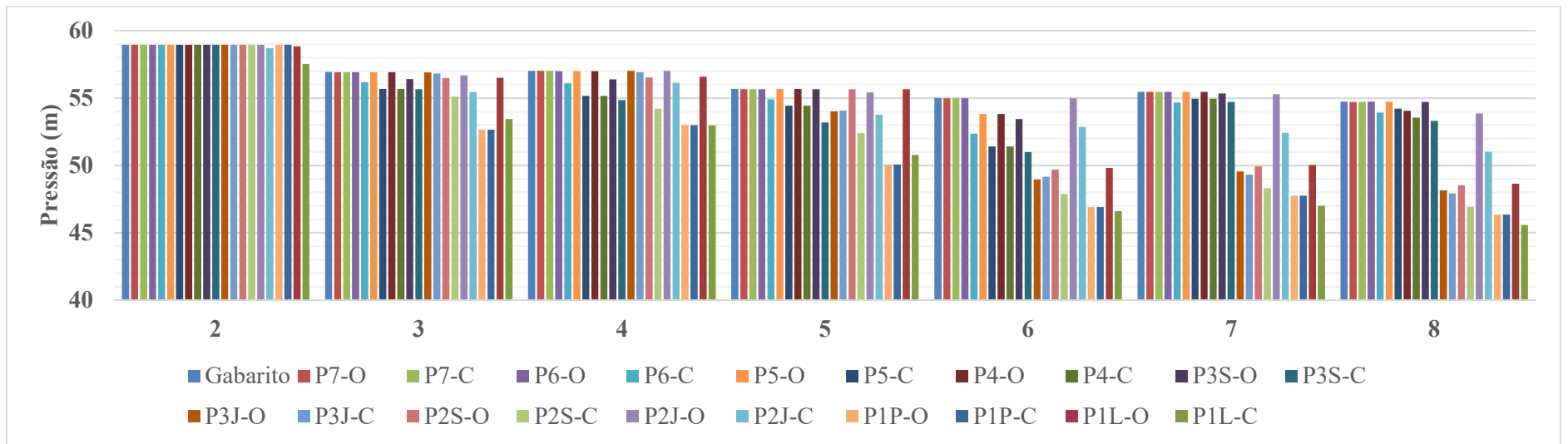


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE BK – Pressões encontradas na Calibração do fator de atrito de Darcy-Weisbach com rugosidade absoluta inicial de 6 mm: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

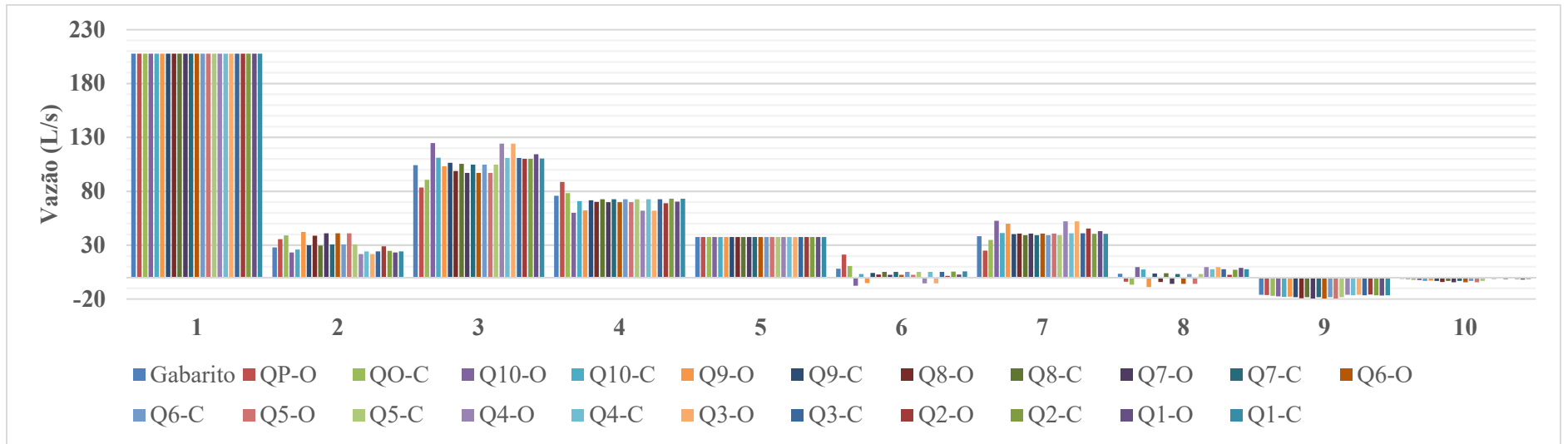


Fonte: Elaborado pelo autor

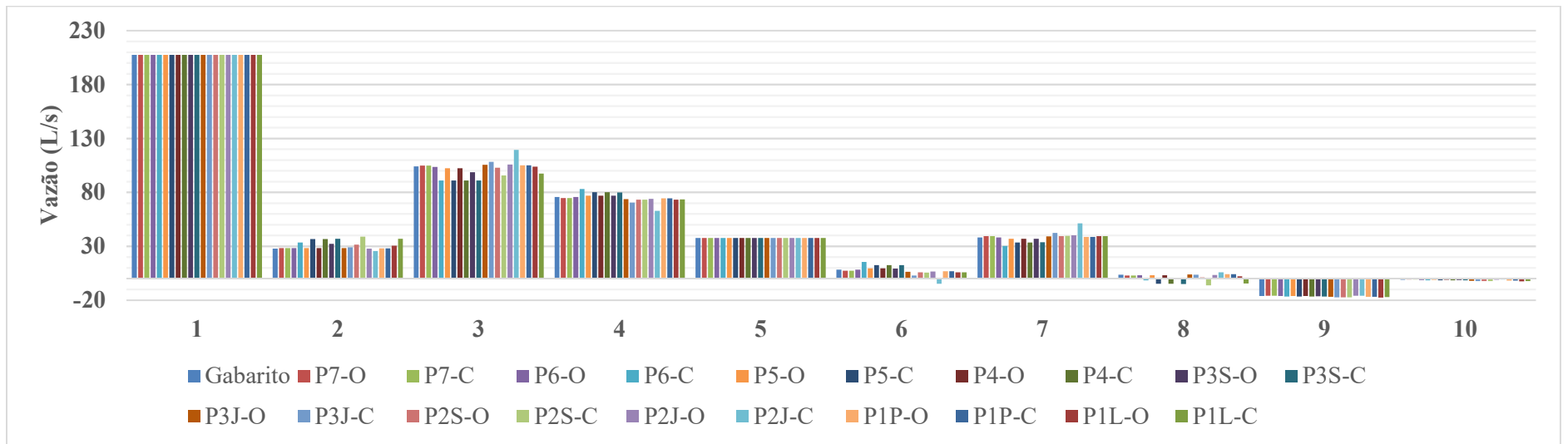


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE BL – Vazões encontradas na Calibração do fator de atrito de Darcy-Weisbach com rugosidade absoluta inicial de 6 mm: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

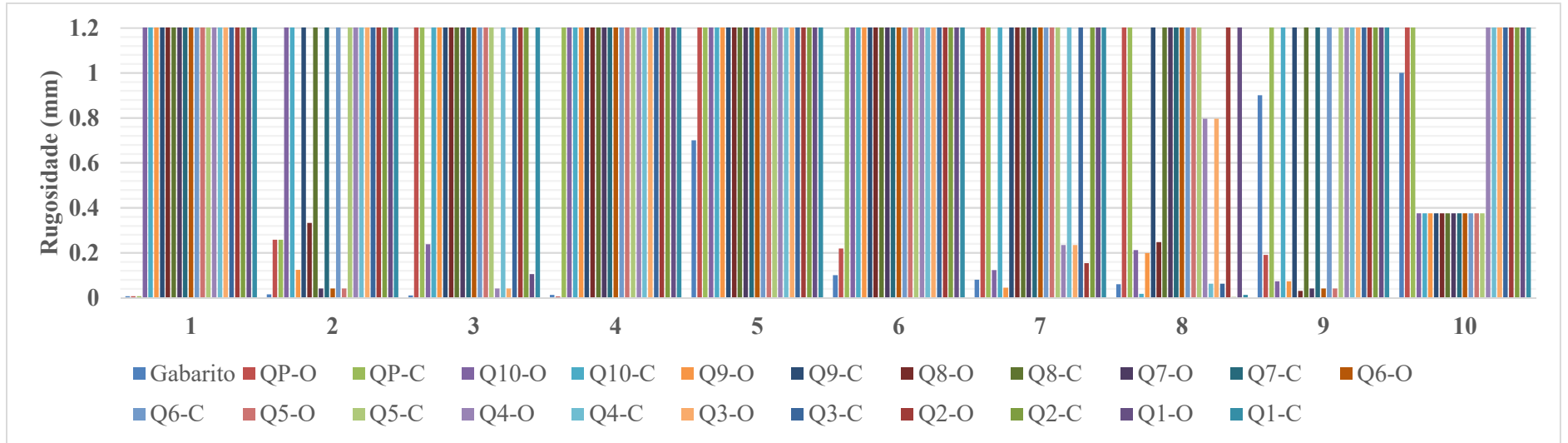


Fonte: Elaborado pelo autor

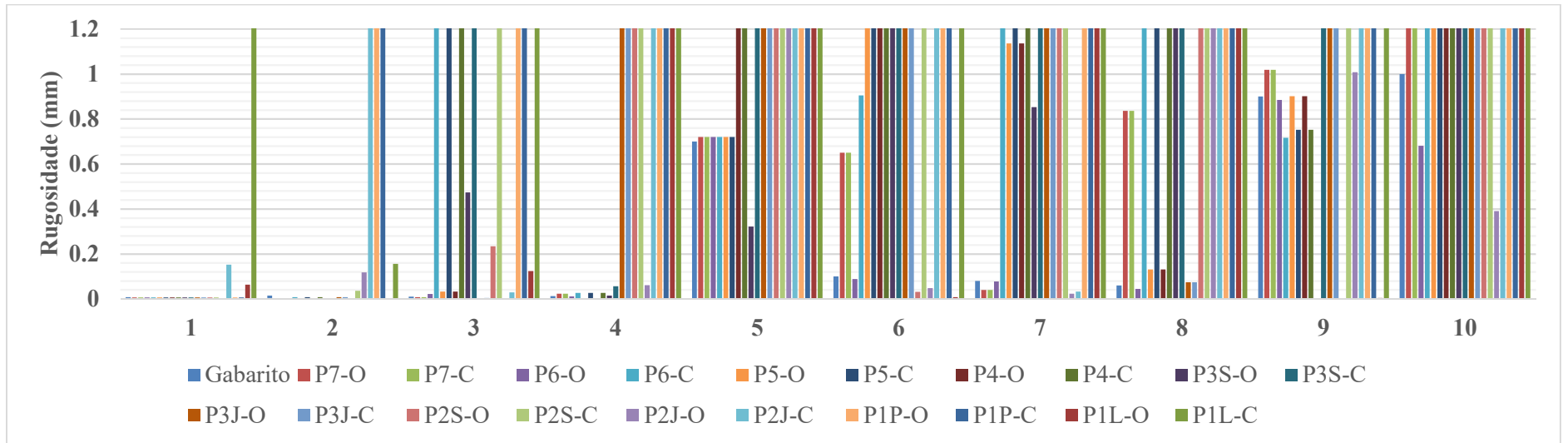


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE BM – Rugosidades absolutas encontradas na Calibração do fator de atrito de Darcy-Weisbach com rugosidade absoluta inicial de 6 mm: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

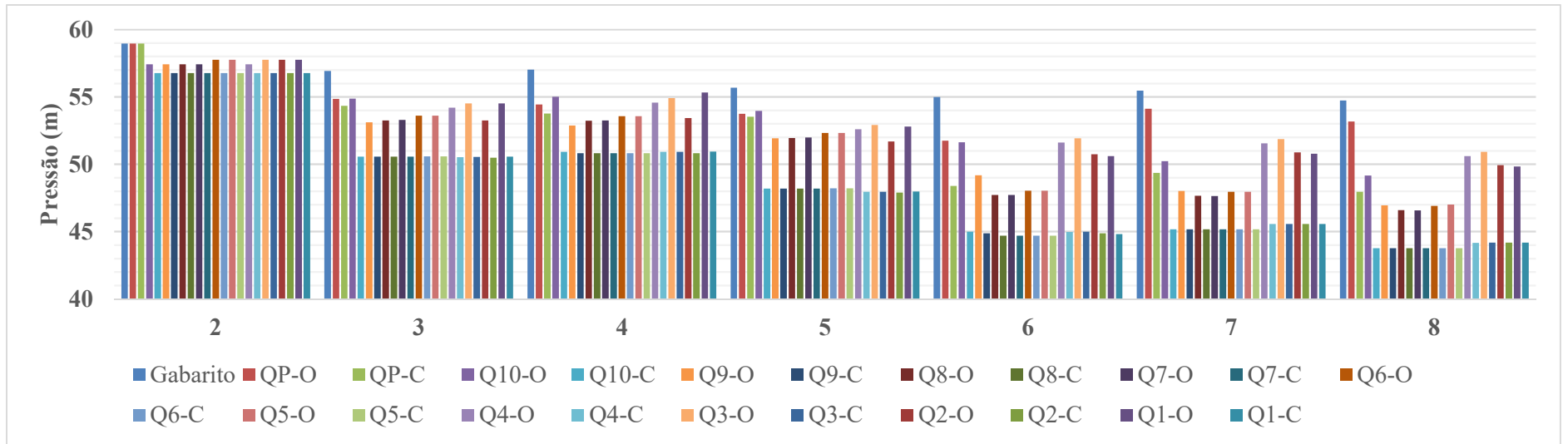


Fonte: Elaborado pelo autor

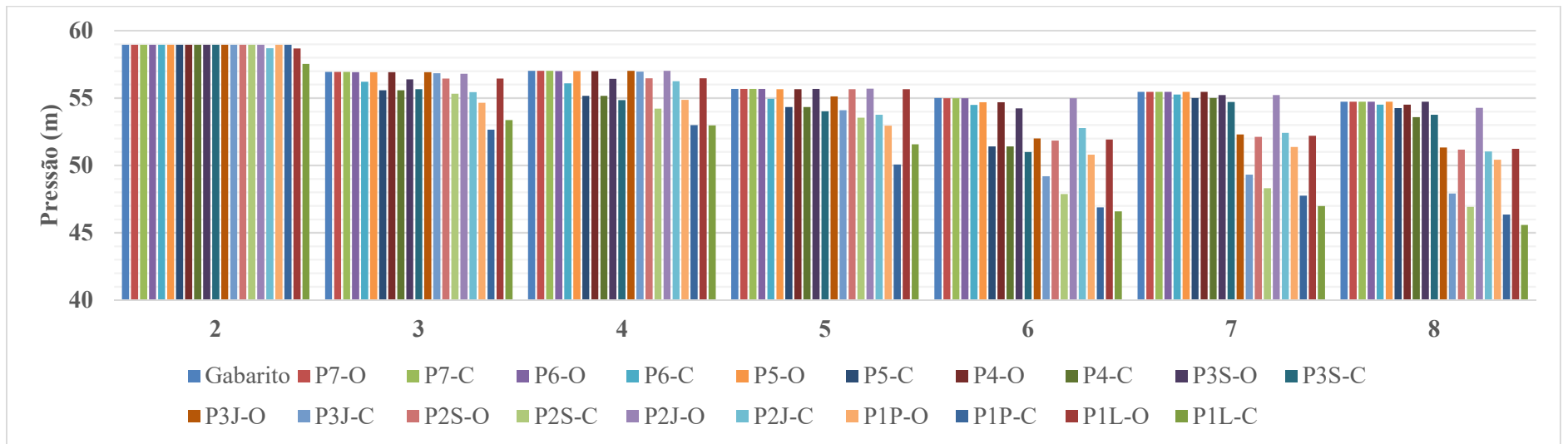


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE BN – Pressões encontradas na Calibração do fator de atrito de Darcy-Weisbach com rugosidade absoluta inicial calculada com uso da sub-rotina computacional: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

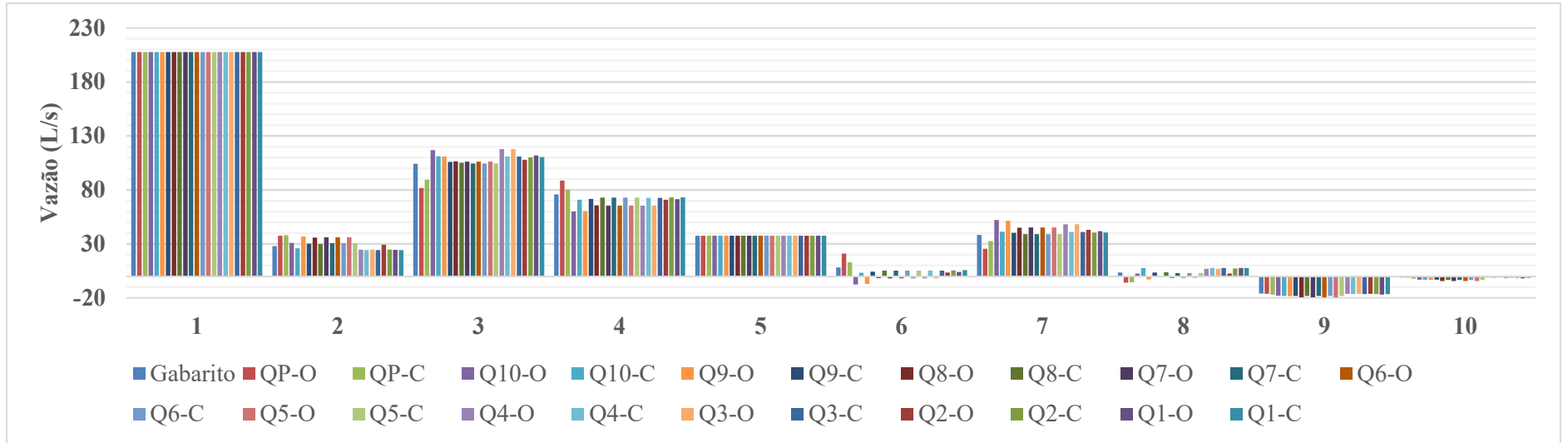


Fonte: Elaborado pelo autor

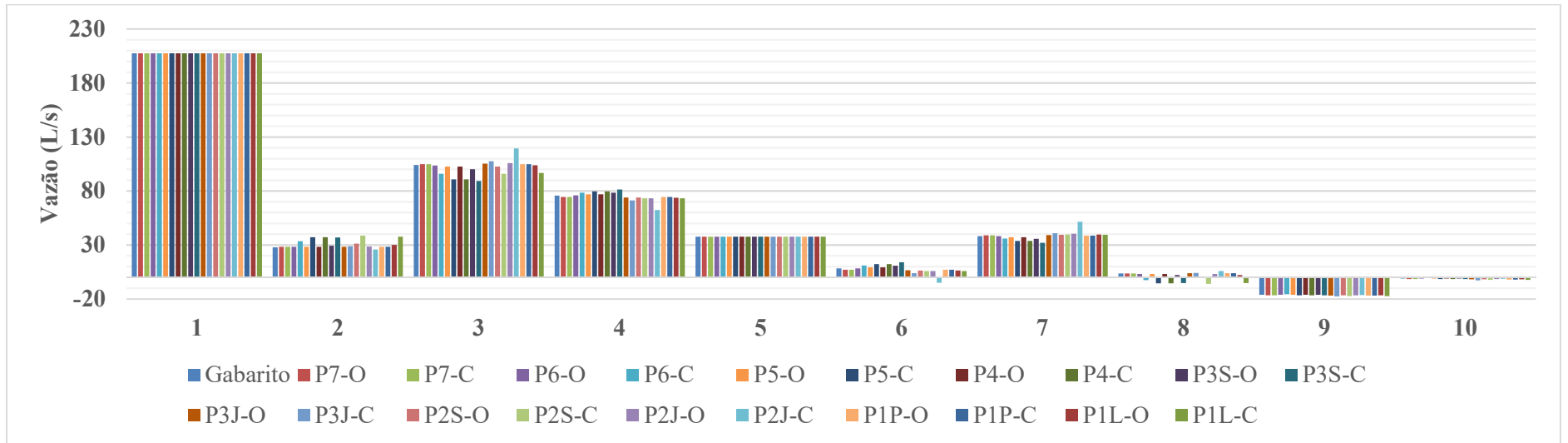


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE BO – Vazões encontradas na Calibração do fator de atrito de Darcy-Weisbach com rugosidade absoluta inicial calculada com uso da sub-rotina computacional: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

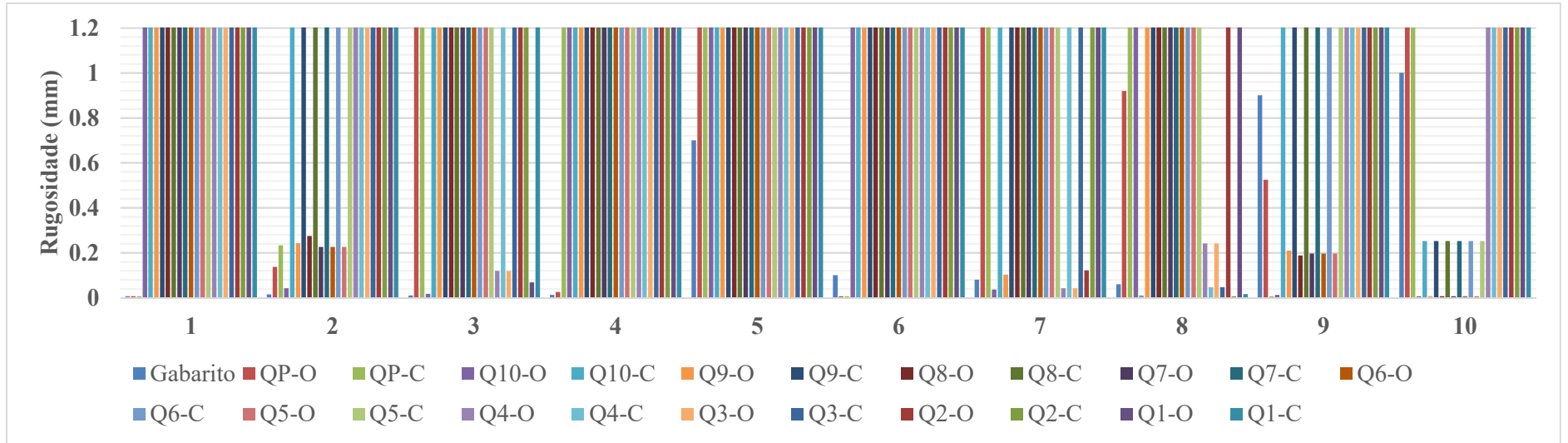


Fonte: Elaborado pelo autor

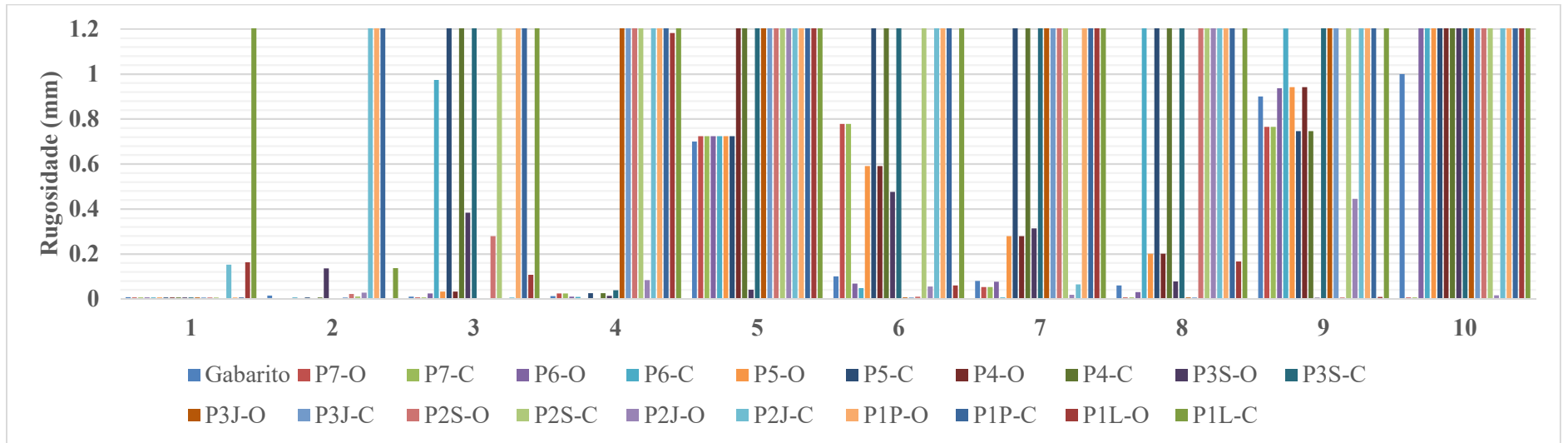


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE BP – Rugosidades absolutas encontradas na Calibração do fator de atrito de Darcy-Weisbach com rugosidade absoluta inicial calculada com uso da sub-rotina computacional: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

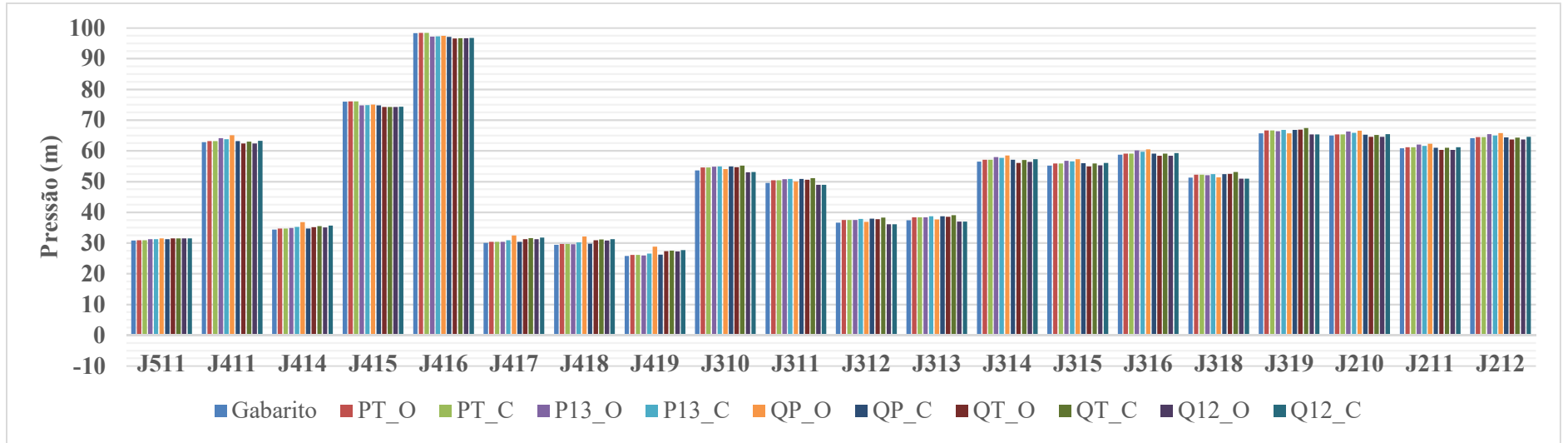


Fonte: Elaborado pelo autor

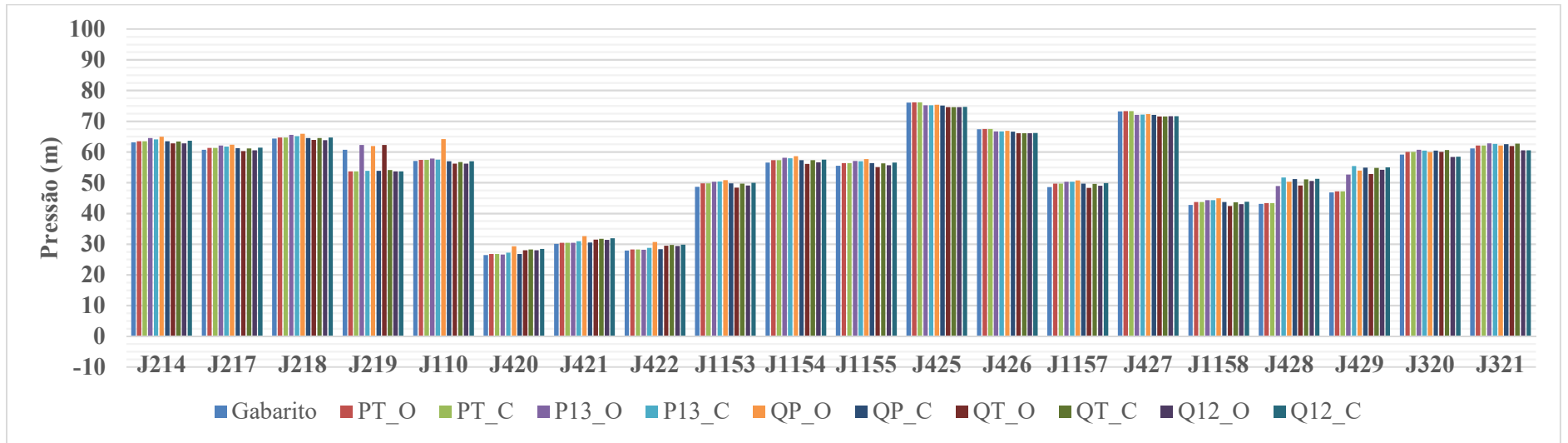


Fonte: Elaborado pelo autor

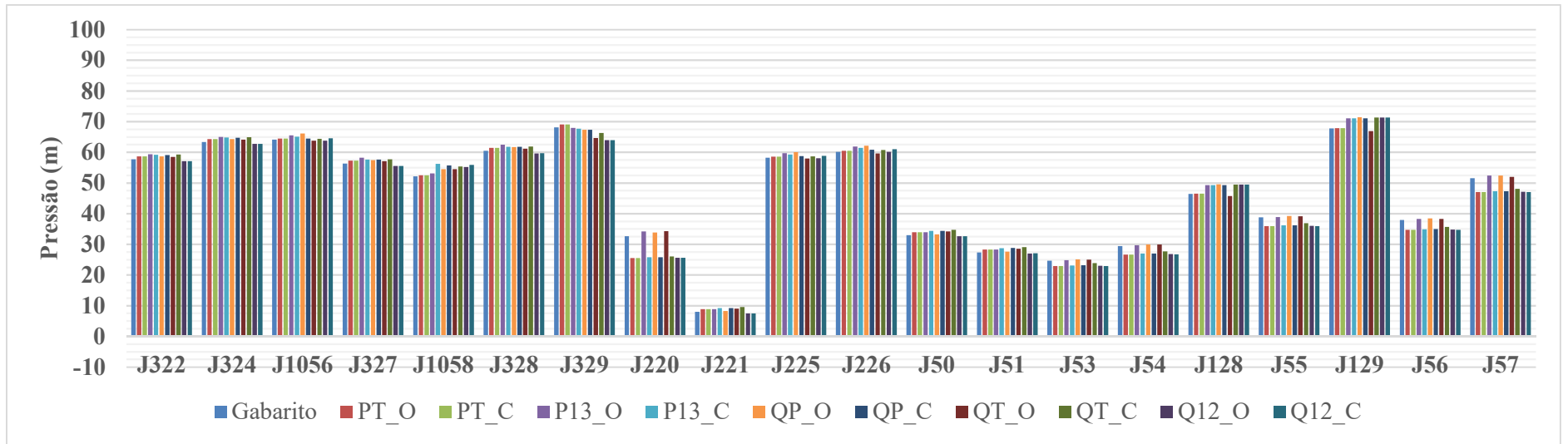
APÊNDICE BQ – Pressões encontradas na Calibração do fator de atrito com rugosidade absoluta inicial de 0,06 mm: rede C-Town



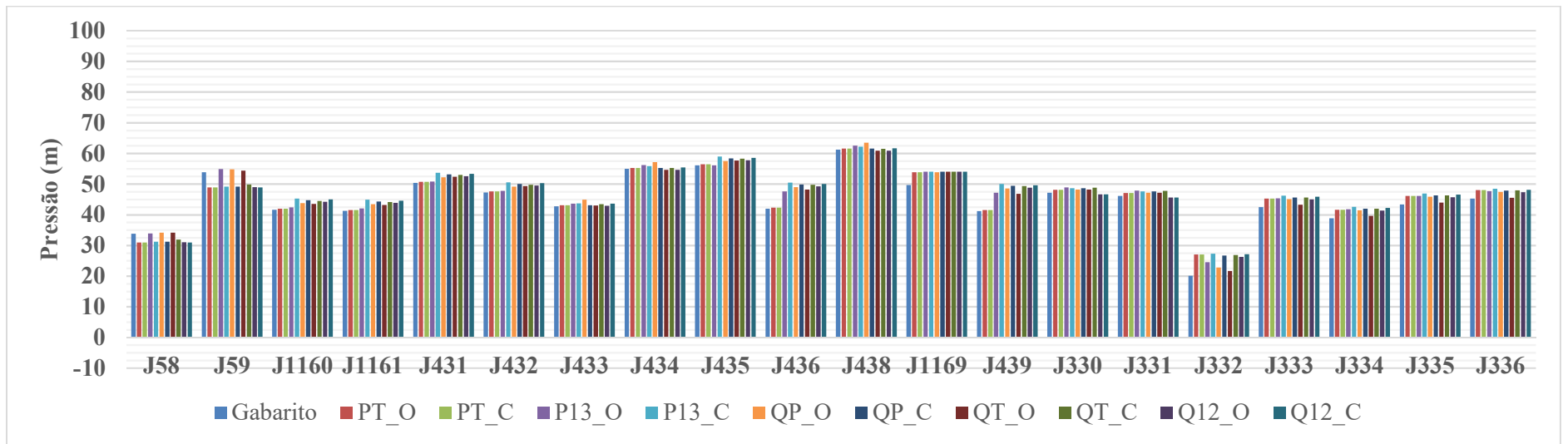
Fonte: Elaborado pelo autor



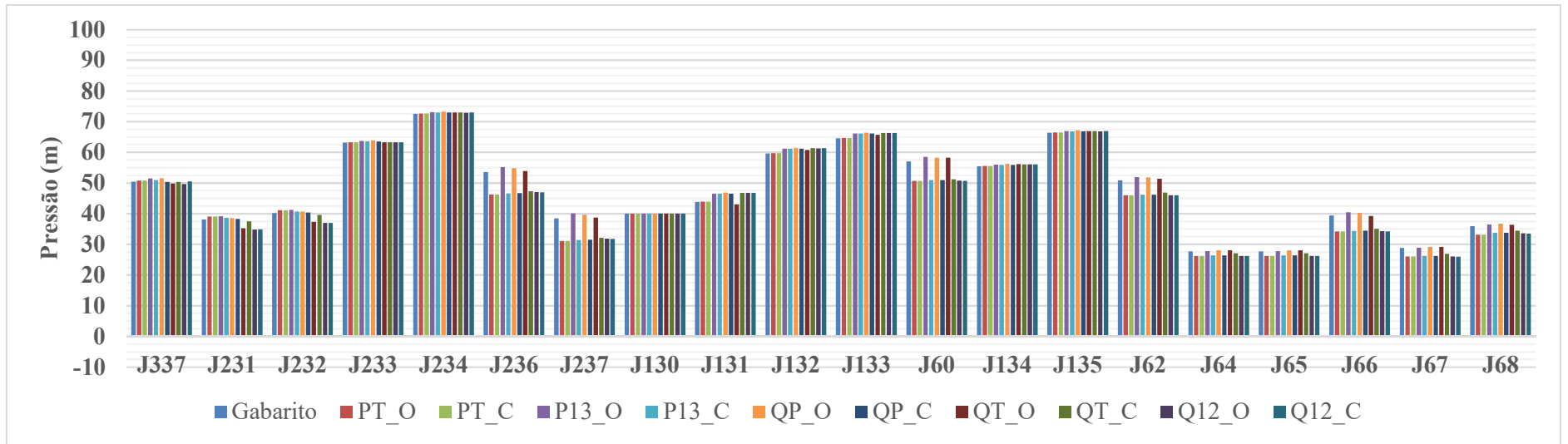
Fonte: Elaborado pelo autor



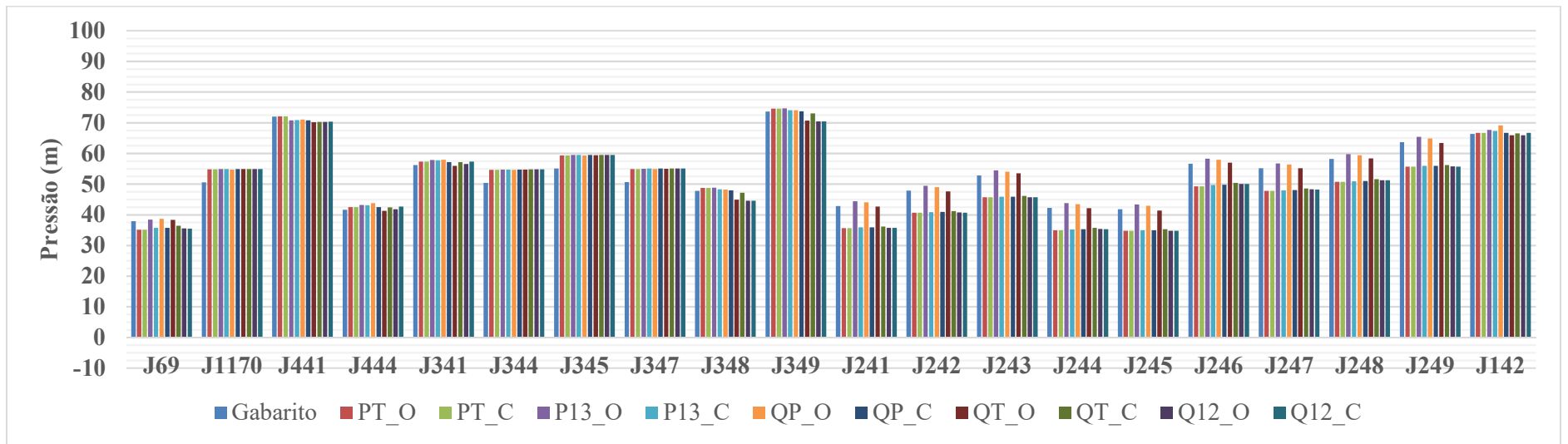
Fonte: Elaborado pelo autor



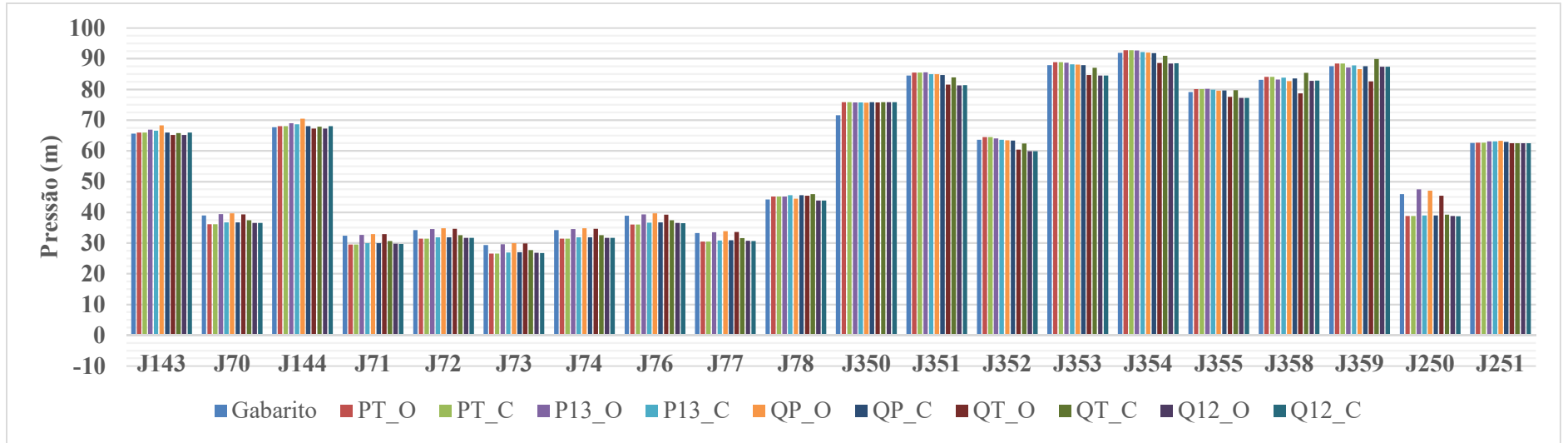
Fonte: Elaborado pelo autor



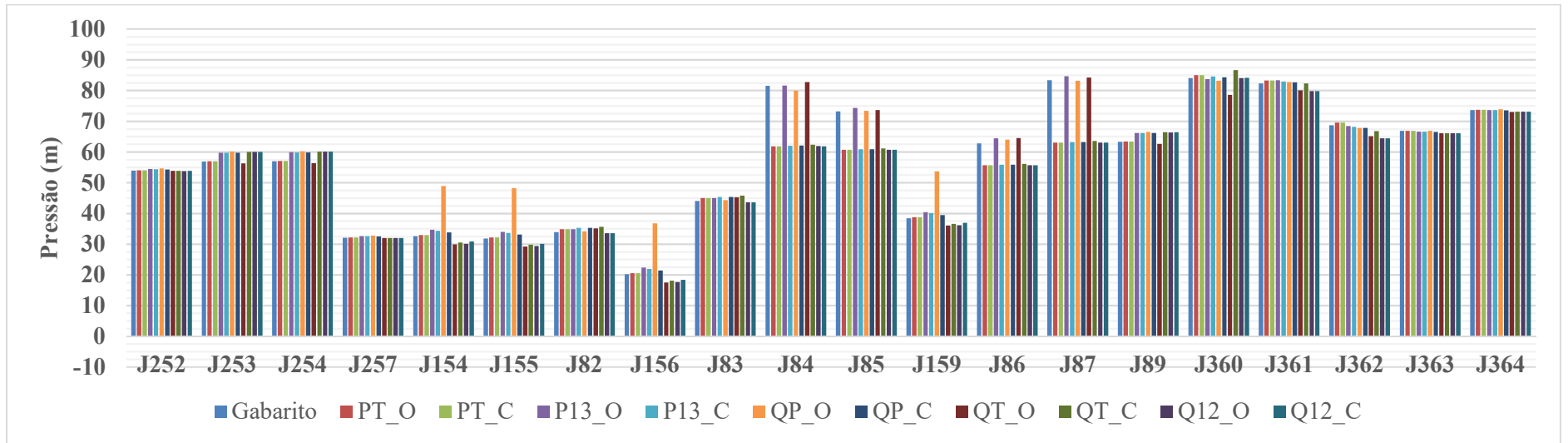
Fonte: Elaborado pelo autor



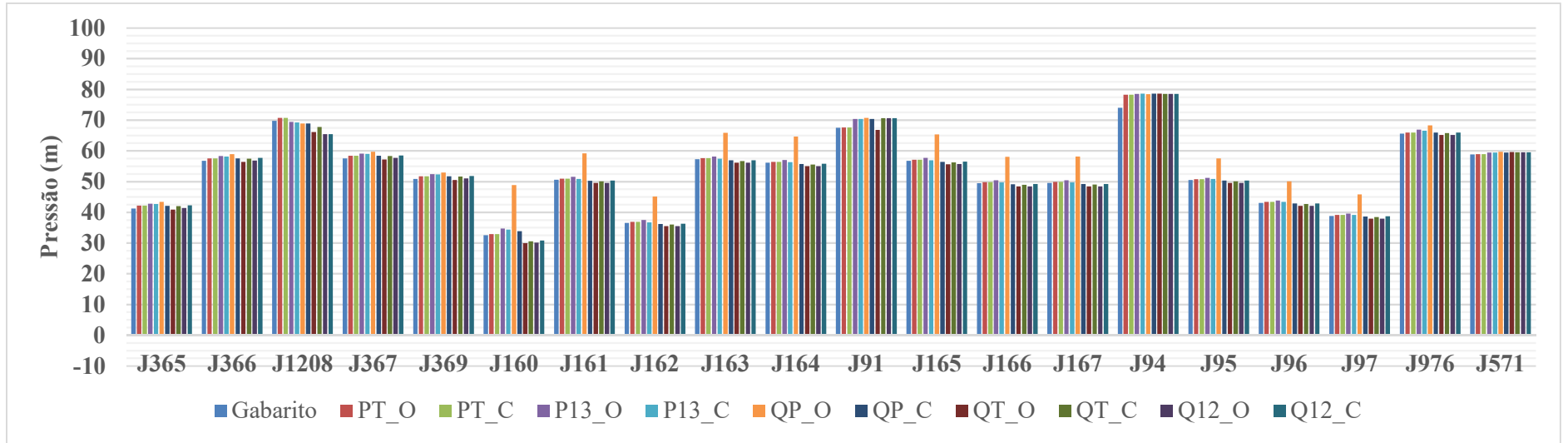
Fonte: Elaborado pelo autor



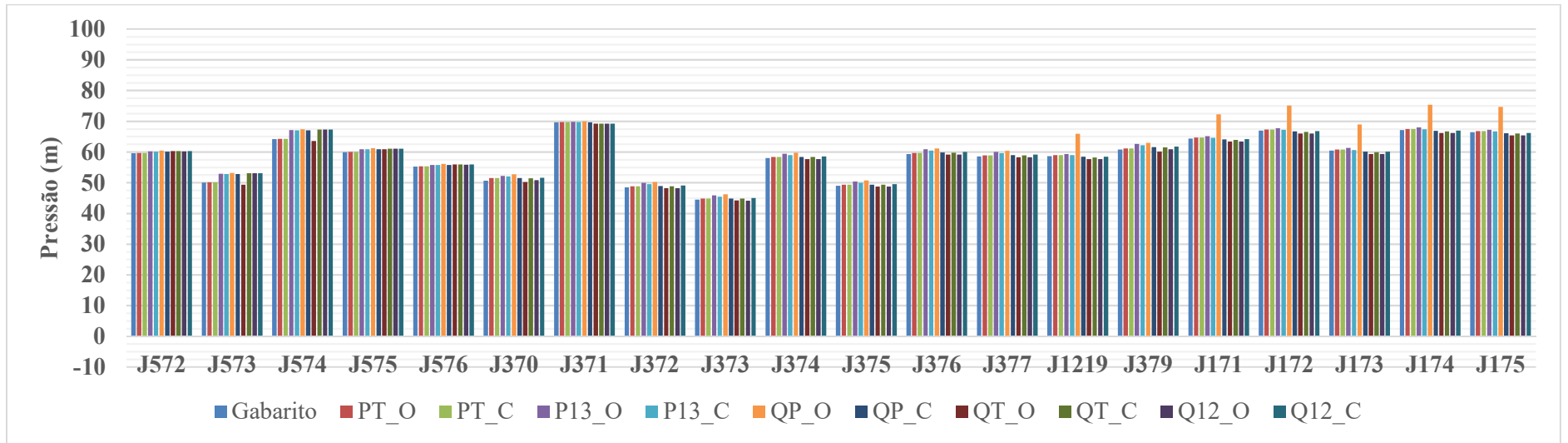
Fonte: Elaborado pelo autor



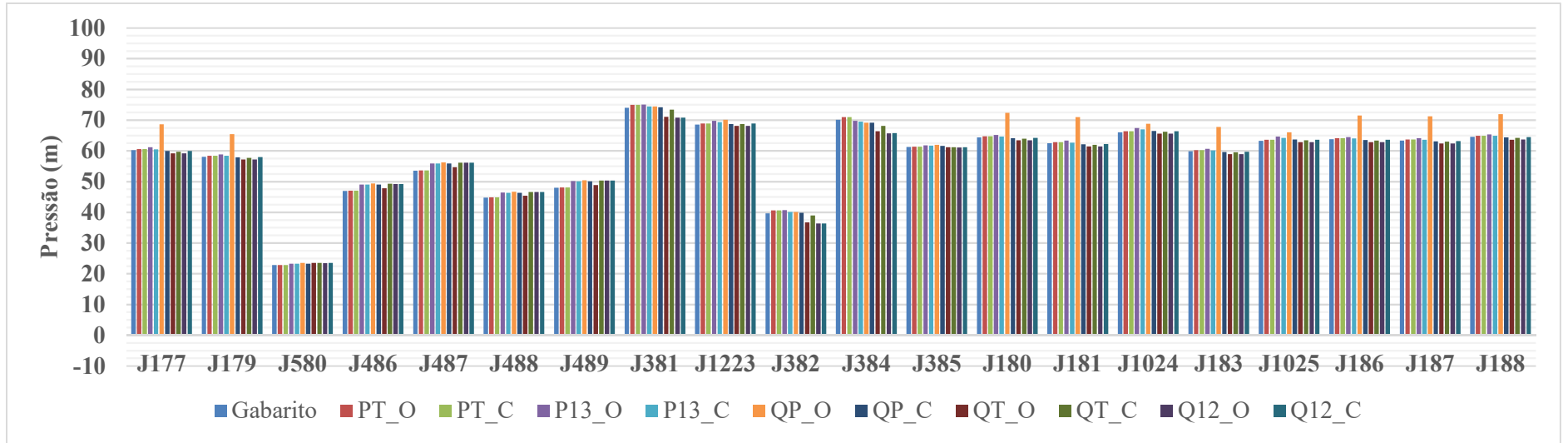
Fonte: Elaborado pelo autor



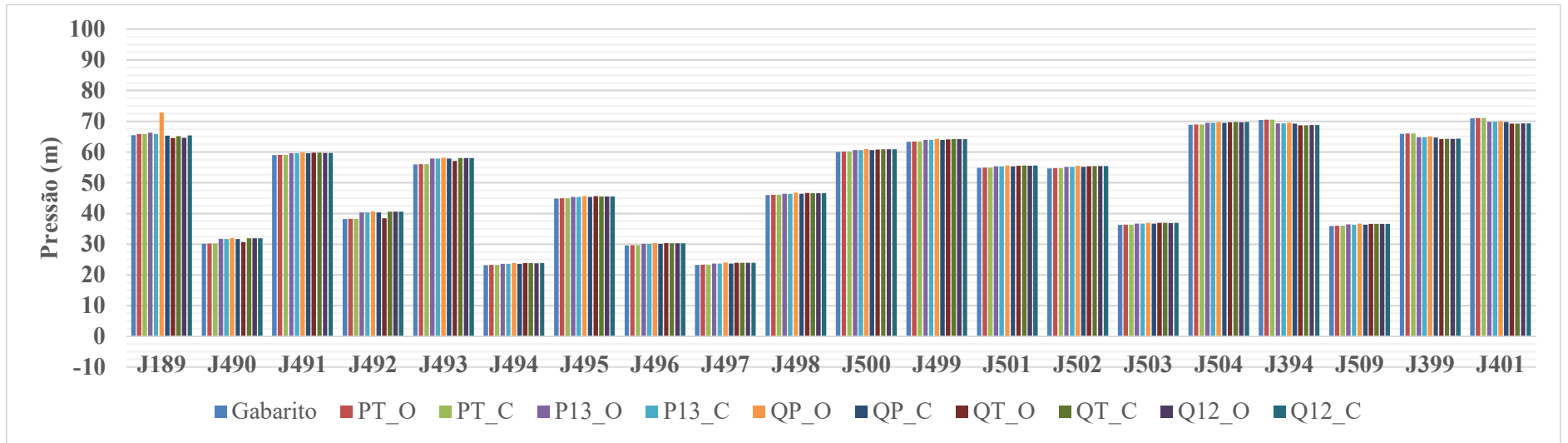
Fonte: Elaborado pelo autor



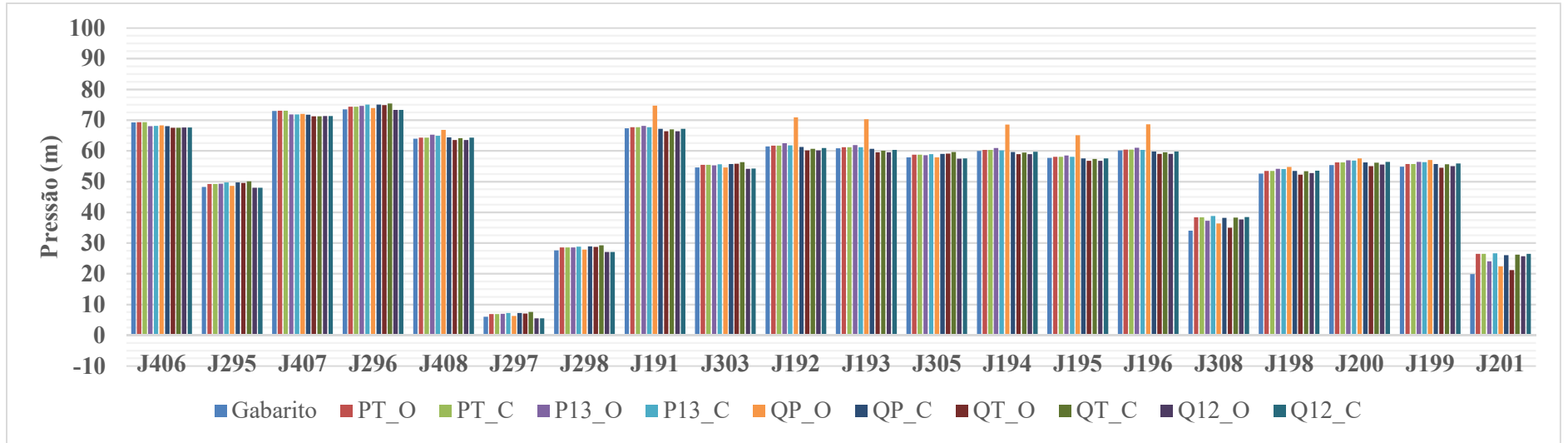
Fonte: Elaborado pelo autor



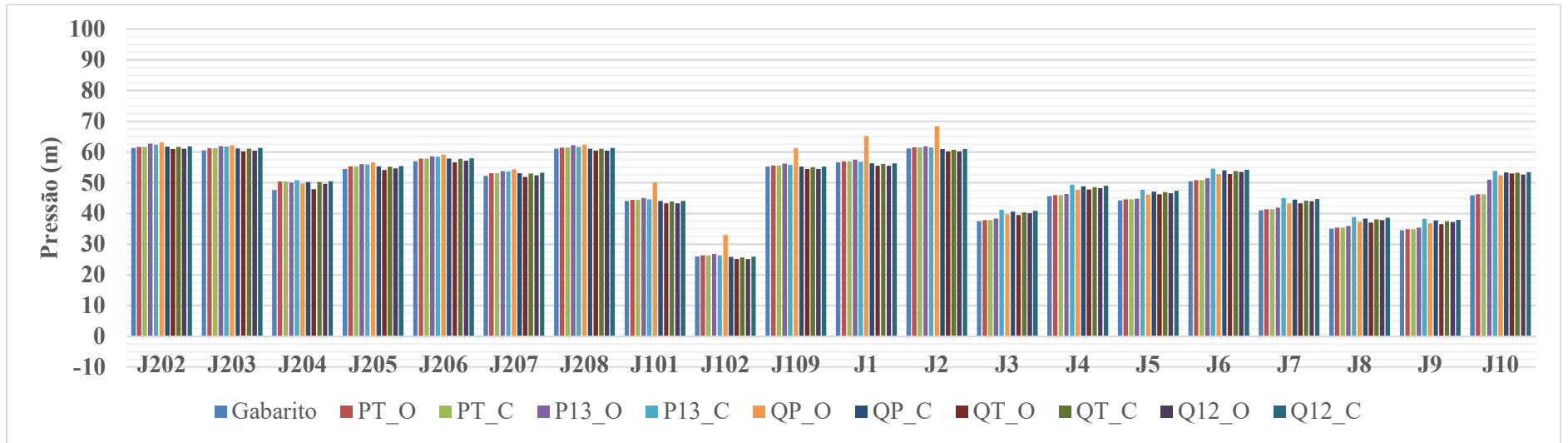
Fonte: Elaborado pelo autor



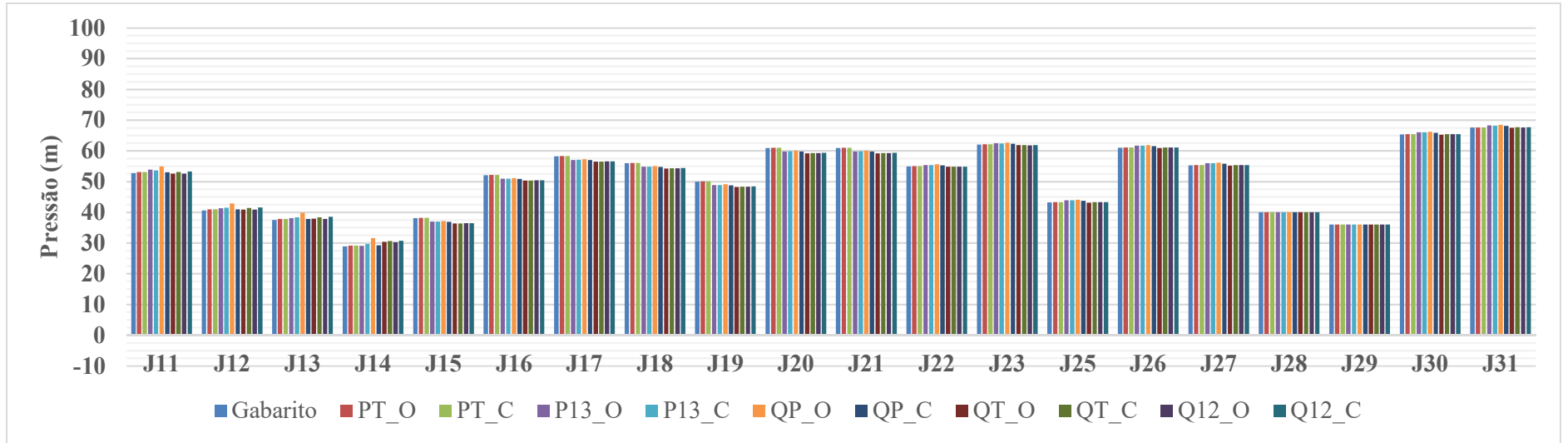
Fonte: Elaborado pelo autor



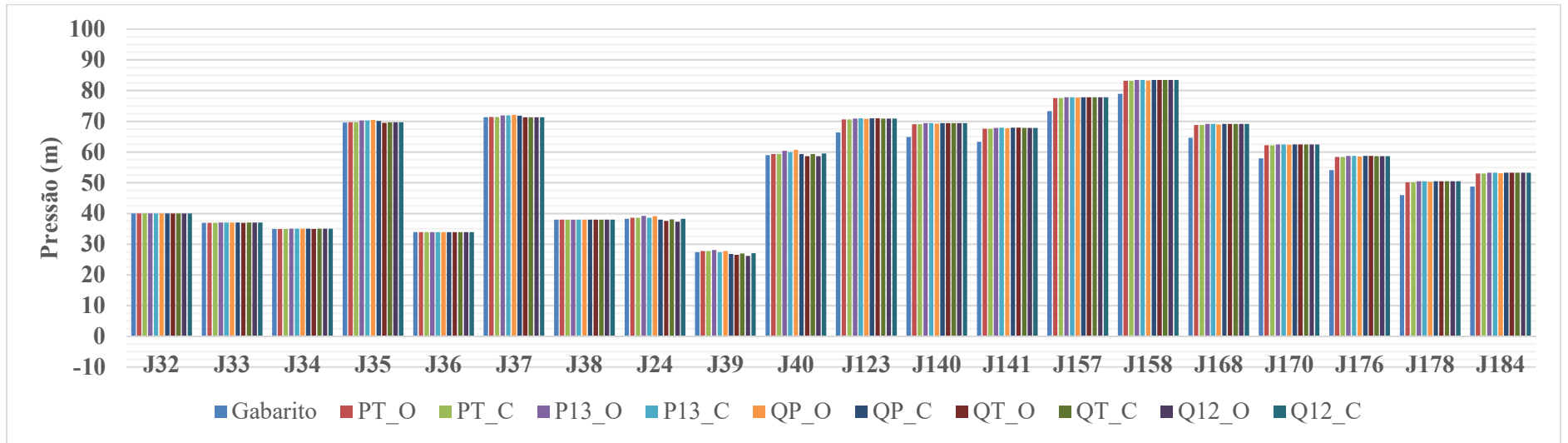
Fonte: Elaborado pelo autor



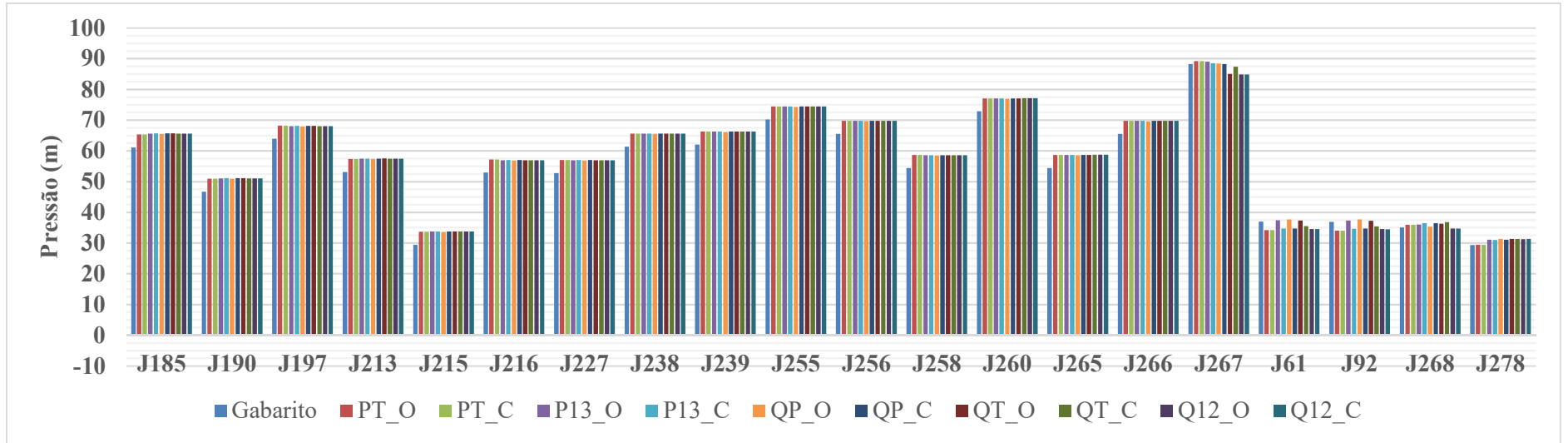
Fonte: Elaborado pelo autor



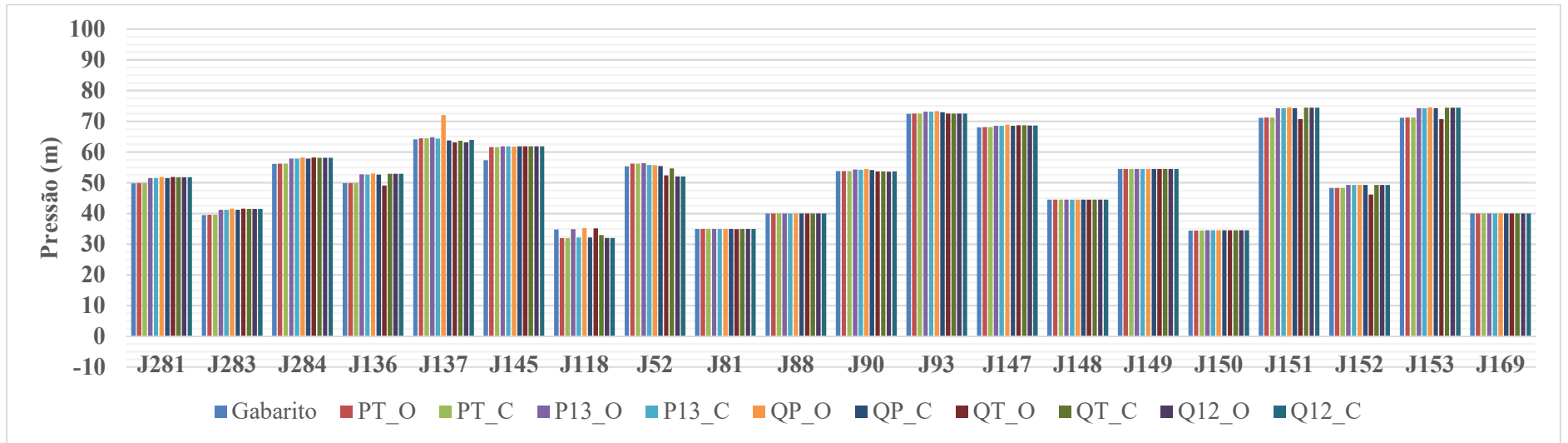
Fonte: Elaborado pelo autor



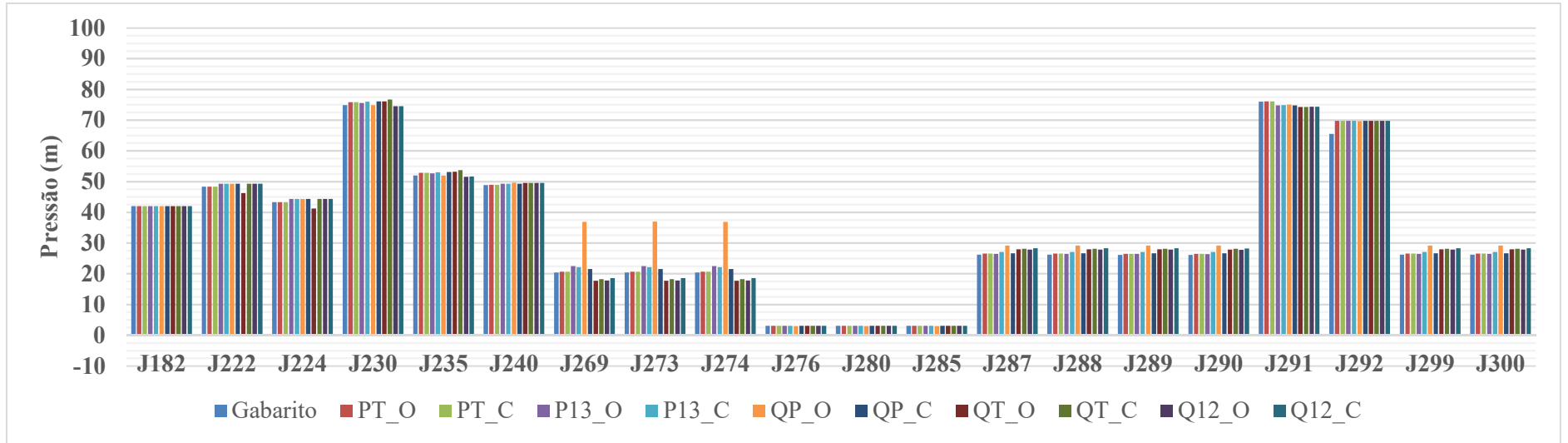
Fonte: Elaborado pelo autor



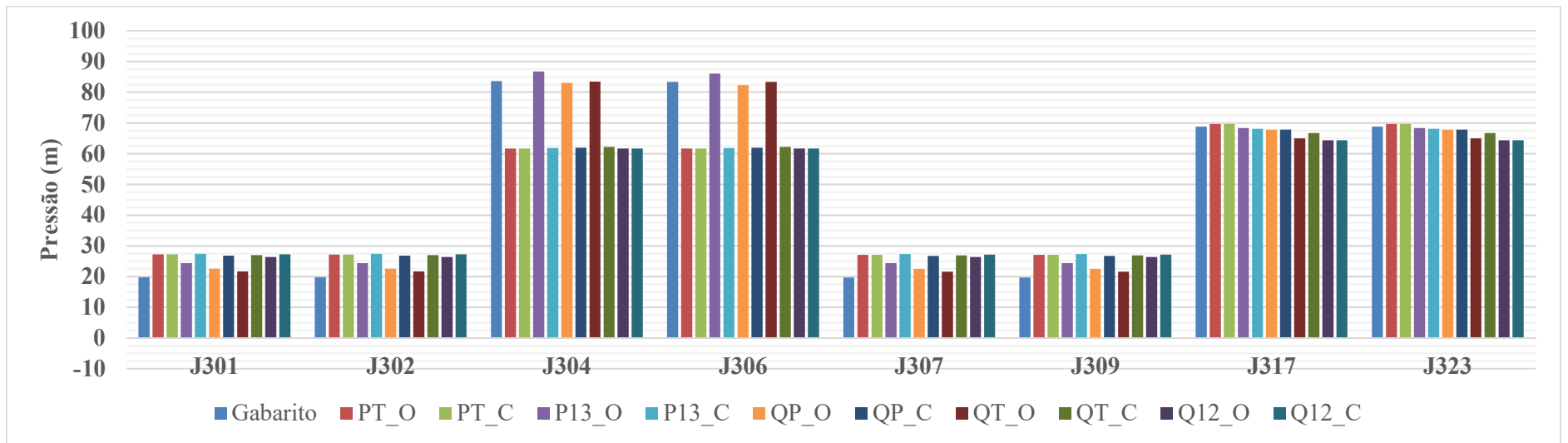
Fonte: Elaborado pelo autor



Fonte: Elaborado pelo autor

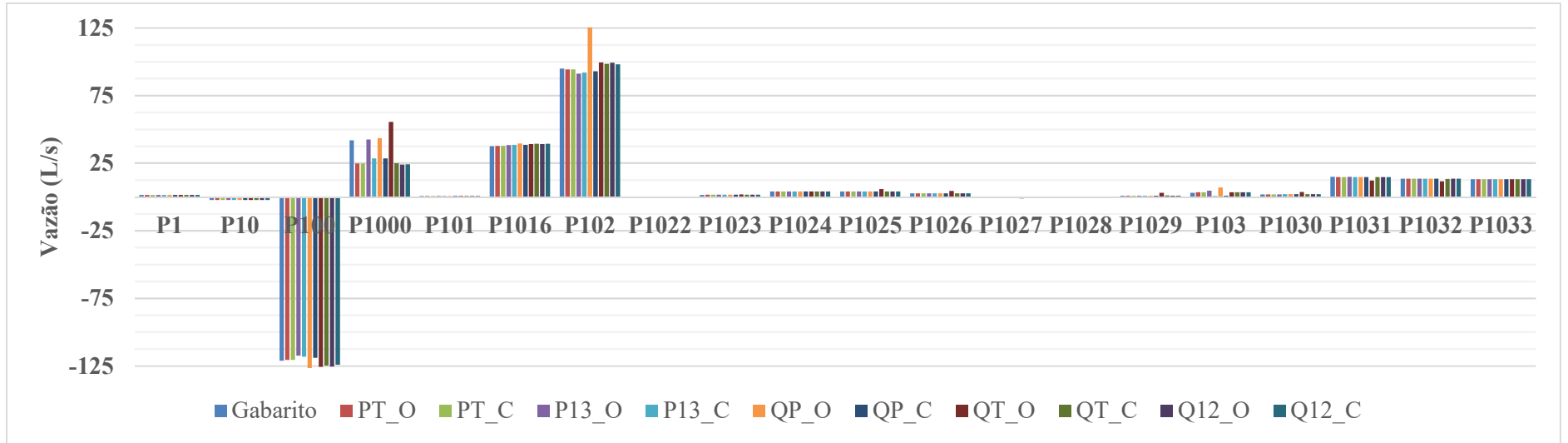


Fonte: Elaborado pelo autor

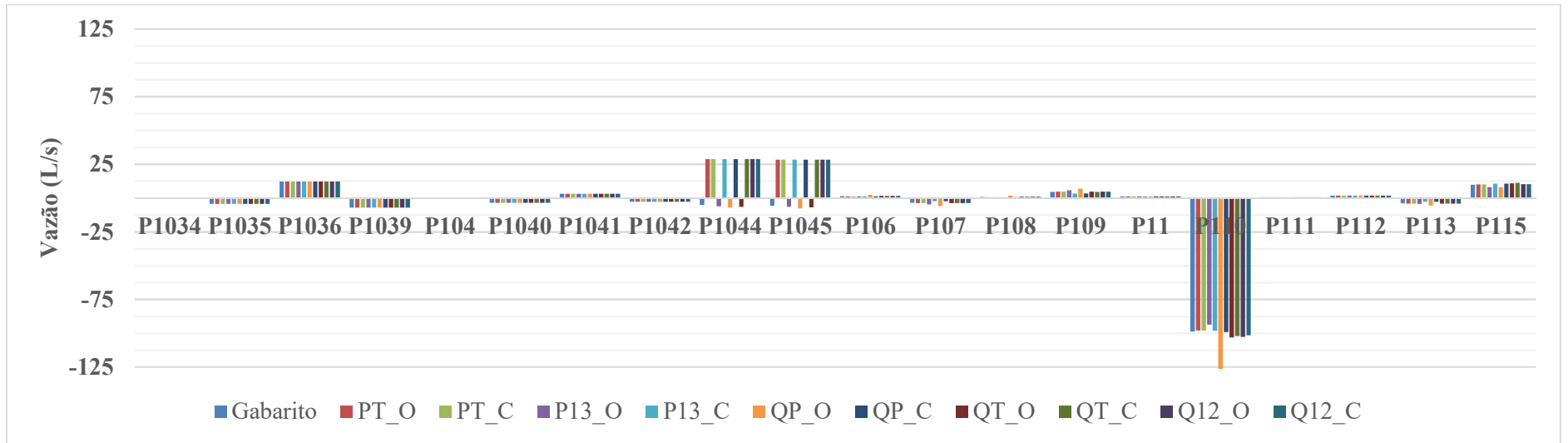


Fonte: Elaborado pelo autor

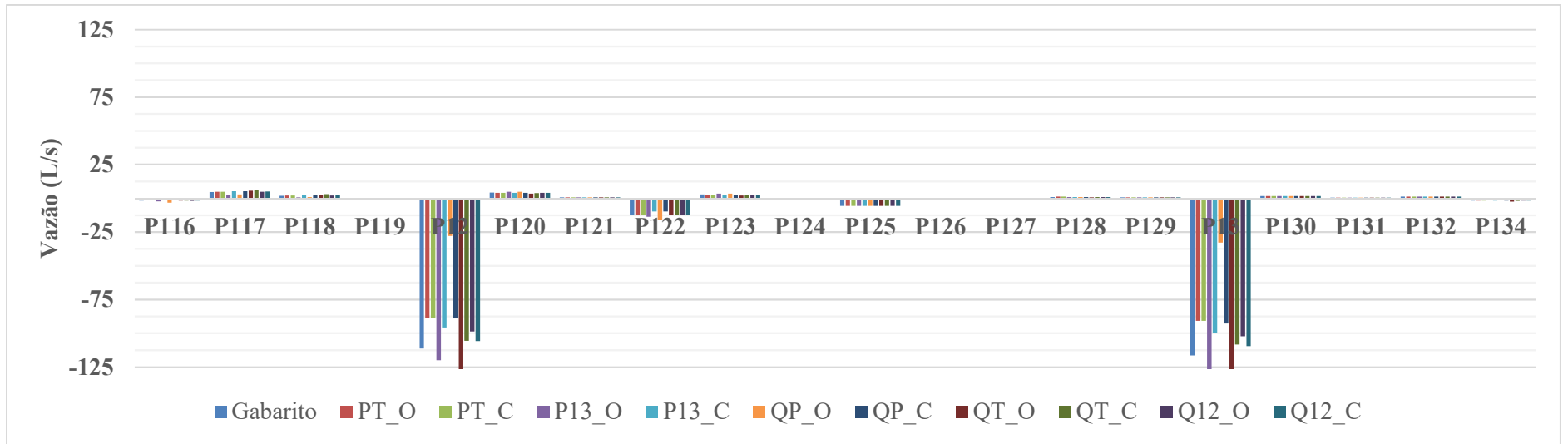
APÊNDICE BR – Vazões encontradas na Calibração do fator de atrito com rugosidade absoluta inicial de 0,06 mm: rede C-Town



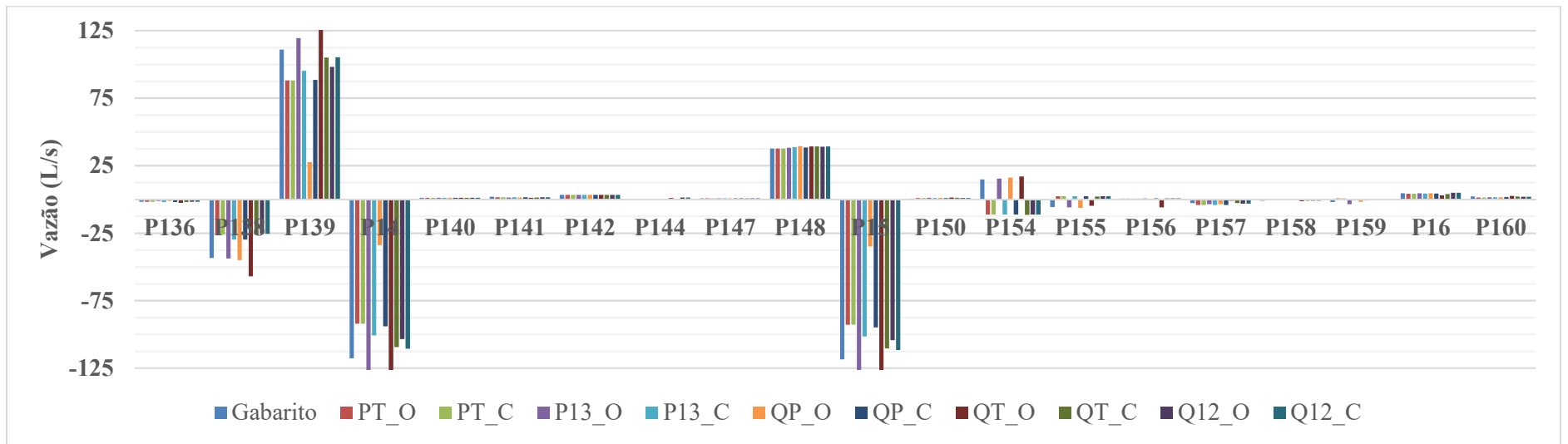
Fonte: Elaborado pelo autor



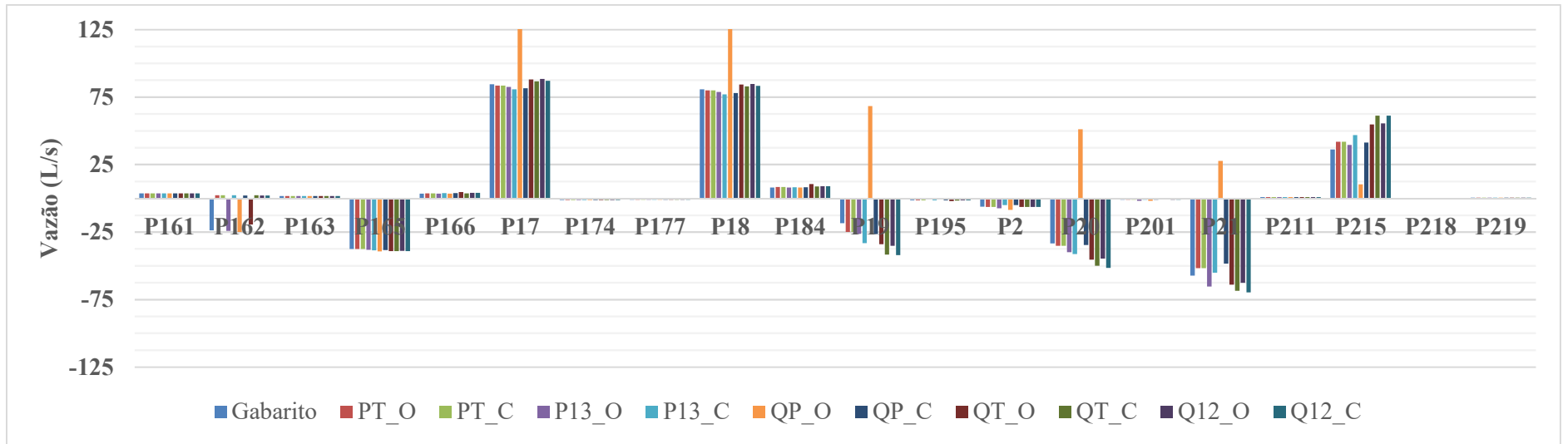
Fonte: Elaborado pelo autor



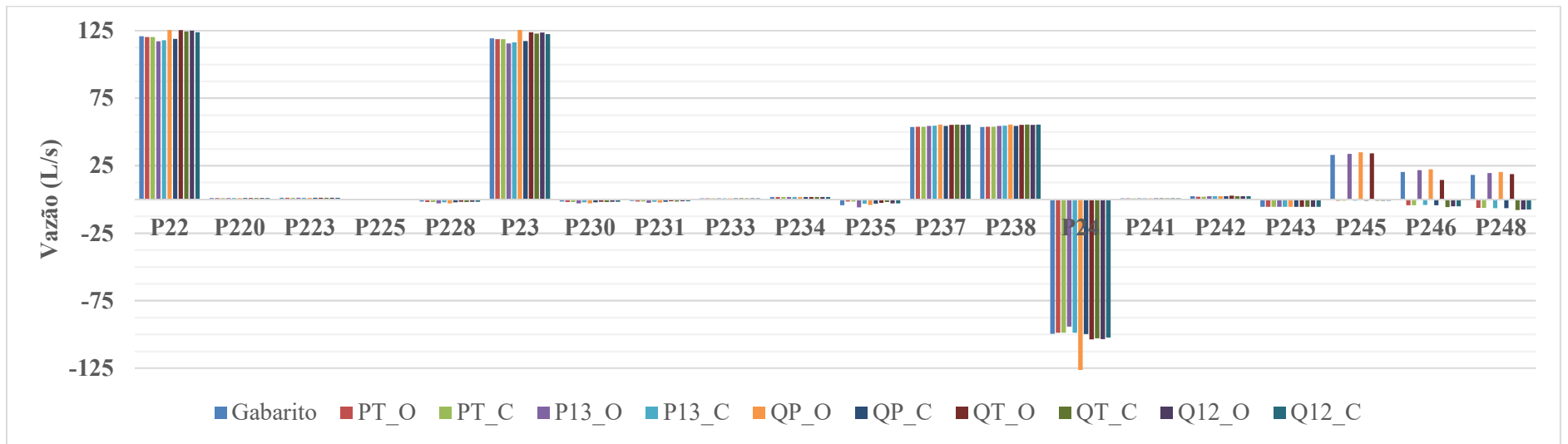
Fonte: Elaborado pelo autor



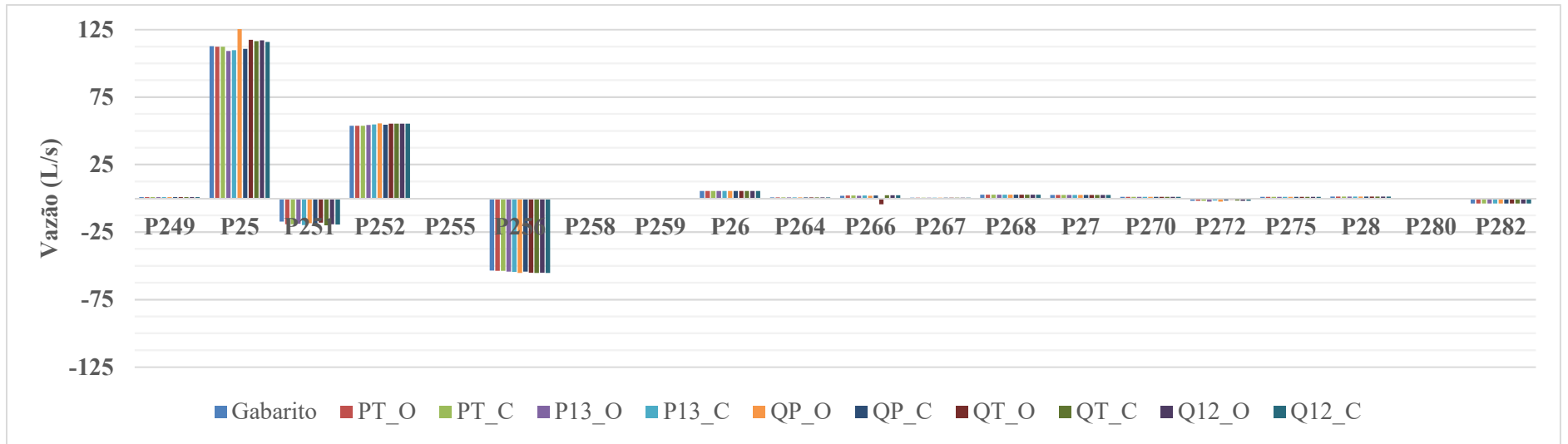
Fonte: Elaborado pelo autor



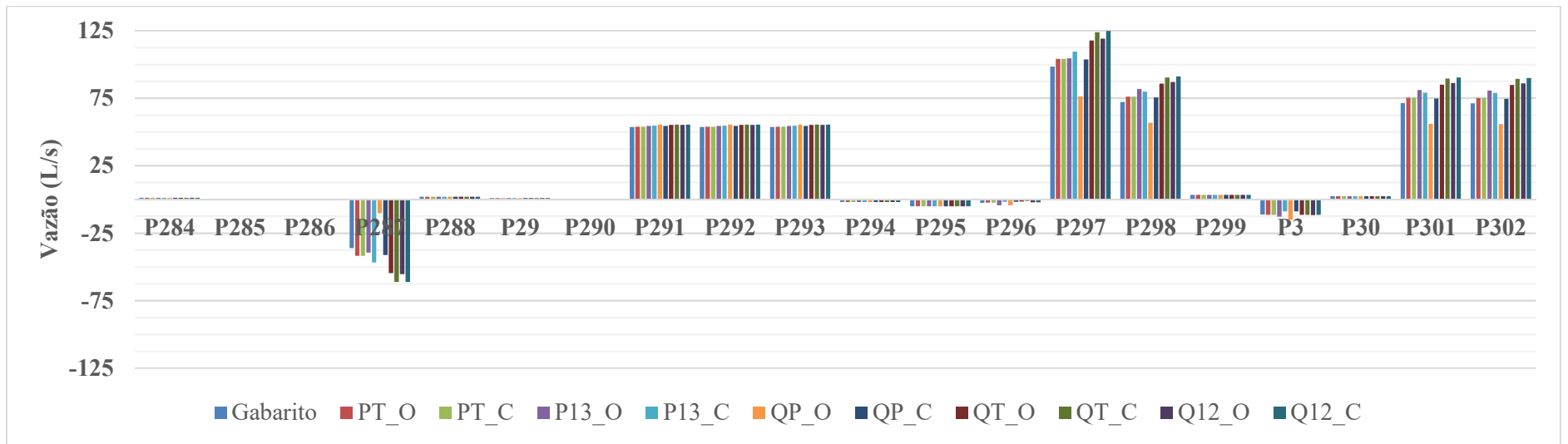
Fonte: Elaborado pelo autor



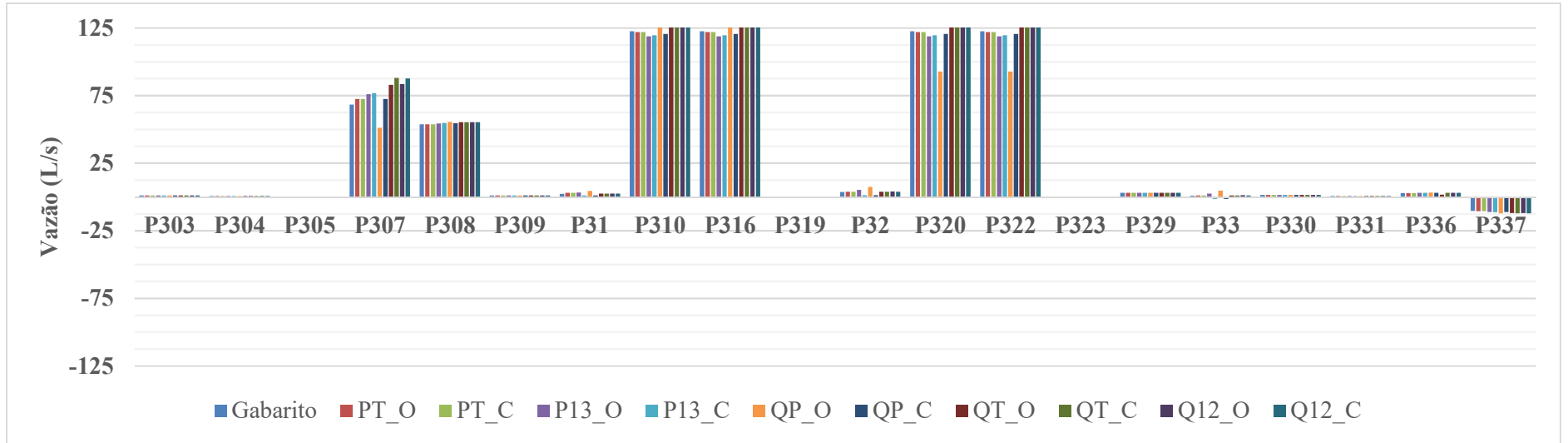
Fonte: Elaborado pelo autor



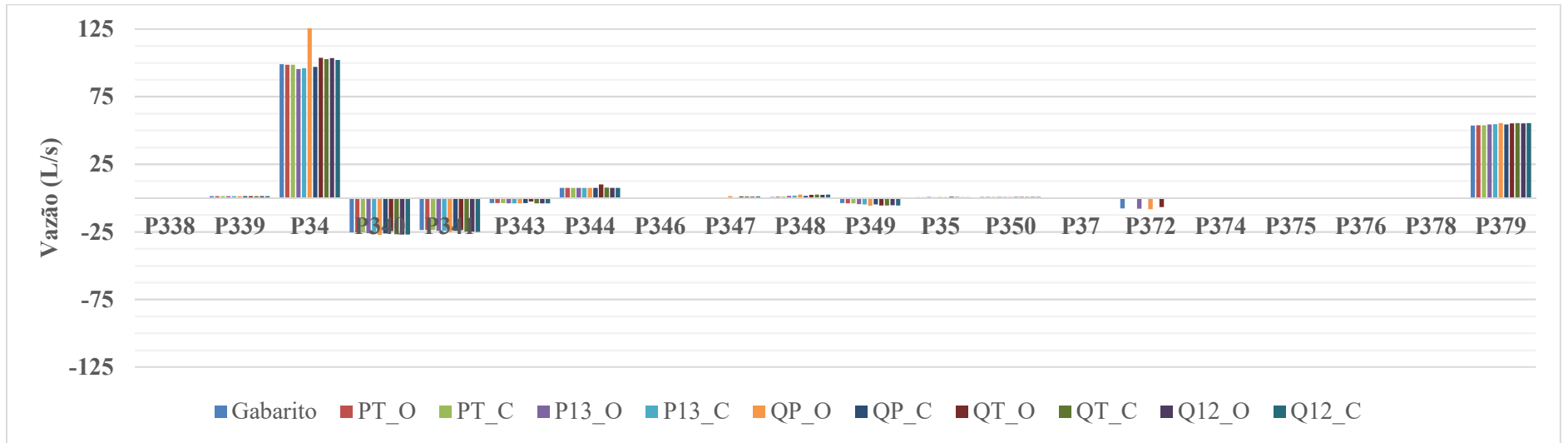
Fonte: Elaborado pelo autor



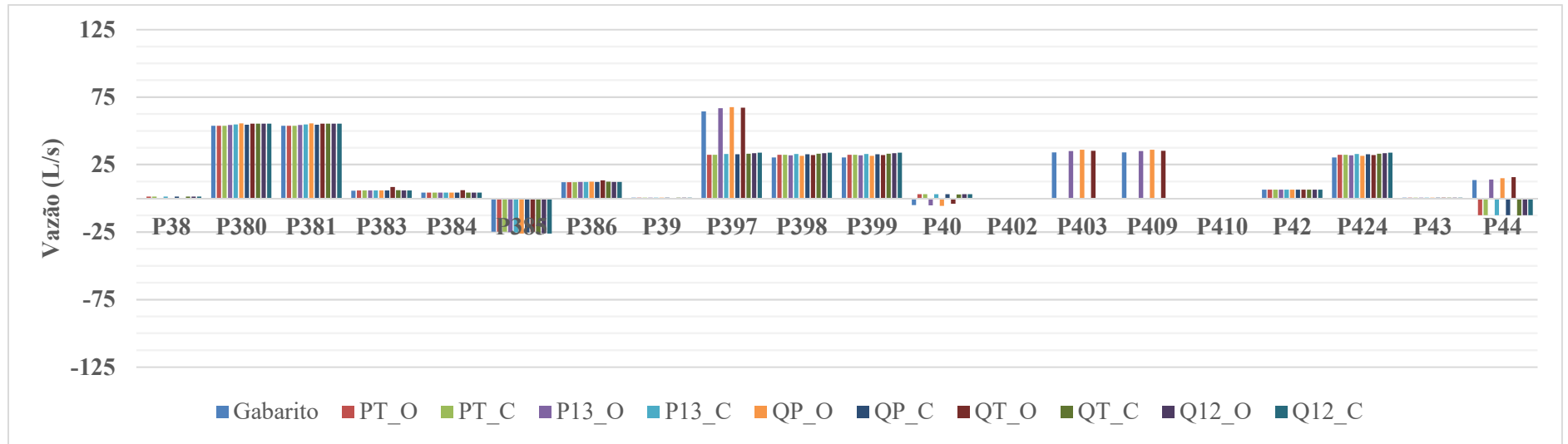
Fonte: Elaborado pelo autor



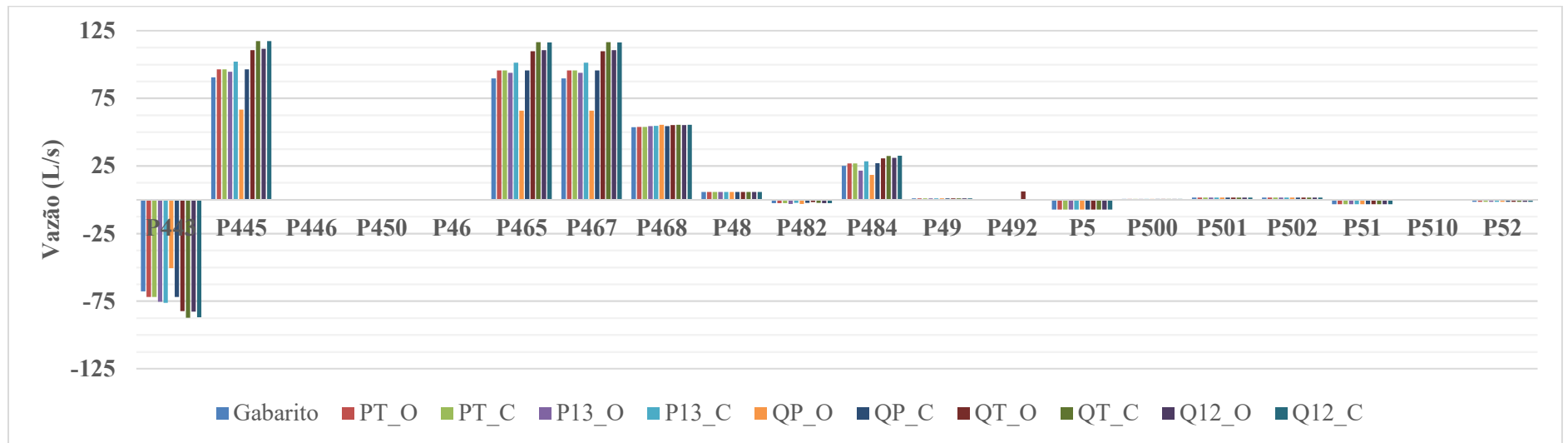
Fonte: Elaborado pelo autor



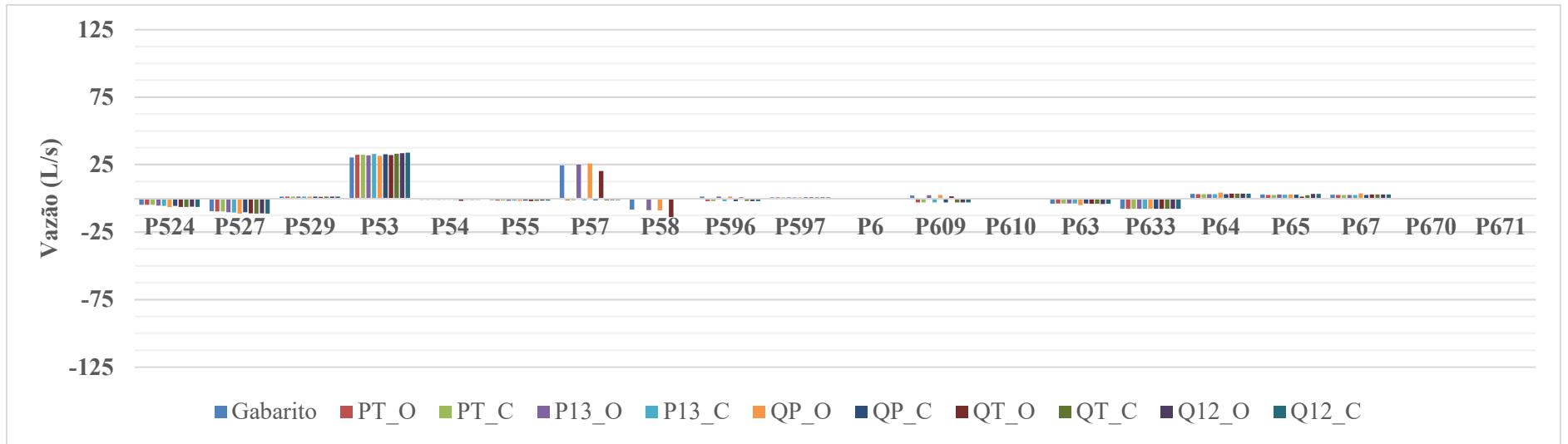
Fonte: Elaborado pelo autor



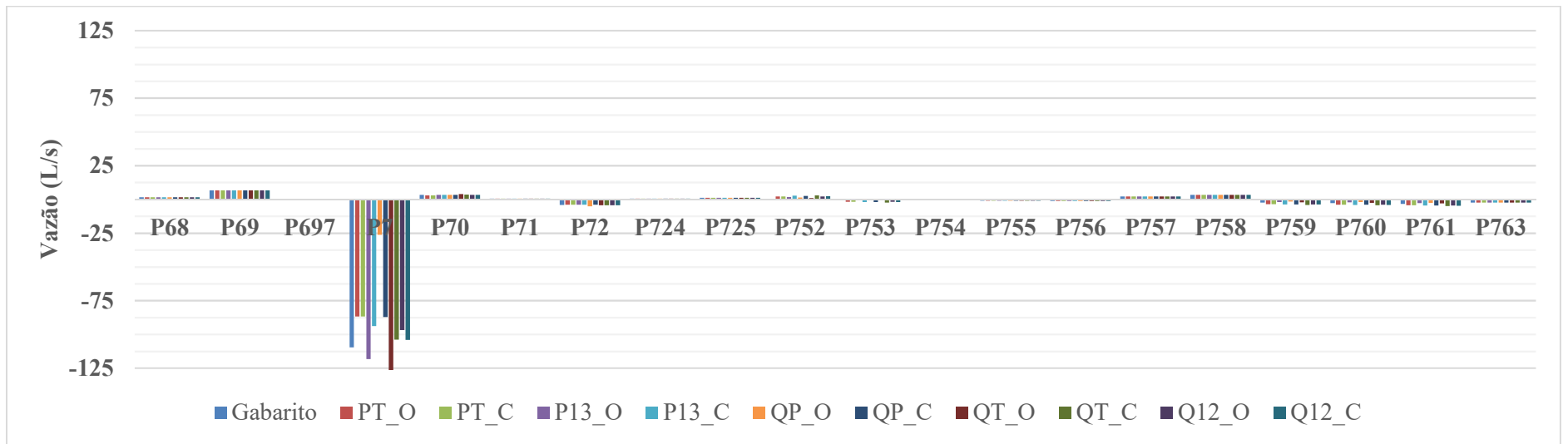
Fonte: Elaborado pelo autor



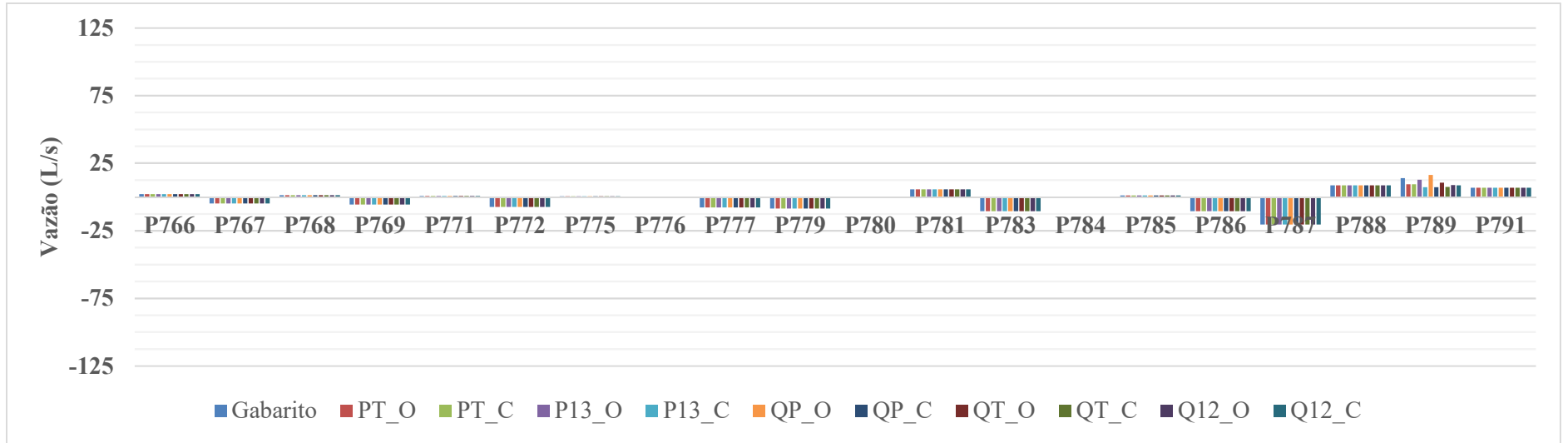
Fonte: Elaborado pelo autor



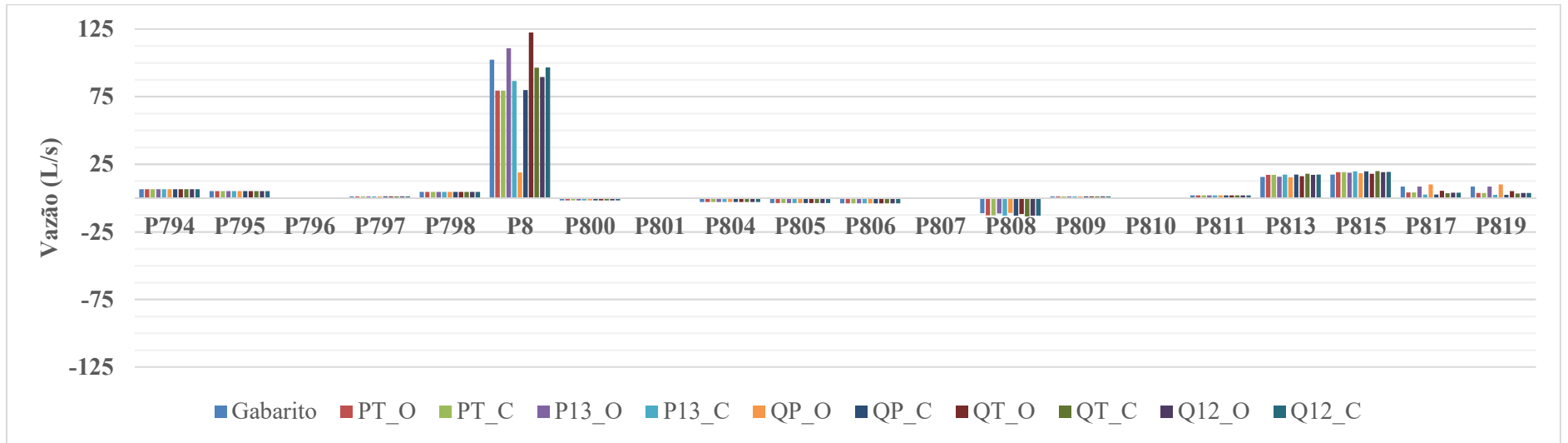
Fonte: Elaborado pelo autor



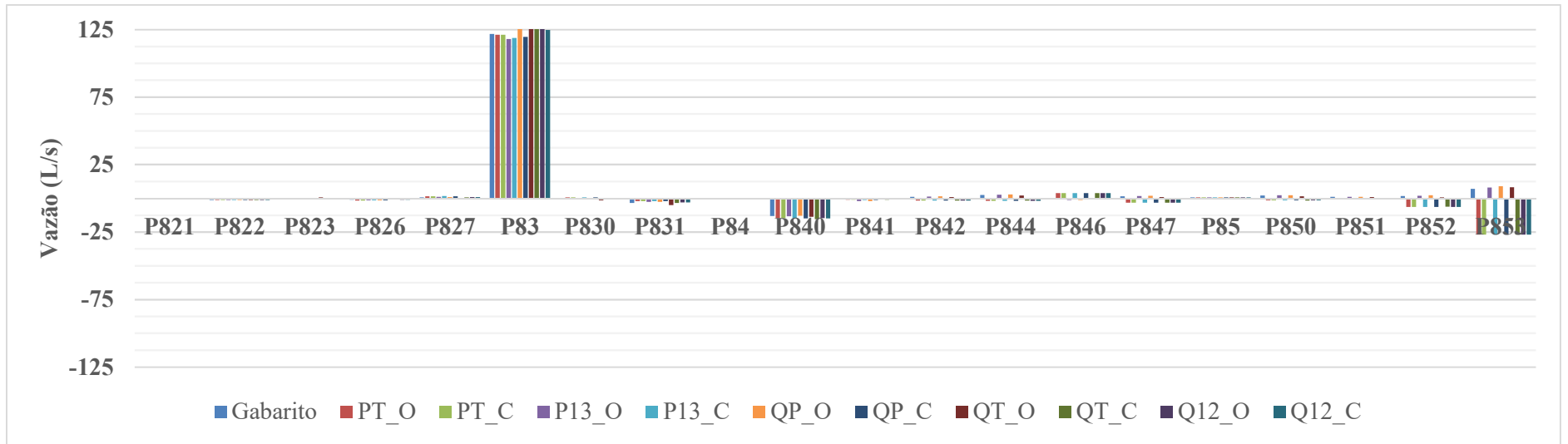
Fonte: Elaborado pelo autor



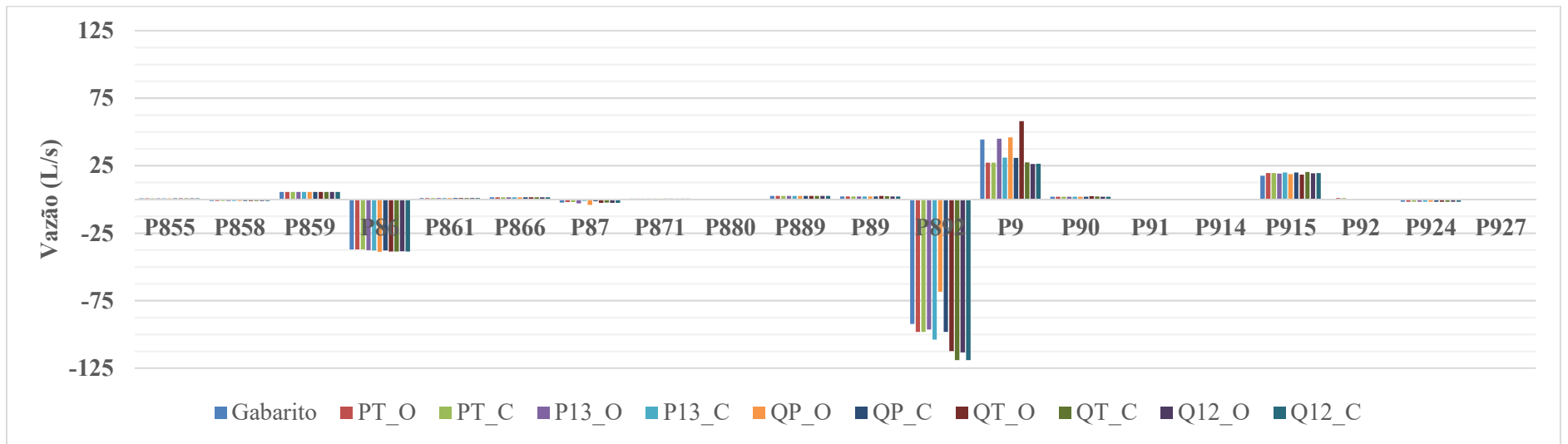
Fonte: Elaborado pelo autor



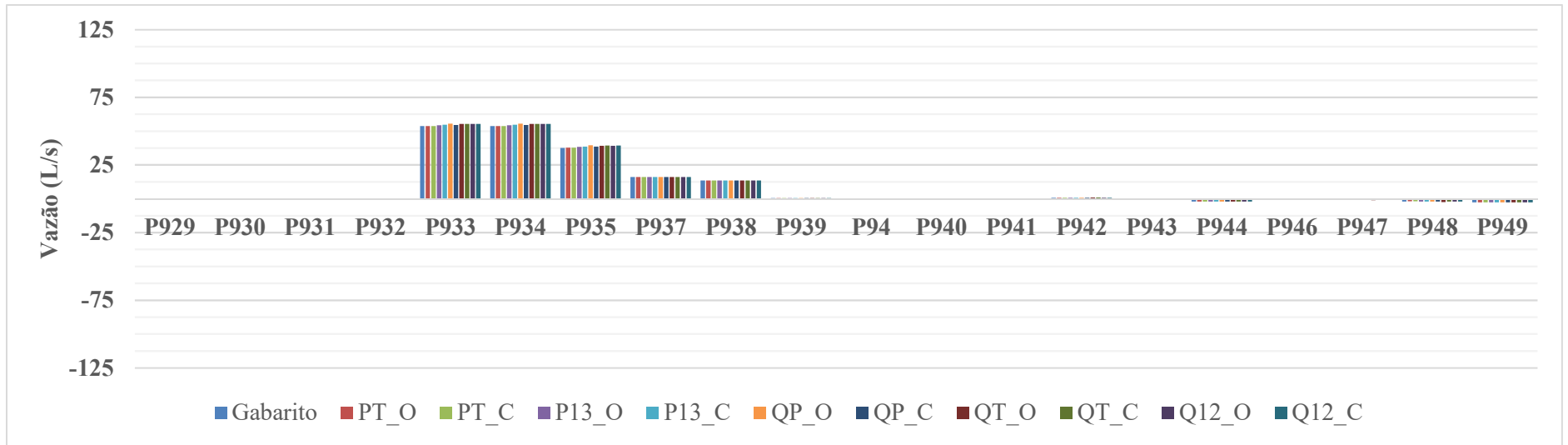
Fonte: Elaborado pelo autor



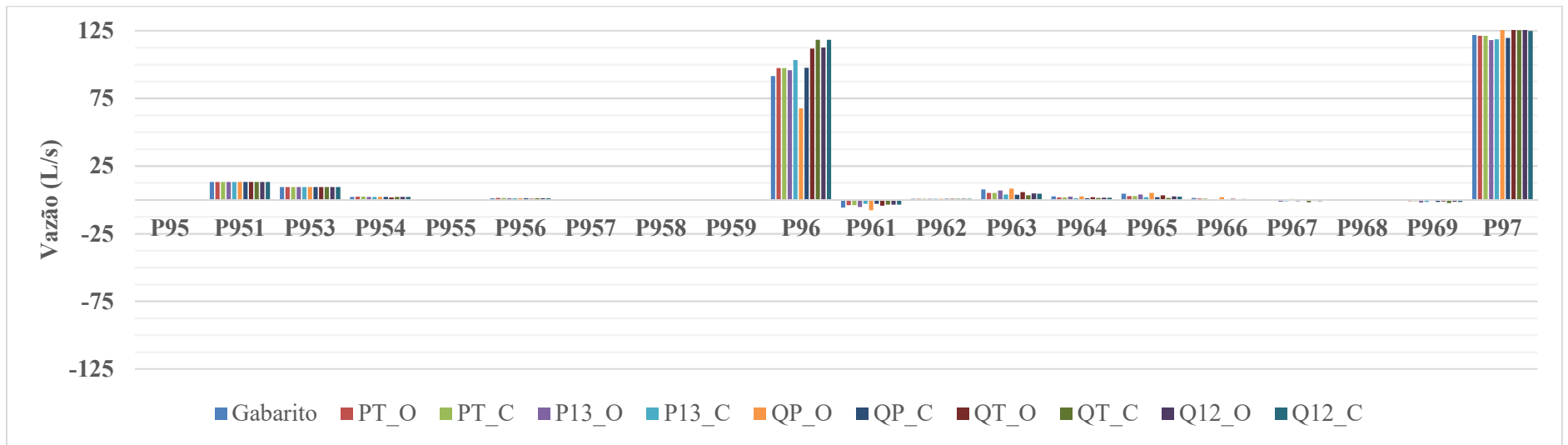
Fonte: Elaborado pelo autor



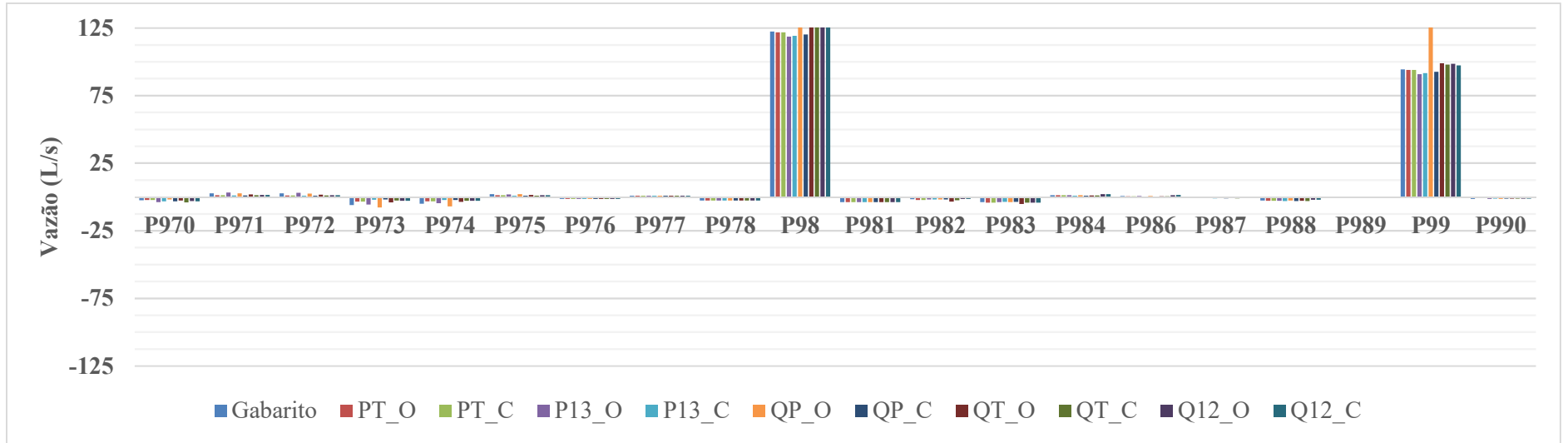
Fonte: Elaborado pelo autor



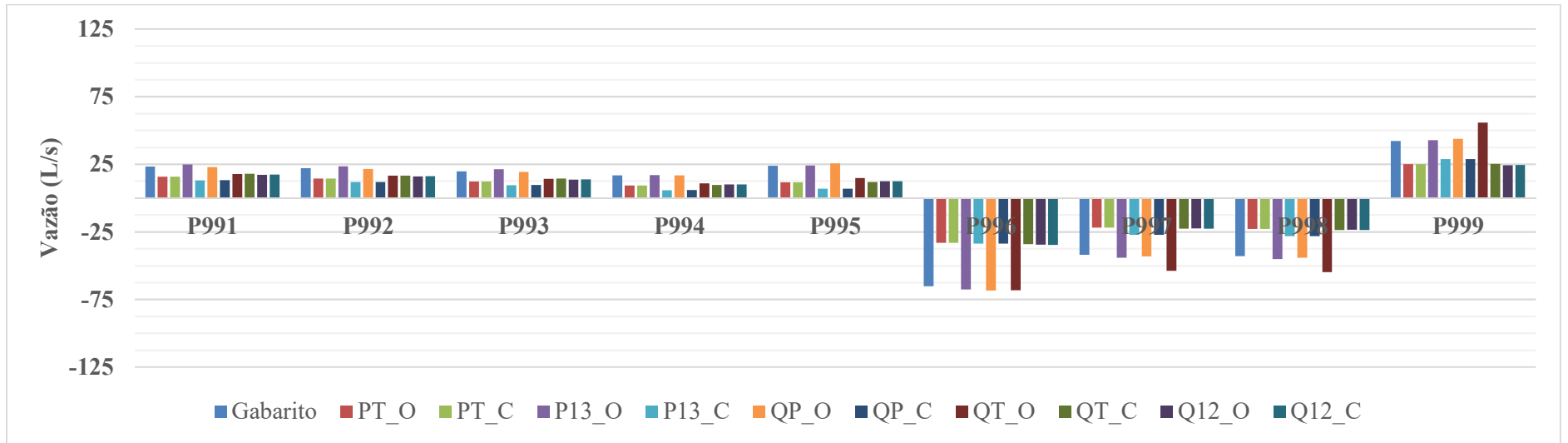
Fonte: Elaborado pelo autor



Fonte: Elaborado pelo autor

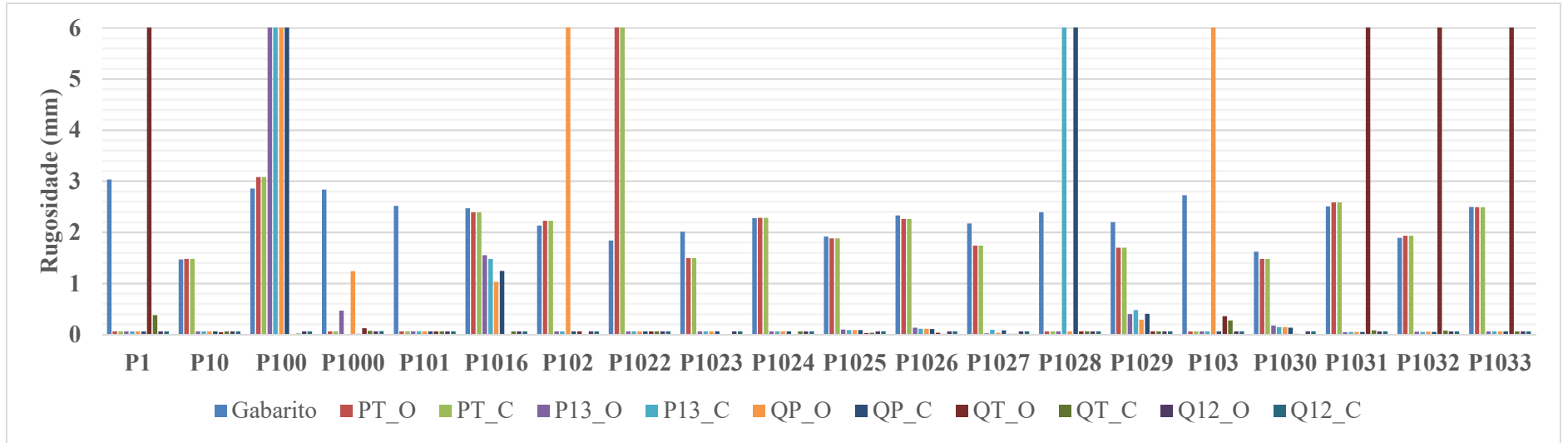


Fonte: Elaborado pelo autor

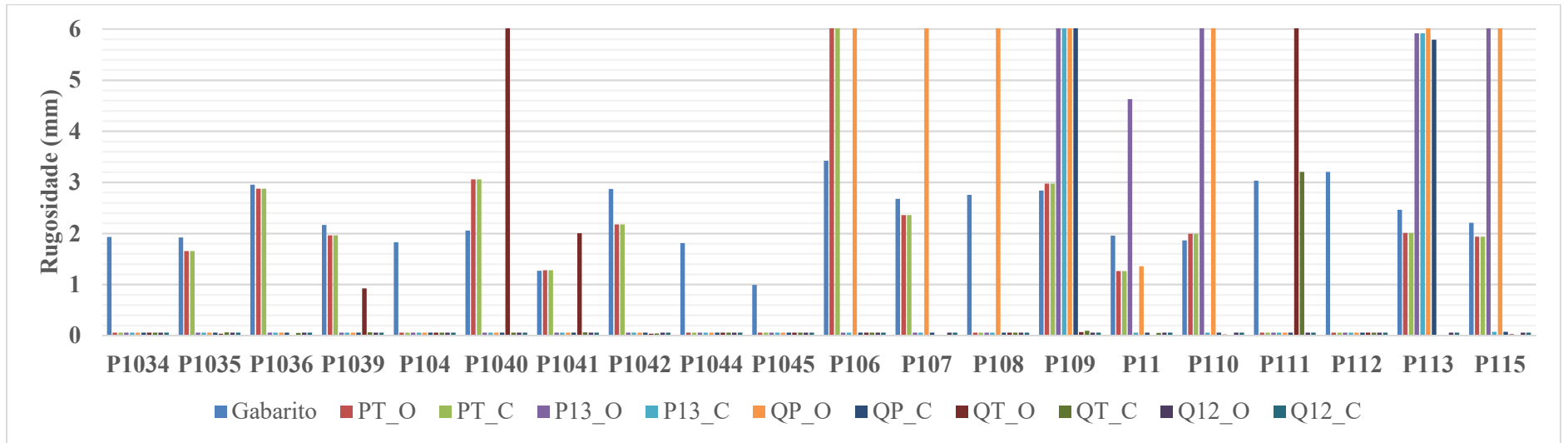


Fonte: Elaborado pelo autor

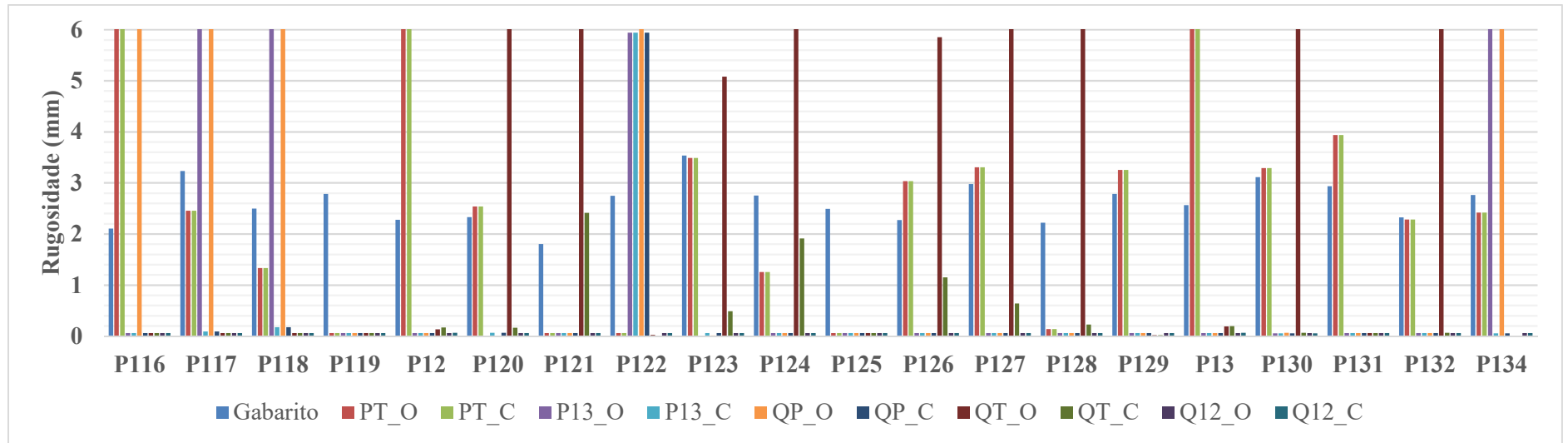
**APÊNDICE BS – Rugosidades Absolutas encontradas na Calibração do fator de atrito
com rugosidade absoluta inicial de 0,06 mm: rede C-Town**



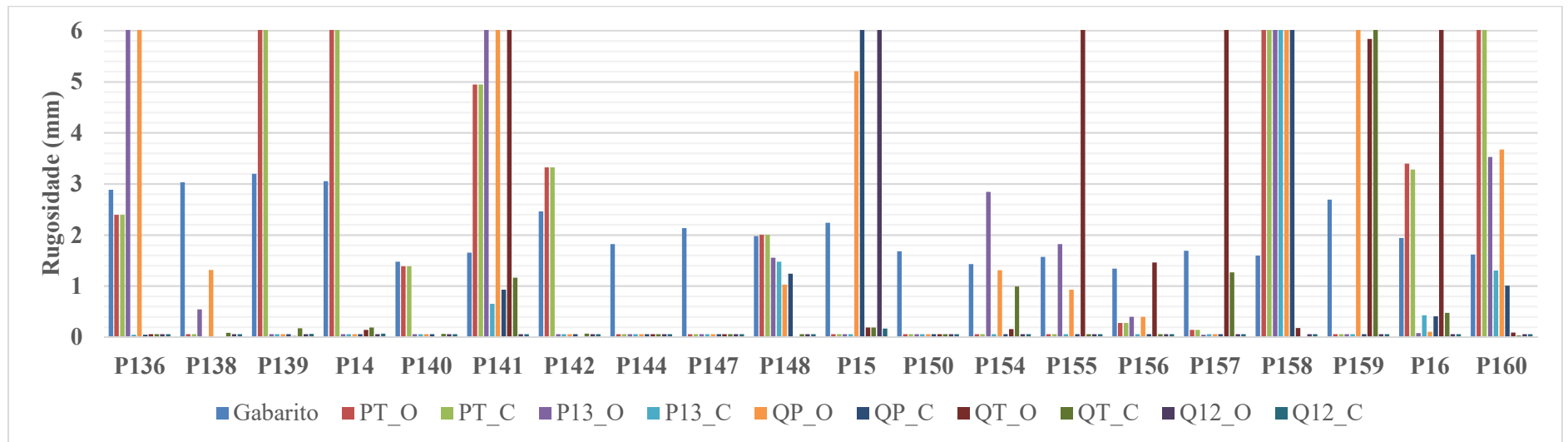
Fonte: Elaborado pelo autor



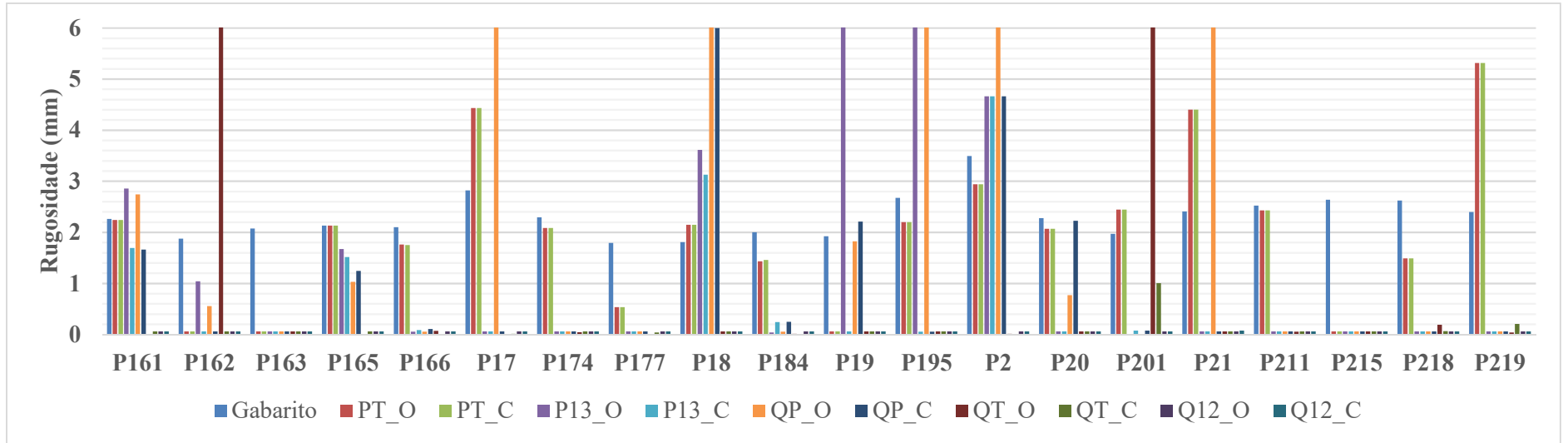
Fonte: Elaborado pelo autor



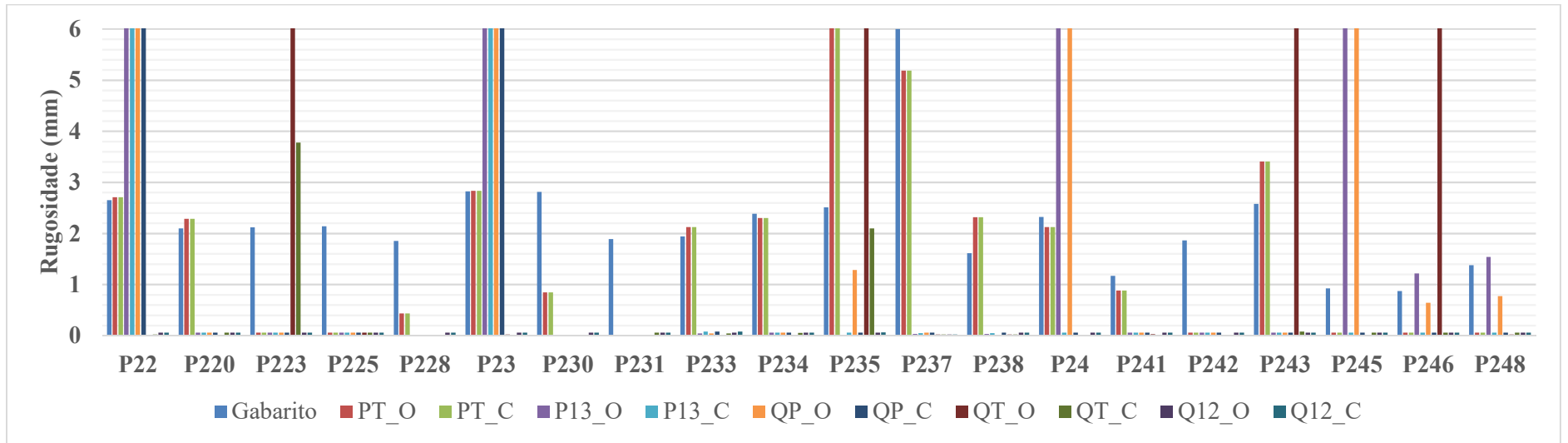
Fonte: Elaborado pelo autor



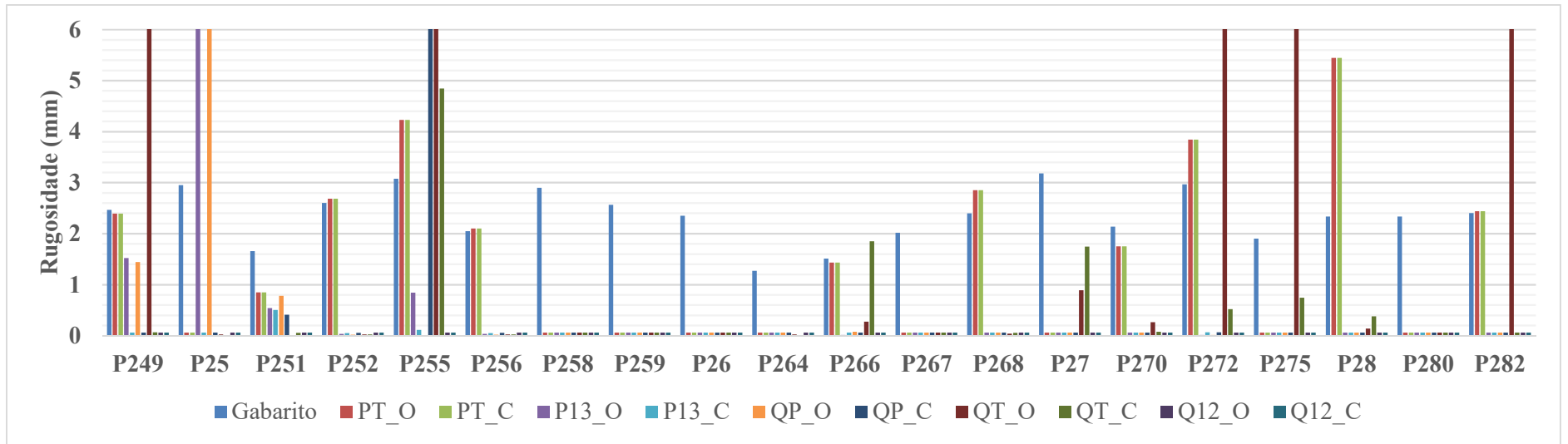
Fonte: Elaborado pelo autor



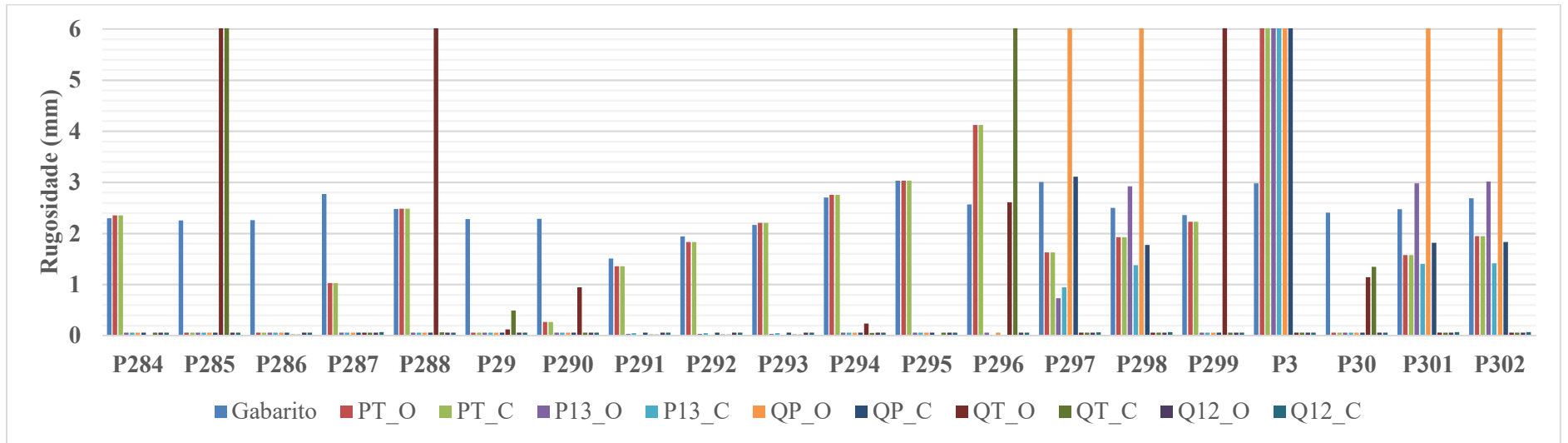
Fonte: Elaborado pelo autor



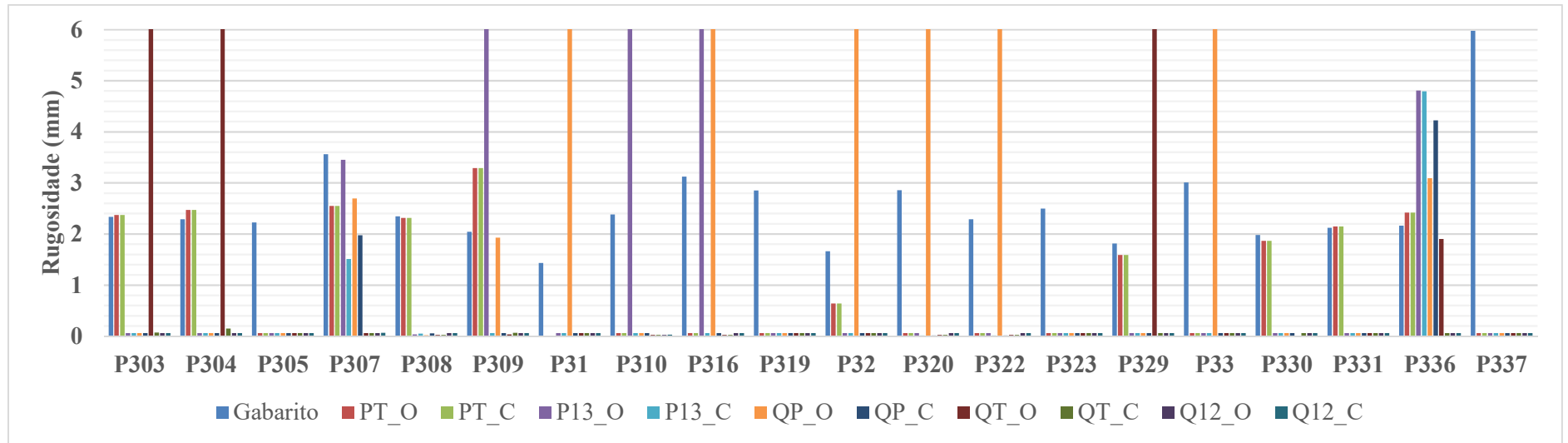
Fonte: Elaborado pelo autor



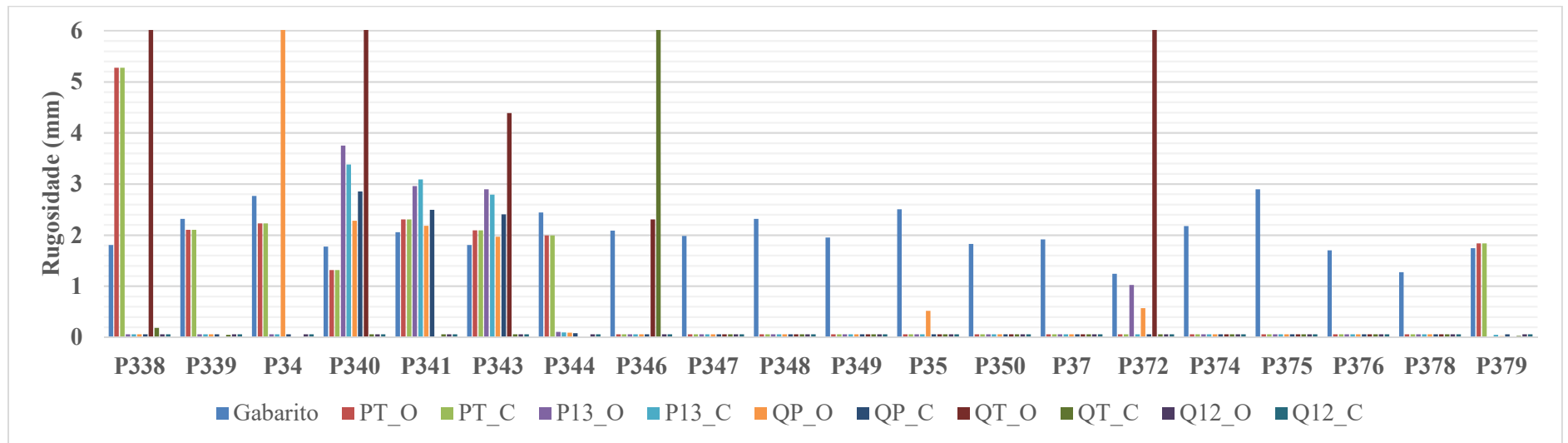
Fonte: Elaborado pelo autor



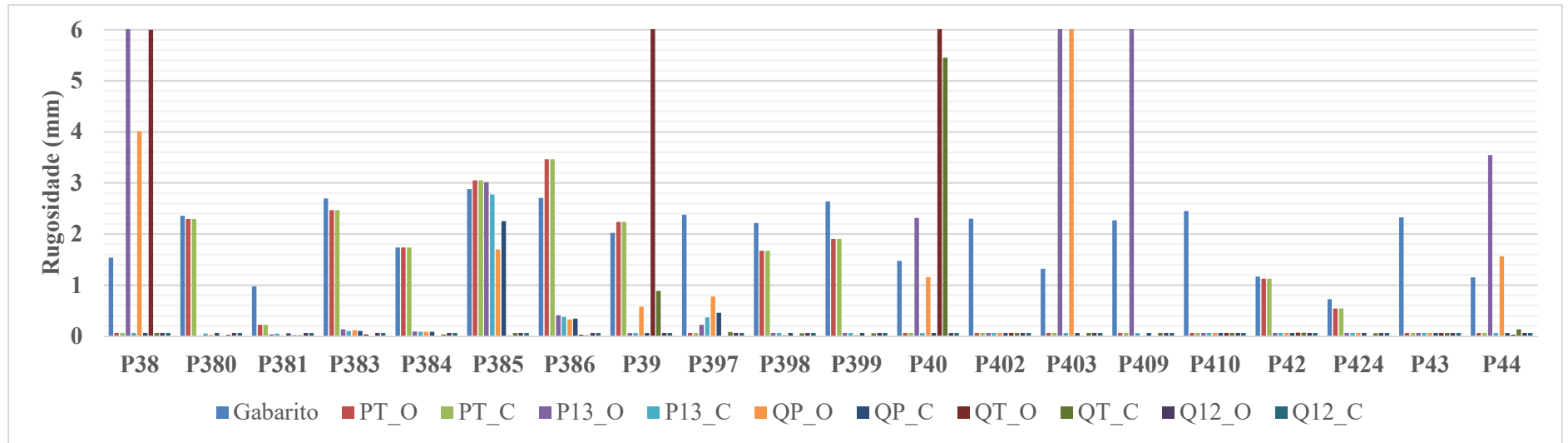
Fonte: Elaborado pelo autor



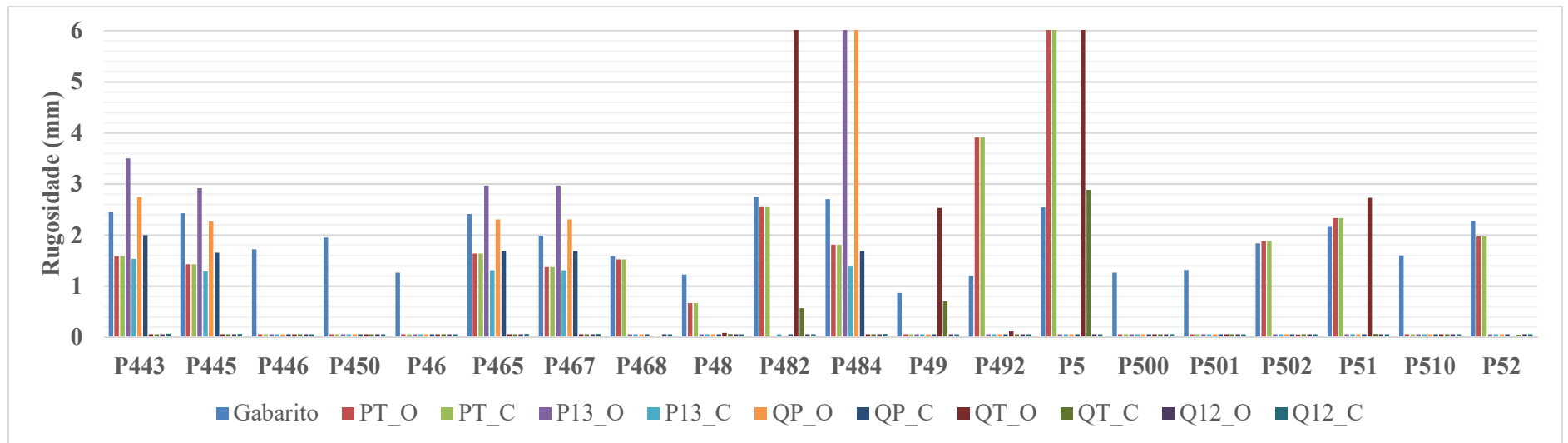
Fonte: Elaborado pelo autor



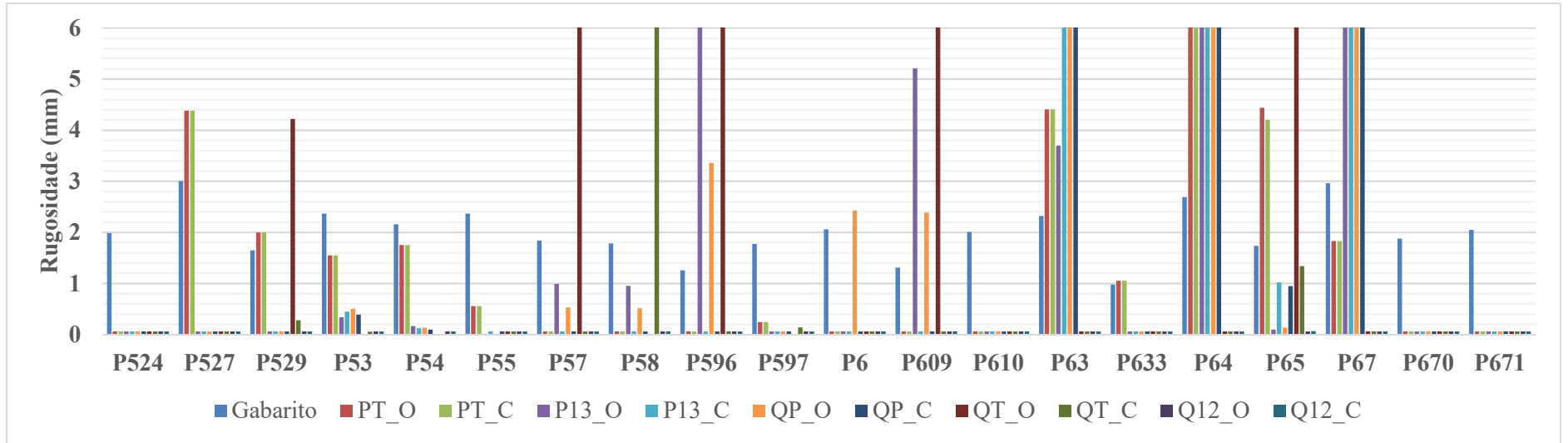
Fonte: Elaborado pelo autor



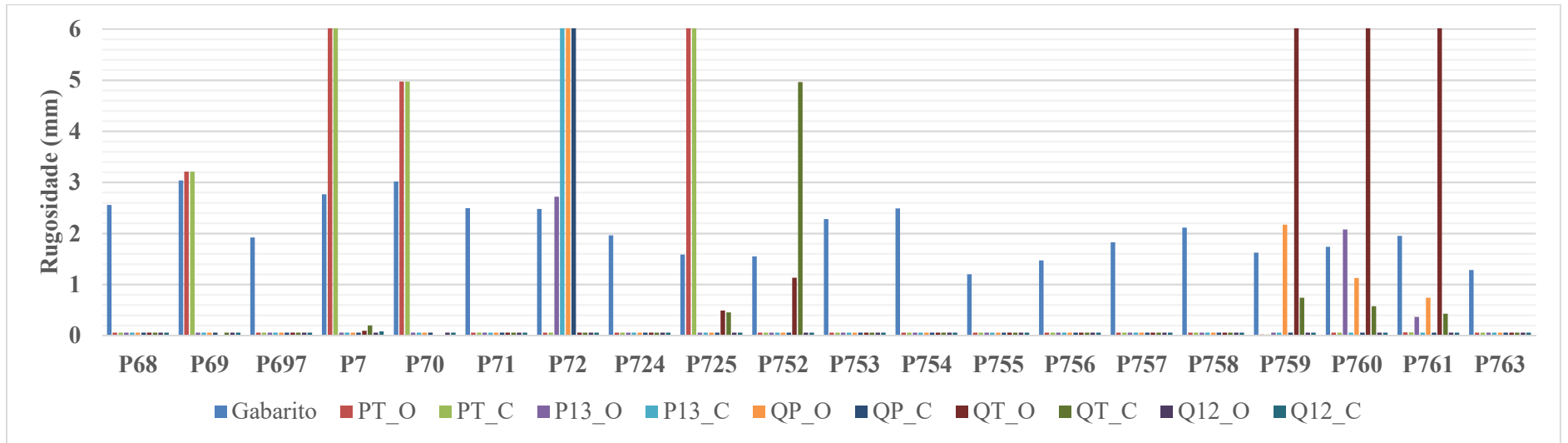
Fonte: Elaborado pelo autor



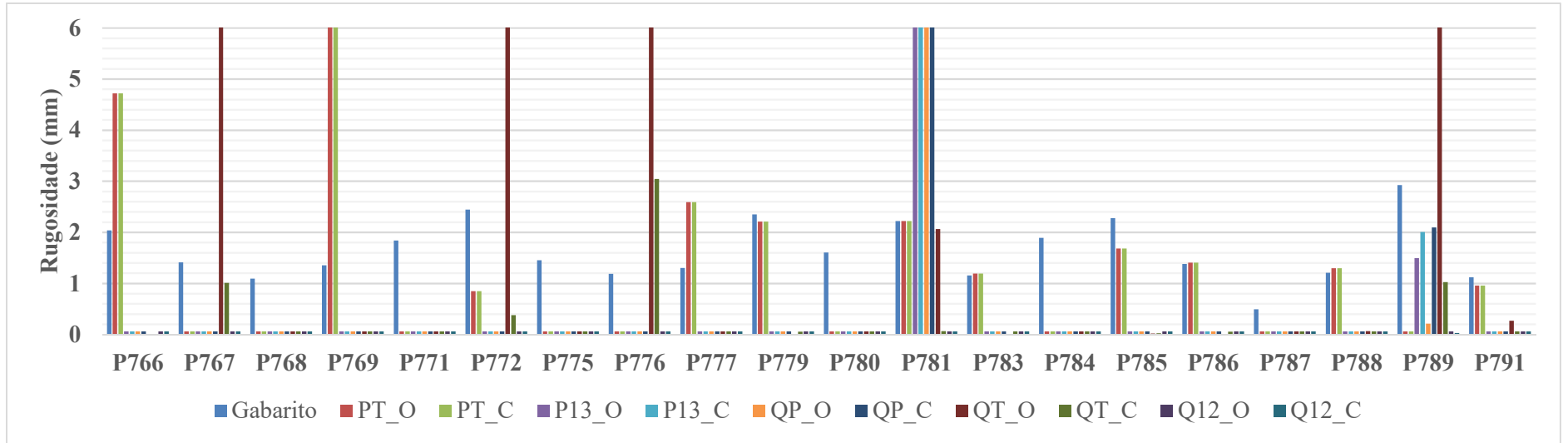
Fonte: Elaborado pelo autor



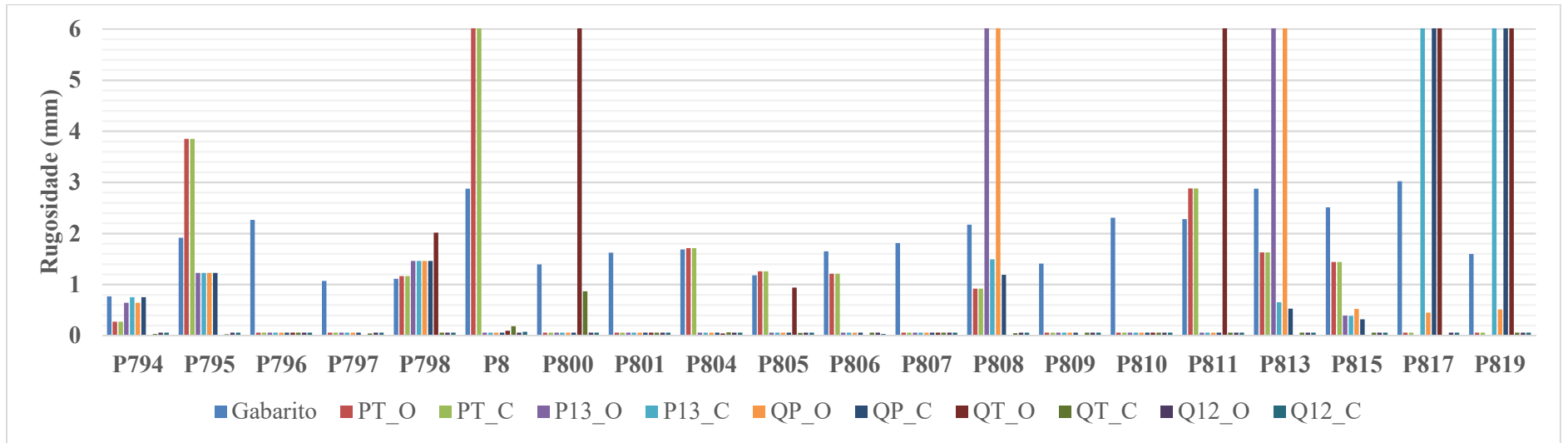
Fonte: Elaborado pelo autor



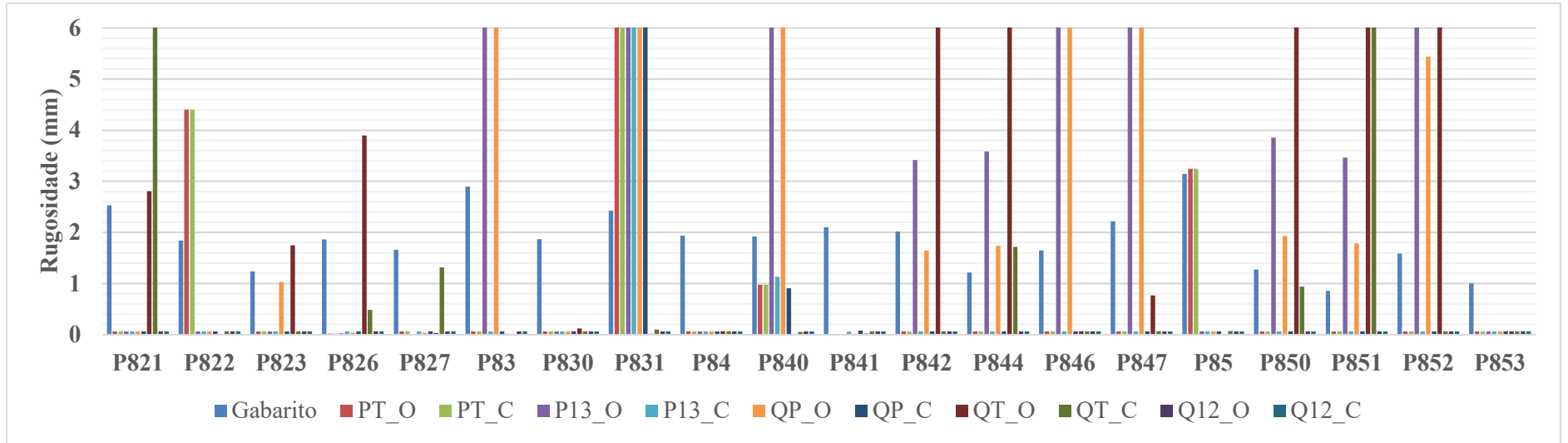
Fonte: Elaborado pelo autor



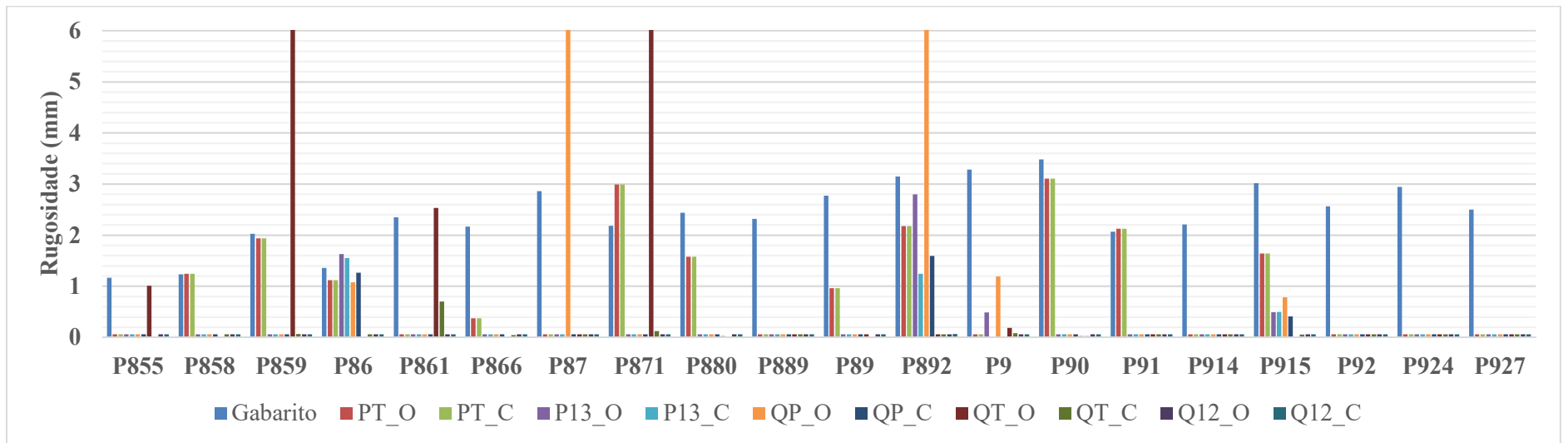
Fonte: Elaborado pelo autor



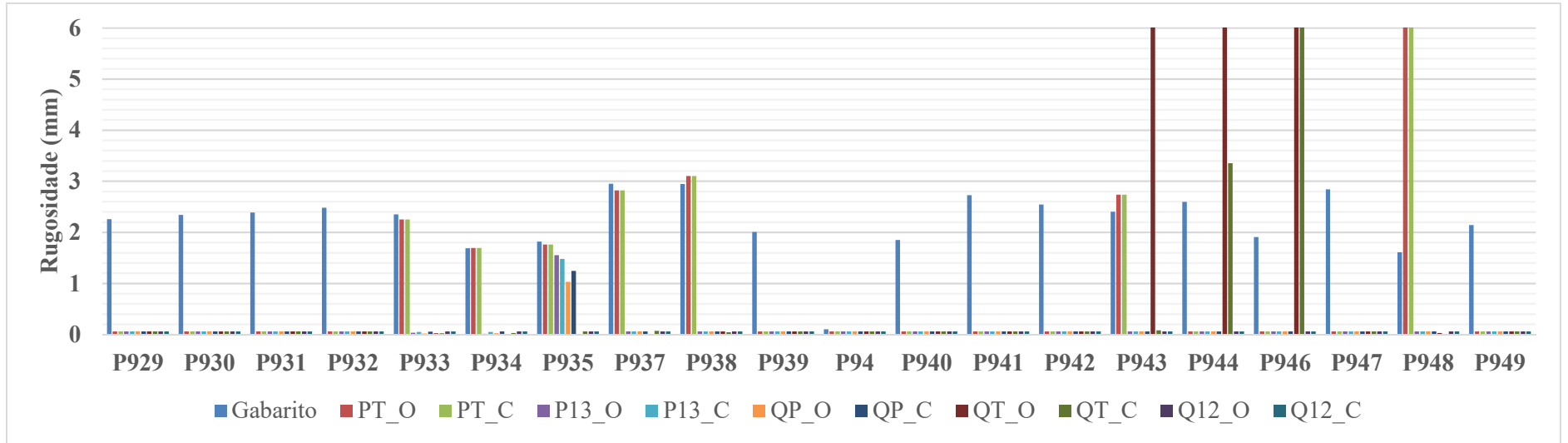
Fonte: Elaborado pelo autor



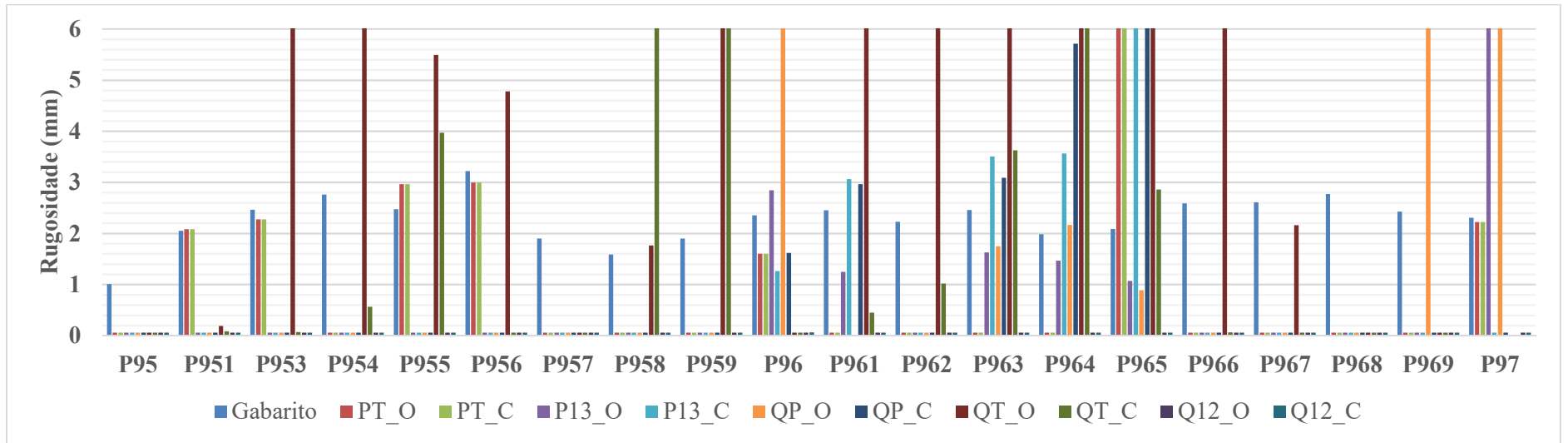
Fonte: Elaborado pelo autor



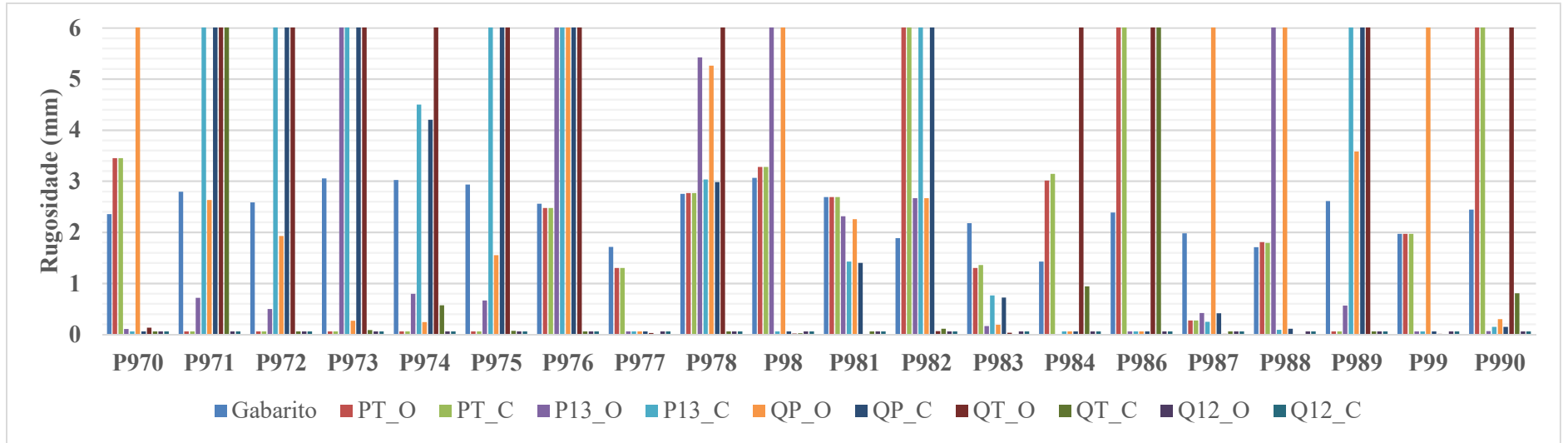
Fonte: Elaborado pelo autor



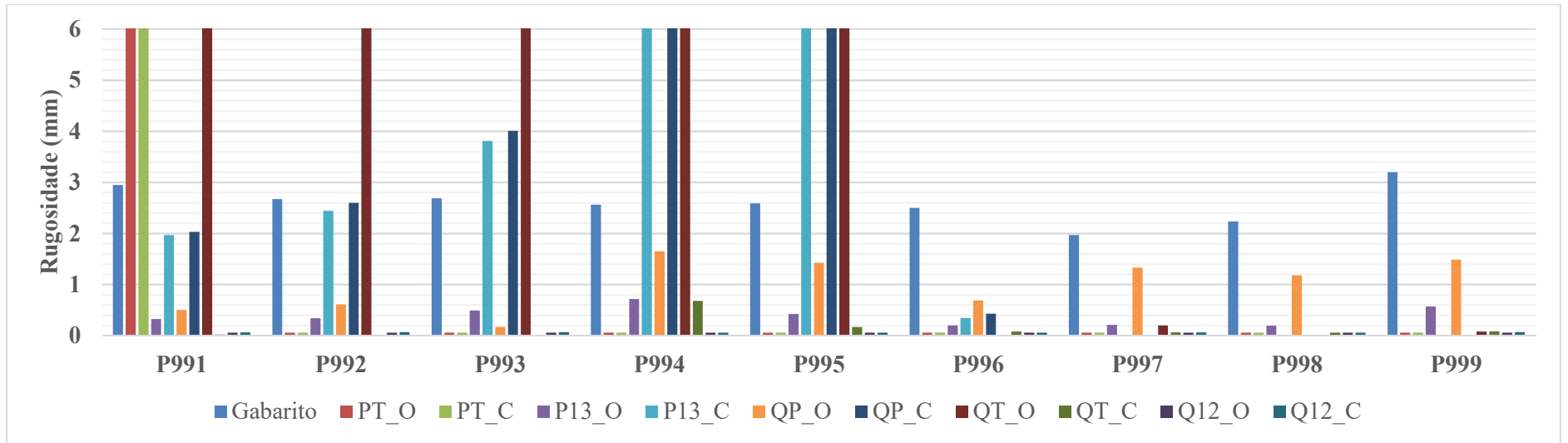
Fonte: Elaborado pelo autor



Fonte: Elaborado pelo autor

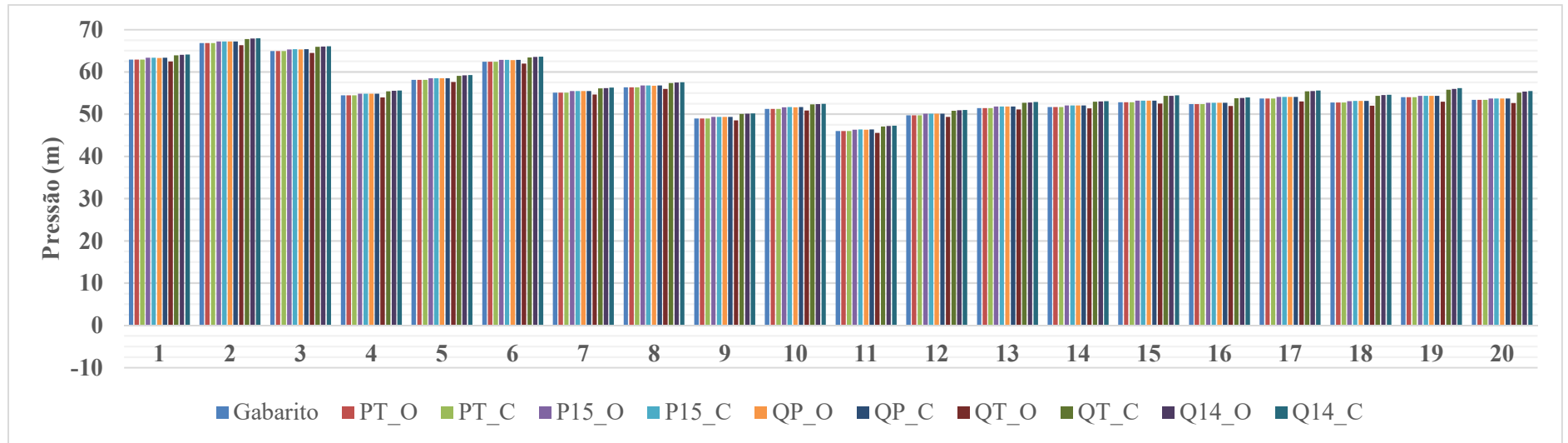


Fonte: Elaborado pelo autor

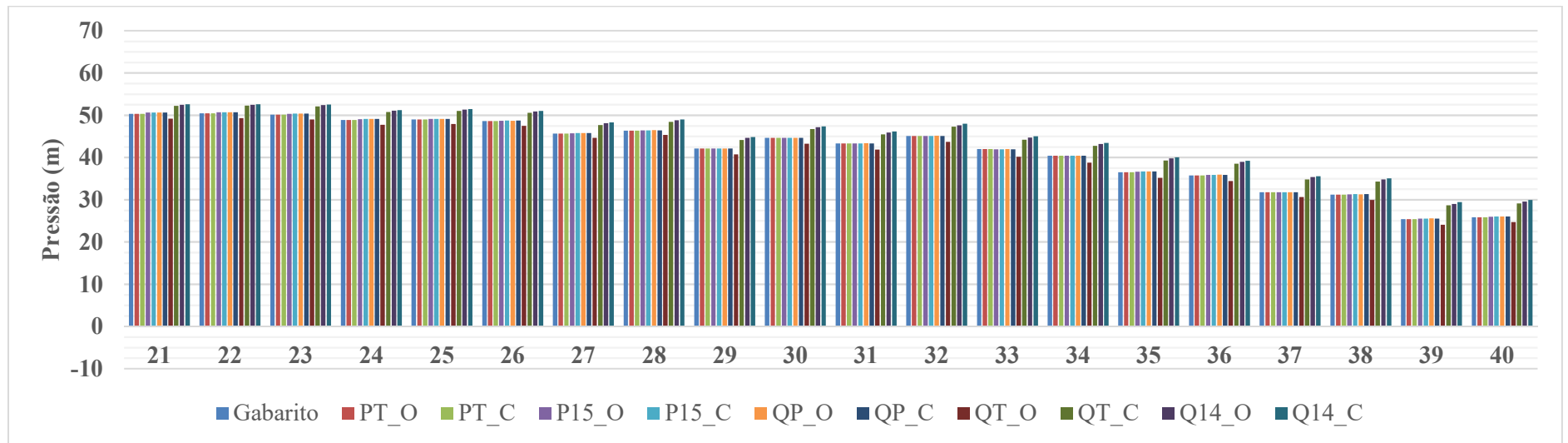


Fonte: Elaborado pelo autor

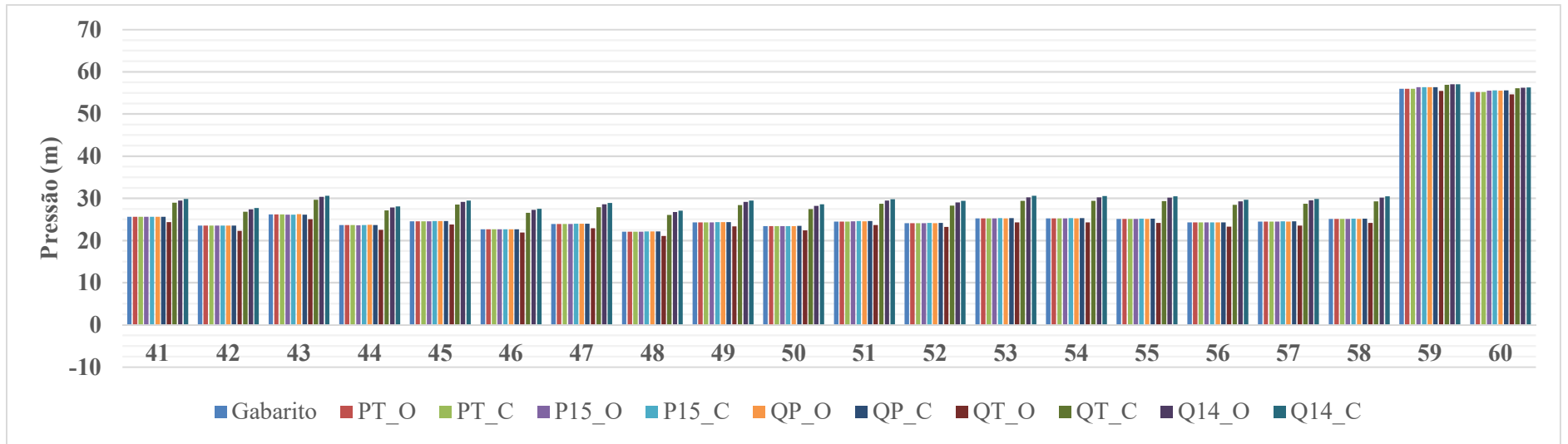
APÊNDICE BT – Pressões encontradas na Calibração do fator de atrito com rugosidade absoluta inicial de 0,06 mm: rede MIGHA



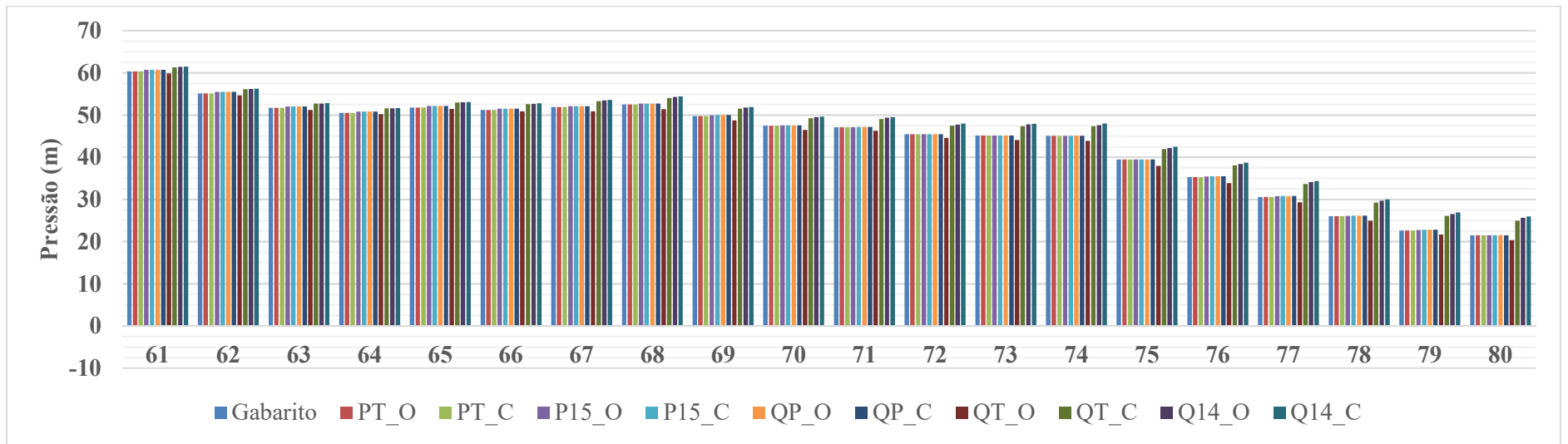
Fonte: Elaborado pelo autor



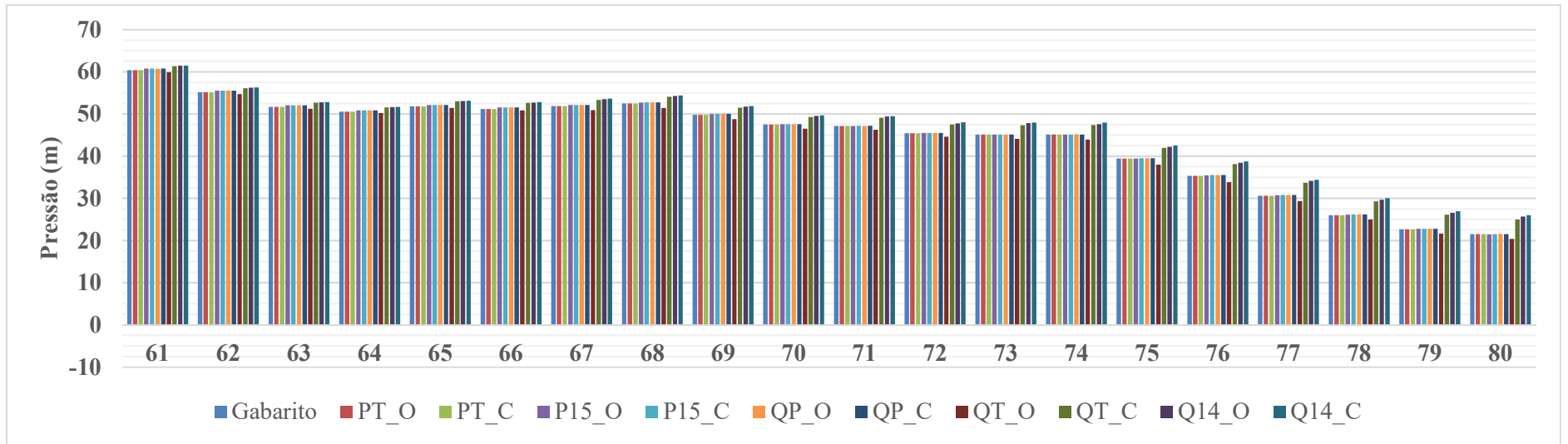
Fonte: Elaborado pelo autor



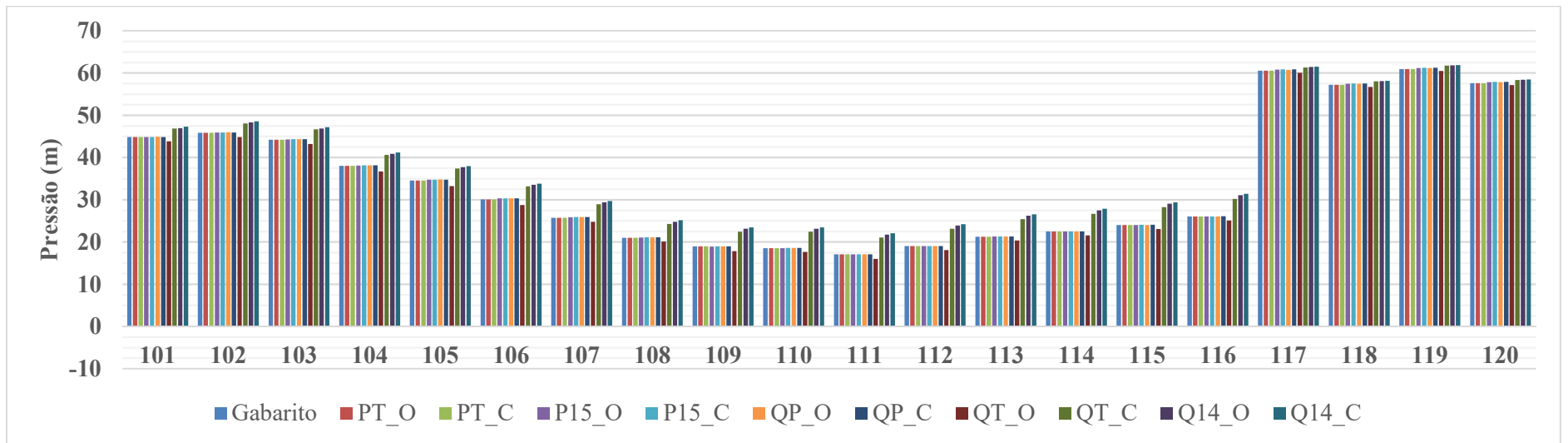
Fonte: Elaborado pelo autor



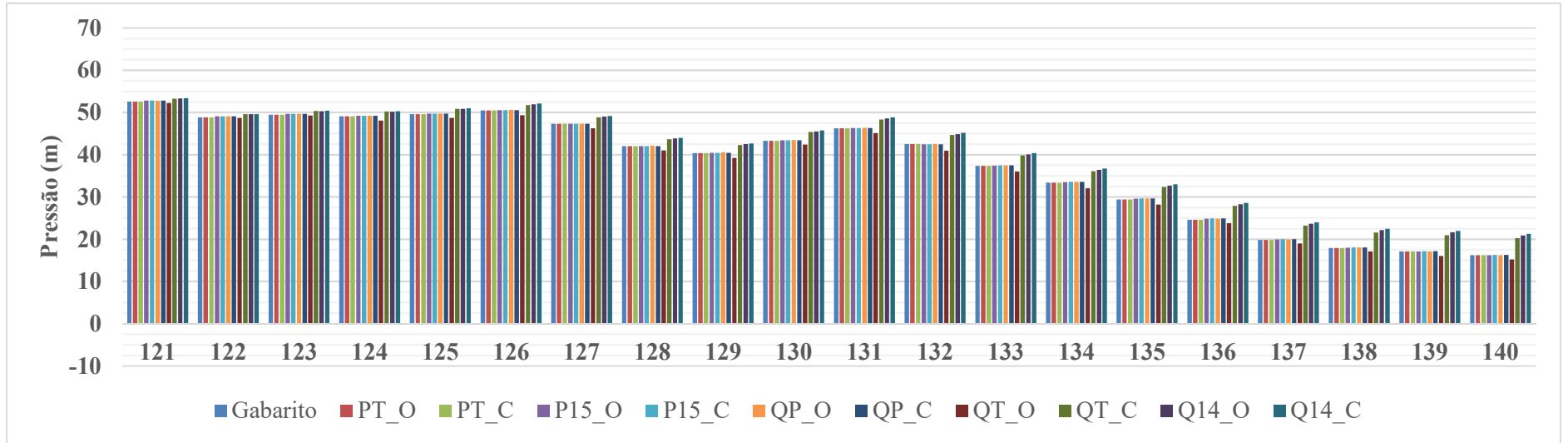
Fonte: Elaborado pelo autor



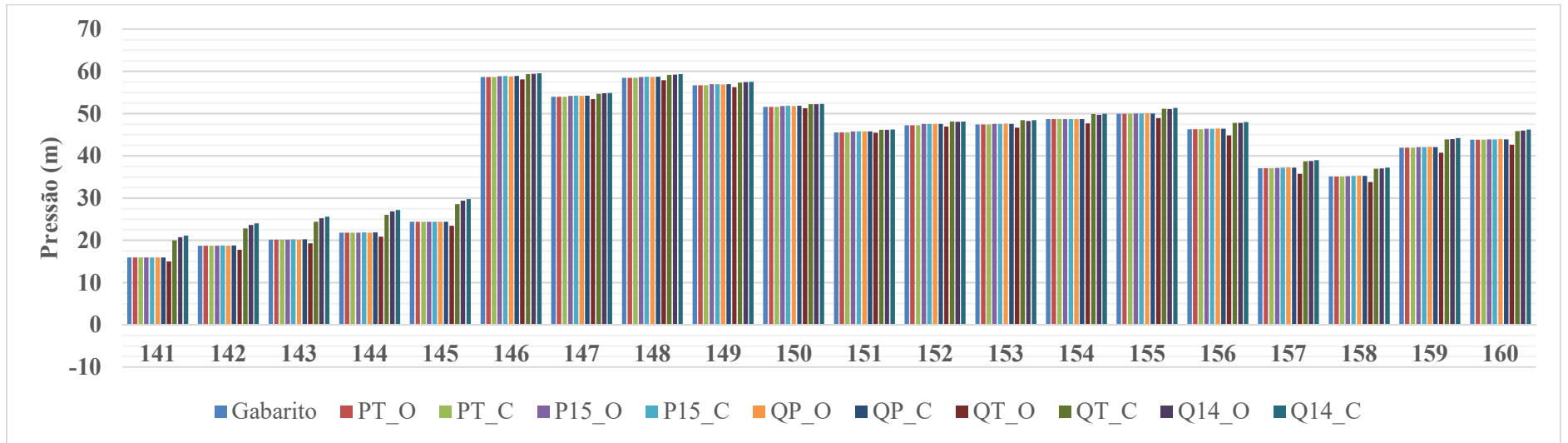
Fonte: Elaborado pelo autor



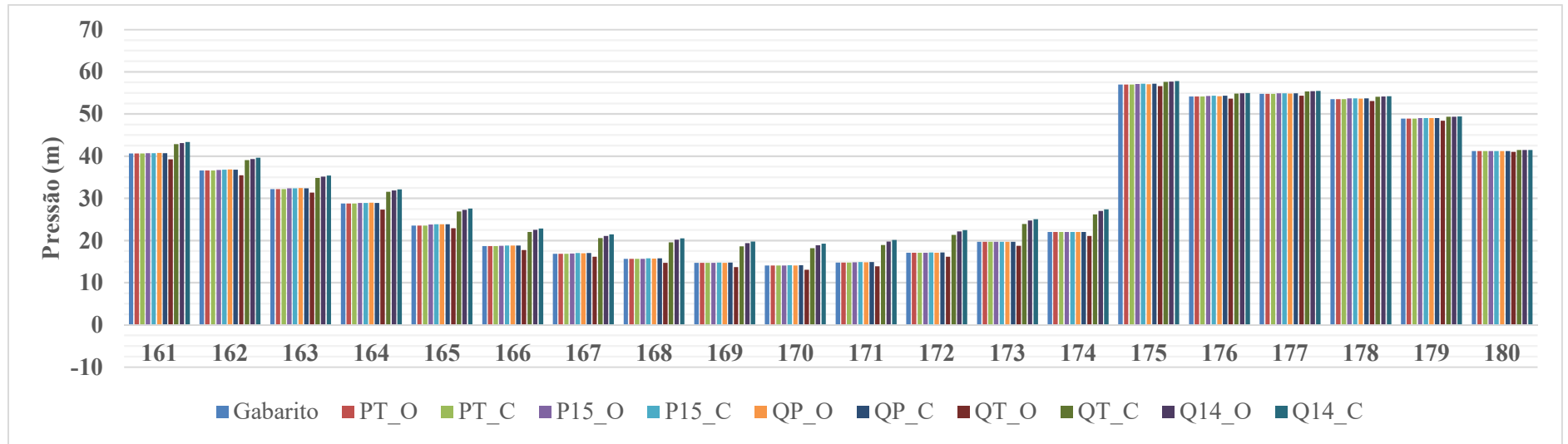
Fonte: Elaborado pelo autor



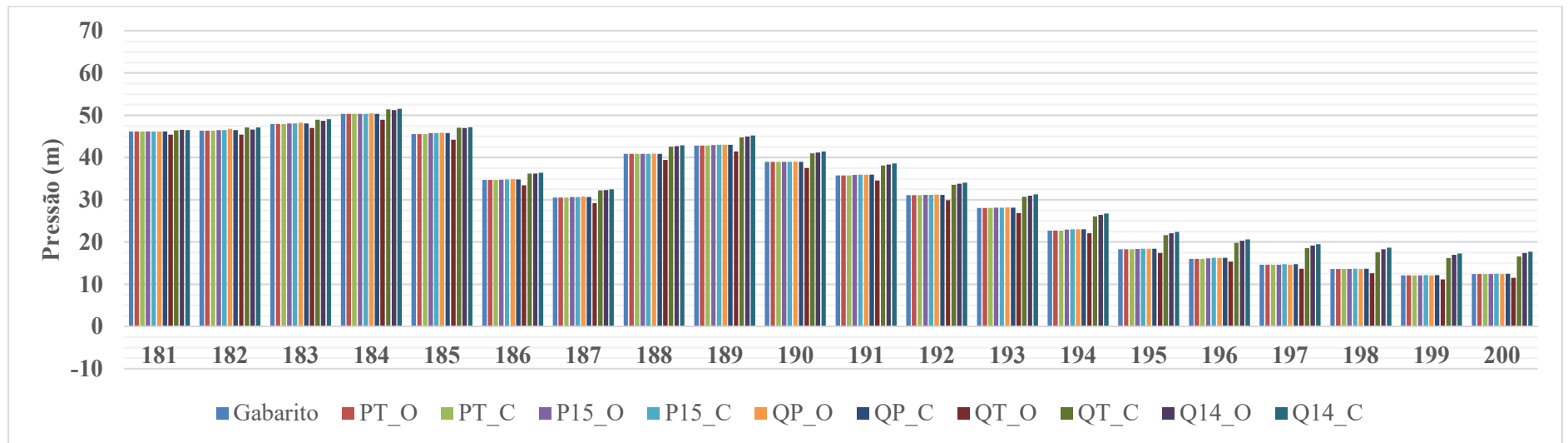
Fonte: Elaborado pelo autor



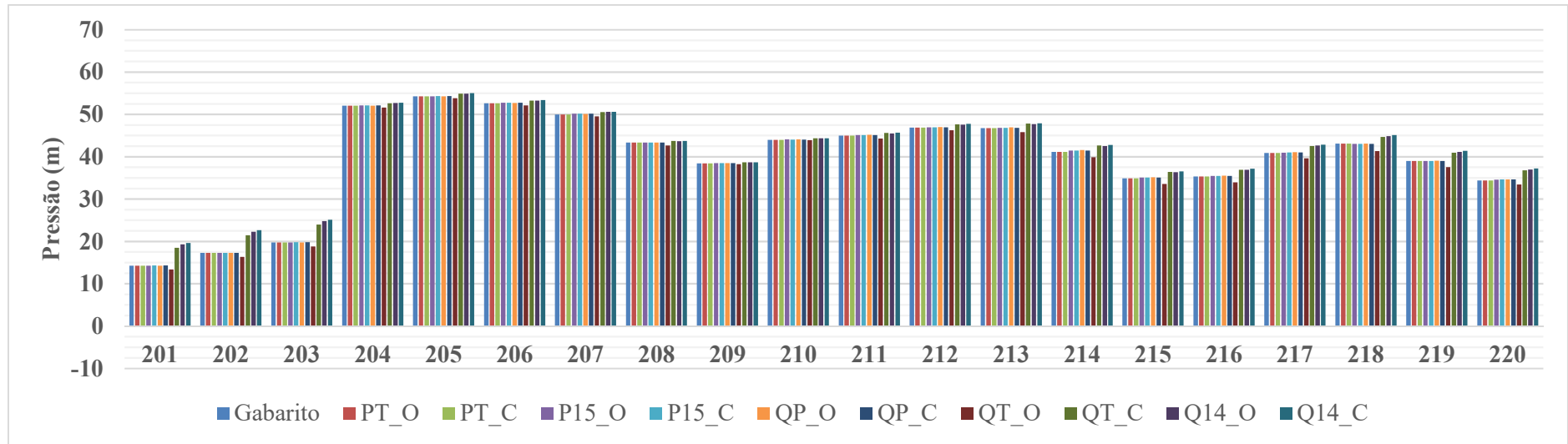
Fonte: Elaborado pelo autor



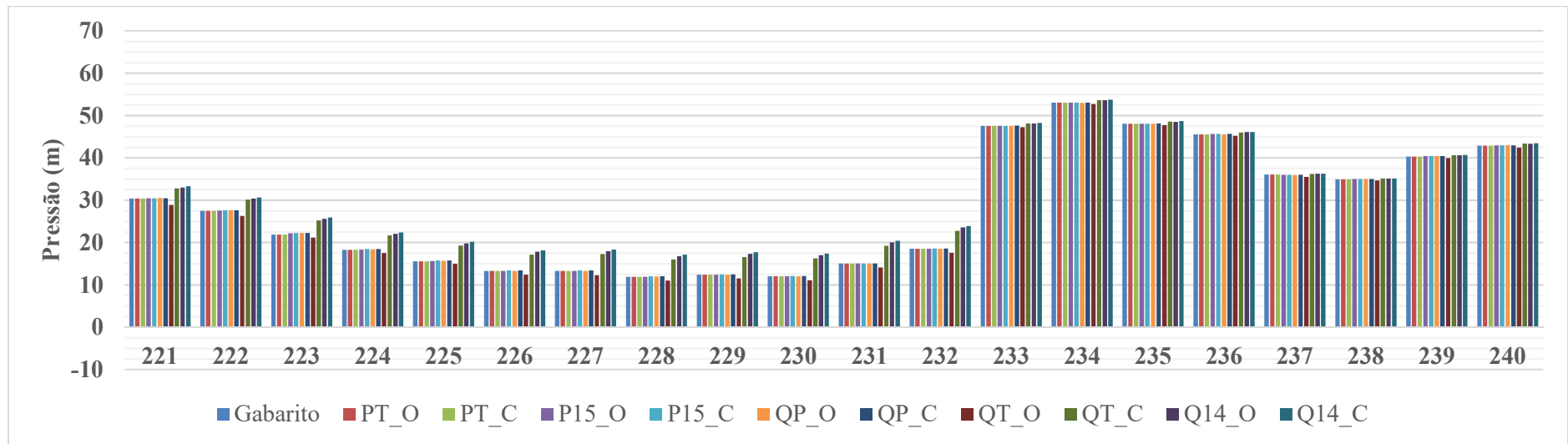
Fonte: Elaborado pelo autor



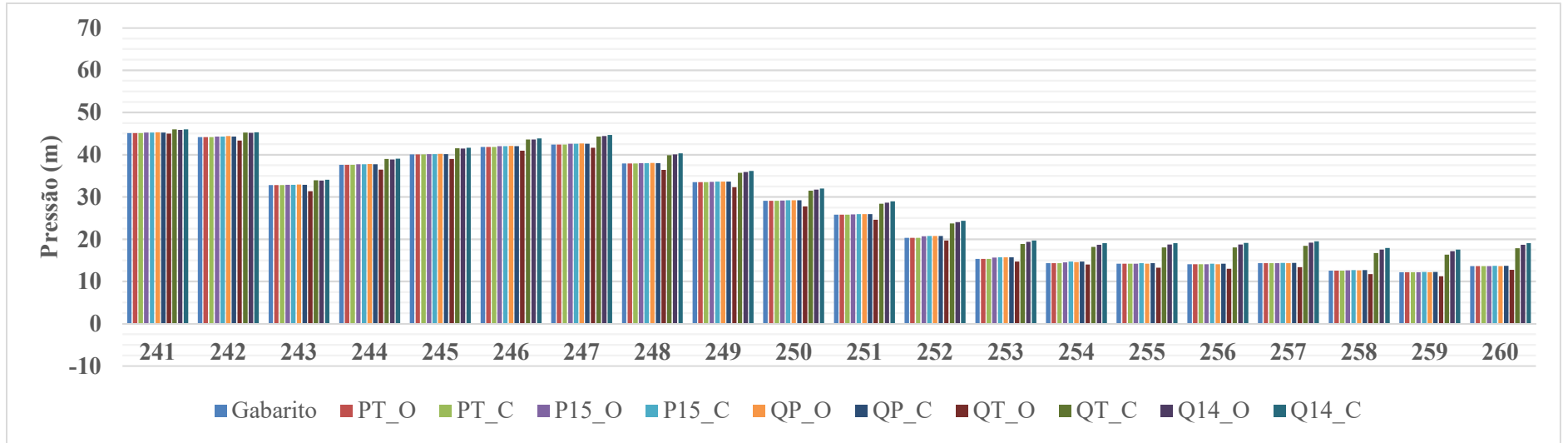
Fonte: Elaborado pelo autor



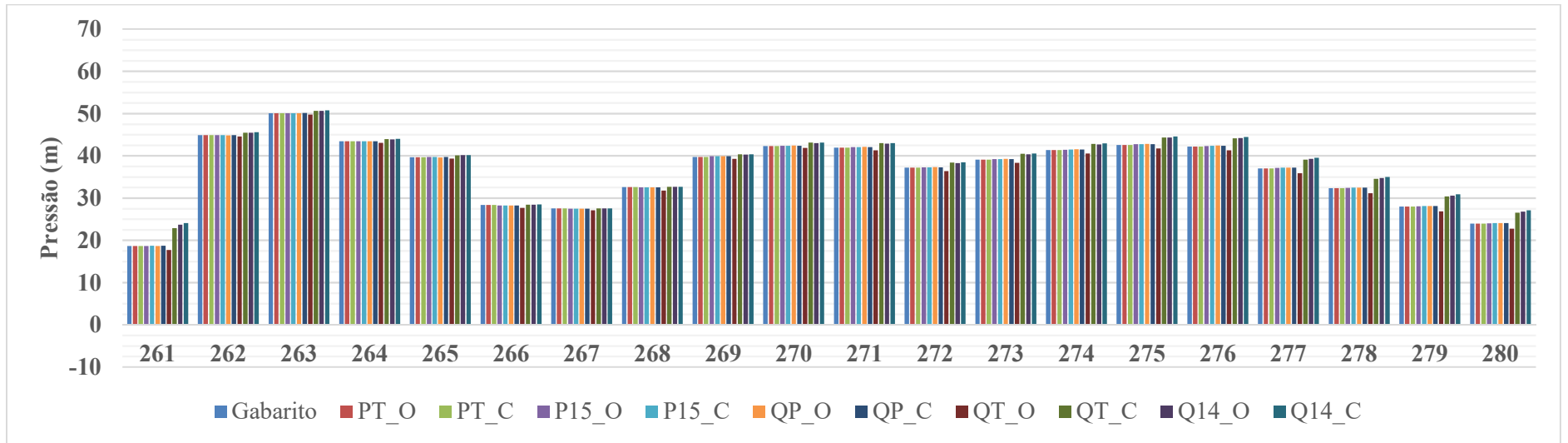
Fonte: Elaborado pelo autor



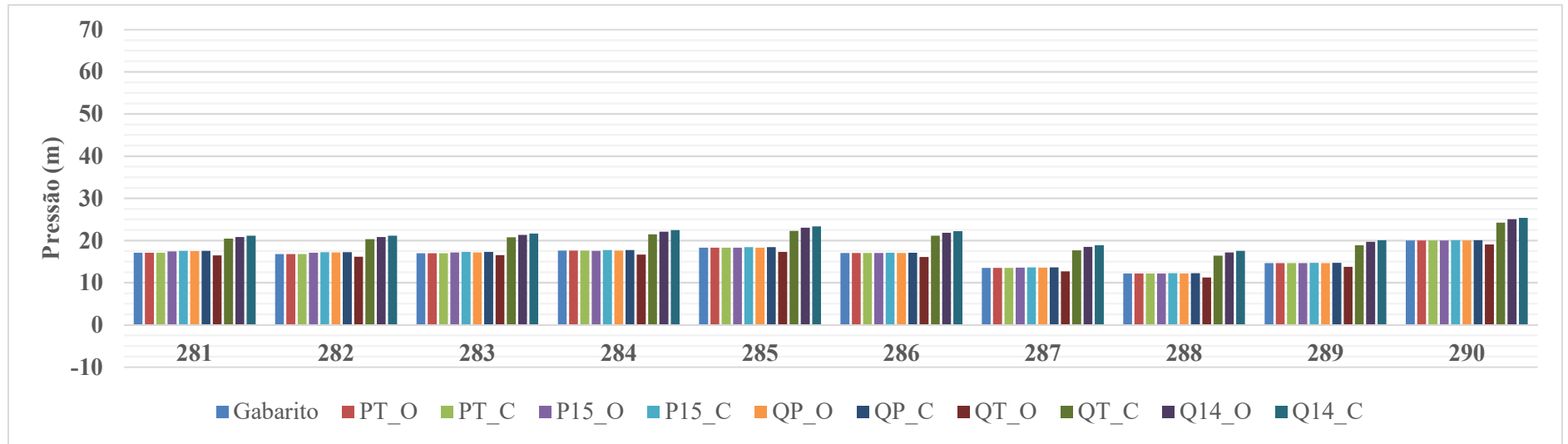
Fonte: Elaborado pelo autor



Fonte: Elaborado pelo autor

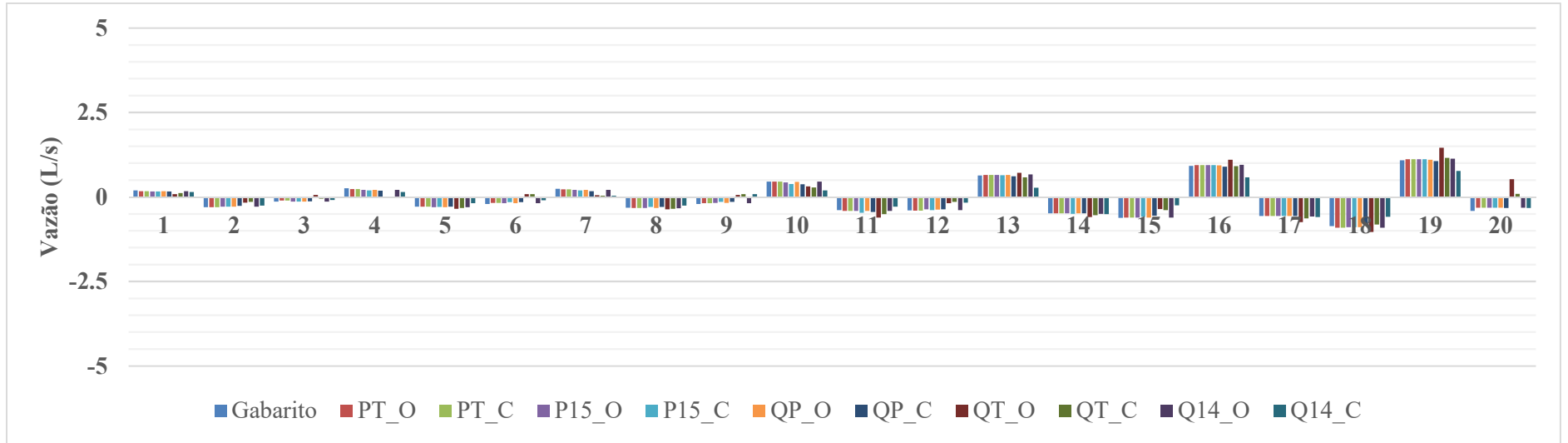


Fonte: Elaborado pelo autor

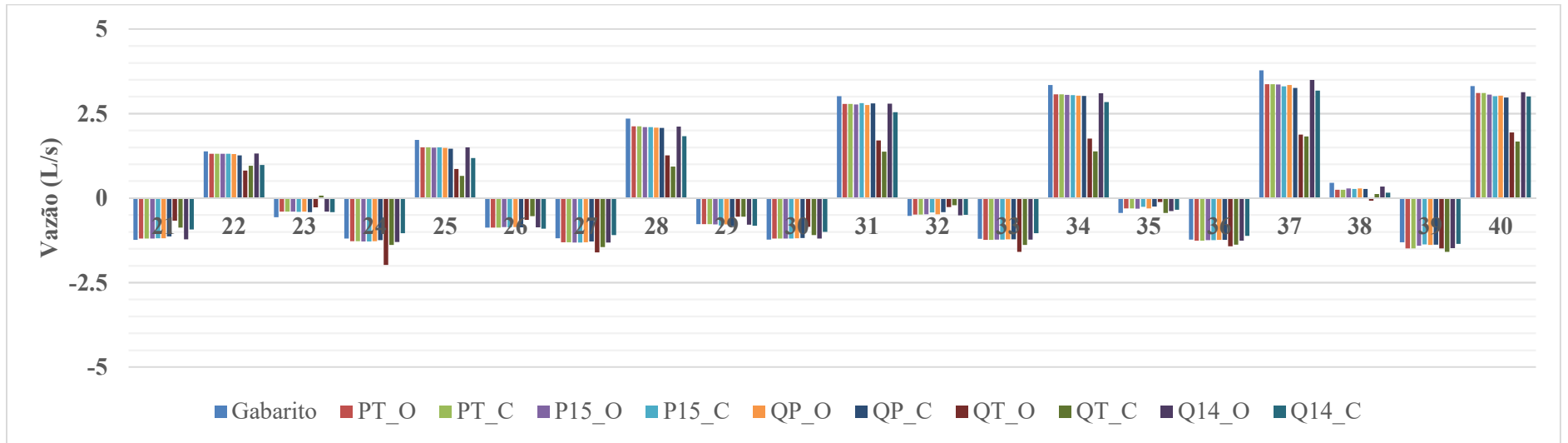


Fonte: Elaborado pelo autor

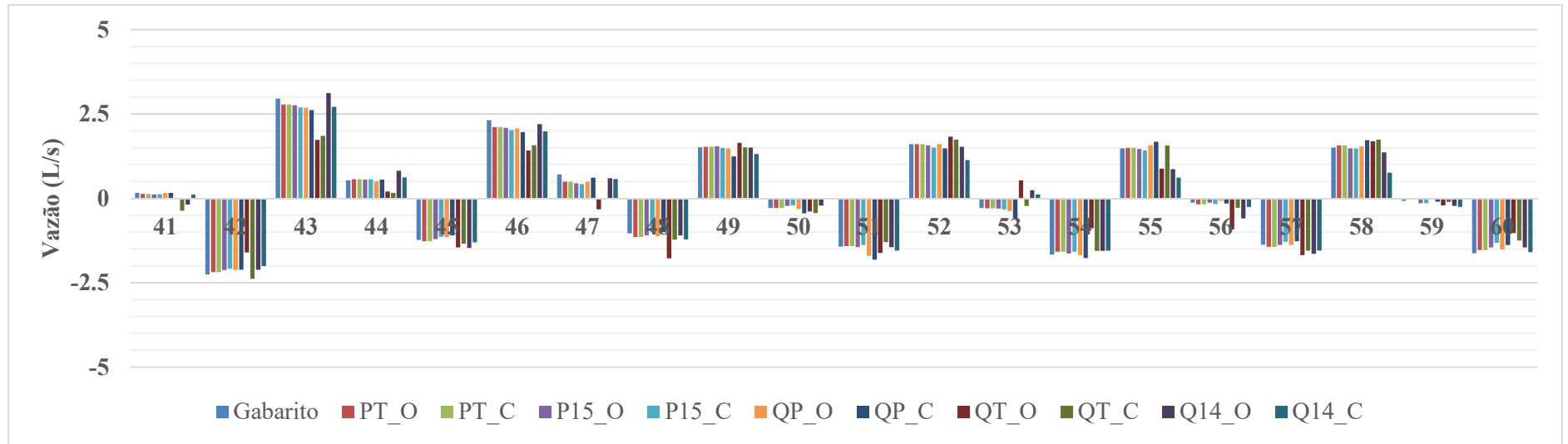
APÊNDICE BU – Vazões encontradas na Calibração do fator de atrito com rugosidade absoluta inicial de 0,06 mm: rede MIGHA



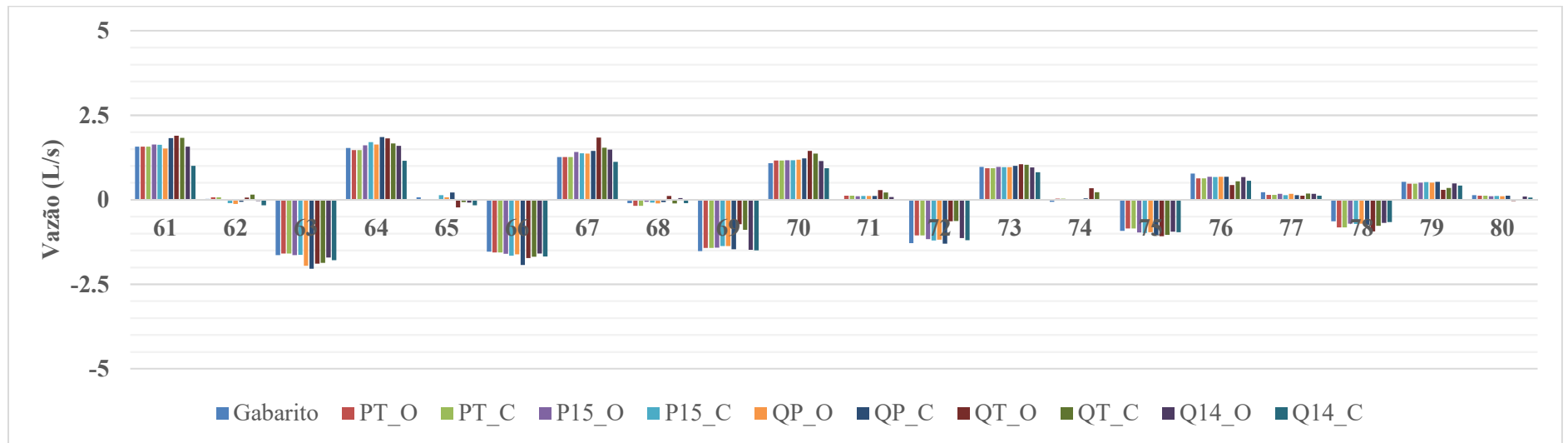
Fonte: Elaborado pelo autor



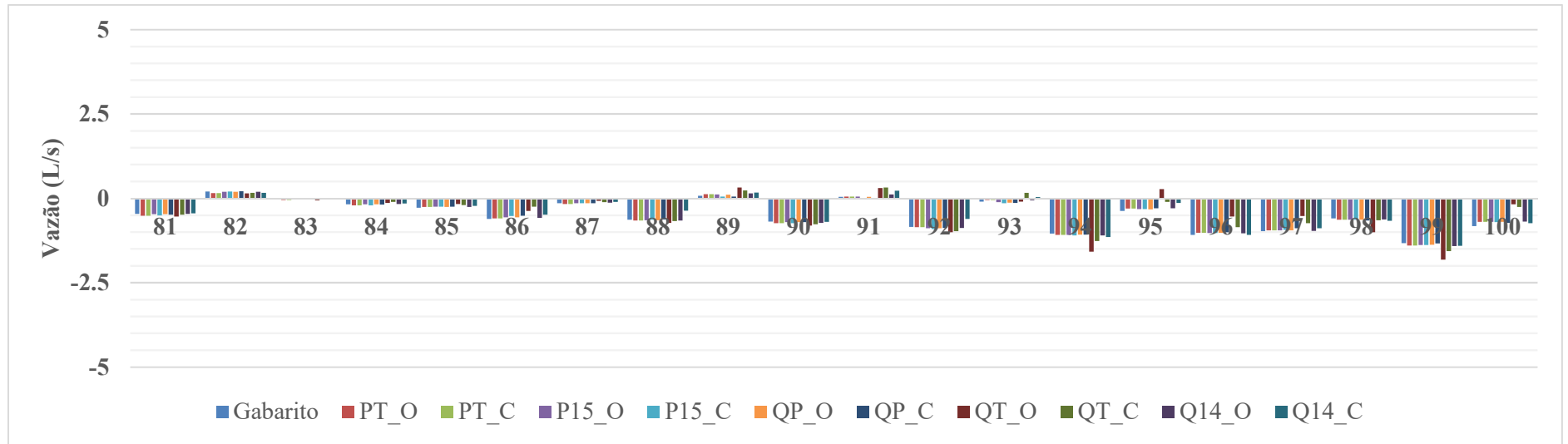
Fonte: Elaborado pelo autor



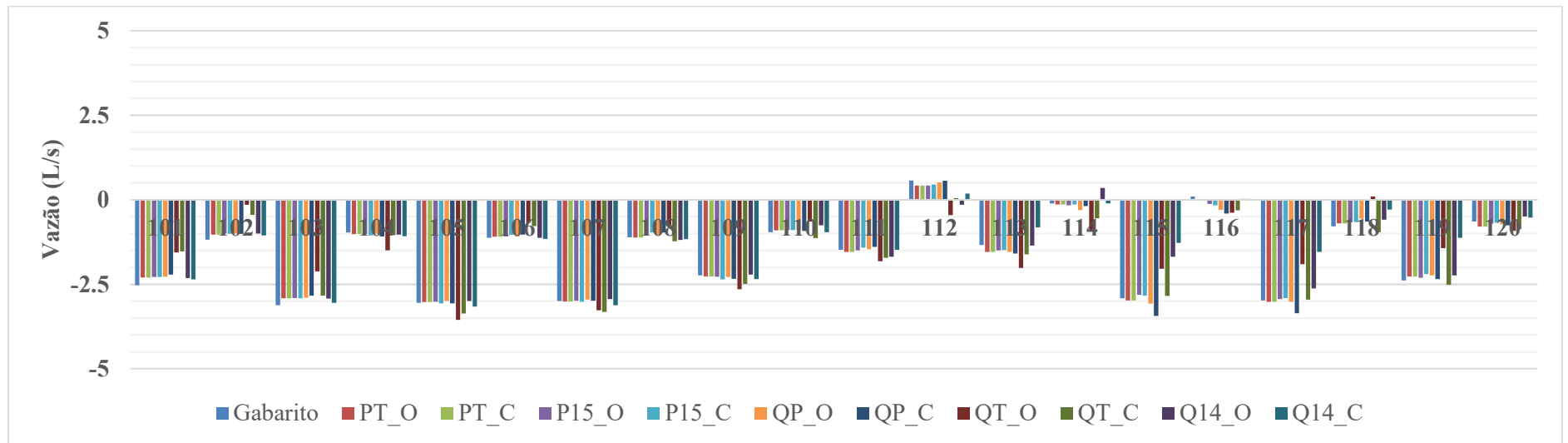
Fonte: Elaborado pelo autor



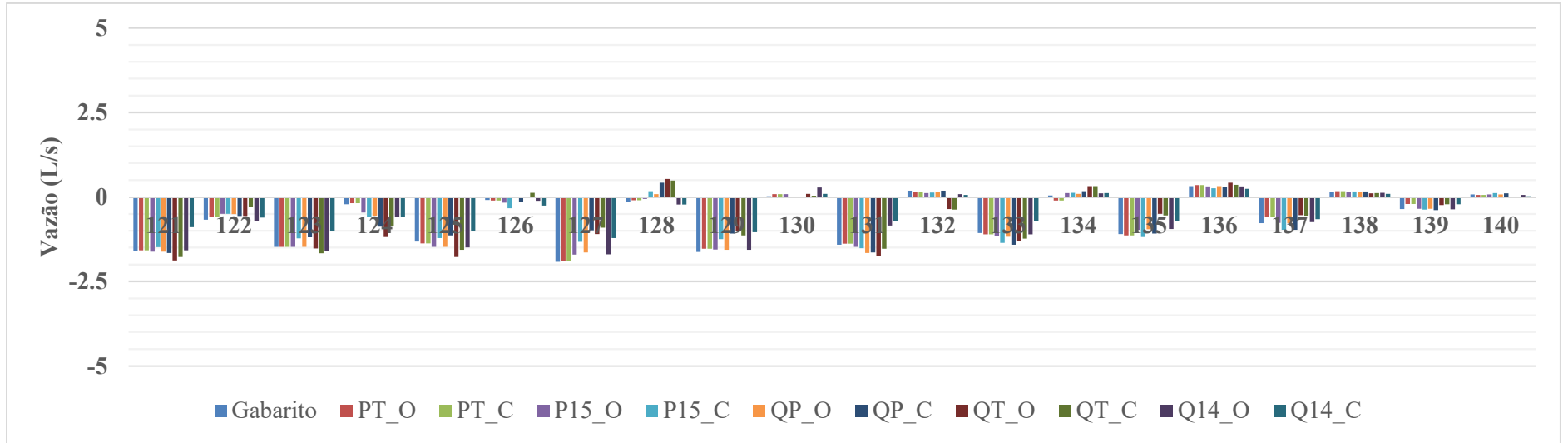
Fonte: Elaborado pelo autor



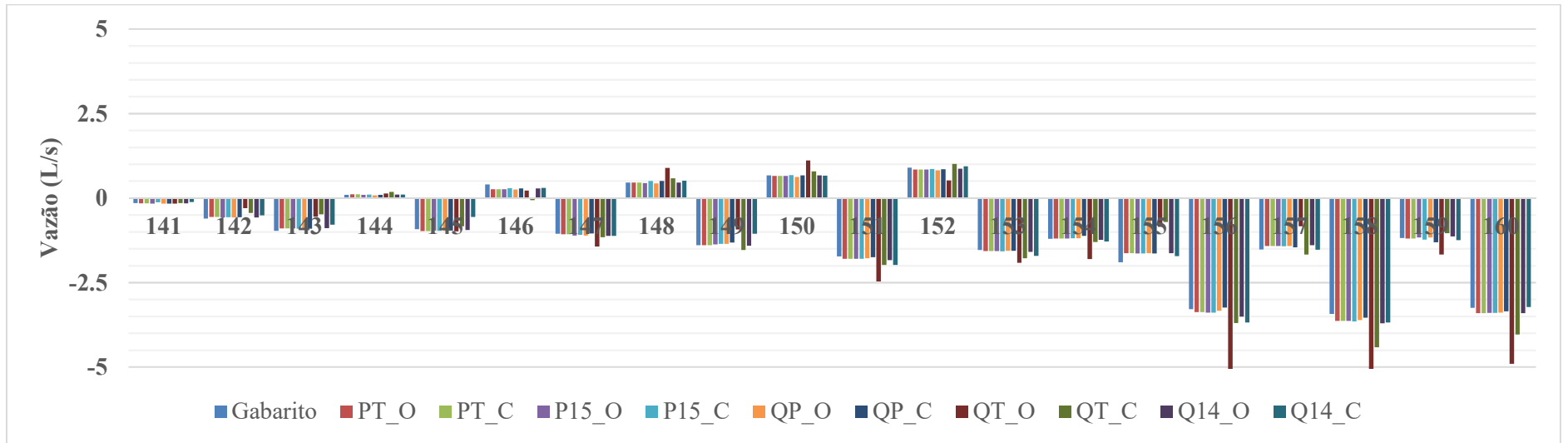
Fonte: Elaborado pelo autor



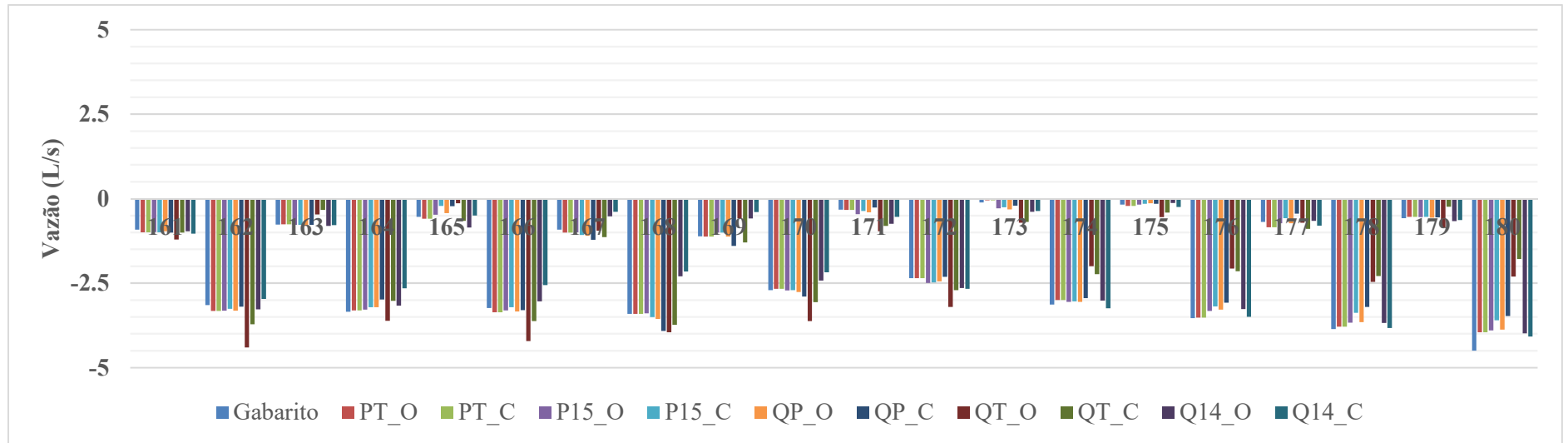
Fonte: Elaborado pelo autor



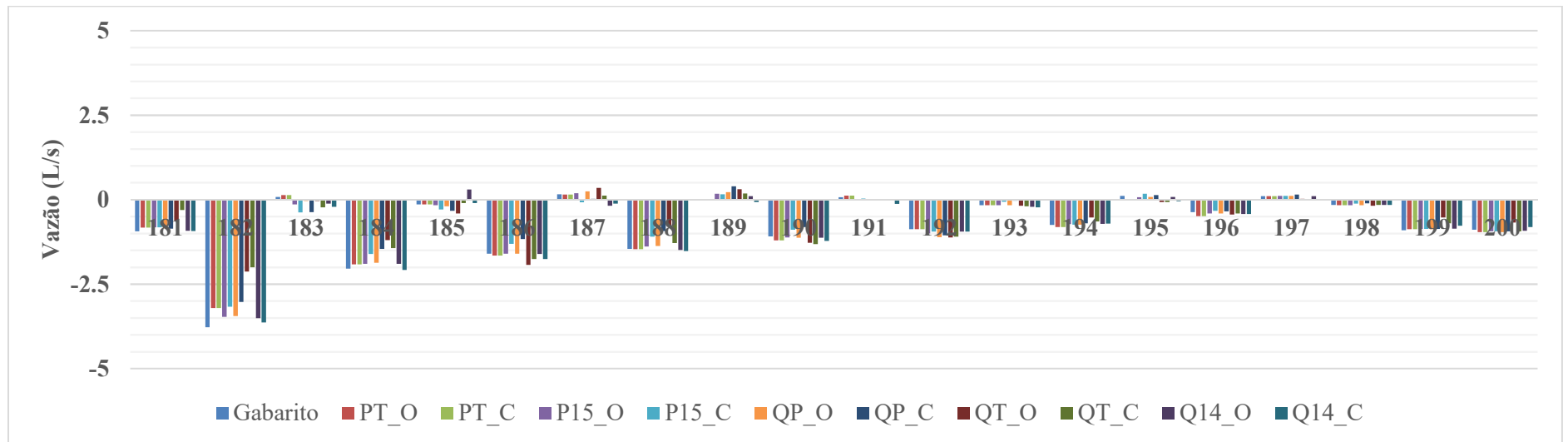
Fonte: Elaborado pelo autor



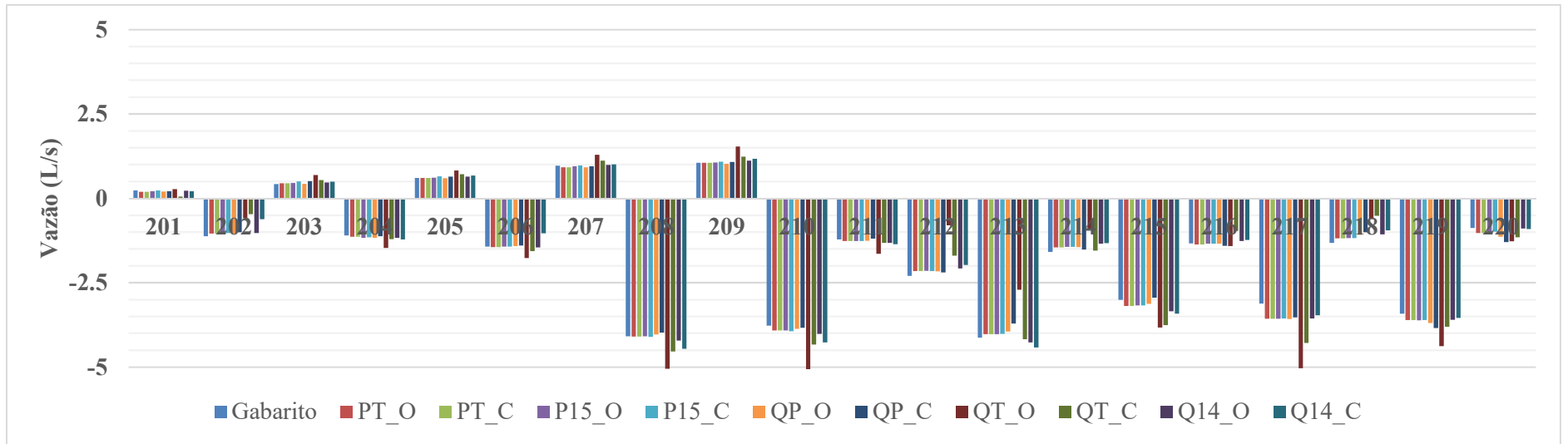
Fonte: Elaborado pelo autor



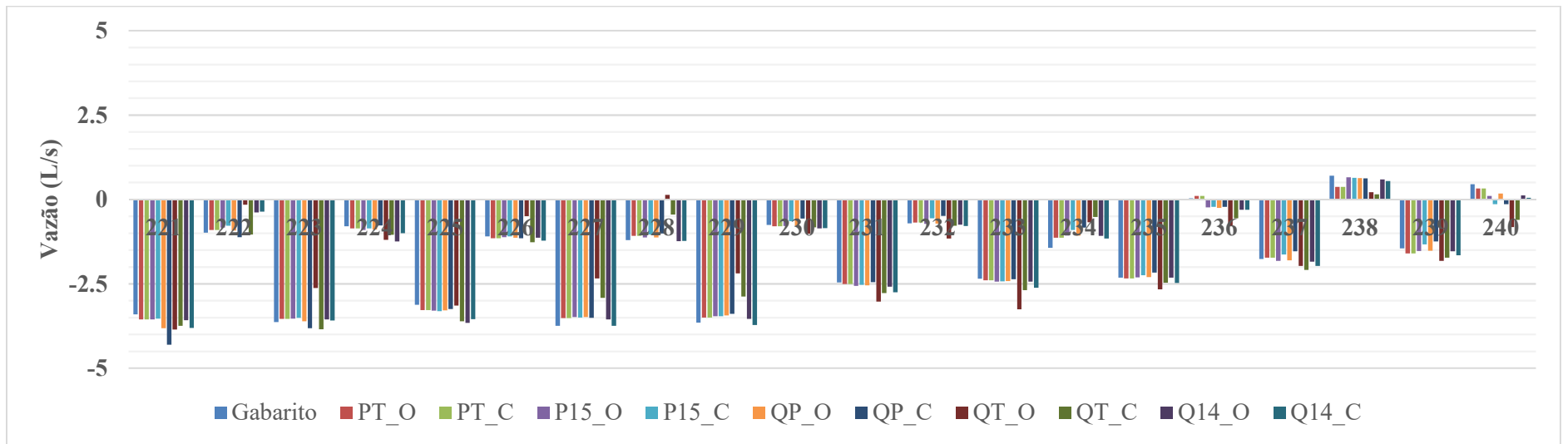
Fonte: Elaborado pelo autor



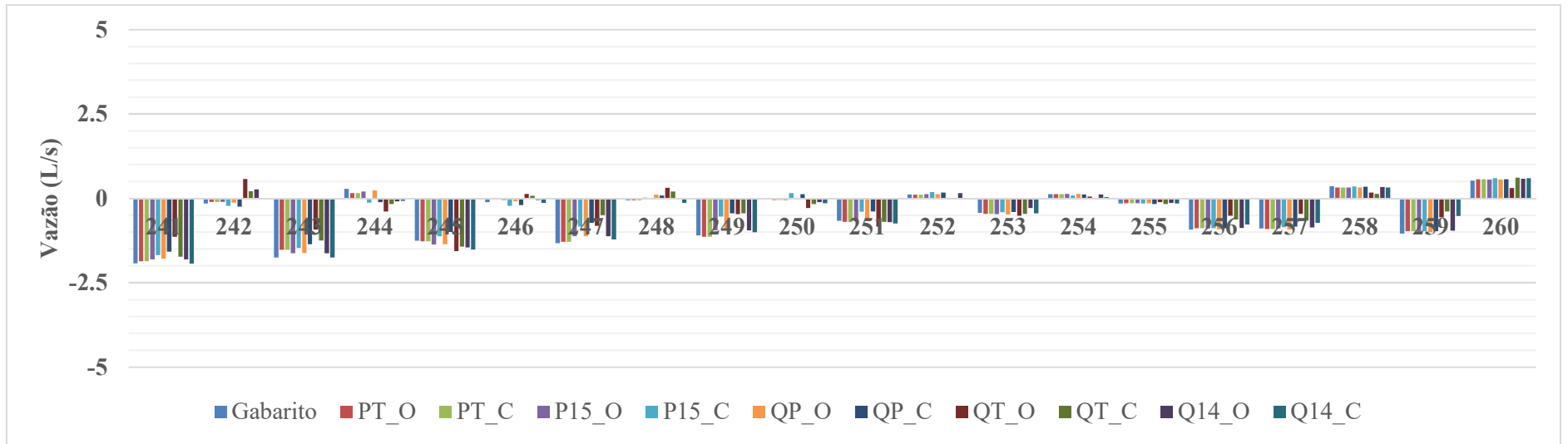
Fonte: Elaborado pelo autor



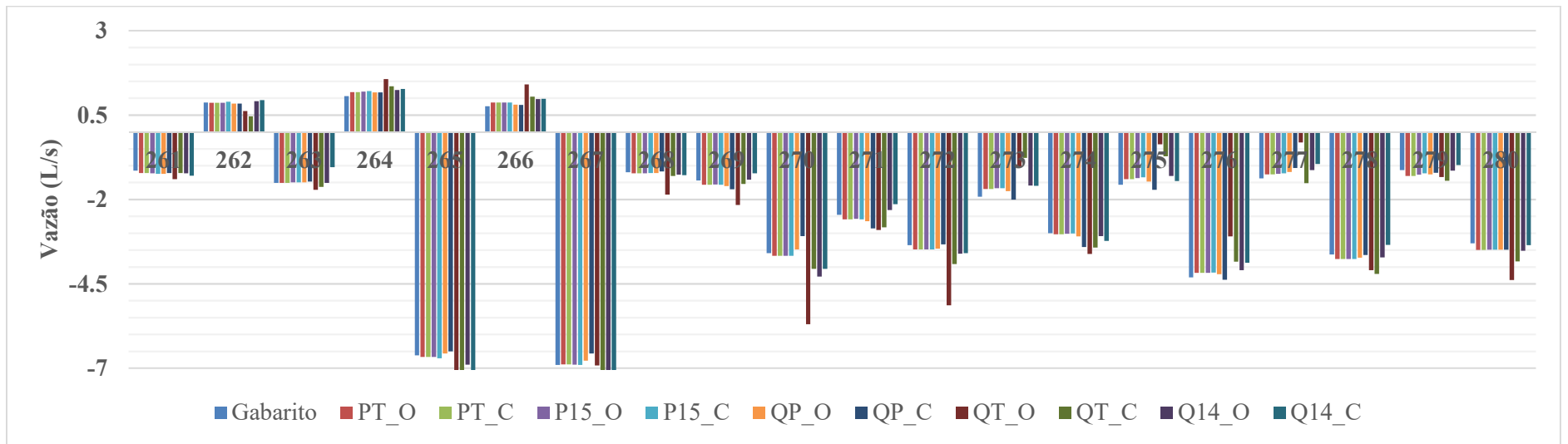
Fonte: Elaborado pelo autor



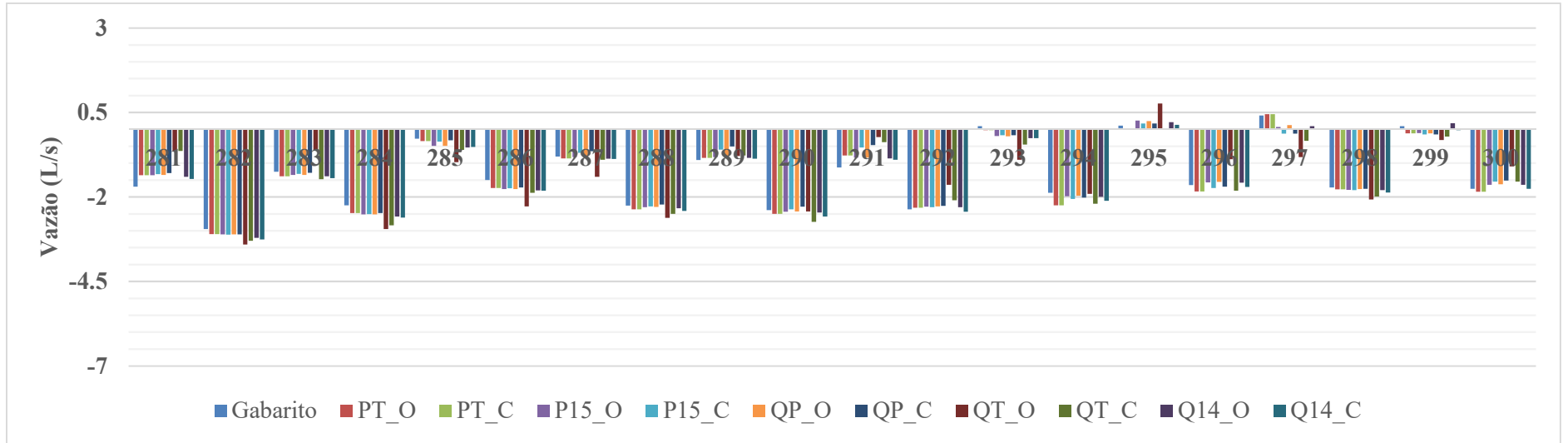
Fonte: Elaborado pelo autor



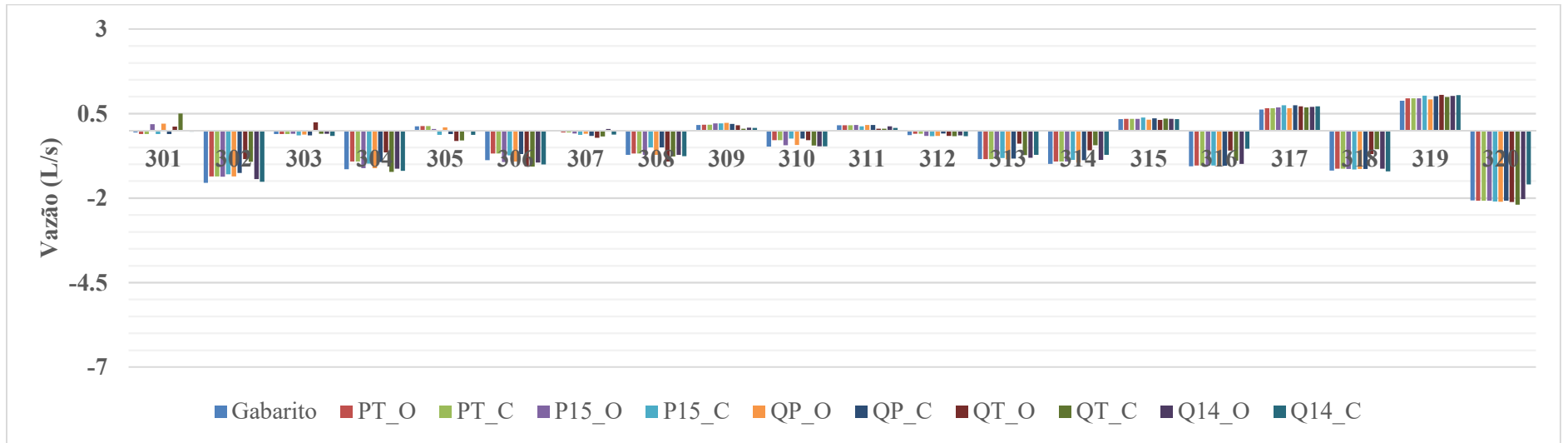
Fonte: Elaborado pelo autor



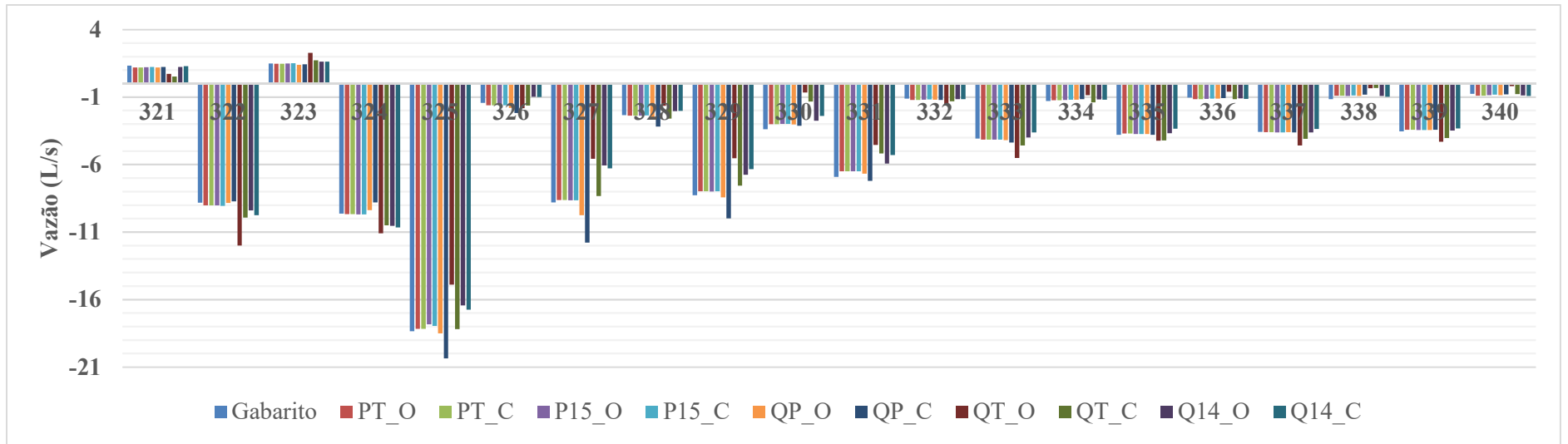
Fonte: Elaborado pelo autor



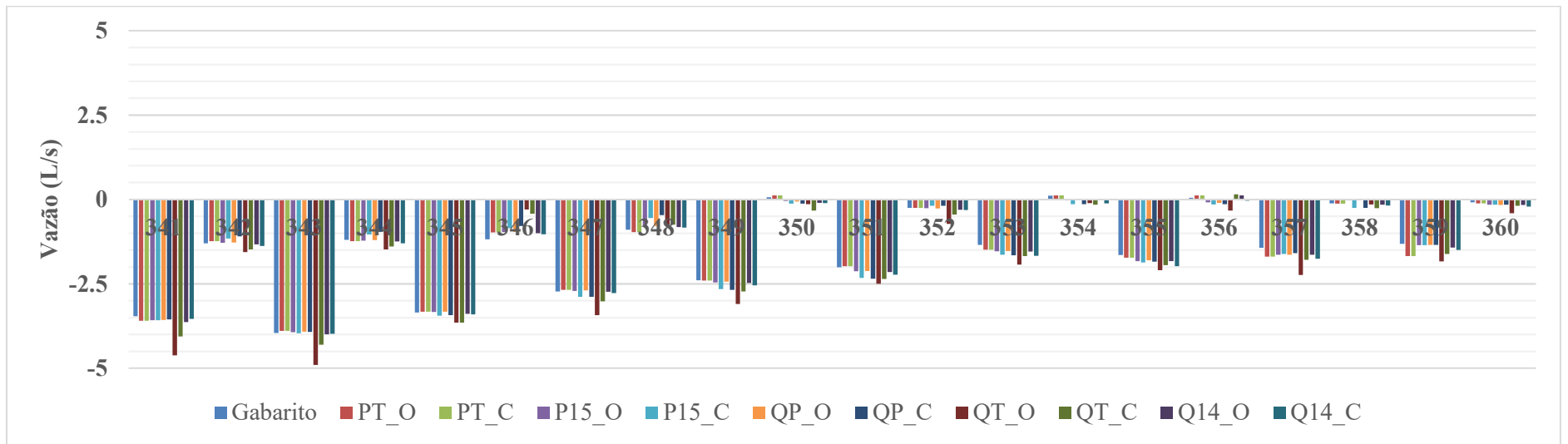
Fonte: Elaborado pelo autor



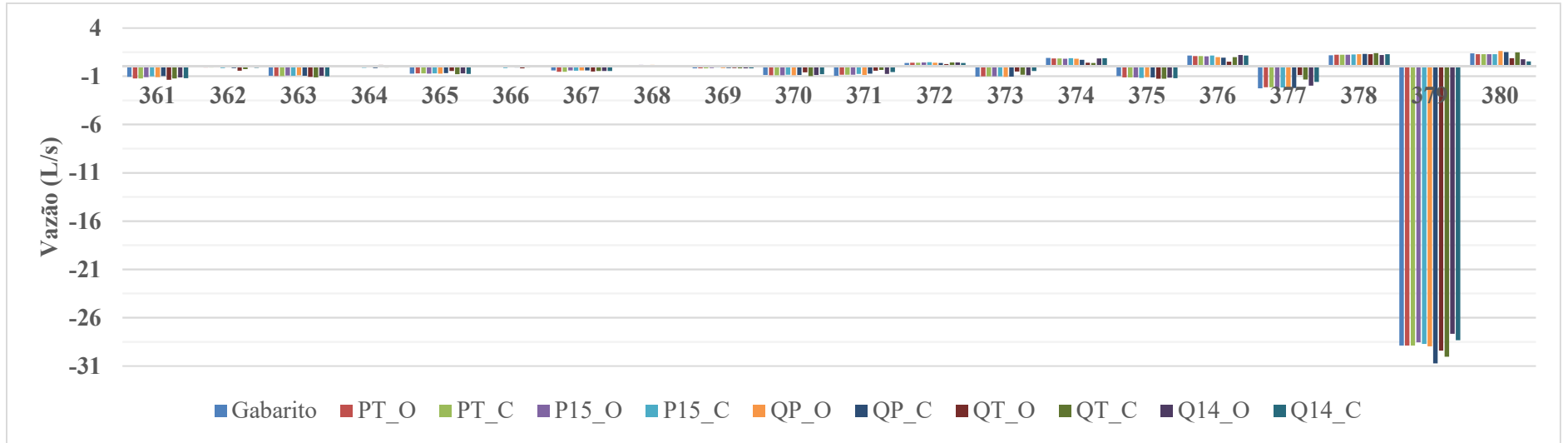
Fonte: Elaborado pelo autor



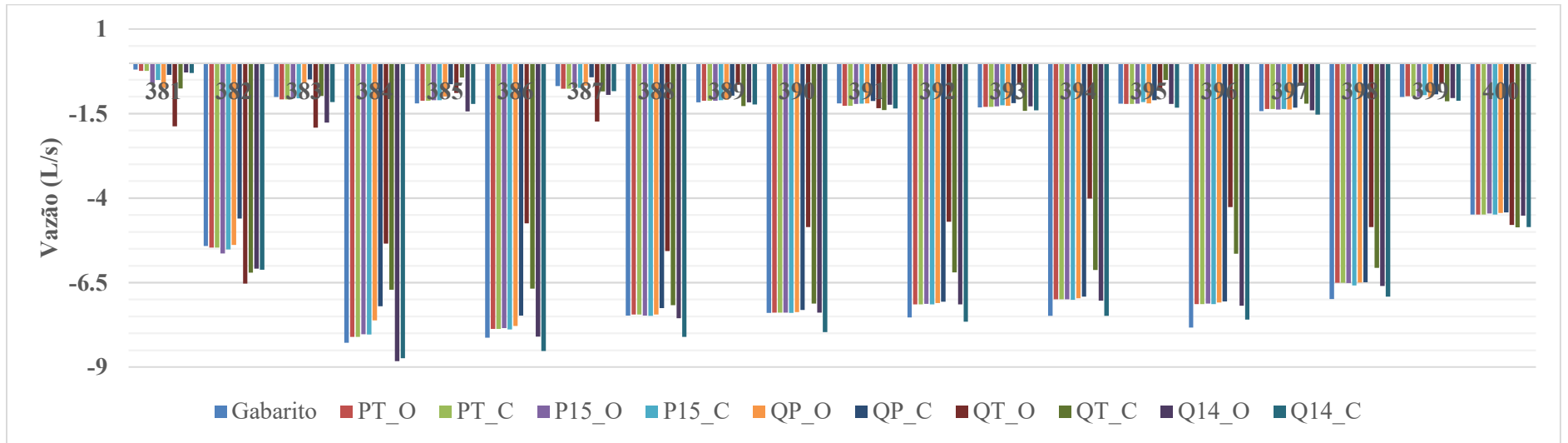
Fonte: Elaborado pelo autor



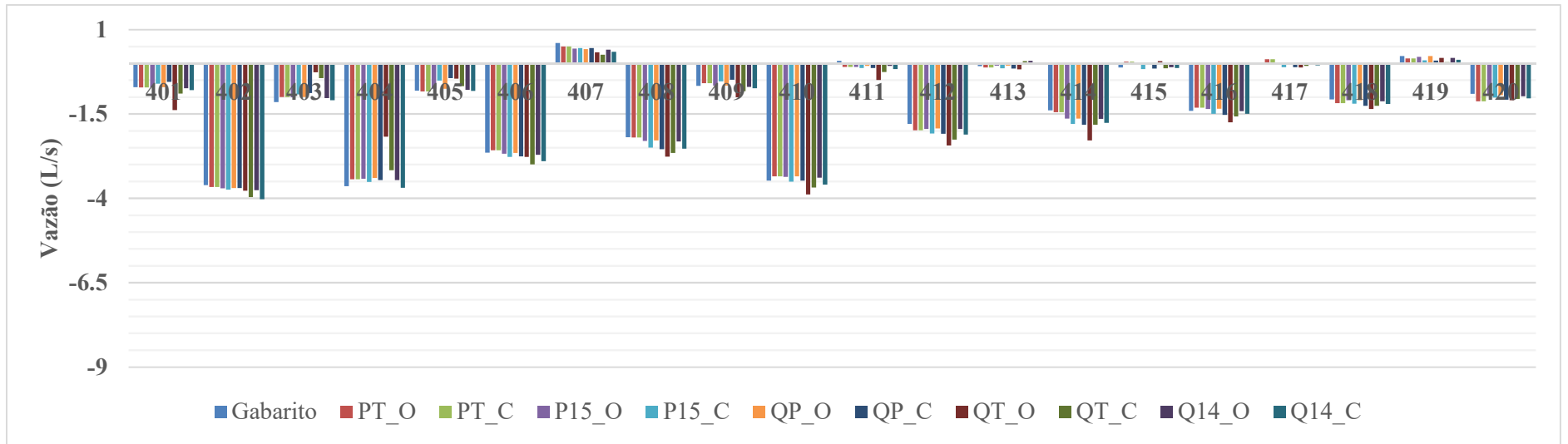
Fonte: Elaborado pelo autor



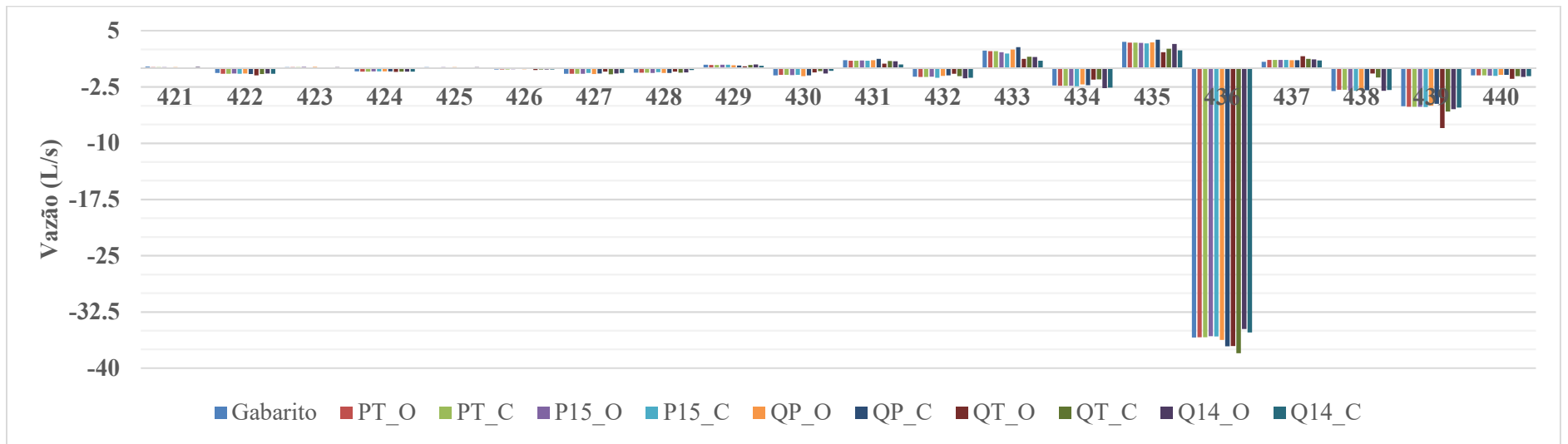
Fonte: Elaborado pelo autor



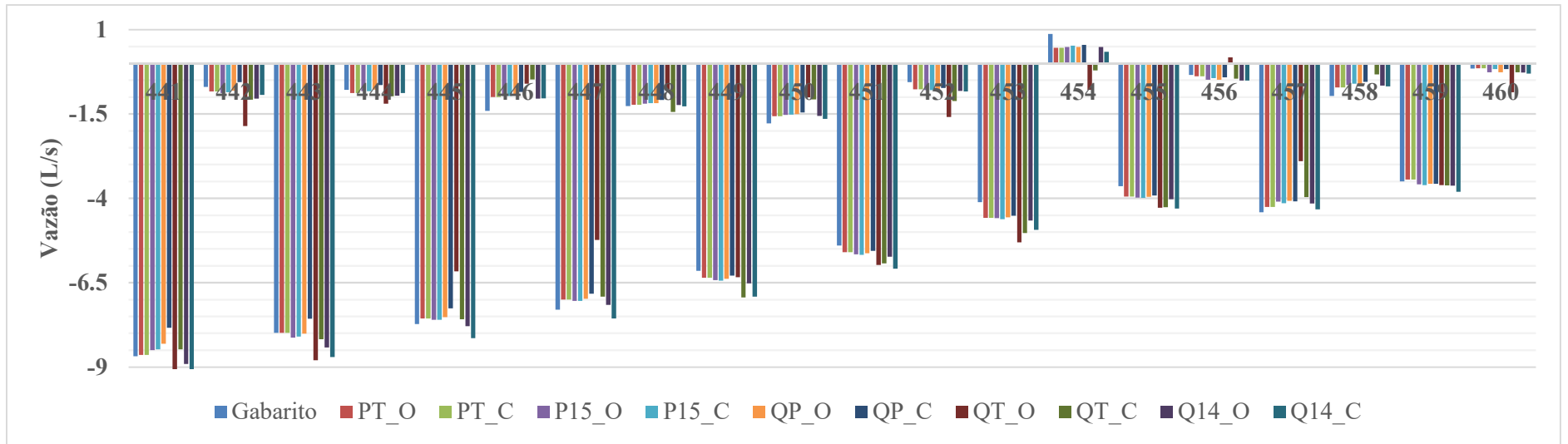
Fonte: Elaborado pelo autor



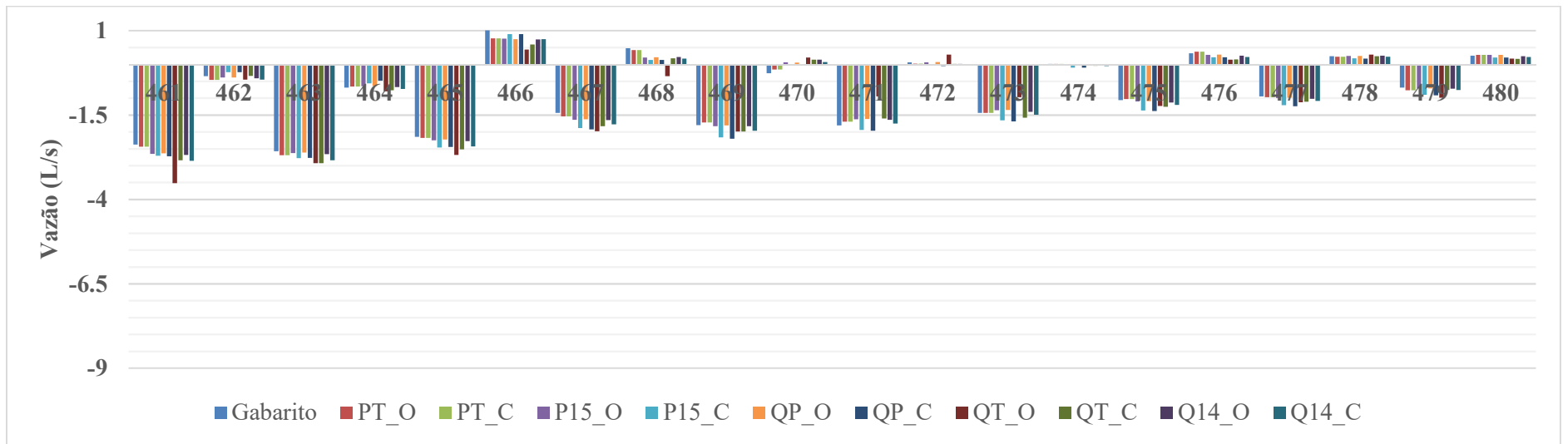
Fonte: Elaborado pelo autor



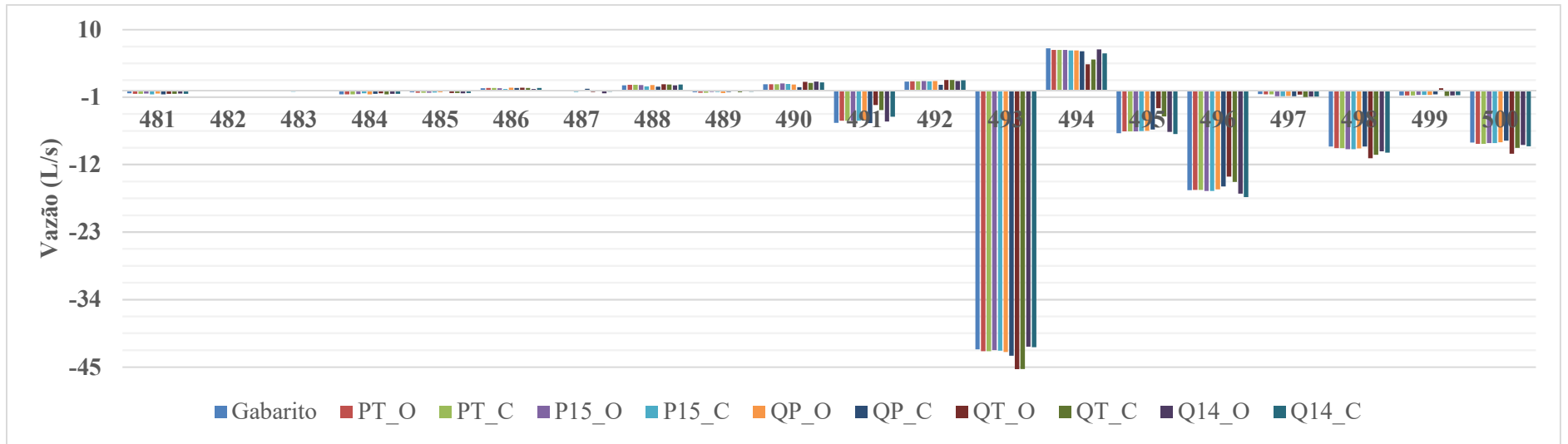
Fonte: Elaborado pelo autor



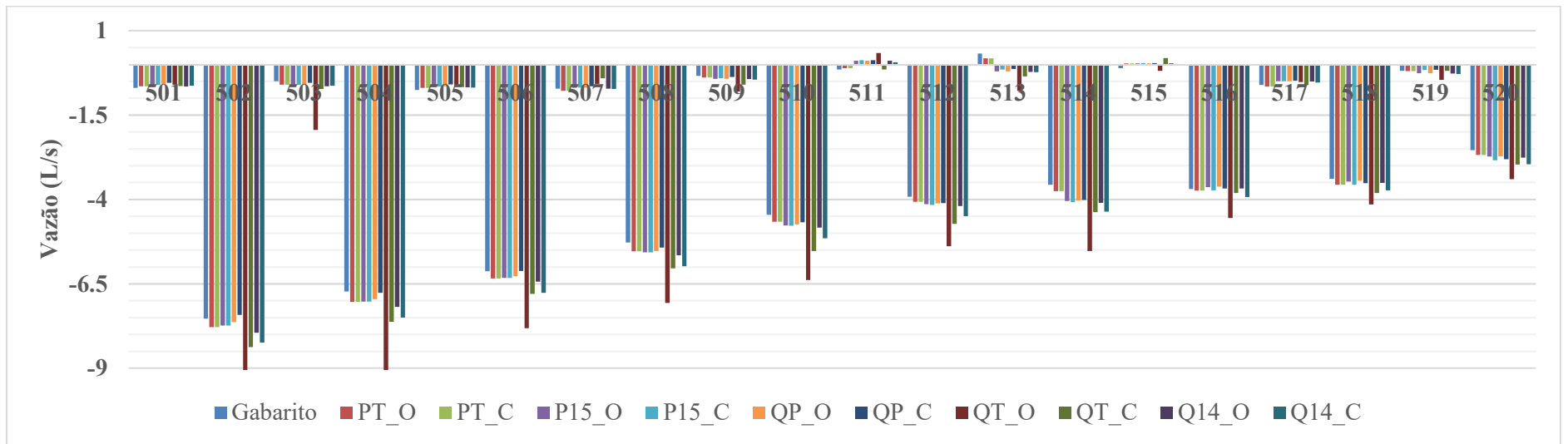
Fonte: Elaborado pelo autor



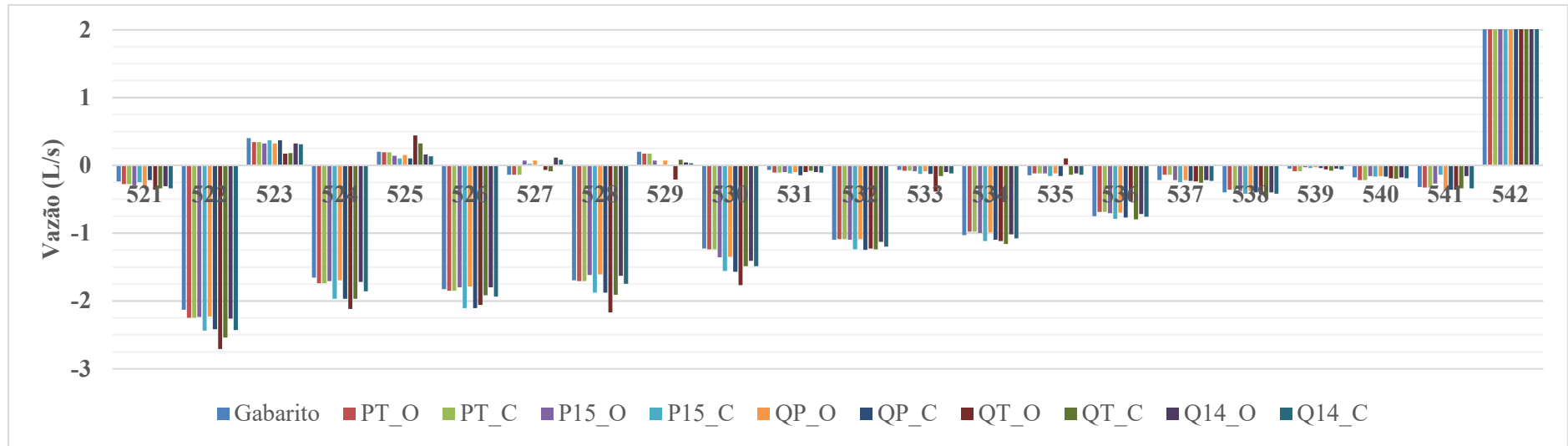
Fonte: Elaborado pelo autor



Fonte: Elaborado pelo autor

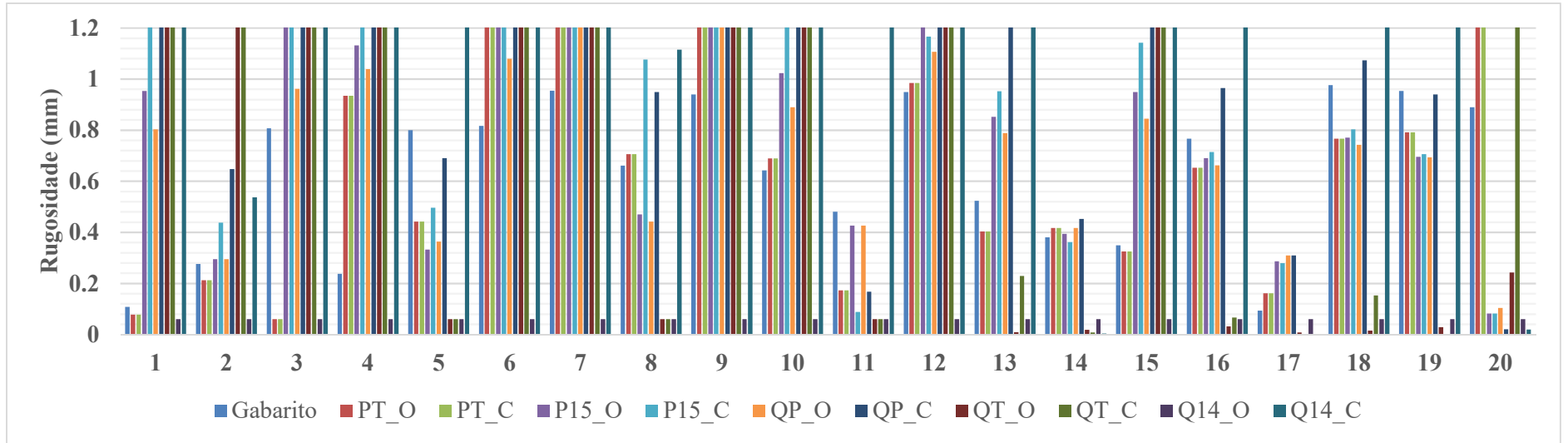


Fonte: Elaborado pelo autor

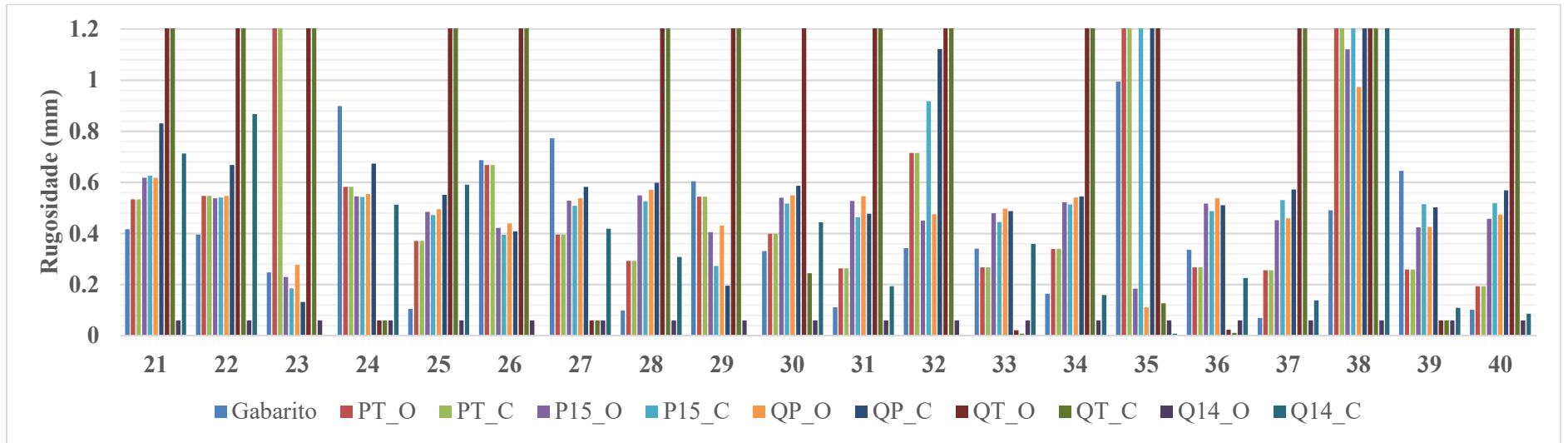


Fonte: Elaborado pelo autor

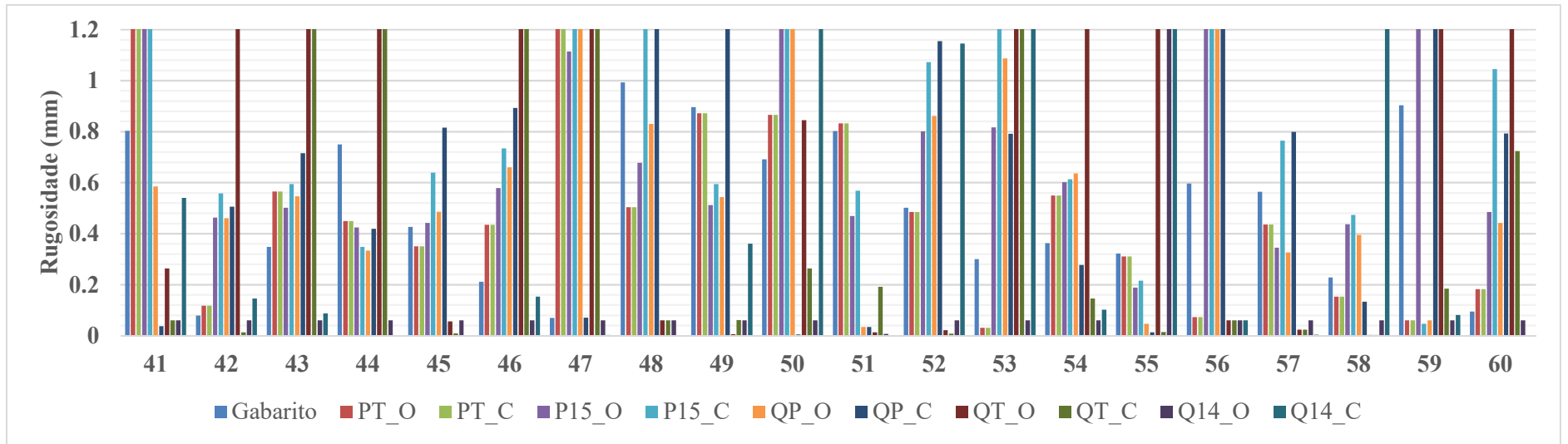
**APÊNDICE BV – Rugosidades absolutas encontradas na Calibração do fator de atrito
com rugosidade absoluta inicial de 0,06 mm: rede MIGHA**



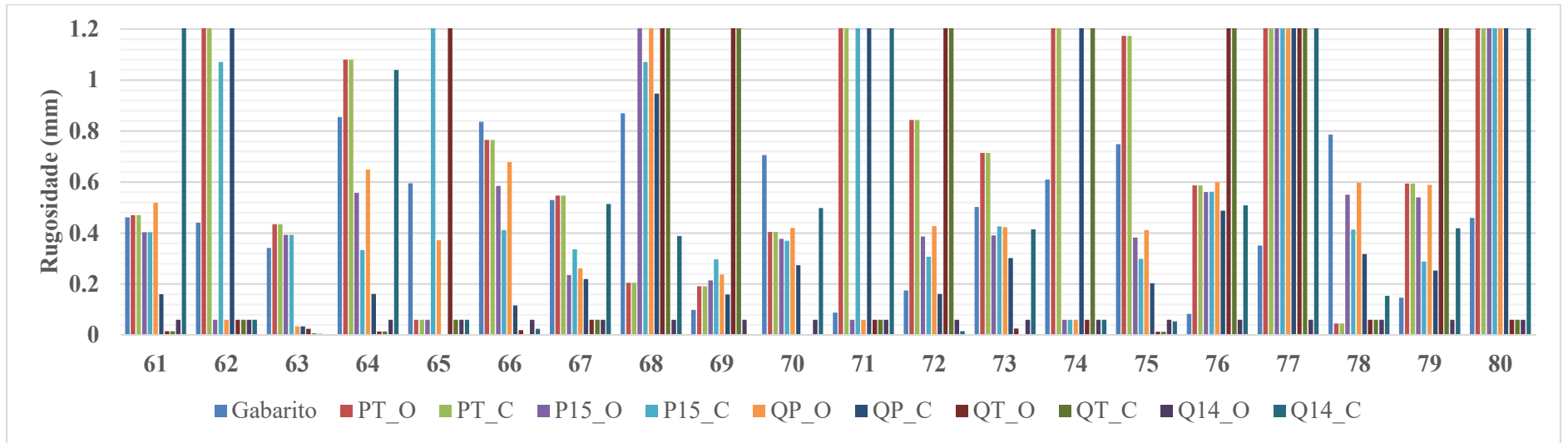
Fonte: Elaborado pelo autor



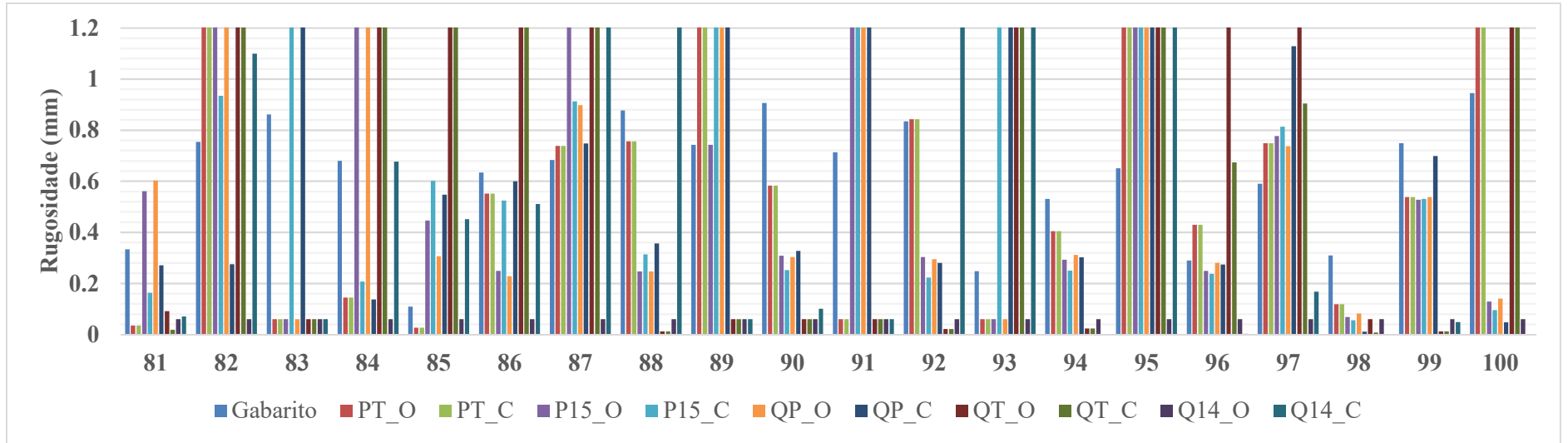
Fonte: Elaborado pelo autor



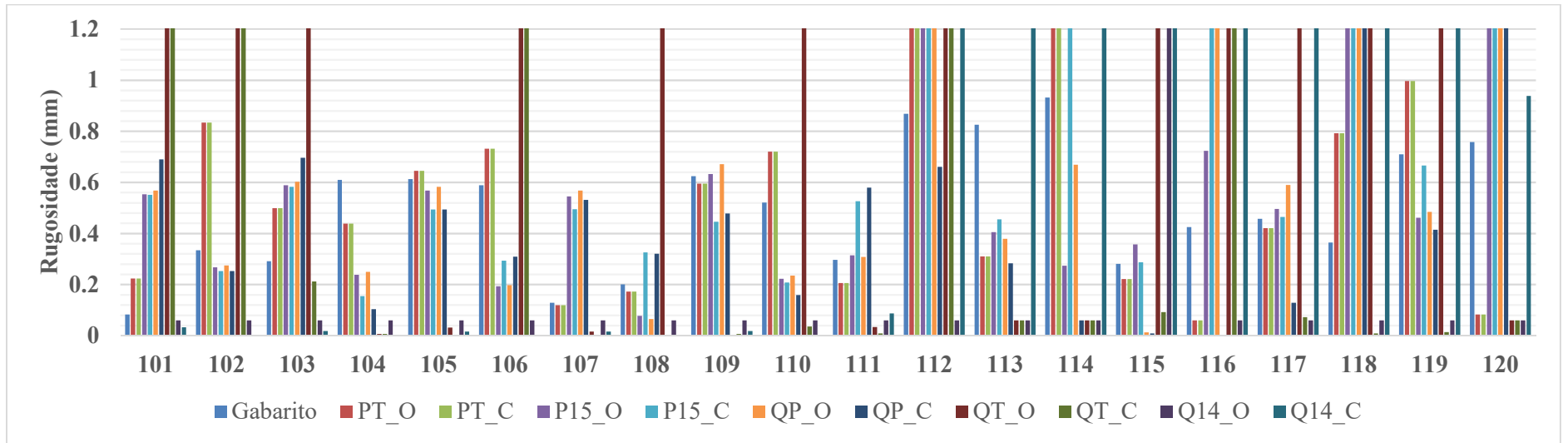
Fonte: Elaborado pelo autor



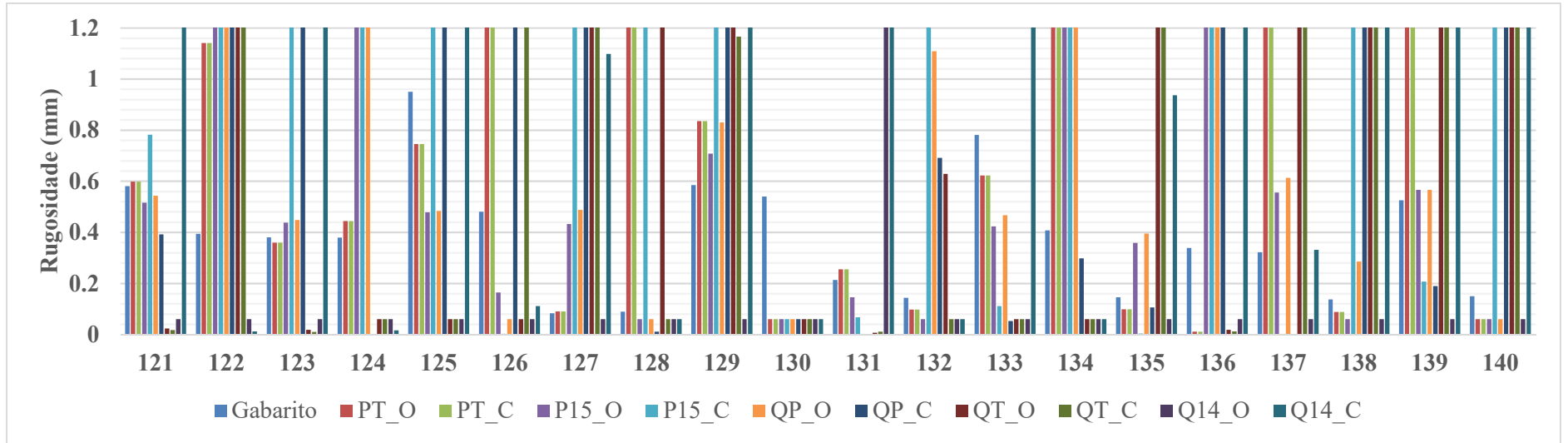
Fonte: Elaborado pelo autor



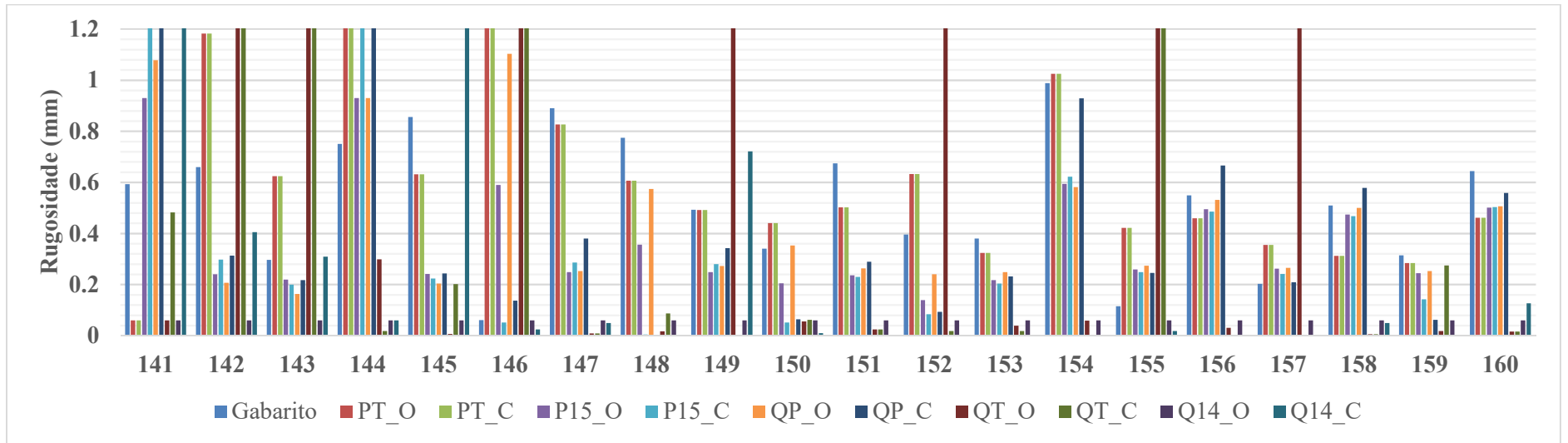
Fonte: Elaborado pelo autor



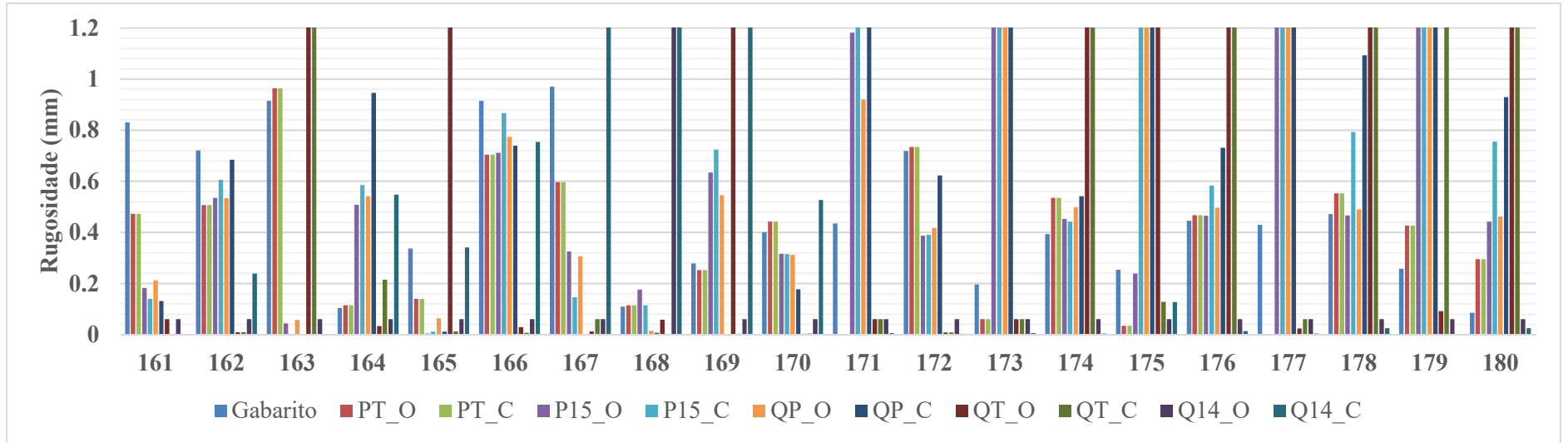
Fonte: Elaborado pelo autor



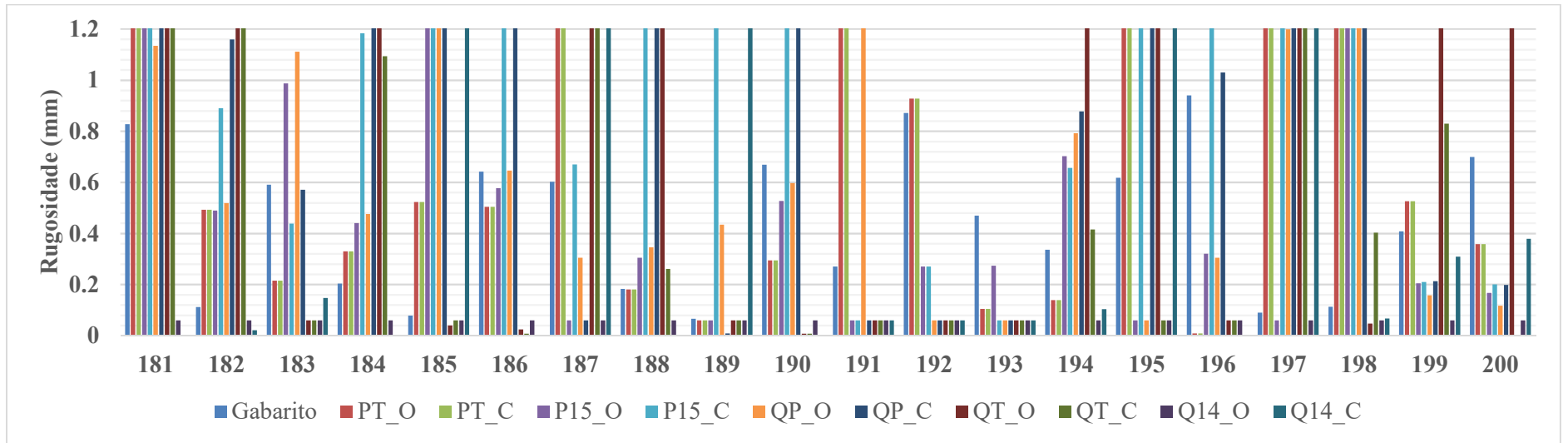
Fonte: Elaborado pelo autor



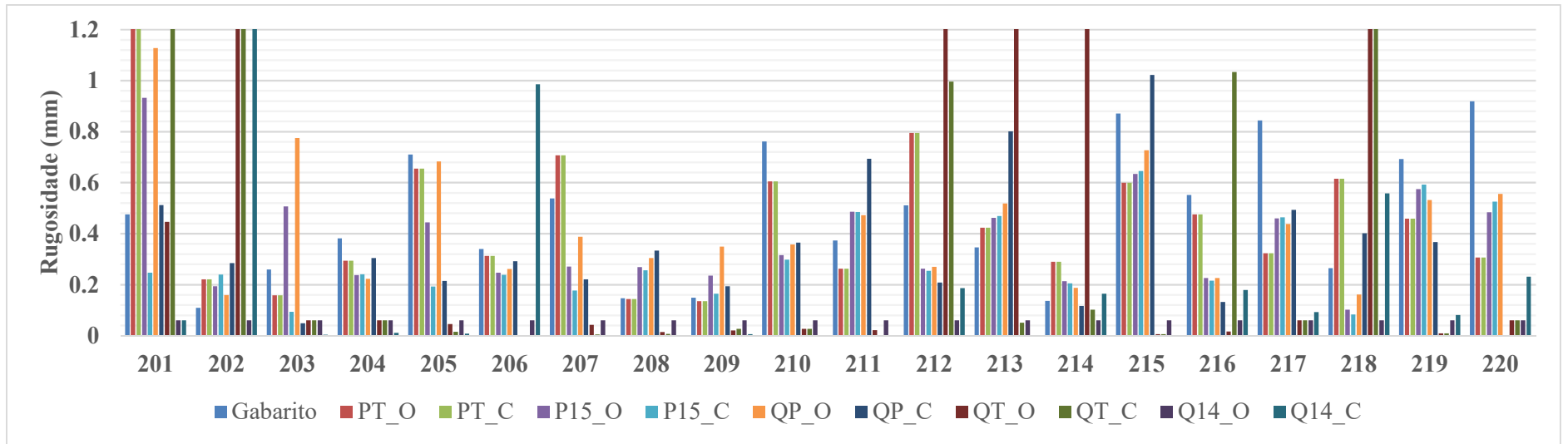
Fonte: Elaborado pelo autor



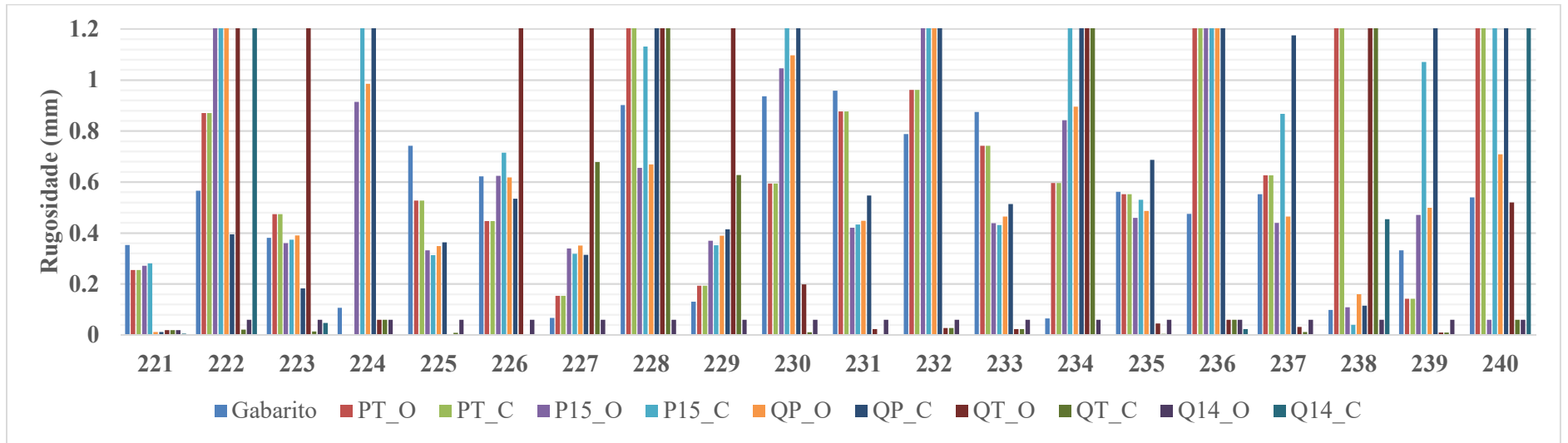
Fonte: Elaborado pelo autor



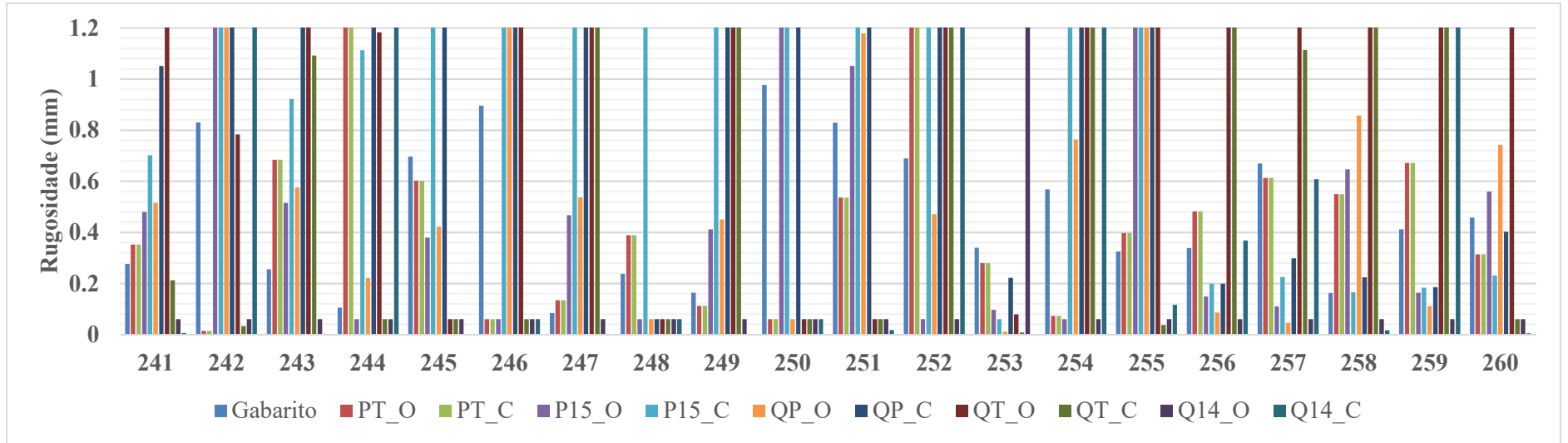
Fonte: Elaborado pelo autor



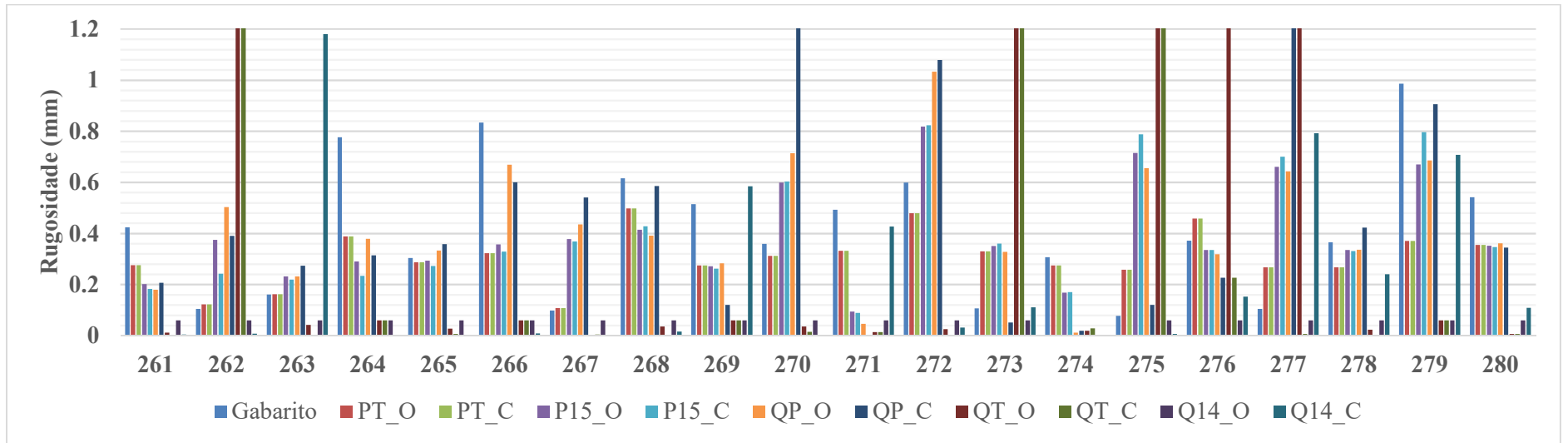
Fonte: Elaborado pelo autor



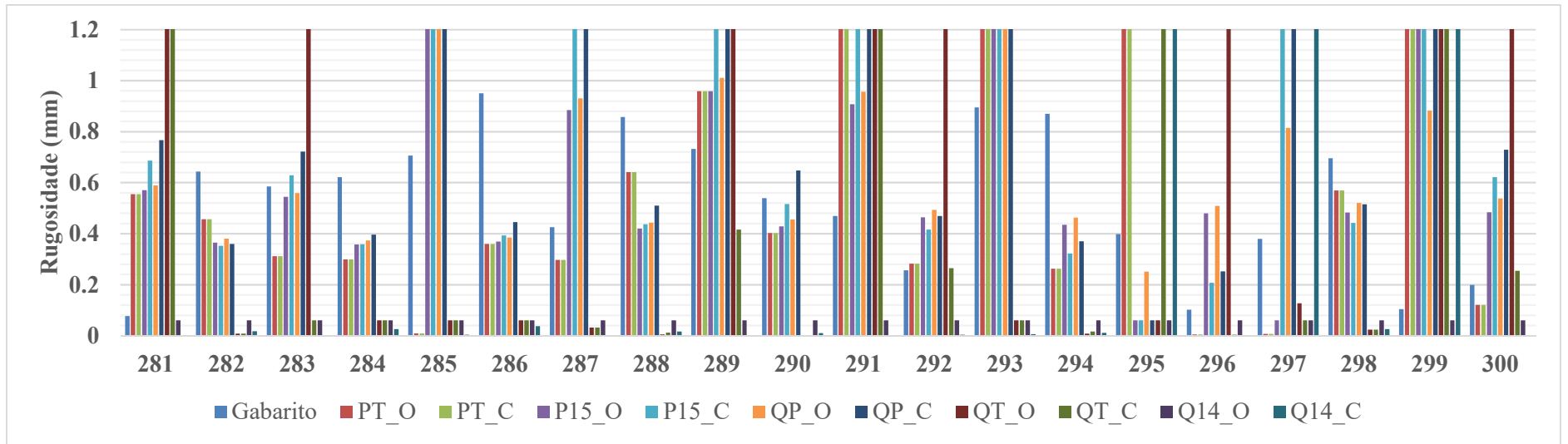
Fonte: Elaborado pelo autor



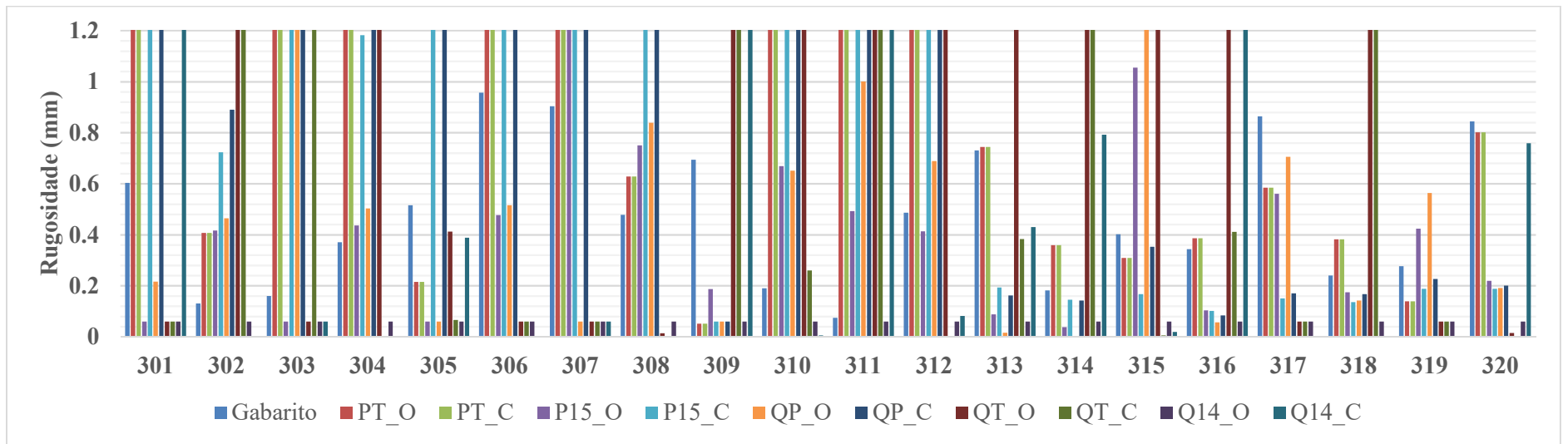
Fonte: Elaborado pelo autor



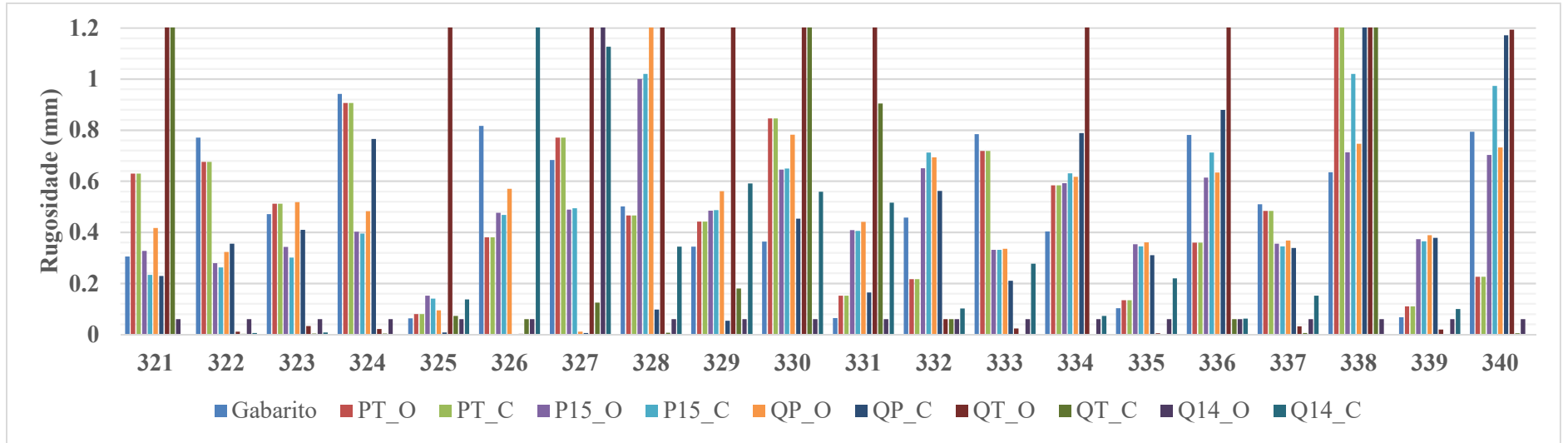
Fonte: Elaborado pelo autor



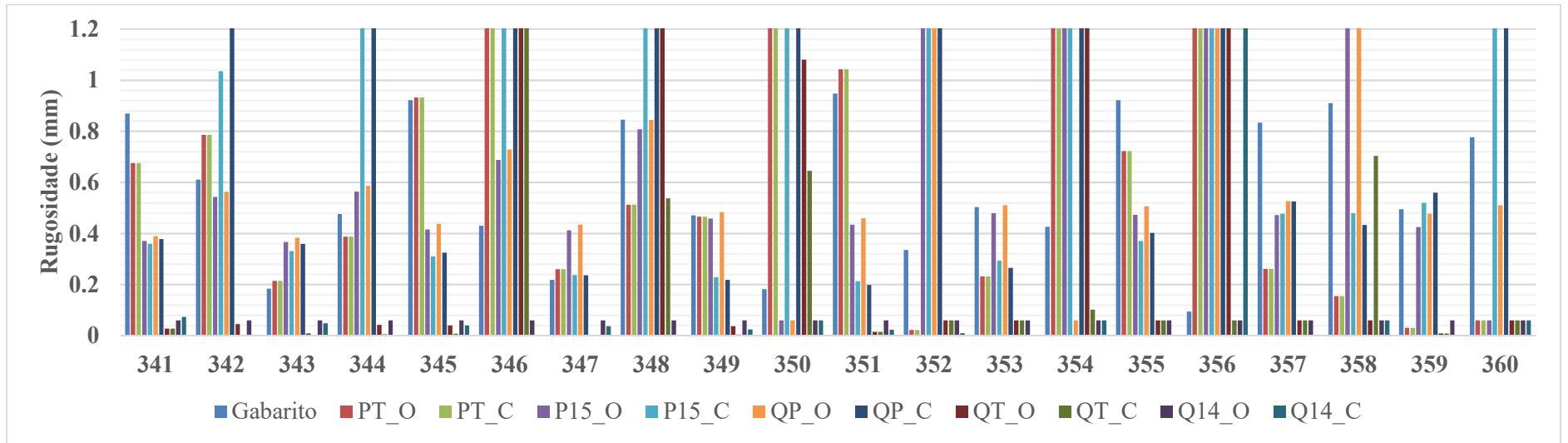
Fonte: Elaborado pelo autor



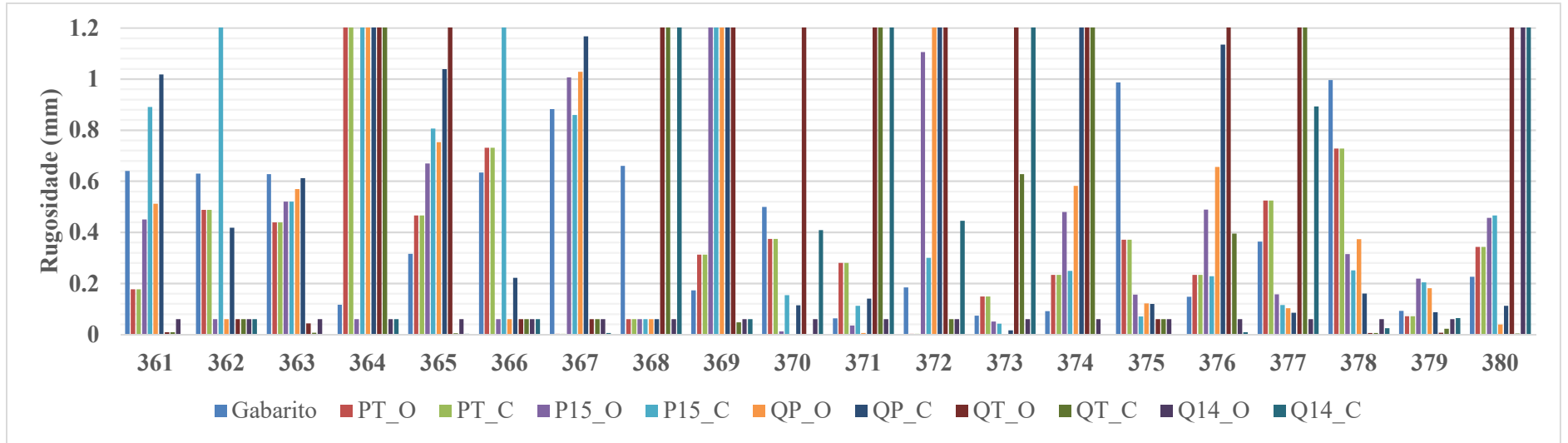
Fonte: Elaborado pelo autor



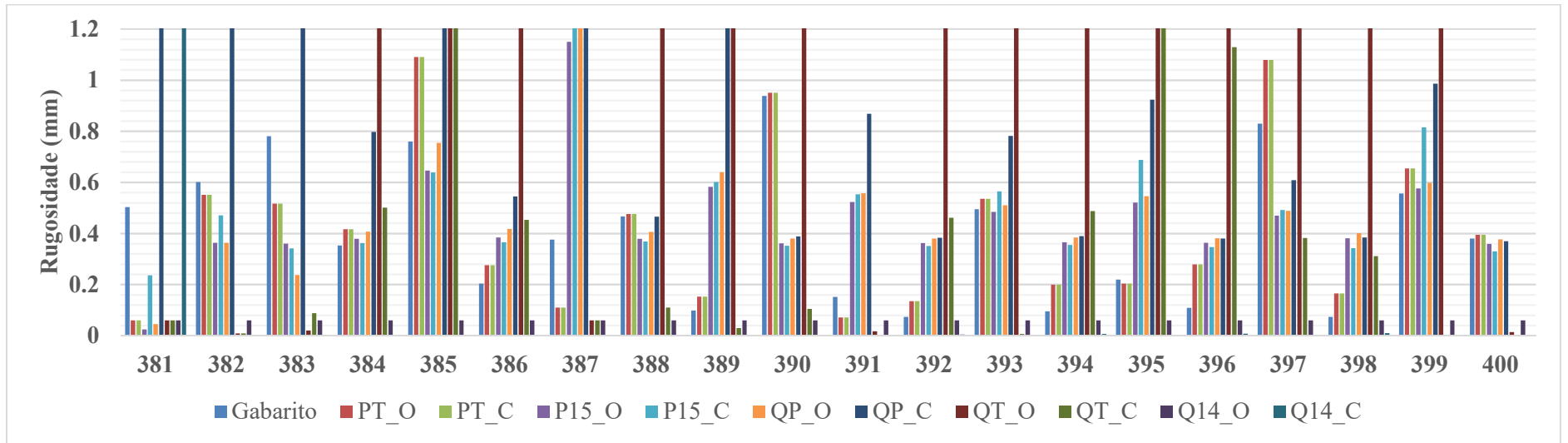
Fonte: Elaborado pelo autor



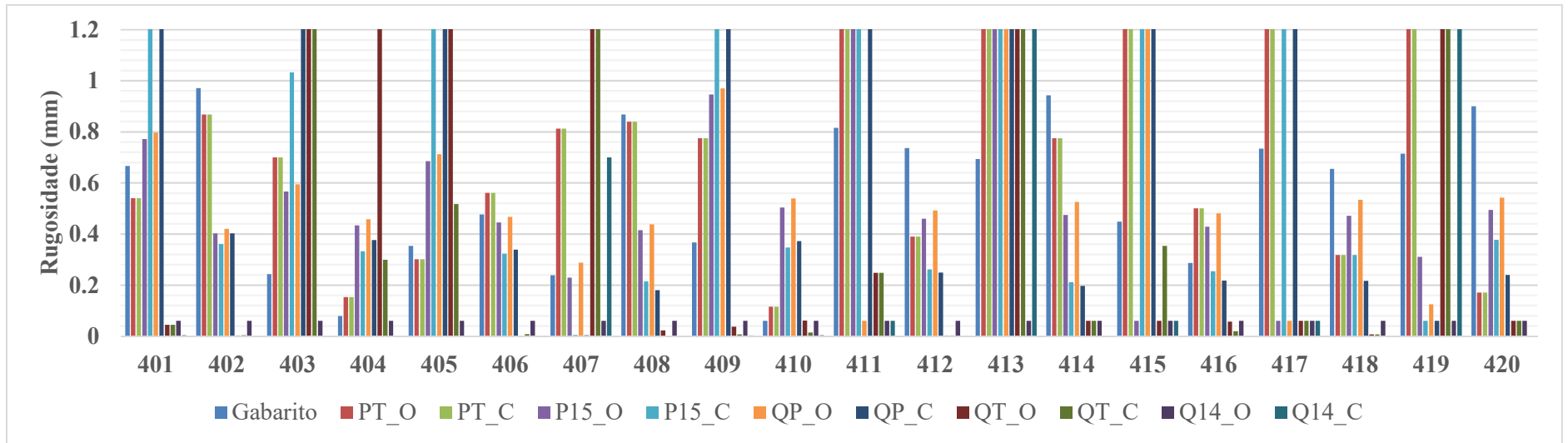
Fonte: Elaborado pelo autor



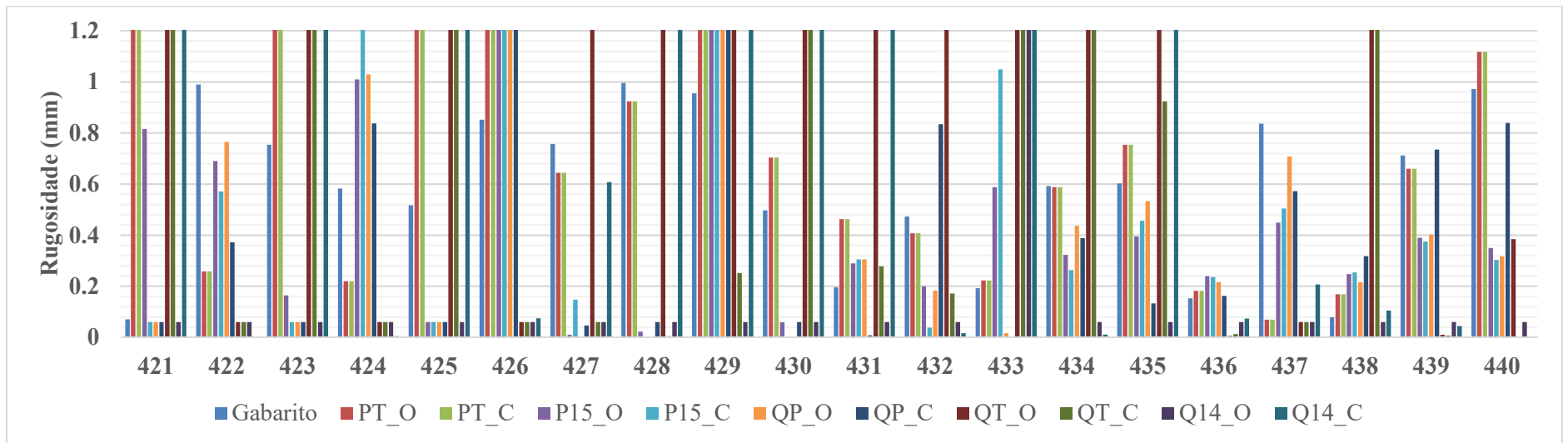
Fonte: Elaborado pelo autor



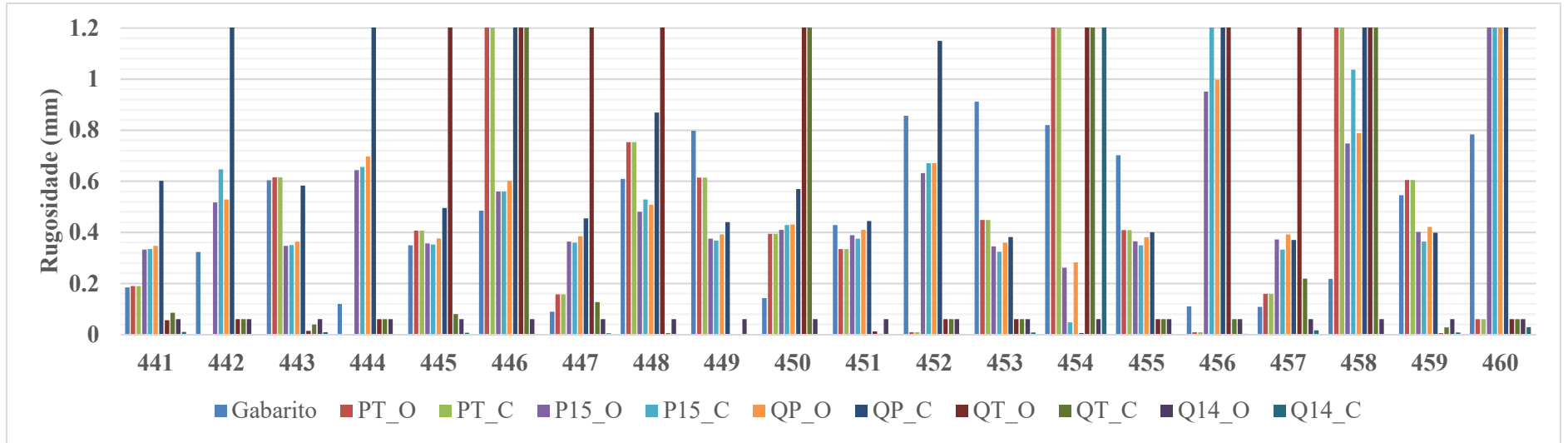
Fonte: Elaborado pelo autor



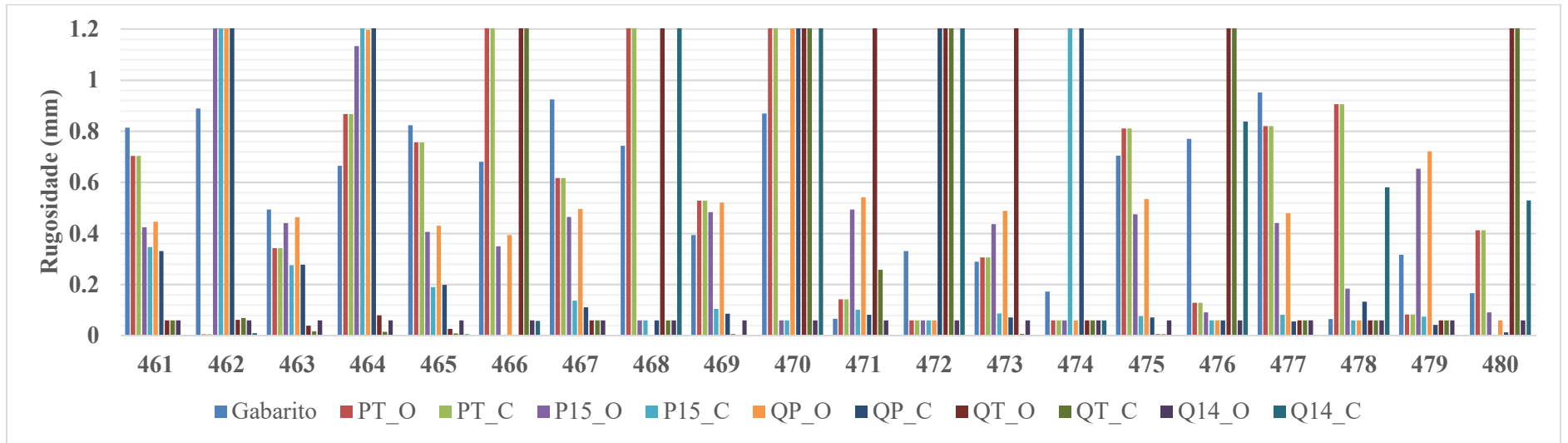
Fonte: Elaborado pelo autor



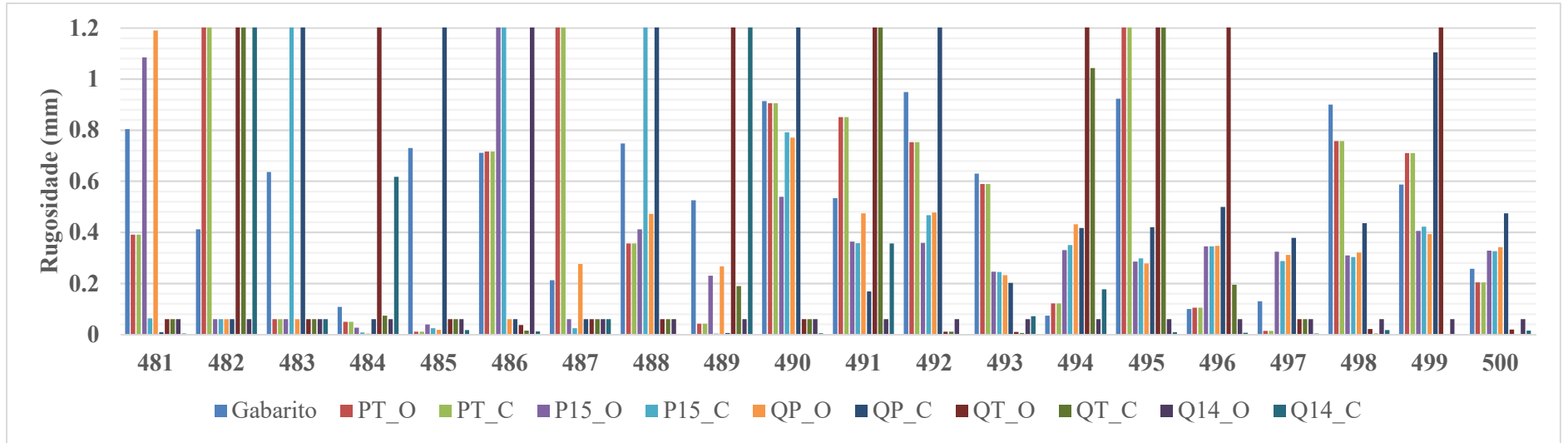
Fonte: Elaborado pelo autor



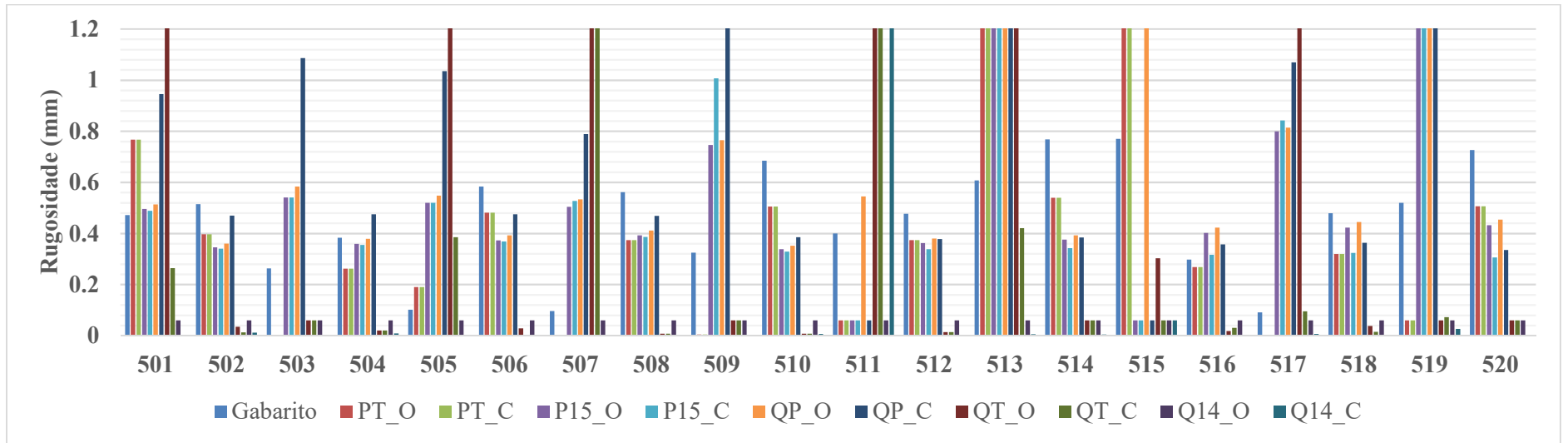
Fonte: Elaborado pelo autor



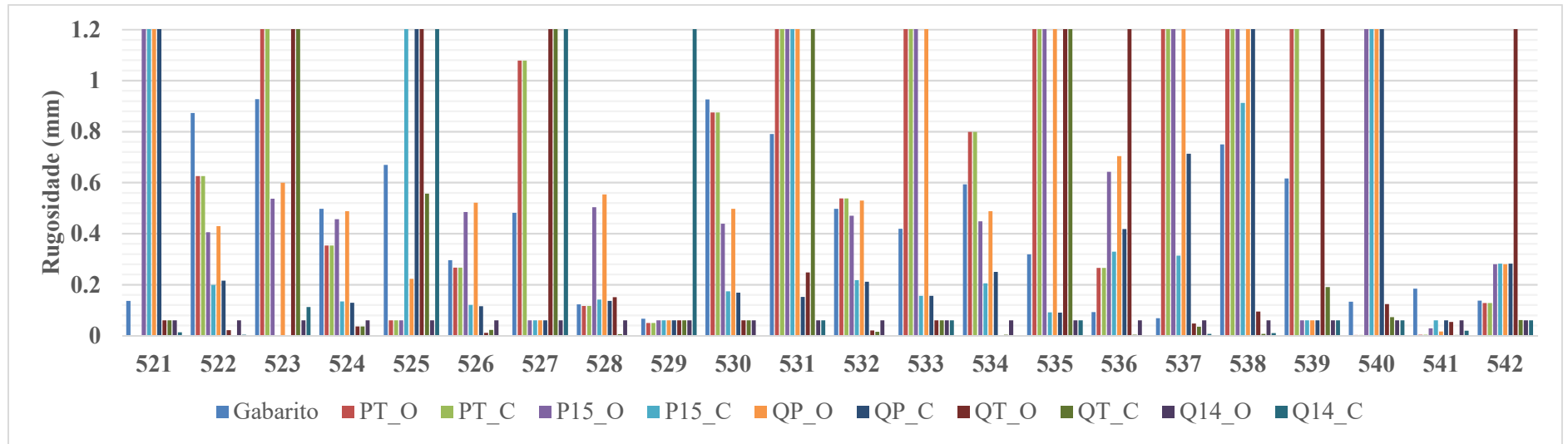
Fonte: Elaborado pelo autor



Fonte: Elaborado pelo autor

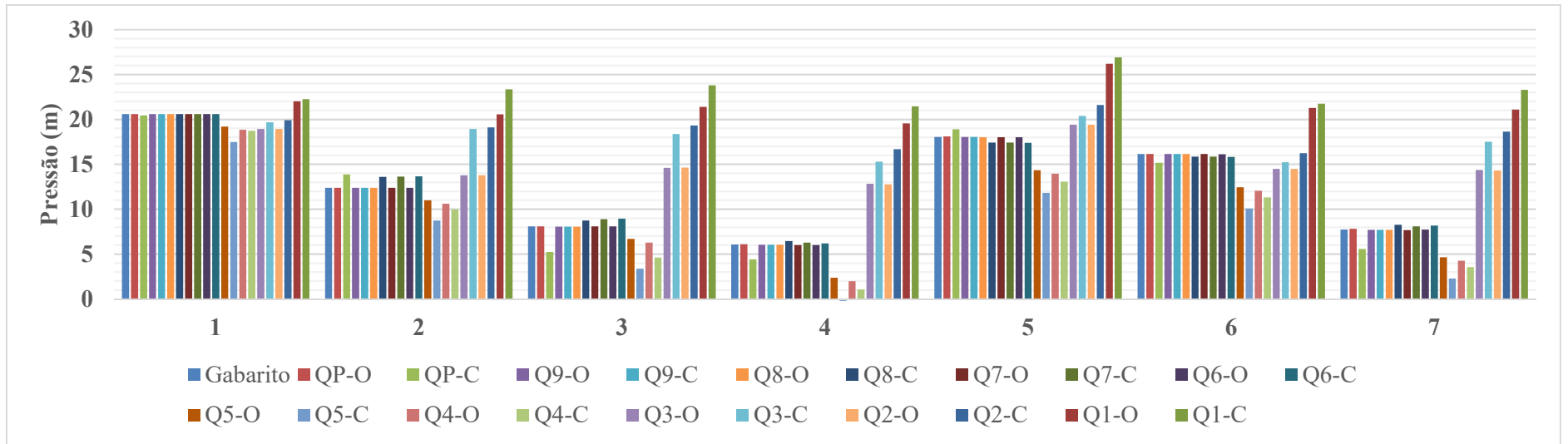


Fonte: Elaborado pelo autor

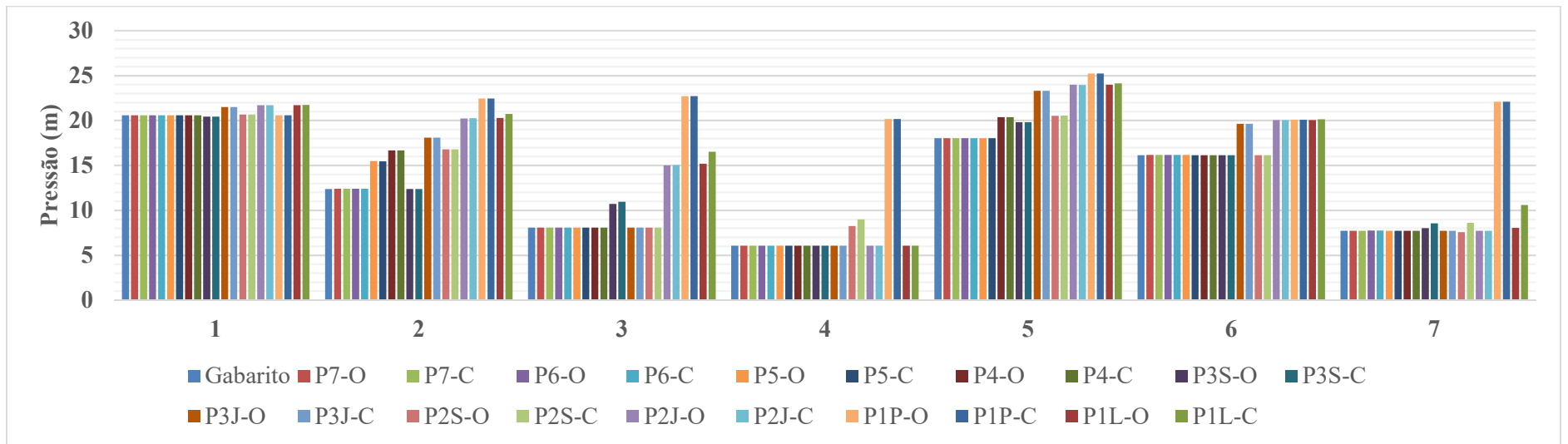


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE BW – Pressões encontradas na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Hazen-Williams com consumos nodais iniciais de 2 L/s: rede Porto (2006)

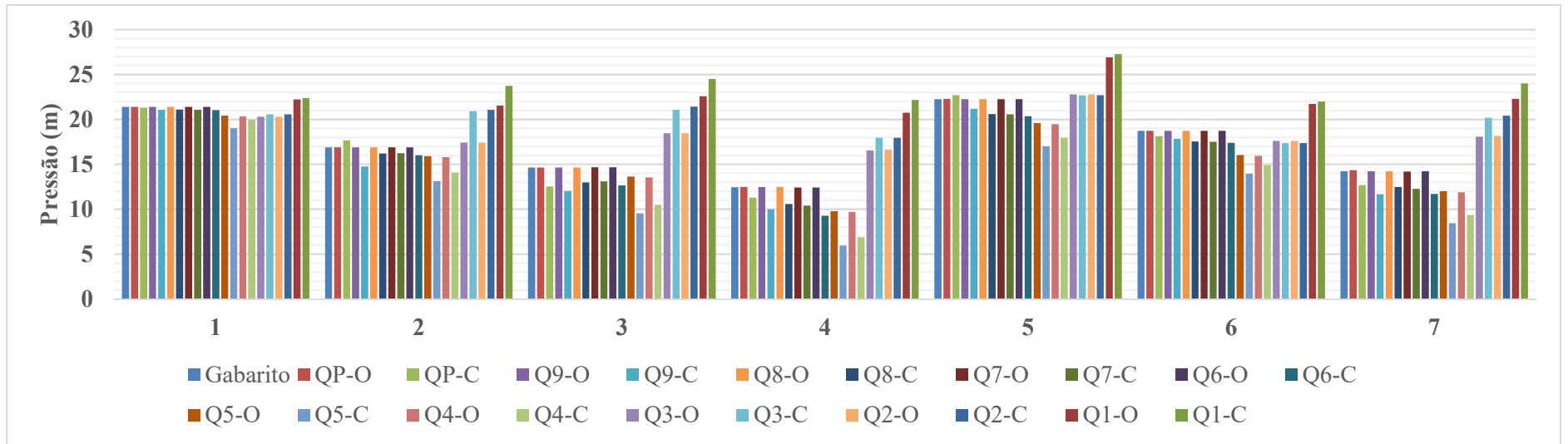


Fonte: Elaborado pelo autor

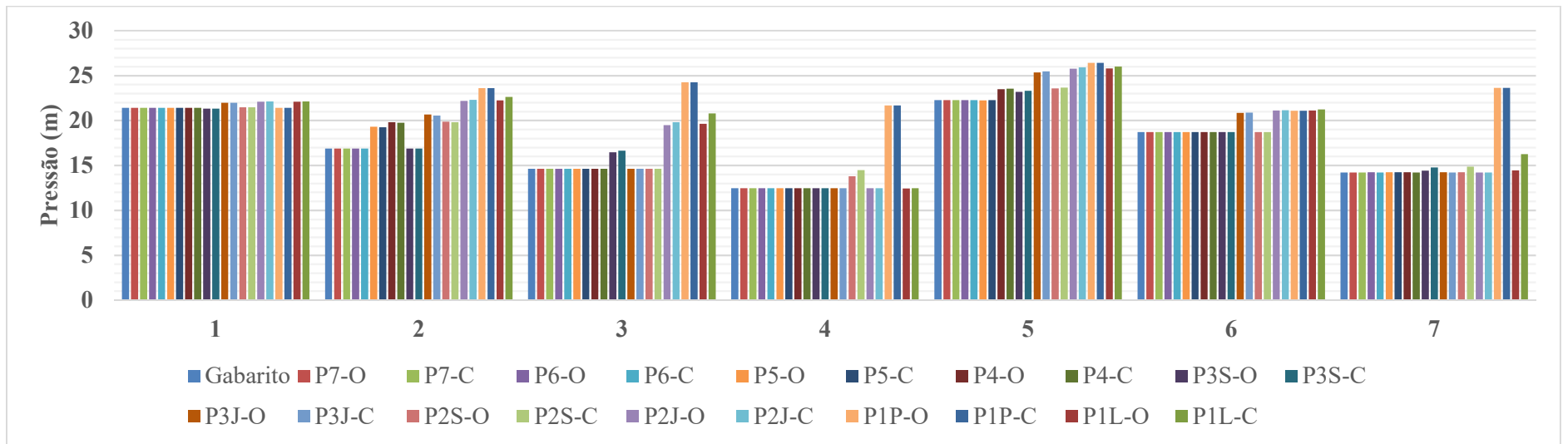


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE BX – Pressões encontradas na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Darcy-Weisbach com consumos nodais iniciais de 2 L/s: rede Porto (2006)

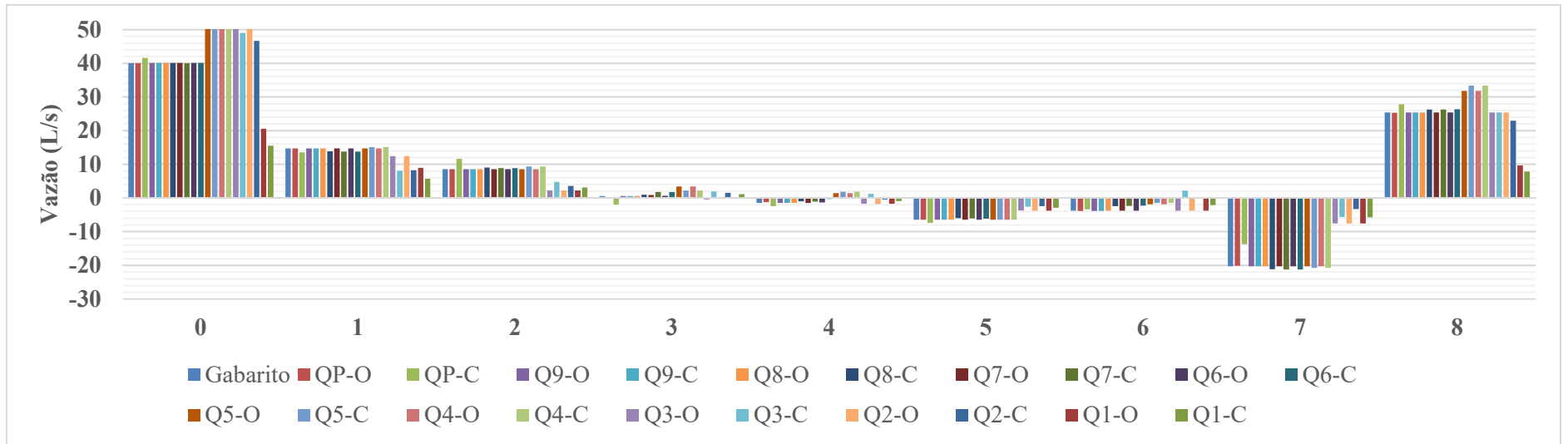


Fonte: Elaborado pelo autor

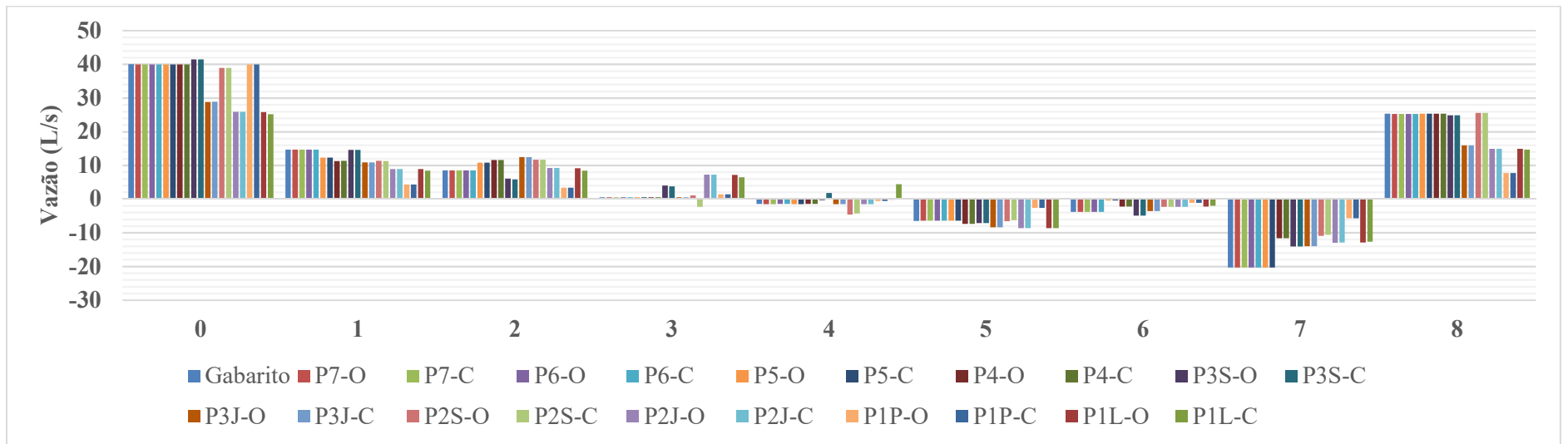


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE BY – Vazões encontradas na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Hazen-Williams com consumos nodais iniciais de 2 L/s: rede Porto (2006)

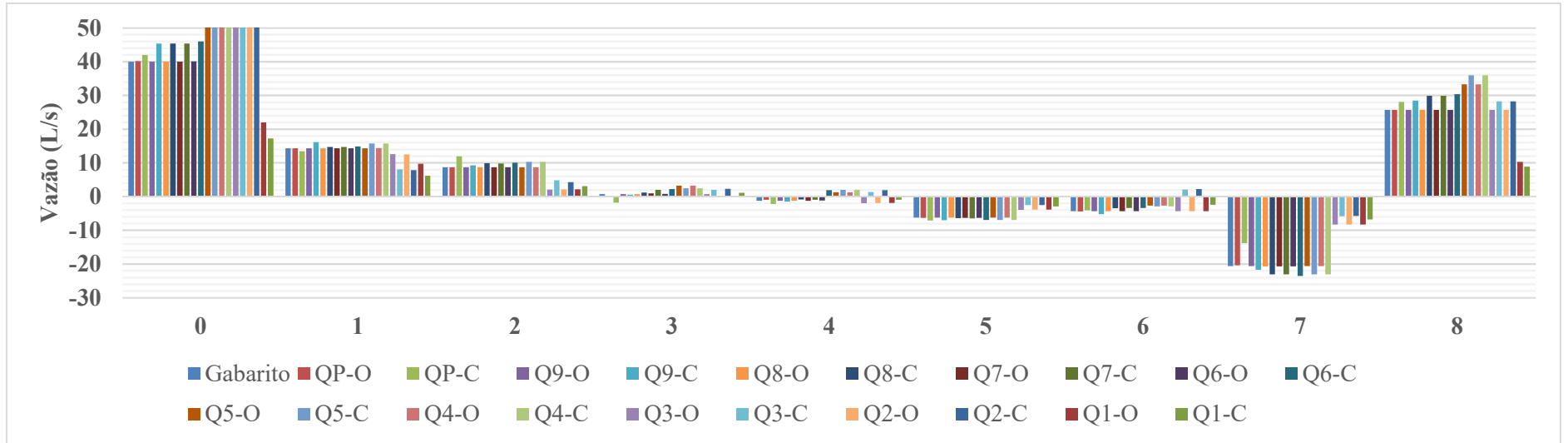


Fonte: Elaborado pelo autor

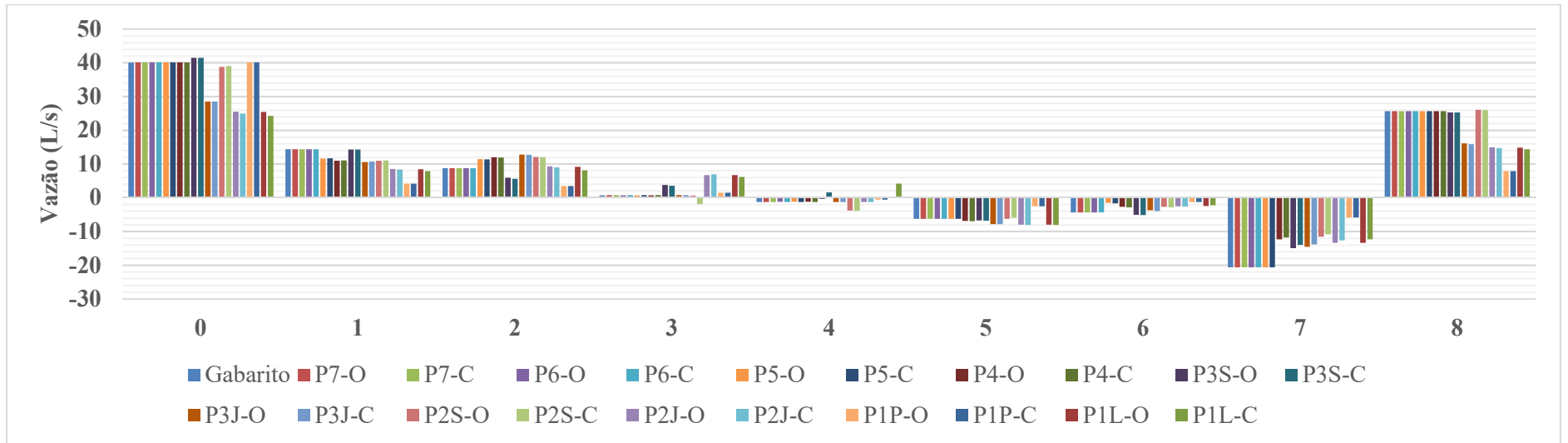


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE BZ – Vazões encontradas na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Darcy-Weisbach com consumos nodais iniciais de 2 L/s: rede Porto (2006)

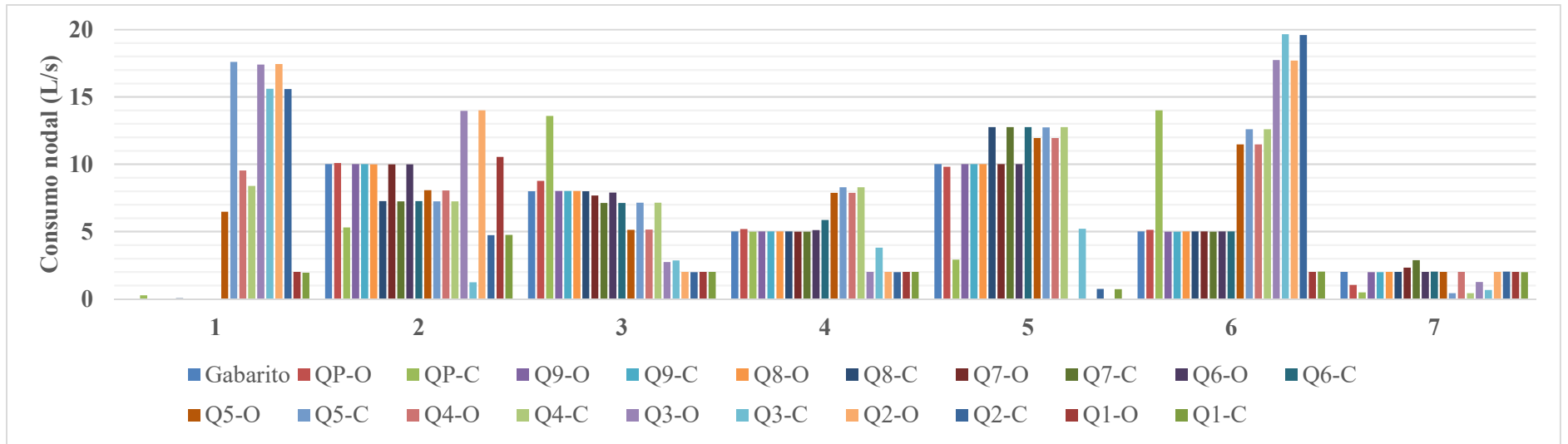


Fonte: Elaborado pelo autor

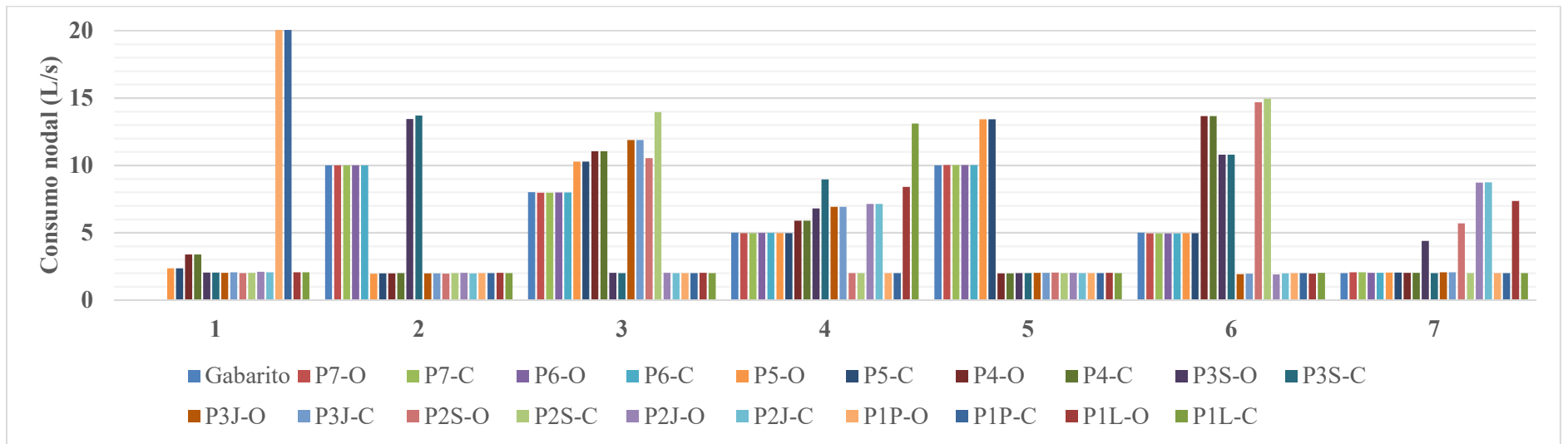


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE CA – Consumos nodais encontrados na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Hazen-Williams com consumos nodais iniciais de 2 L/s: rede Porto (2006)

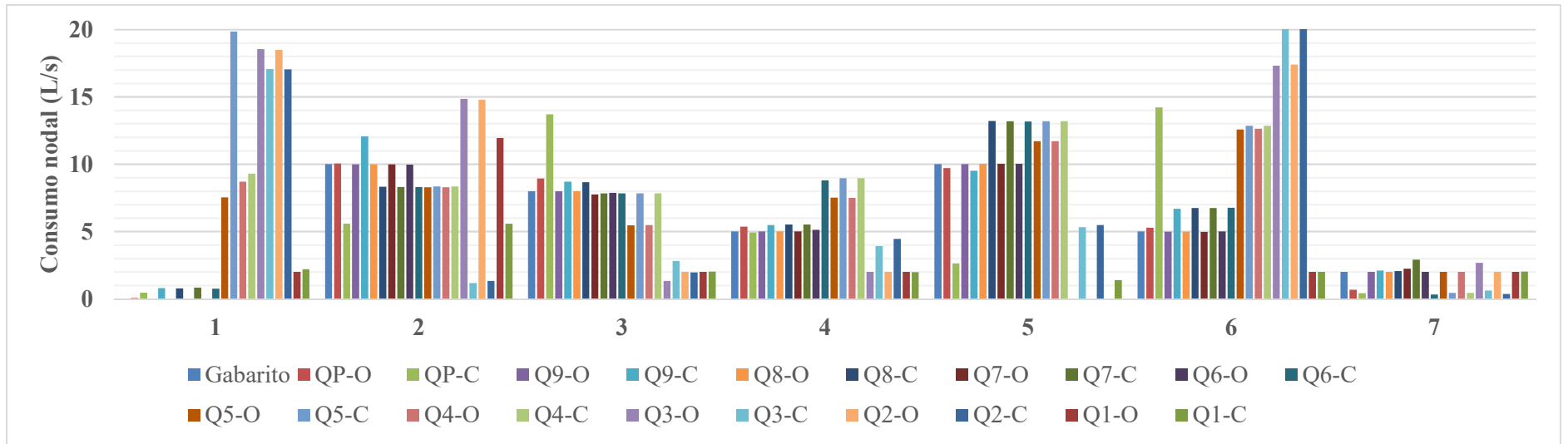


Fonte: Elaborado pelo autor

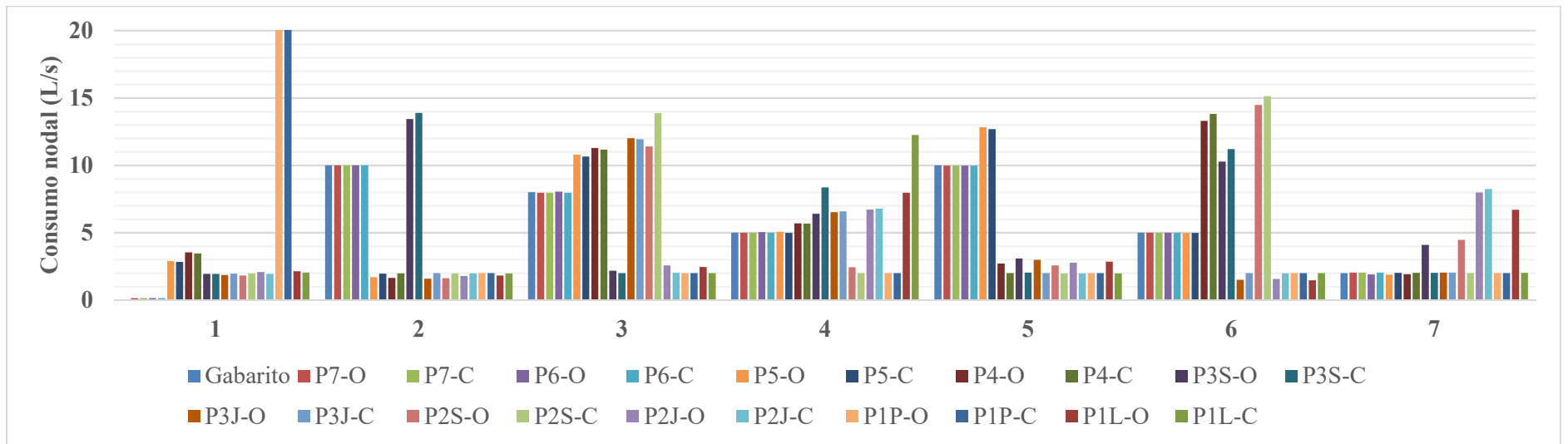


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE CB – Consumos nodais encontrados na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Darcy-Weisbach com consumos nodais iniciais de 2 L/s: rede Porto (2006)

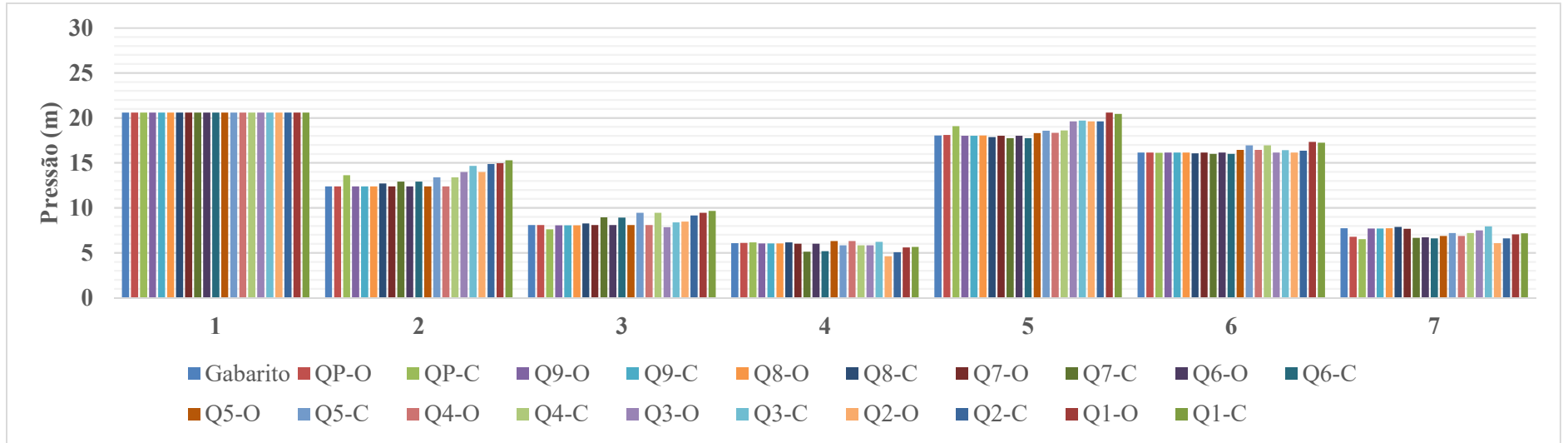


Fonte: Elaborado pelo autor

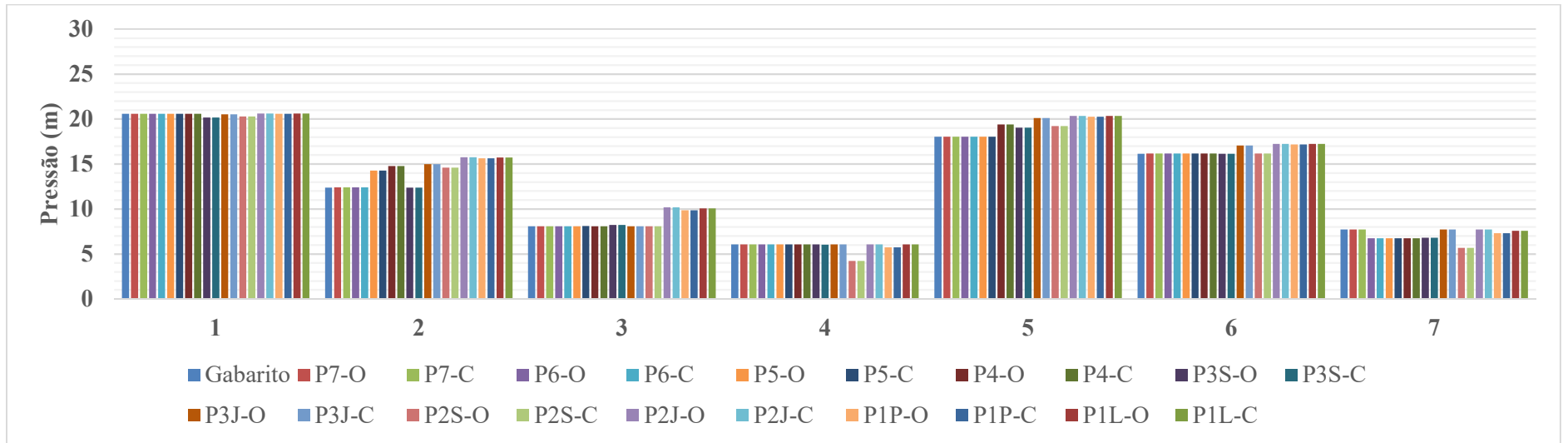


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE CC – Pressões encontradas na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Hazen-Williams com consumos nodais iniciais de 5,7 L/s: rede Porto (2006)

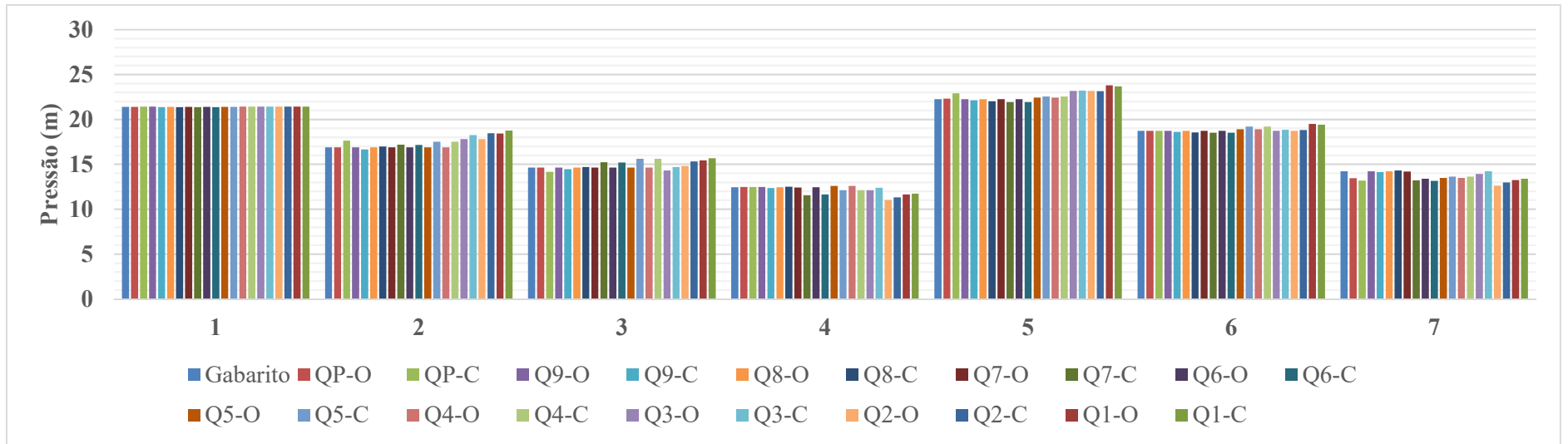


Fonte: Elaborado pelo autor

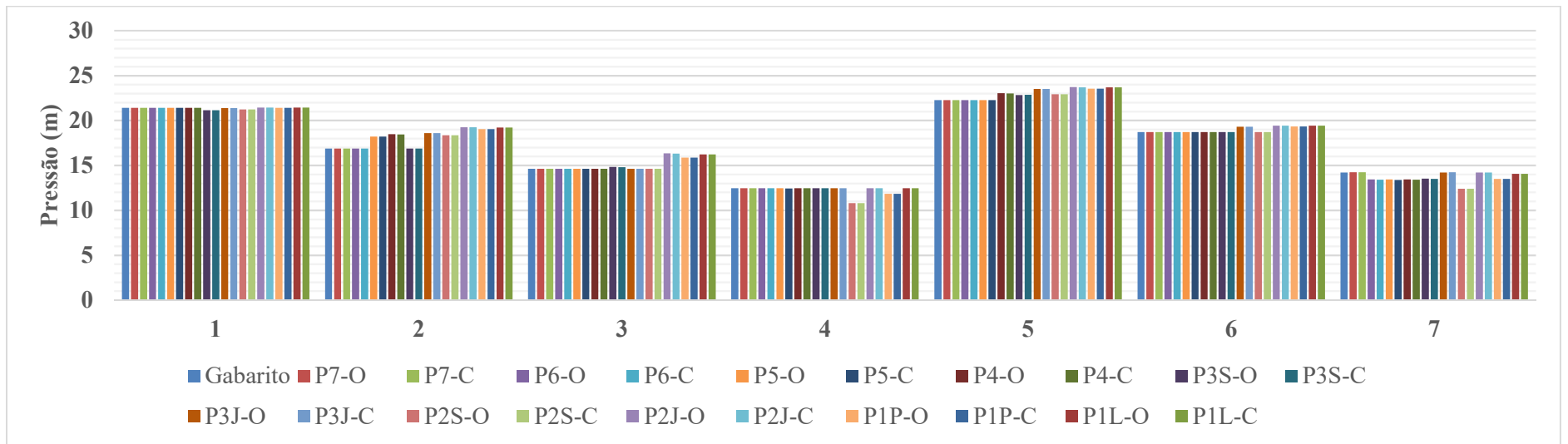


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE CD – Pressões encontradas na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Darcy-Weisbach com consumos nodais iniciais de 5,7 L/s: rede Porto (2006)



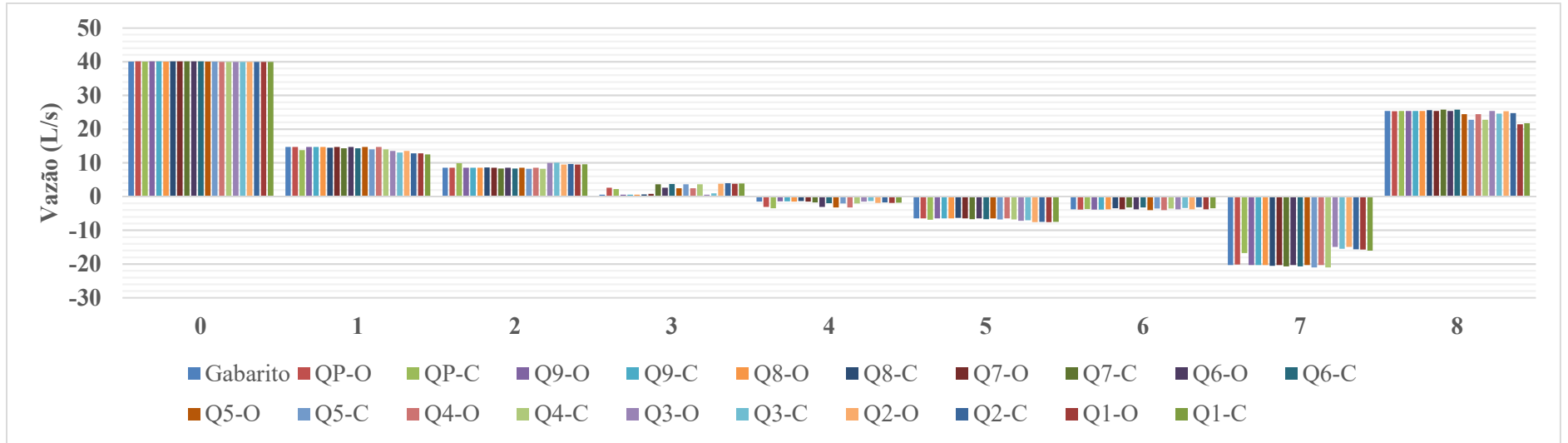
Fonte: Elaborado pelo autor



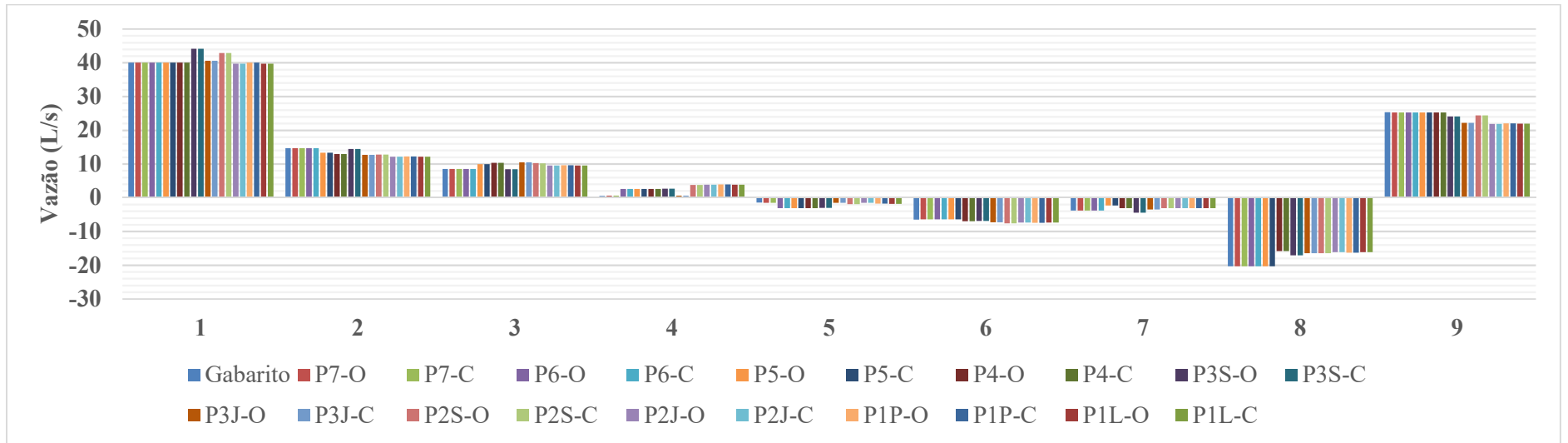
Fonte: Elaborado pelo autor

**APÊNDICE CE – Vazões encontradas na Calibração da vazão com gradiente hidráulico
calculado através da equação de Hazen-Williams com consumos nodais iniciais de 5,7**

L/s: rede Porto (2006)



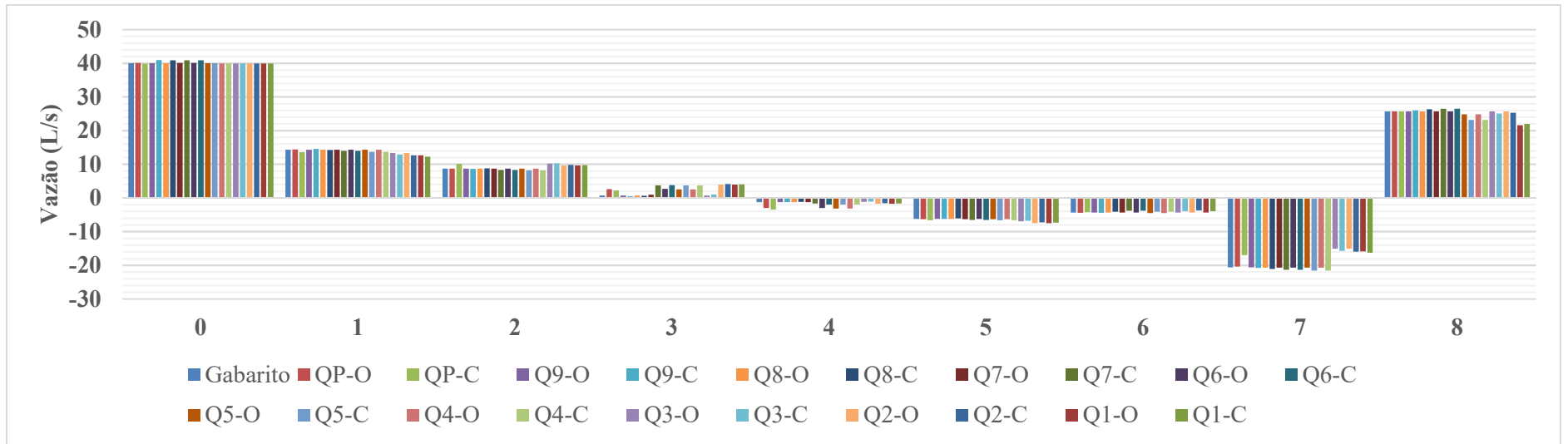
Fonte: Elaborado pelo autor



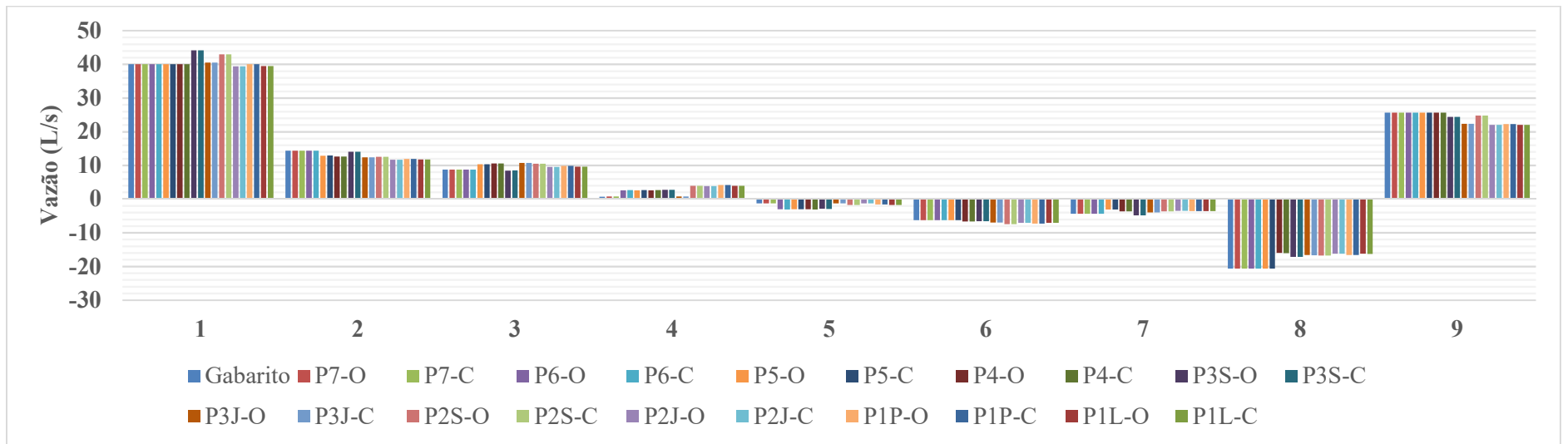
Fonte: Elaborado pelo autor

**APÊNDICE CF – Vazões encontradas na Calibração da vazão com gradiente hidráulico
calculado através da equação de Darcy-Weisbach com consumos nodais iniciais de 5,7**

L/s: rede Porto (2006)

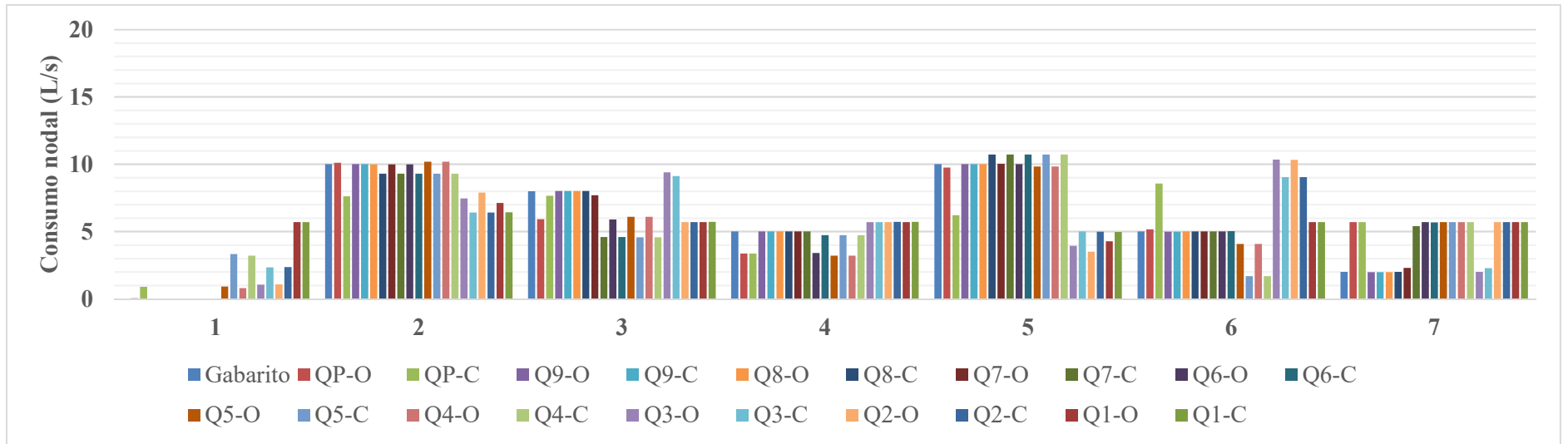


Fonte: Elaborado pelo autor

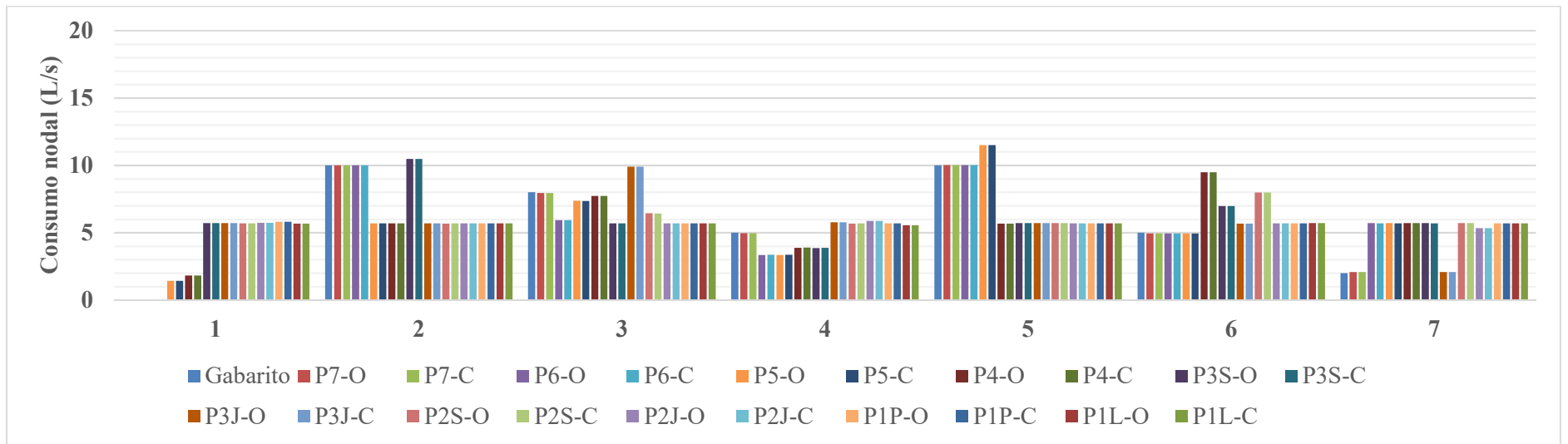


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE CG – Consumos nodais encontrados na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Hazen-Williams com consumos nodais iniciais de 5,7 L/s: rede Porto (2006)

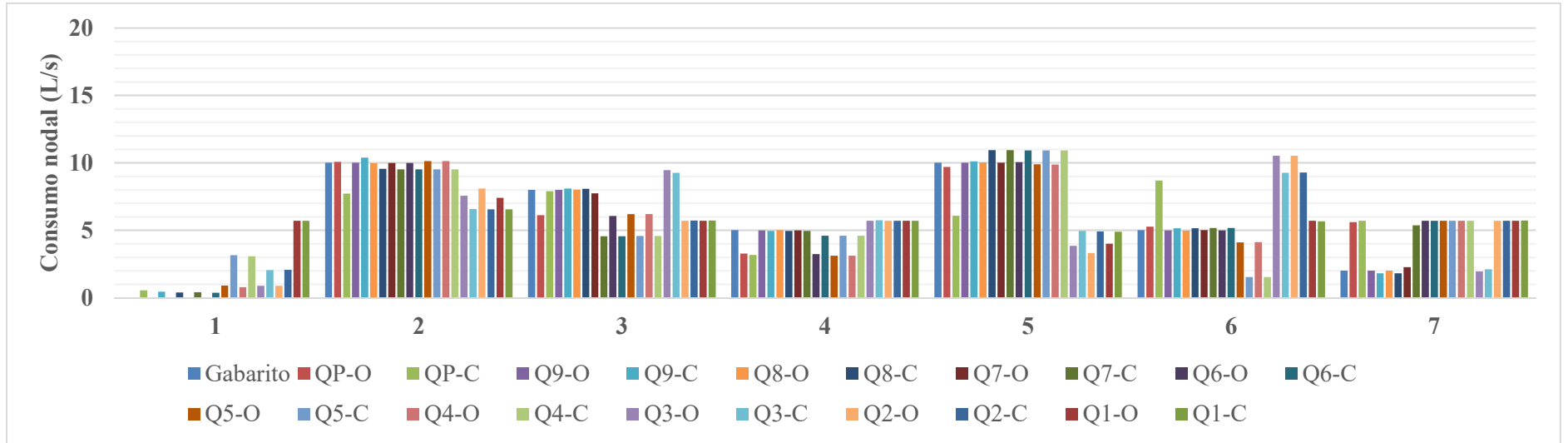


Fonte: Elaborado pelo autor

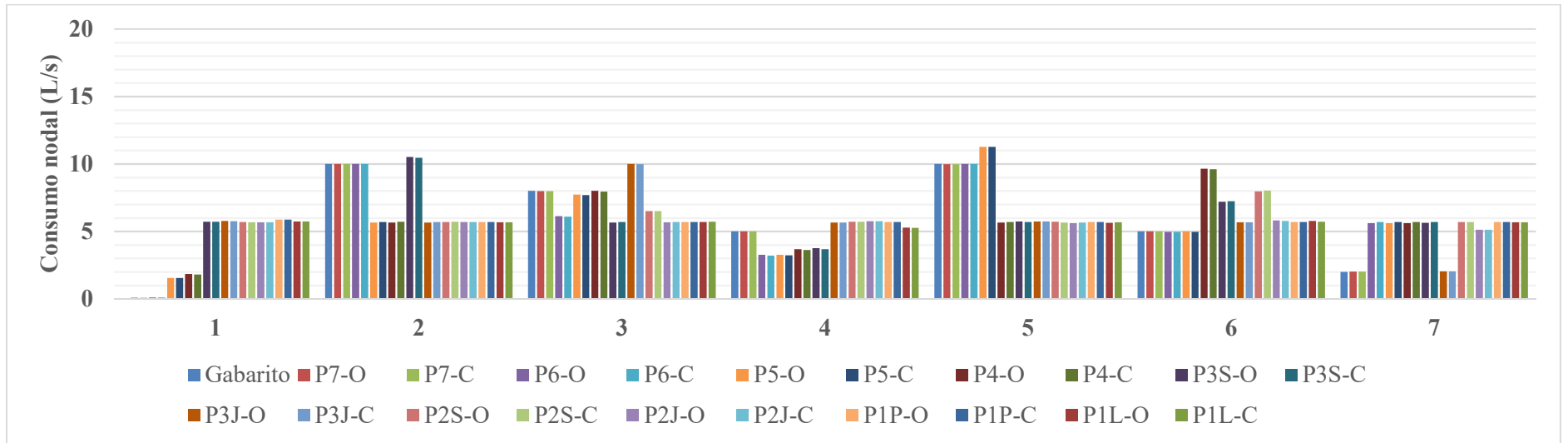


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE CH – Consumos nodais encontrados na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Darcy-Weisbach com consumos nodais iniciais de 5,7 L/s: rede Porto (2006)

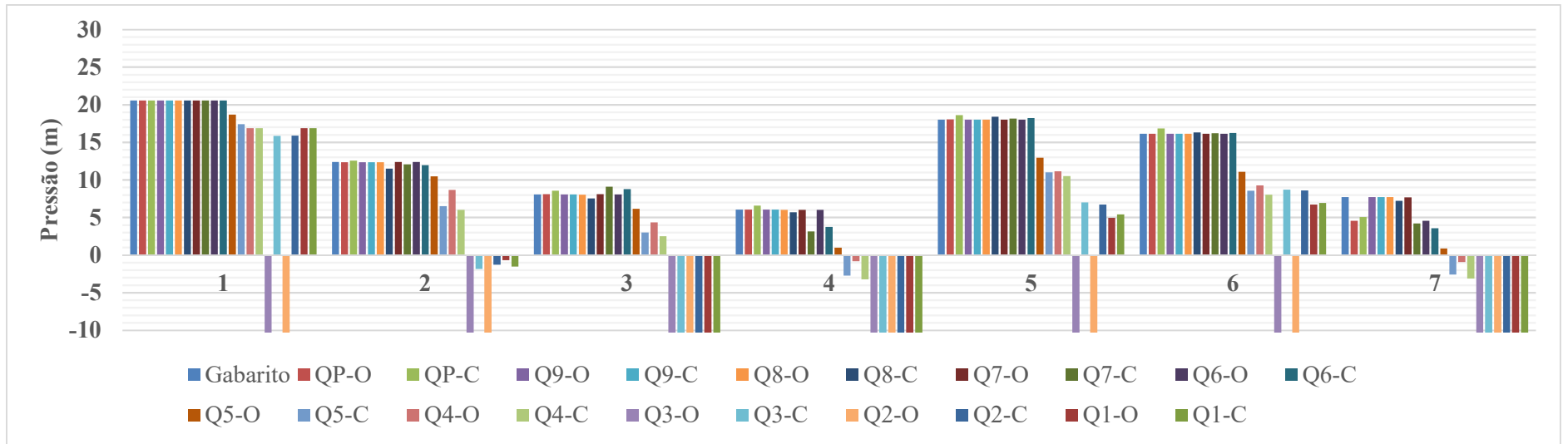


Fonte: Elaborado pelo autor

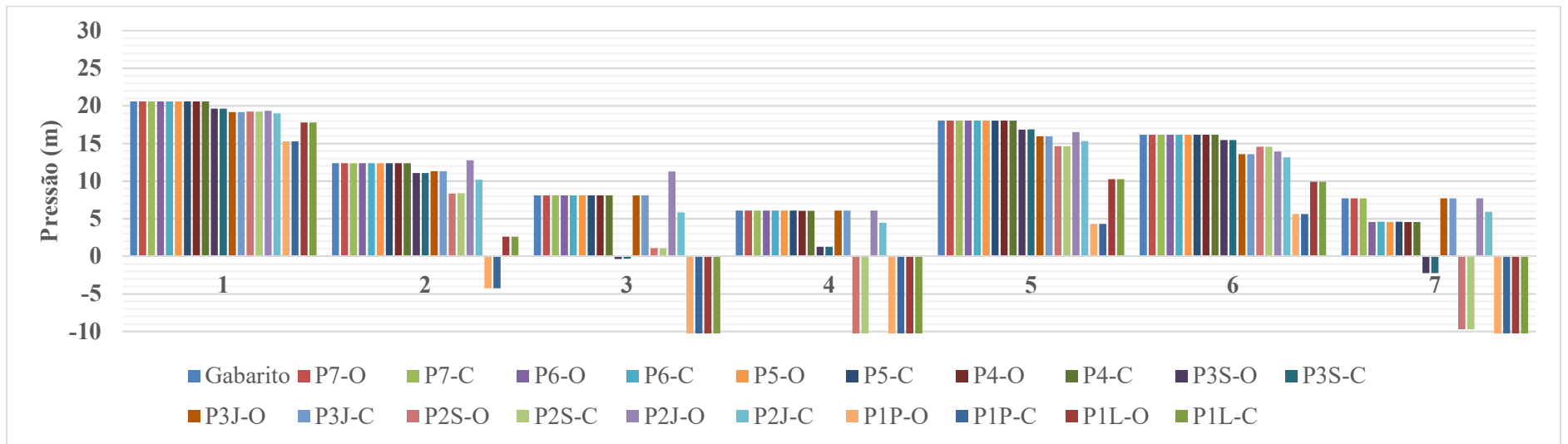


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE CI – Pressões encontradas na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Hazen-Williams com consumos nodais iniciais de 10 L/s: rede Porto (2006)

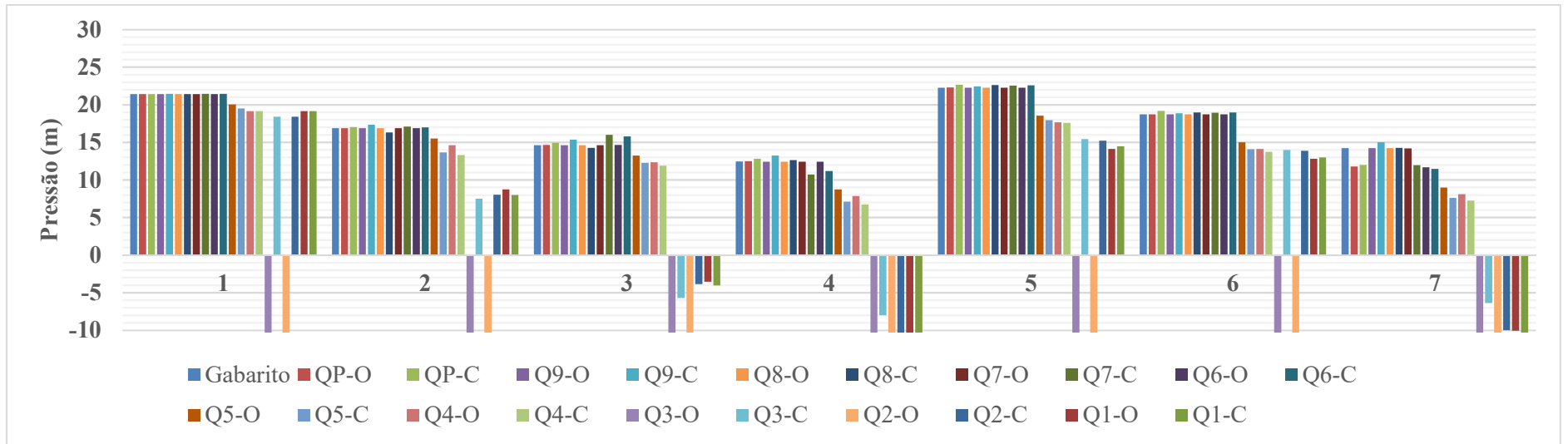


Fonte: Elaborado pelo autor

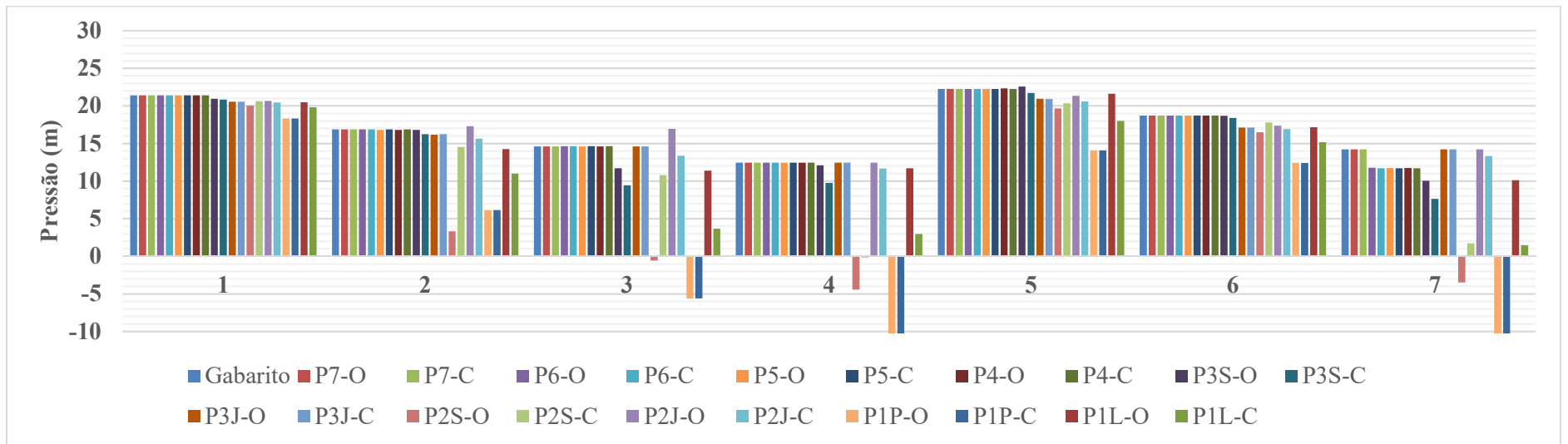


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE CJ – Pressões encontradas na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Darcy-Weisbach com consumos nodais iniciais de 10 L/s: rede Porto (2006)

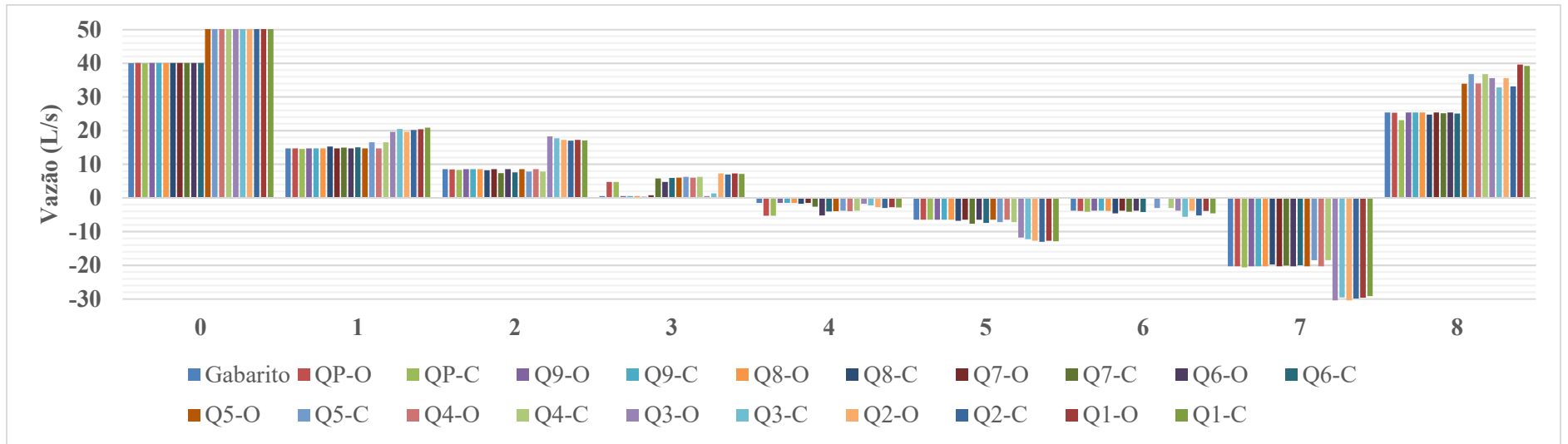


Fonte: Elaborado pelo autor

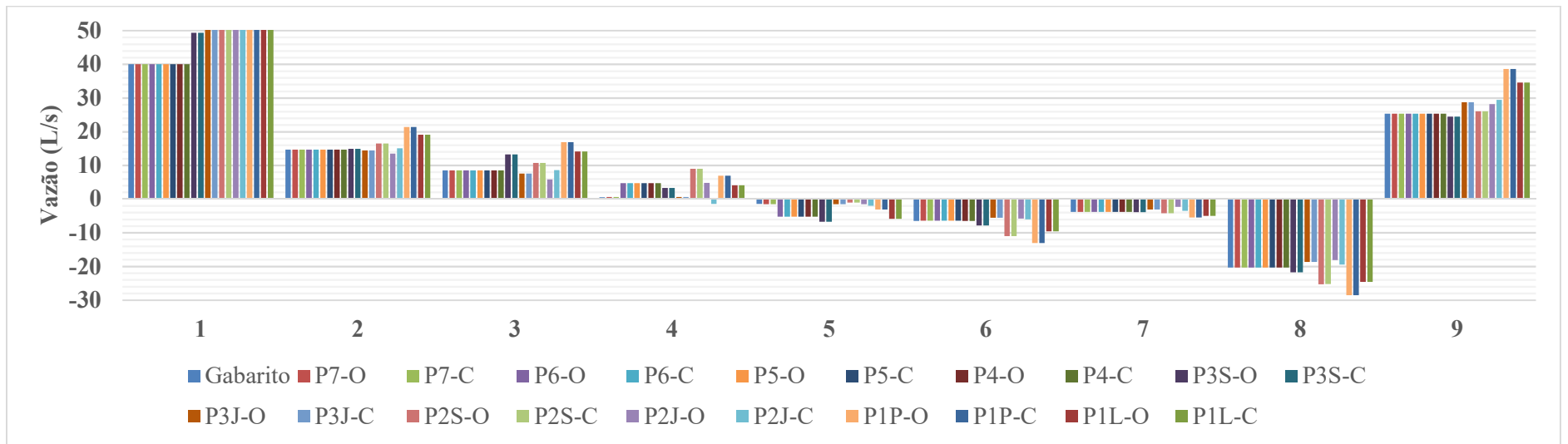


Fonte: Elaborado pelo autor

**APÊNDICE CK – Vazões encontradas na Calibração da vazão com gradiente hidráulico
calculado através da equação de Hazen-Williams com consumos nodais iniciais de 10
L/s: rede Porto (2006)**

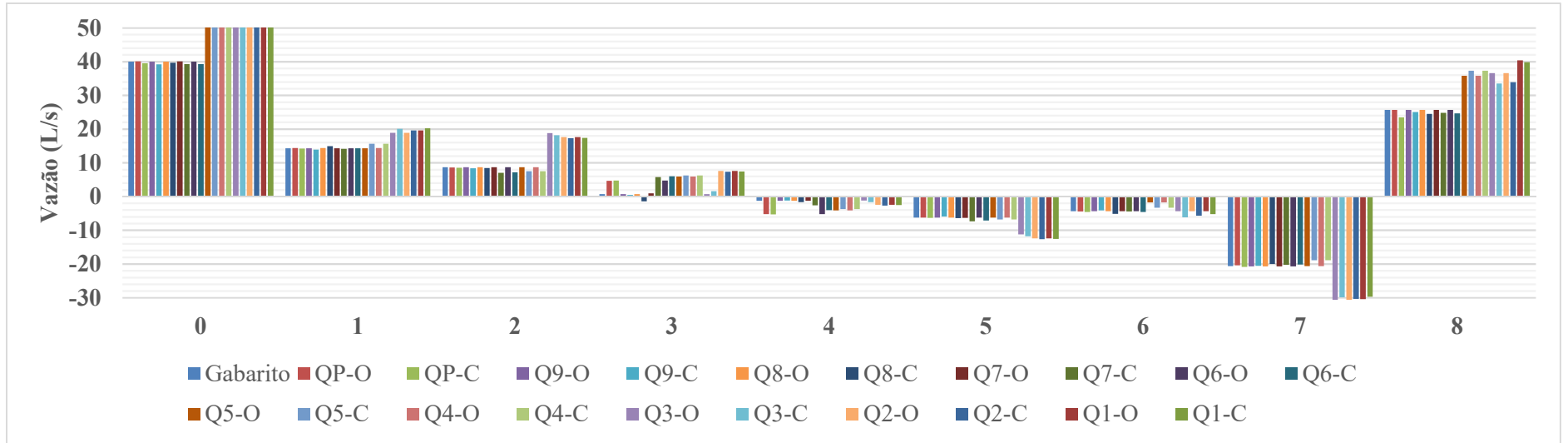


Fonte: Elaborado pelo autor

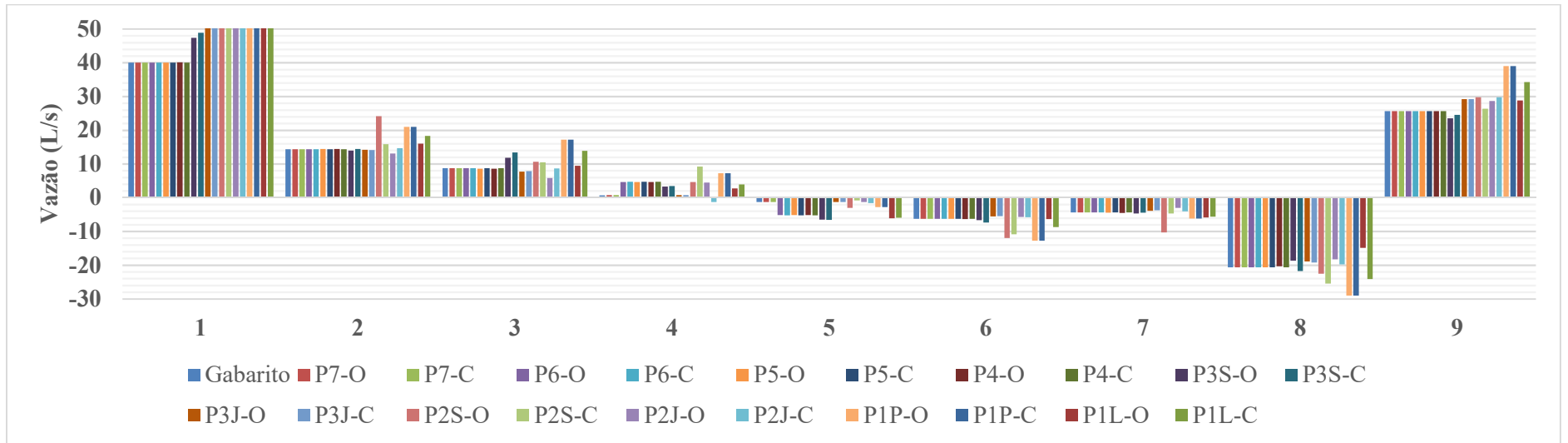


Fonte: Elaborado pelo autor

**APÊNDICE CL – Vazões encontradas na Calibração da vazão com gradiente hidráulico
calculado através da equação de Darcy-Weisbach com consumos nodais iniciais de 10
L/s: rede Porto (2006)**

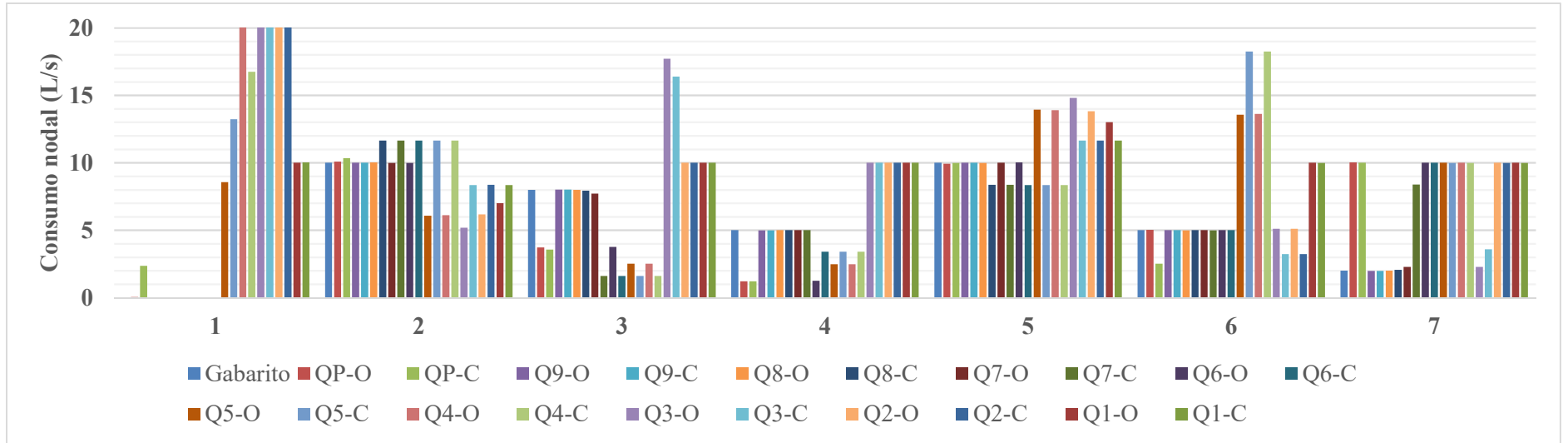


Fonte: Elaborado pelo autor

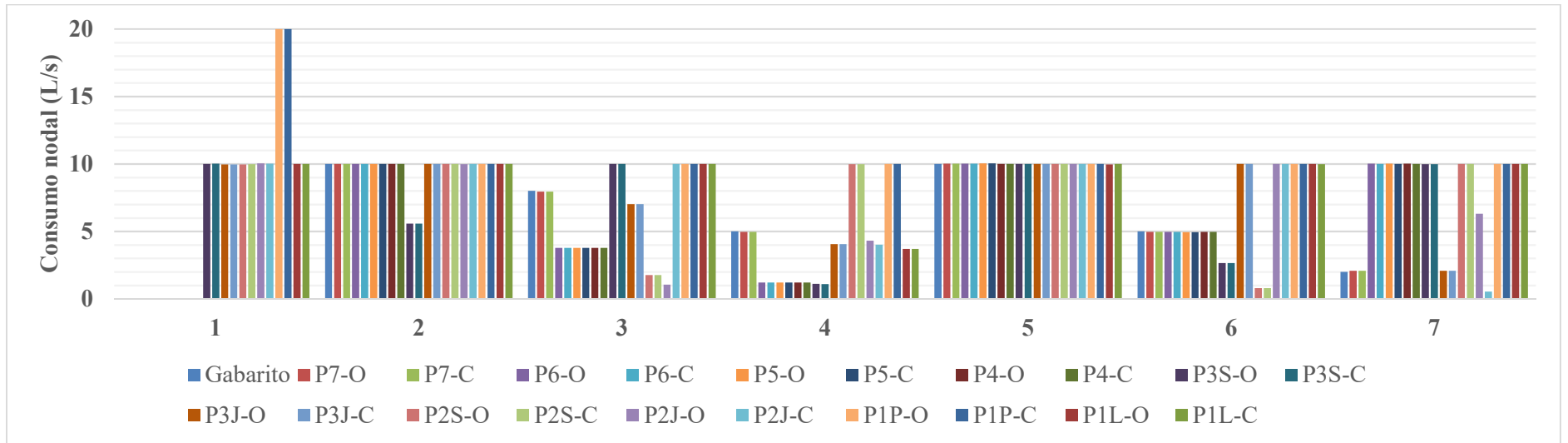


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE CM – Consumos nodais encontrados na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Hazen-Williams com consumos nodais iniciais de 10 L/s: rede Porto (2006)

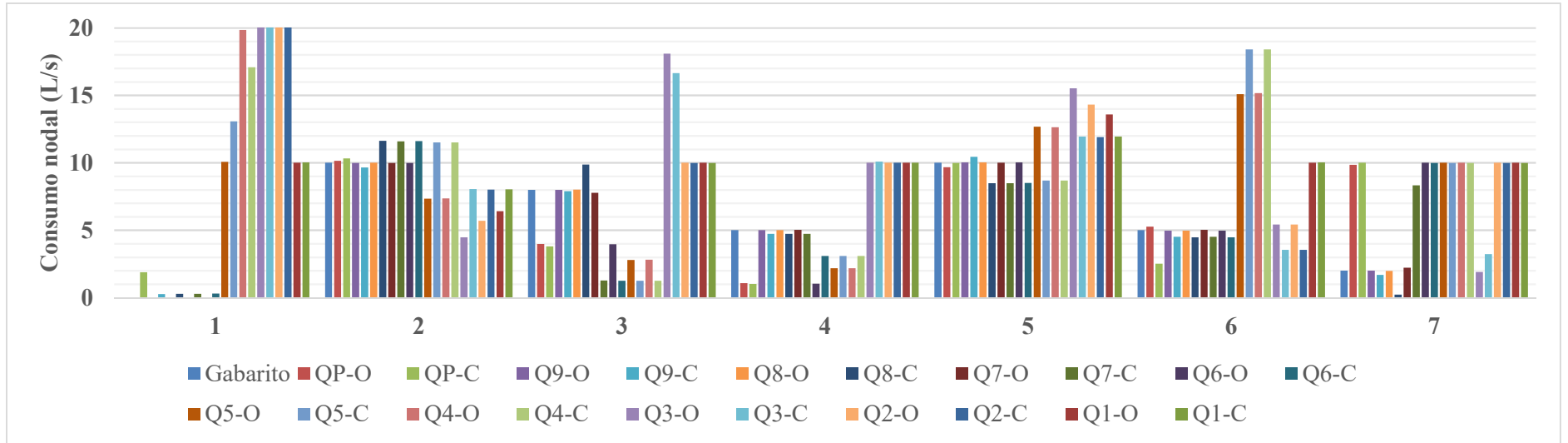


Fonte: Elaborado pelo autor

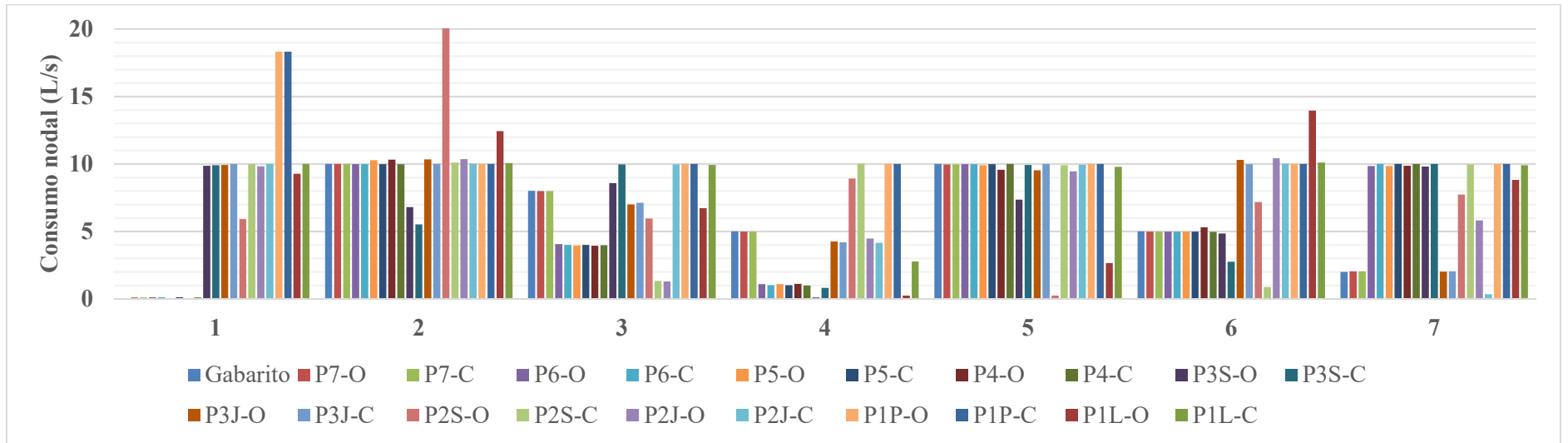


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE CN – Consumos nodais encontrados na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Darcy-Weisbach com consumos nodais iniciais de 10 L/s: rede Porto (2006)

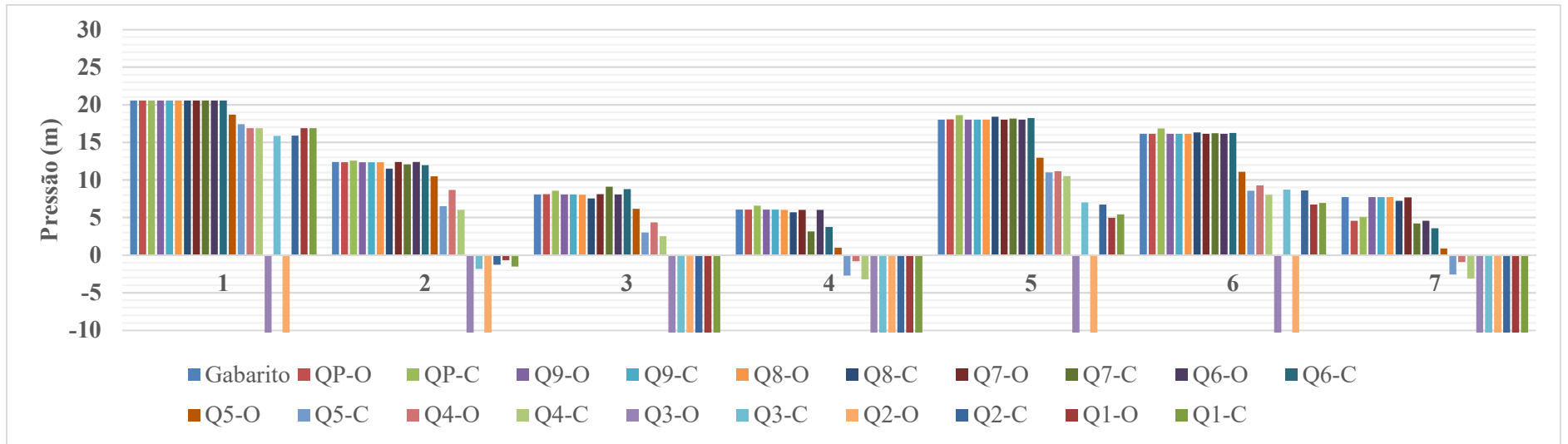


Fonte: Elaborado pelo autor

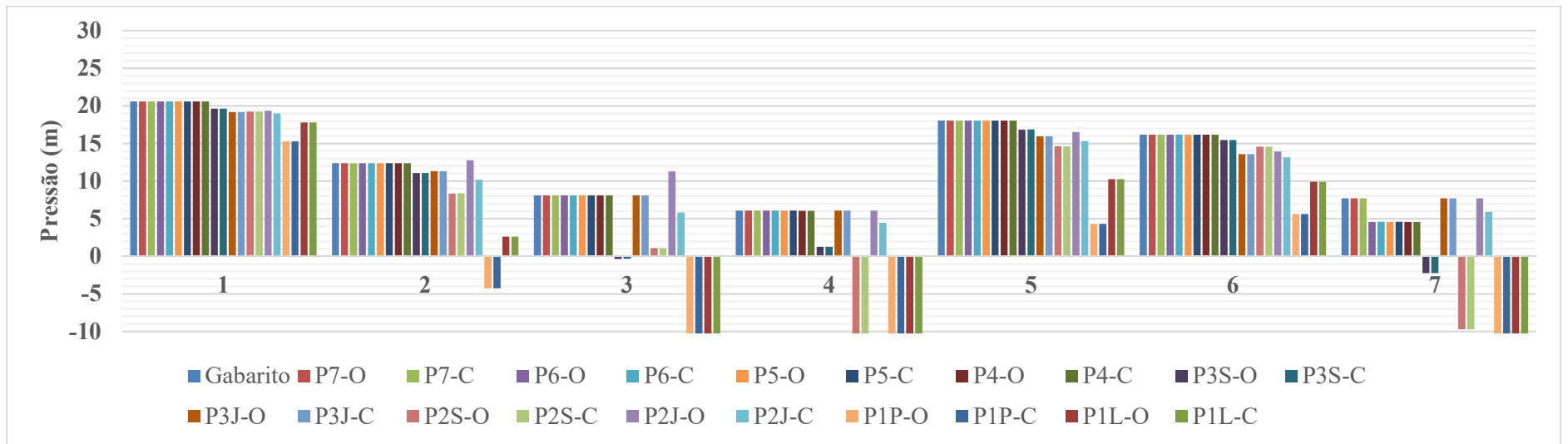


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE CO – Pressões encontradas na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Hazen-Williams com consumos nodais iniciais calculados com uso da sub-rotina computacional: rede Porto (2006)

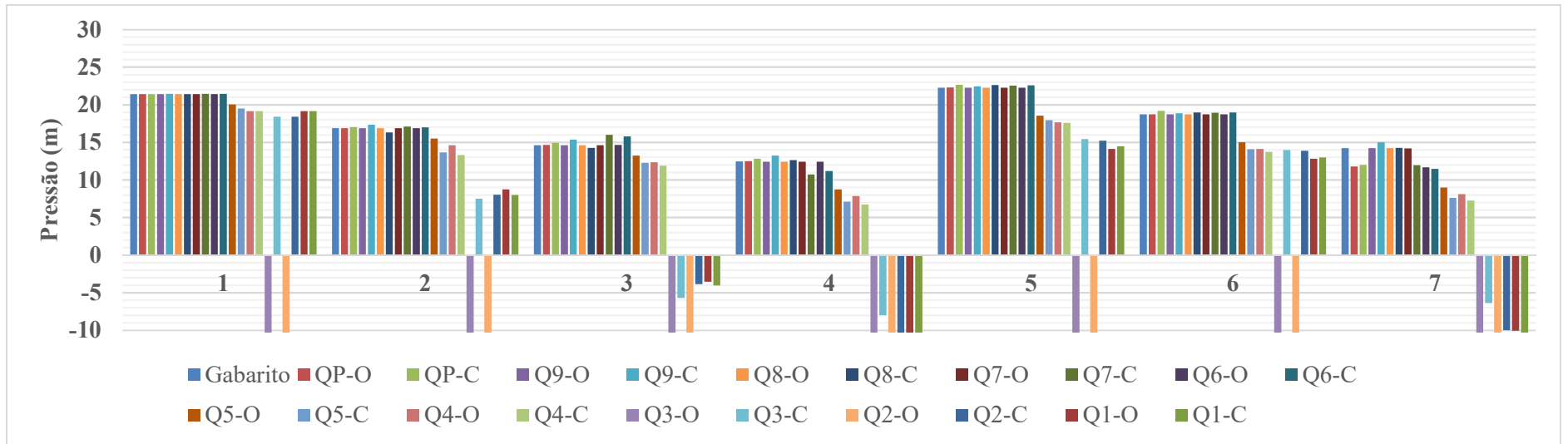


Fonte: Elaborado pelo autor

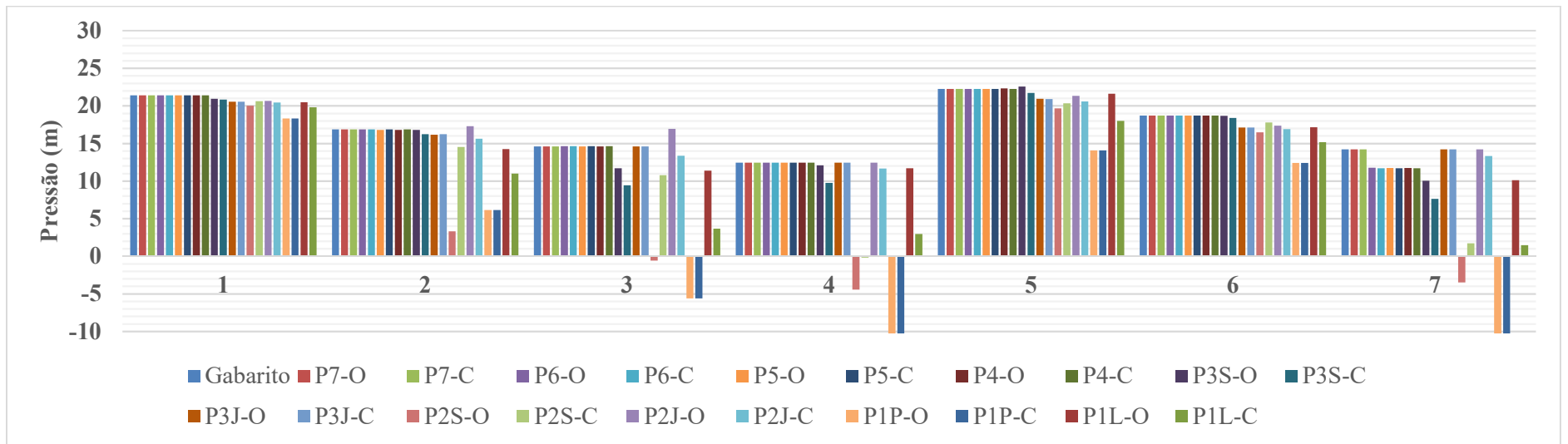


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE CP – Pressões encontradas na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Darcy-Weisbach com consumos nodais iniciais calculados com uso da sub-rotina computacional: rede Porto (2006)

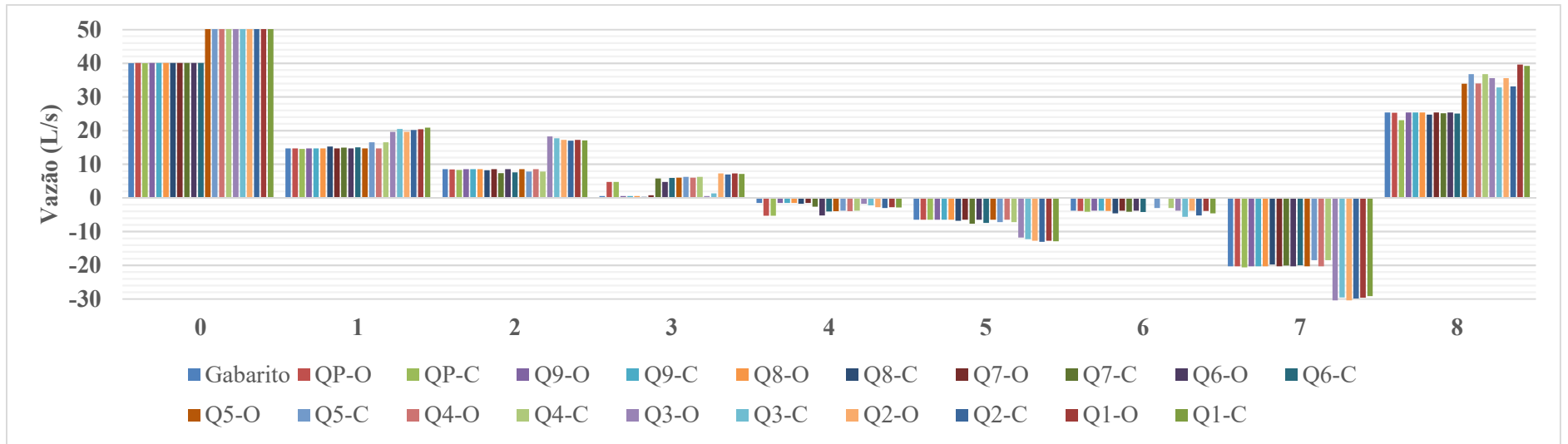


Fonte: Elaborado pelo autor

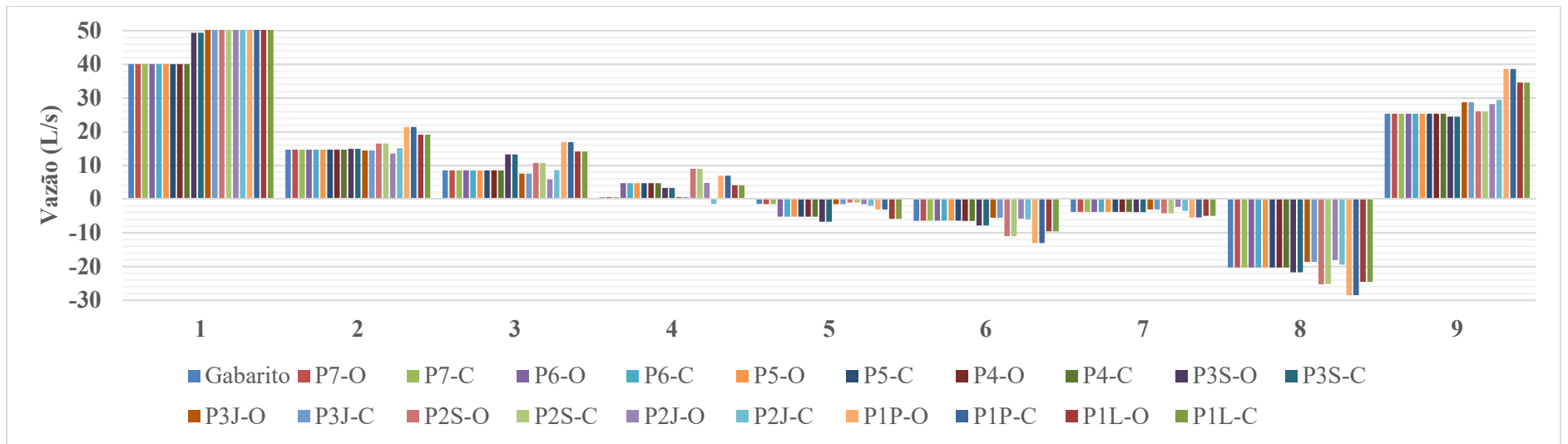


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE CQ – Vazões encontradas na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Hazen-Williams com consumos nodais iniciais calculados com uso da sub-rotina computacional: rede Porto (2006)

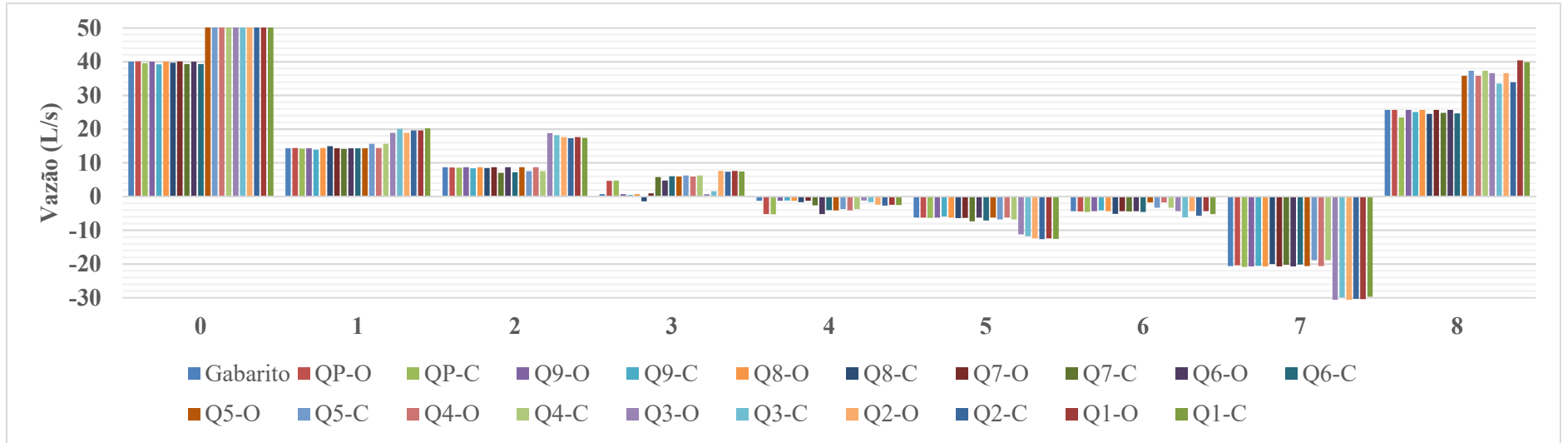


Fonte: Elaborado pelo autor

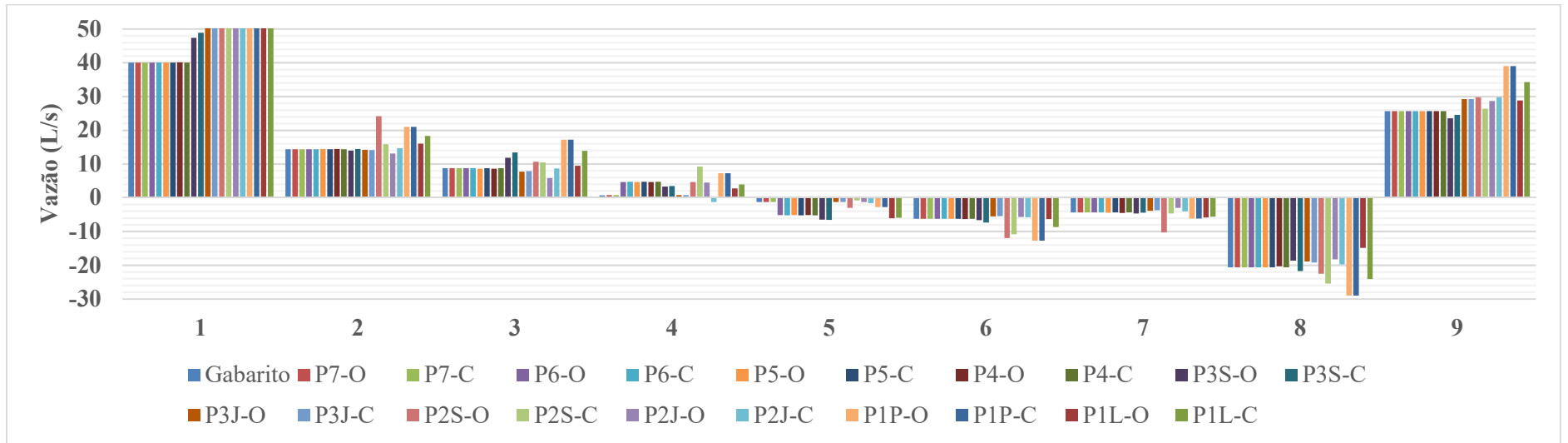


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE CR – Vazões encontradas na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Darcy-Weisbach com consumos nodais iniciais calculados com uso da sub-rotina computacional: rede Porto (2006)

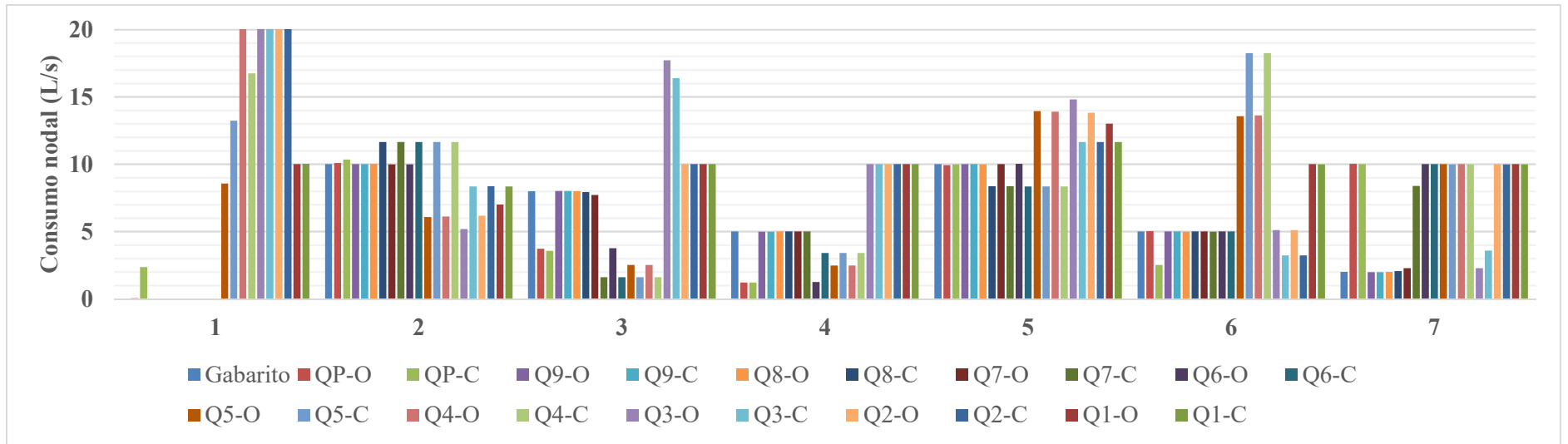


Fonte: Elaborado pelo autor

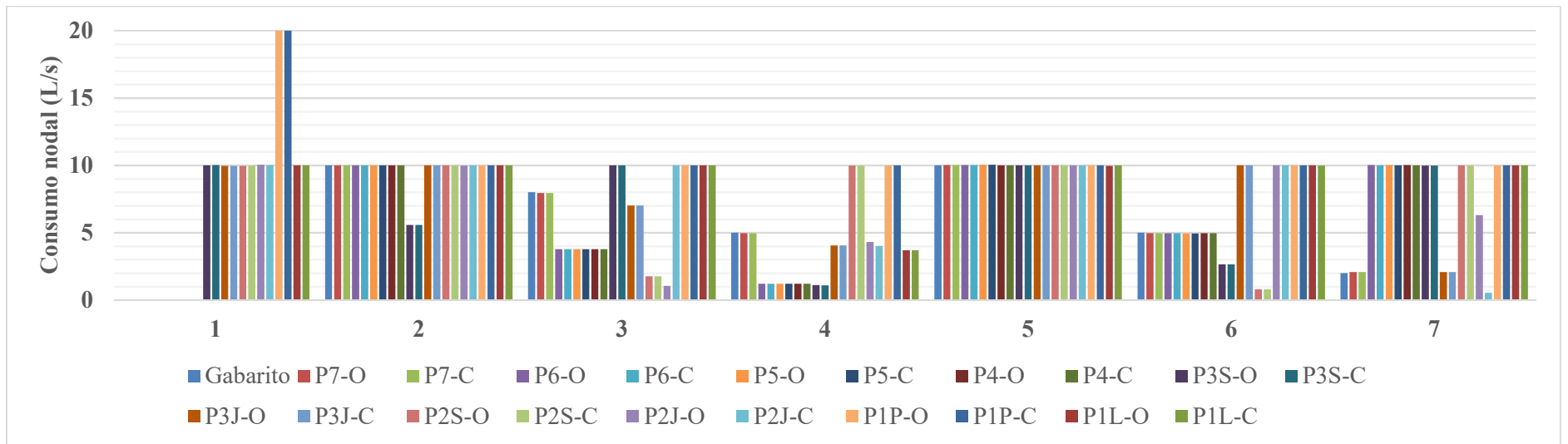


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE CS – Consumos nodais encontrados na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Hazen-Williams com consumos nodais iniciais calculados com uso da sub-rotina computacional: rede Porto (2006)

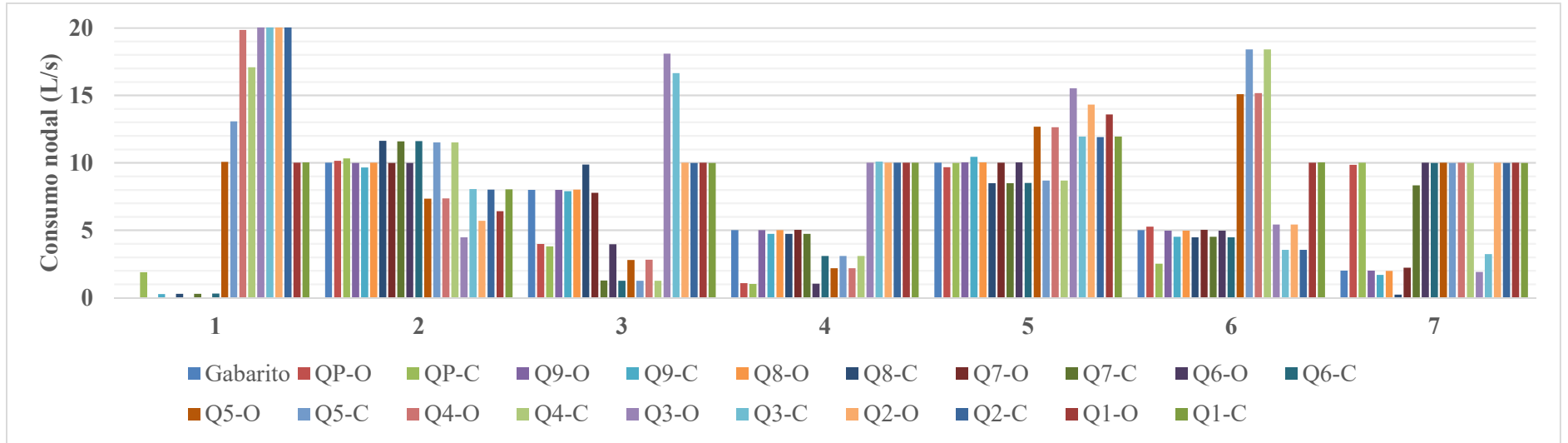


Fonte: Elaborado pelo autor

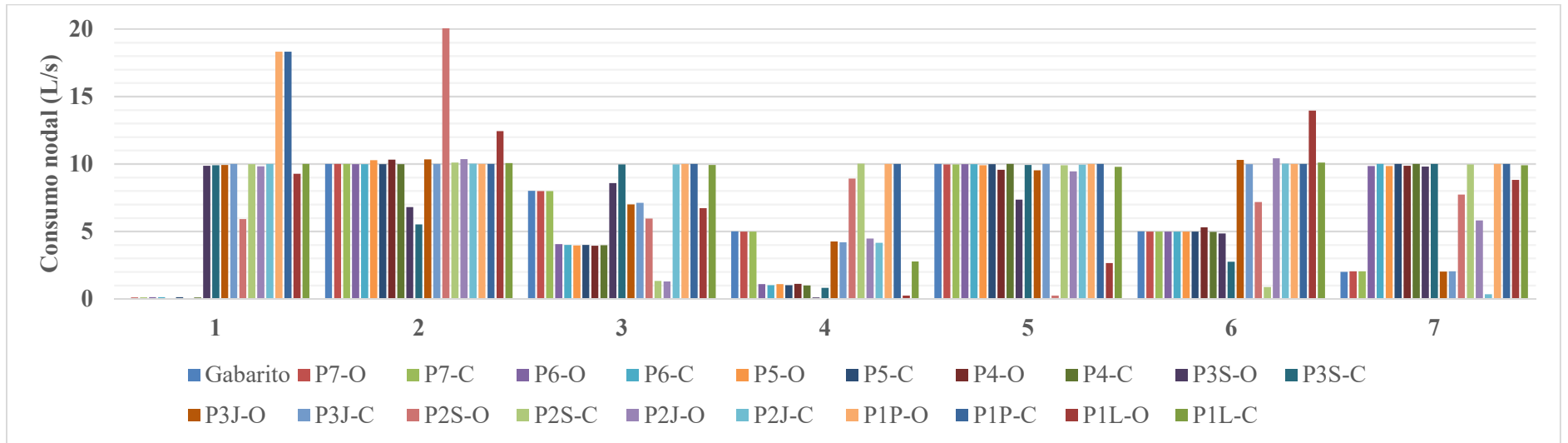


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE CT – Consumos nodais encontrados na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Darcy-Weisbach com consumos nodais iniciais calculados com uso da sub-rotina computacional: rede Porto (2006)

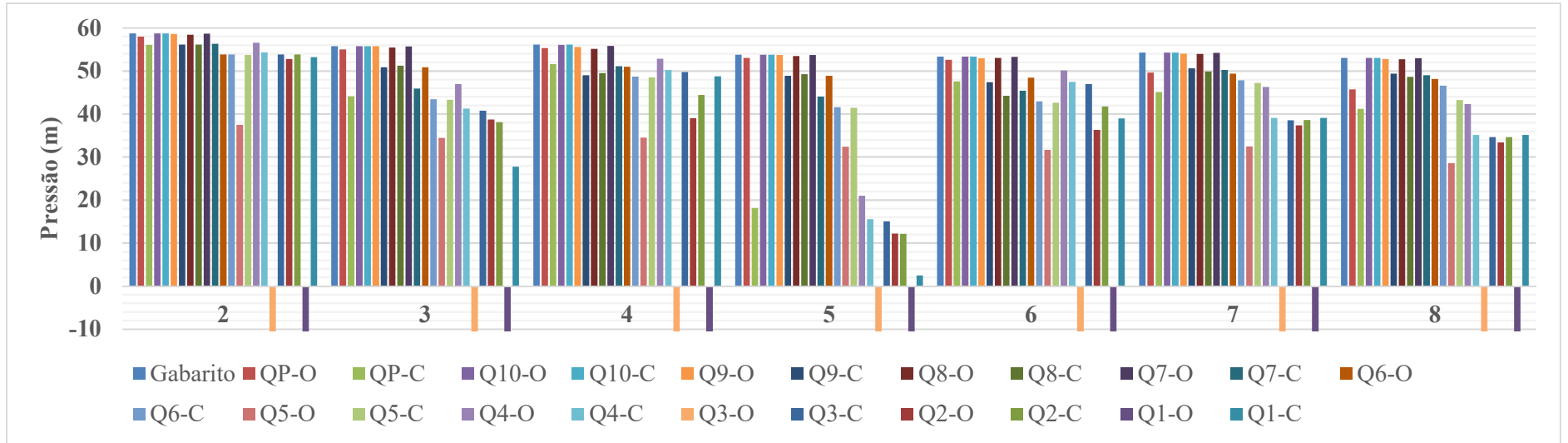


Fonte: Elaborado pelo autor

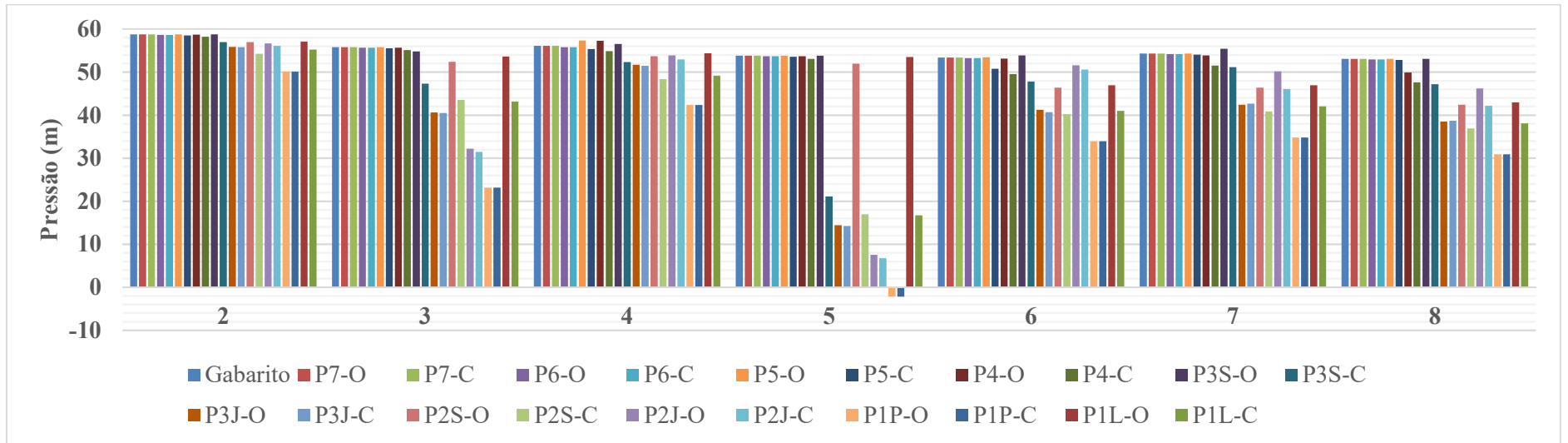


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE CU – Pressões encontradas na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Hazen-Williams com consumos nodais iniciais de 70 L/s: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

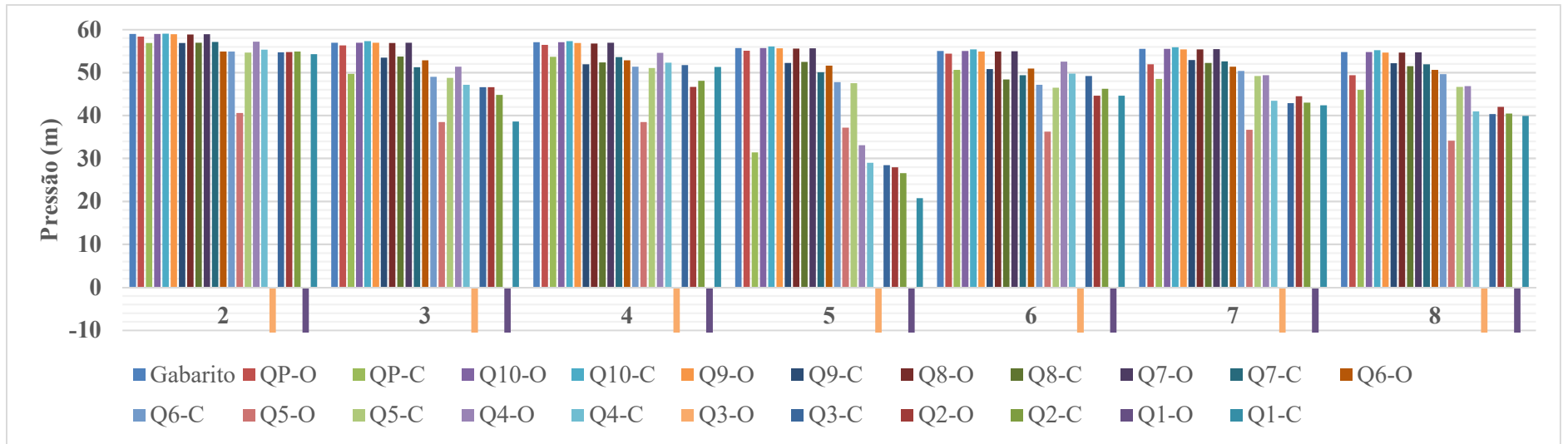


Fonte: Elaborado pelo autor

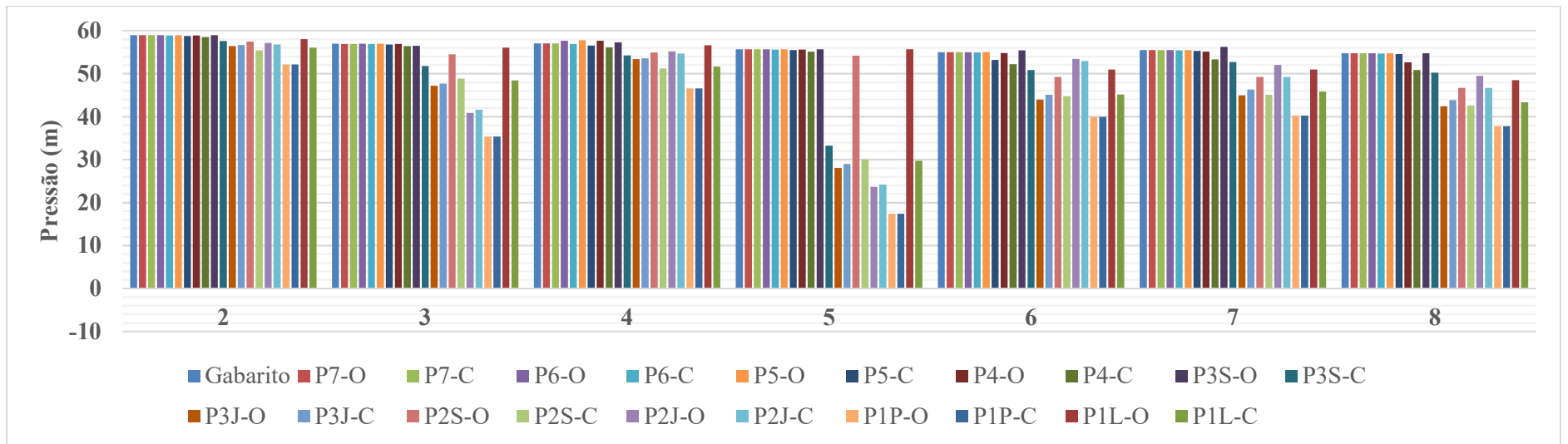


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE CV – Pressões encontradas na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Darcy-Weisbach com consumos nodais iniciais de 70 L/s: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

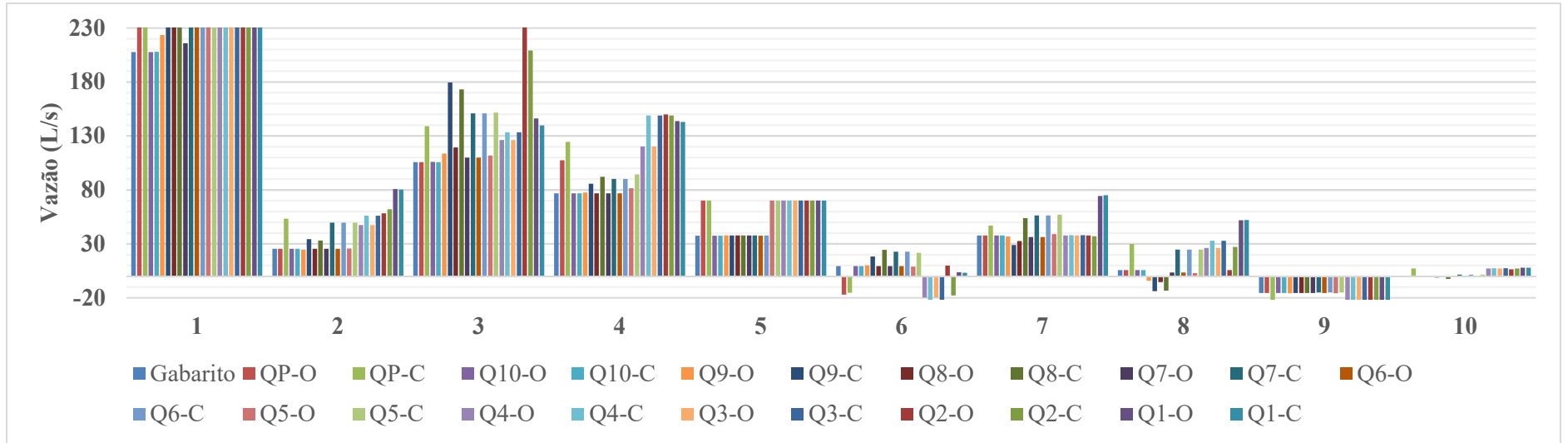


Fonte: Elaborado pelo autor

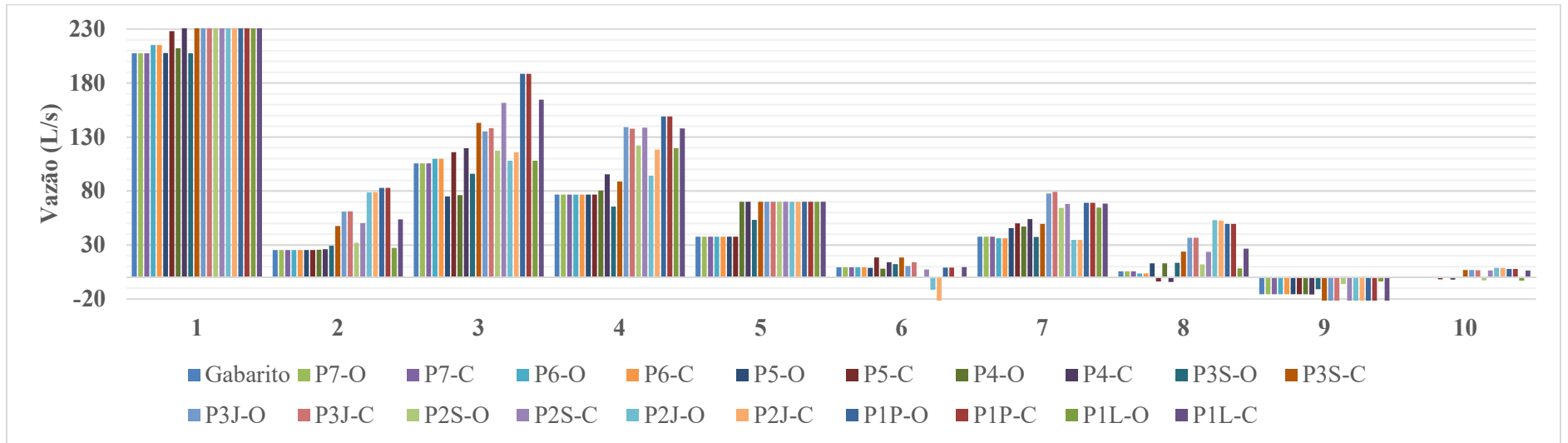


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE CW – Vazões encontradas na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Hazen-Williams com consumos nodais iniciais de 70 L/s: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

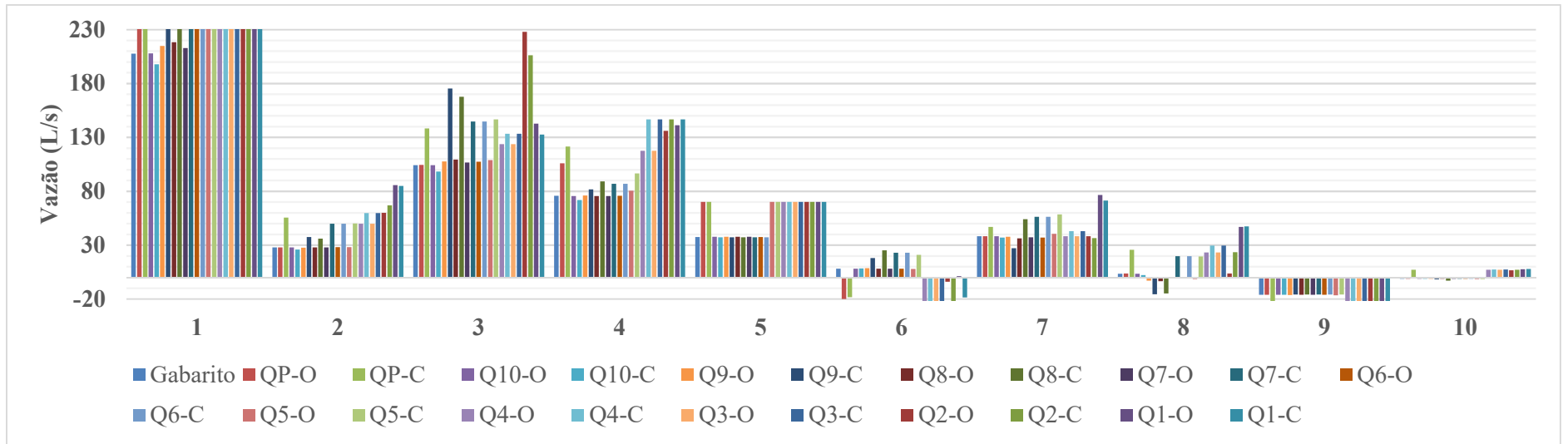


Fonte: Elaborado pelo autor

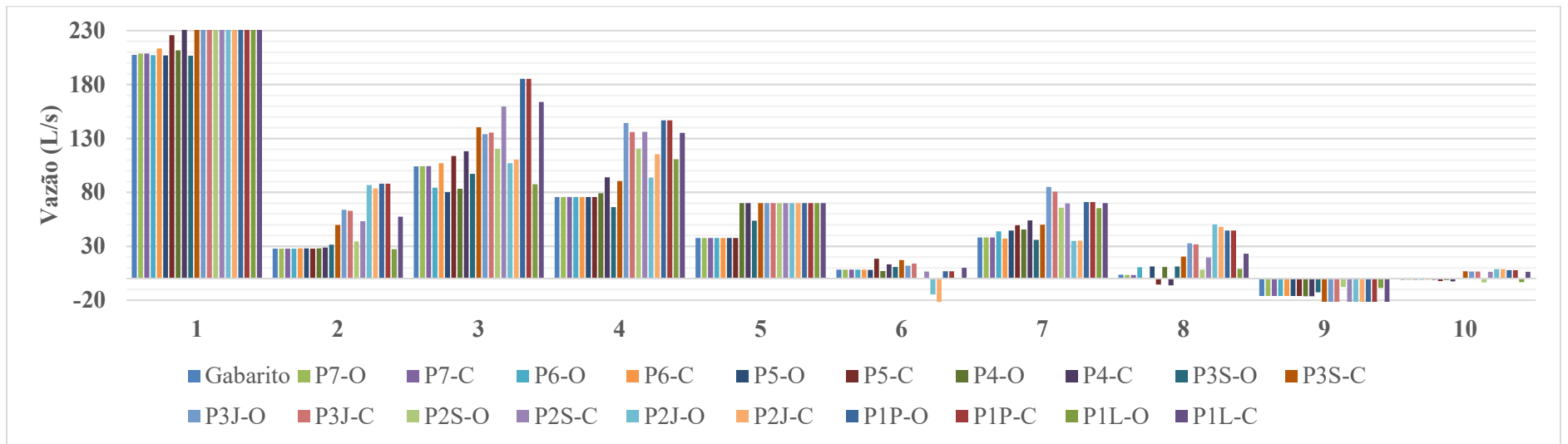


Fonte: Elaborado pelo autor

**APÊNDICE CX – Vazões encontradas na Calibração da vazão com gradiente hidráulico
calculado através da equação de Darcy-Weisbach com consumos nodais iniciais de 70
L/s: rede Walski (1983) – Gambale (2000)**

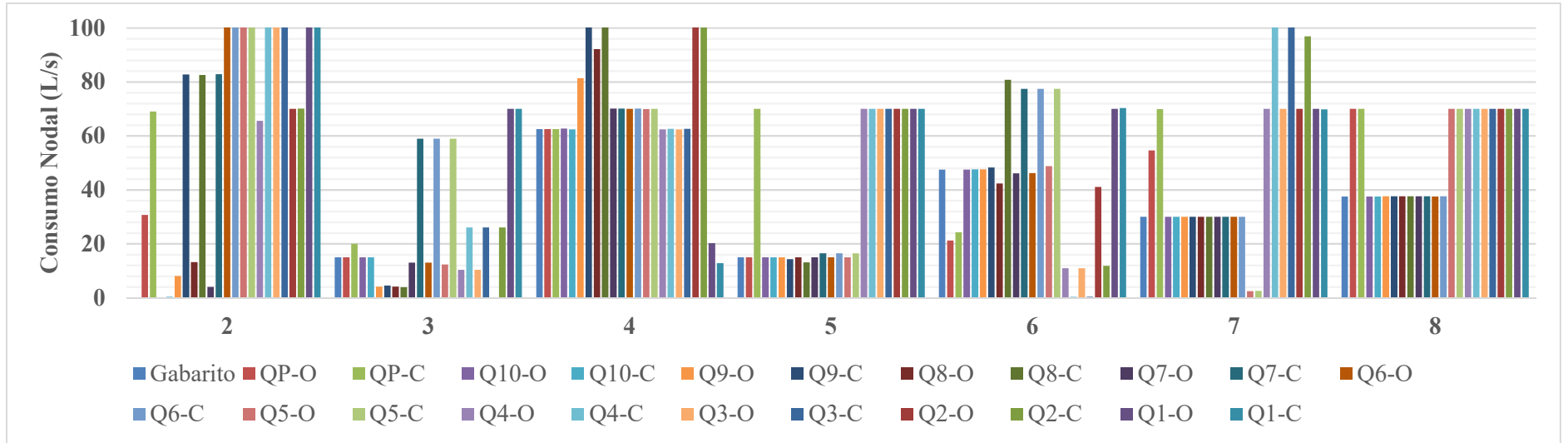


Fonte: Elaborado pelo autor

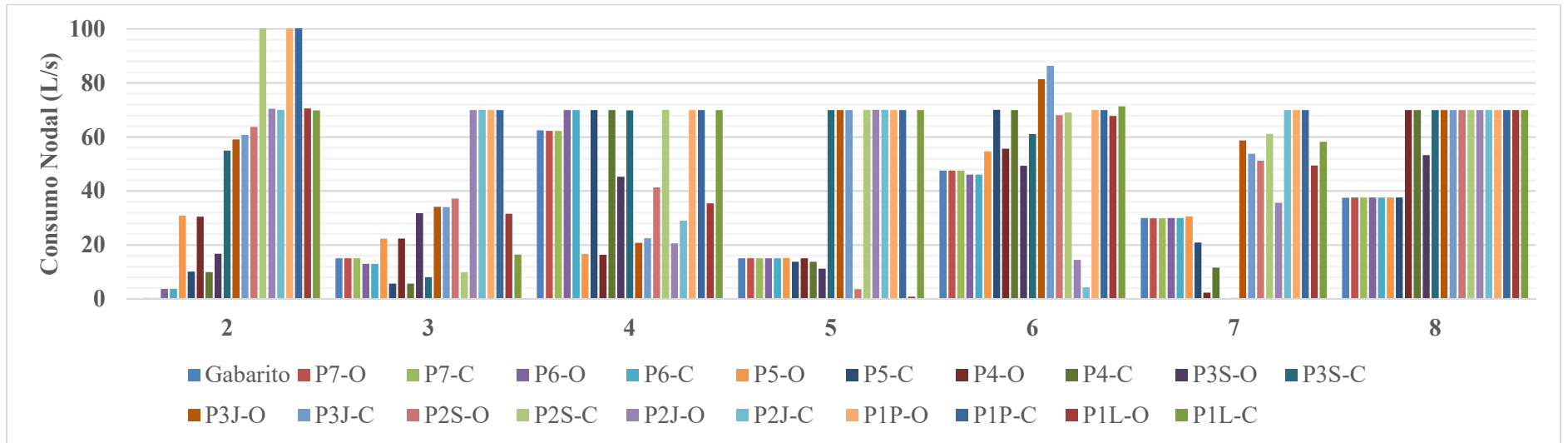


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE CY – Consumos nodais encontrados na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Hazen-Williams com consumos nodais iniciais de 70 L/s: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

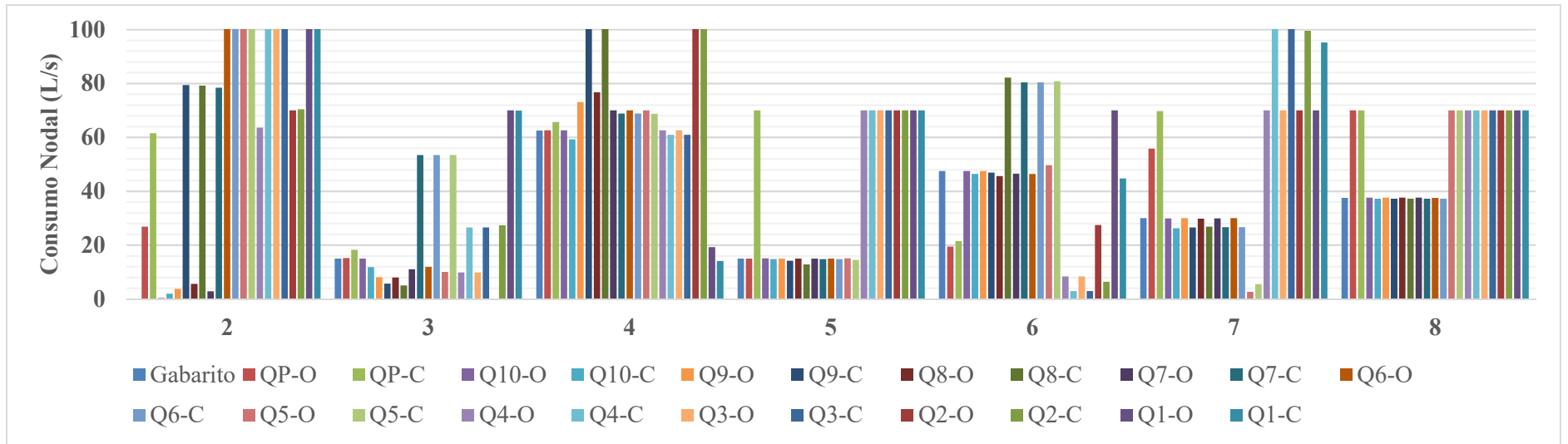


Fonte: Elaborado pelo autor

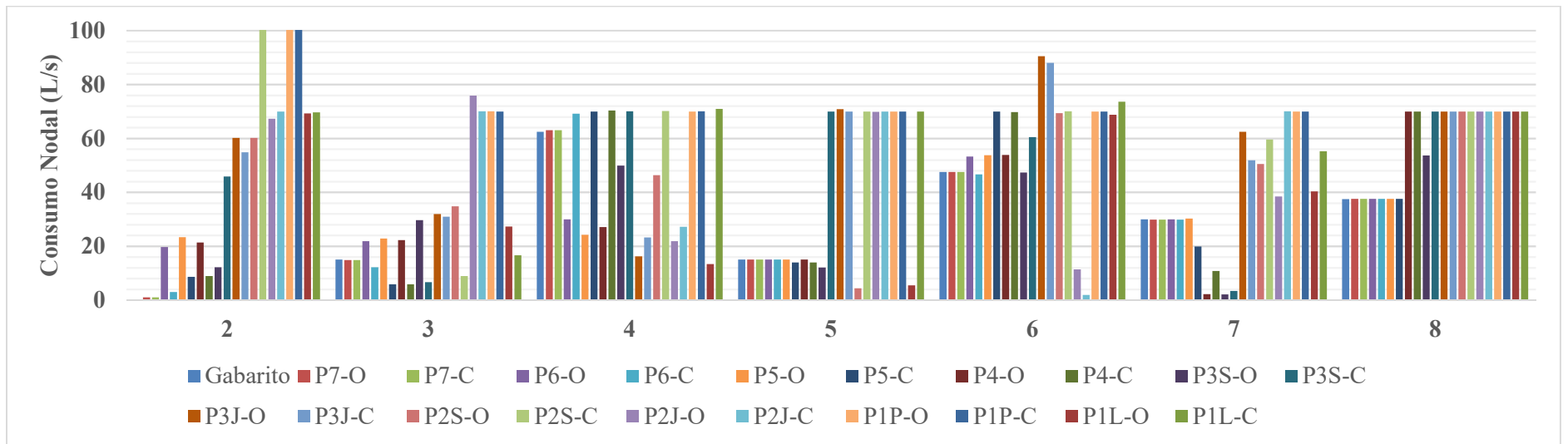


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE CZ – Consumos nodais encontrados na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Darcy-Weisbach com consumos nodais iniciais de 70 L/s: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

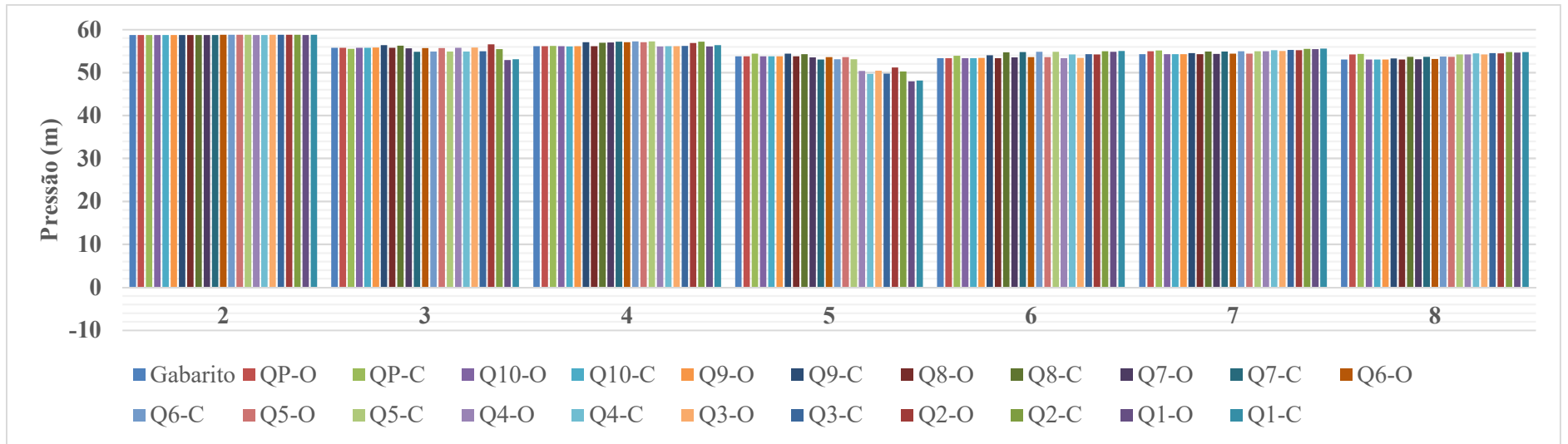


Fonte: Elaborado pelo autor

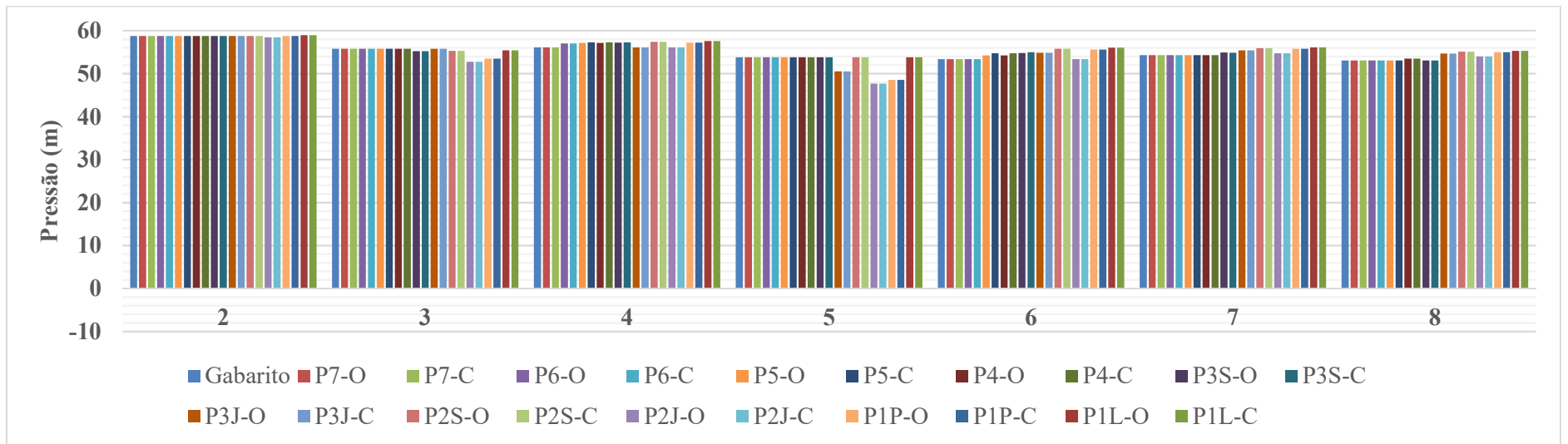


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE DA – Pressões encontradas na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Hazen-Williams com consumos nodais iniciais de 29 L/s: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

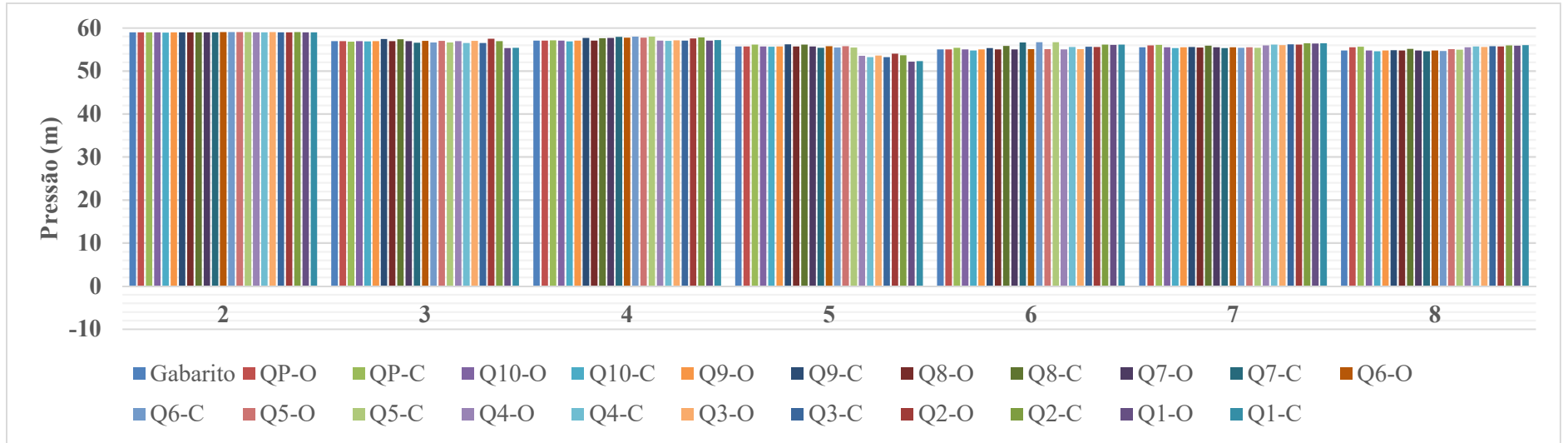


Fonte: Elaborado pelo autor

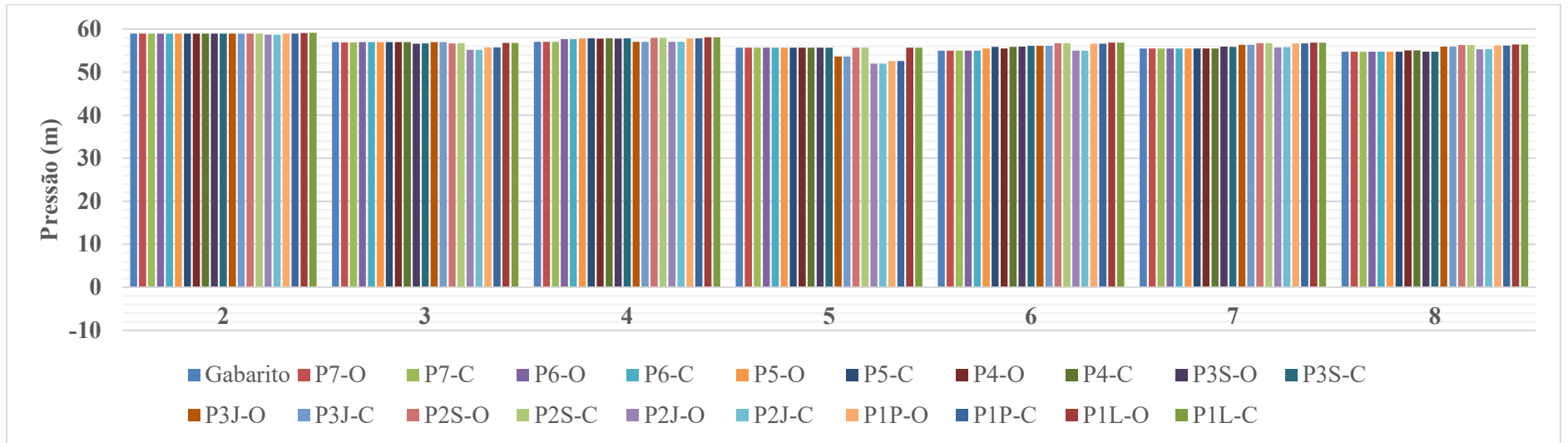


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE DB – Pressões encontradas na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Darcy-Weisbach com consumos nodais iniciais de 29 L/s: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

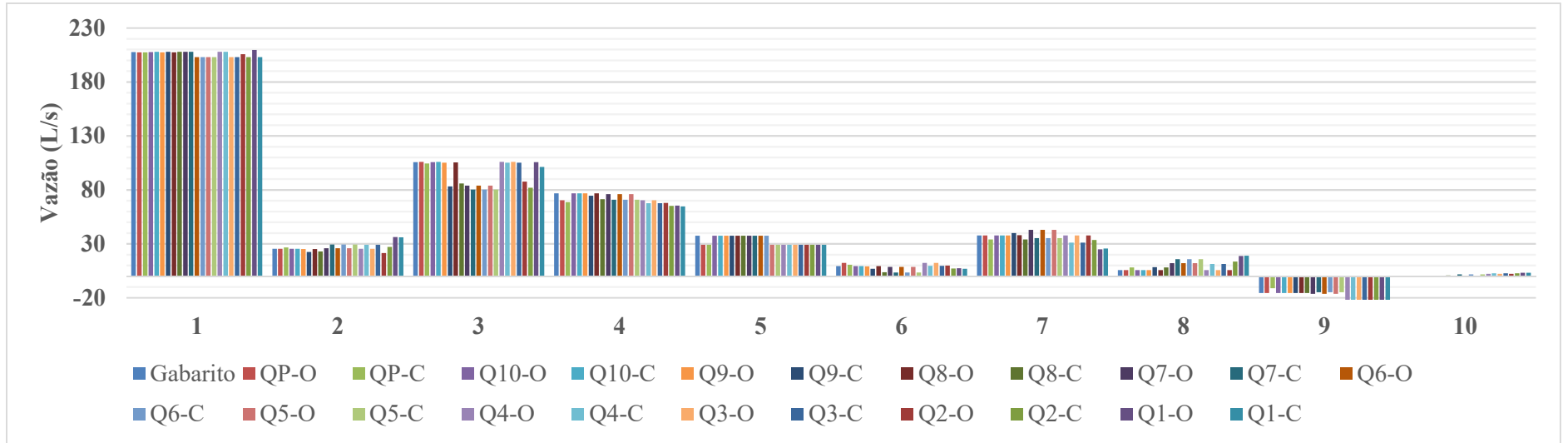


Fonte: Elaborado pelo autor

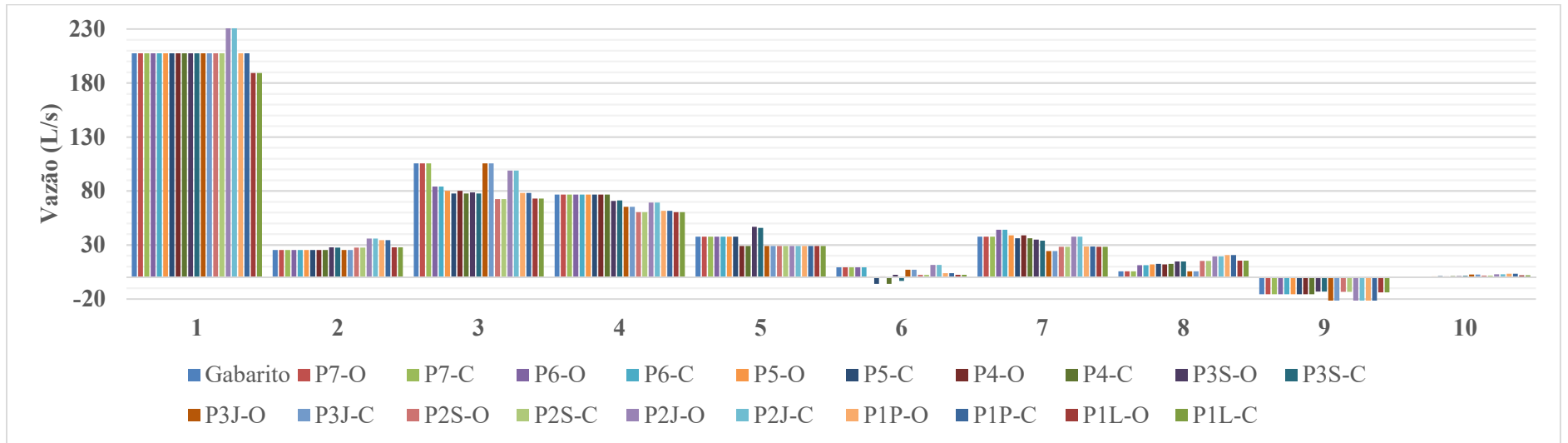


Fonte: Elaborado pelo autor

**APÊNDICE DC – Vazões encontradas na Calibração da vazão com gradiente hidráulico
calculado através da equação de Hazen-Williams com consumos nodais iniciais de 29
L/s: rede Walski (1983) – Gambale (2000)**



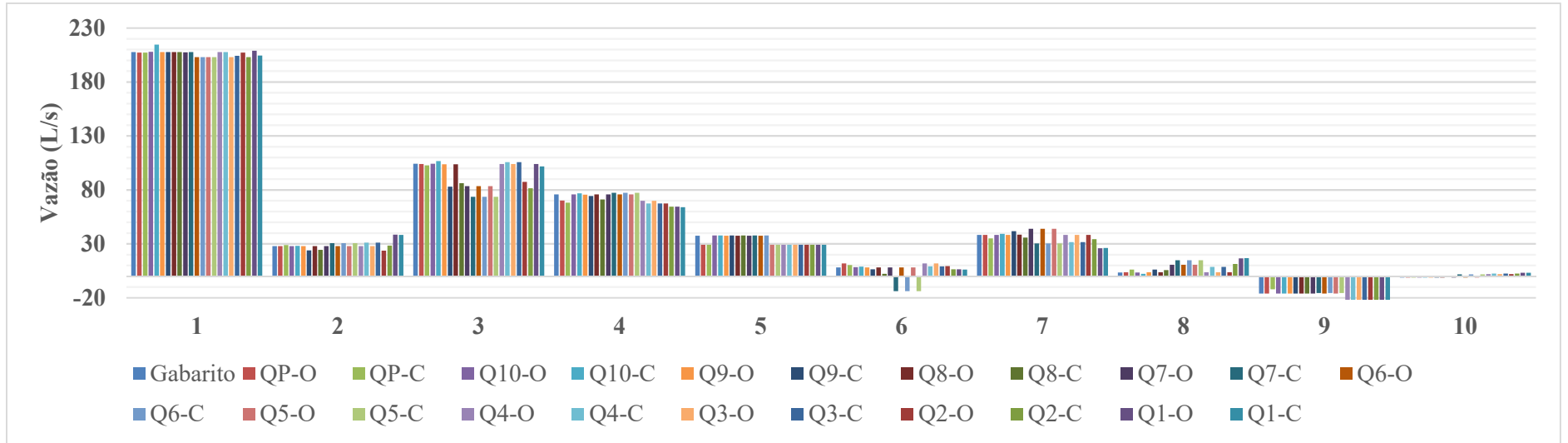
Fonte: Elaborado pelo autor



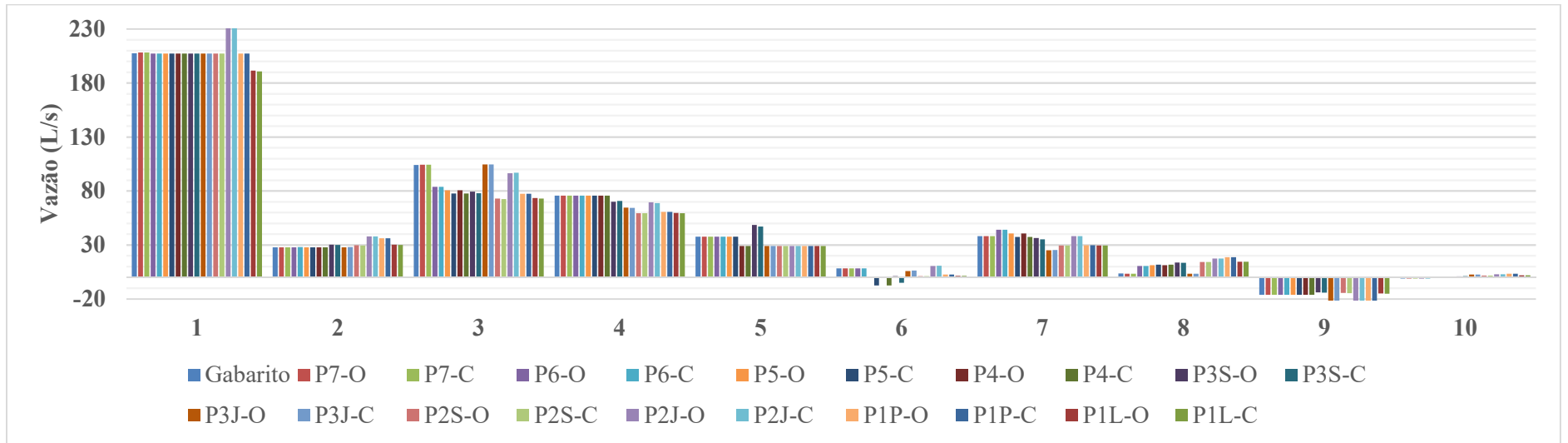
Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE DD – Vazões encontradas na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Darcy-Weisbach com consumos nodais iniciais de 29

L/s: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

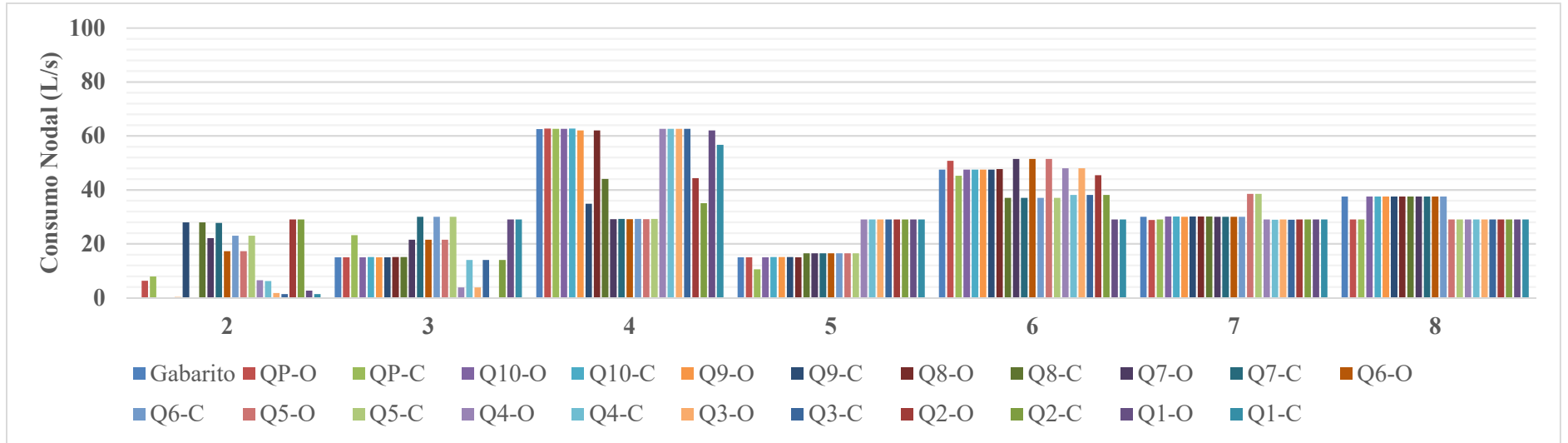


Fonte: Elaborado pelo autor

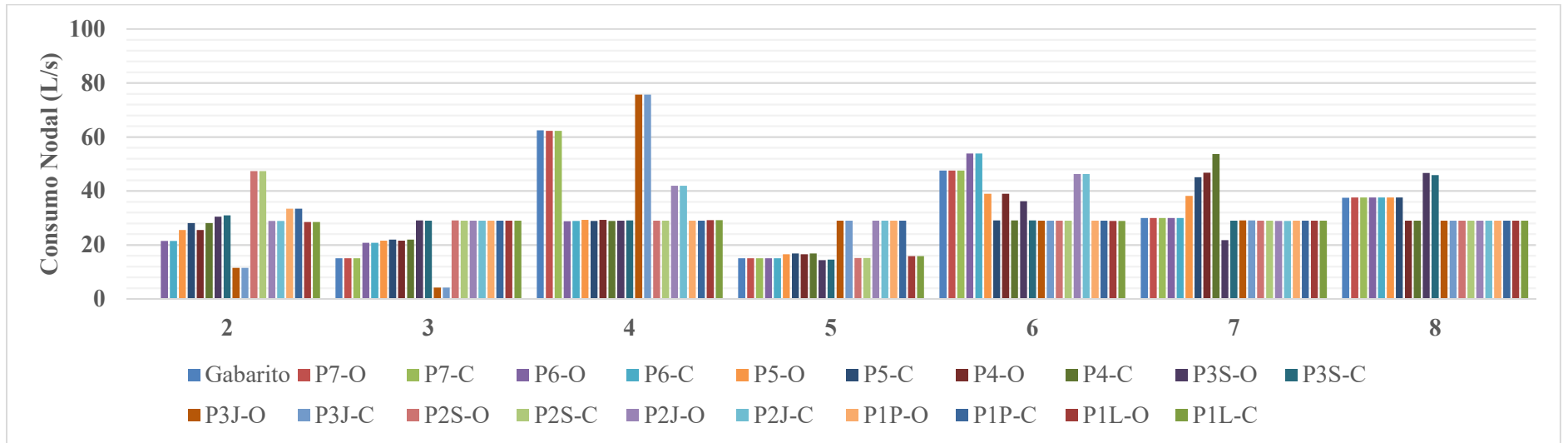


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE DE – Consumos nodais encontrados na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Hazen-Williams com consumos nodais iniciais de 29 L/s: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

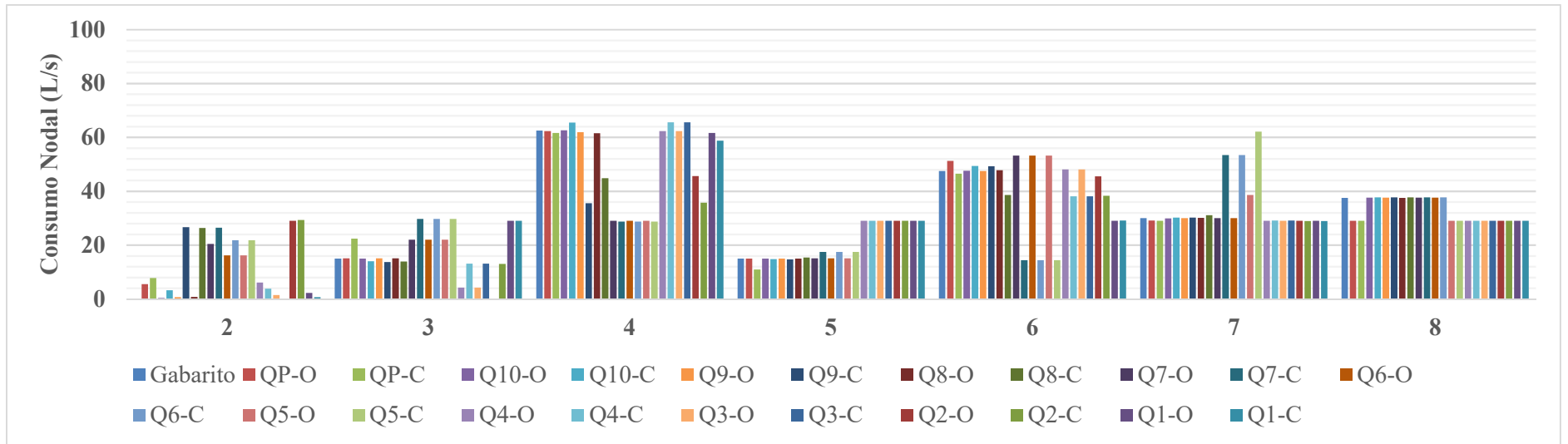


Fonte: Elaborado pelo autor

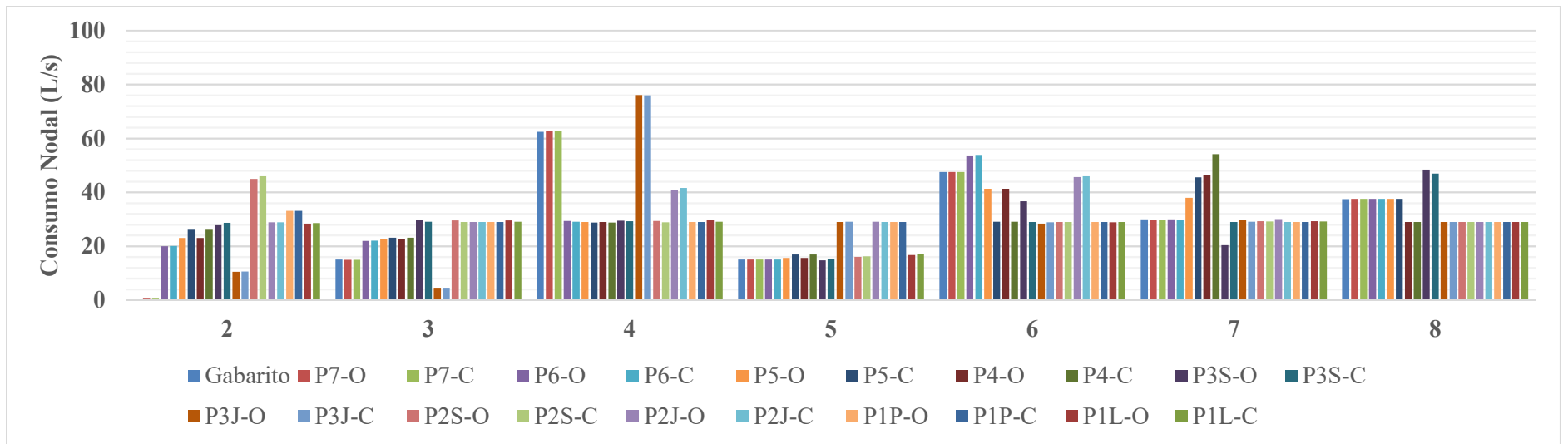


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE DF – Consumos nodais encontrados na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Darcy-Weisbach com consumos nodais iniciais de 29 L/s: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

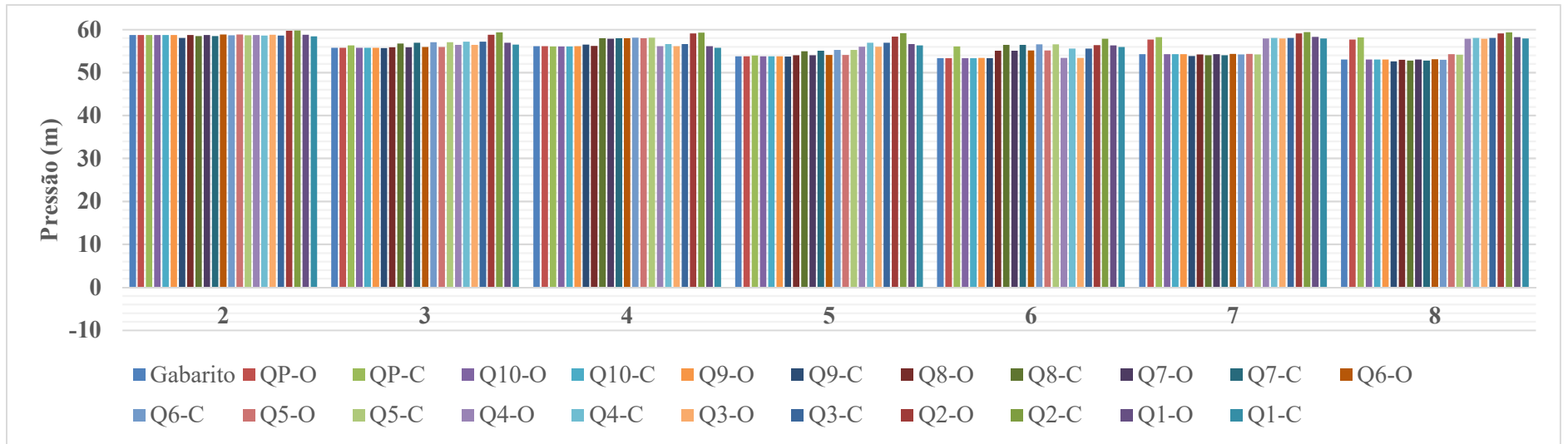


Fonte: Elaborado pelo autor

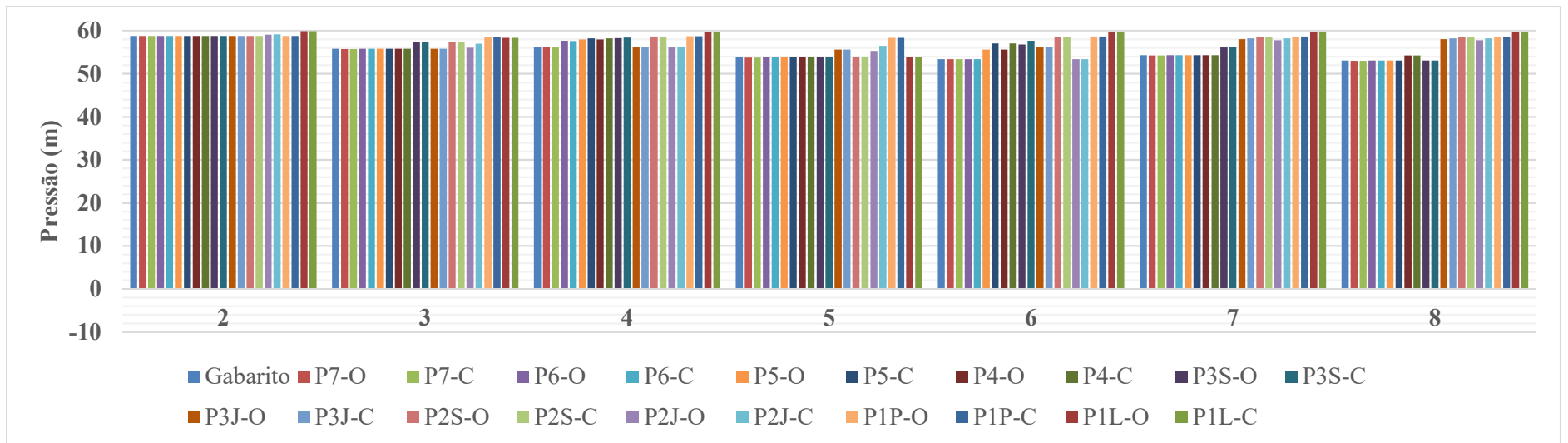


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE DG – Pressões encontradas na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Hazen-Williams com consumos nodais iniciais de 5 L/s: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

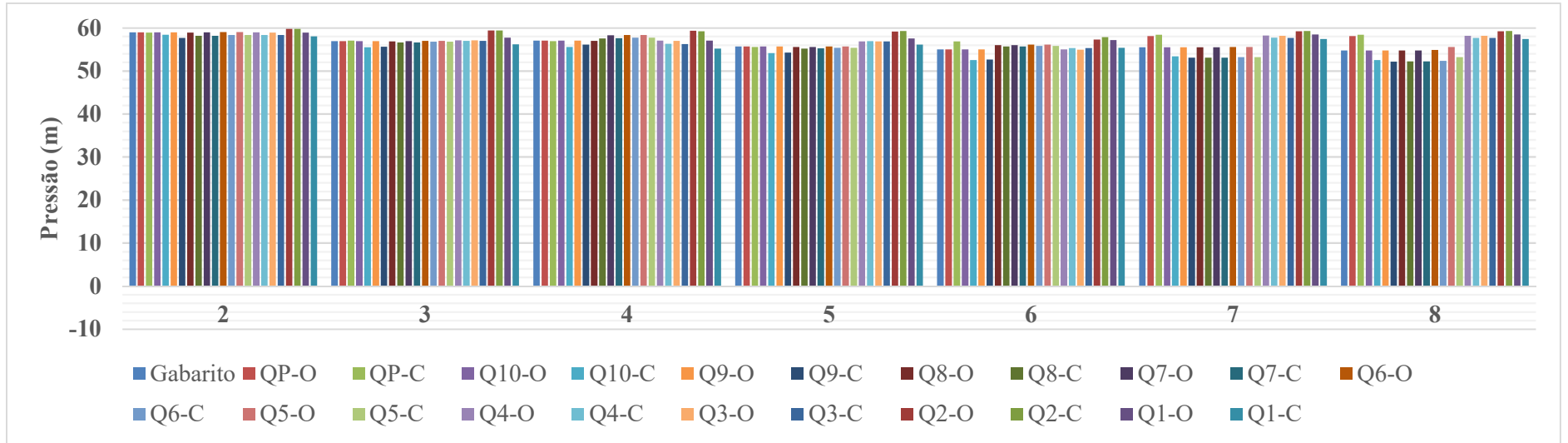


Fonte: Elaborado pelo autor

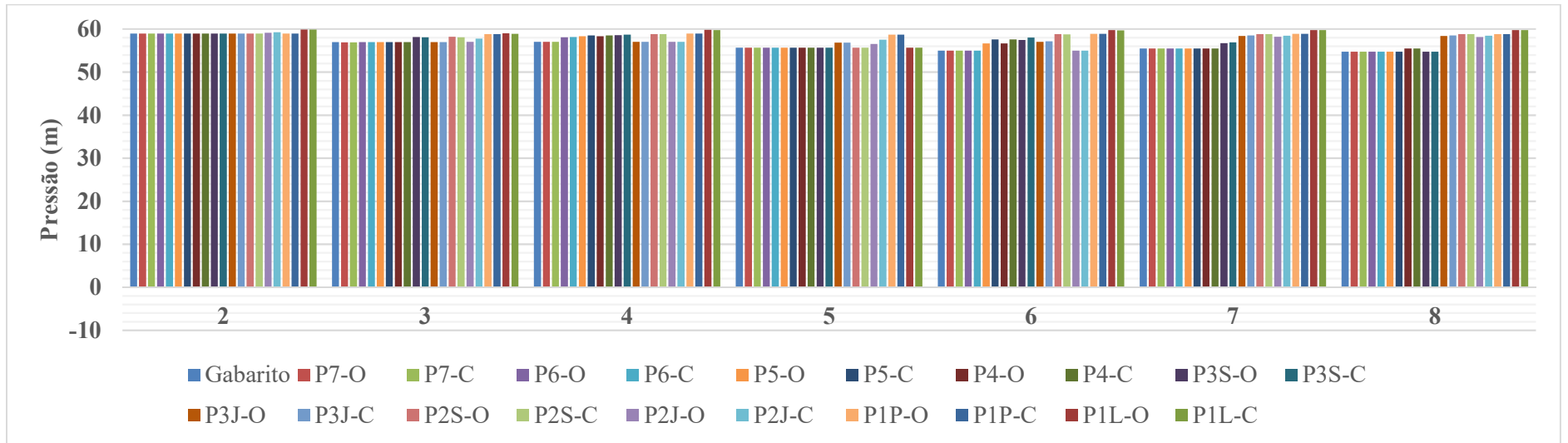


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE DH – Pressões encontradas na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Darcy-Weisbach com consumos nodais iniciais de 5 L/s: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

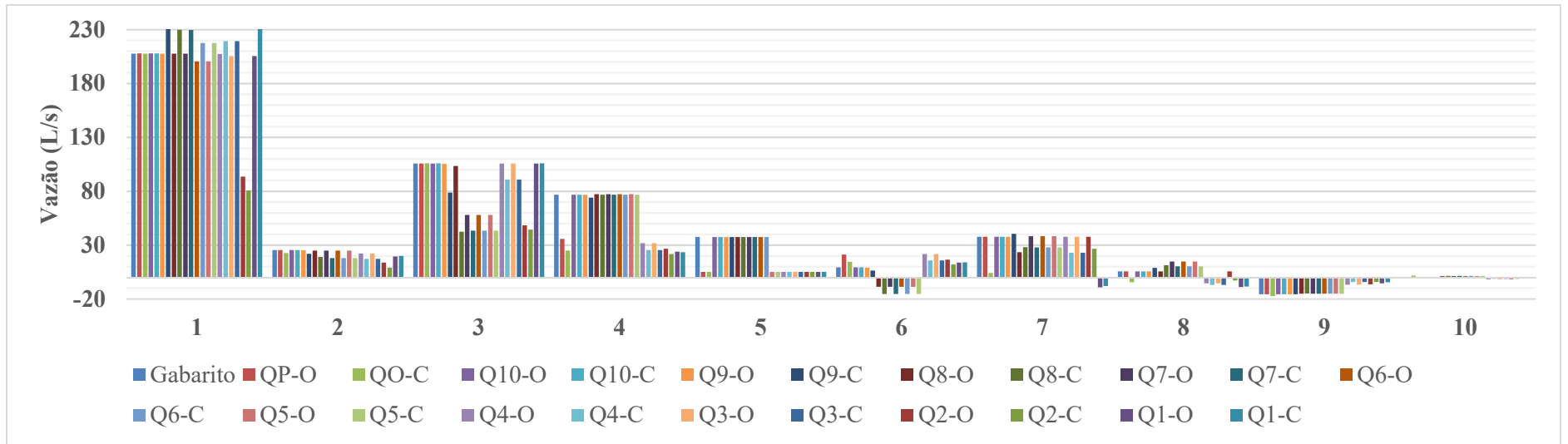


Fonte: Elaborado pelo autor

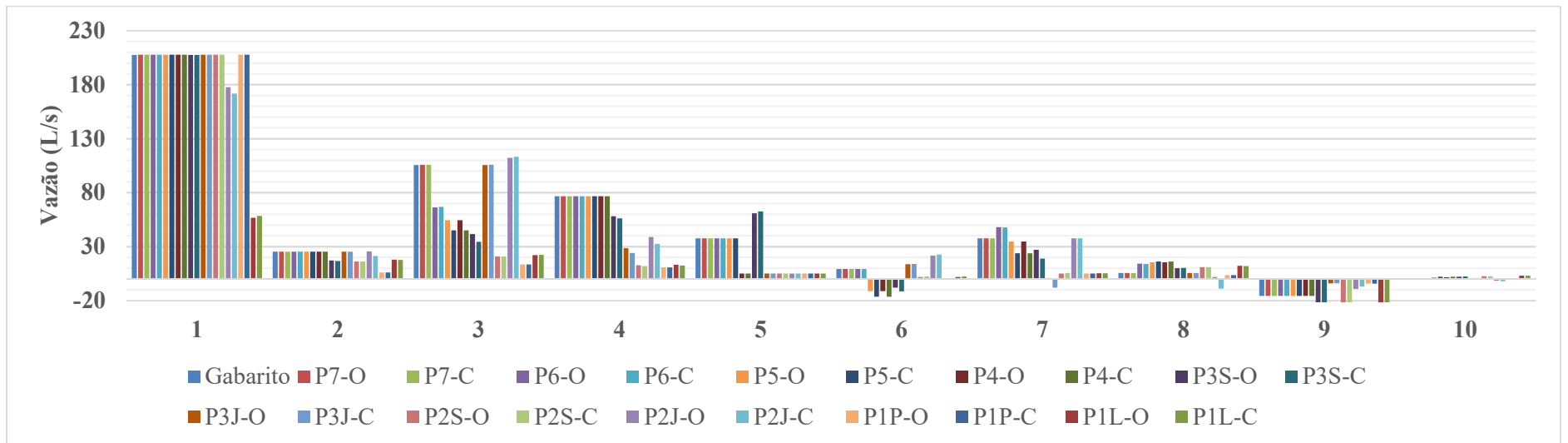


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE DI – Vazões encontradas na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Hazen-Williams com consumos nodais iniciais de 5 L/s: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

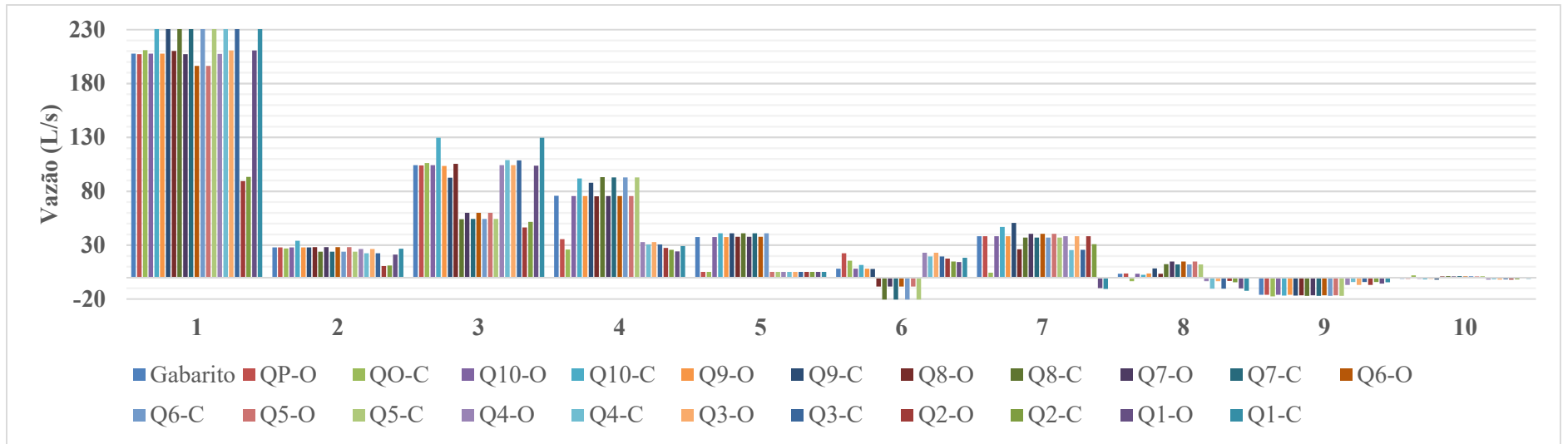


Fonte: Elaborado pelo autor

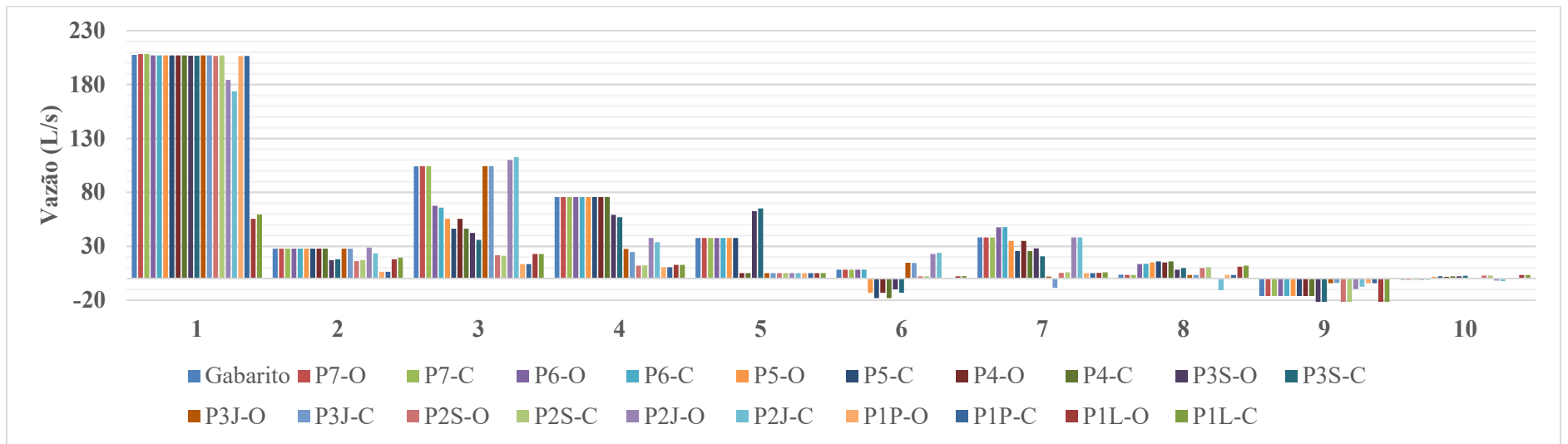


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE DJ – Vazões encontradas na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Darcy-Weisbach com consumos nodais iniciais de 5 L/s: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

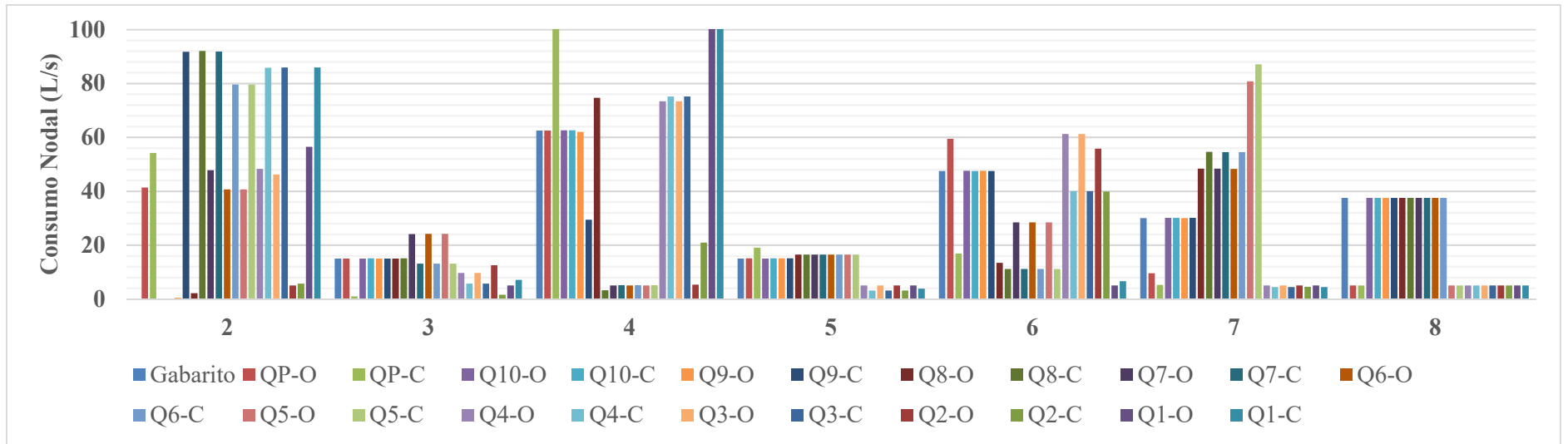


Fonte: Elaborado pelo autor

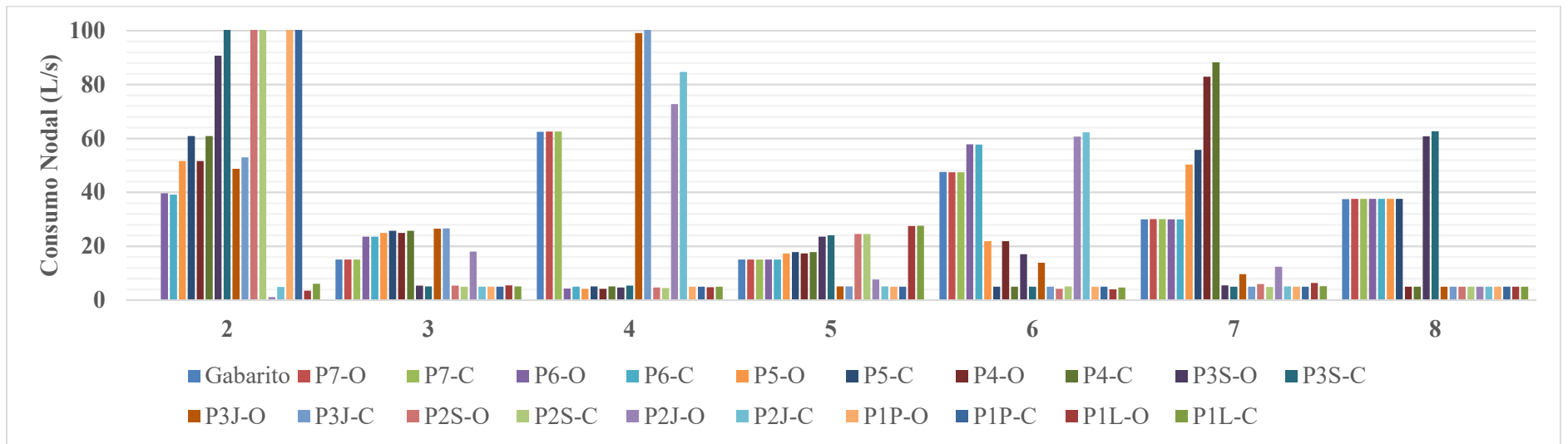


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE DK – Consumos nodais encontrados na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Hazen-Williams com consumos nodais iniciais de 5 L/s: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

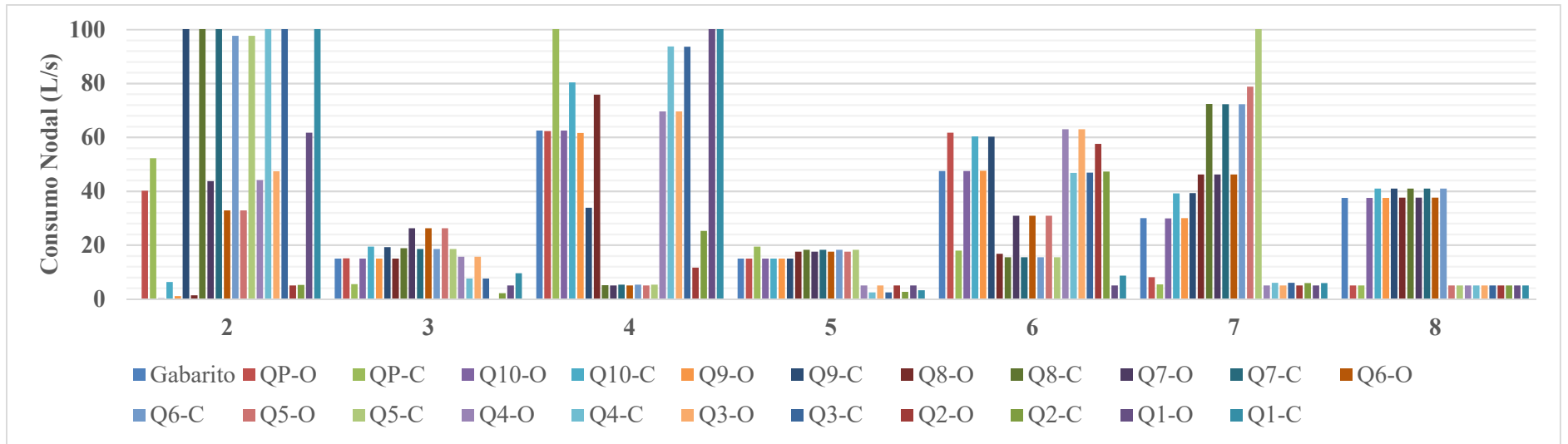


Fonte: Elaborado pelo autor

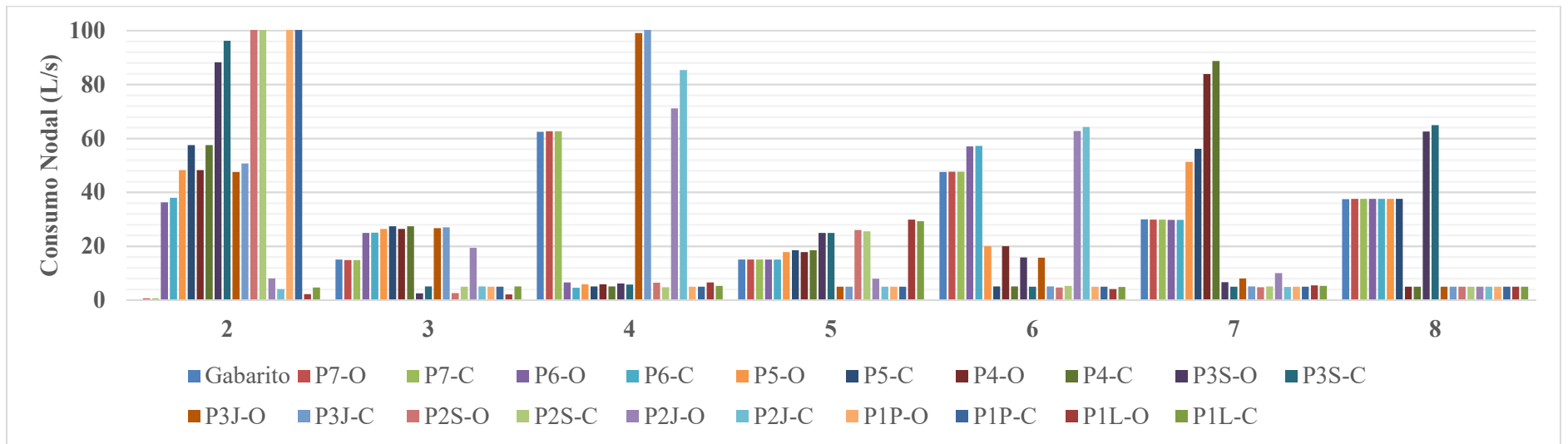


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE DL – Consumos nodais encontrados na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Darcy-Weisbach com consumos nodais iniciais de 5 L/s: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

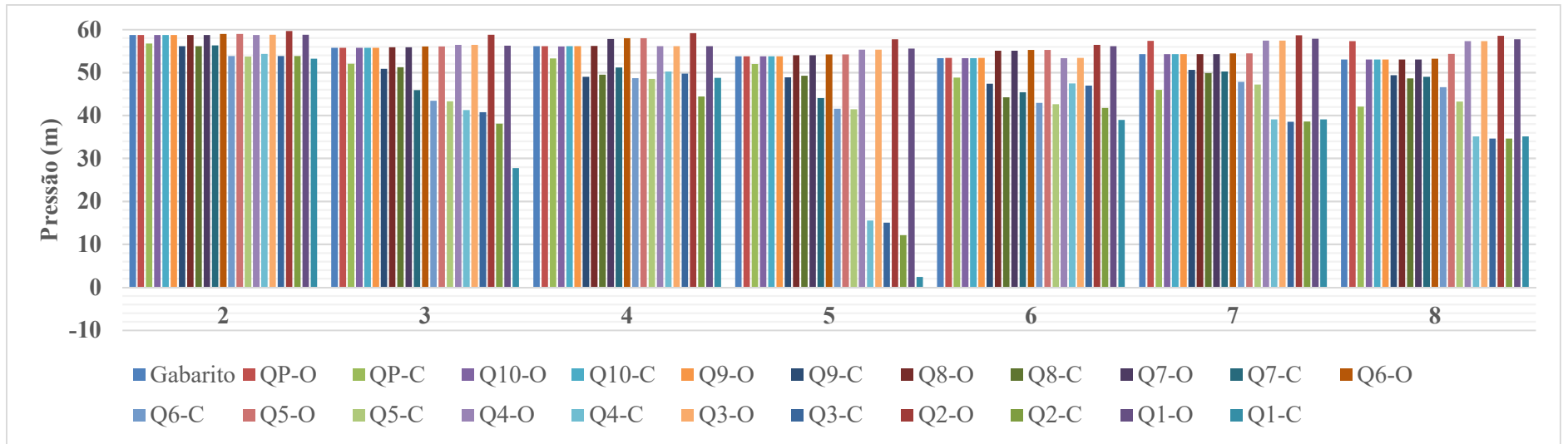


Fonte: Elaborado pelo autor

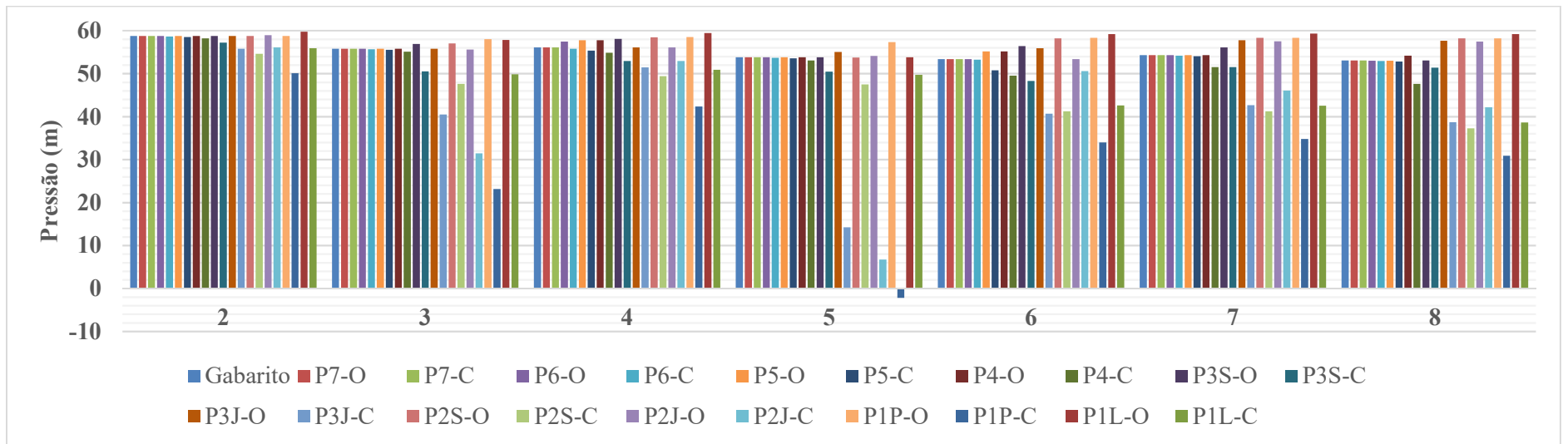


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE DM – Pressões encontradas na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Hazen-Williams com consumos nodais iniciais calculados com uso da sub-rotina computacional: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

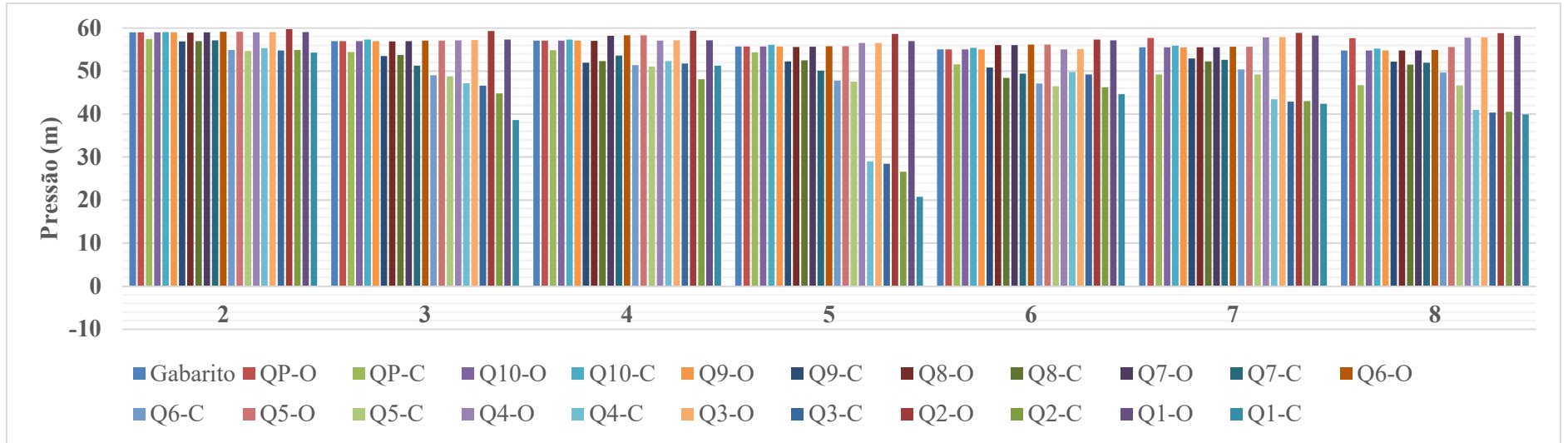


Fonte: Elaborado pelo autor

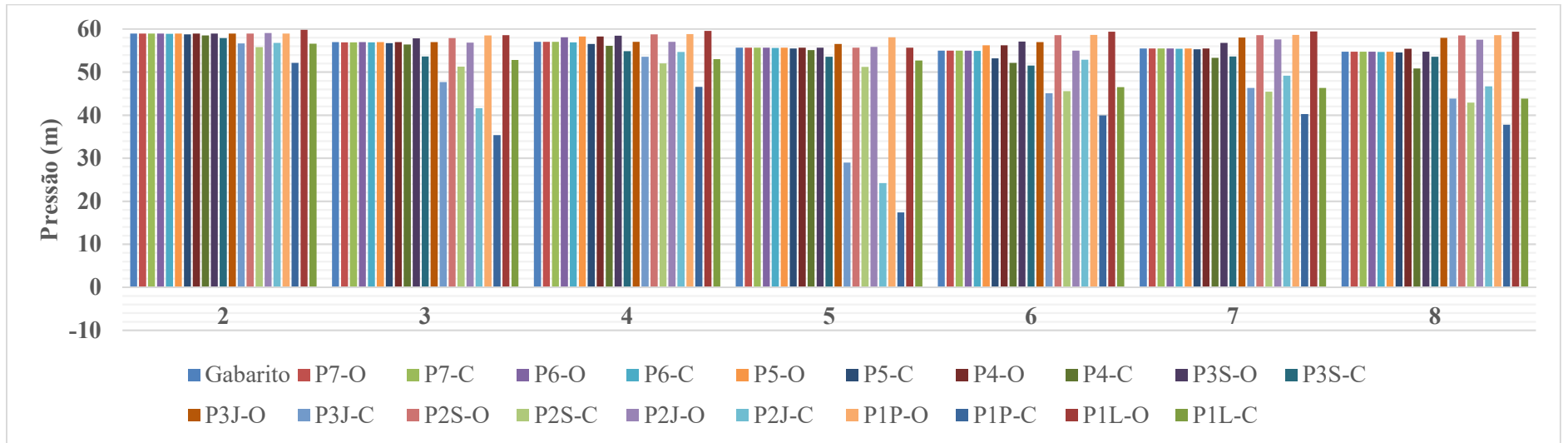


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE DN – Pressões encontradas na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Darcy-Weisbach com consumos nodais iniciais calculados com uso da sub-rotina computacional: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

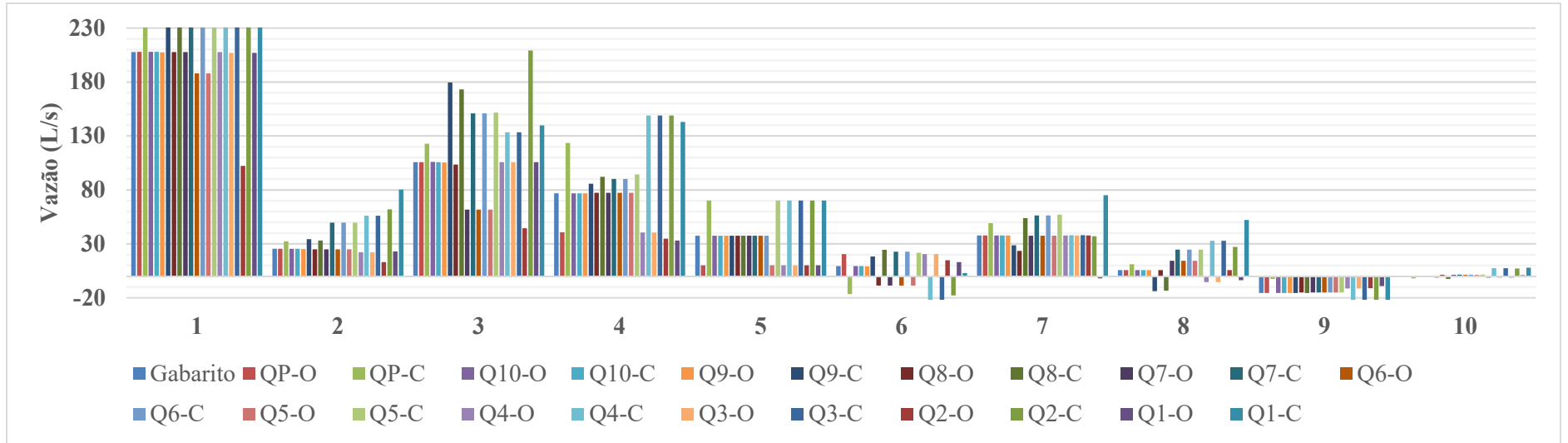


Fonte: Elaborado pelo autor

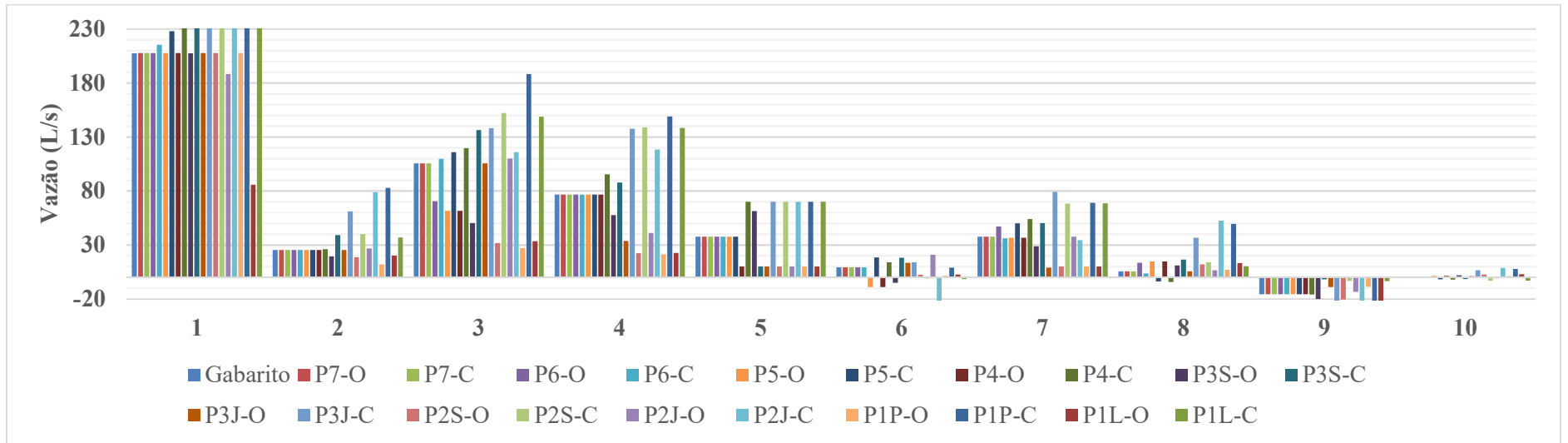


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE DO – Vazões encontradas na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Hazen-Williams com consumos nodais iniciais calculados com uso da sub-rotina computacional: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

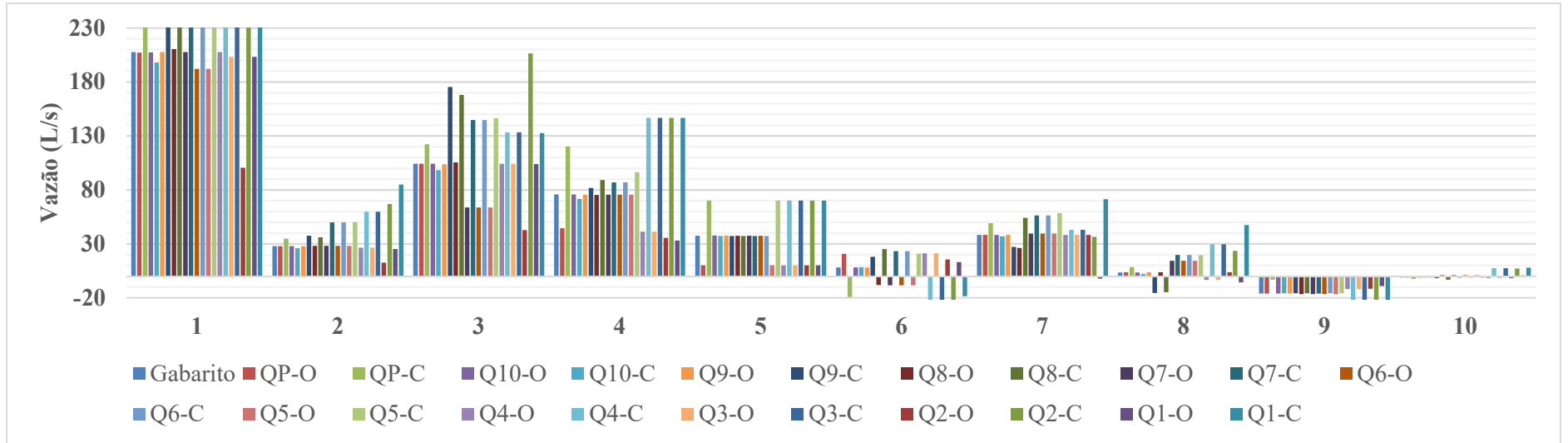


Fonte: Elaborado pelo autor

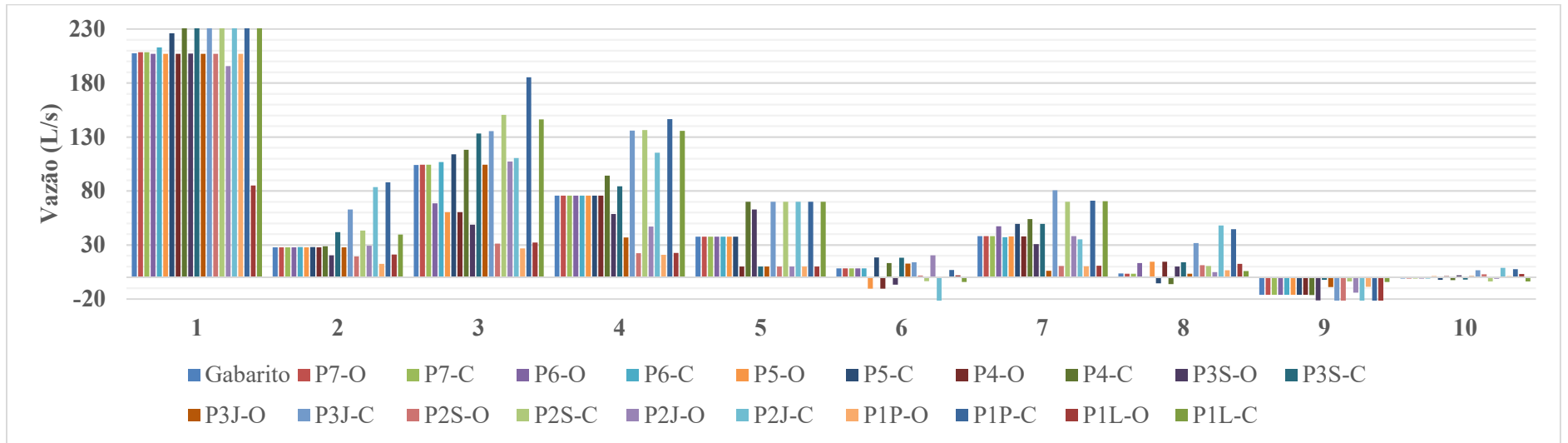


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE DP – Vazões encontradas na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Darcy-Weisbach com consumos nodais iniciais calculados com uso da sub-rotina computacional: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

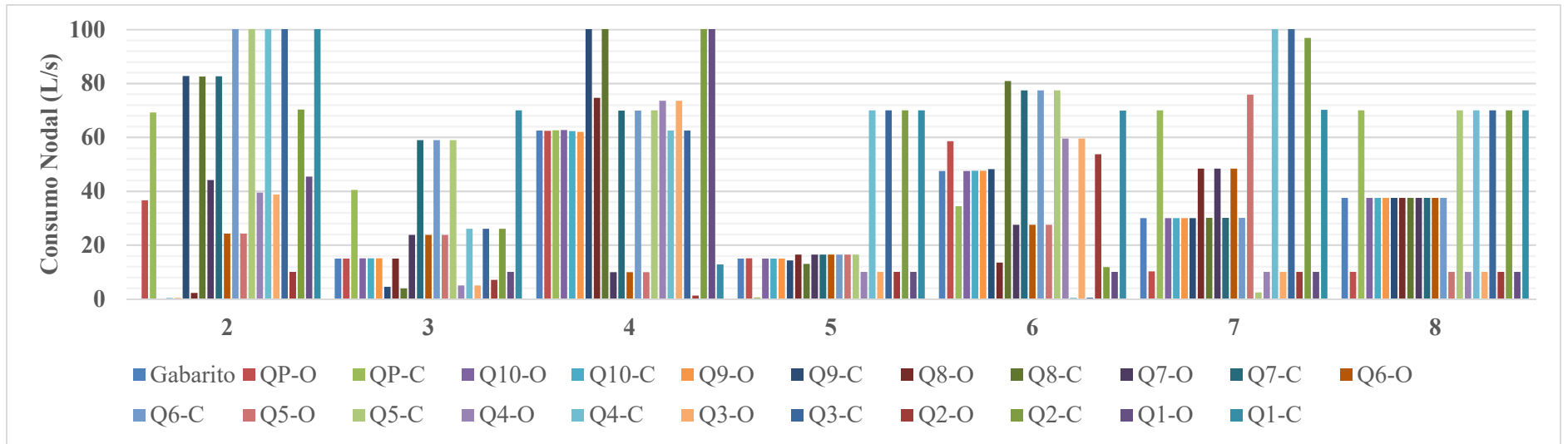


Fonte: Elaborado pelo autor

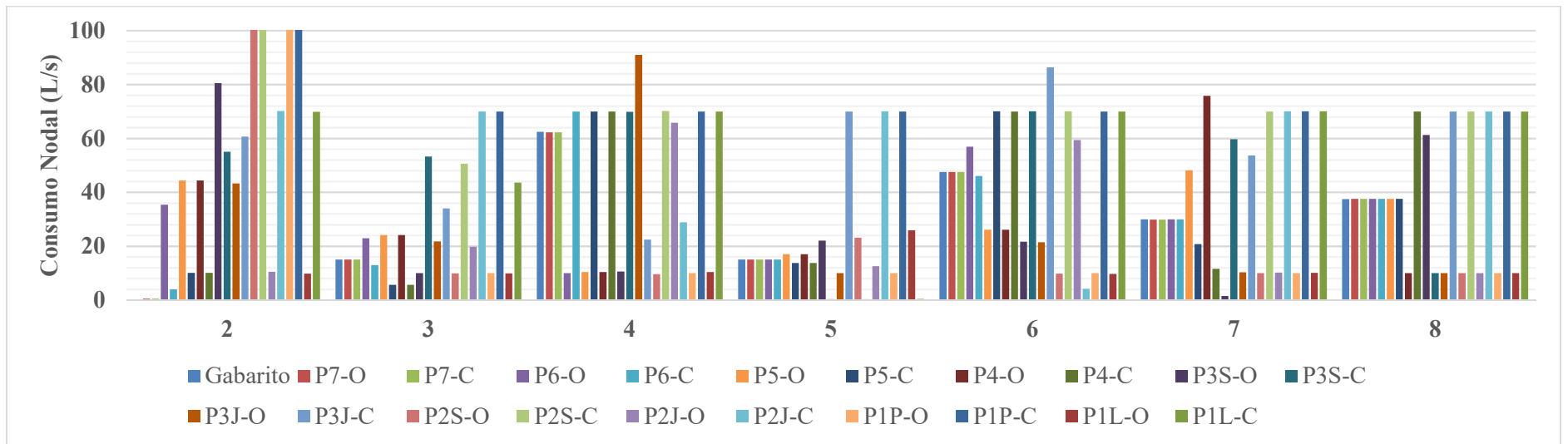


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE DQ – Consumos nodais encontrados na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Hazen-Williams com consumos nodais iniciais calculados com uso da sub-rotina computacional: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

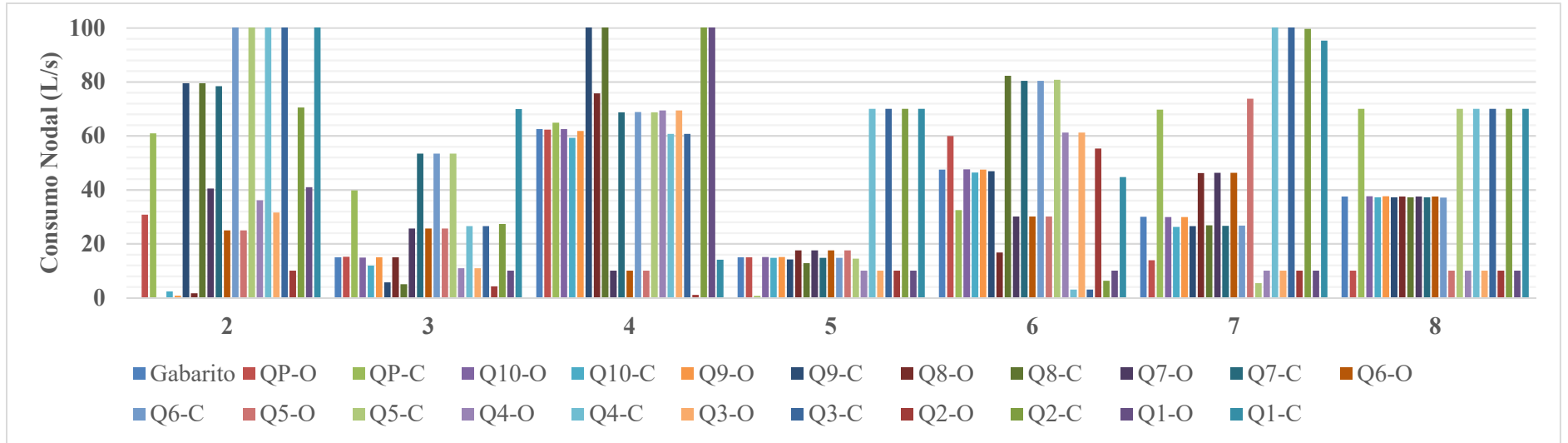


Fonte: Elaborado pelo autor

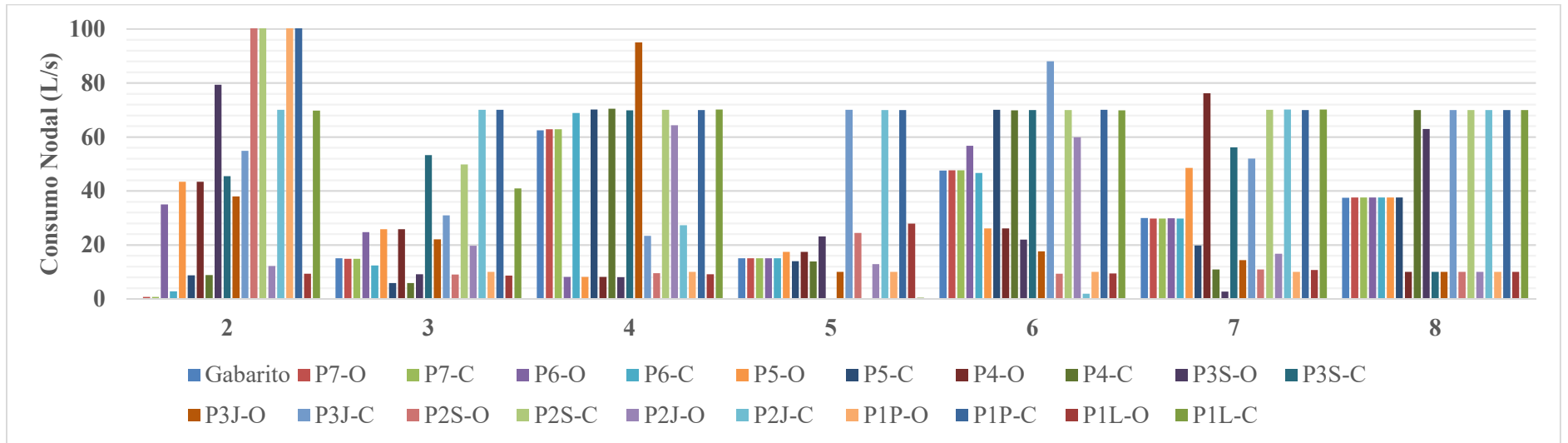


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE DR – Consumos nodais encontrados na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Darcy-Weisbach com consumos nodais iniciais calculados com uso da sub-rotina computacional: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

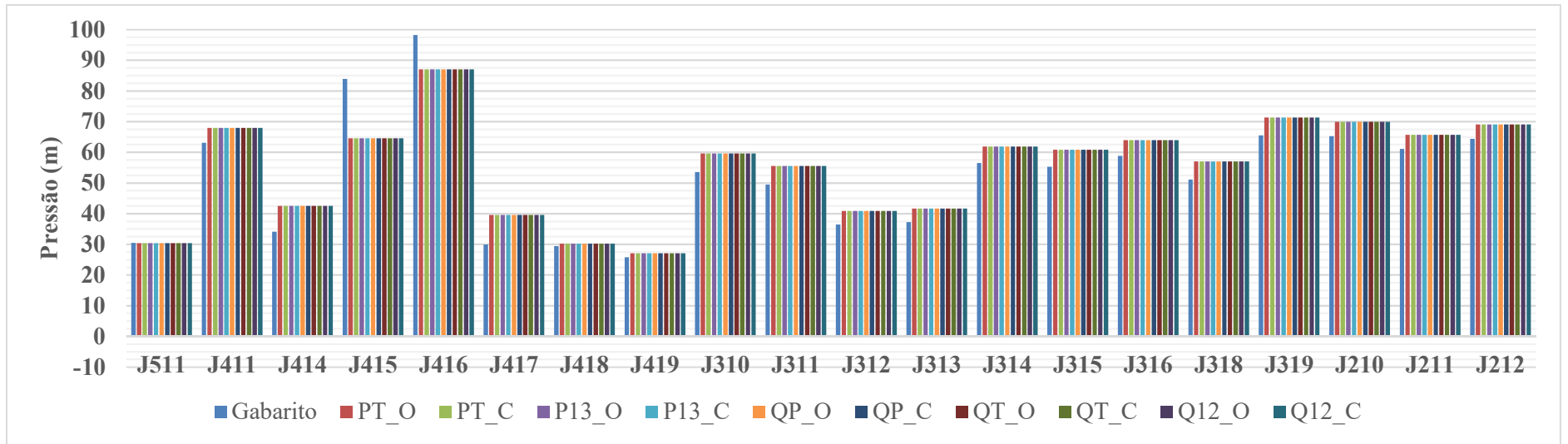


Fonte: Elaborado pelo autor

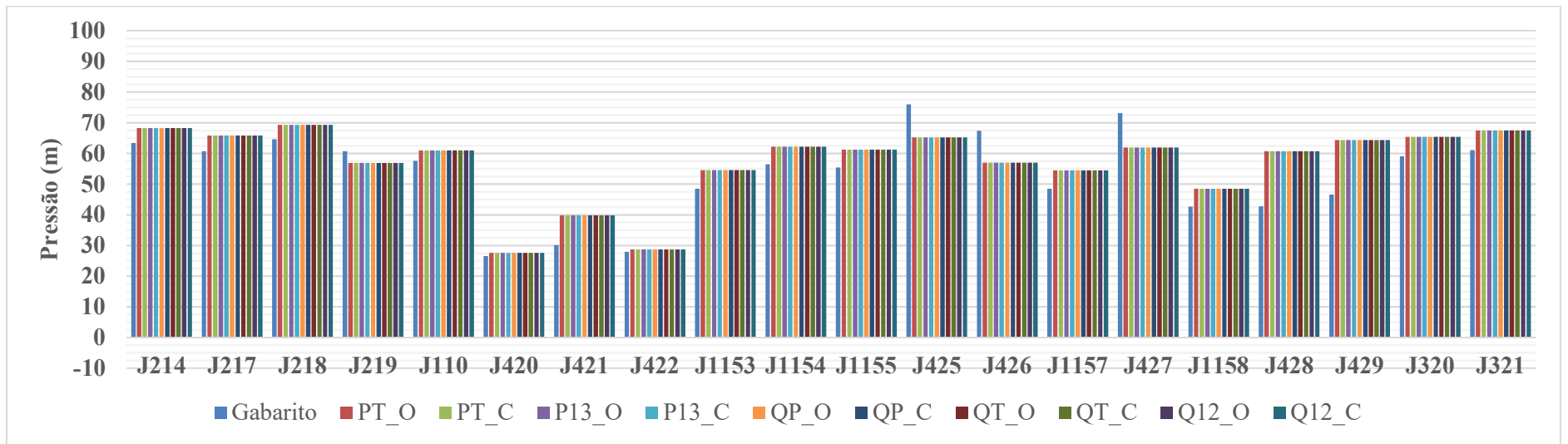


Fonte: Elaborado pelo autor

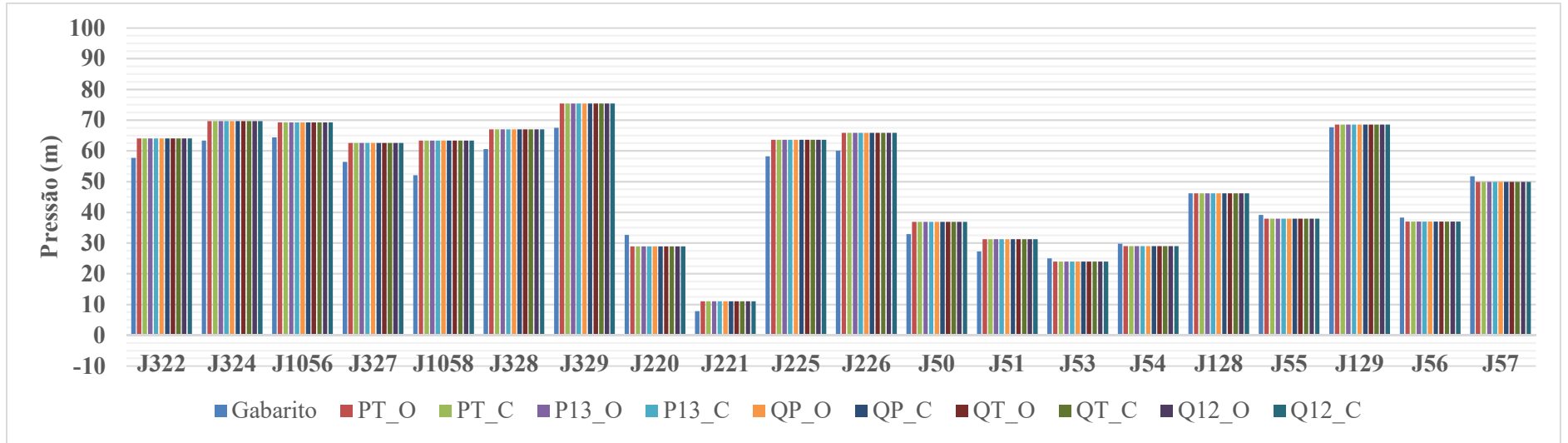
**APÊNDICE DS – Pressões encontradas na Calibração da vazão com gradiente
hidráulico calculado através da equação de Hazen-Williams com consumos nodais
iniciais de 1 L/s: rede C-Town**



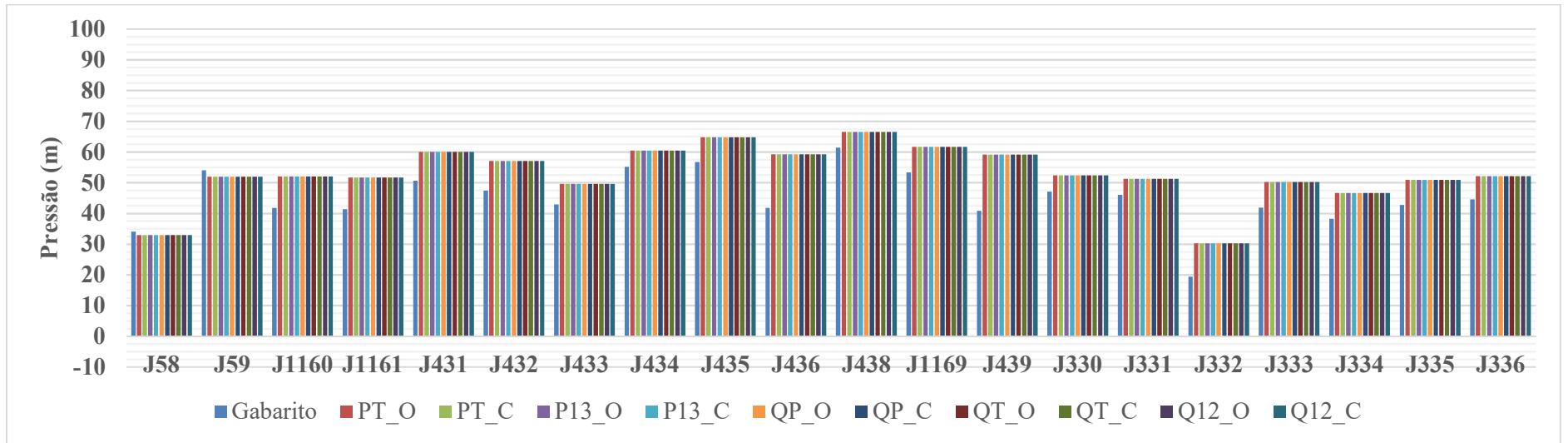
Fonte: Elaborado pelo autor



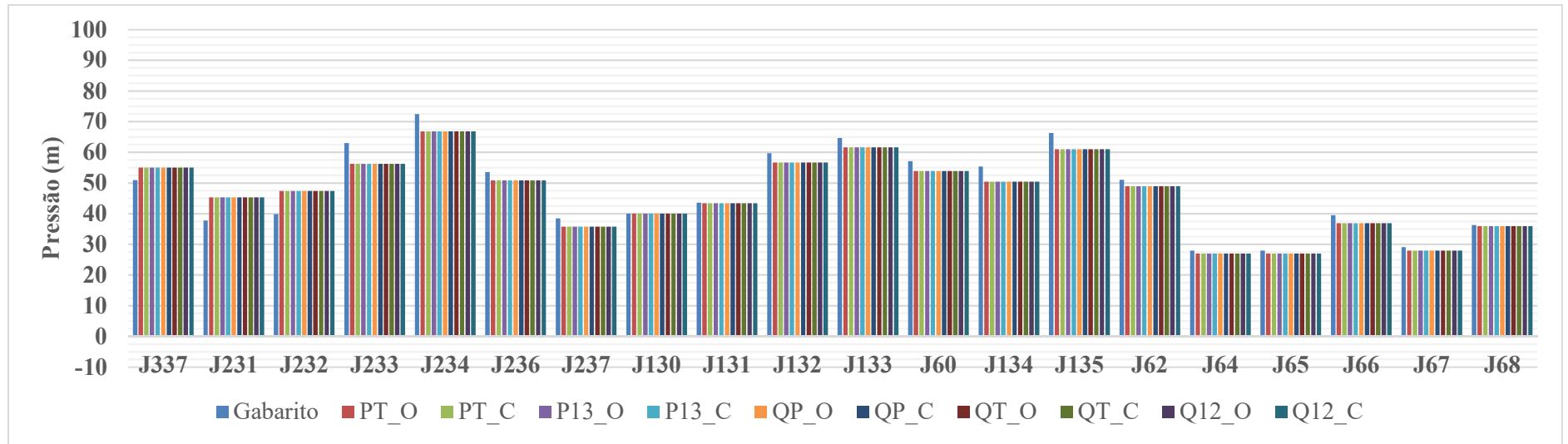
Fonte: Elaborado pelo autor



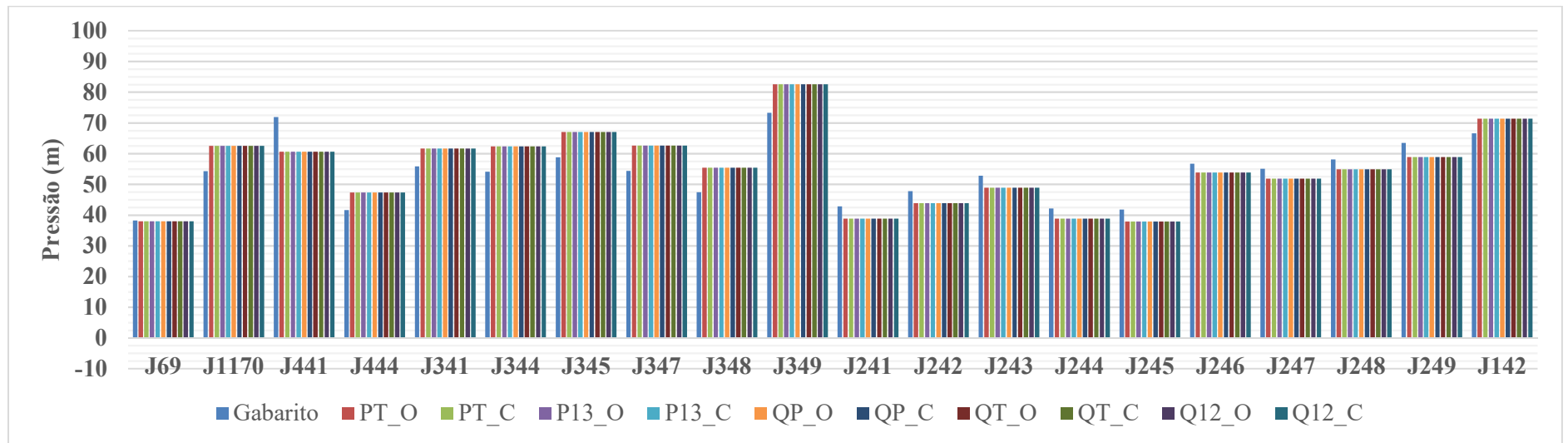
Fonte: Elaborado pelo autor



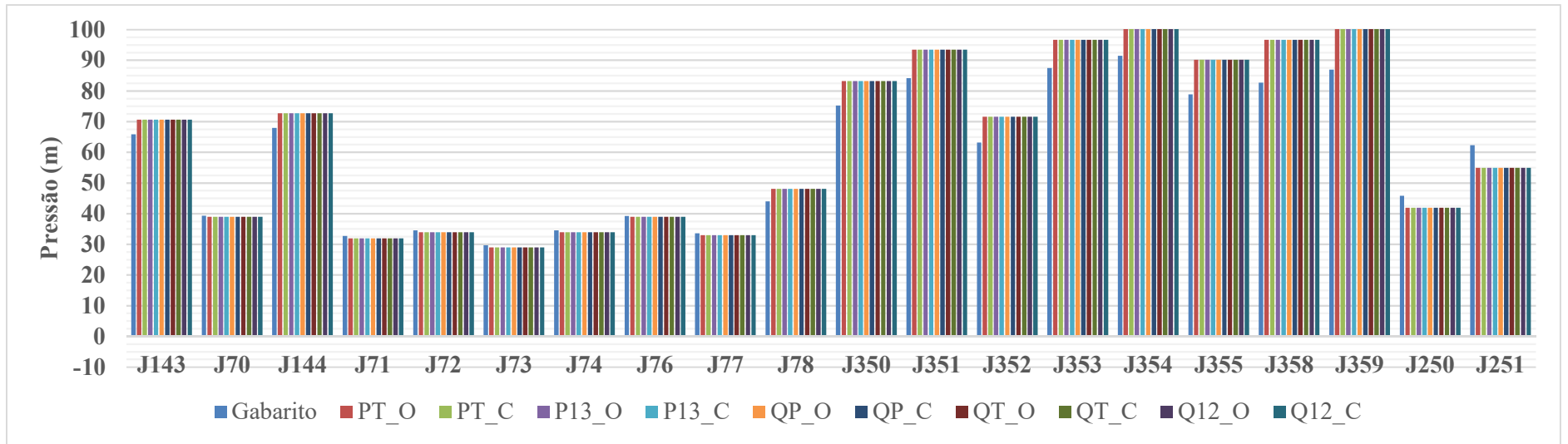
Fonte: Elaborado pelo autor



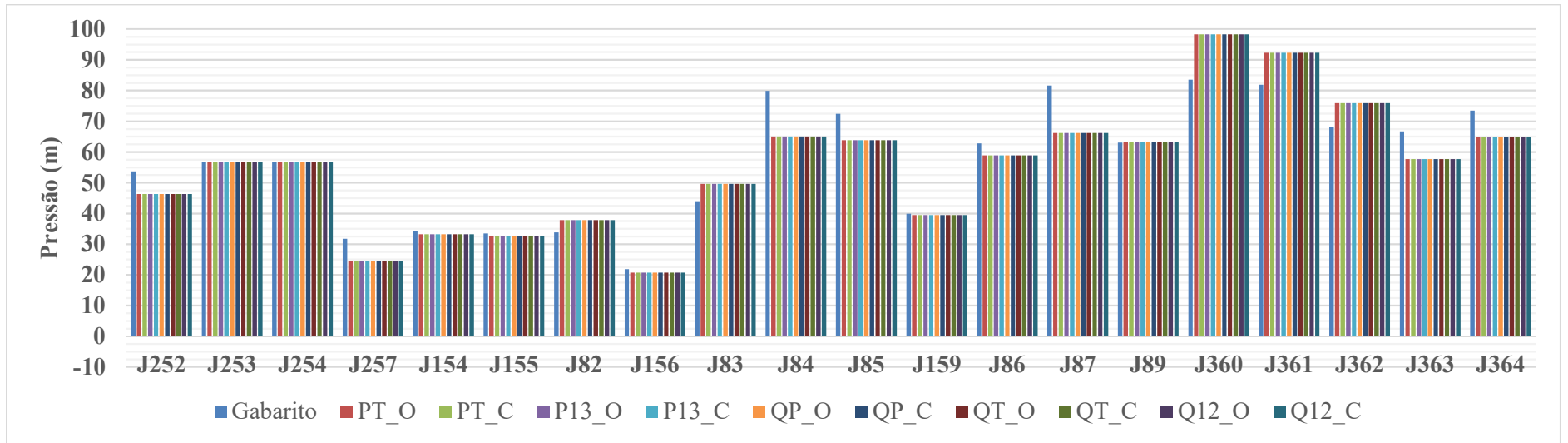
Fonte: Elaborado pelo autor



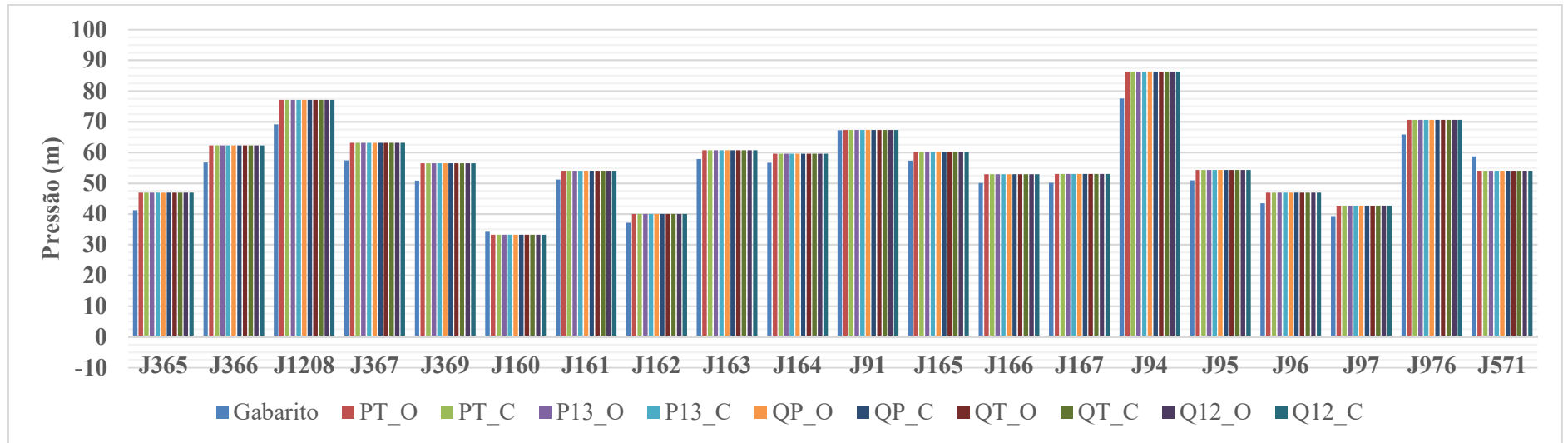
Fonte: Elaborado pelo autor



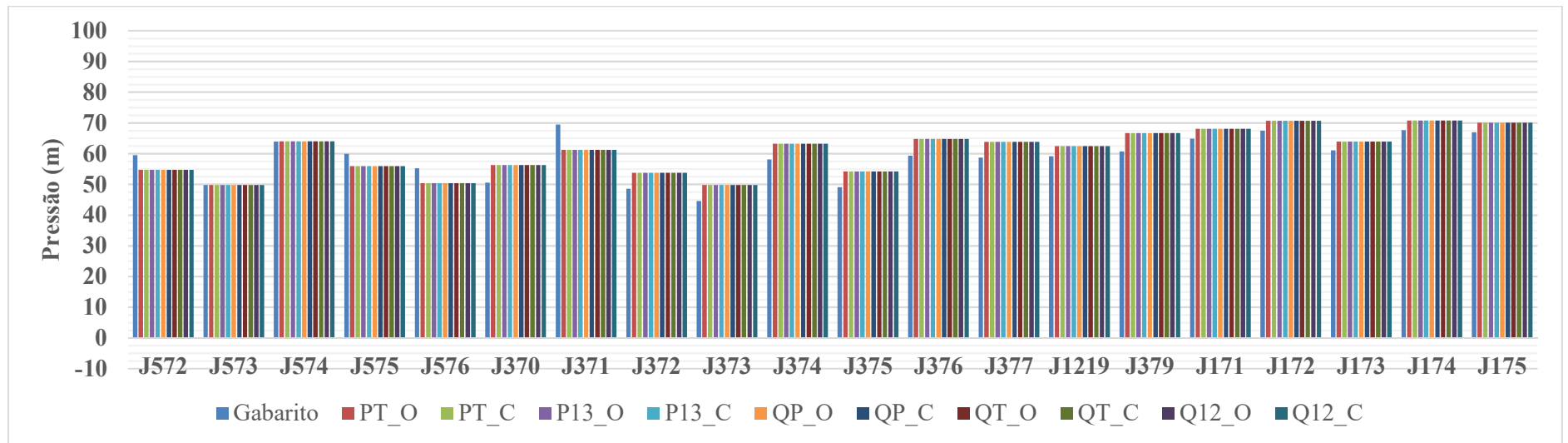
Fonte: Elaborado pelo autor



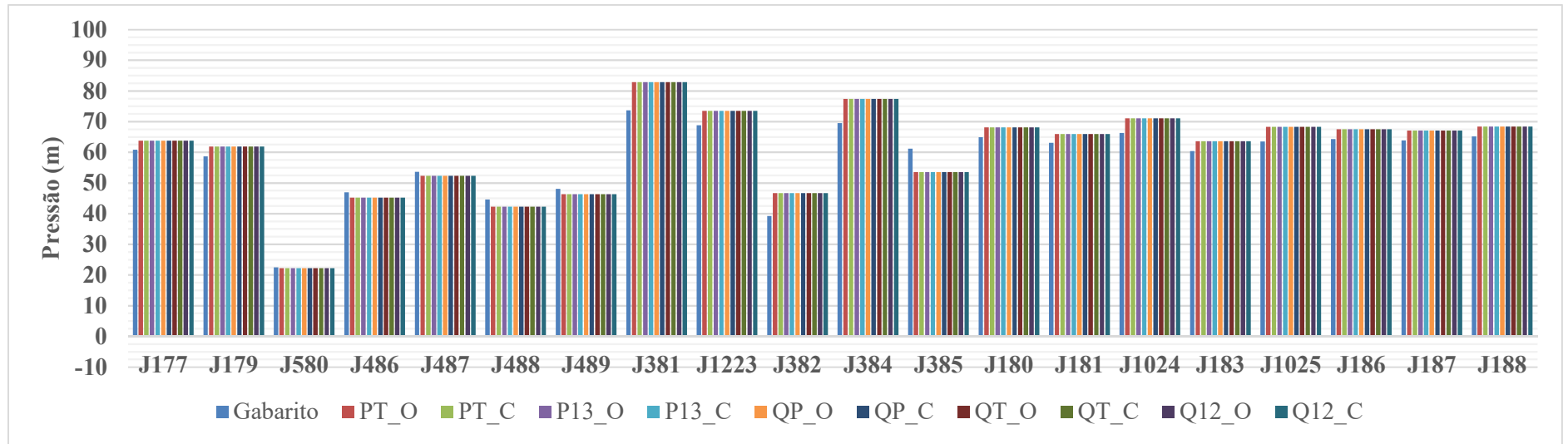
Fonte: Elaborado pelo autor



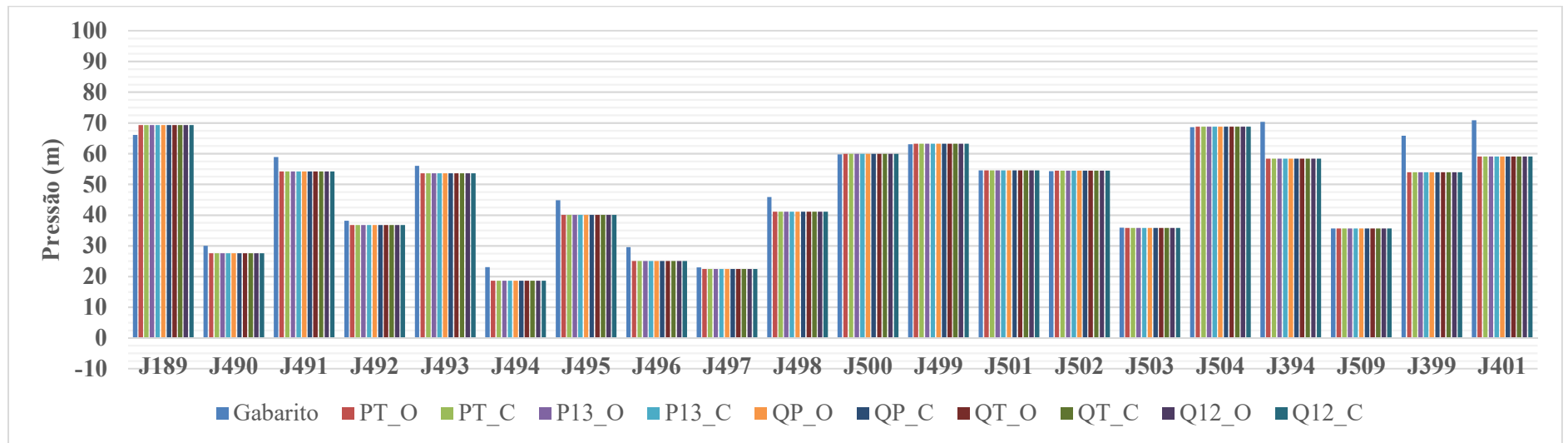
Fonte: Elaborado pelo autor



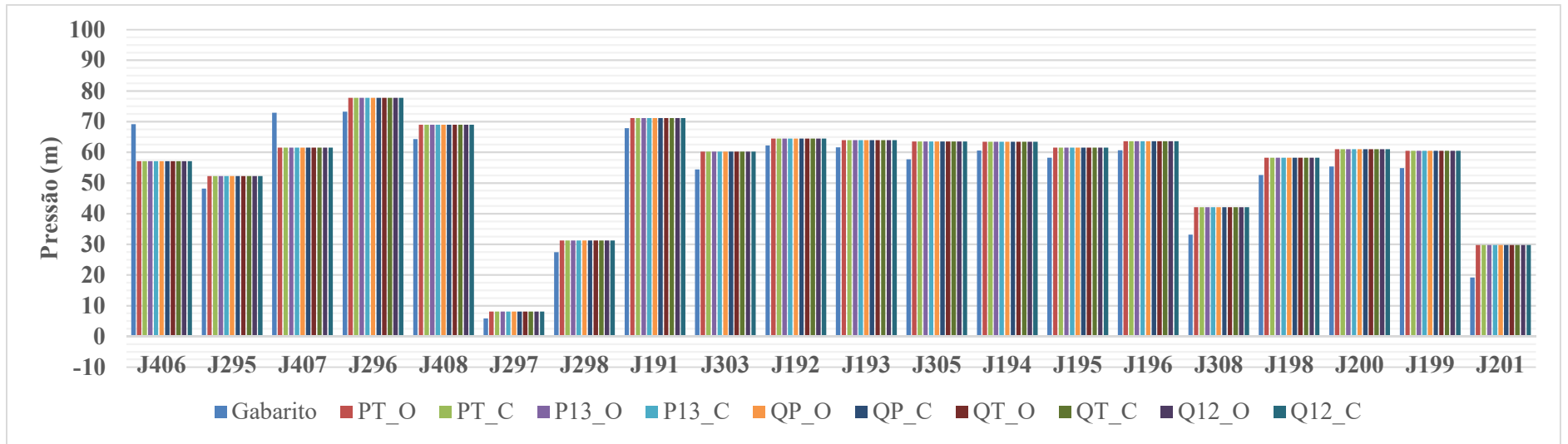
Fonte: Elaborado pelo autor



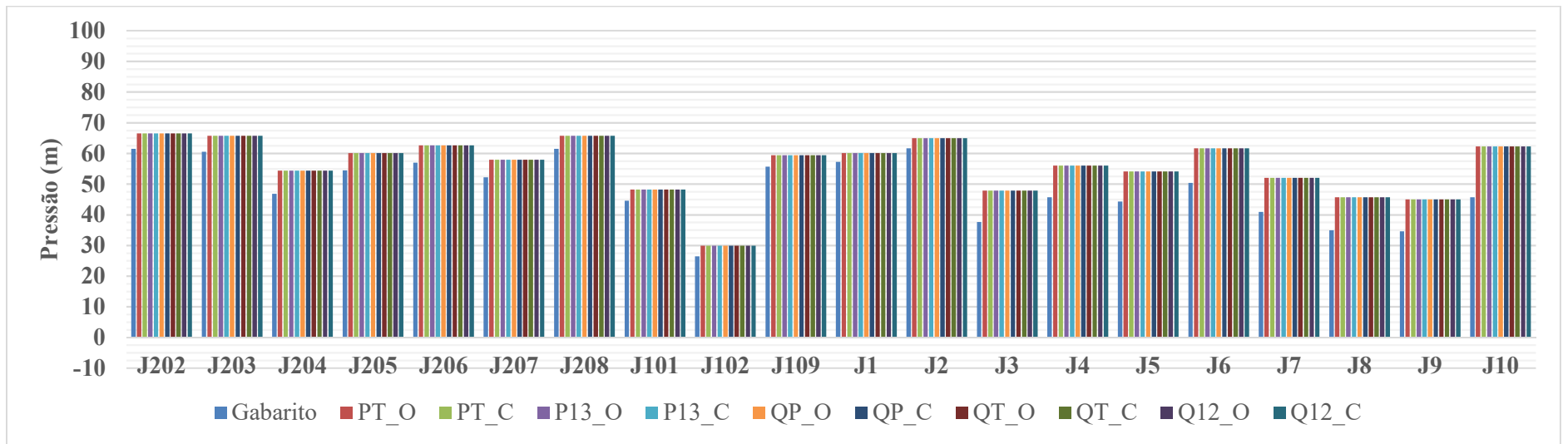
Fonte: Elaborado pelo autor



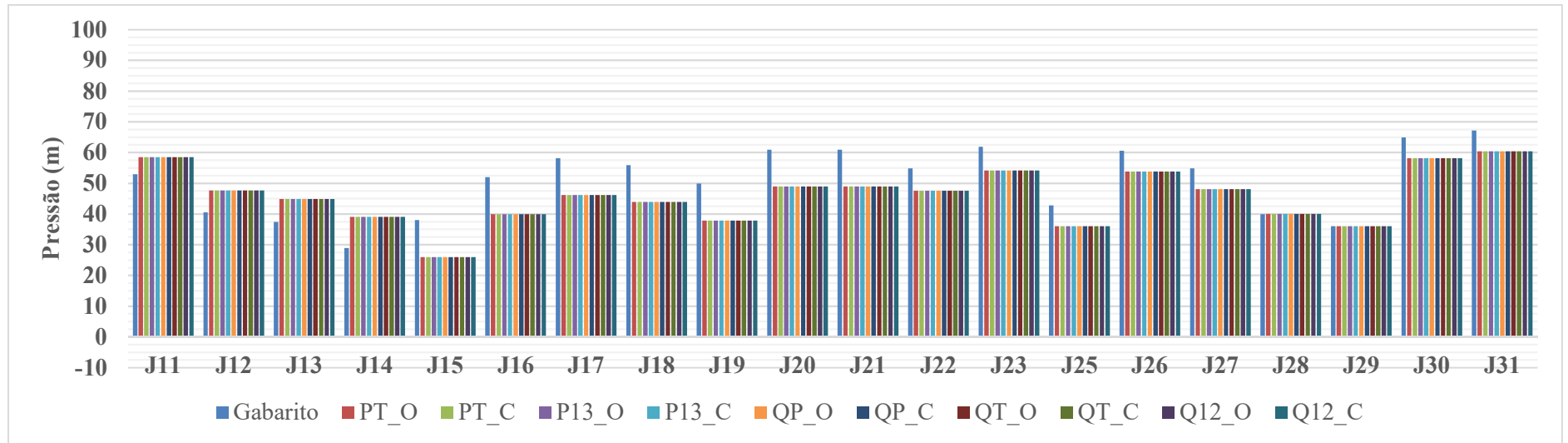
Fonte: Elaborado pelo autor



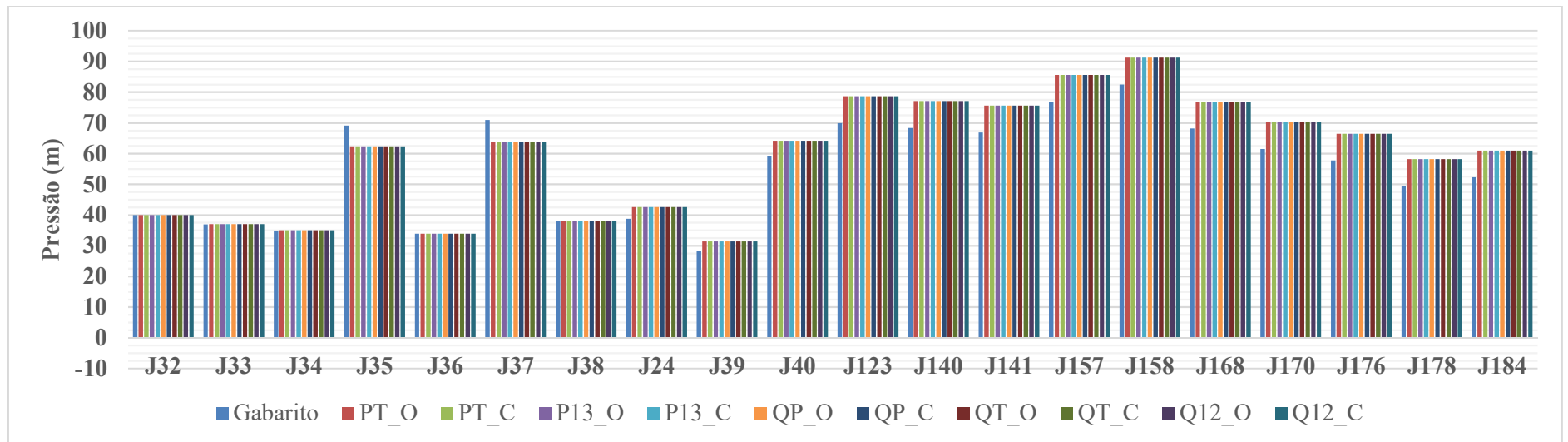
Fonte: Elaborado pelo autor



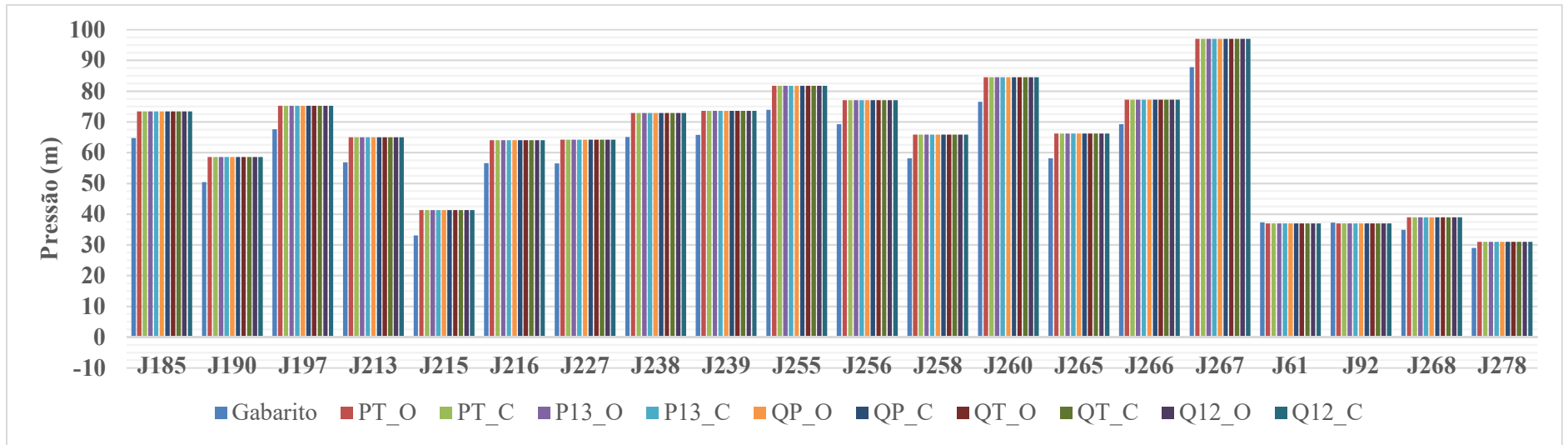
Fonte: Elaborado pelo autor



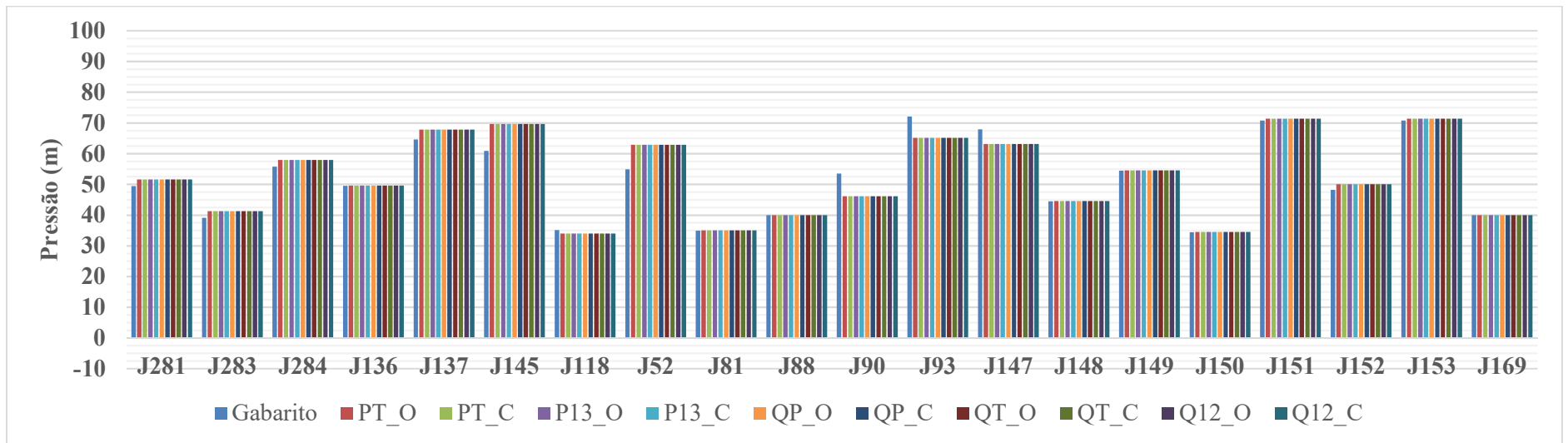
Fonte: Elaborado pelo autor



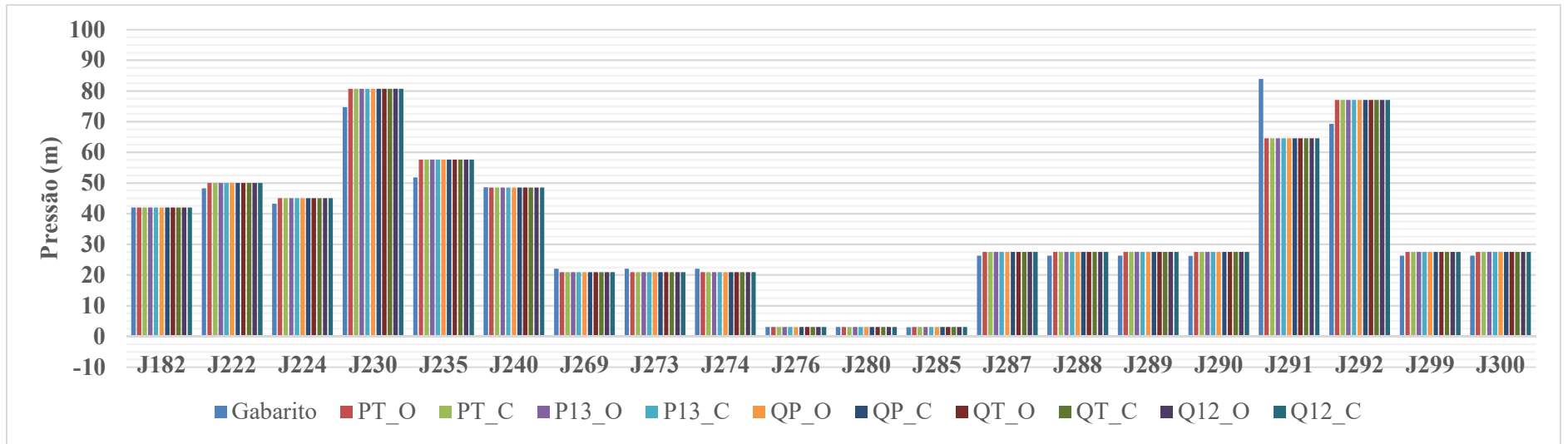
Fonte: Elaborado pelo autor



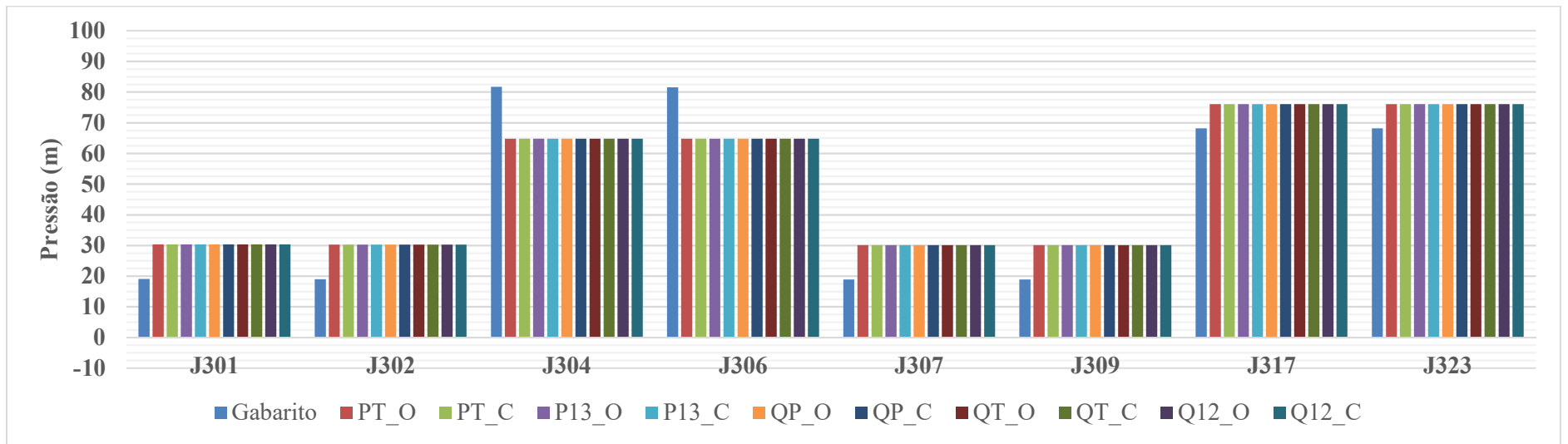
Fonte: Elaborado pelo autor



Fonte: Elaborado pelo autor

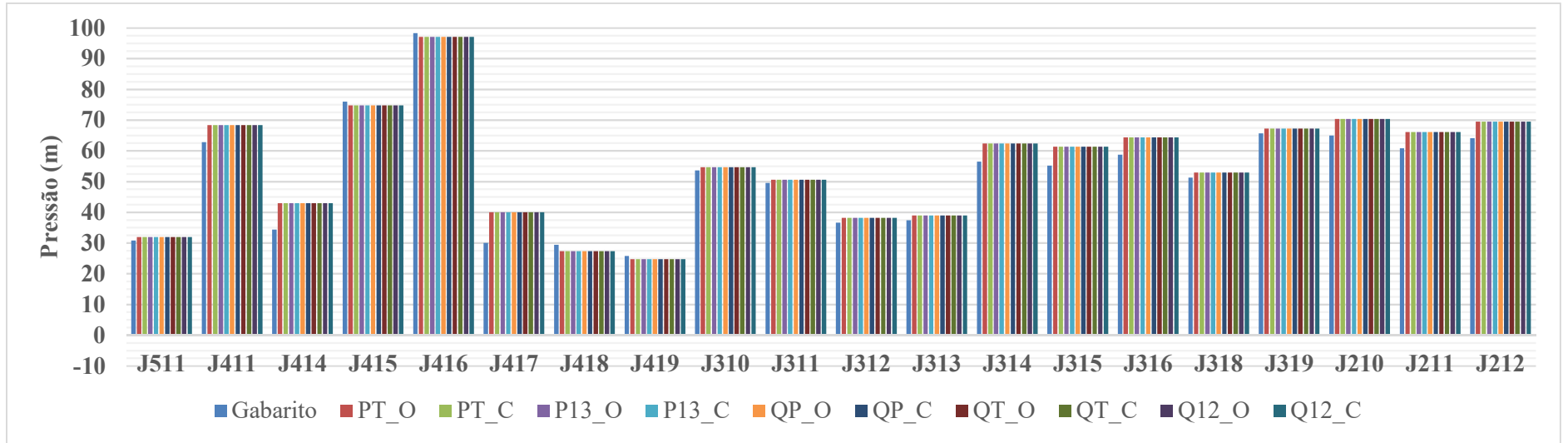


Fonte: Elaborado pelo autor

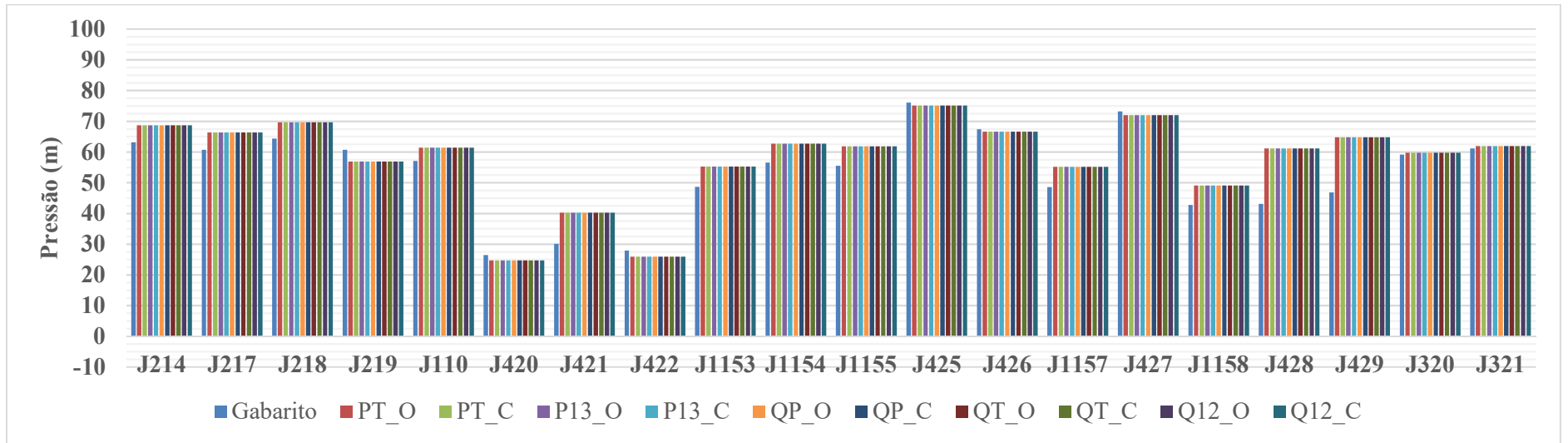


Fonte: Elaborado pelo autor

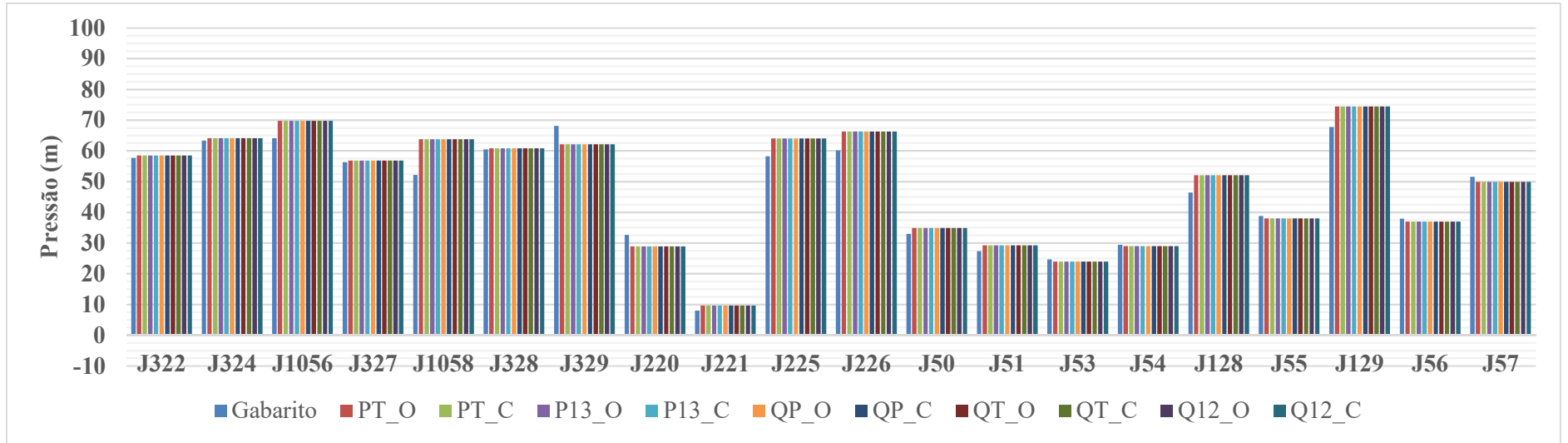
APÊNDICE DT – Pressões encontradas na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Darcy-Weisbach com consumos nodais iniciais de 1 L/s: rede C-Town



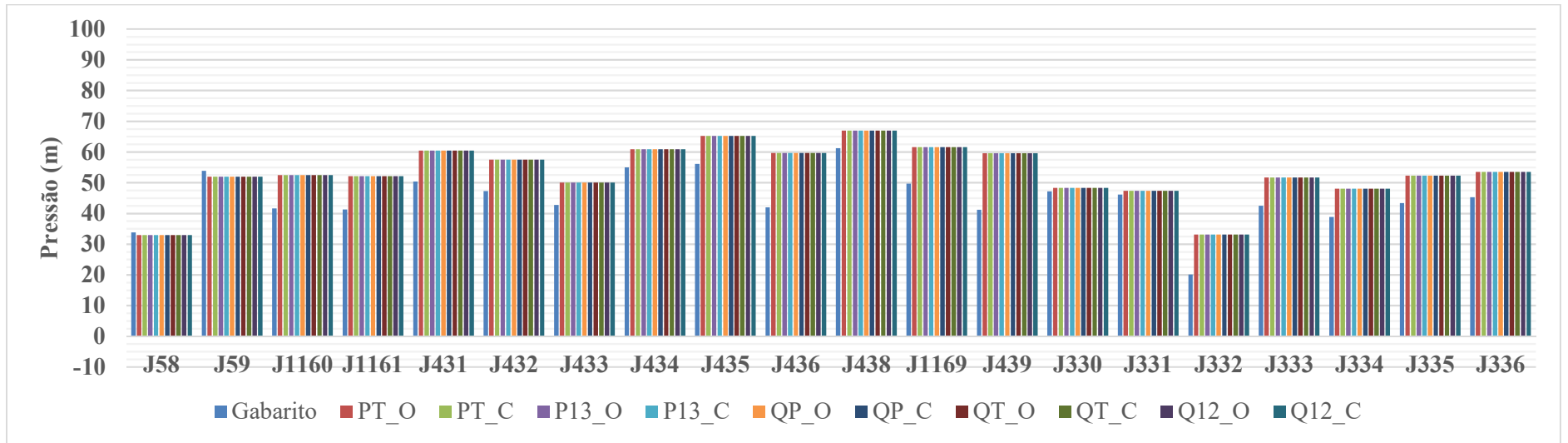
Fonte: Elaborado pelo autor



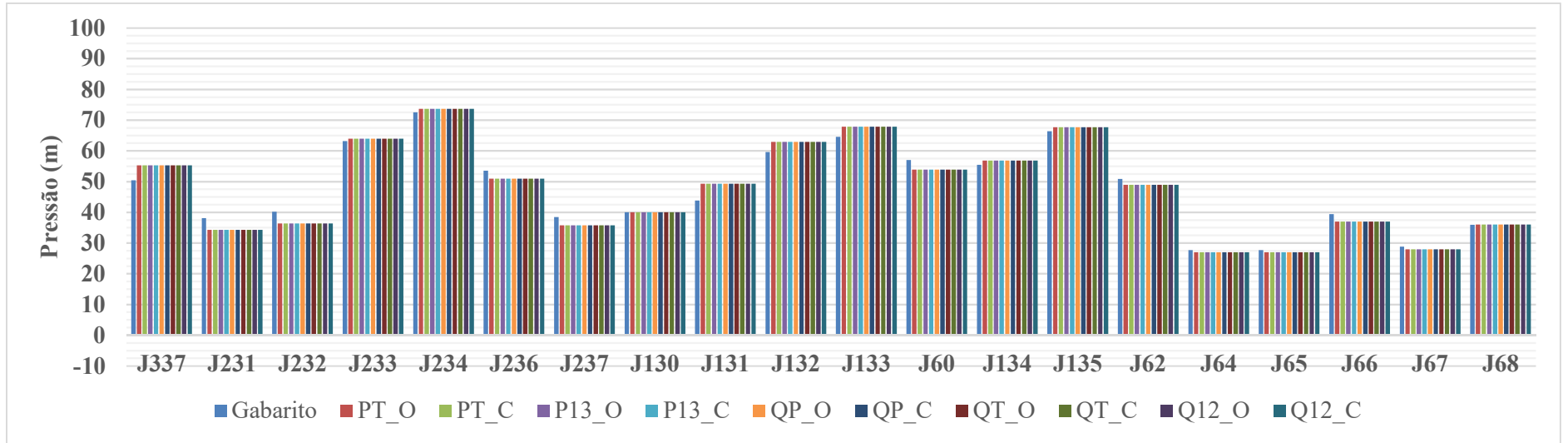
Fonte: Elaborado pelo autor



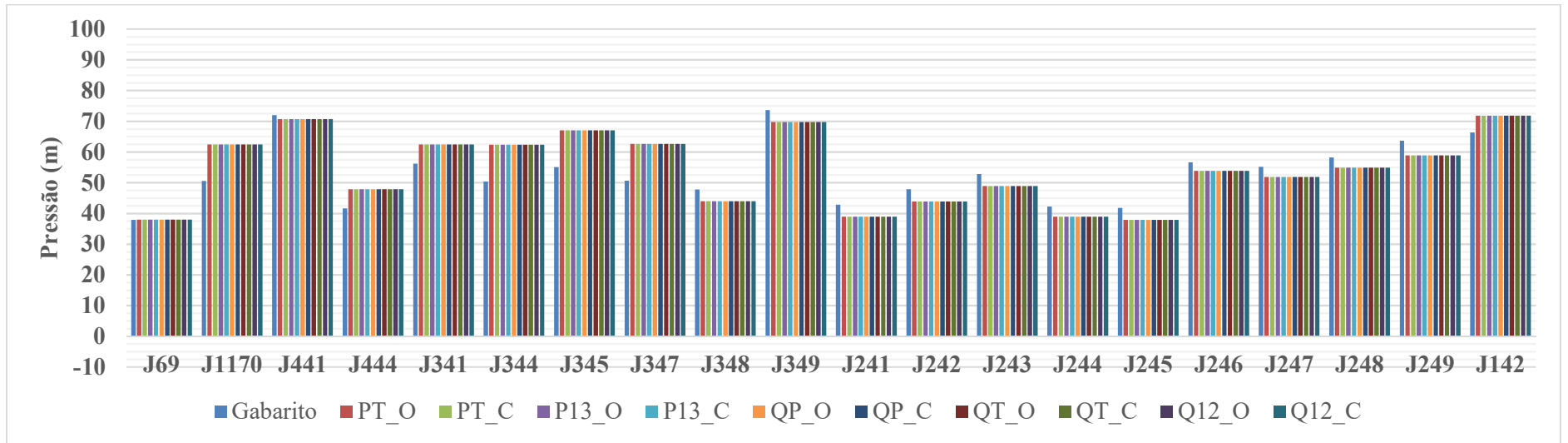
Fonte: Elaborado pelo autor



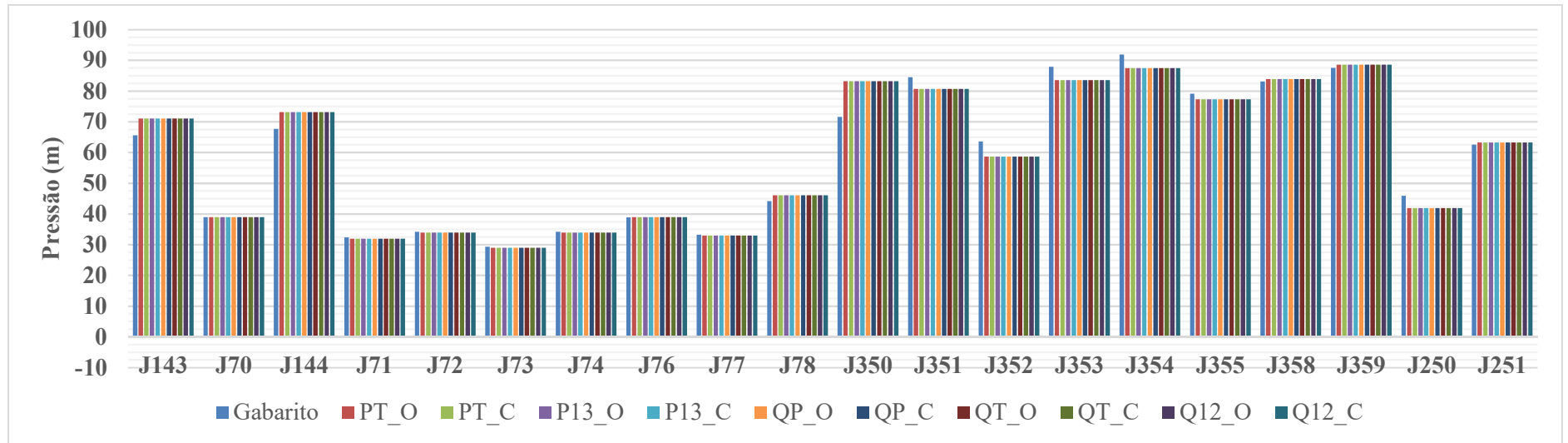
Fonte: Elaborado pelo autor



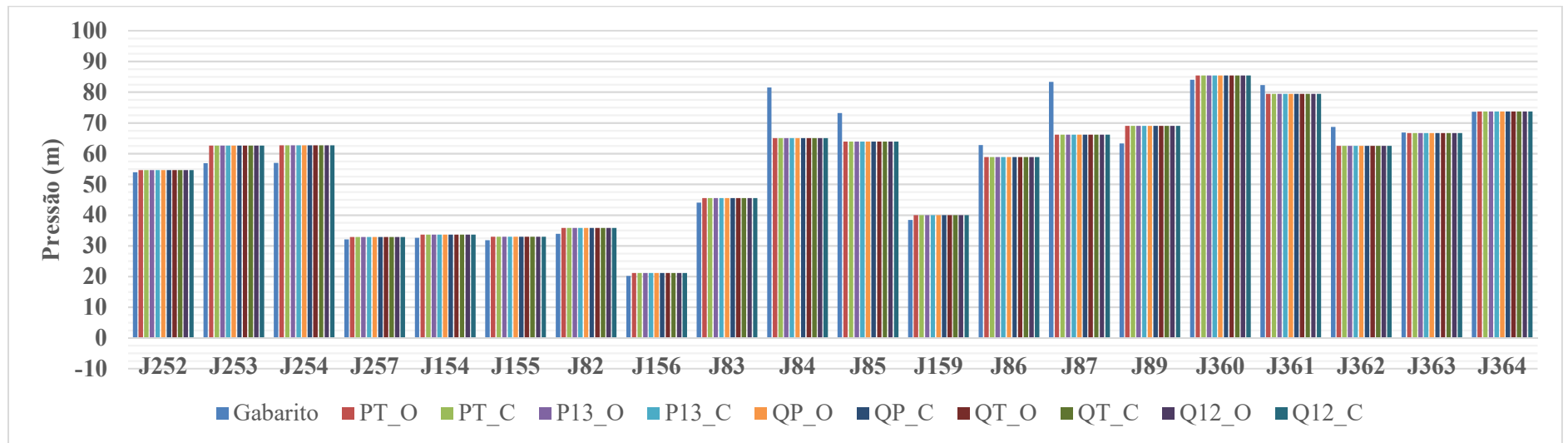
Fonte: Elaborado pelo autor



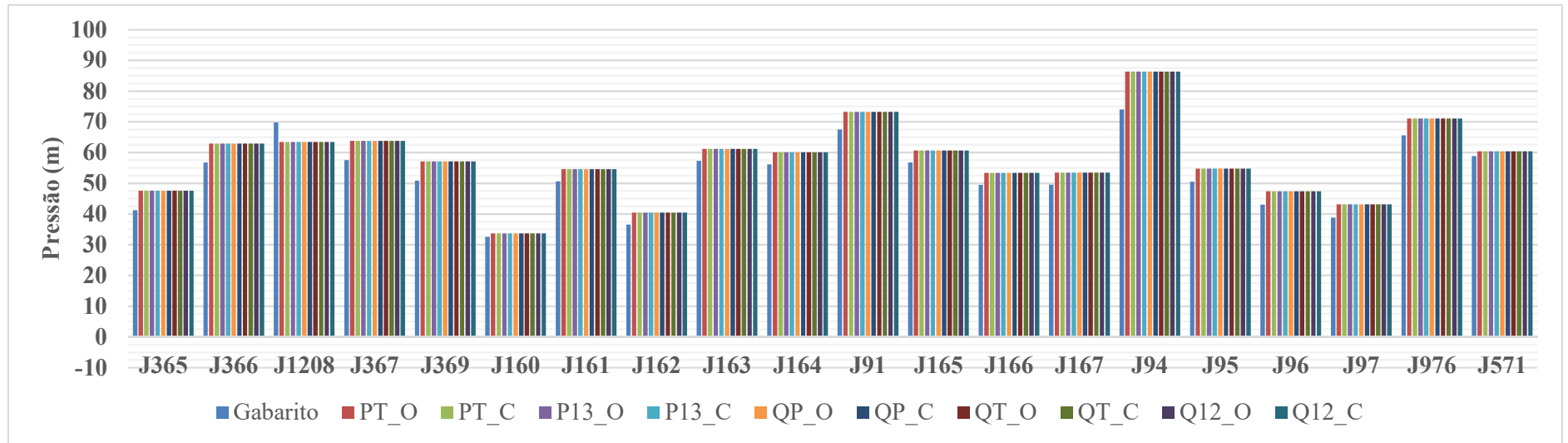
Fonte: Elaborado pelo autor



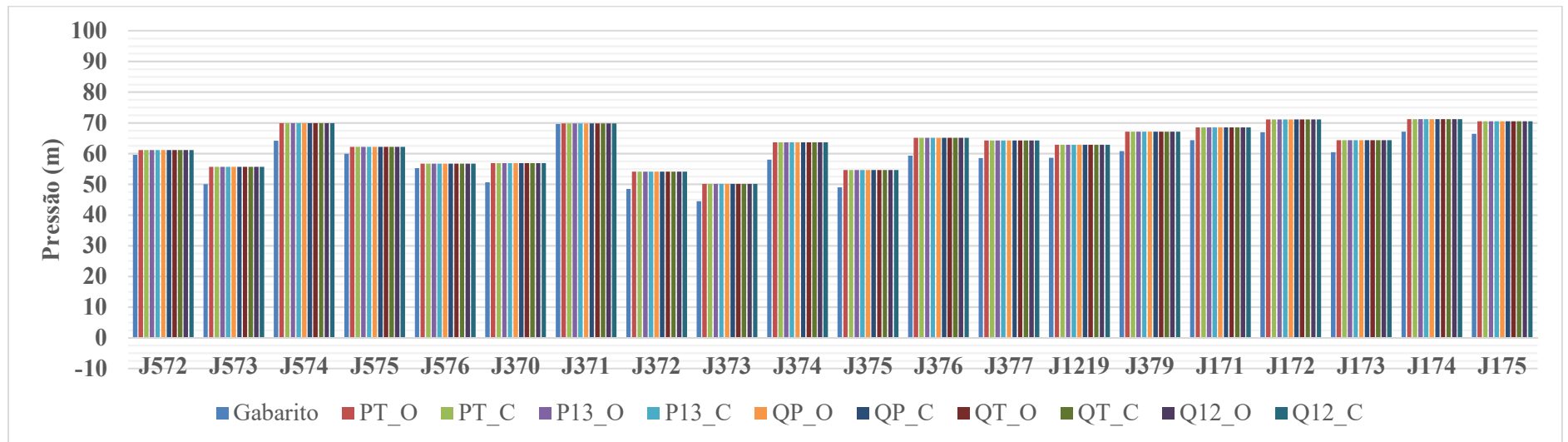
Fonte: Elaborado pelo autor



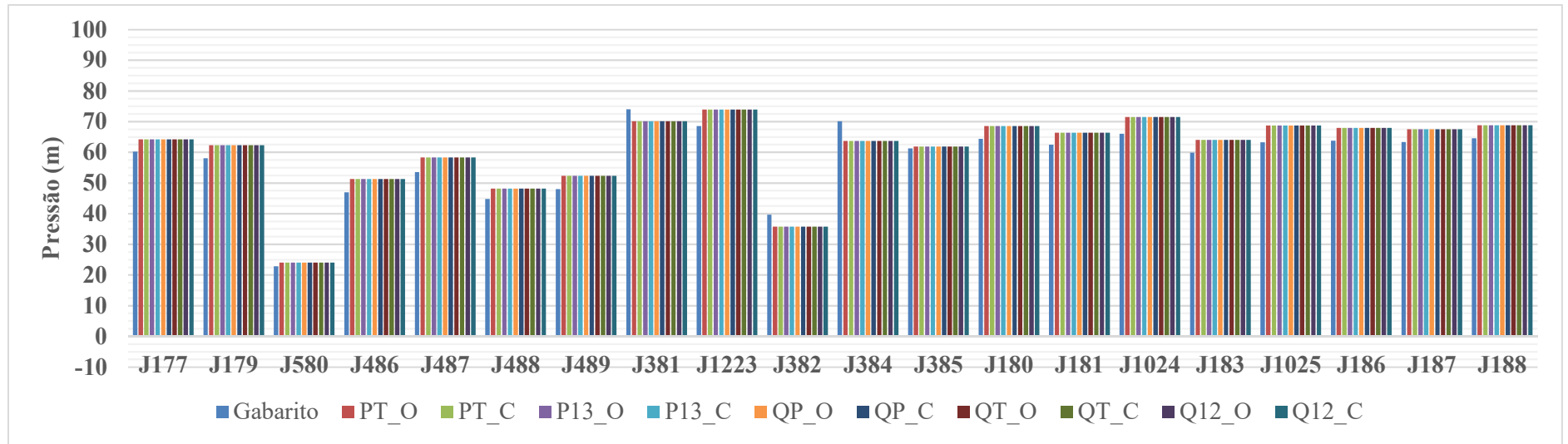
Fonte: Elaborado pelo autor



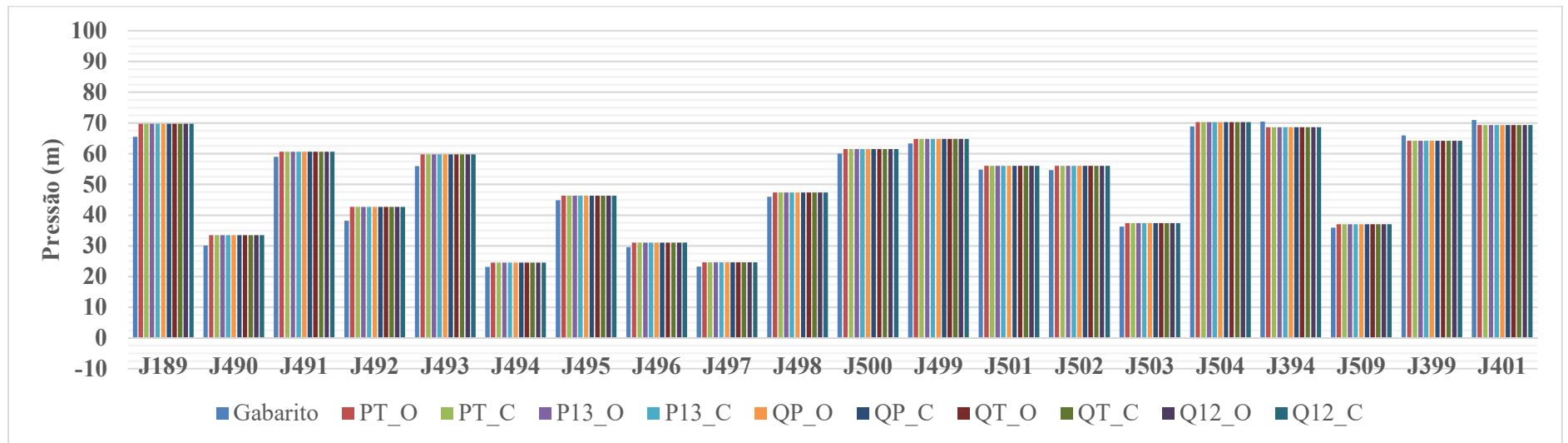
Fonte: Elaborado pelo autor



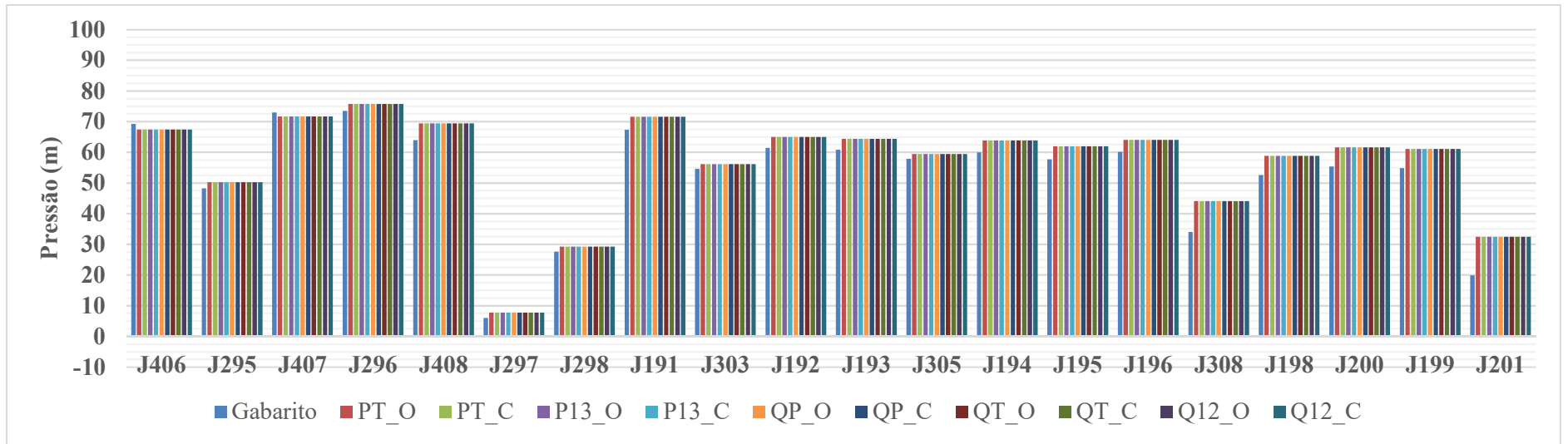
Fonte: Elaborado pelo autor



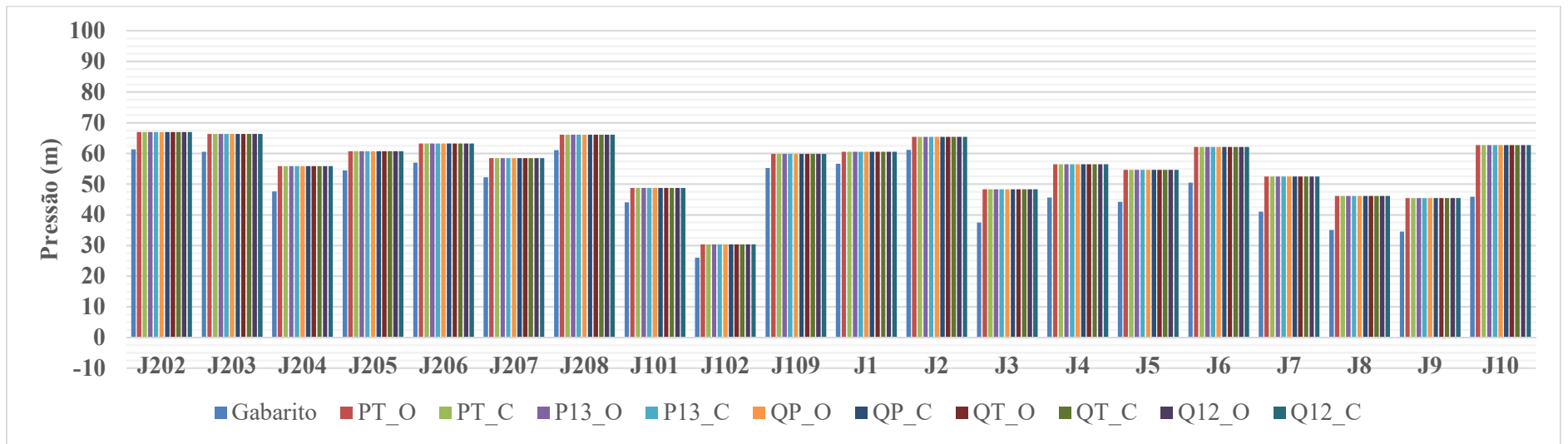
Fonte: Elaborado pelo autor



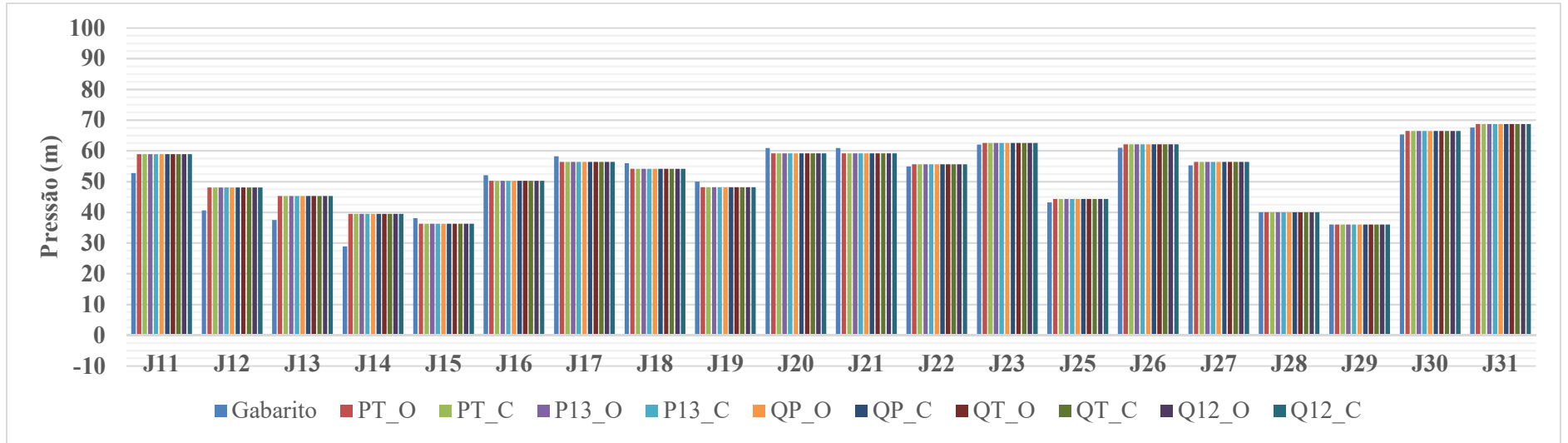
Fonte: Elaborado pelo autor



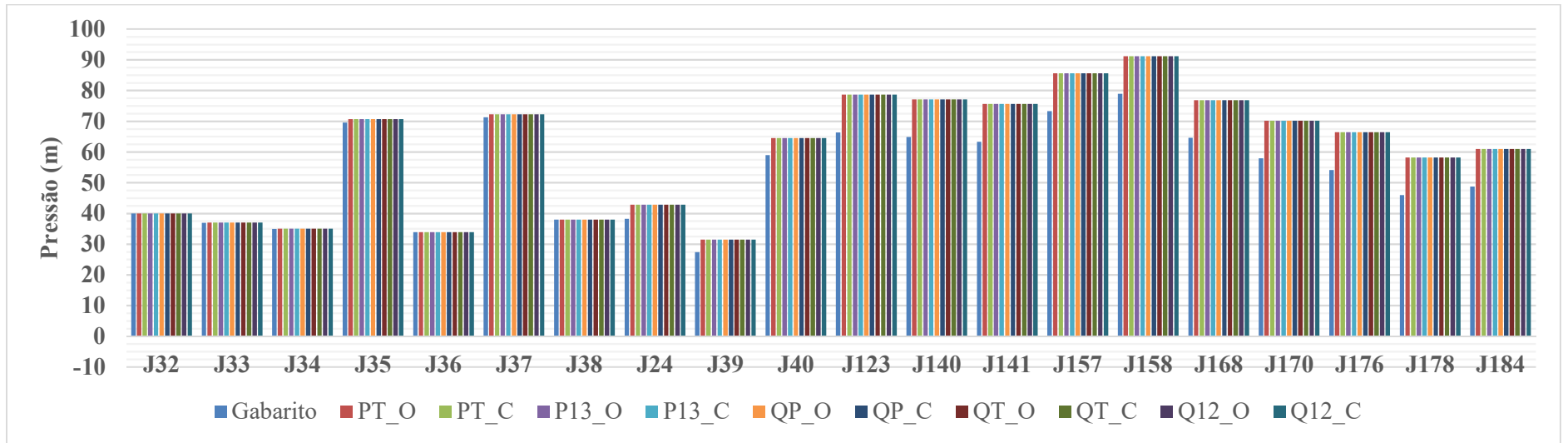
Fonte: Elaborado pelo autor



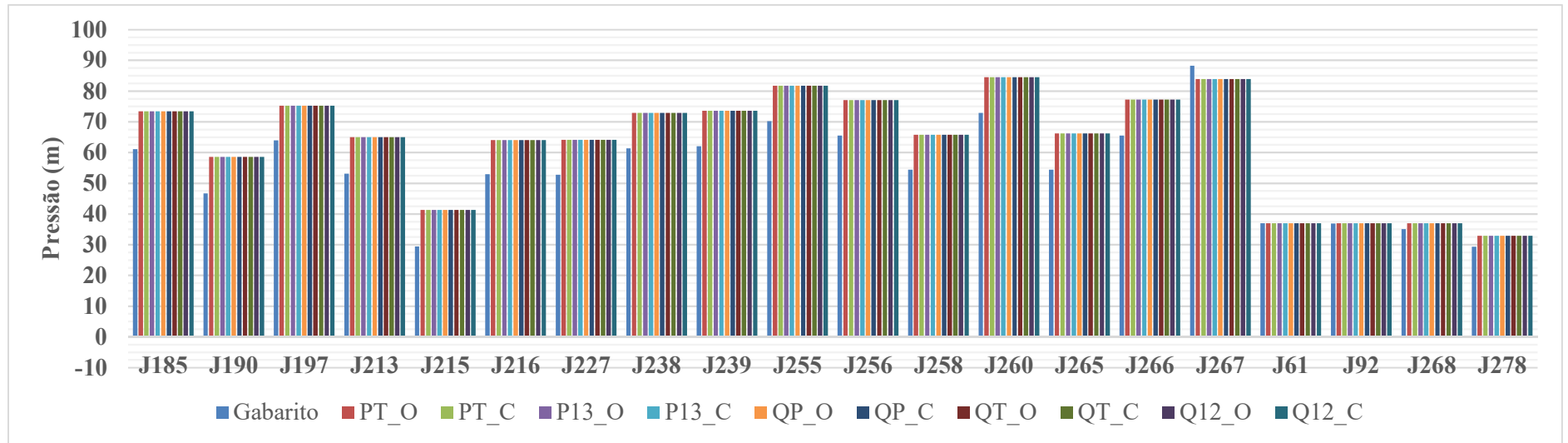
Fonte: Elaborado pelo autor



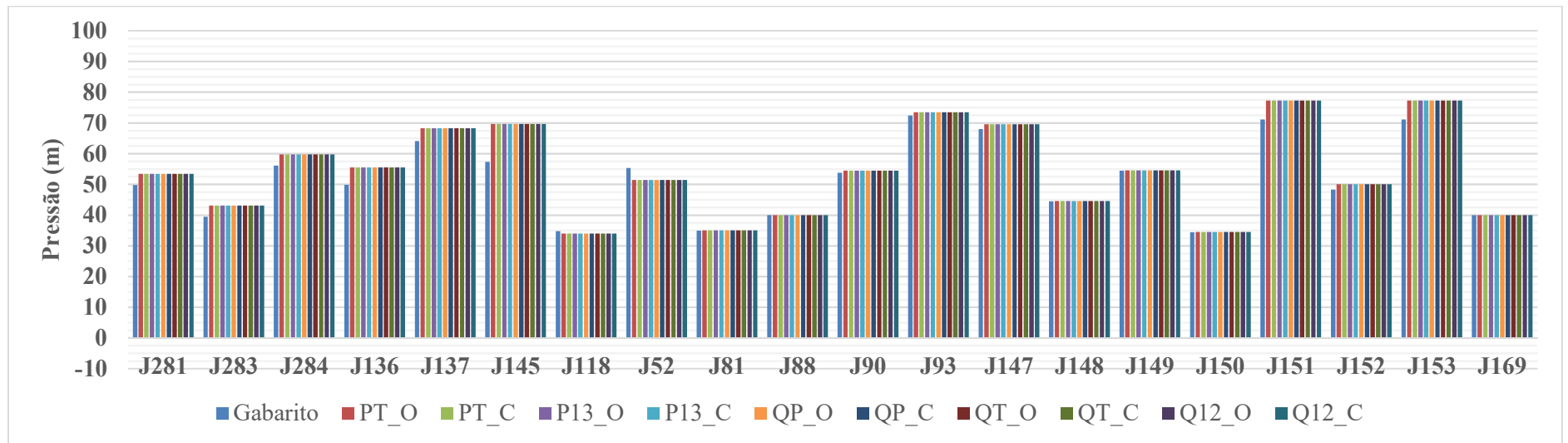
Fonte: Elaborado pelo autor



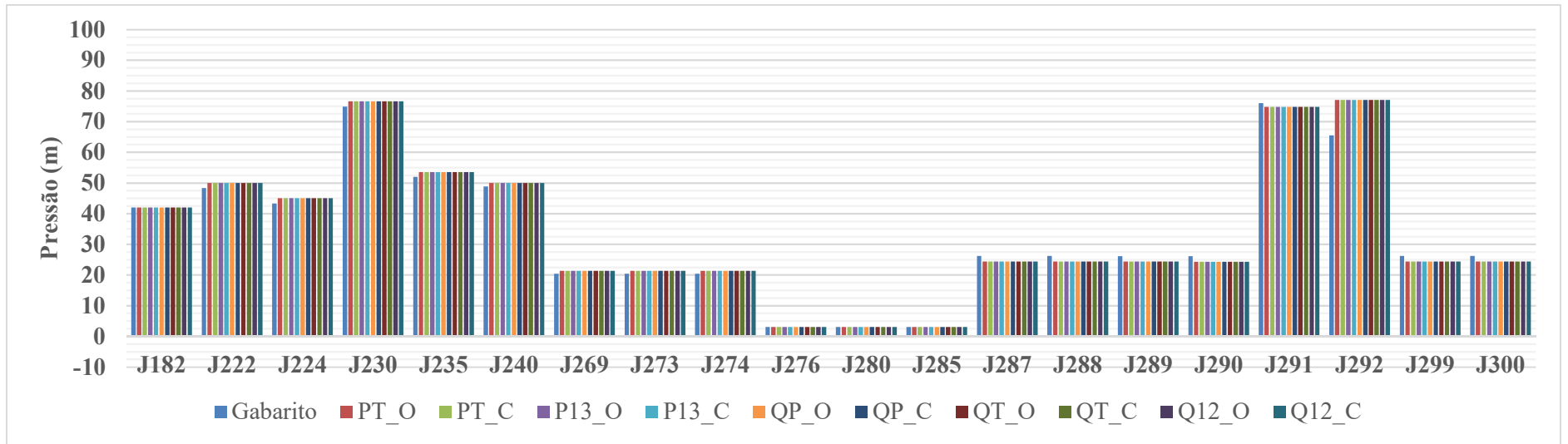
Fonte: Elaborado pelo autor



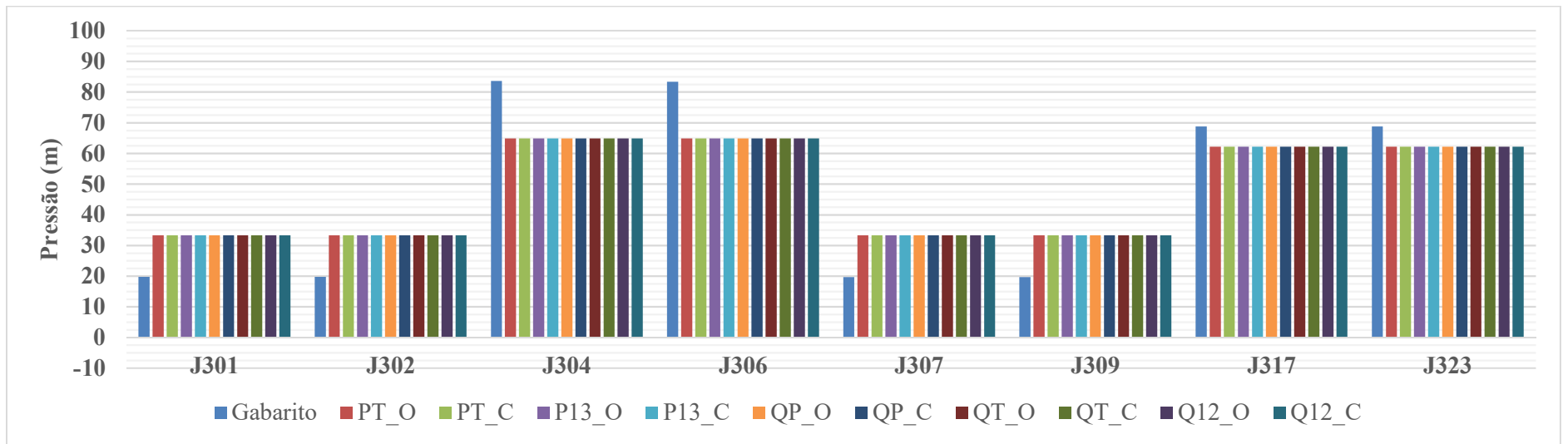
Fonte: Elaborado pelo autor



Fonte: Elaborado pelo autor

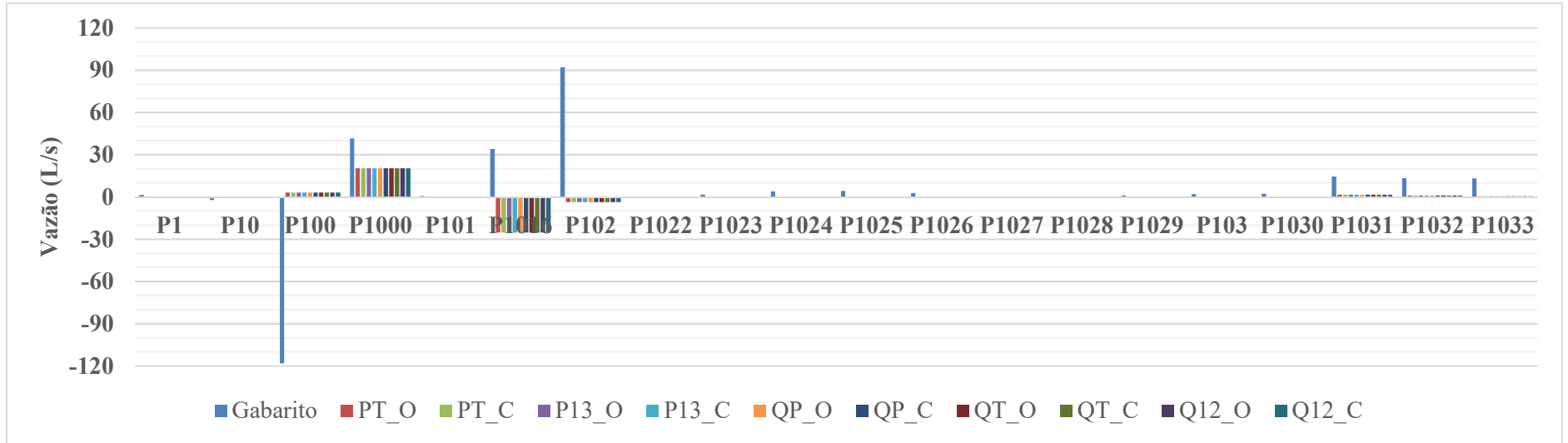


Fonte: Elaborado pelo autor

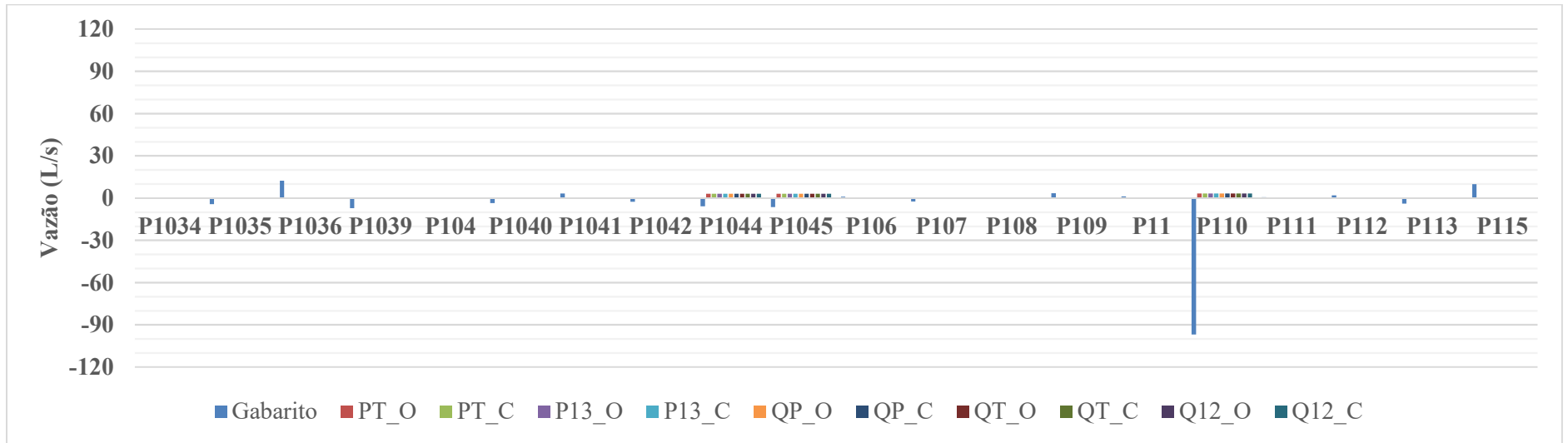


Fonte: Elaborado pelo autor

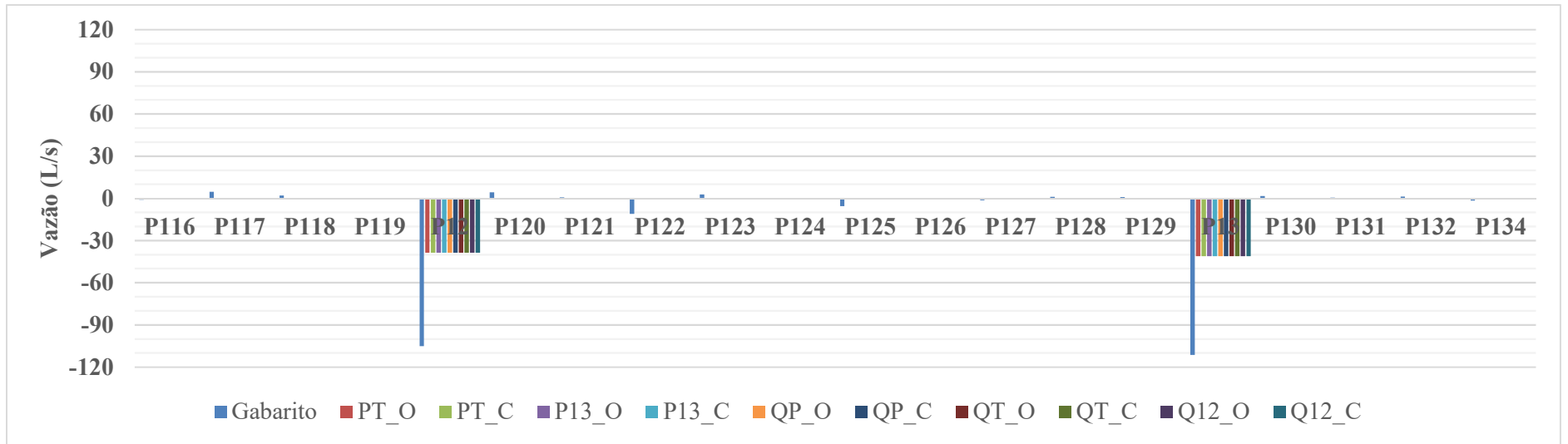
**APÊNDICE DU – Vazões encontradas na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Hazen-Williams com consumos nodais iniciais de 1 L/s:
rede C-Town**



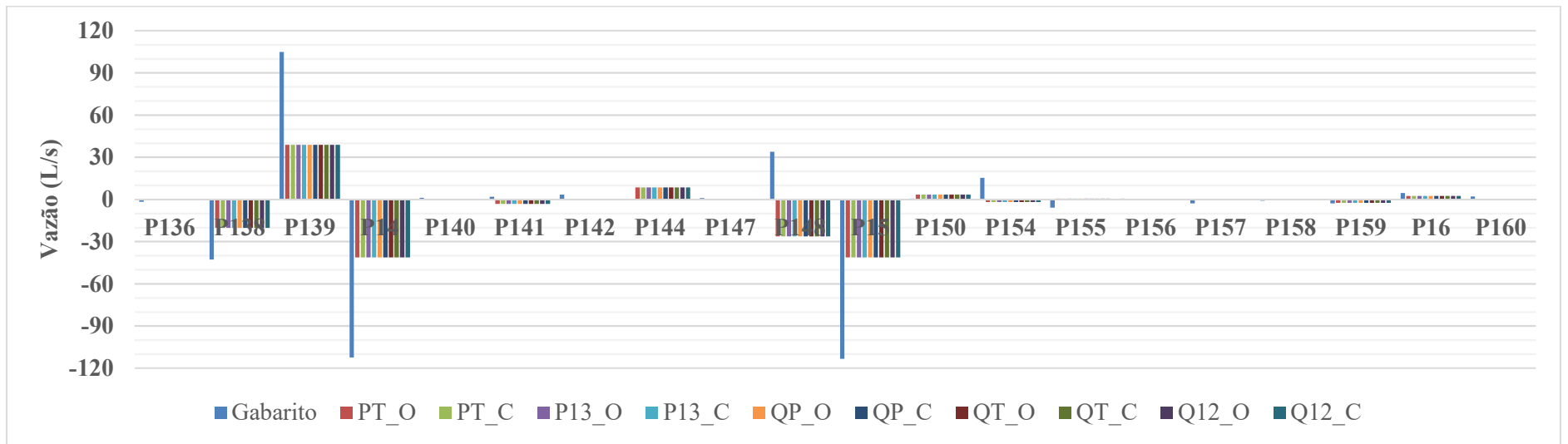
Fonte: Elaborado pelo autor



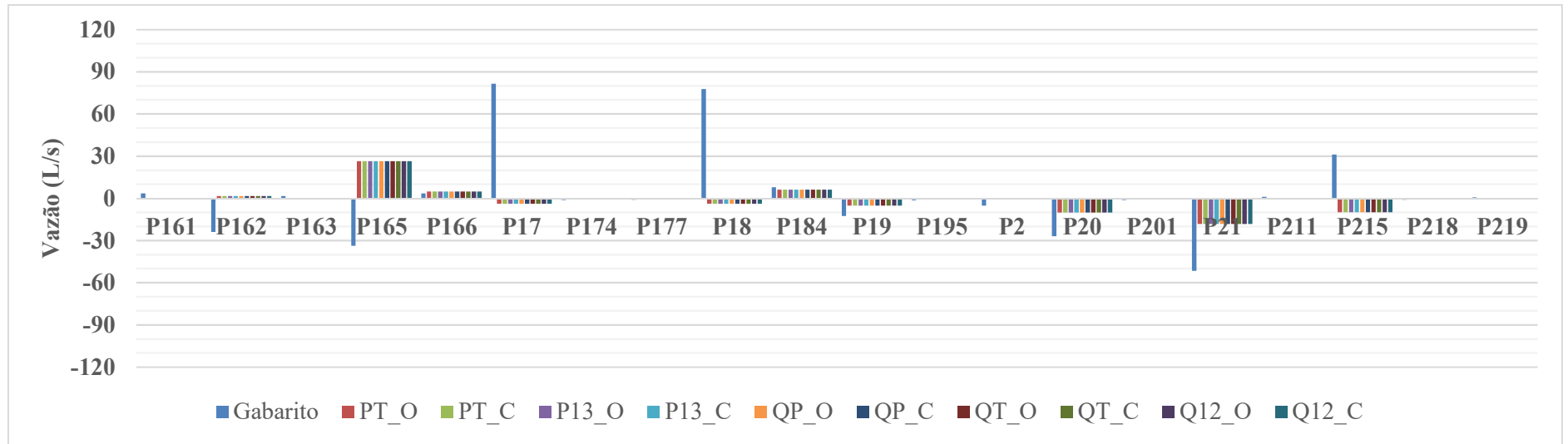
Fonte: Elaborado pelo autor



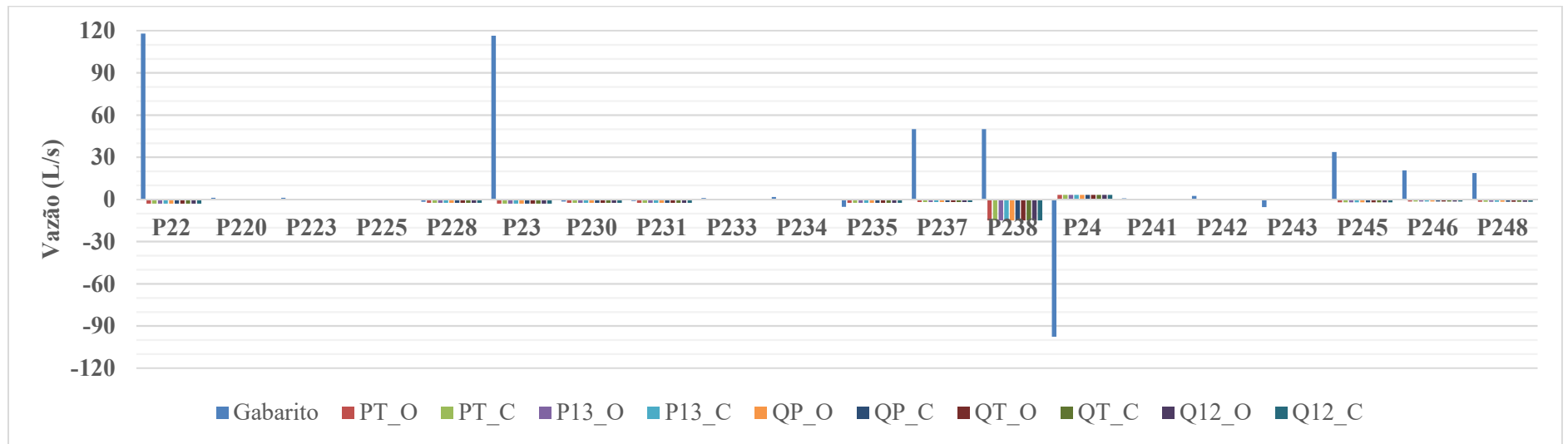
Fonte: Elaborado pelo autor



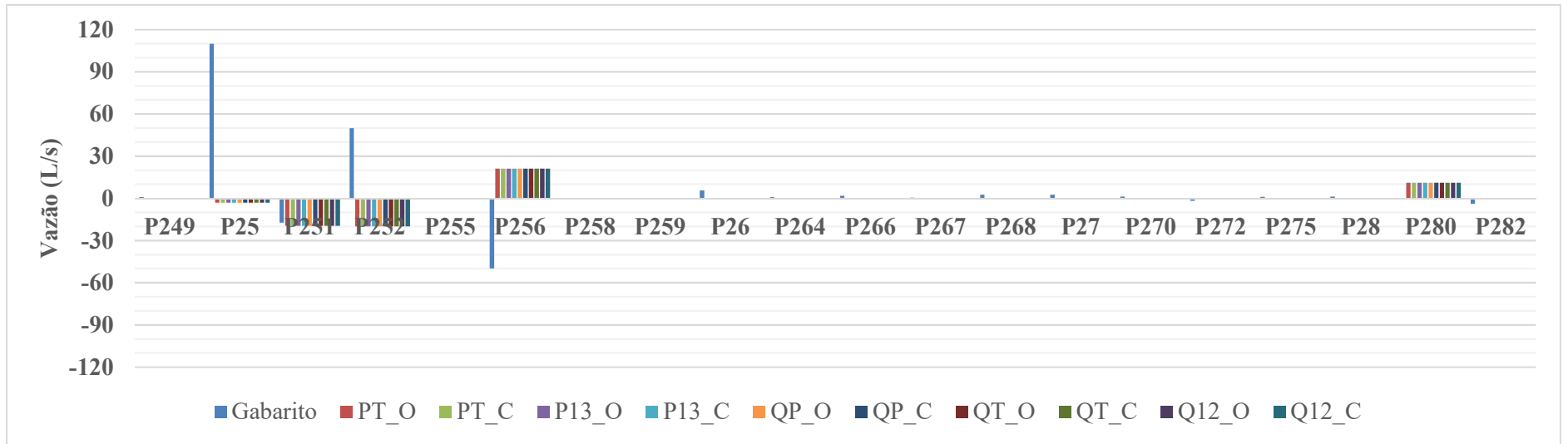
Fonte: Elaborado pelo autor



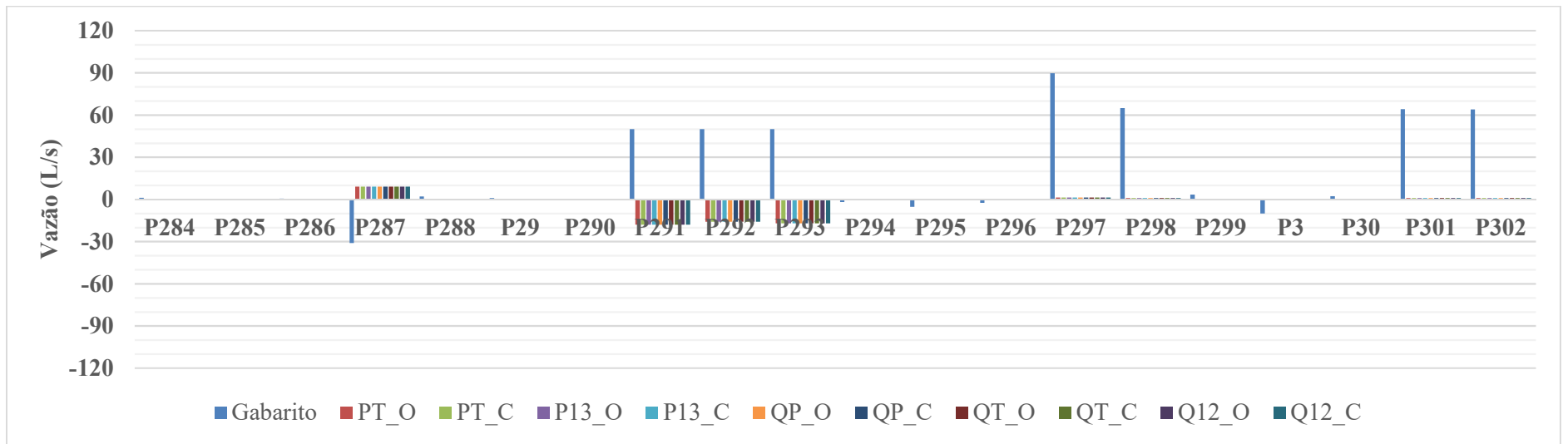
Fonte: Elaborado pelo autor



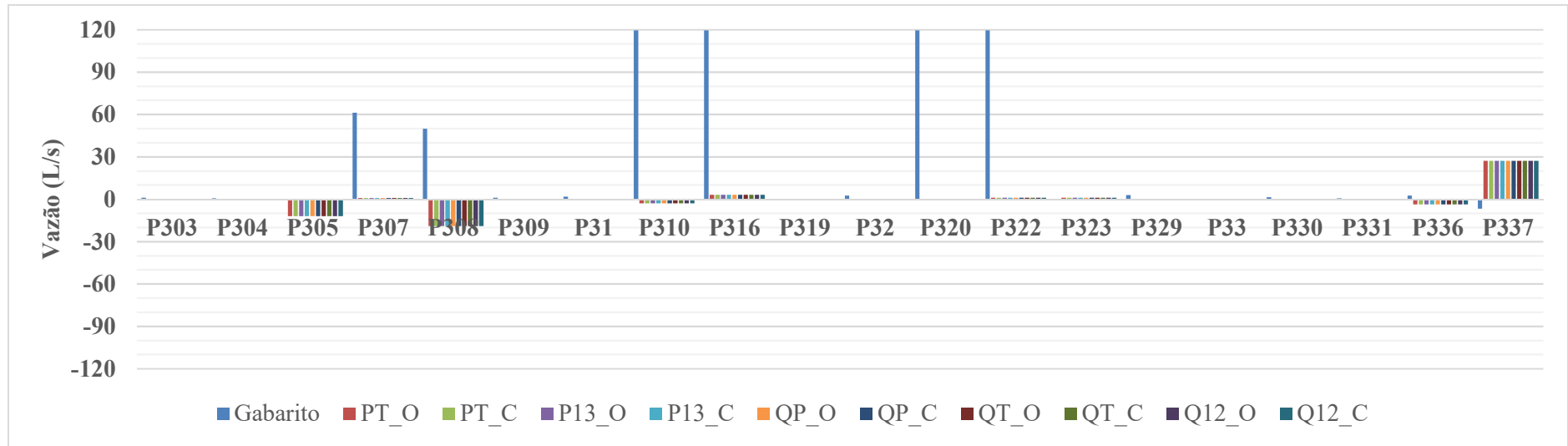
Fonte: Elaborado pelo autor



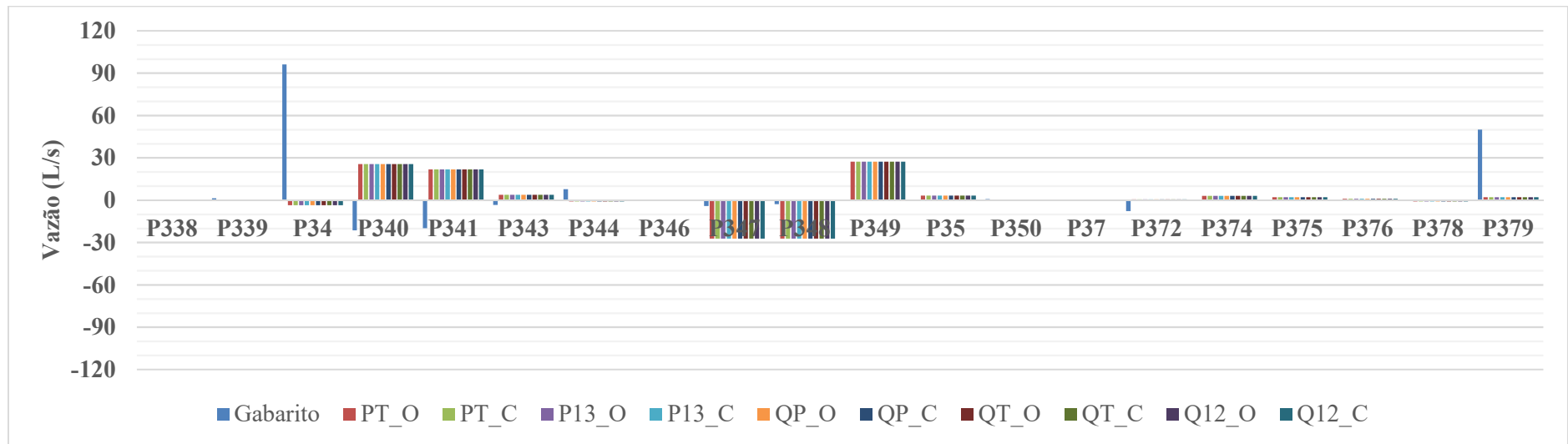
Fonte: Elaborado pelo autor



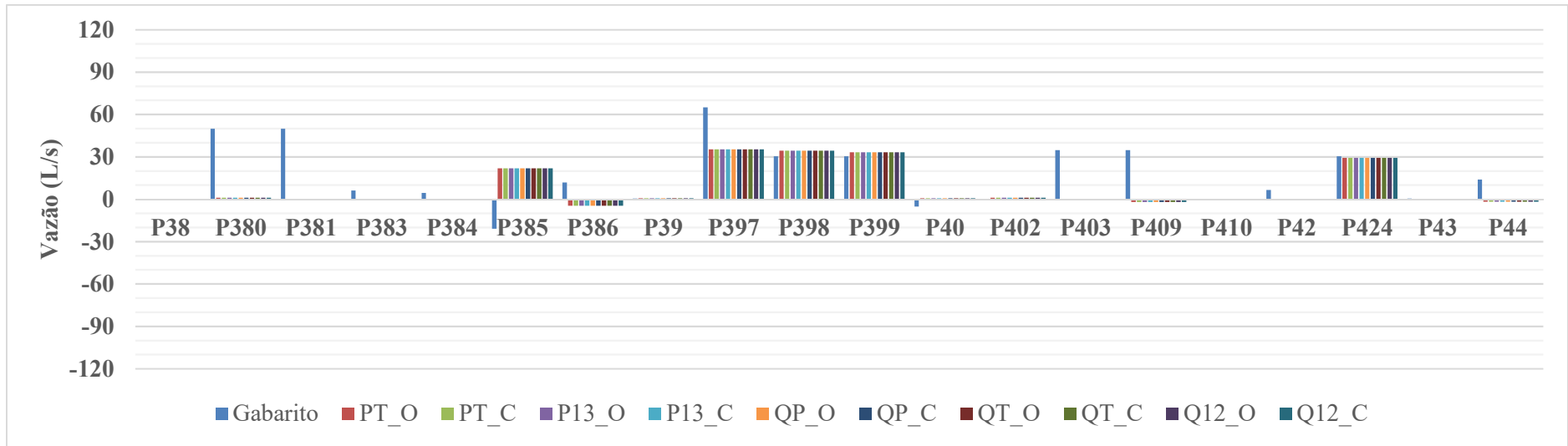
Fonte: Elaborado pelo autor



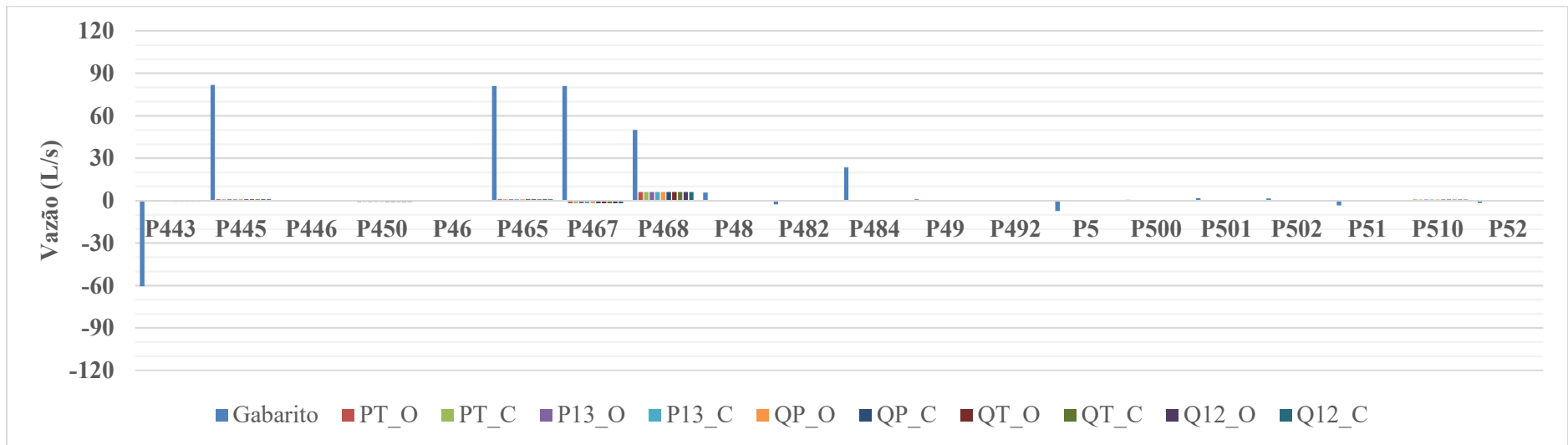
Fonte: Elaborado pelo autor



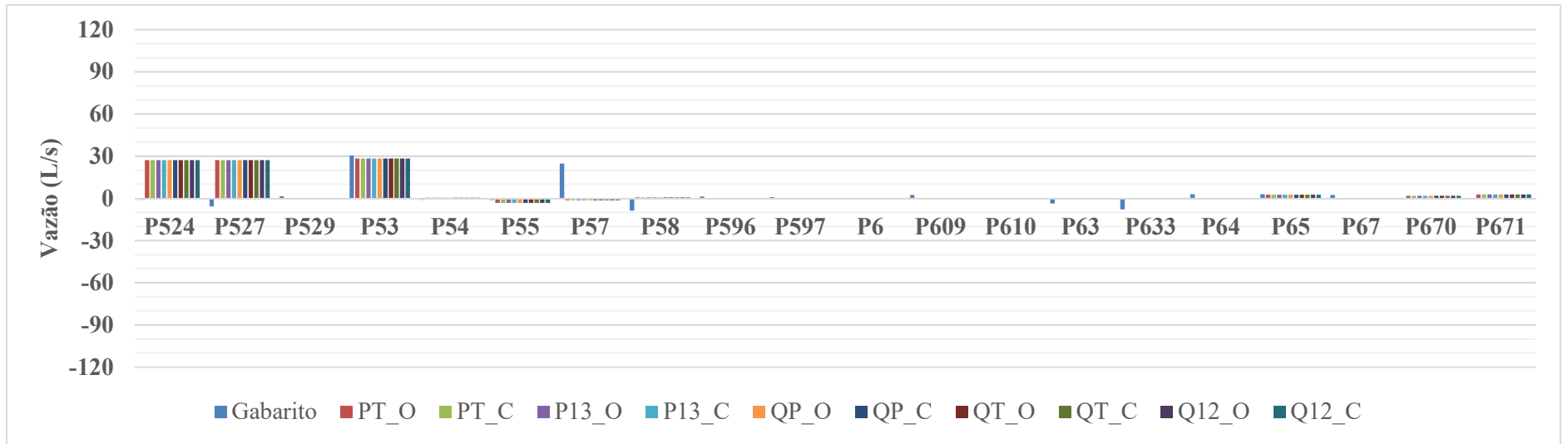
Fonte: Elaborado pelo autor



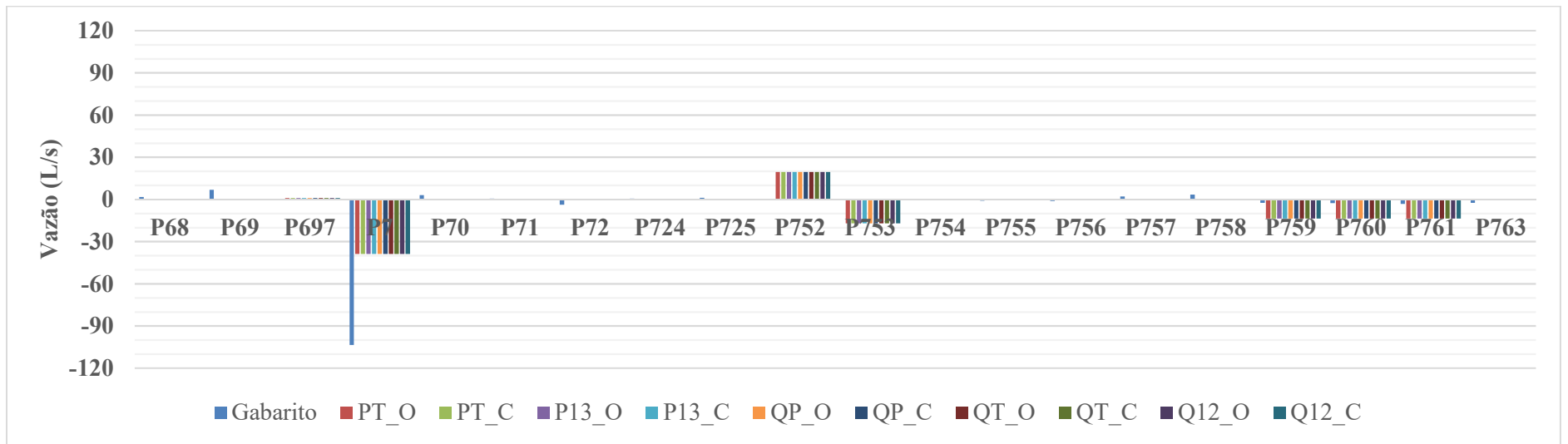
Fonte: Elaborado pelo autor



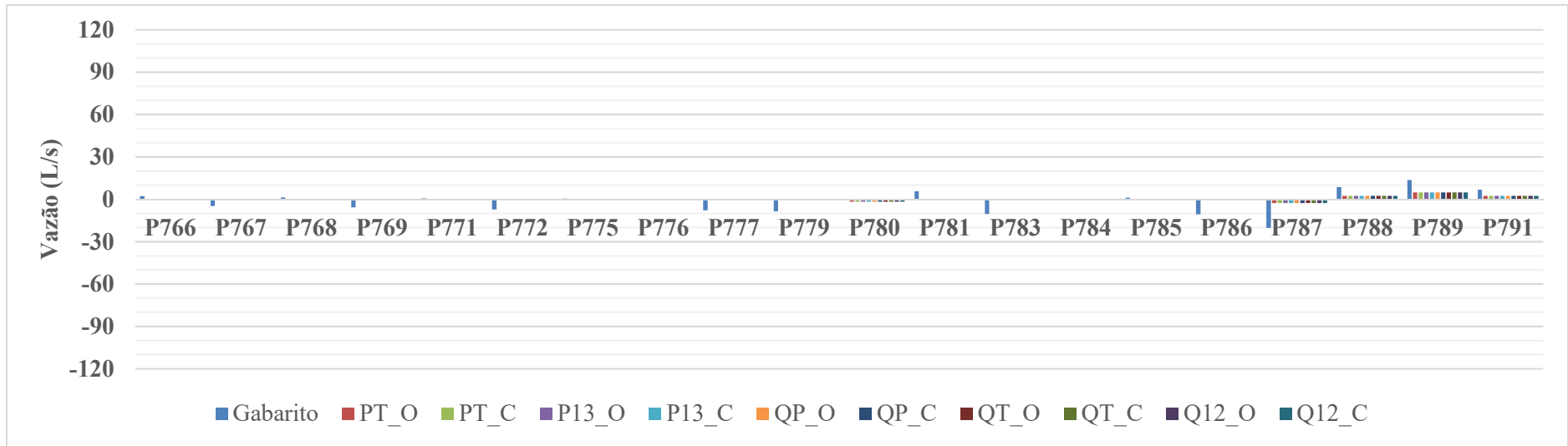
Fonte: Elaborado pelo autor



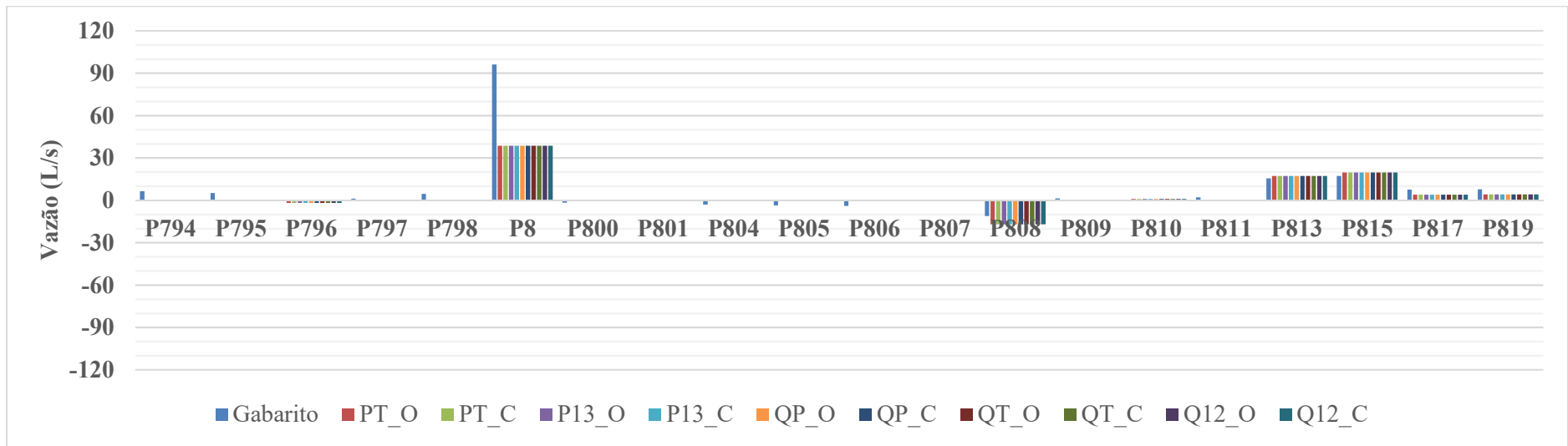
Fonte: Elaborado pelo autor



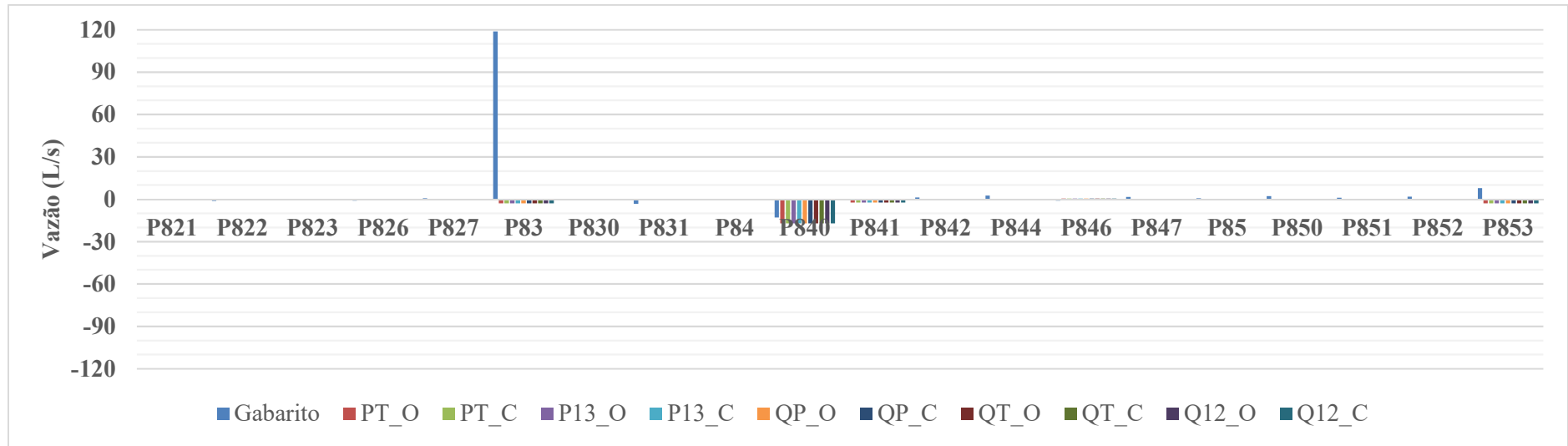
Fonte: Elaborado pelo autor



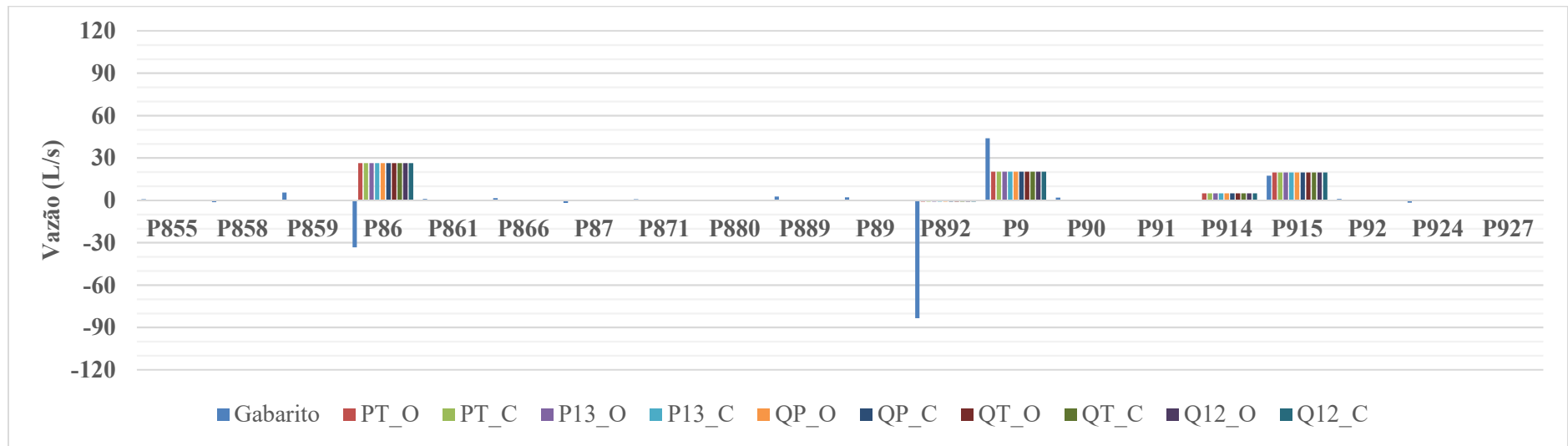
Fonte: Elaborado pelo autor



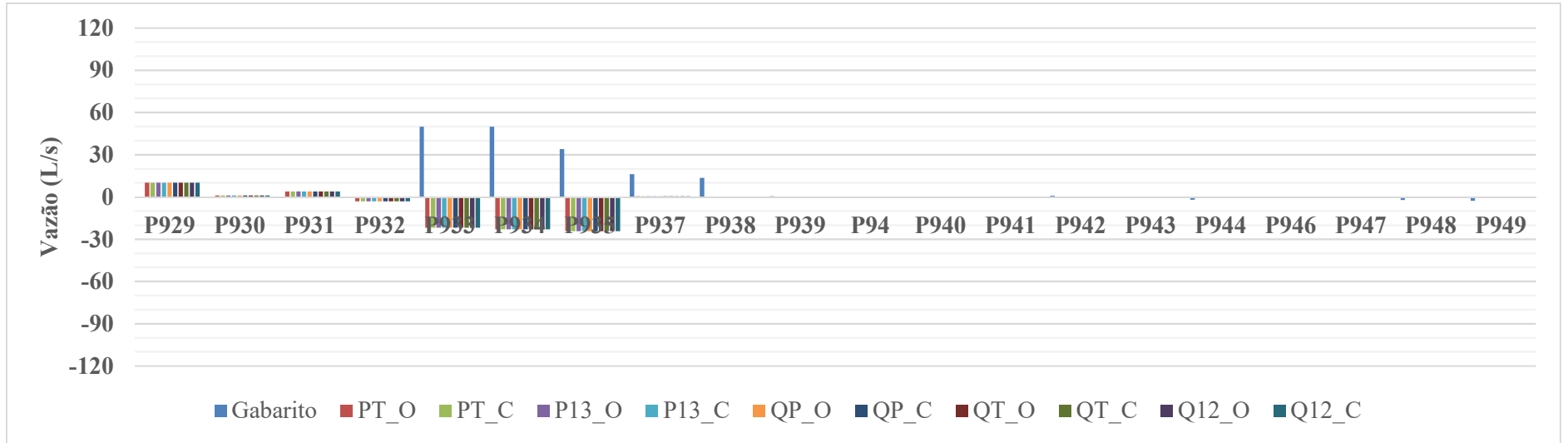
Fonte: Elaborado pelo autor



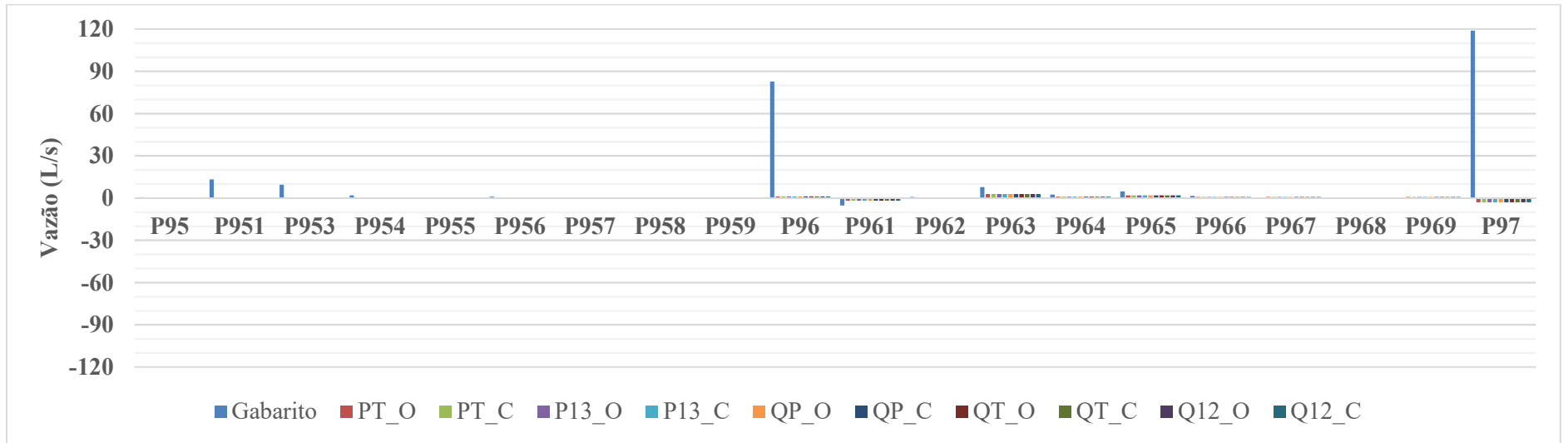
Fonte: Elaborado pelo autor



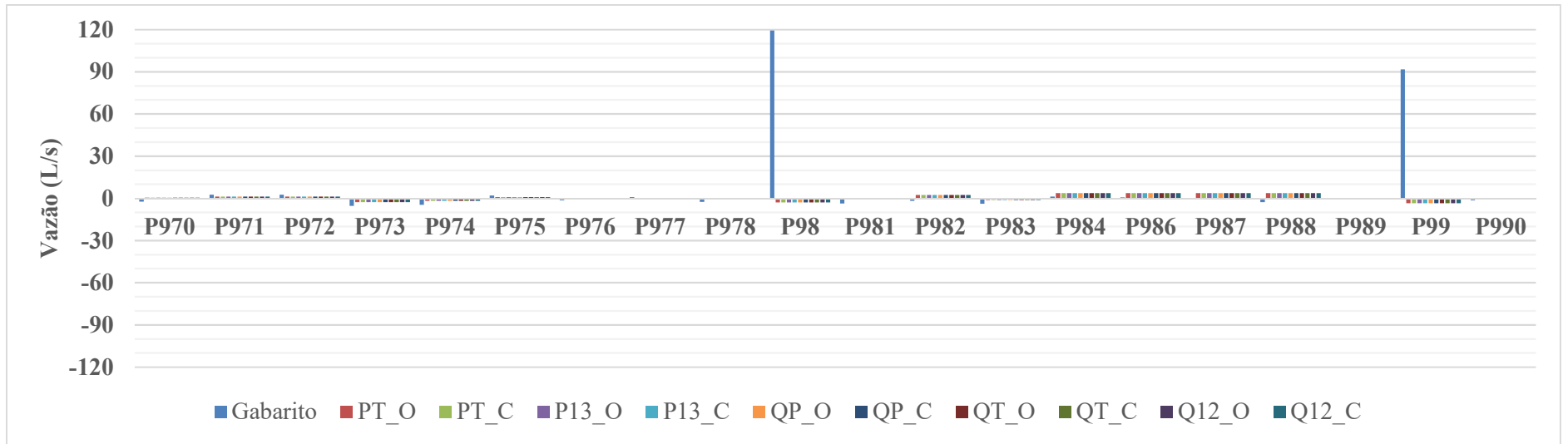
Fonte: Elaborado pelo autor



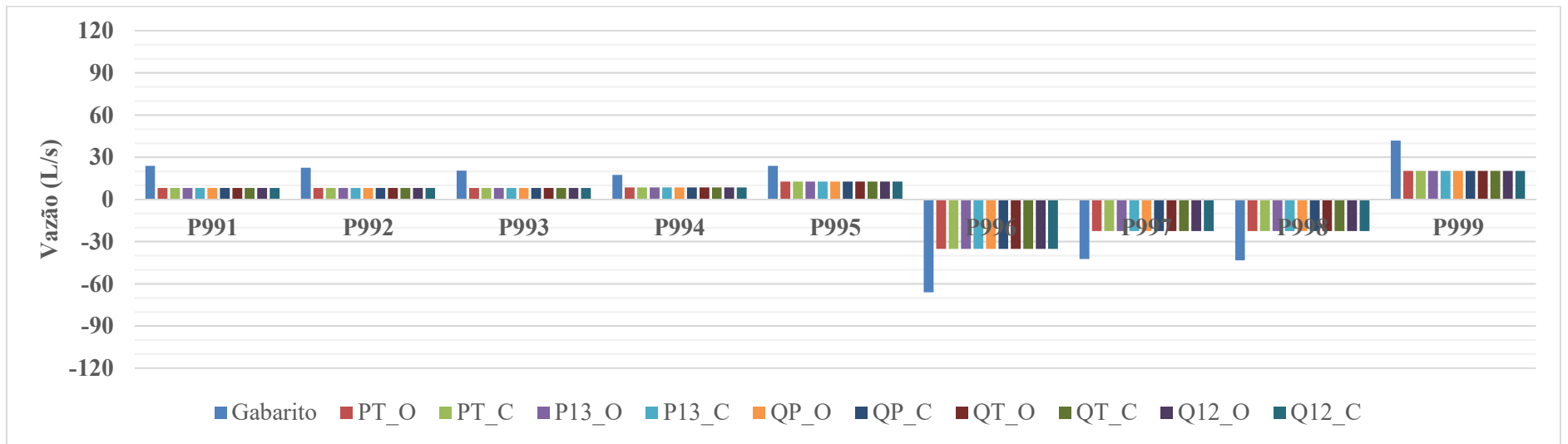
Fonte: Elaborado pelo autor



Fonte: Elaborado pelo autor

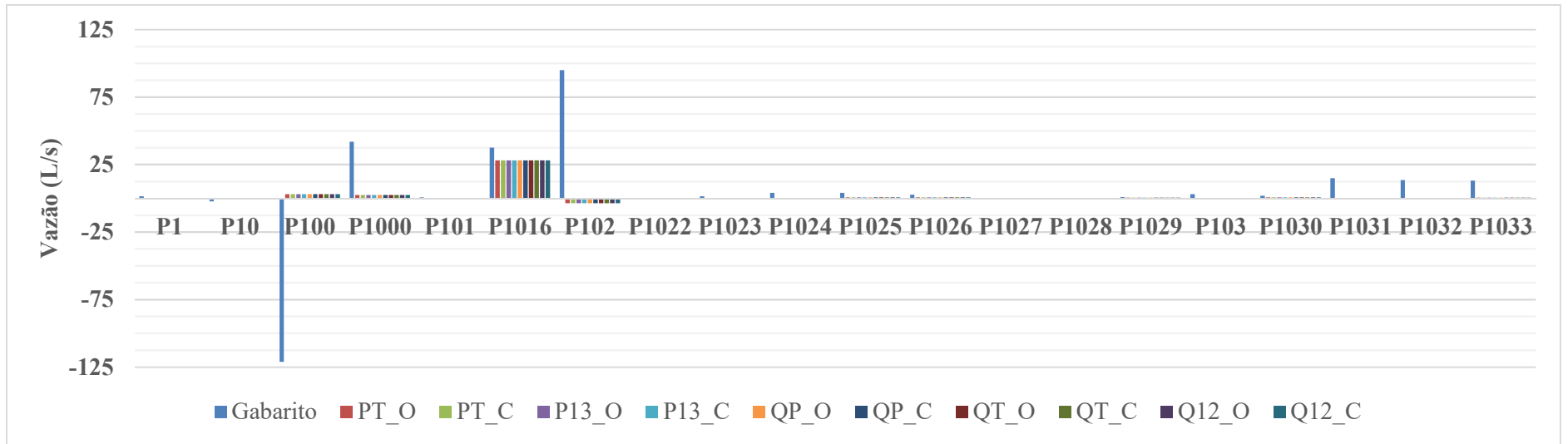


Fonte: Elaborado pelo autor

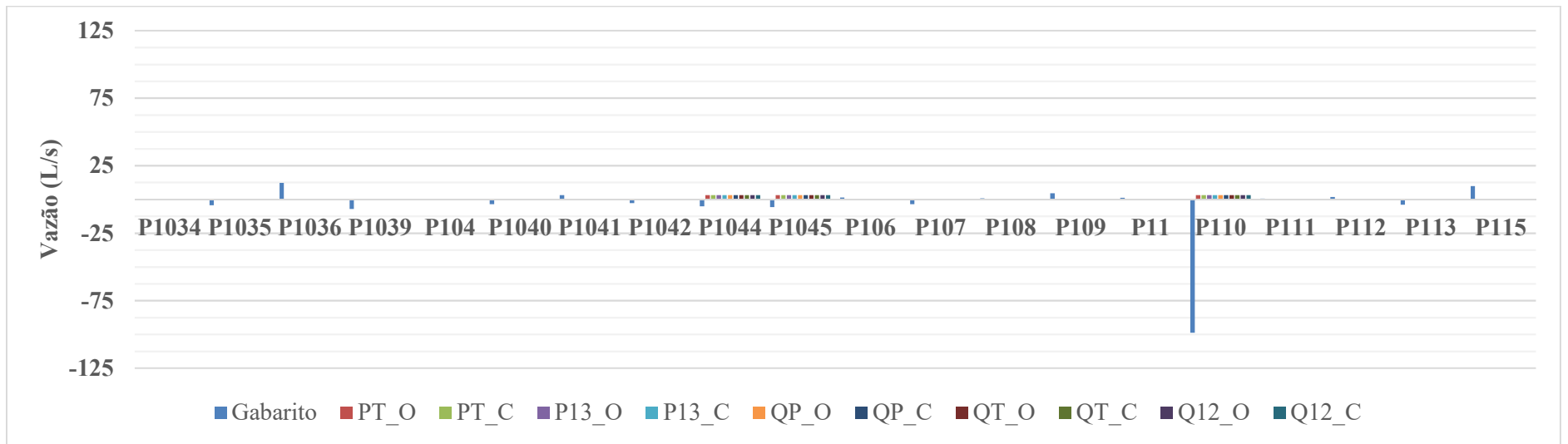


Fonte: Elaborado pelo autor

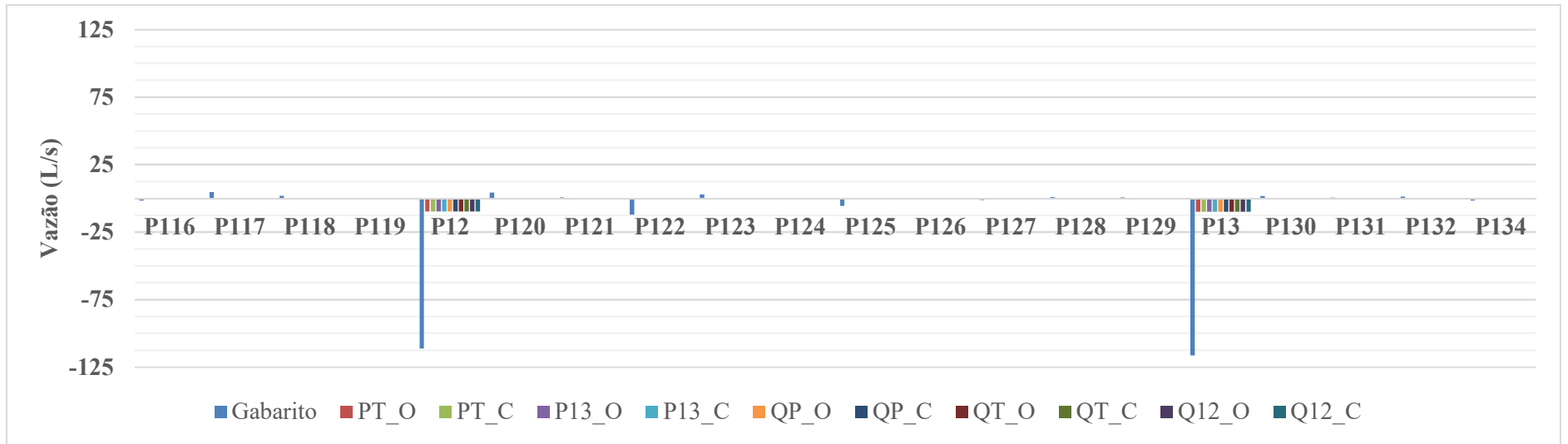
**APÊNDICE DV – Vazões encontradas na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Darcy-Weisbach com consumos nodais iniciais de 1 L/s:
rede C-Town**



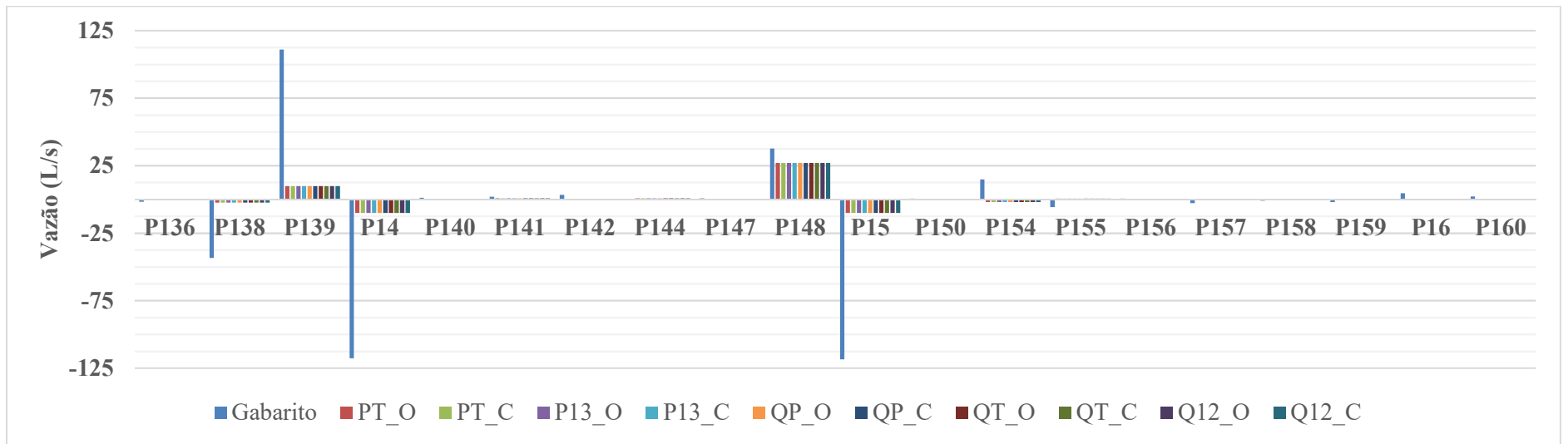
Fonte: Elaborado pelo autor



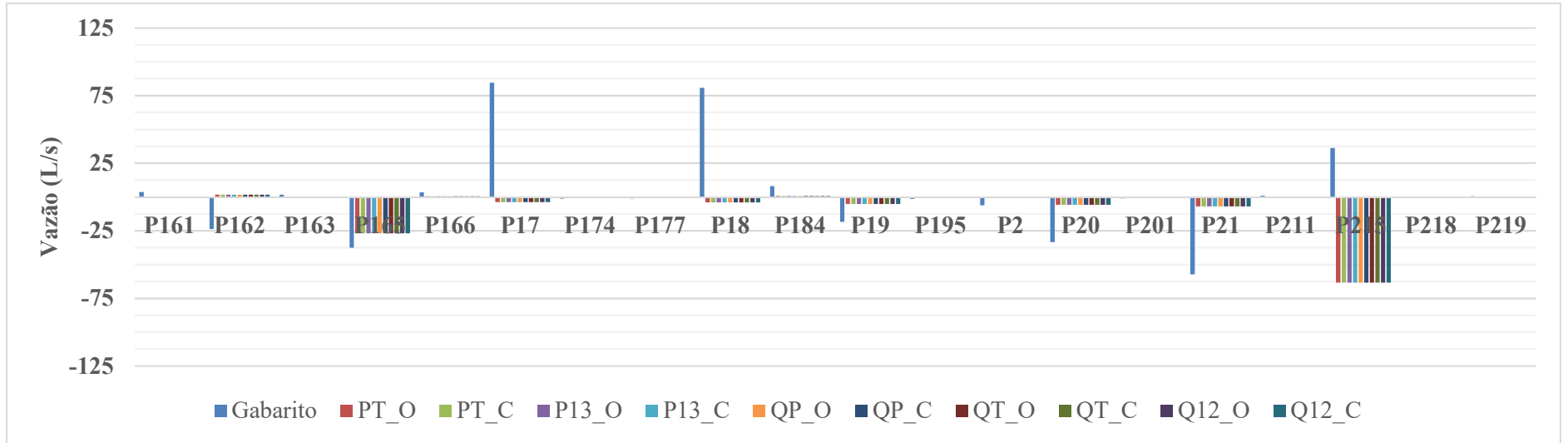
Fonte: Elaborado pelo autor



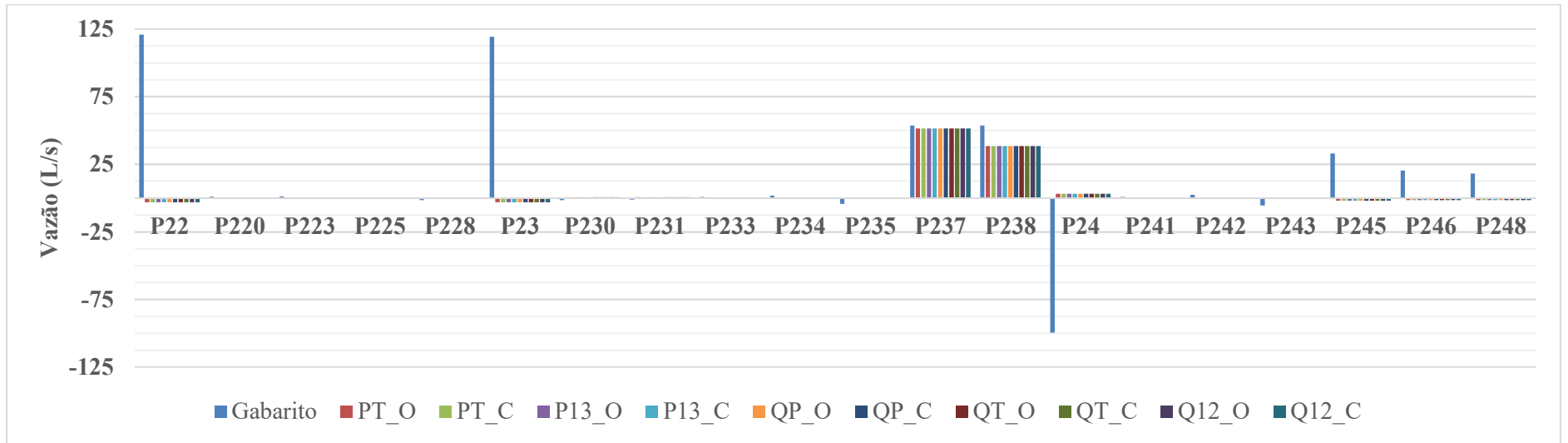
Fonte: Elaborado pelo autor



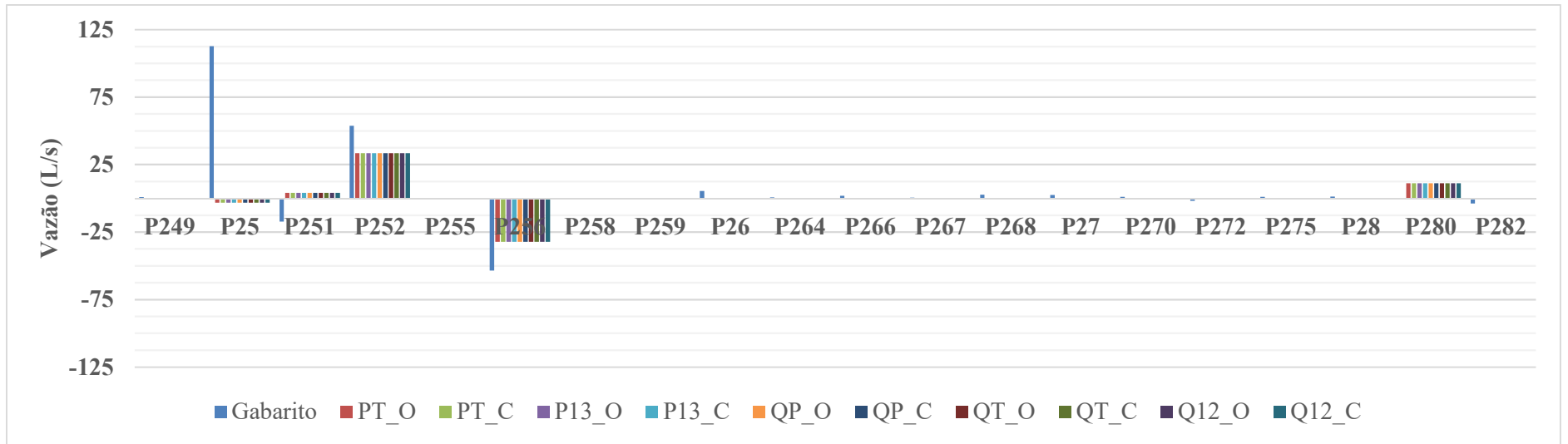
Fonte: Elaborado pelo autor



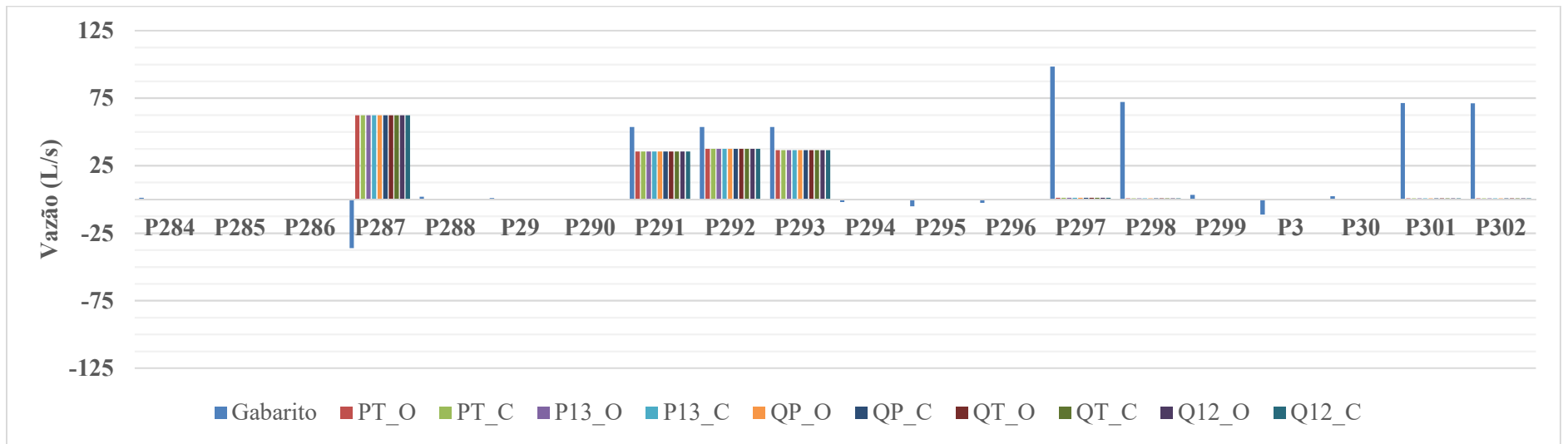
Fonte: Elaborado pelo autor



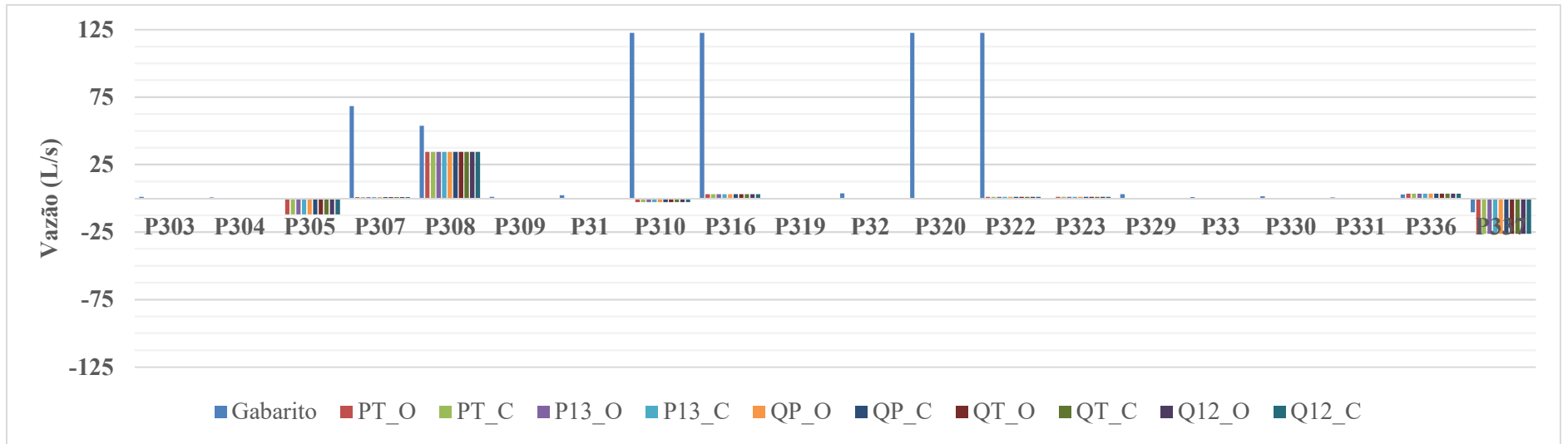
Fonte: Elaborado pelo autor



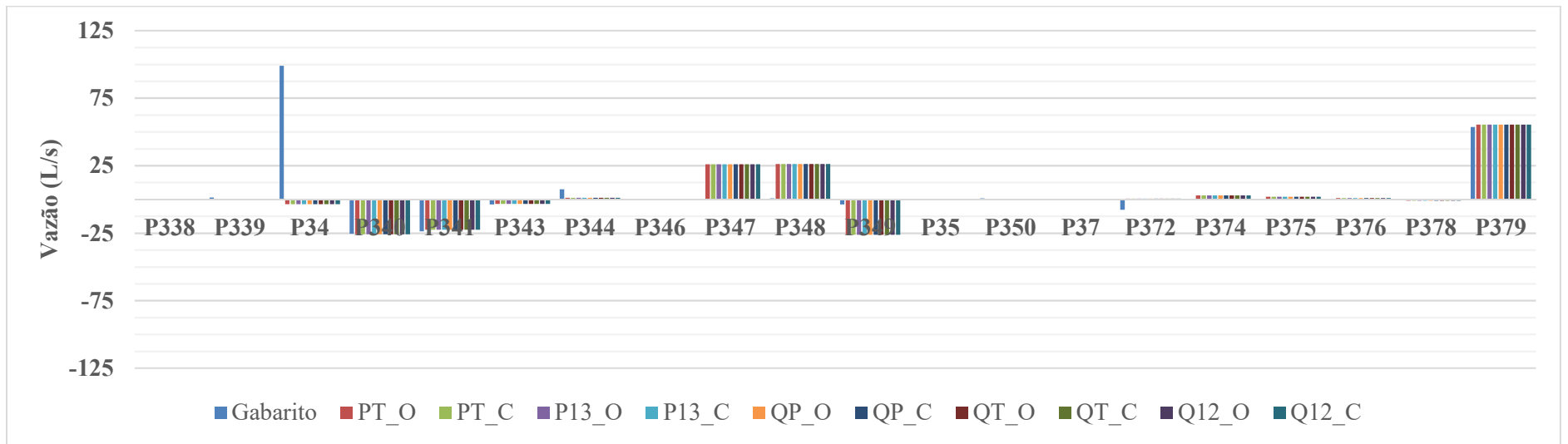
Fonte: Elaborado pelo autor



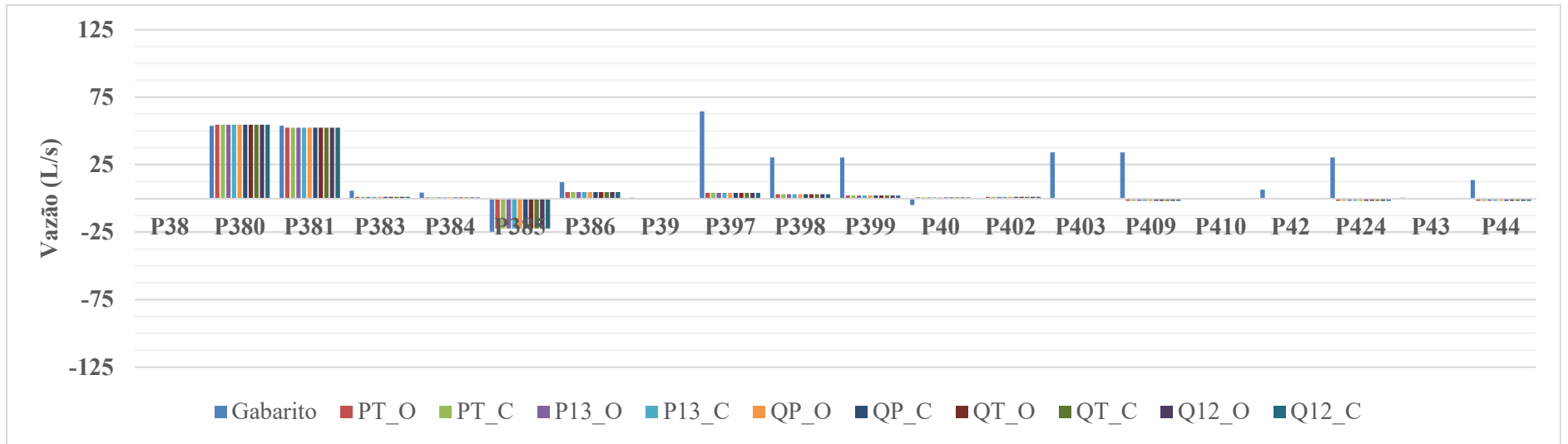
Fonte: Elaborado pelo autor



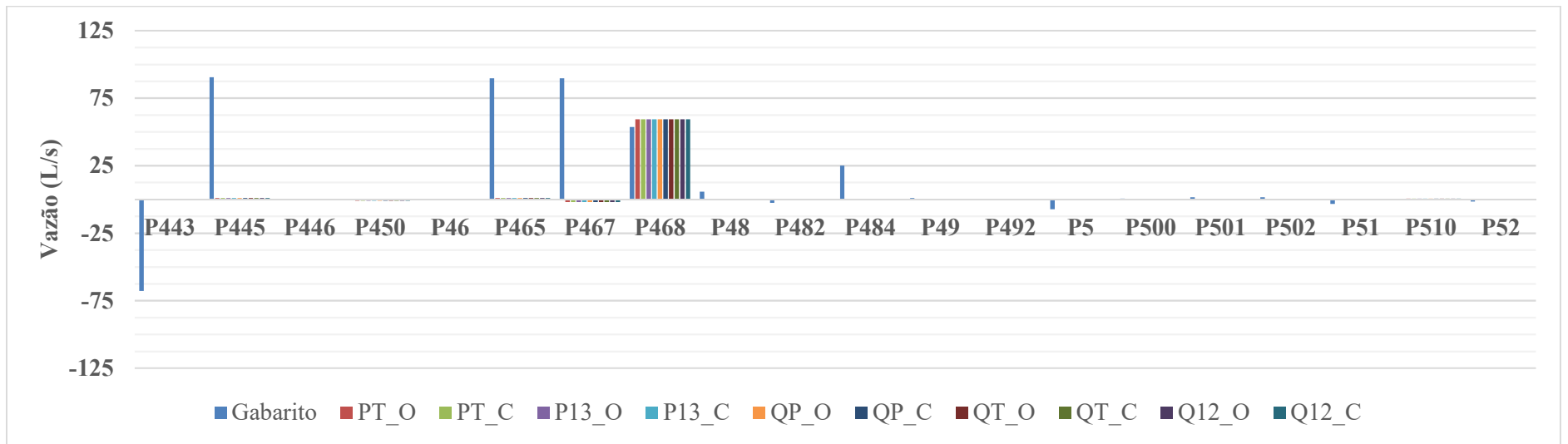
Fonte: Elaborado pelo autor



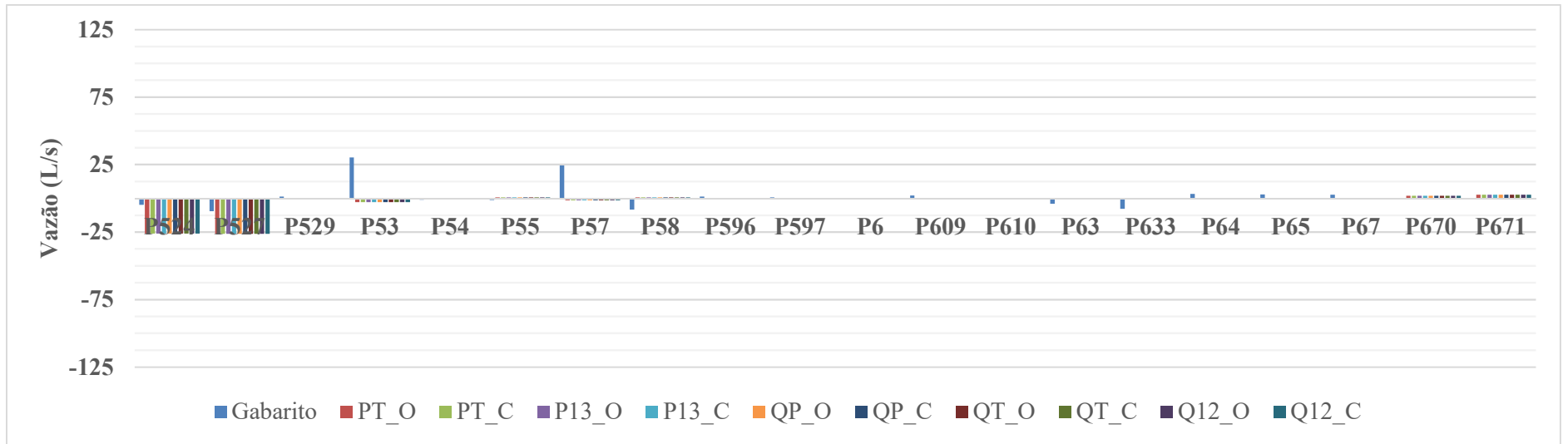
Fonte: Elaborado pelo autor



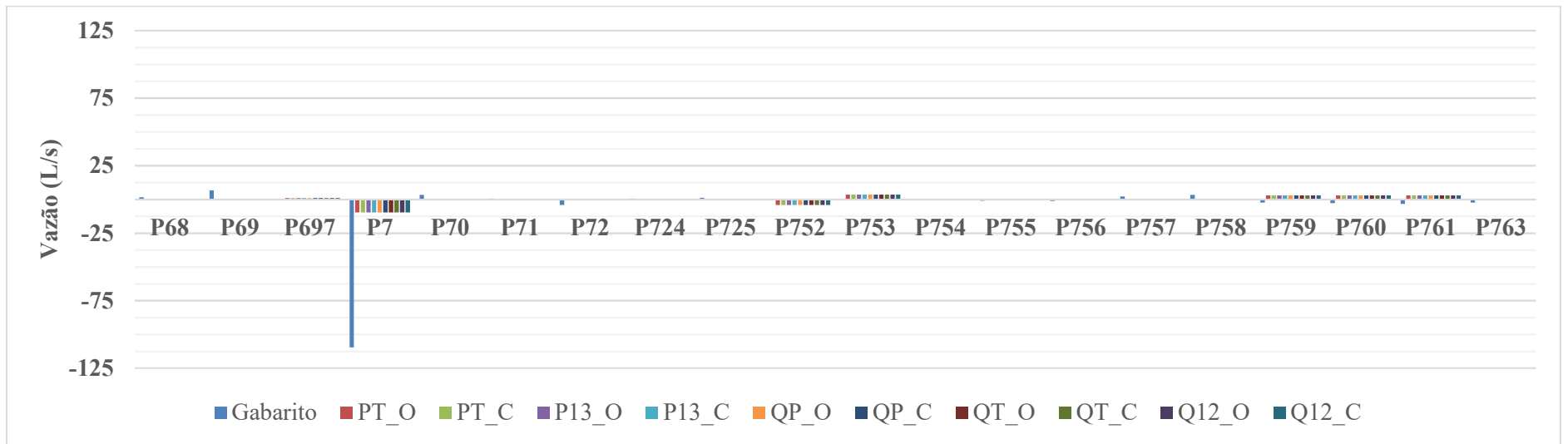
Fonte: Elaborado pelo autor



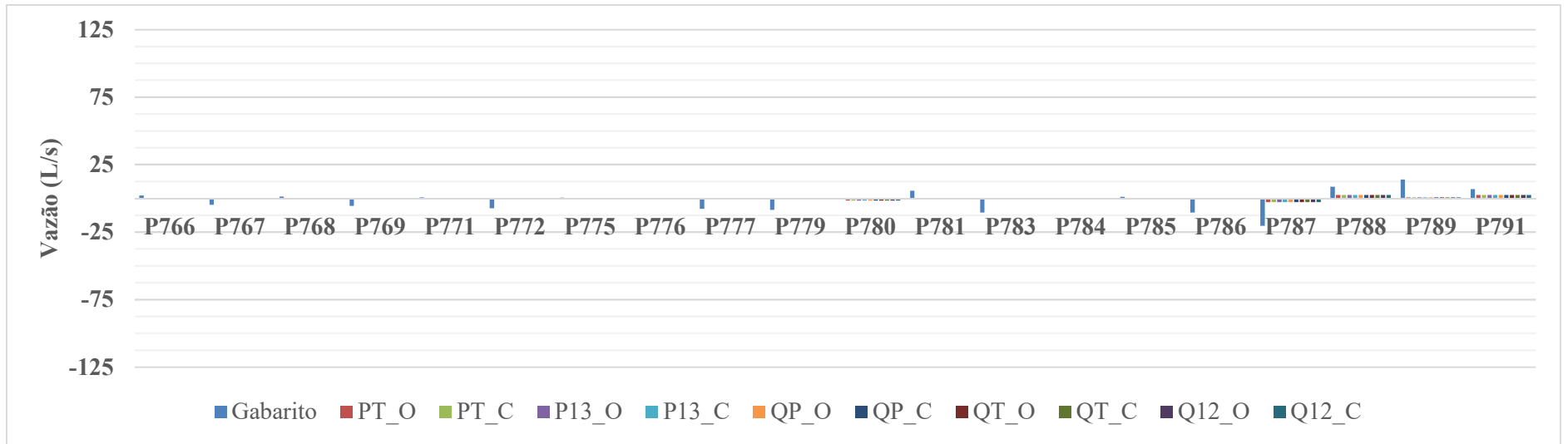
Fonte: Elaborado pelo autor



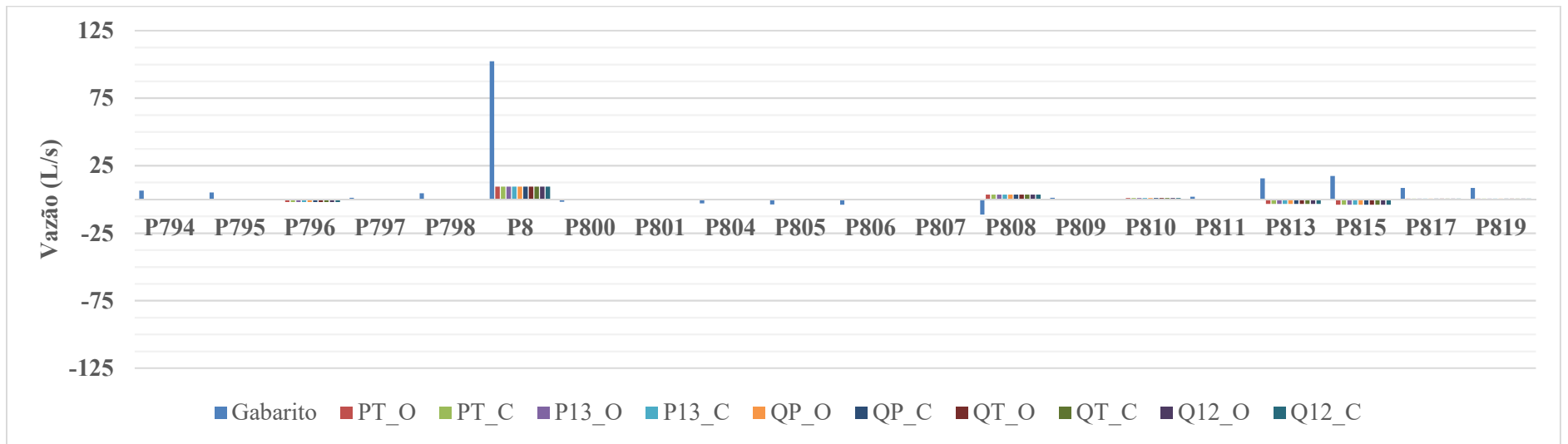
Fonte: Elaborado pelo autor



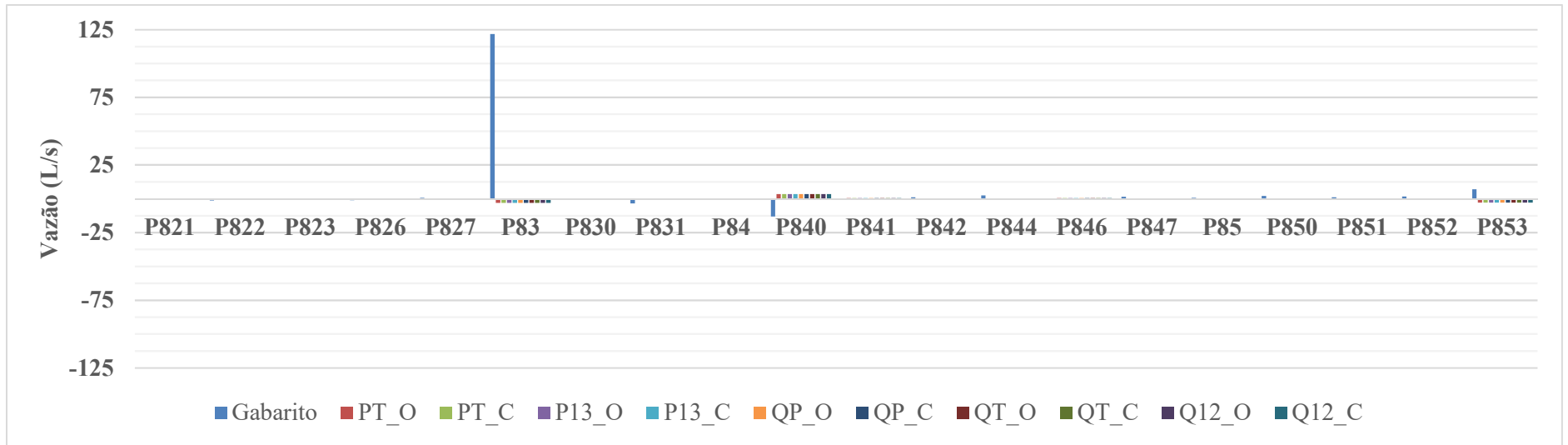
Fonte: Elaborado pelo autor



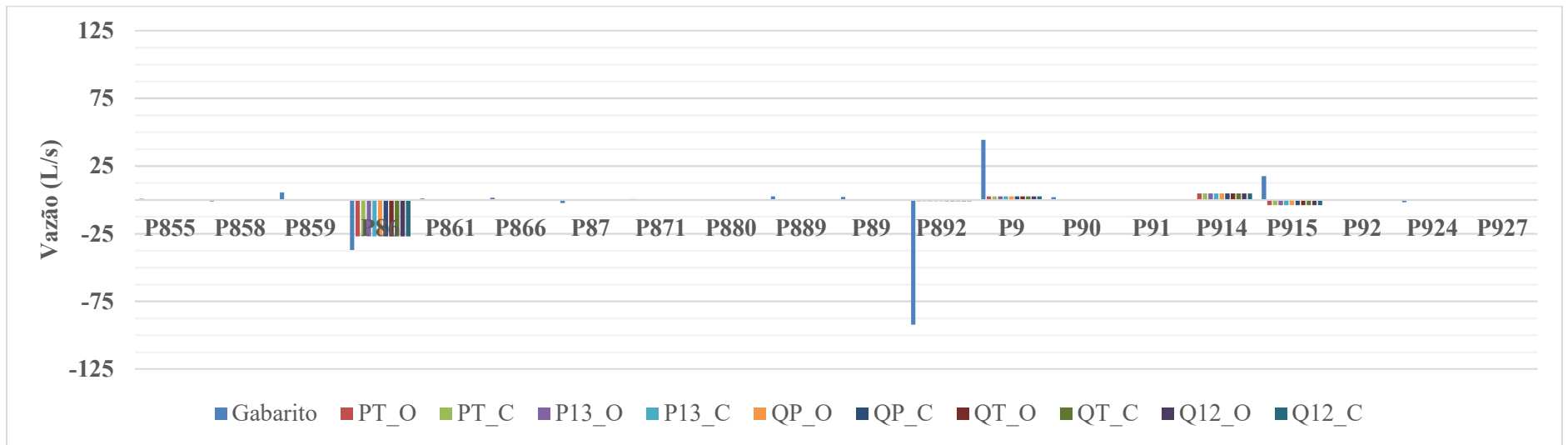
Fonte: Elaborado pelo autor



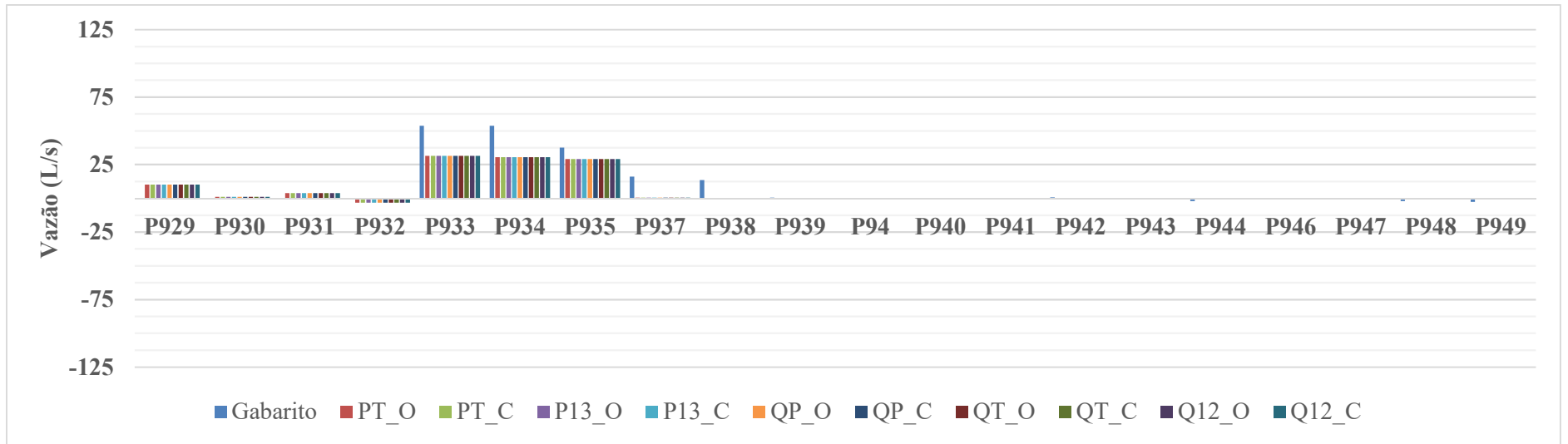
Fonte: Elaborado pelo autor



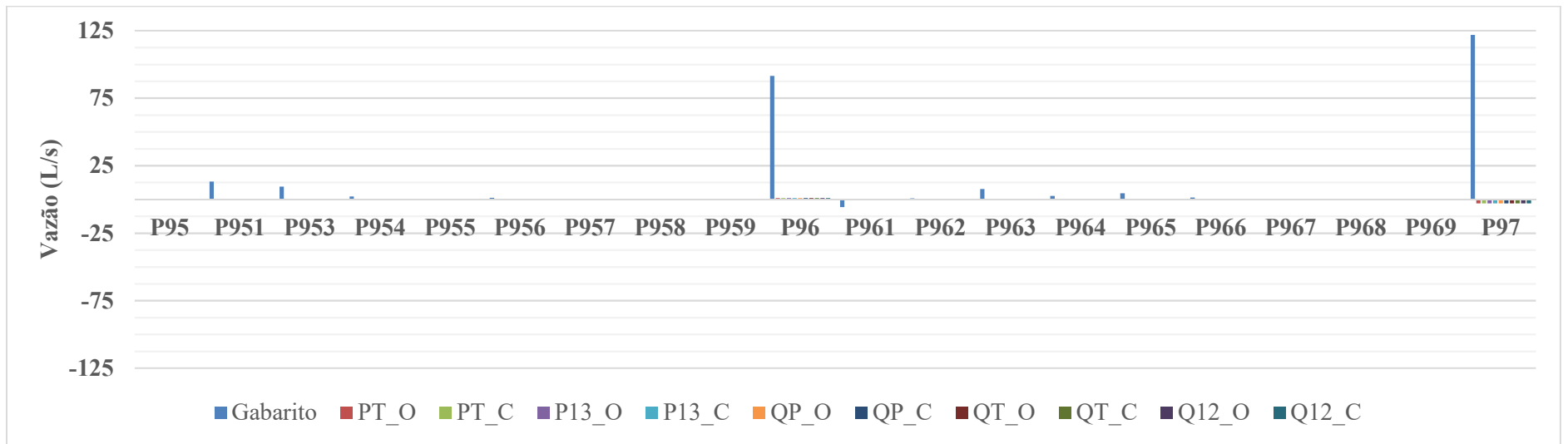
Fonte: Elaborado pelo autor



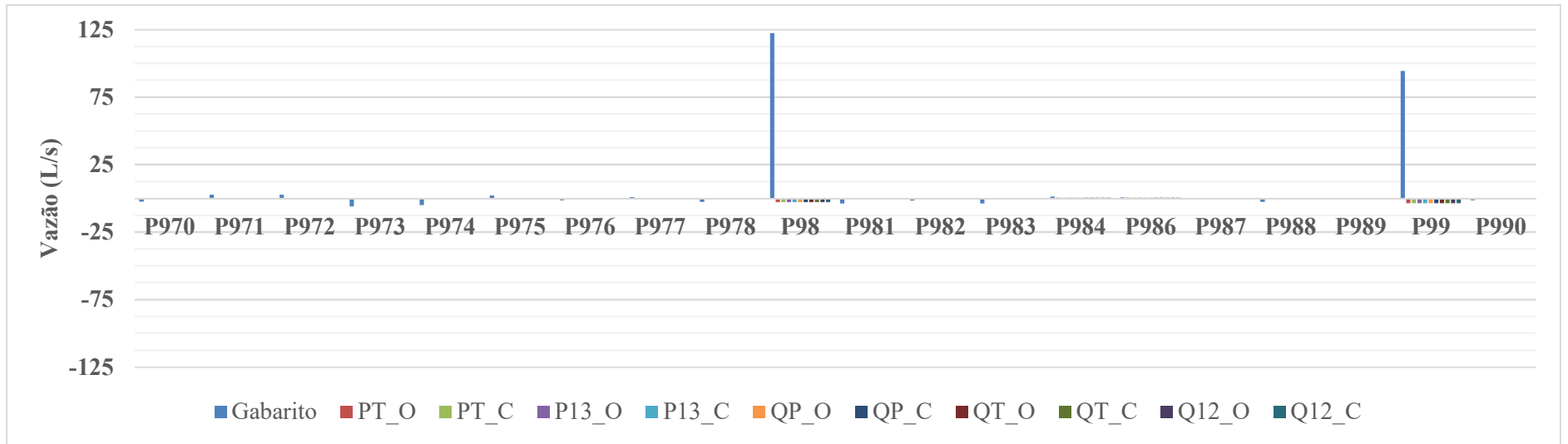
Fonte: Elaborado pelo autor



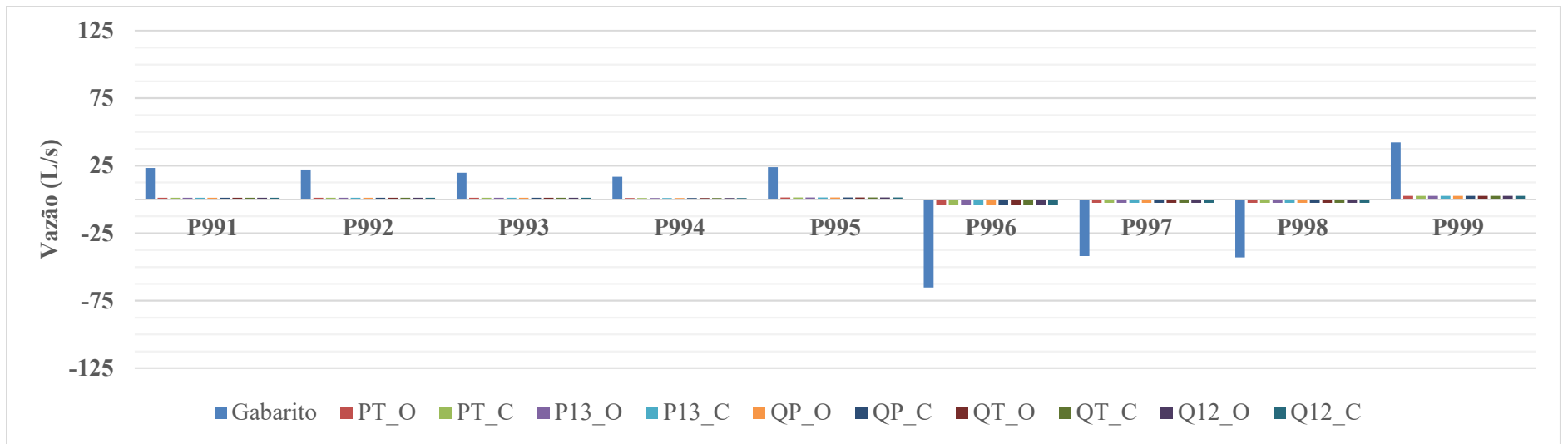
Fonte: Elaborado pelo autor



Fonte: Elaborado pelo autor

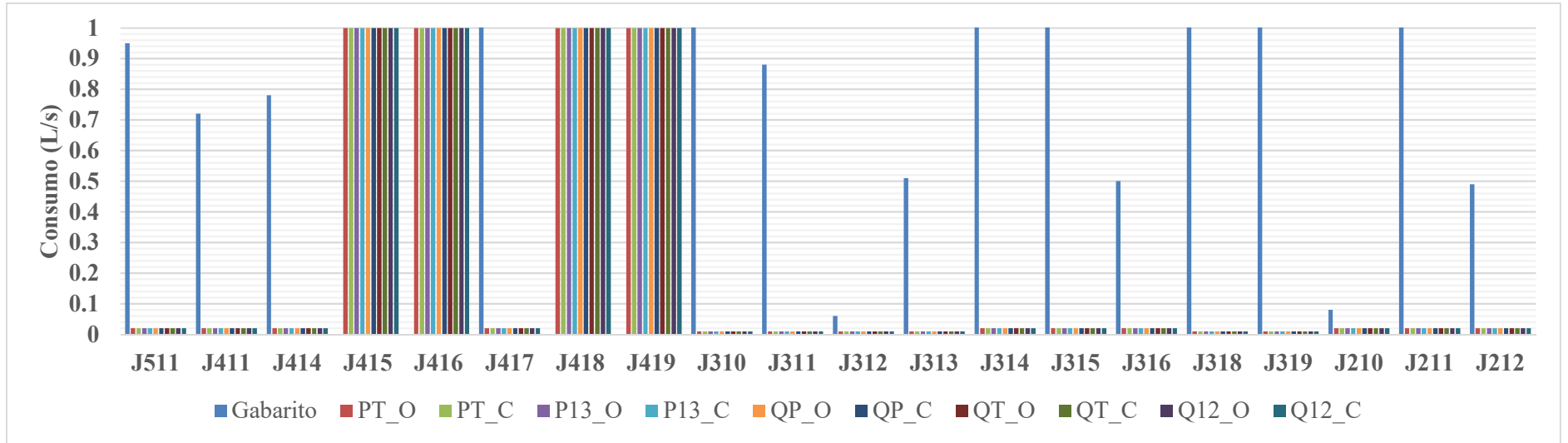


Fonte: Elaborado pelo autor

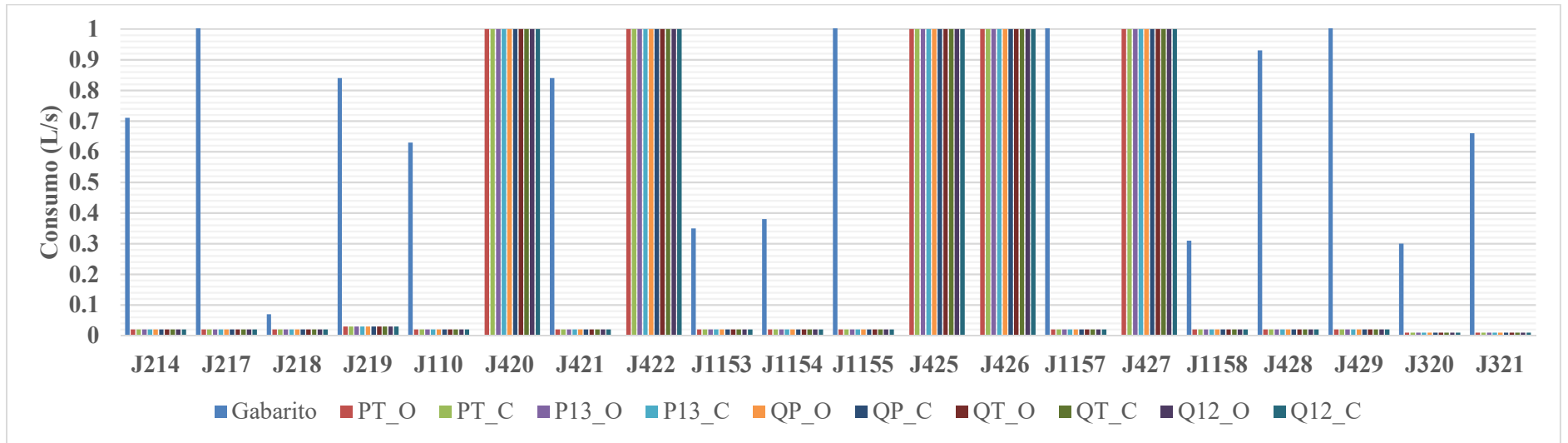


Fonte: Elaborado pelo autor

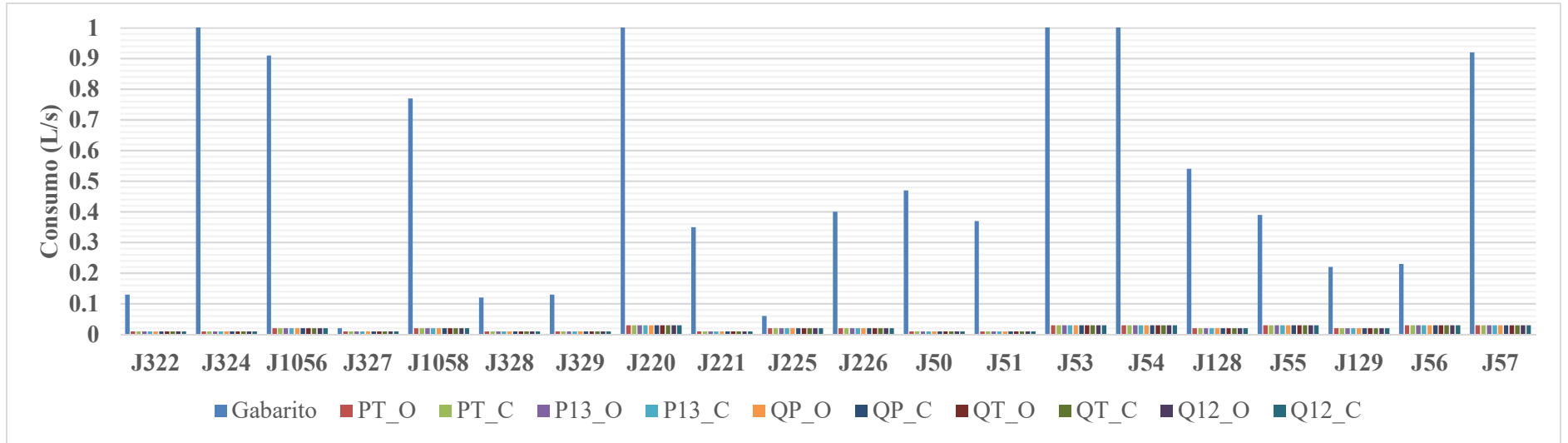
APÊNDICE DW – Consumos encontrados na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Hazen-Williams com consumos nodais iniciais de 1 L/s: rede C-Town



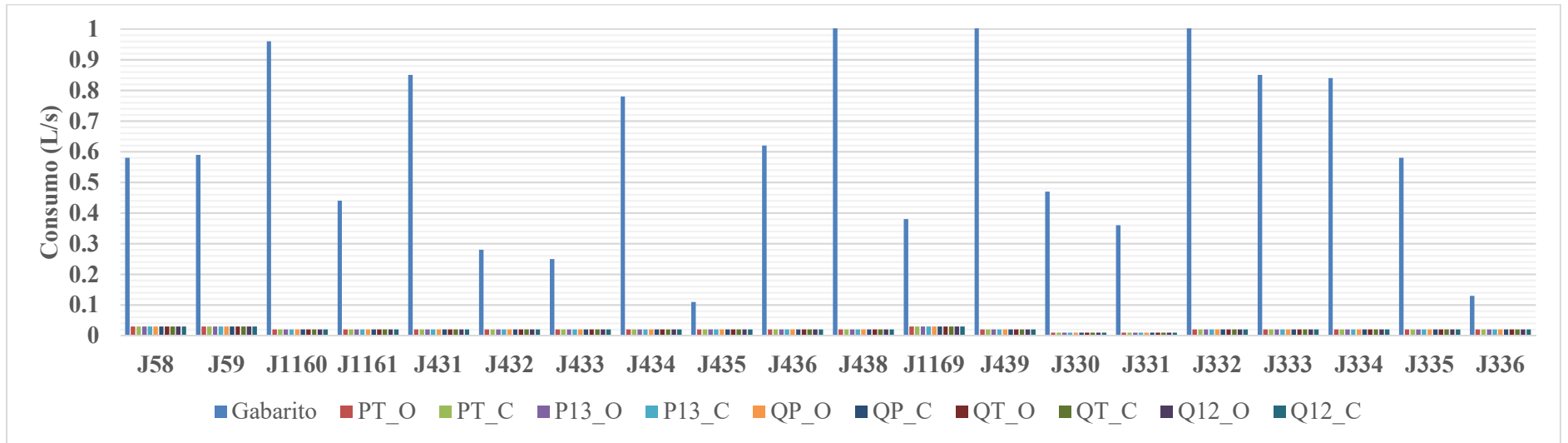
Fonte: Elaborado pelo autor



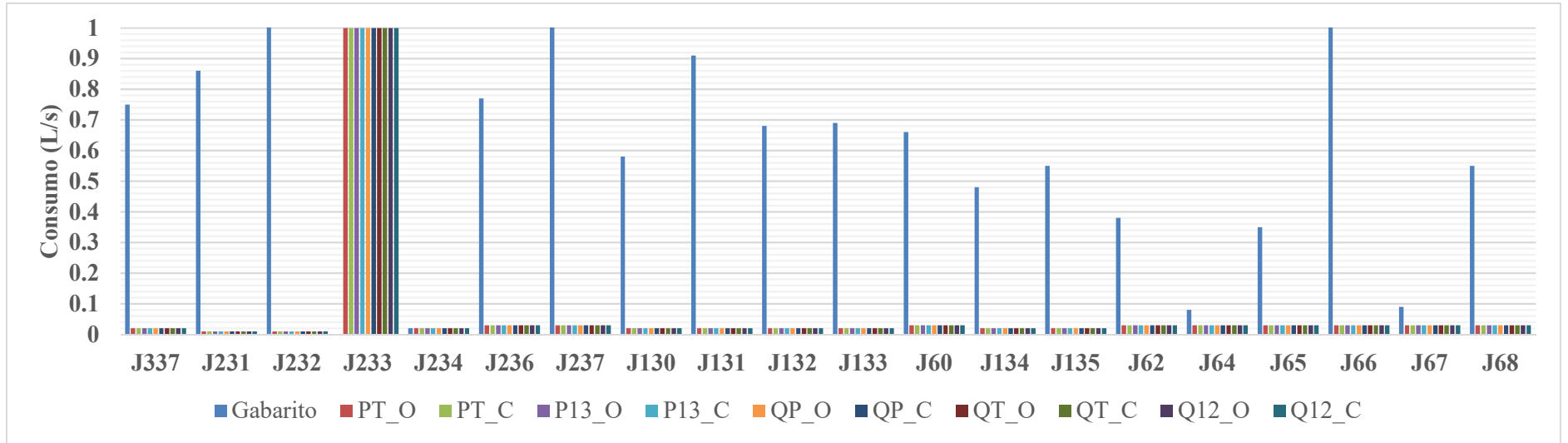
Fonte: Elaborado pelo autor



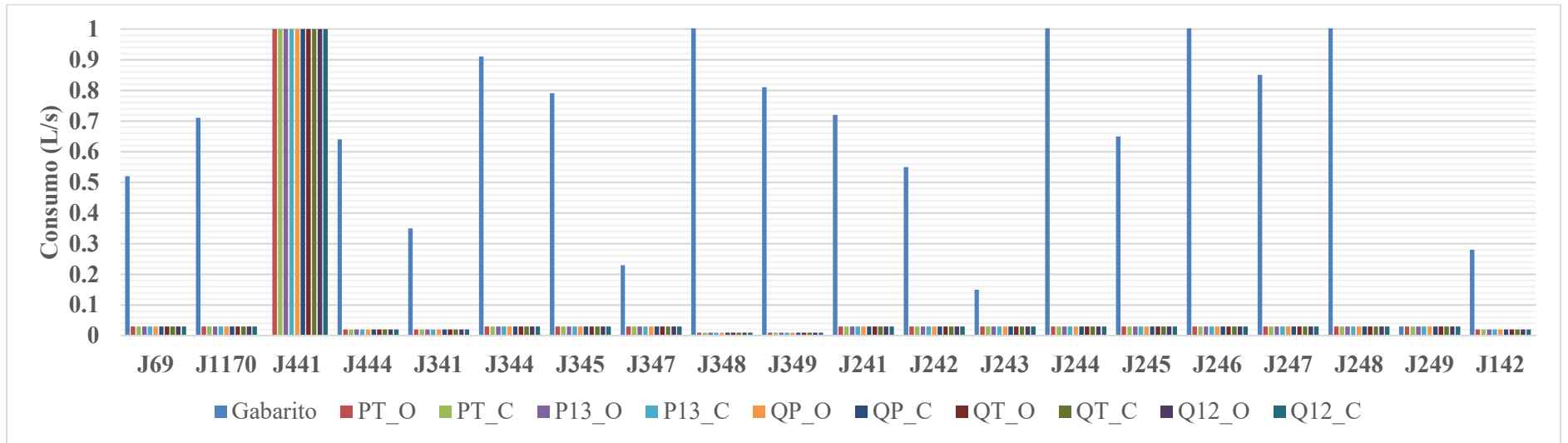
Fonte: Elaborado pelo autor



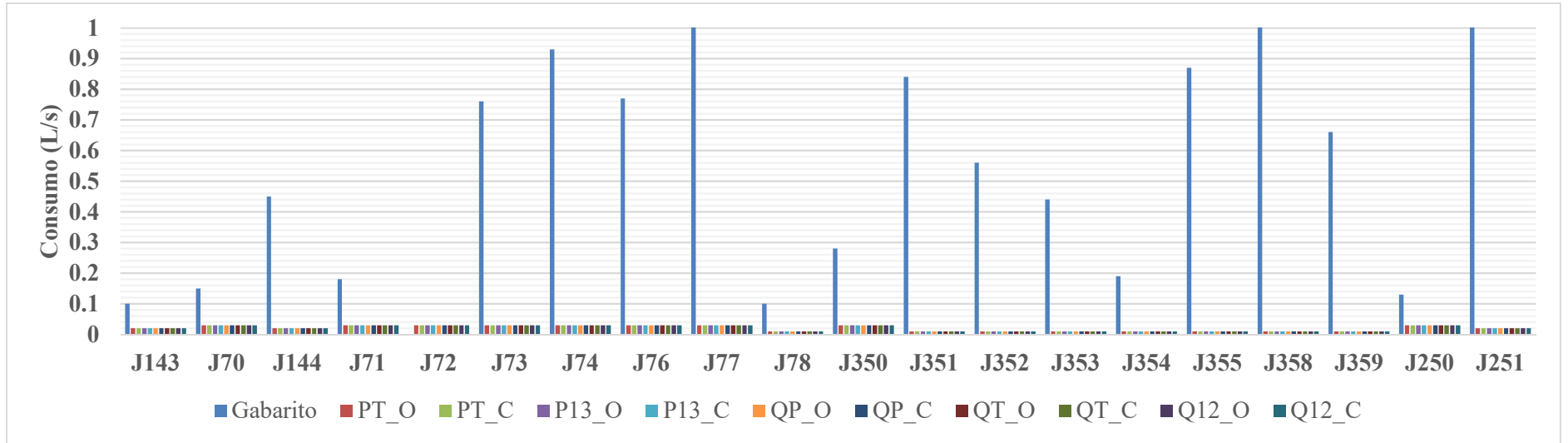
Fonte: Elaborado pelo autor



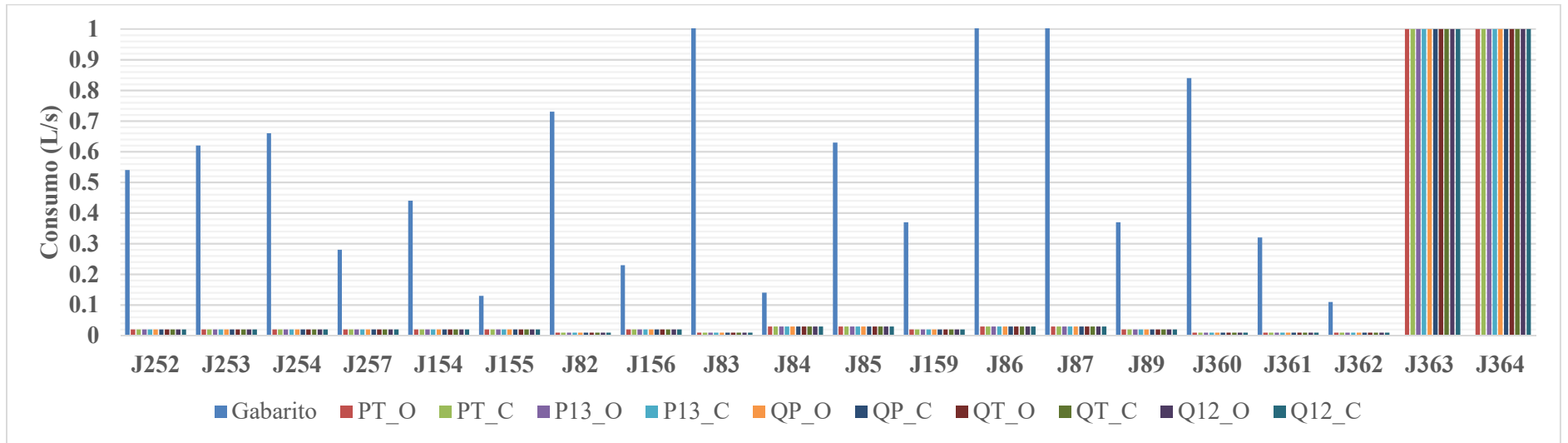
Fonte: Elaborado pelo autor



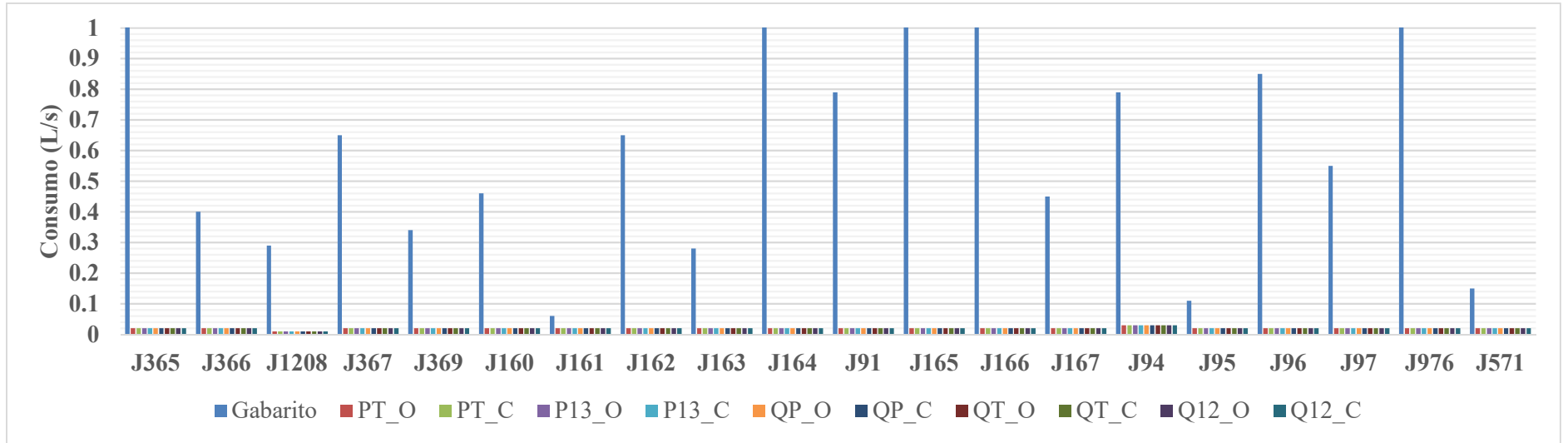
Fonte: Elaborado pelo autor



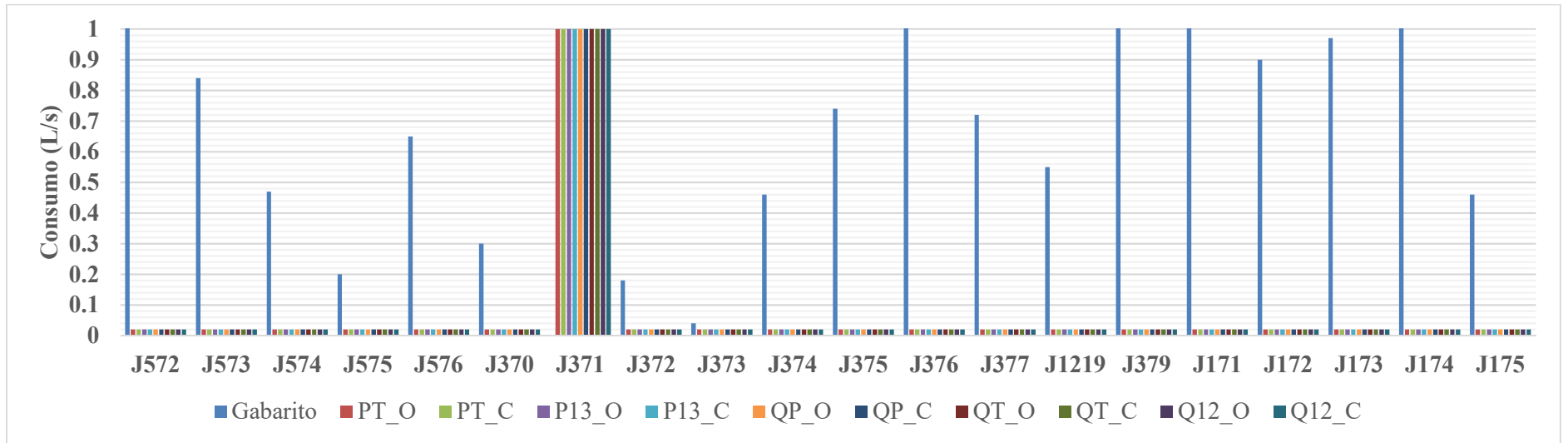
Fonte: Elaborado pelo autor



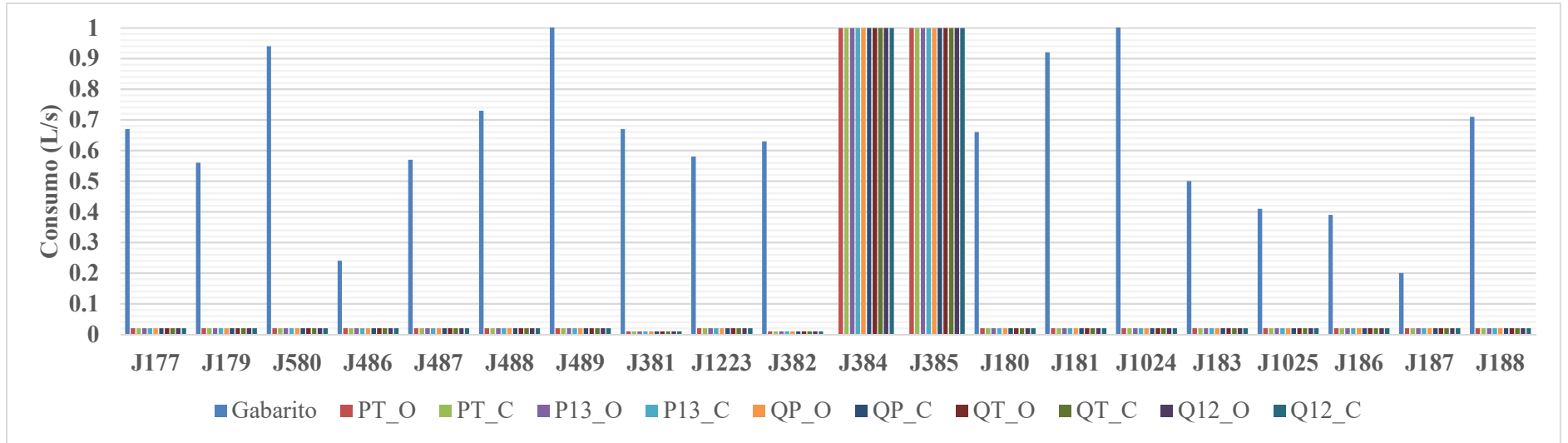
Fonte: Elaborado pelo autor



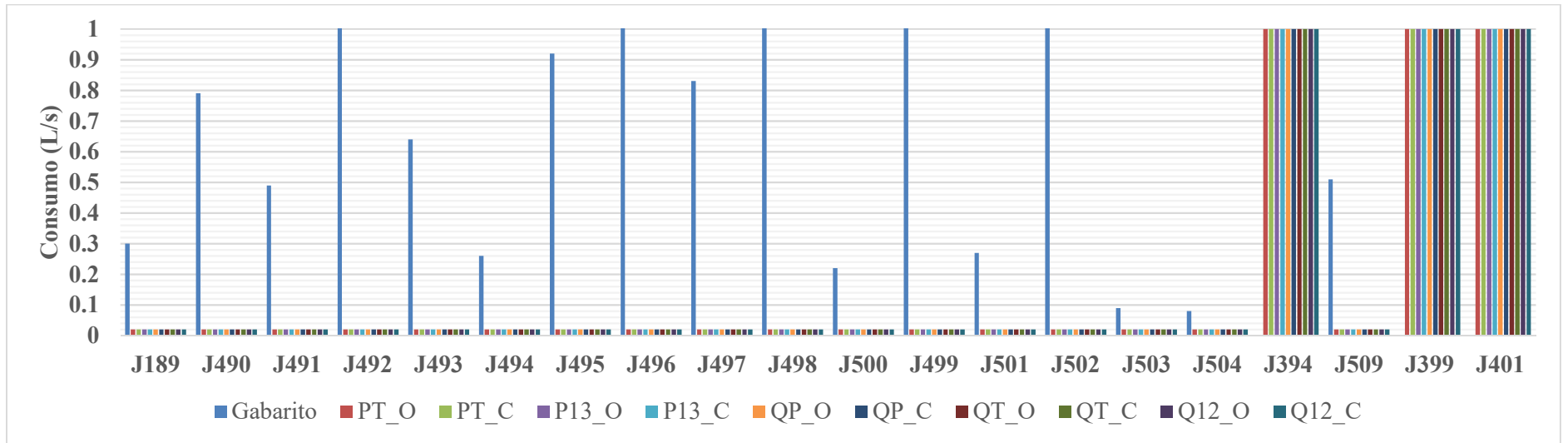
Fonte: Elaborado pelo autor



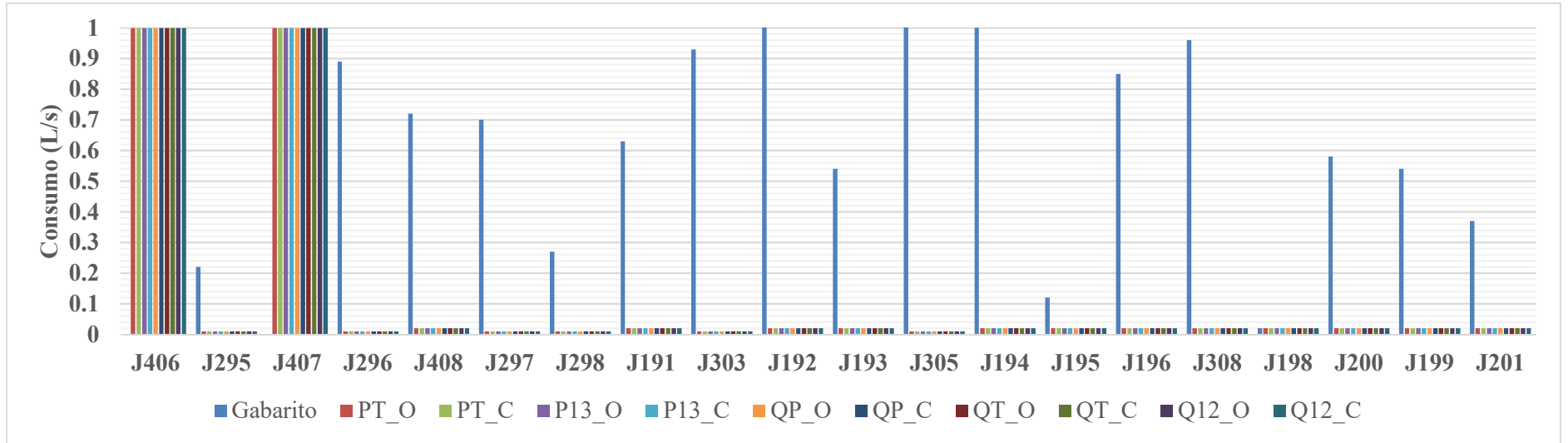
Fonte: Elaborado pelo autor



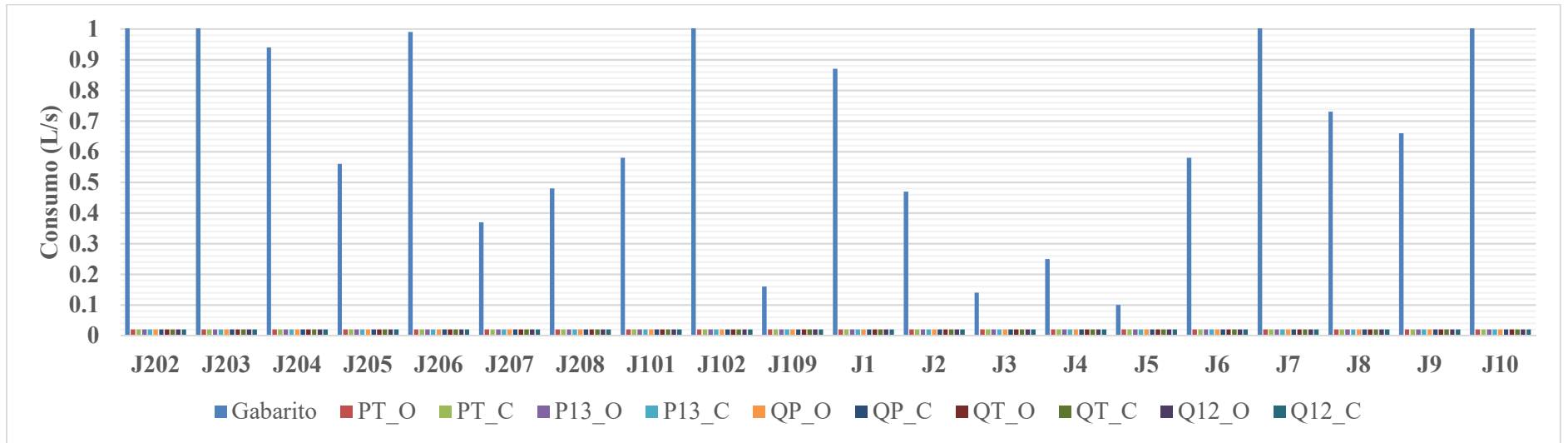
Fonte: Elaborado pelo autor



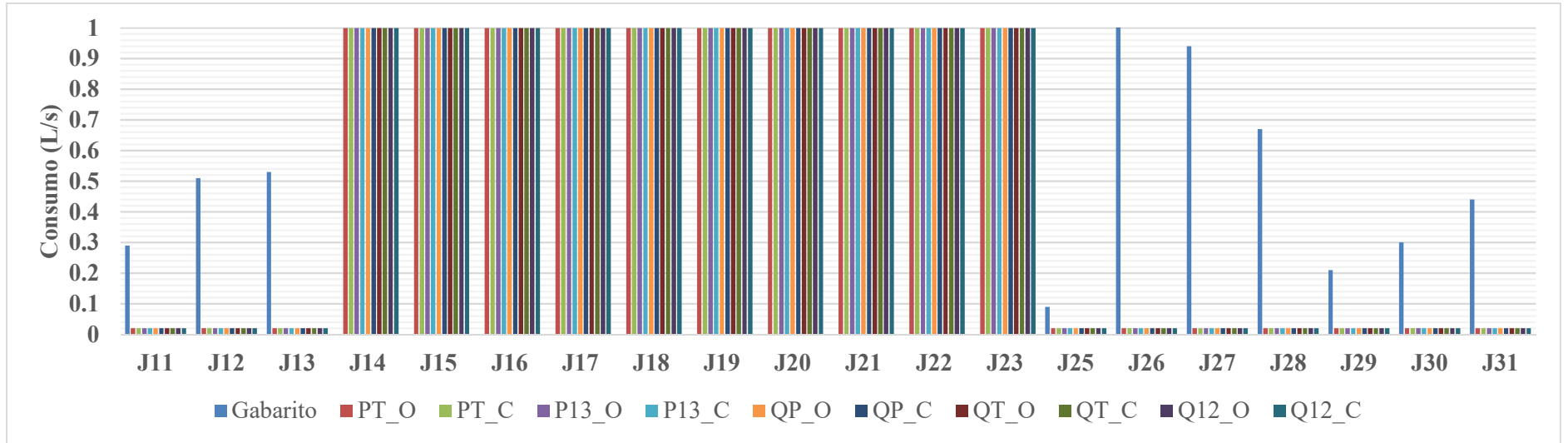
Fonte: Elaborado pelo autor



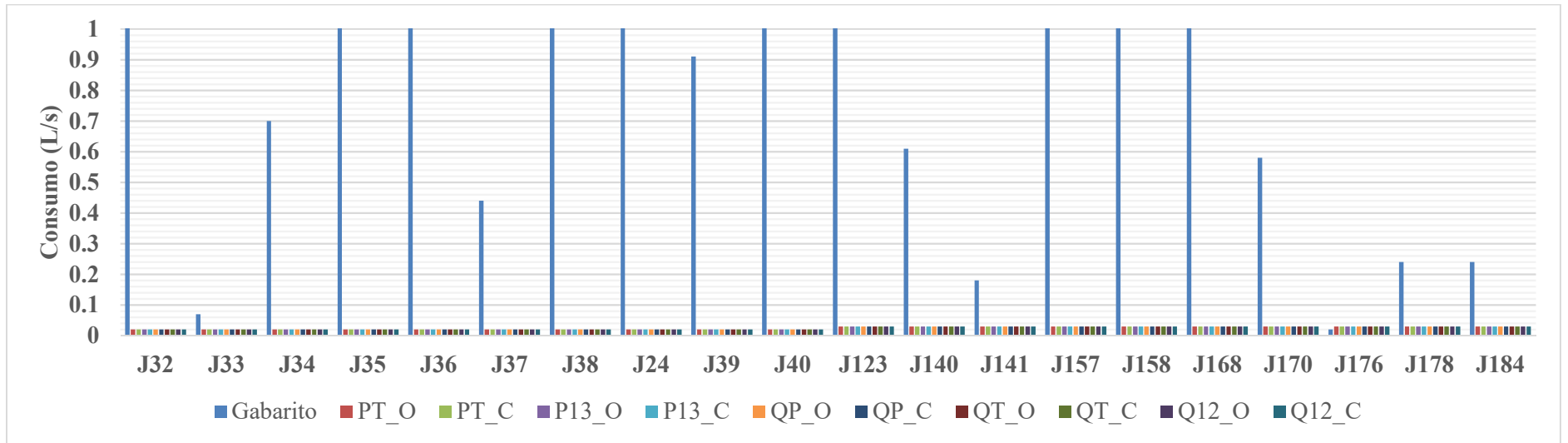
Fonte: Elaborado pelo autor



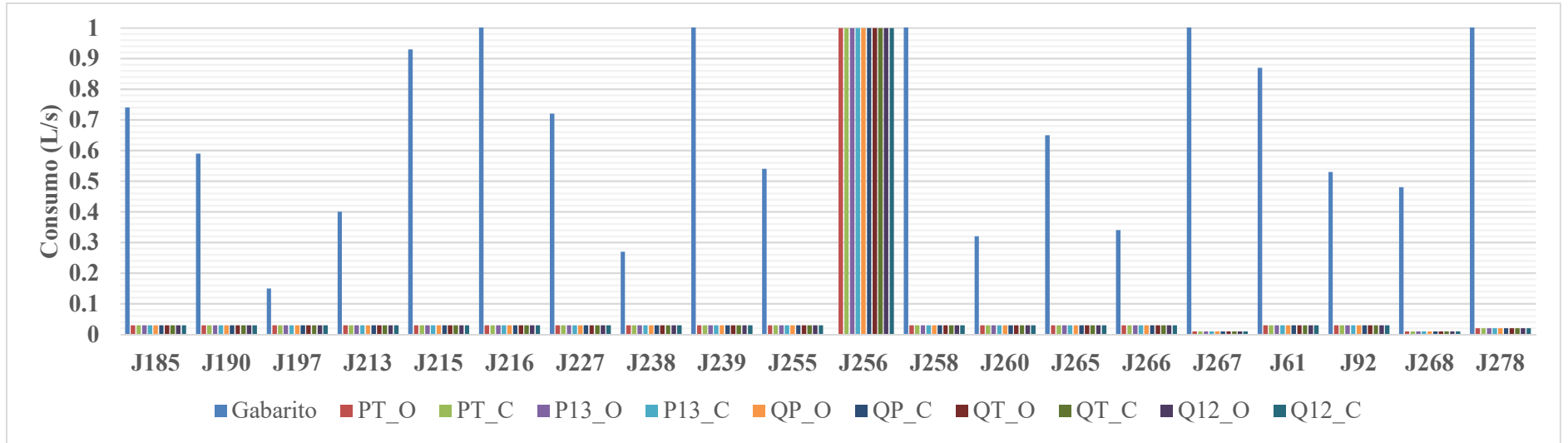
Fonte: Elaborado pelo autor



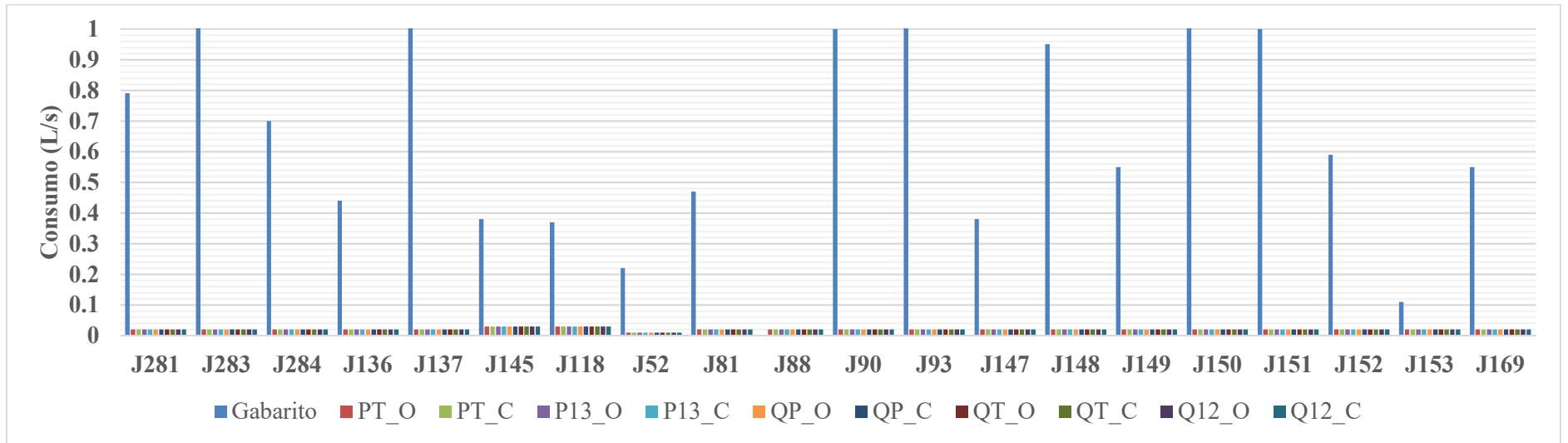
Fonte: Elaborado pelo autor



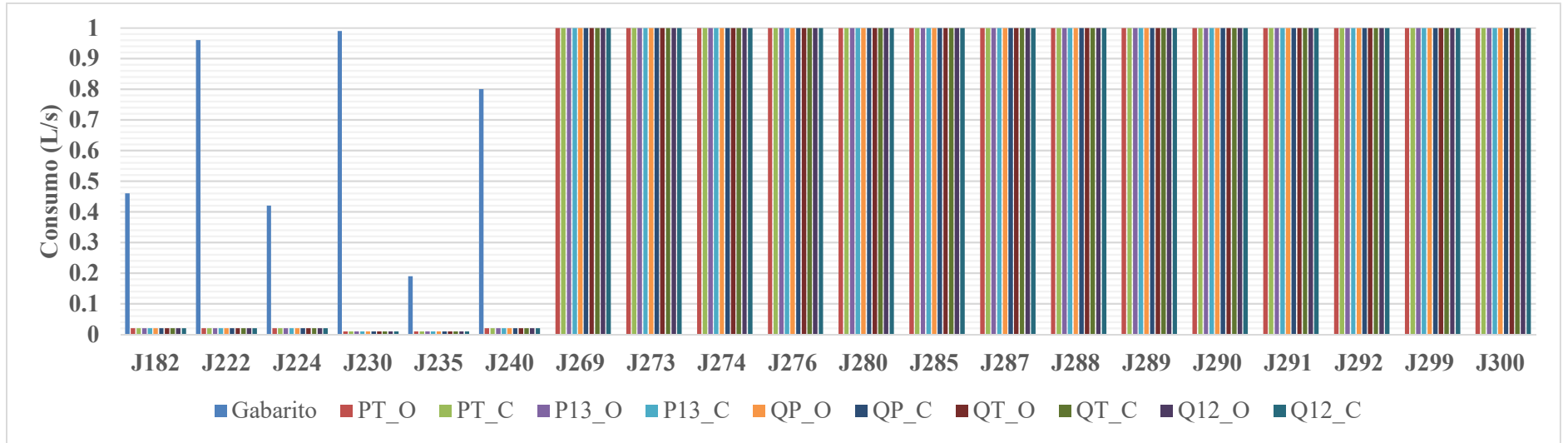
Fonte: Elaborado pelo autor



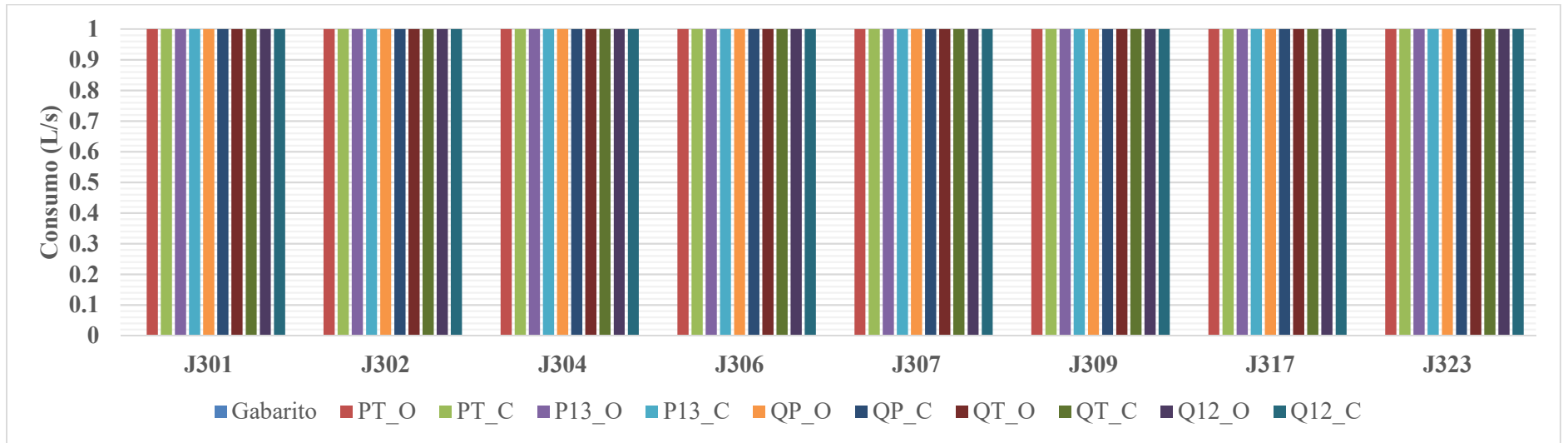
Fonte: Elaborado pelo autor



Fonte: Elaborado pelo autor

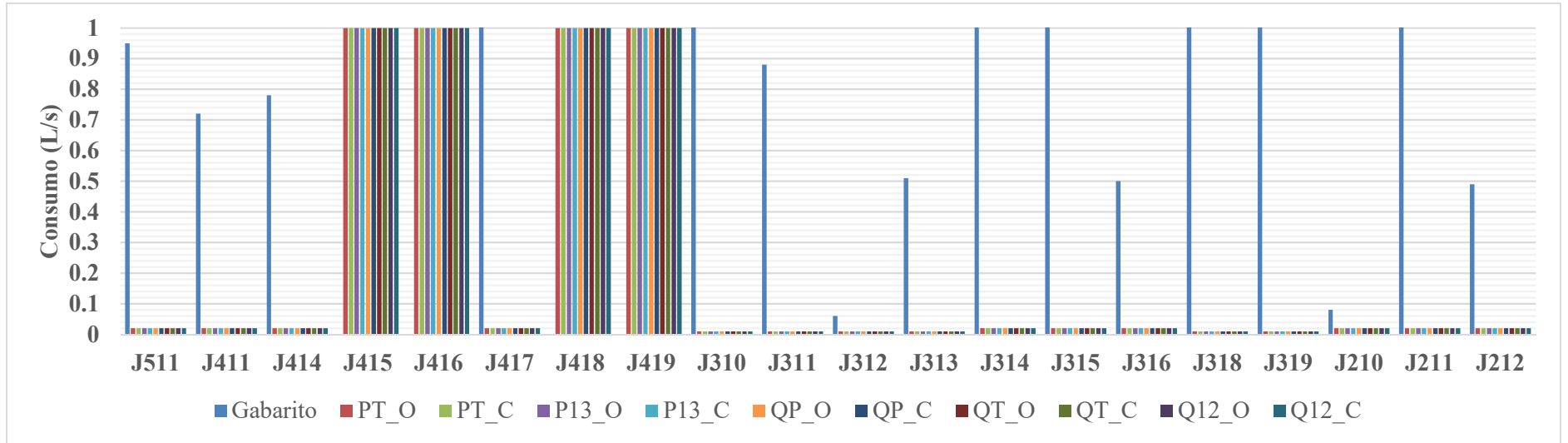


Fonte: Elaborado pelo autor

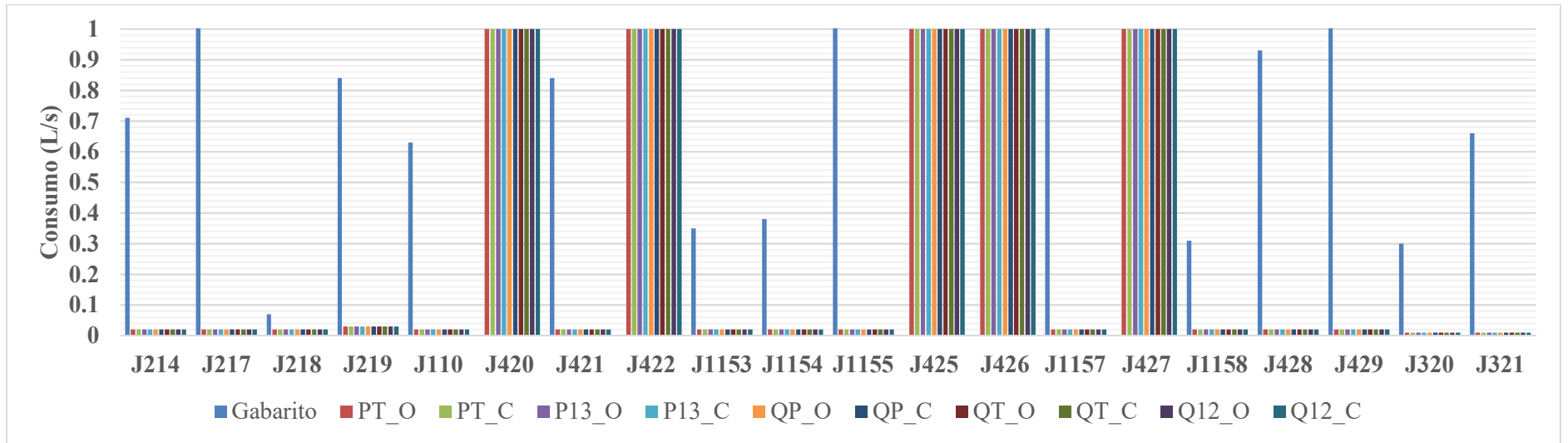


Fonte: Elaborado pelo autor

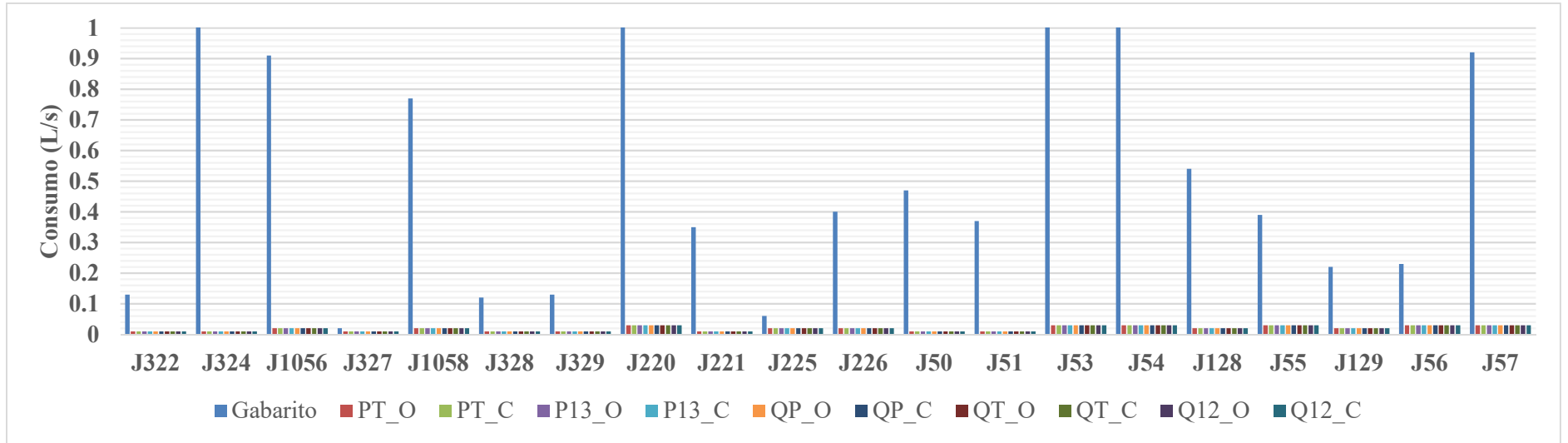
APÊNDICE DX – Consumos encontrados na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Darcy-Weisbach com consumos nodais iniciais de 1 L/s: rede C-Town



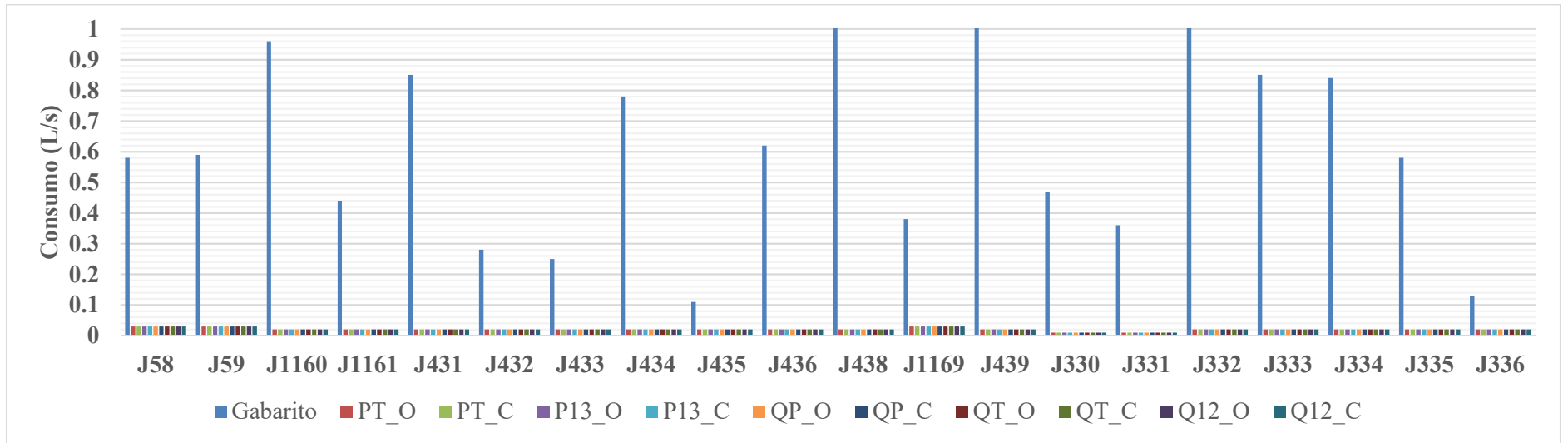
Fonte: Elaborado pelo autor



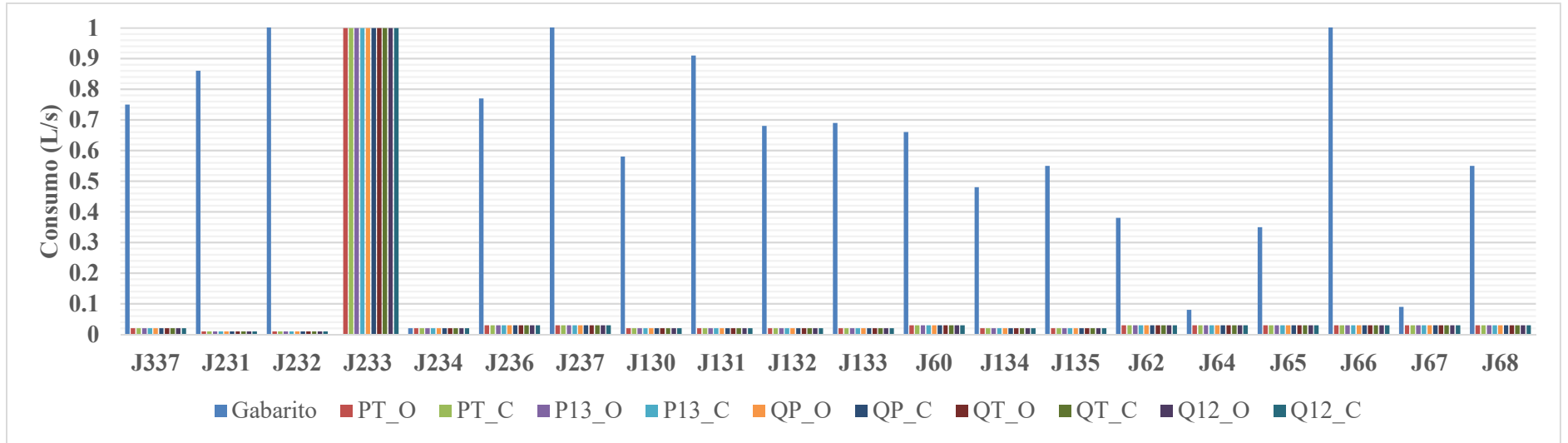
Fonte: Elaborado pelo autor



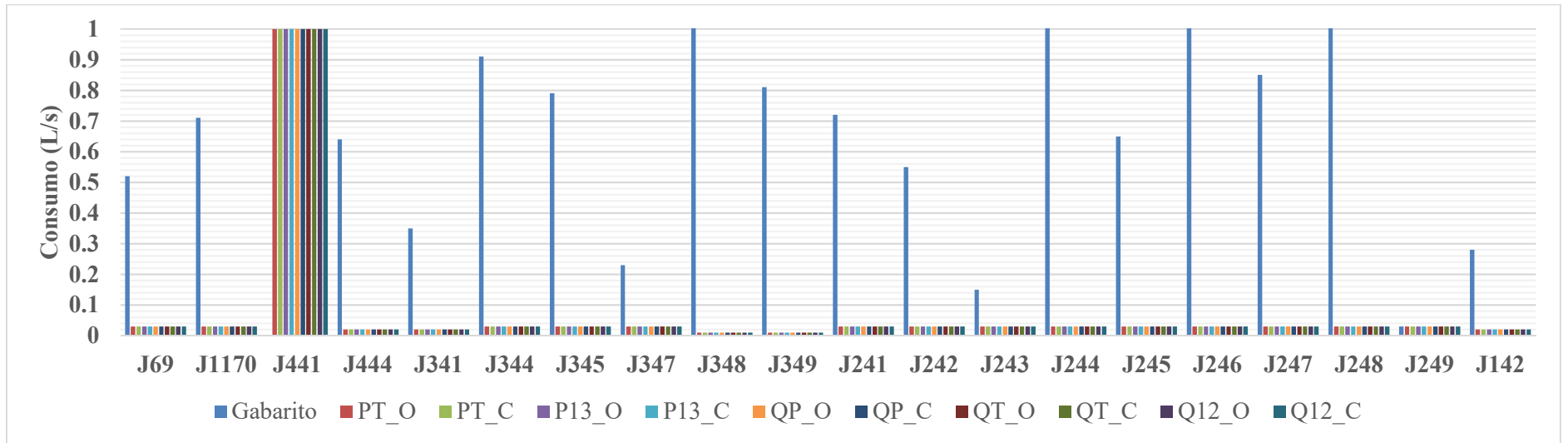
Fonte: Elaborado pelo autor



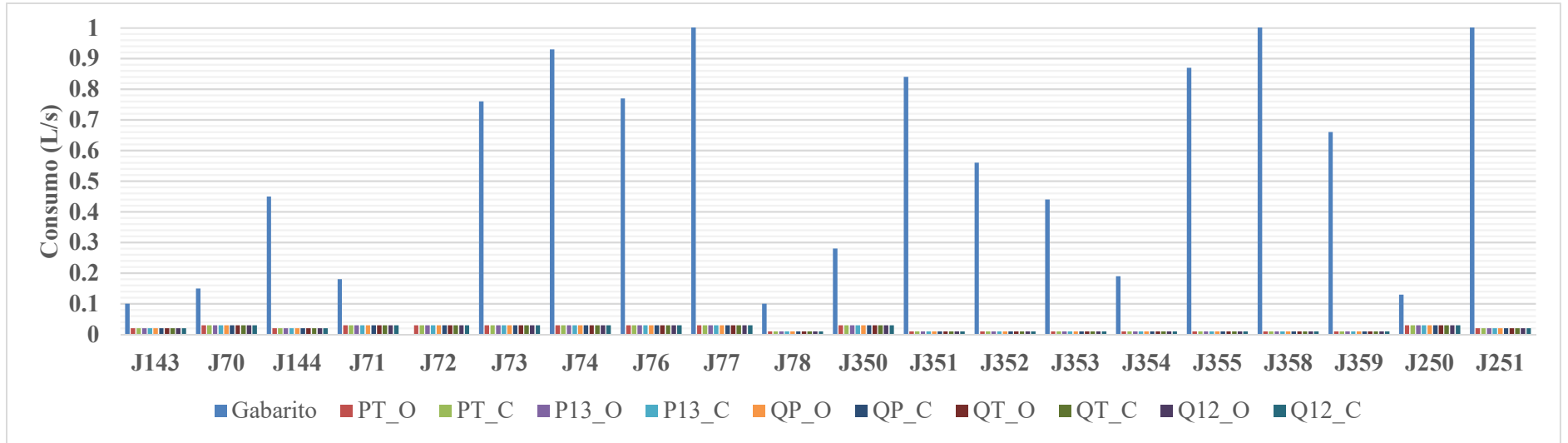
Fonte: Elaborado pelo autor



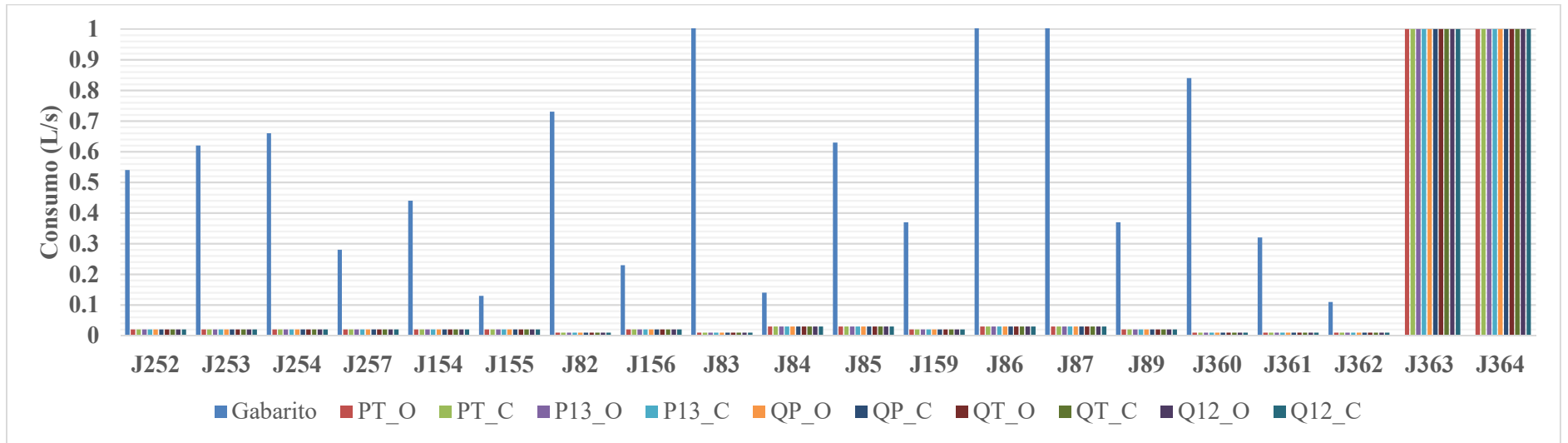
Fonte: Elaborado pelo autor



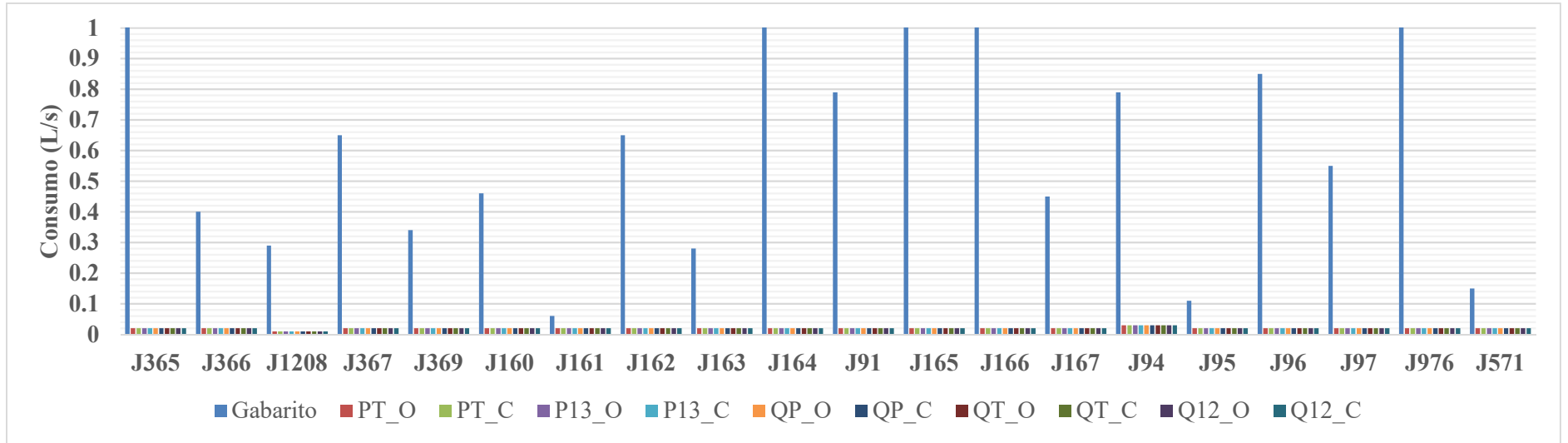
Fonte: Elaborado pelo autor



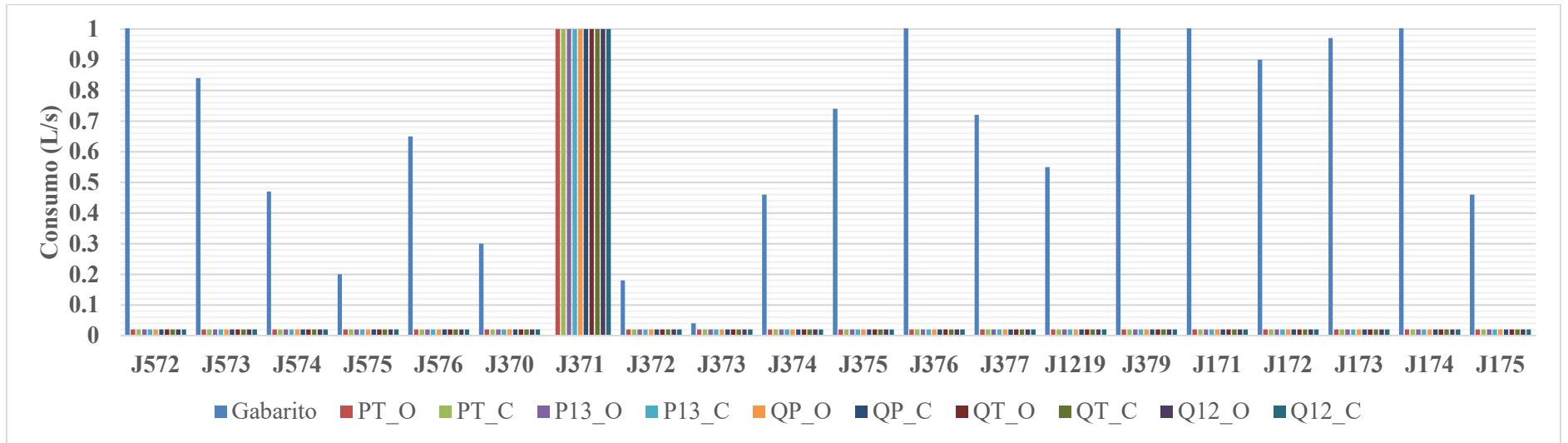
Fonte: Elaborado pelo autor



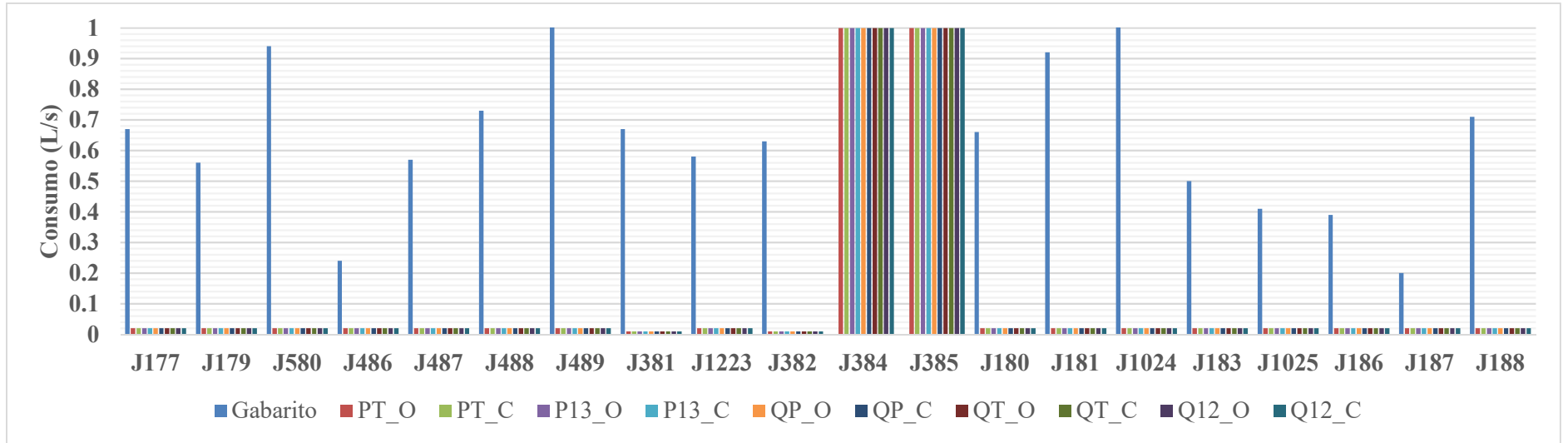
Fonte: Elaborado pelo autor



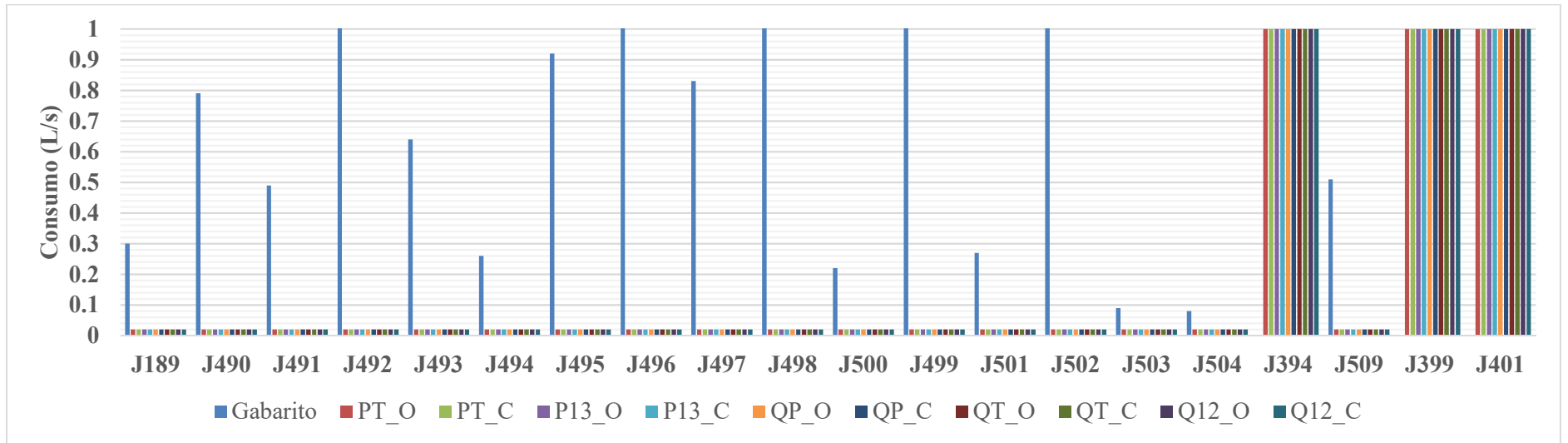
Fonte: Elaborado pelo autor



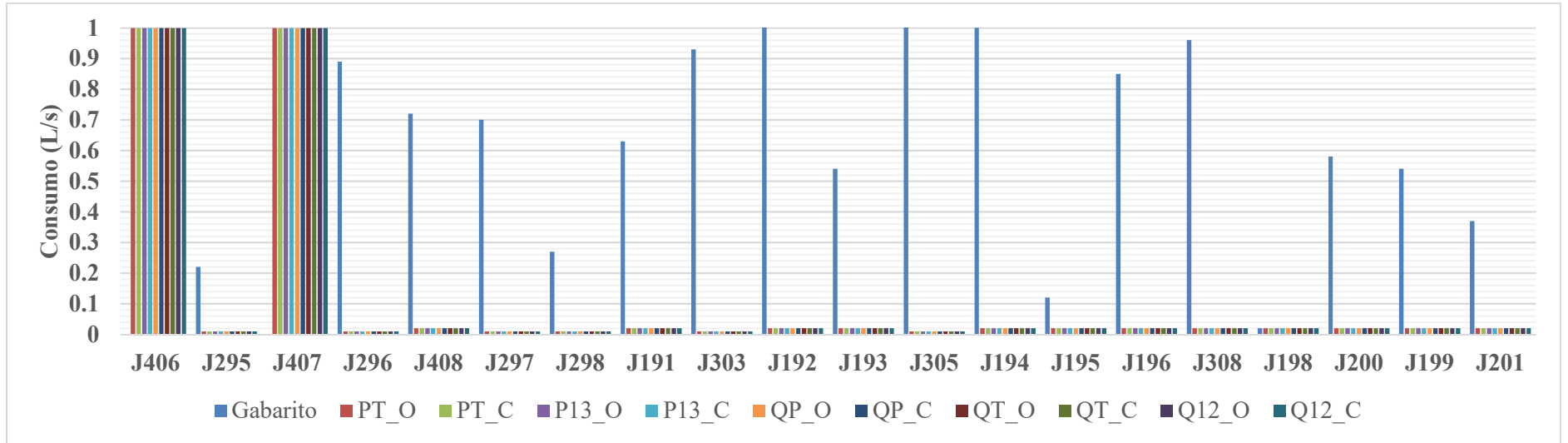
Fonte: Elaborado pelo autor



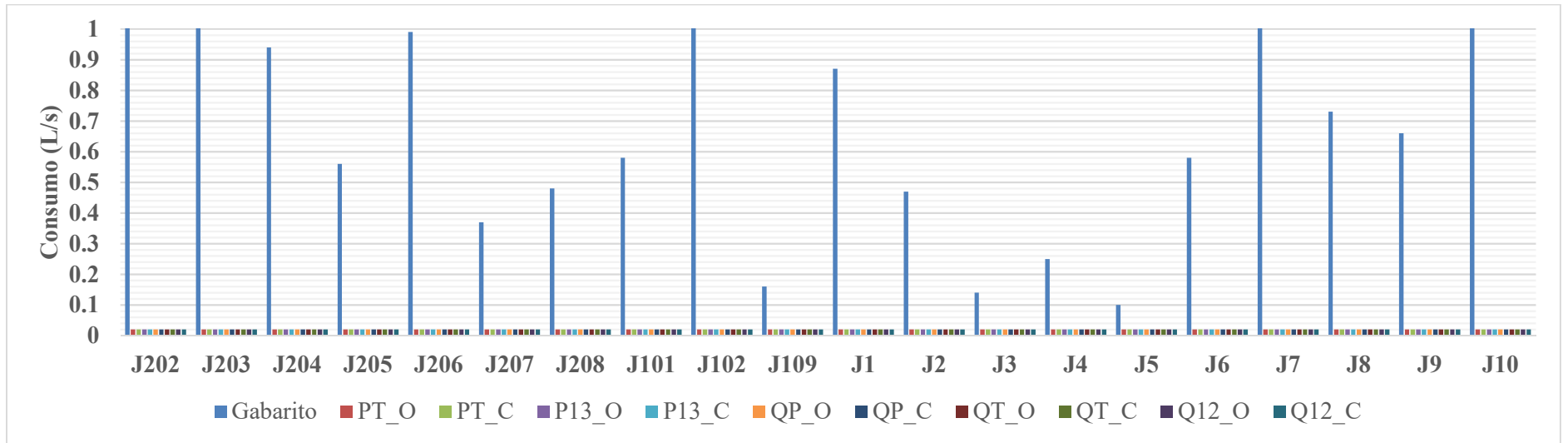
Fonte: Elaborado pelo autor



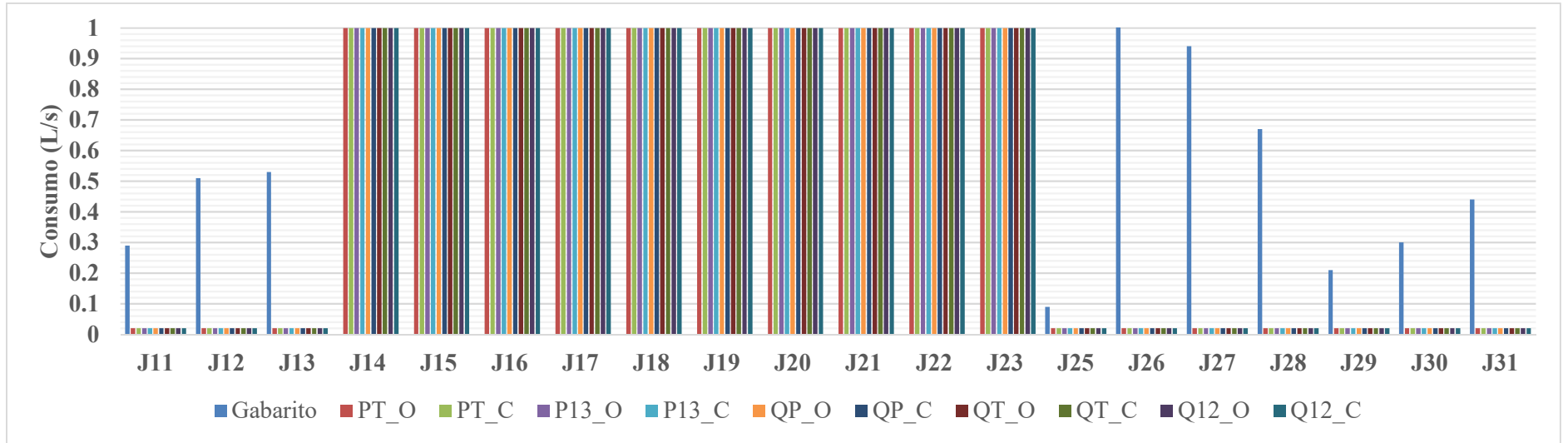
Fonte: Elaborado pelo autor



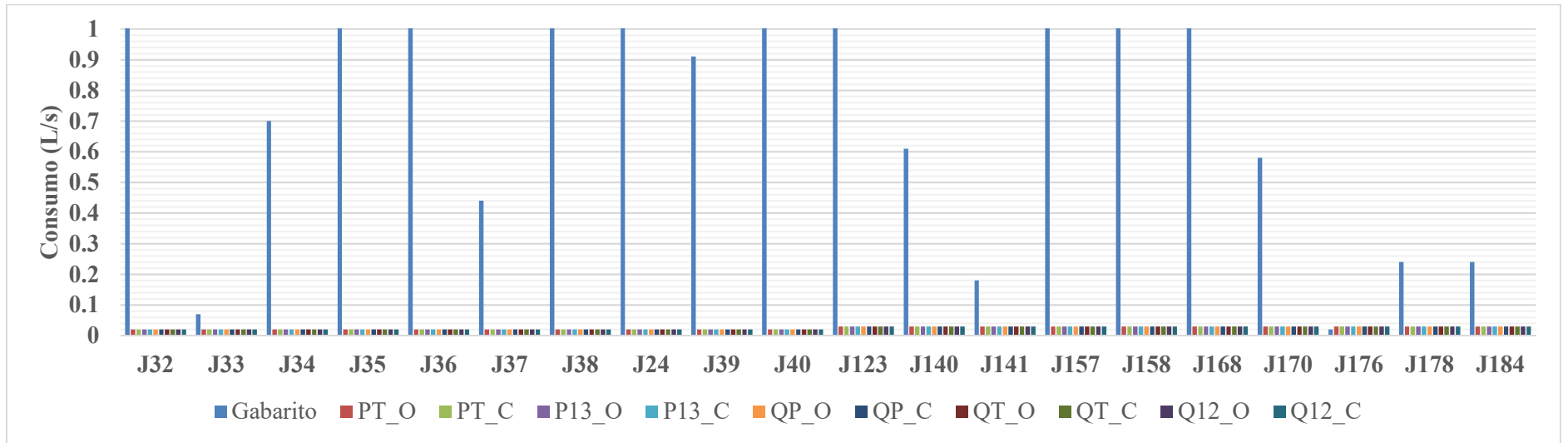
Fonte: Elaborado pelo autor



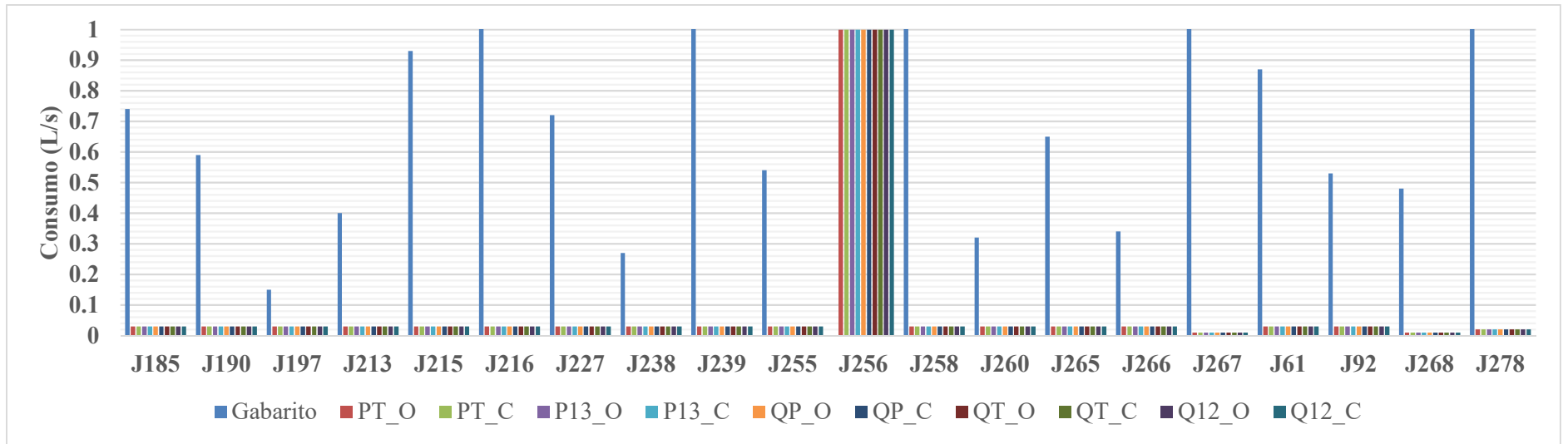
Fonte: Elaborado pelo autor



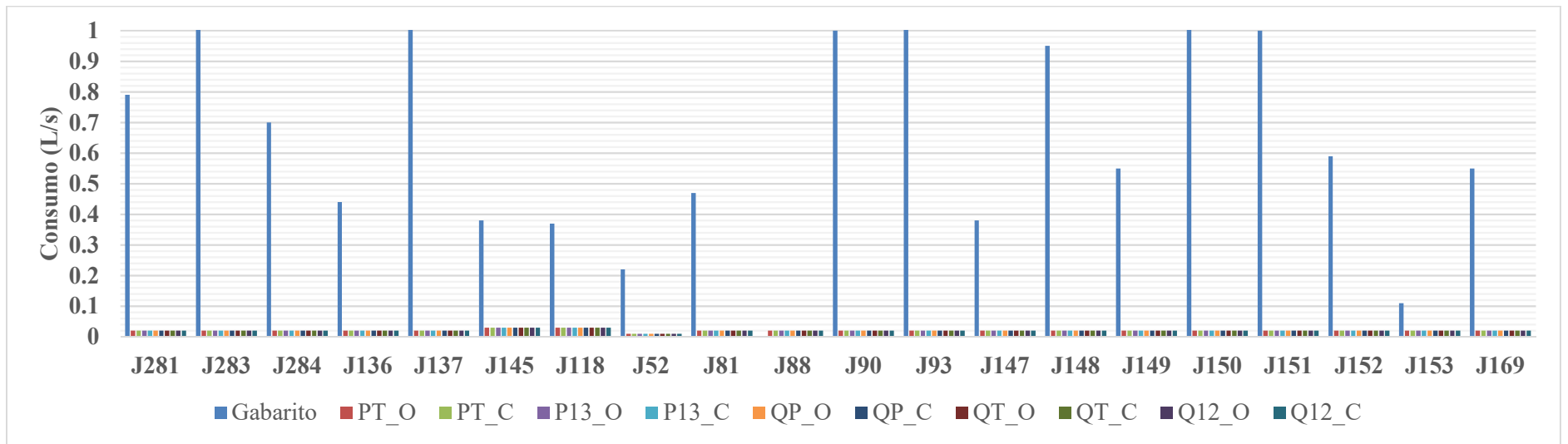
Fonte: Elaborado pelo autor



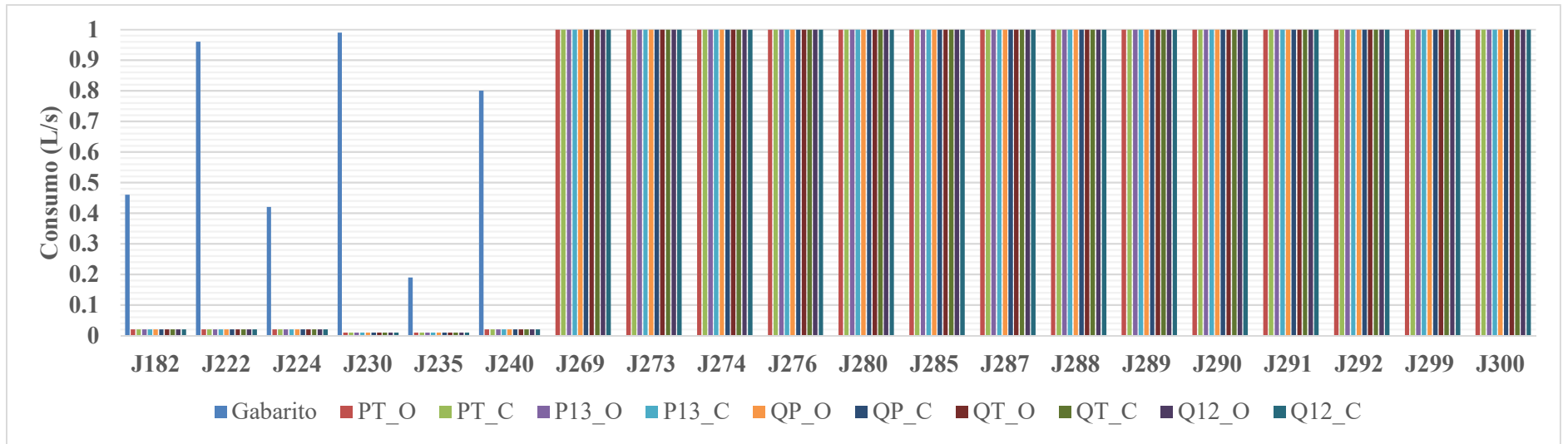
Fonte: Elaborado pelo autor



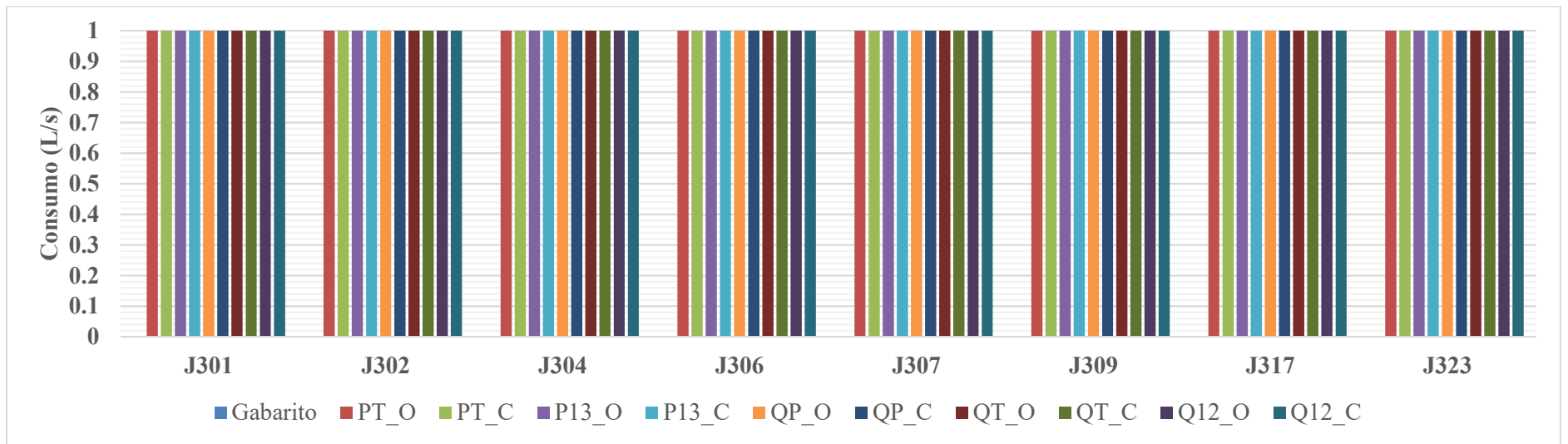
Fonte: Elaborado pelo autor



Fonte: Elaborado pelo autor

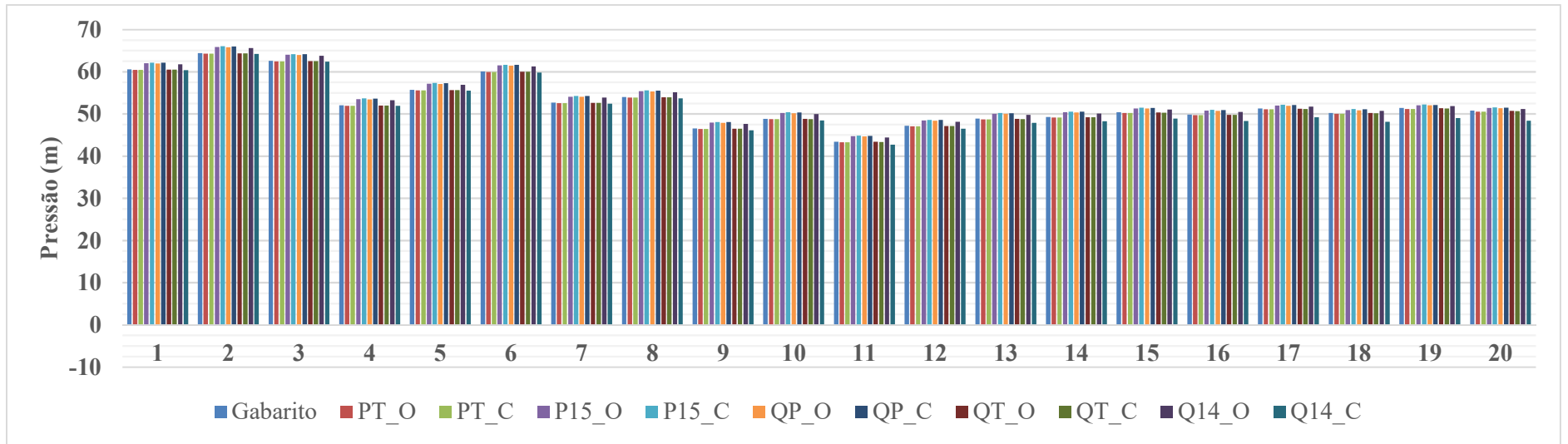


Fonte: Elaborado pelo autor

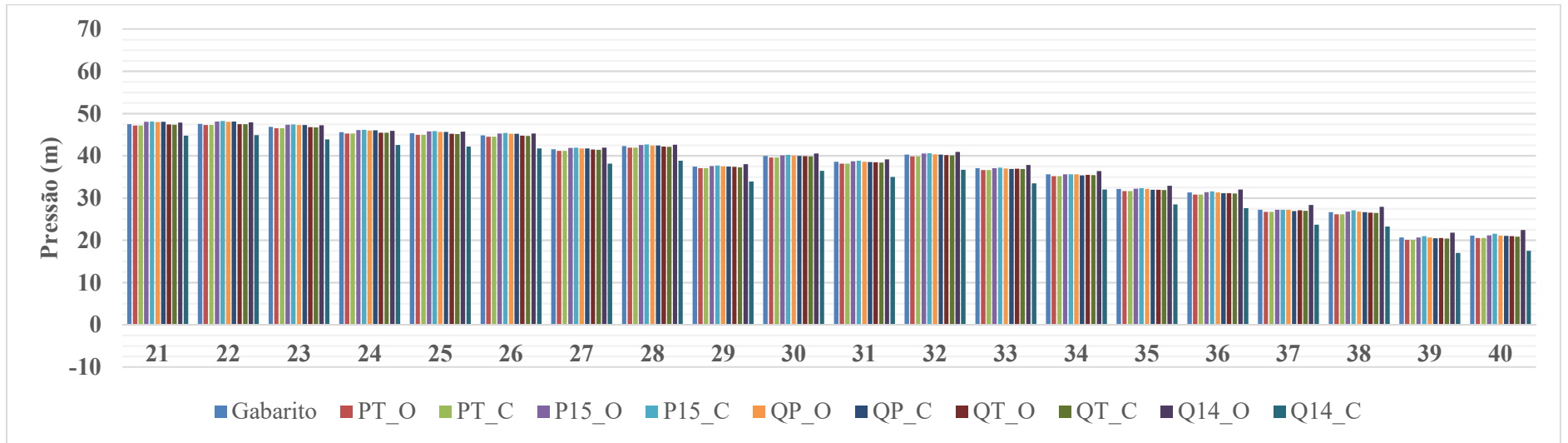


Fonte: Elaborado pelo autor

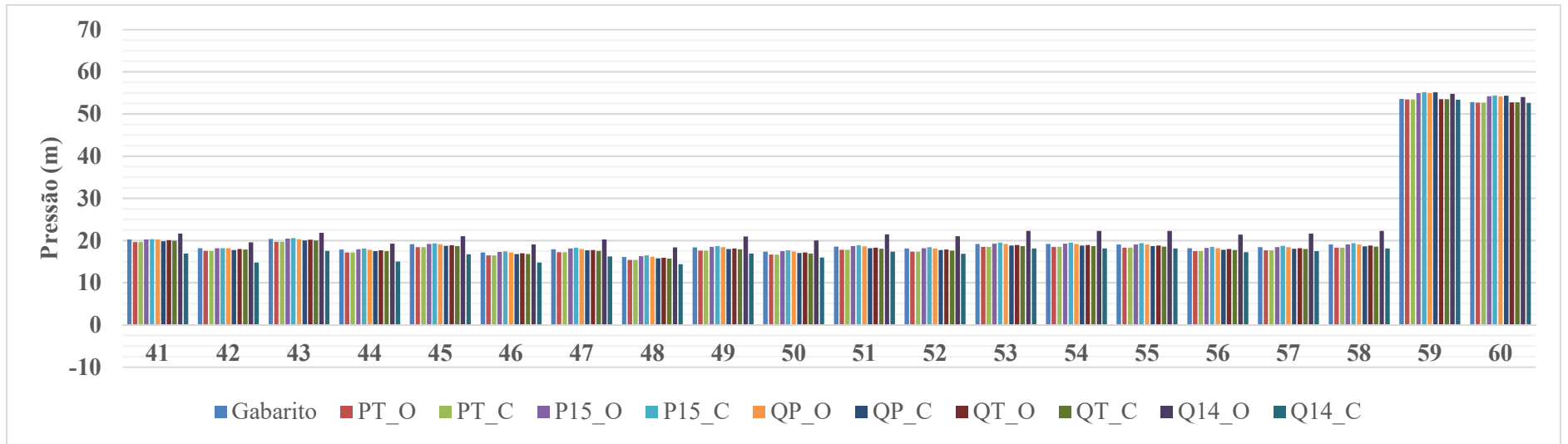
APÊNDICE DY – Pressões encontradas na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Hazen-Williams com consumos nodais iniciais de 0,1 L/s: rede MIGHA



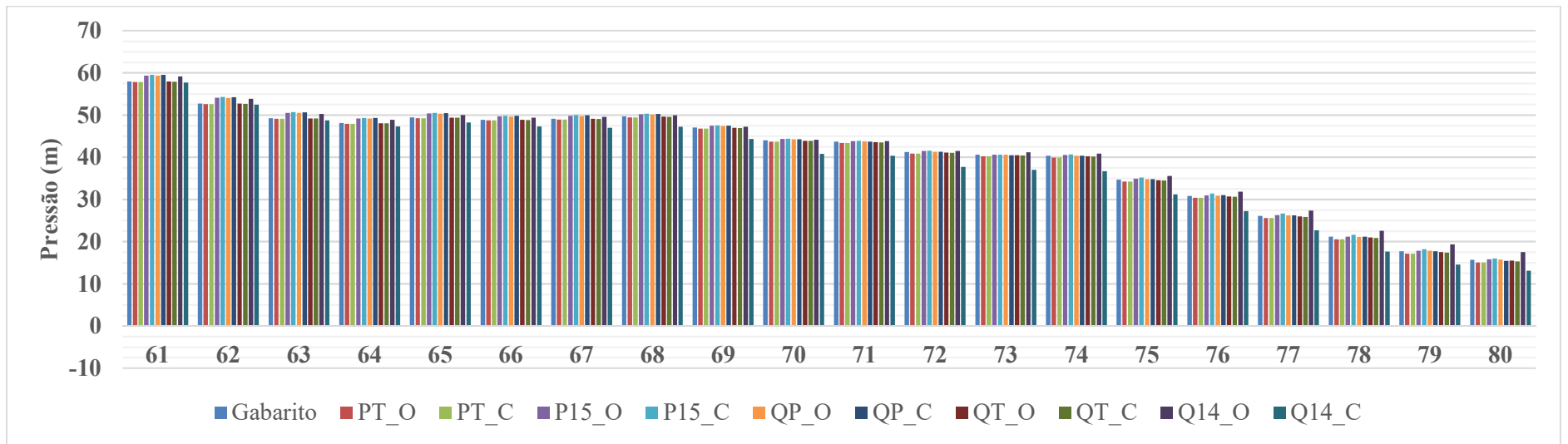
Fonte: Elaborado pelo autor



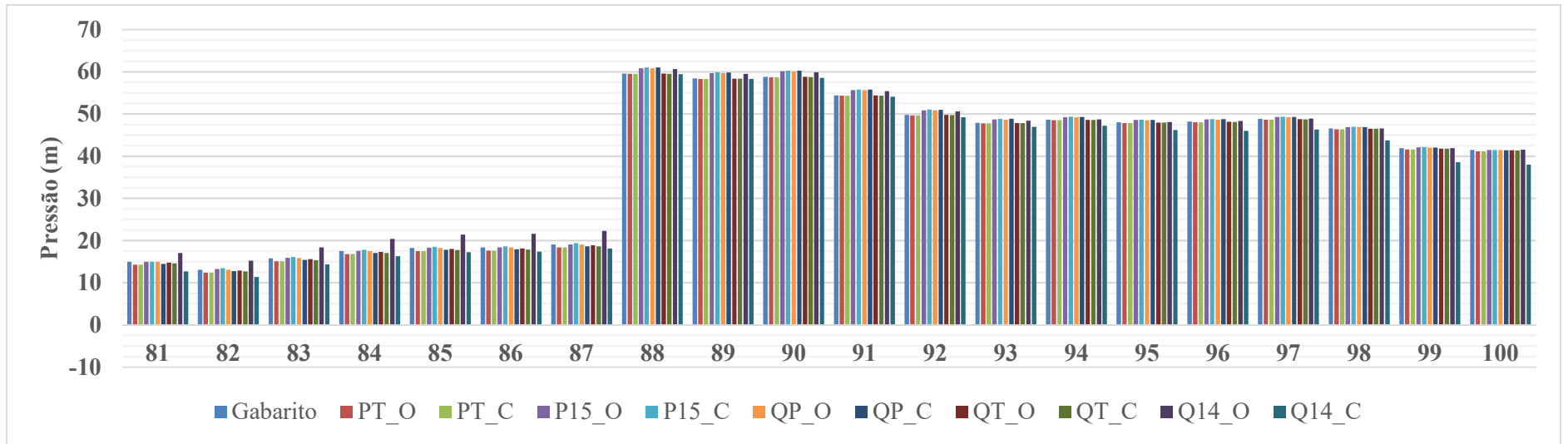
Fonte: Elaborado pelo autor



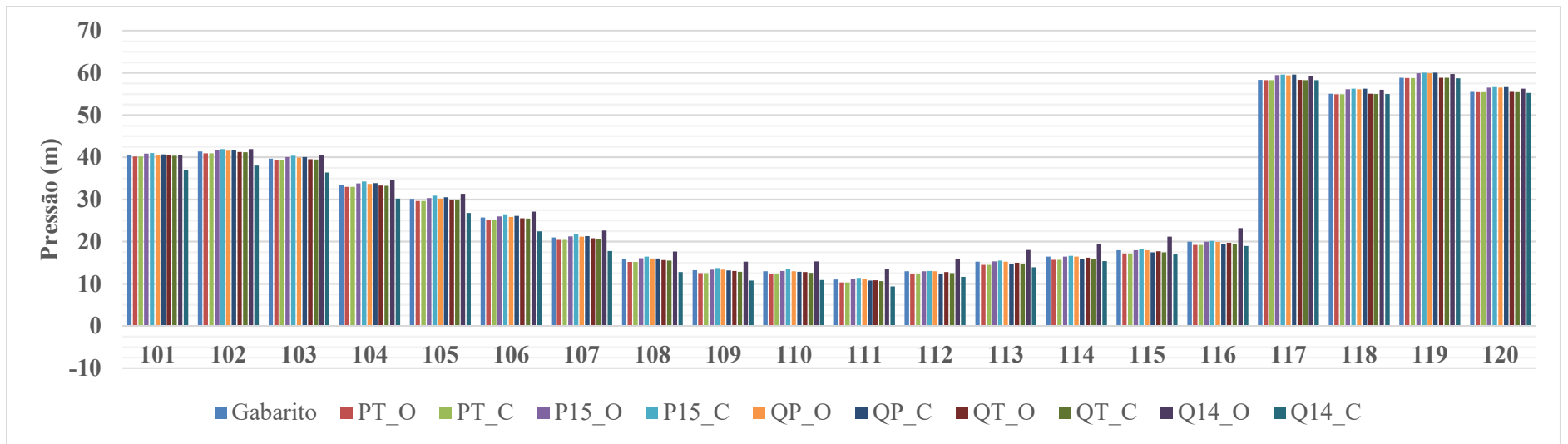
Fonte: Elaborado pelo autor



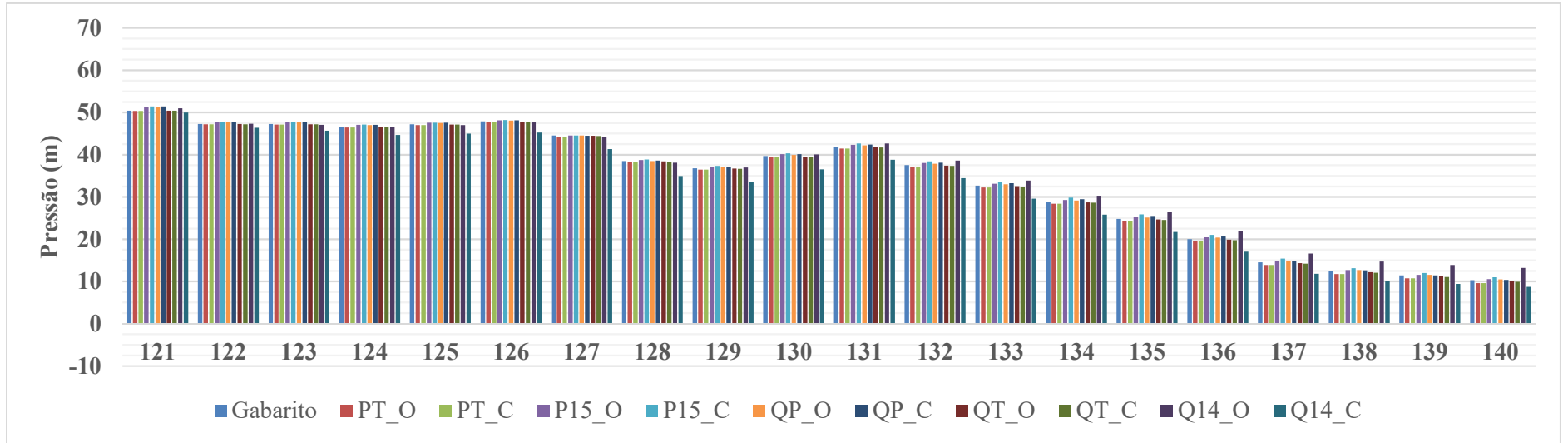
Fonte: Elaborado pelo autor



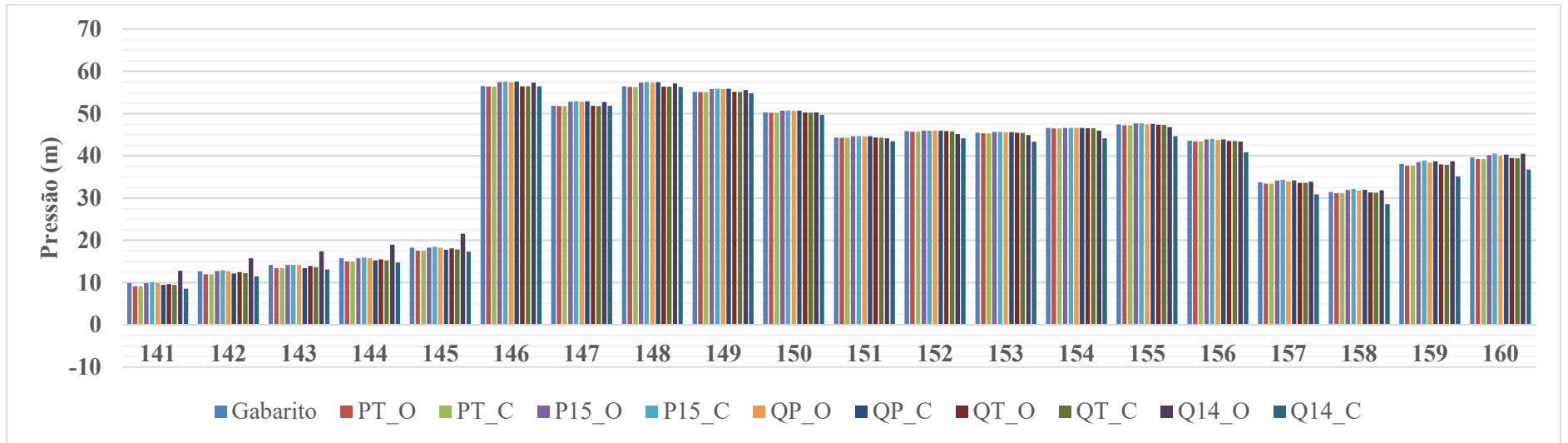
Fonte: Elaborado pelo autor



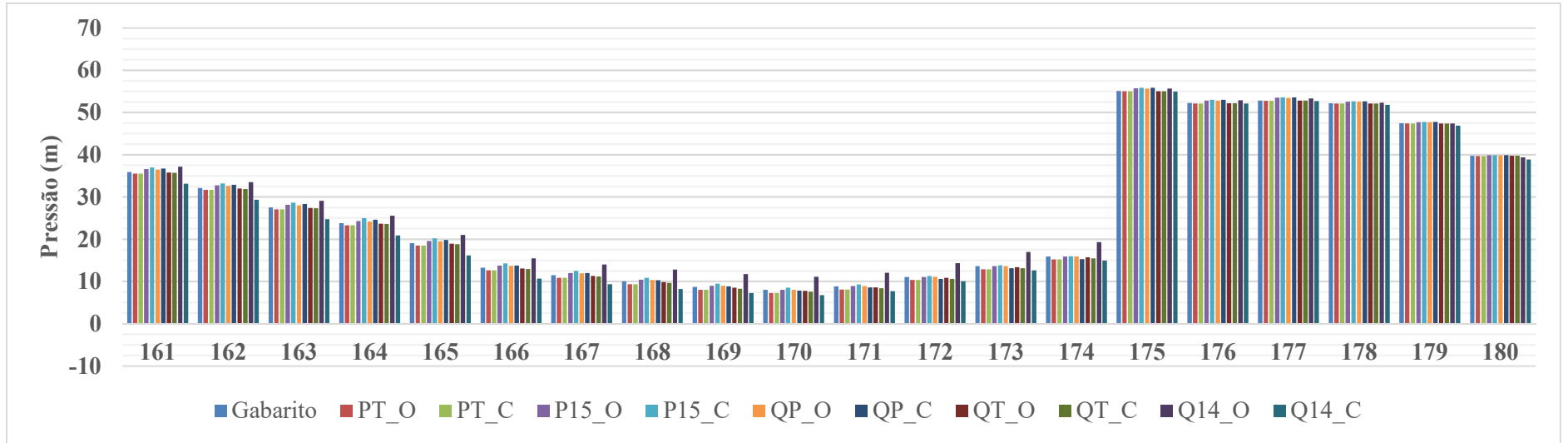
Fonte: Elaborado pelo autor



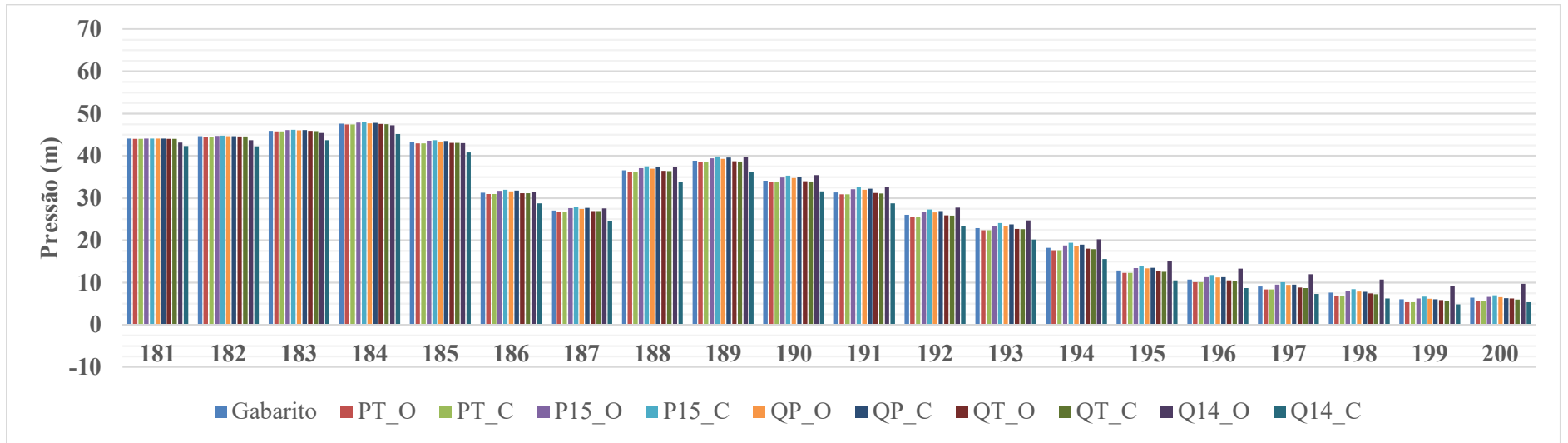
Fonte: Elaborado pelo autor



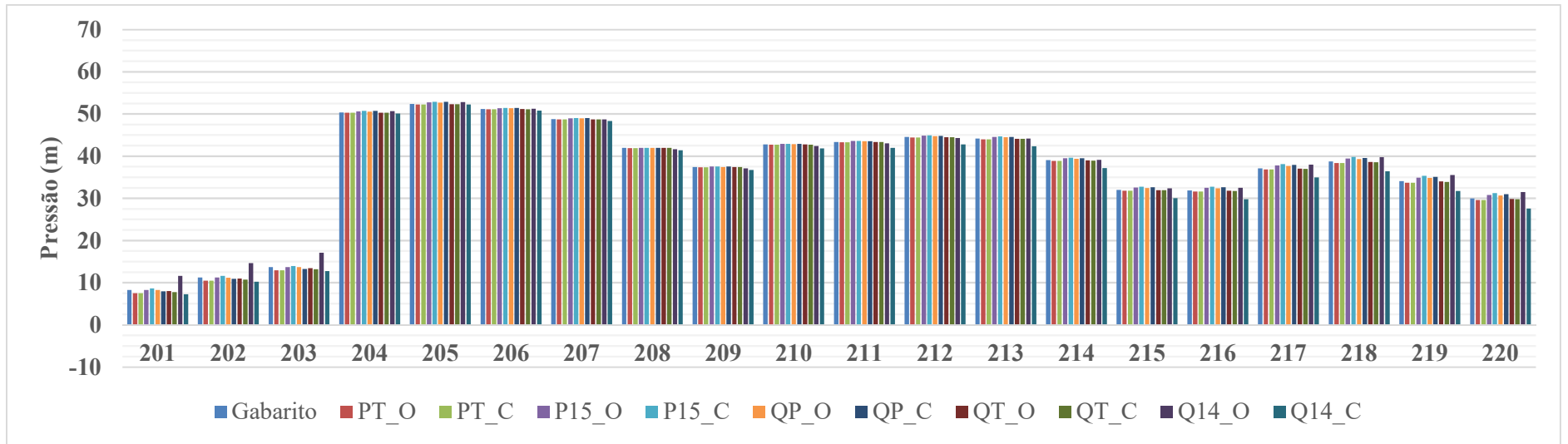
Fonte: Elaborado pelo autor



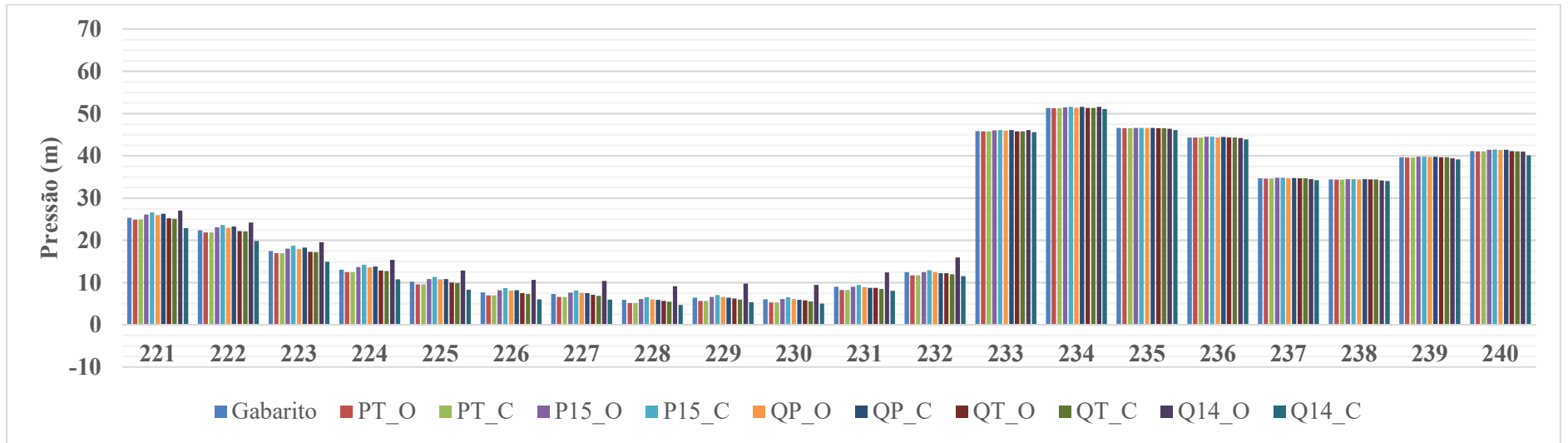
Fonte: Elaborado pelo autor



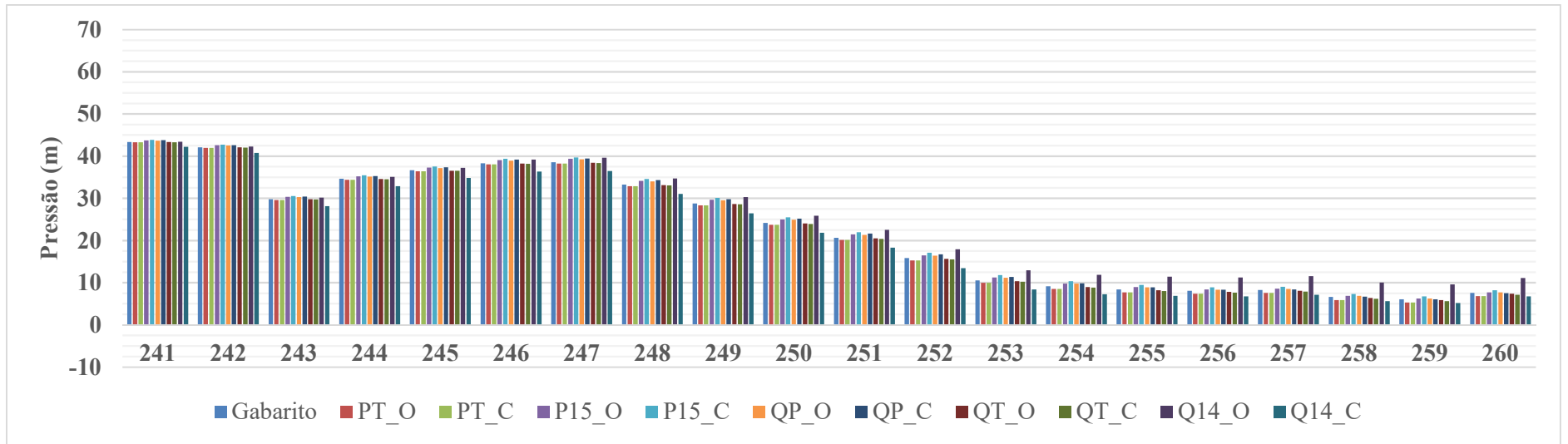
Fonte: Elaborado pelo autor



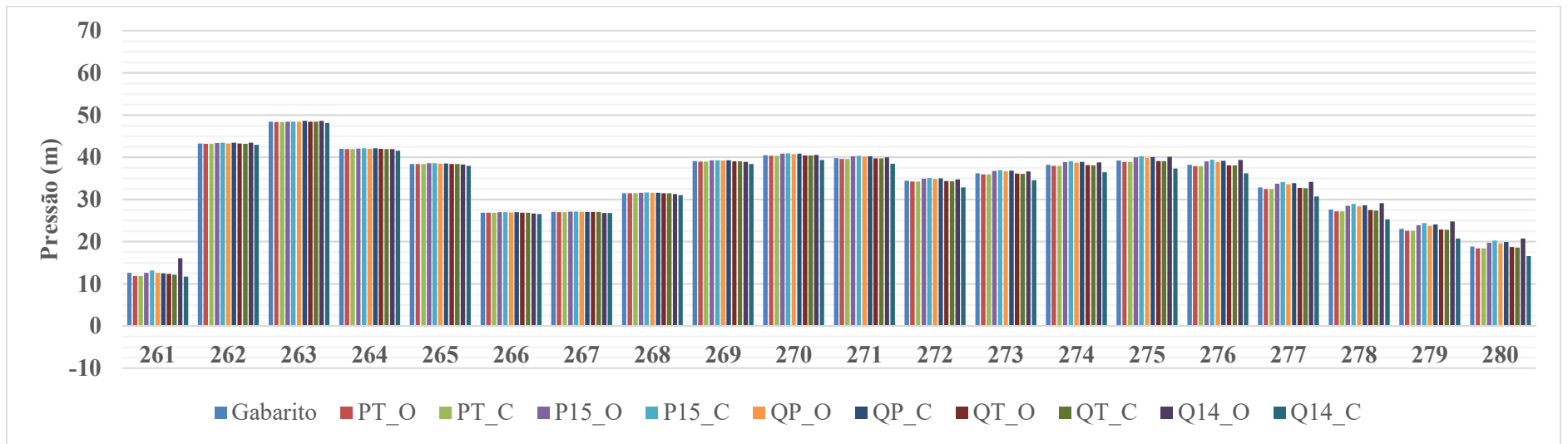
Fonte: Elaborado pelo autor



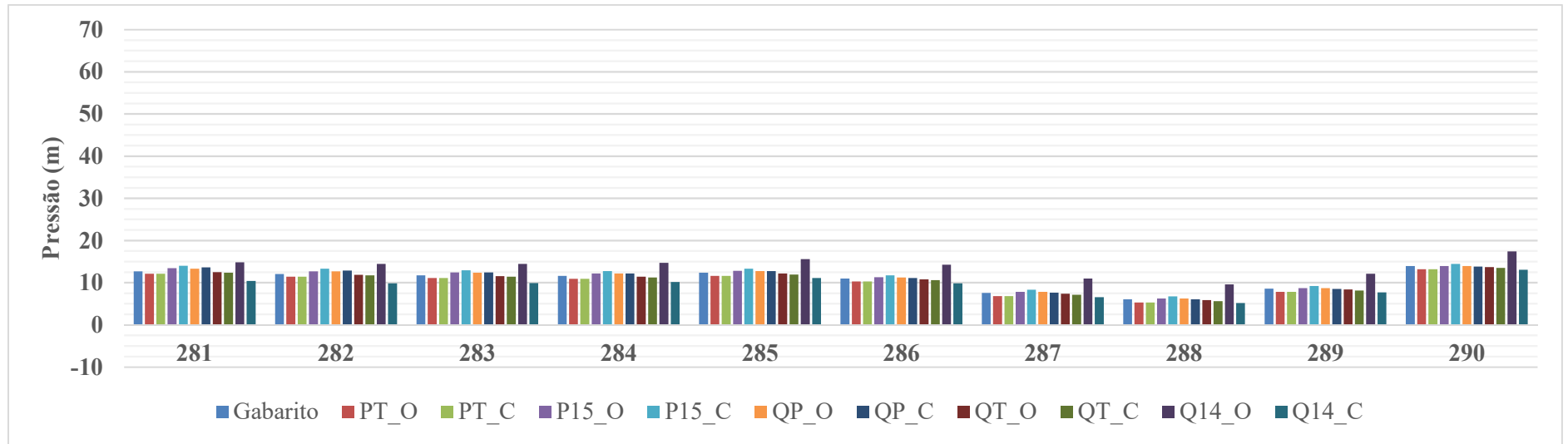
Fonte: Elaborado pelo autor



Fonte: Elaborado pelo autor

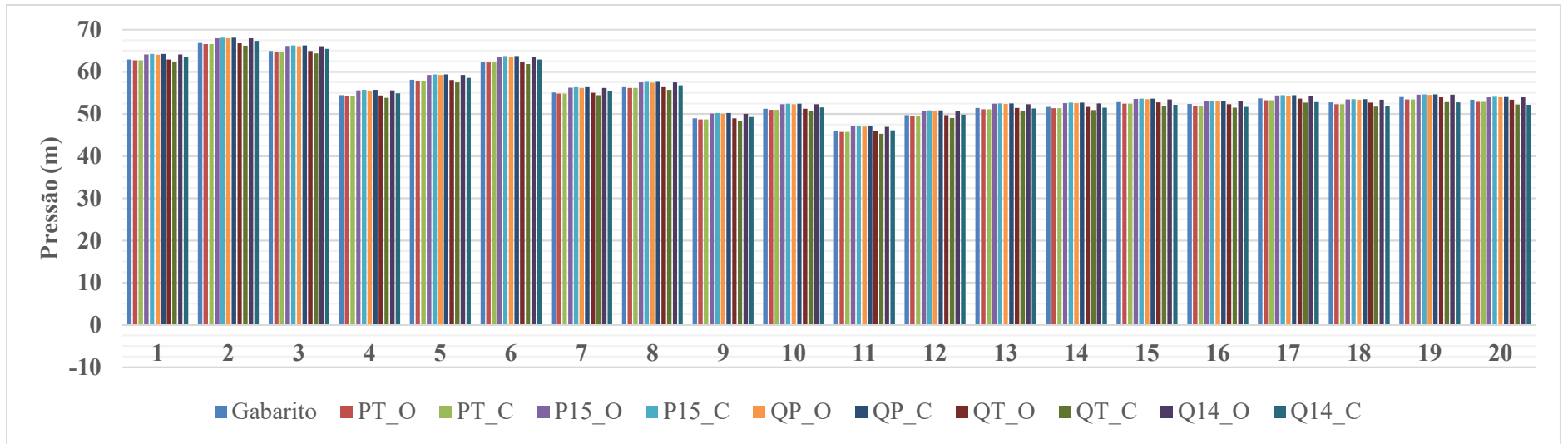


Fonte: Elaborado pelo autor

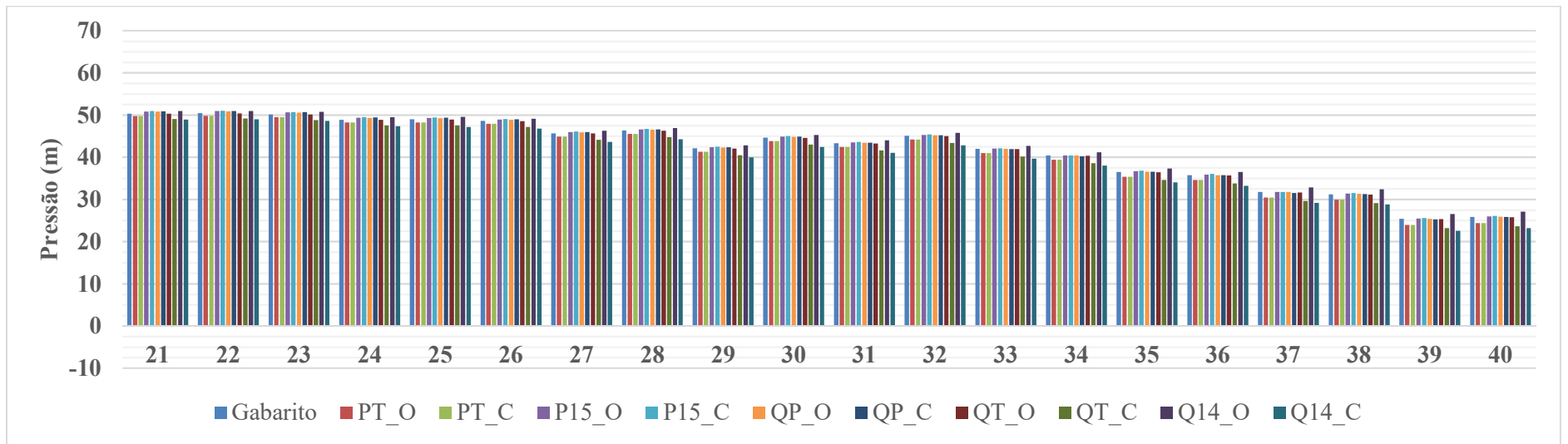


Fonte: Elaborado pelo autor

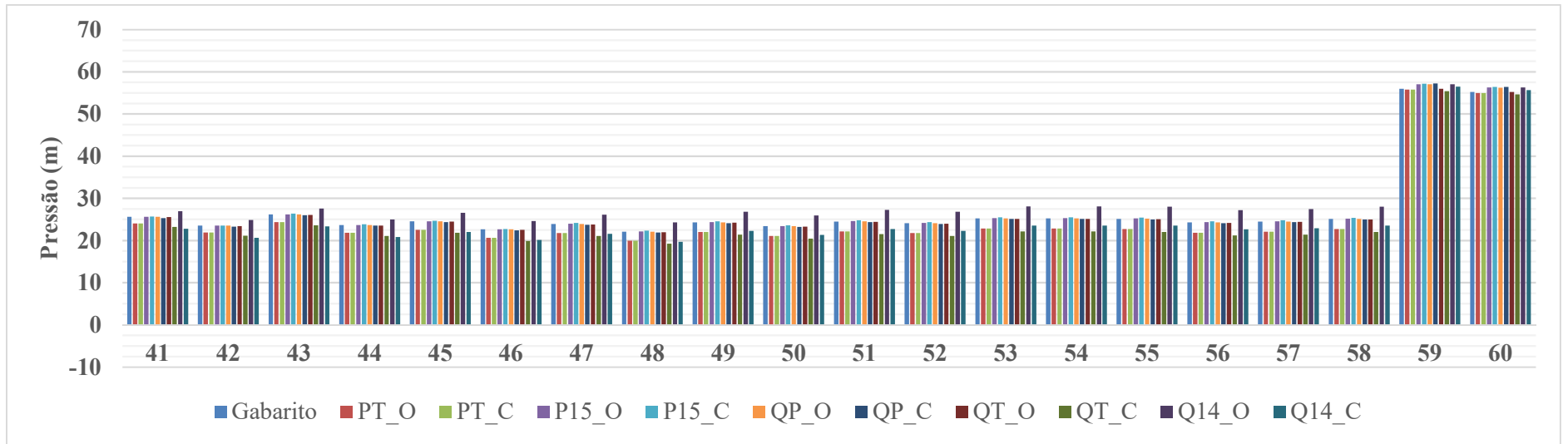
APÊNDICE DZ – Pressões encontradas na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Darcy-Weisbach com consumos nodais iniciais de 0,1 L/s: rede MIGHA



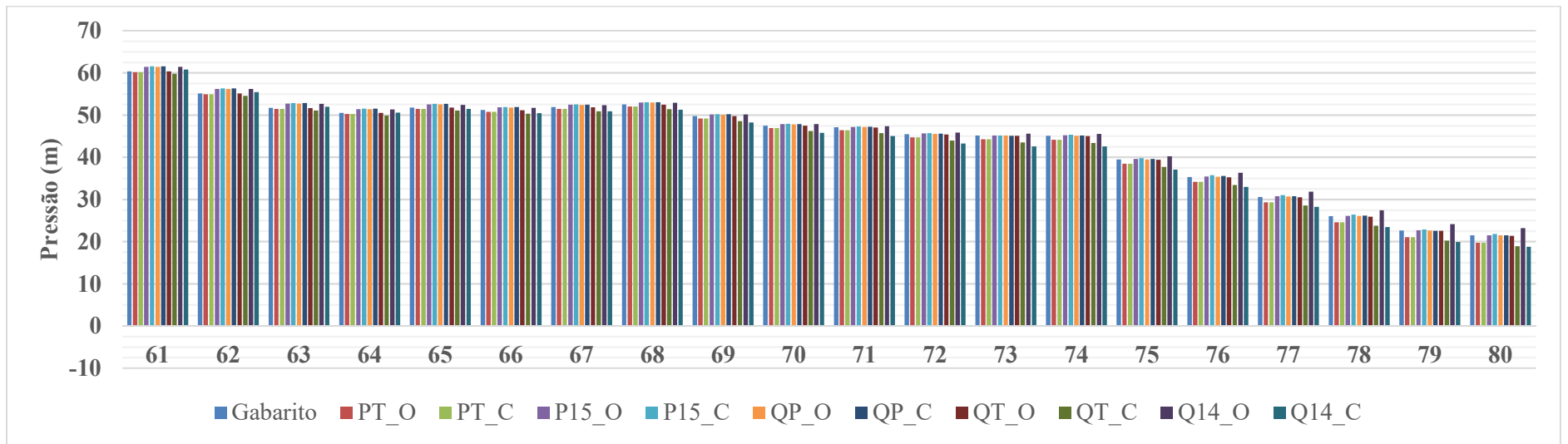
Fonte: Elaborado pelo autor



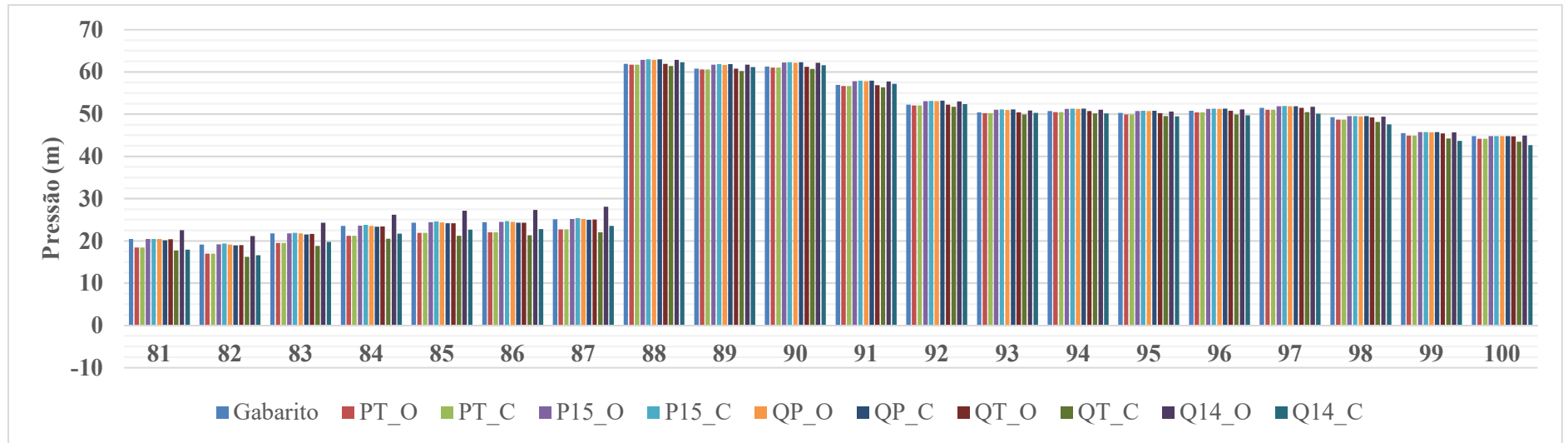
Fonte: Elaborado pelo autor



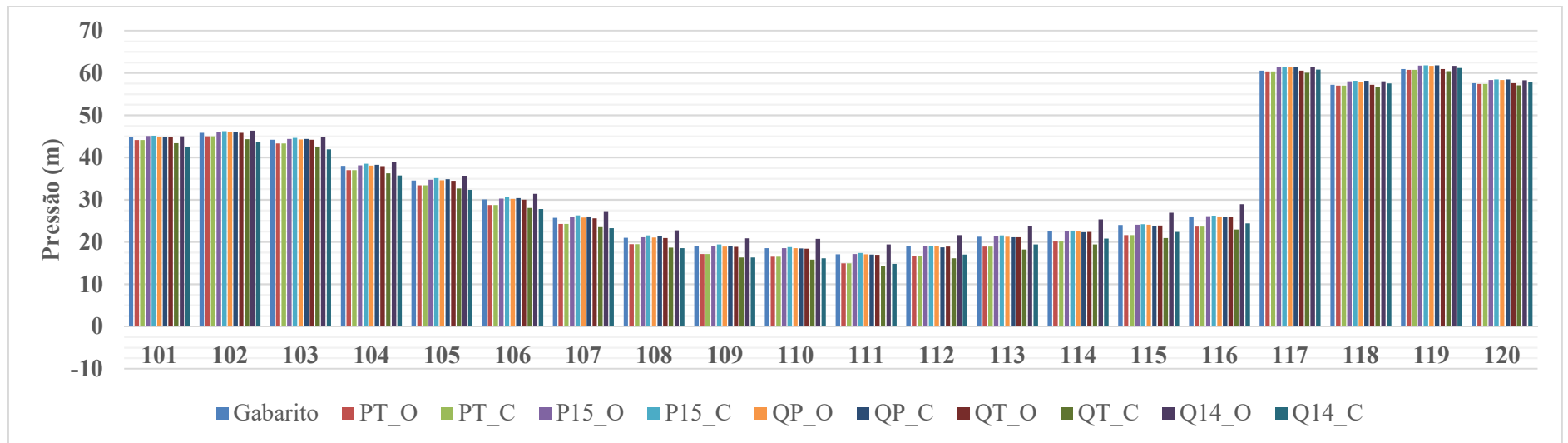
Fonte: Elaborado pelo autor



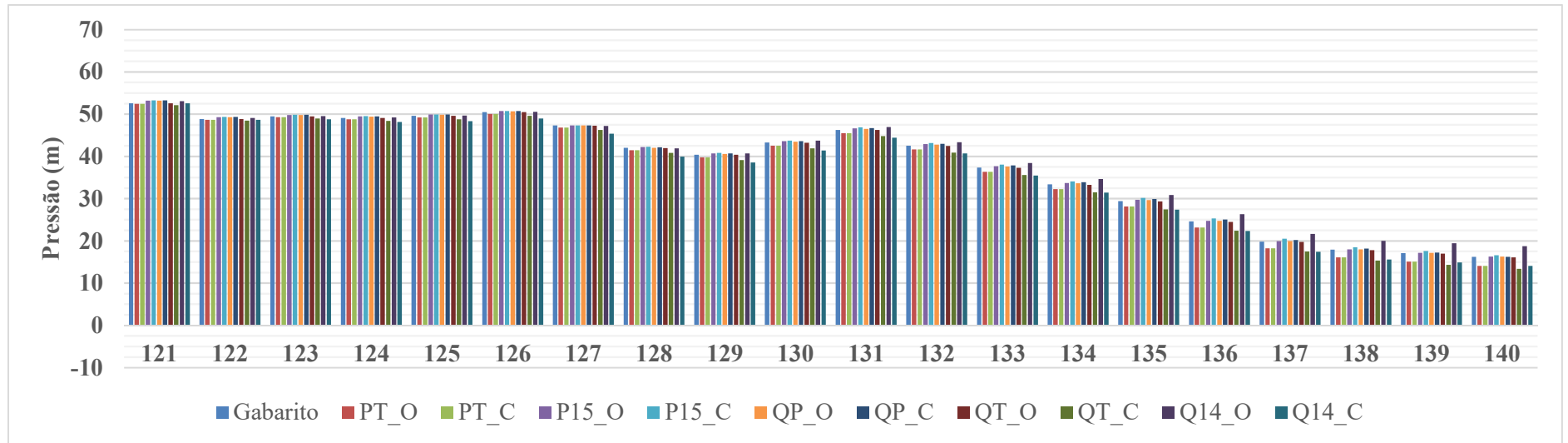
Fonte: Elaborado pelo autor



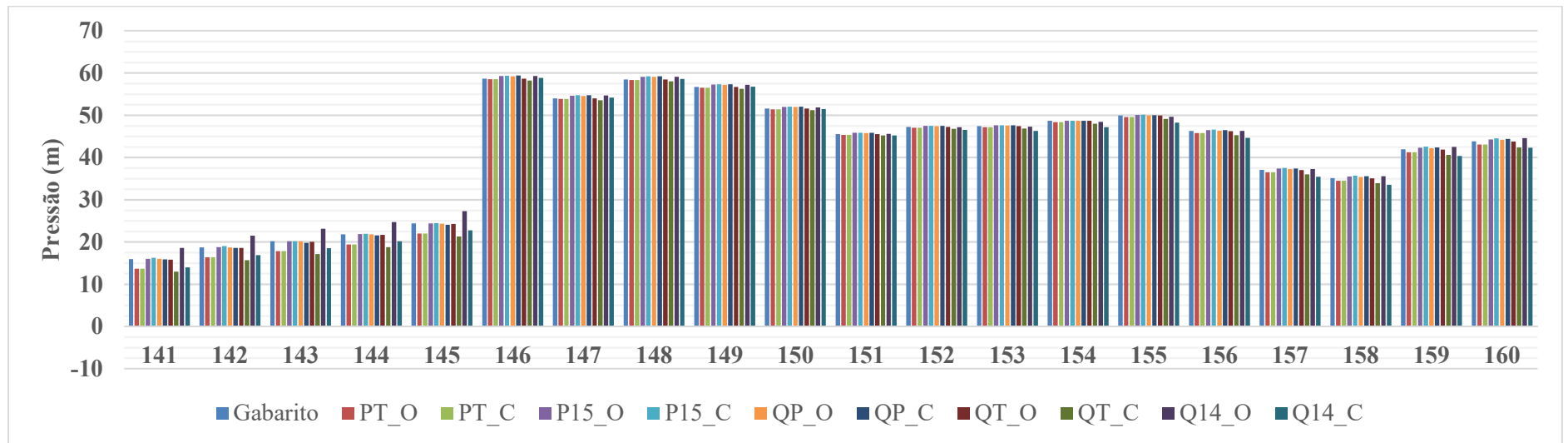
Fonte: Elaborado pelo autor



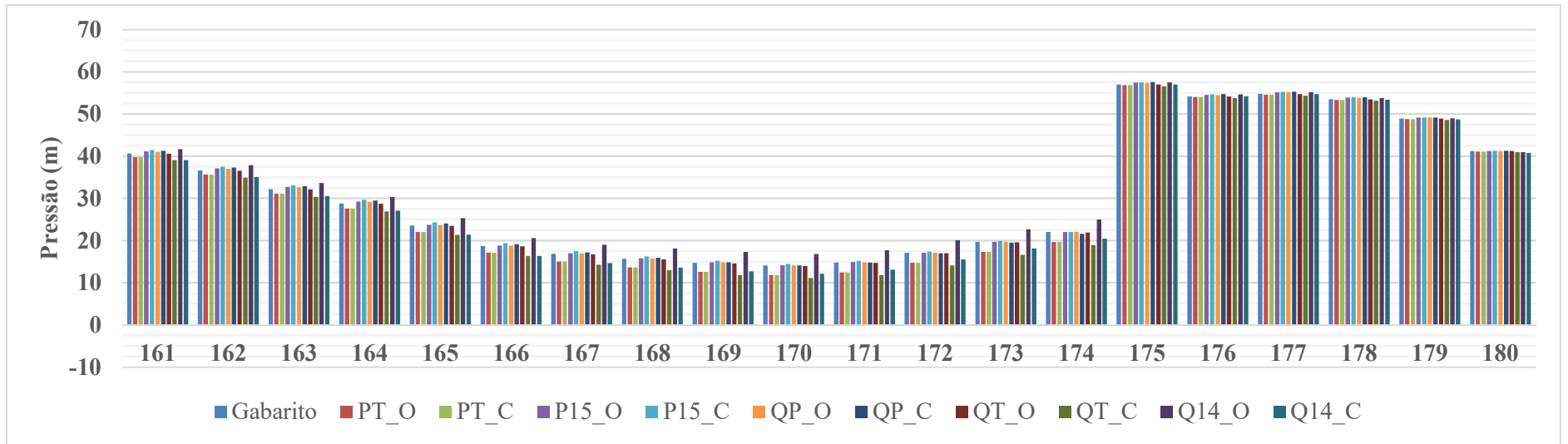
Fonte: Elaborado pelo autor



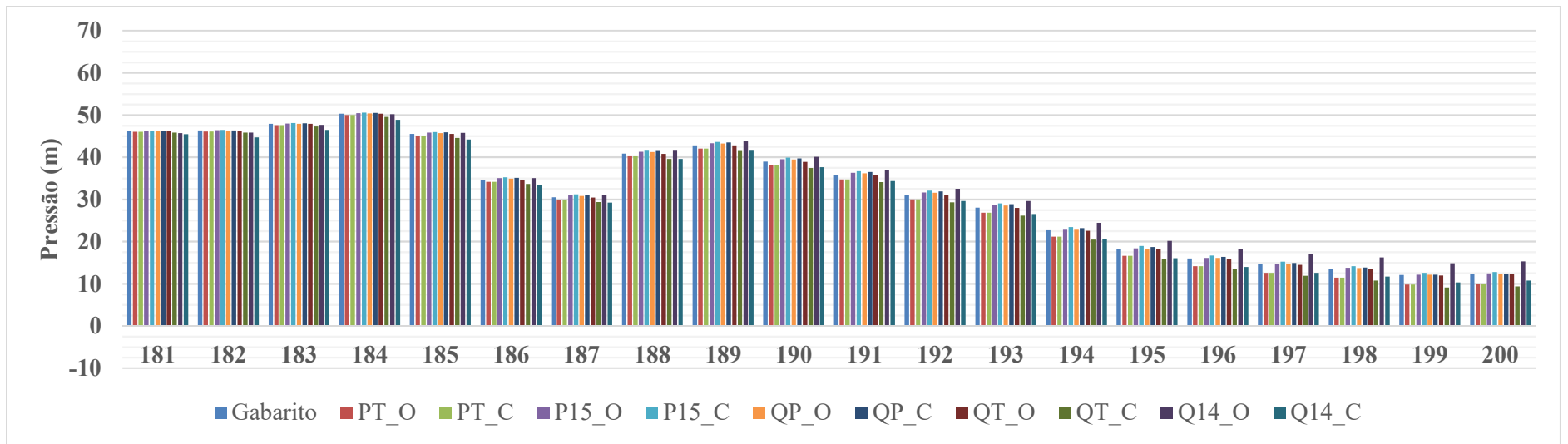
Fonte: Elaborado pelo autor



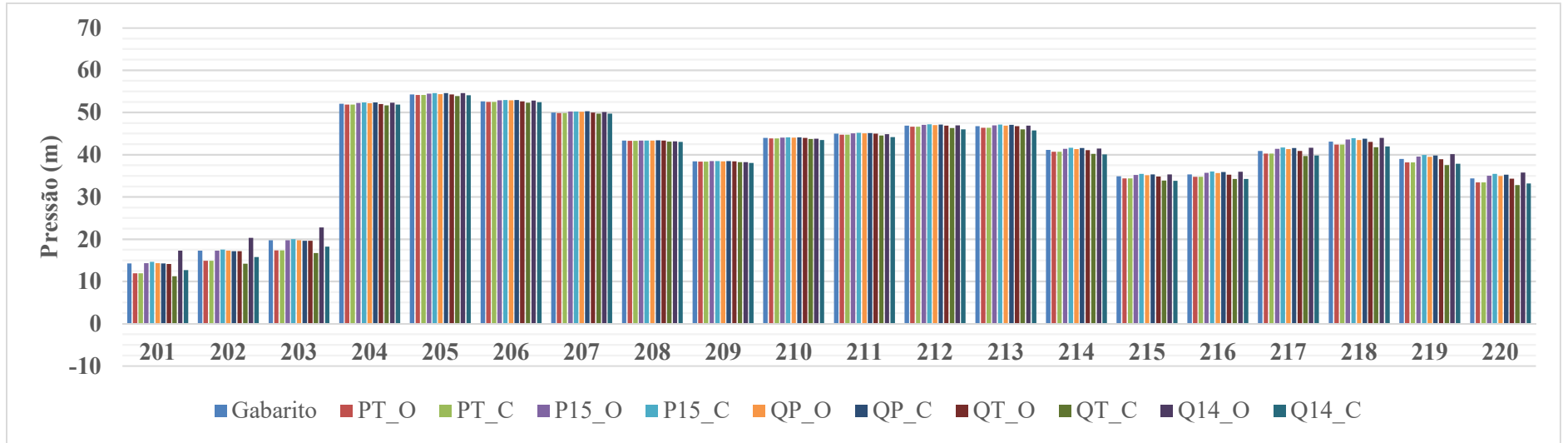
Fonte: Elaborado pelo autor



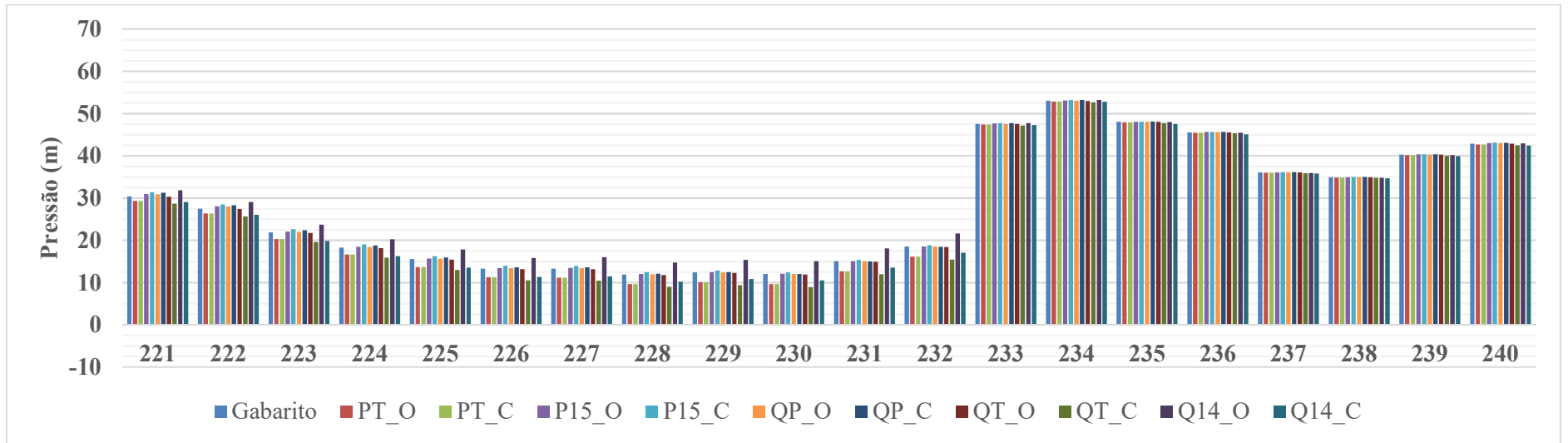
Fonte: Elaborado pelo autor



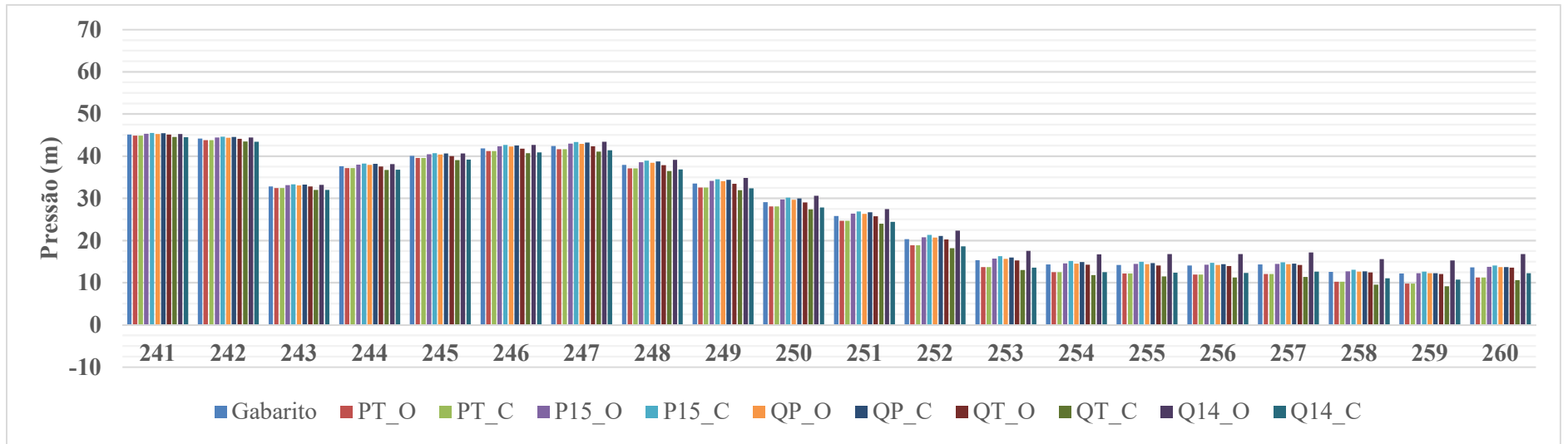
Fonte: Elaborado pelo autor



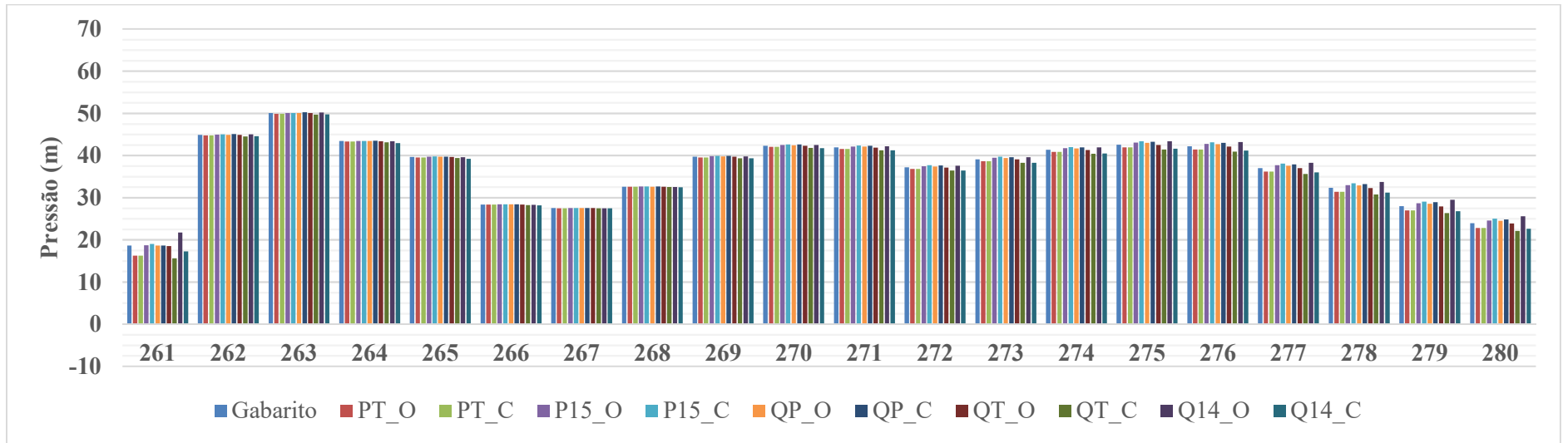
Fonte: Elaborado pelo autor



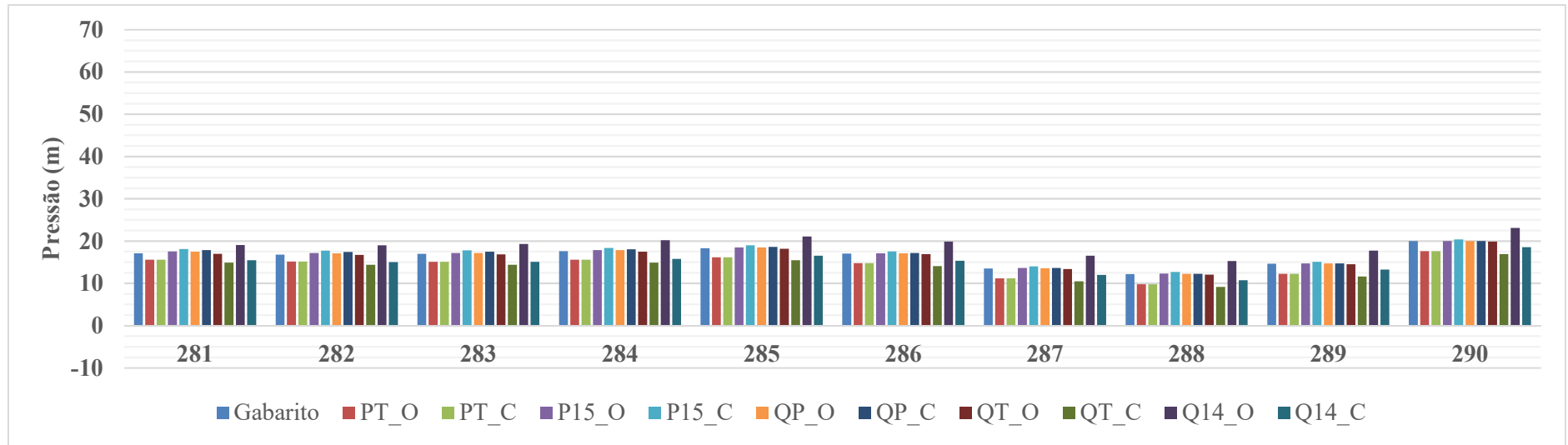
Fonte: Elaborado pelo autor



Fonte: Elaborado pelo autor

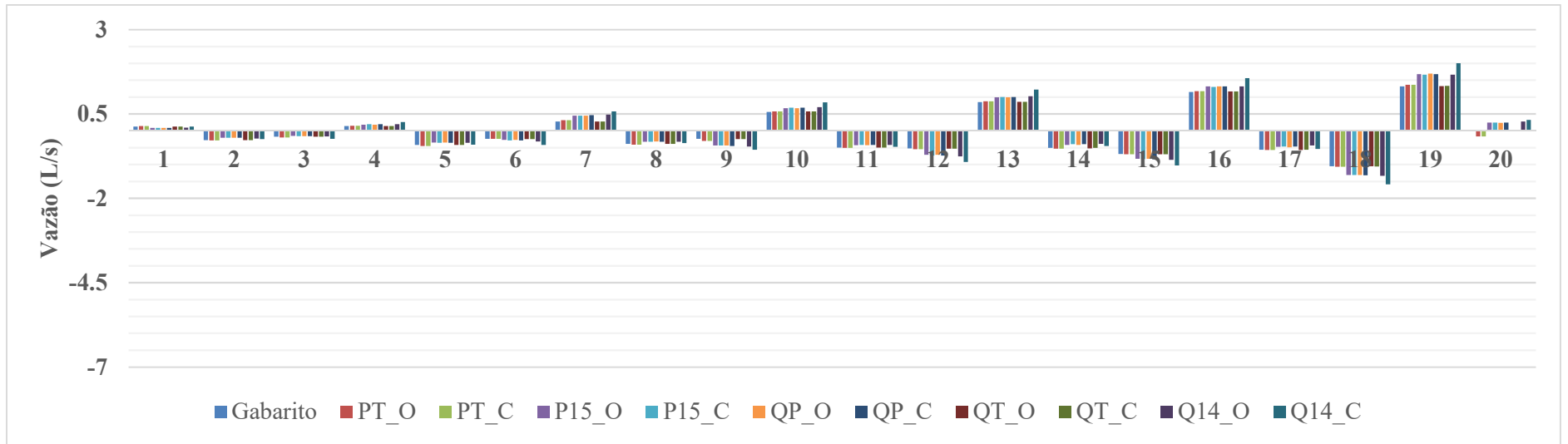


Fonte: Elaborado pelo autor

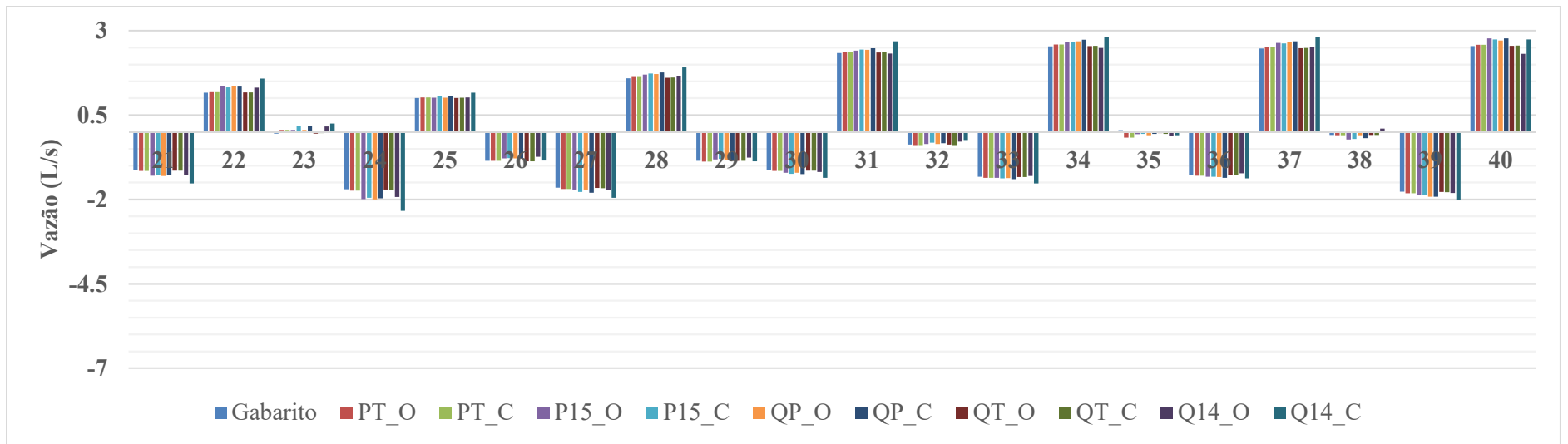


Fonte: Elaborado pelo autor

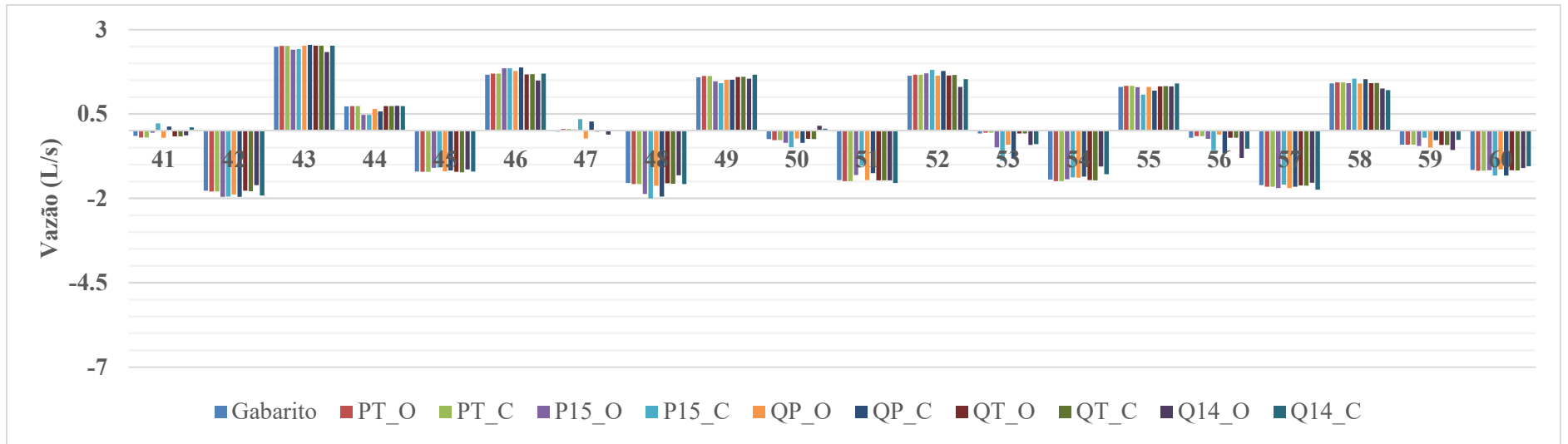
**APÊNDICE EA – Vazões encontradas na Calibração da vazão com gradiente hidráulico
calculado através da equação de Hazen-Williams com consumos nodais iniciais de 0,1
L/s: rede MIGHA**



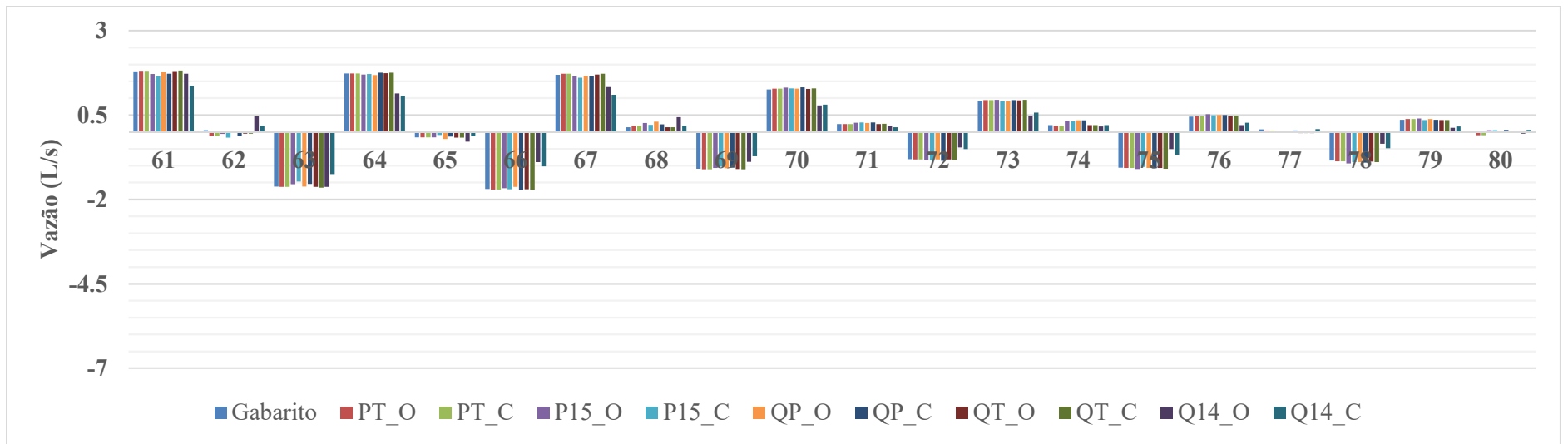
Fonte: Elaborado pelo autor



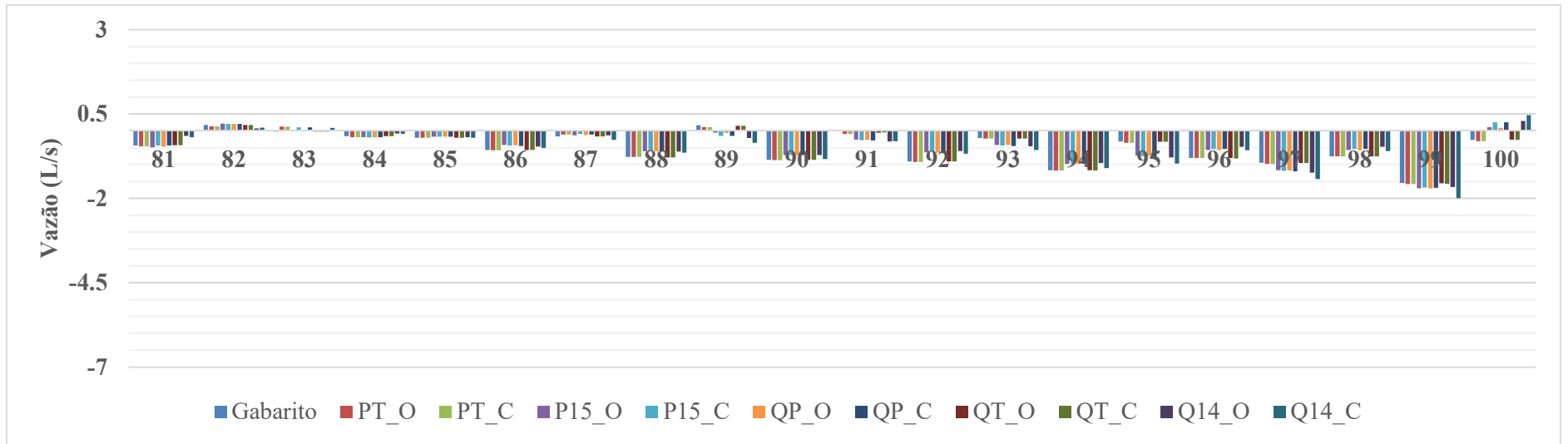
Fonte: Elaborado pelo autor



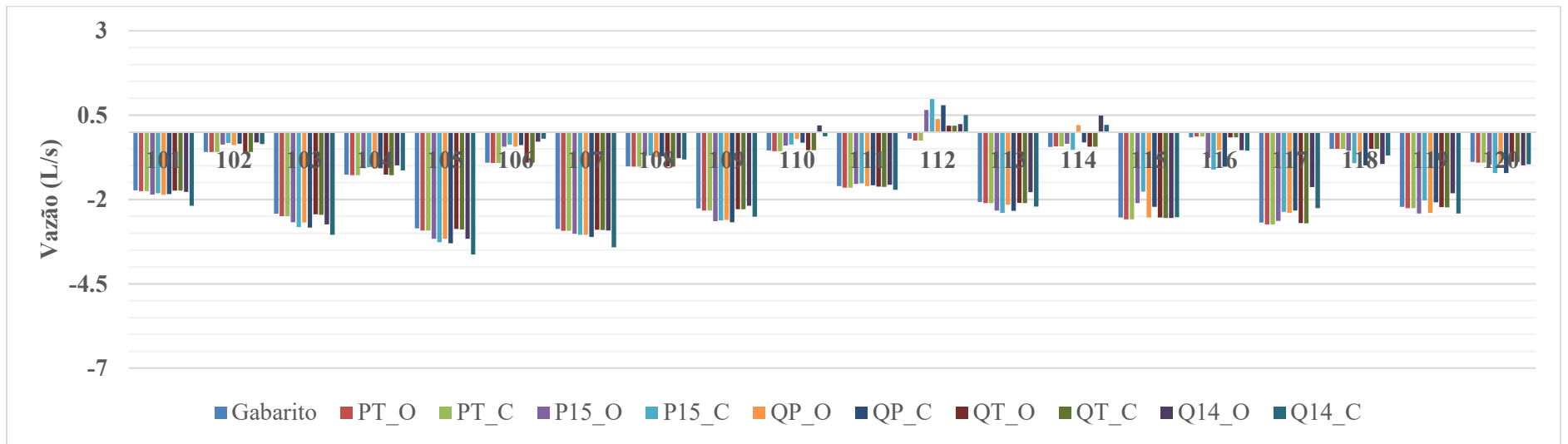
Fonte: Elaborado pelo autor



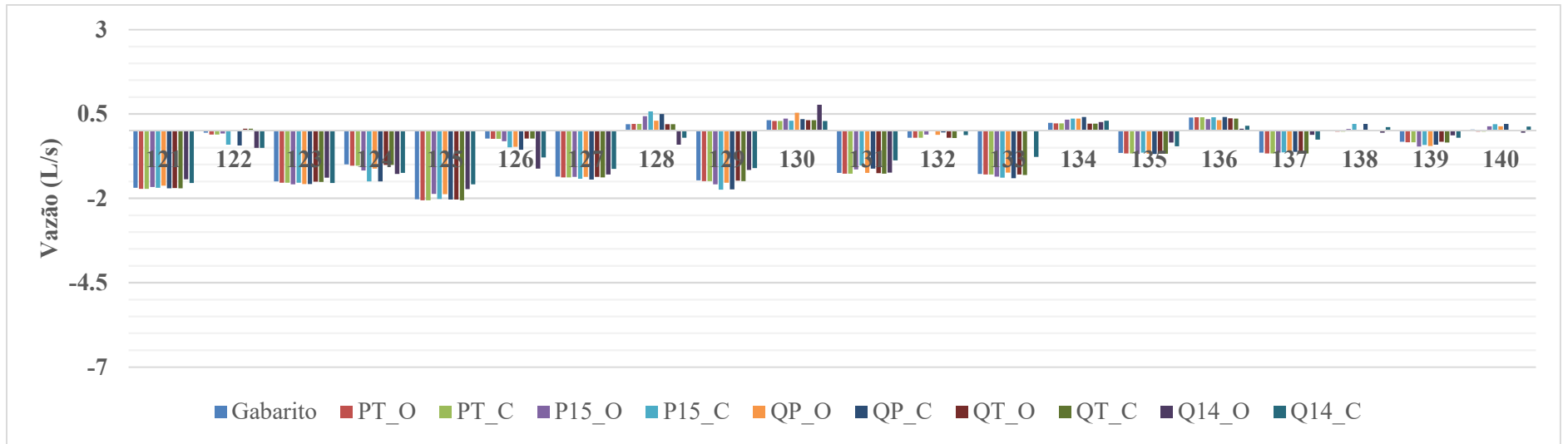
Fonte: Elaborado pelo autor



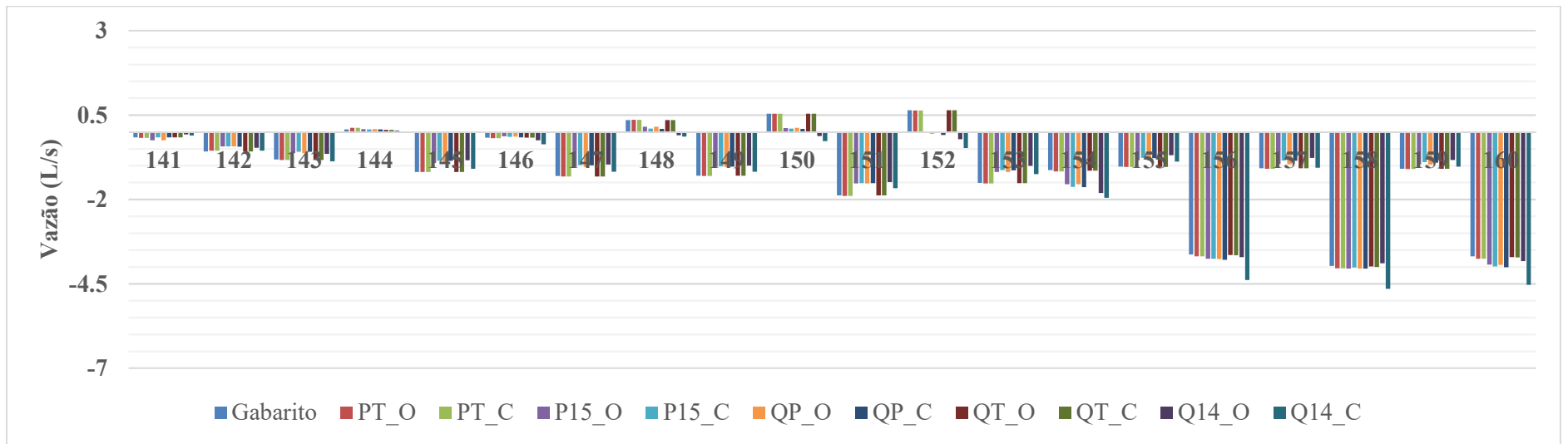
Fonte: Elaborado pelo autor



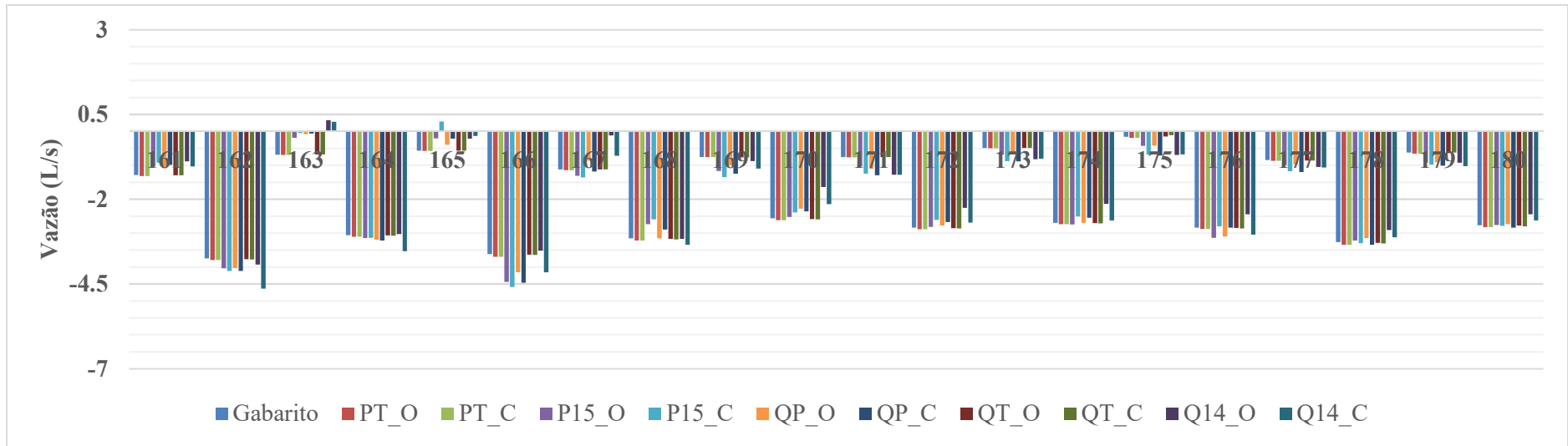
Fonte: Elaborado pelo autor



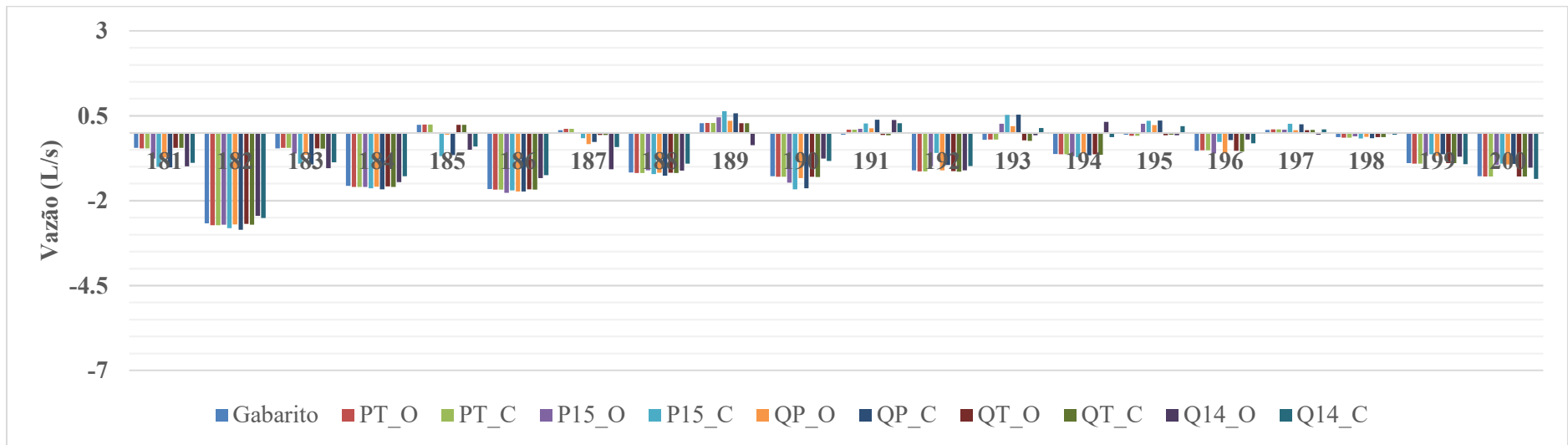
Fonte: Elaborado pelo autor



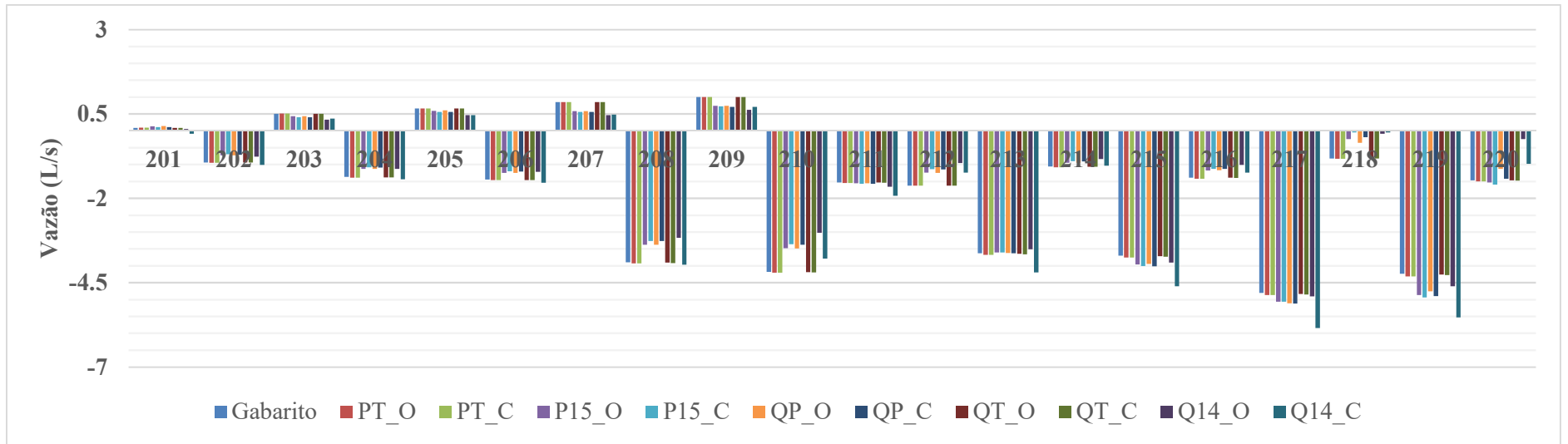
Fonte: Elaborado pelo autor



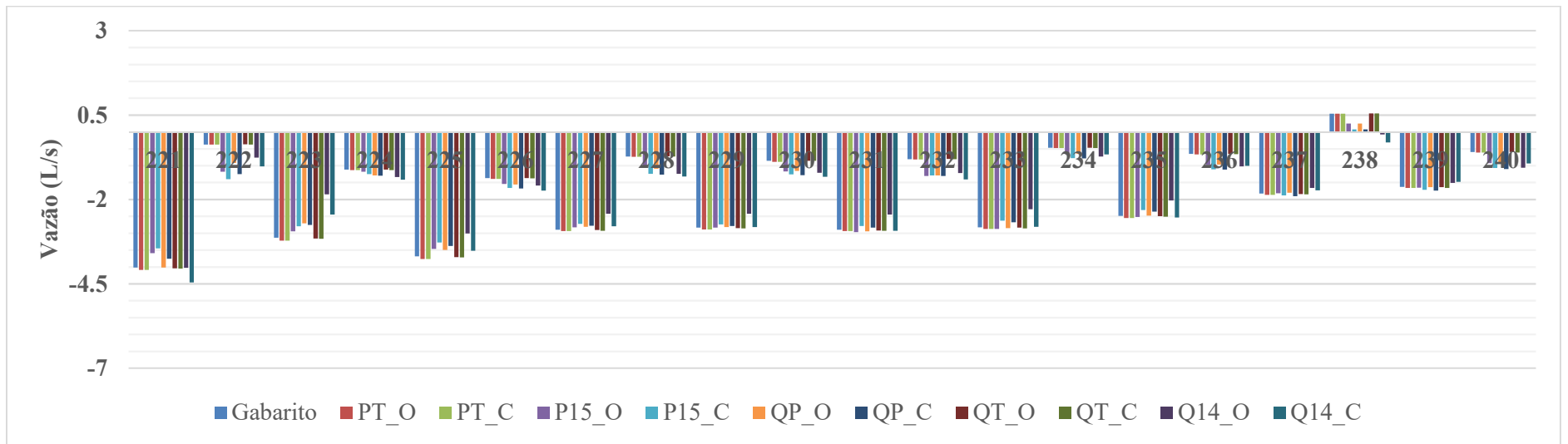
Fonte: Elaborado pelo autor



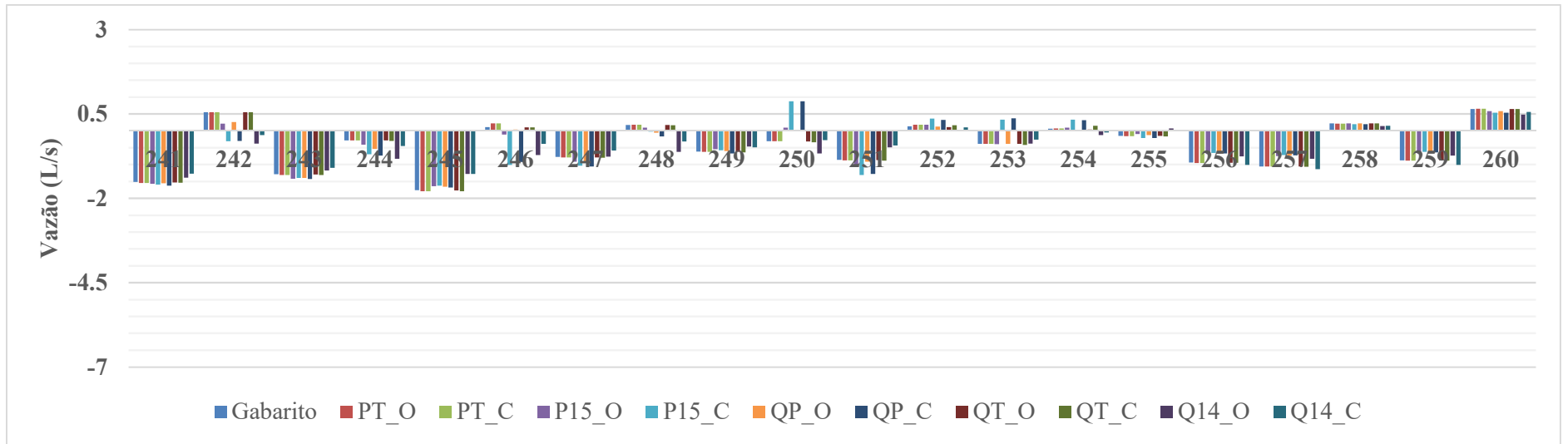
Fonte: Elaborado pelo autor



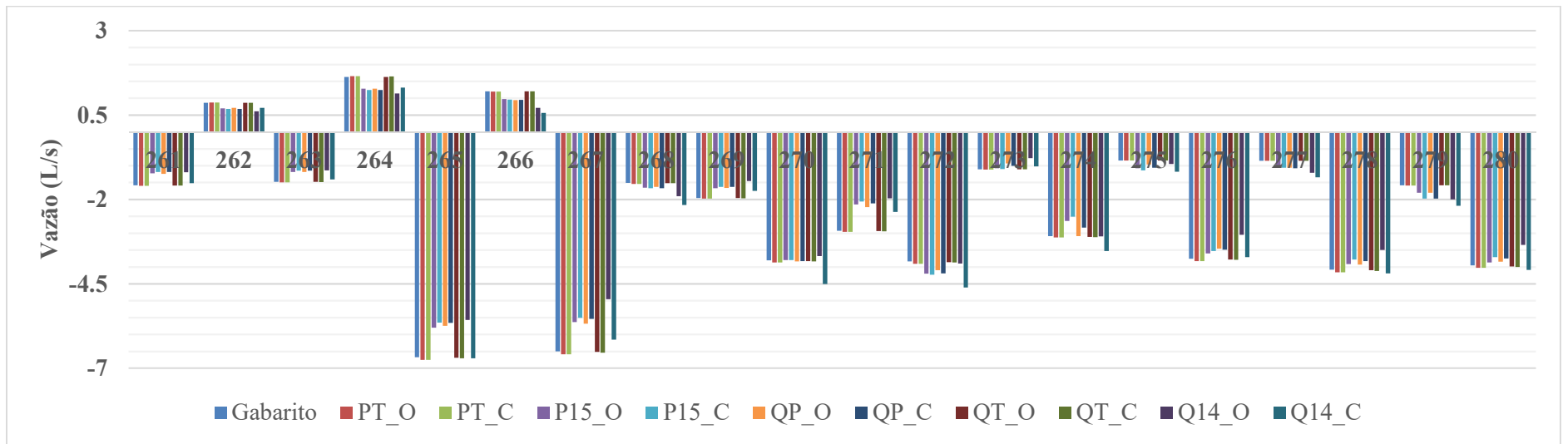
Fonte: Elaborado pelo autor



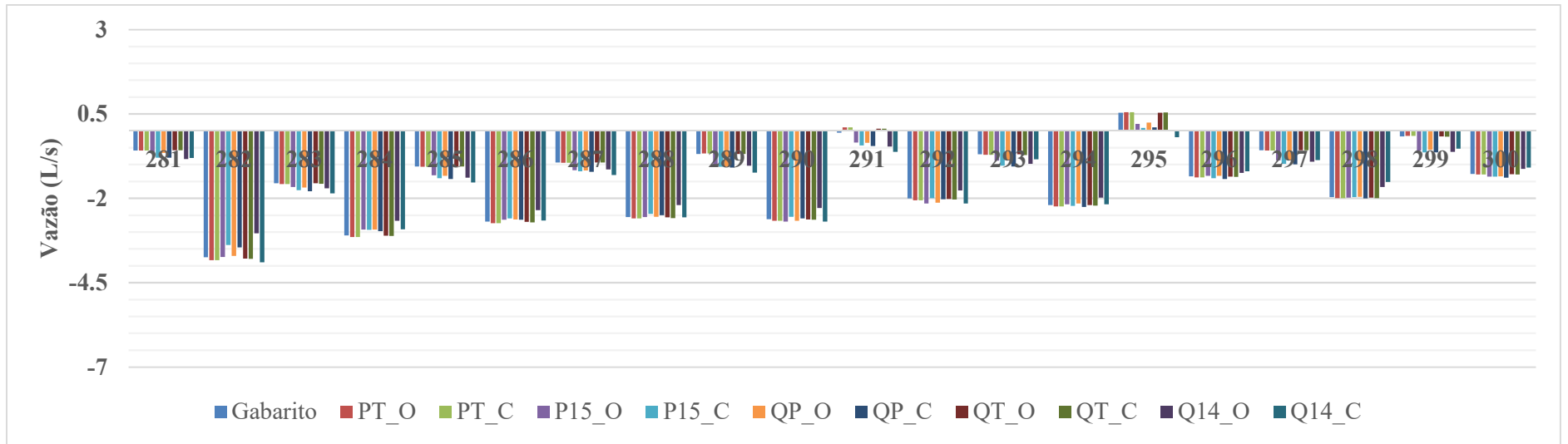
Fonte: Elaborado pelo autor



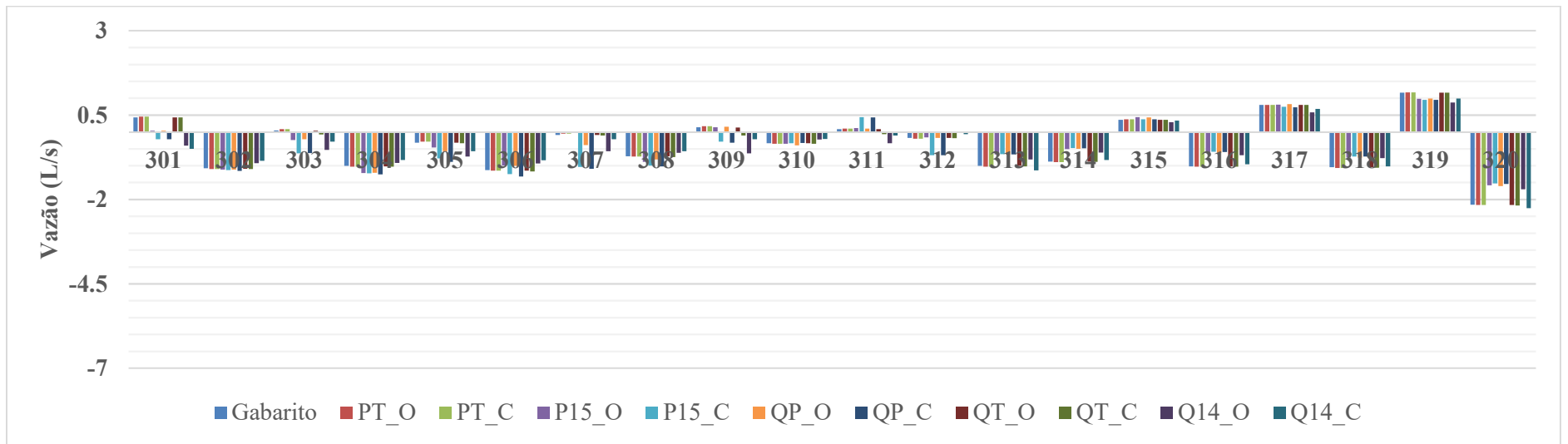
Fonte: Elaborado pelo autor



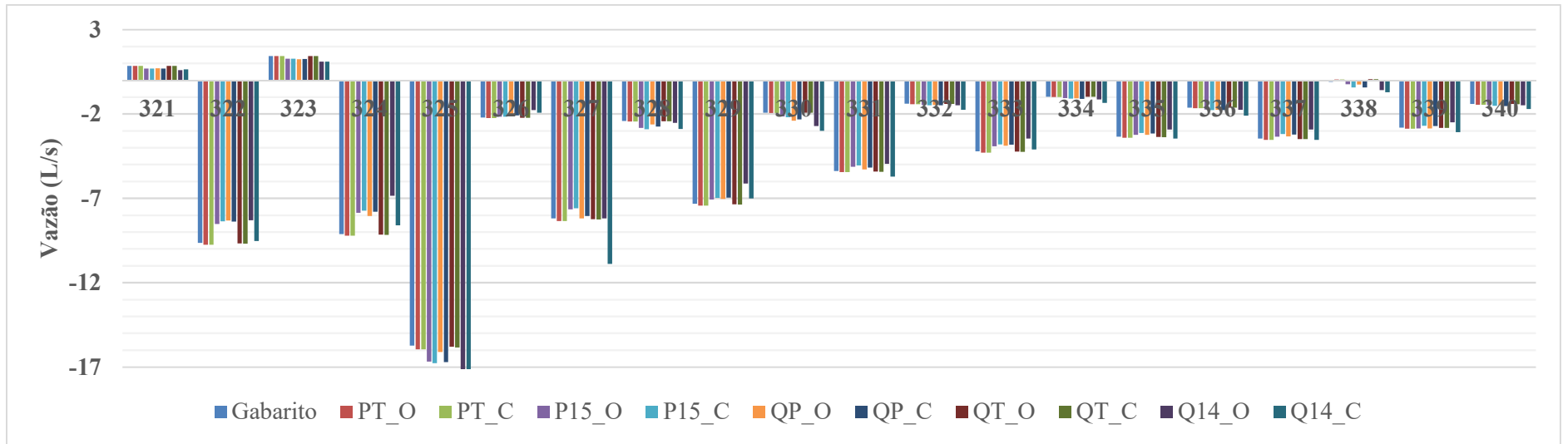
Fonte: Elaborado pelo autor



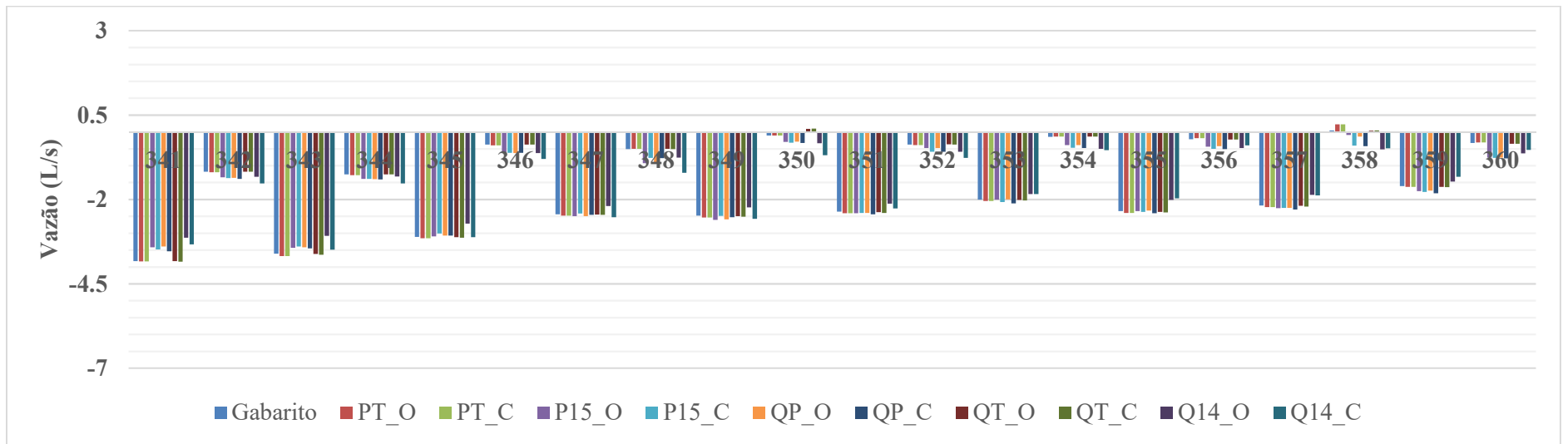
Fonte: Elaborado pelo autor



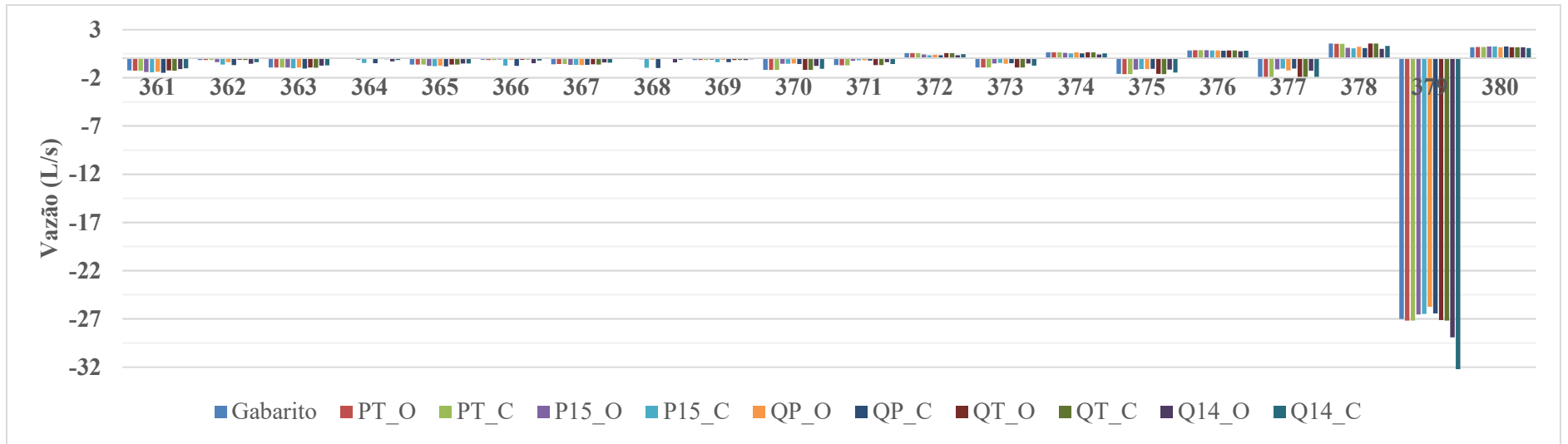
Fonte: Elaborado pelo autor



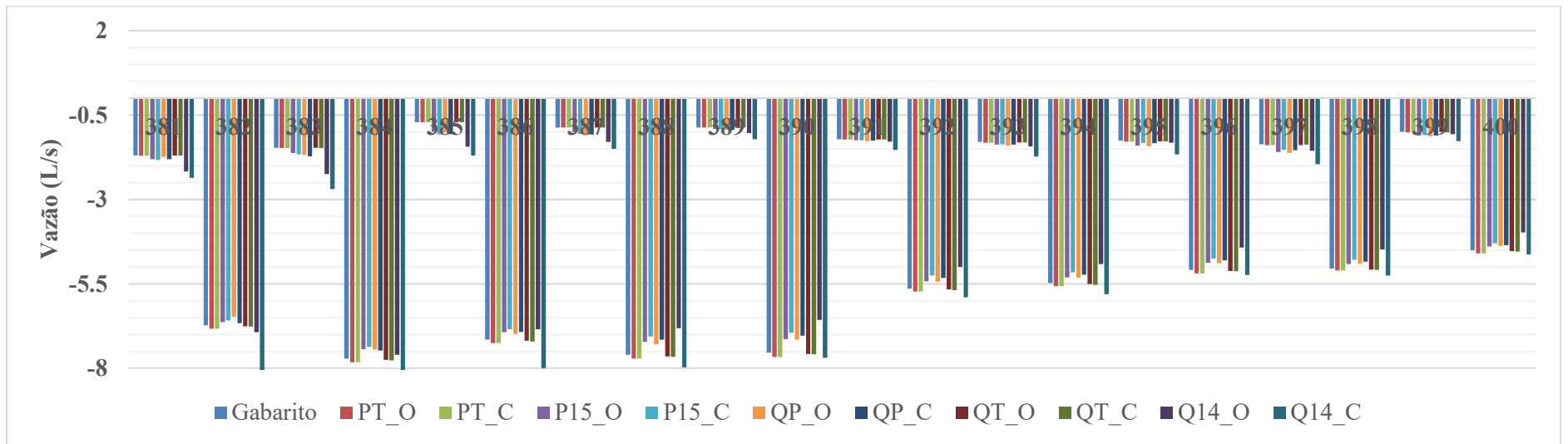
Fonte: Elaborado pelo autor



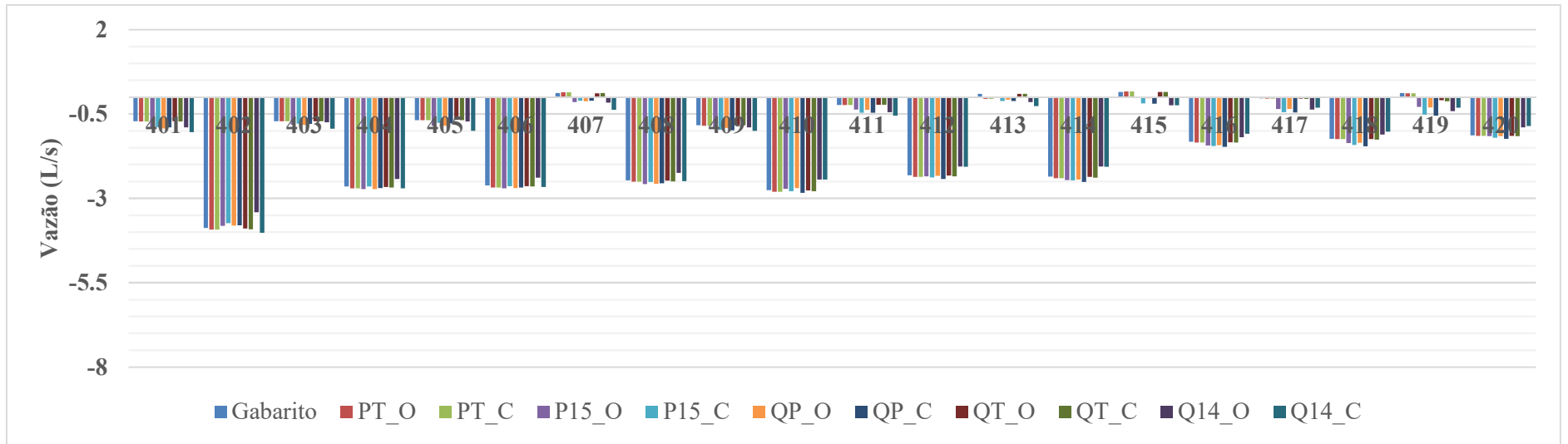
Fonte: Elaborado pelo autor



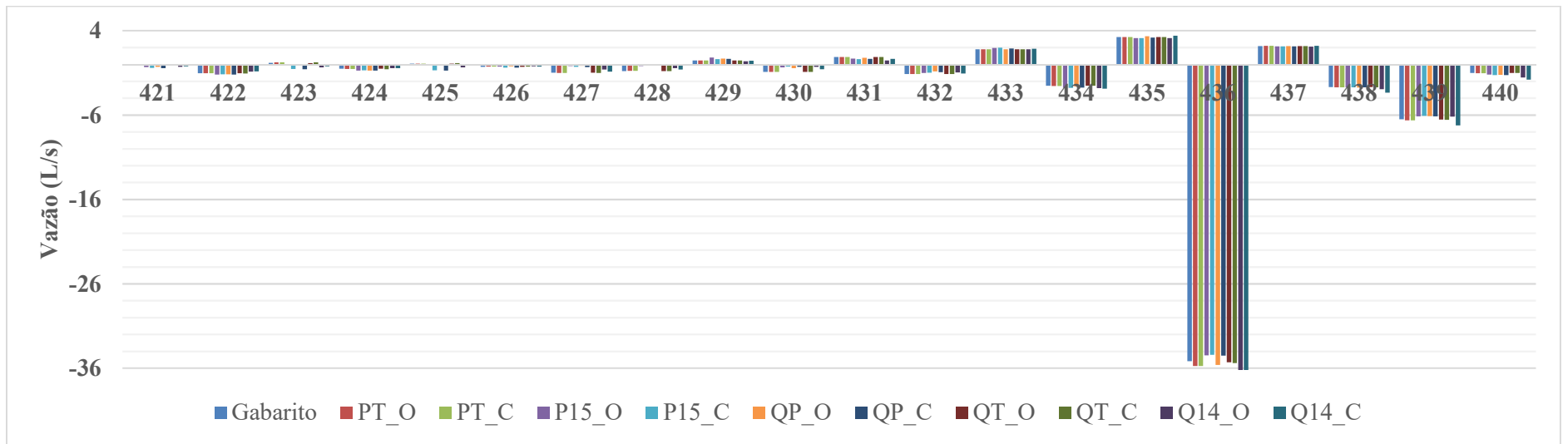
Fonte: Elaborado pelo autor



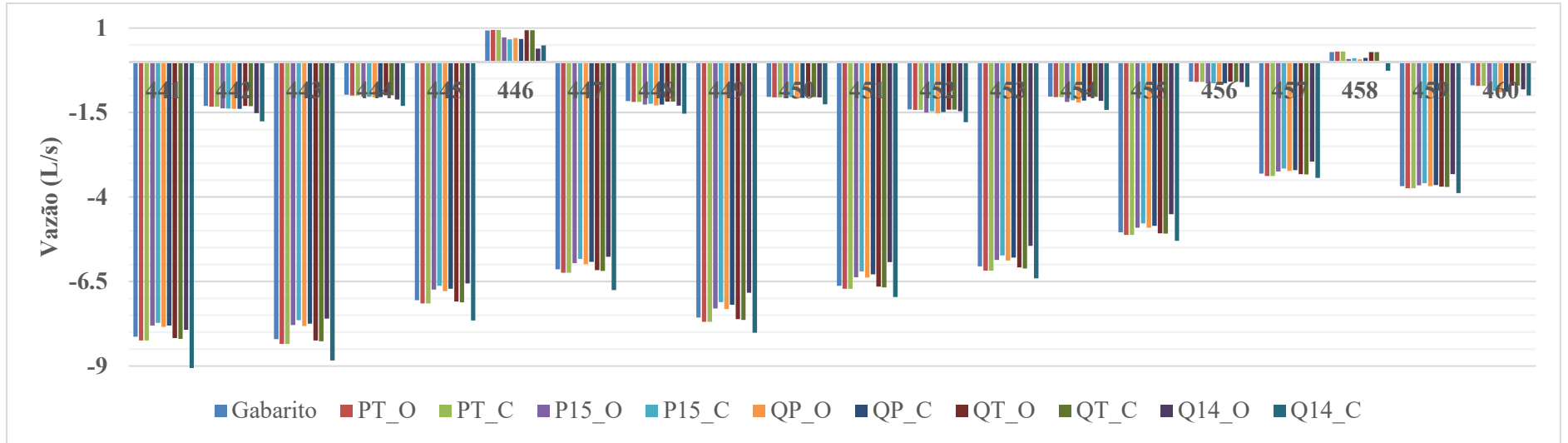
Fonte: Elaborado pelo autor



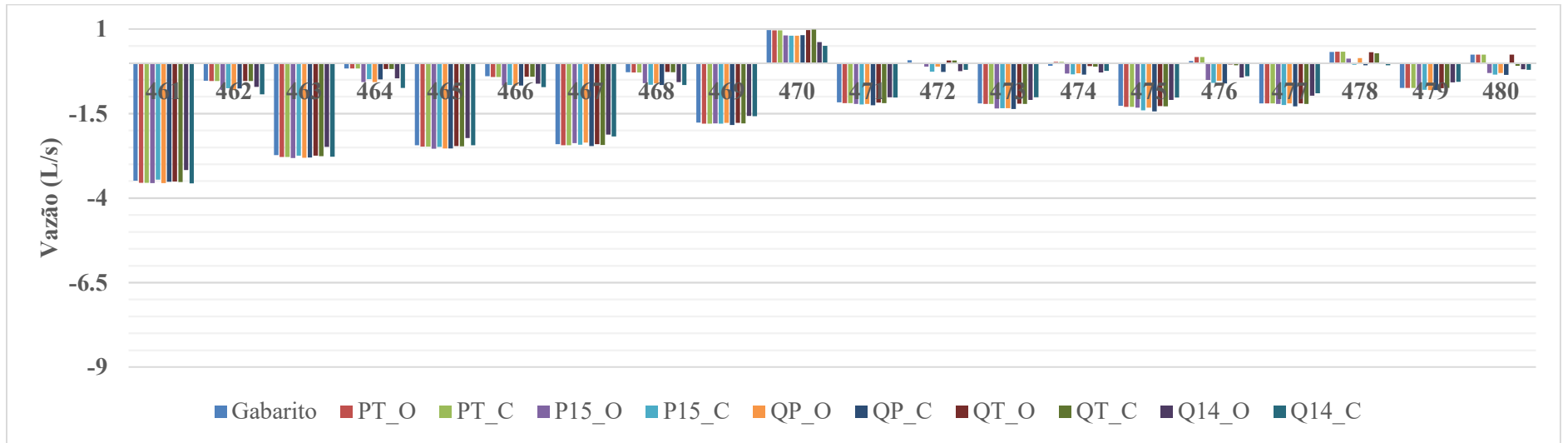
Fonte: Elaborado pelo autor



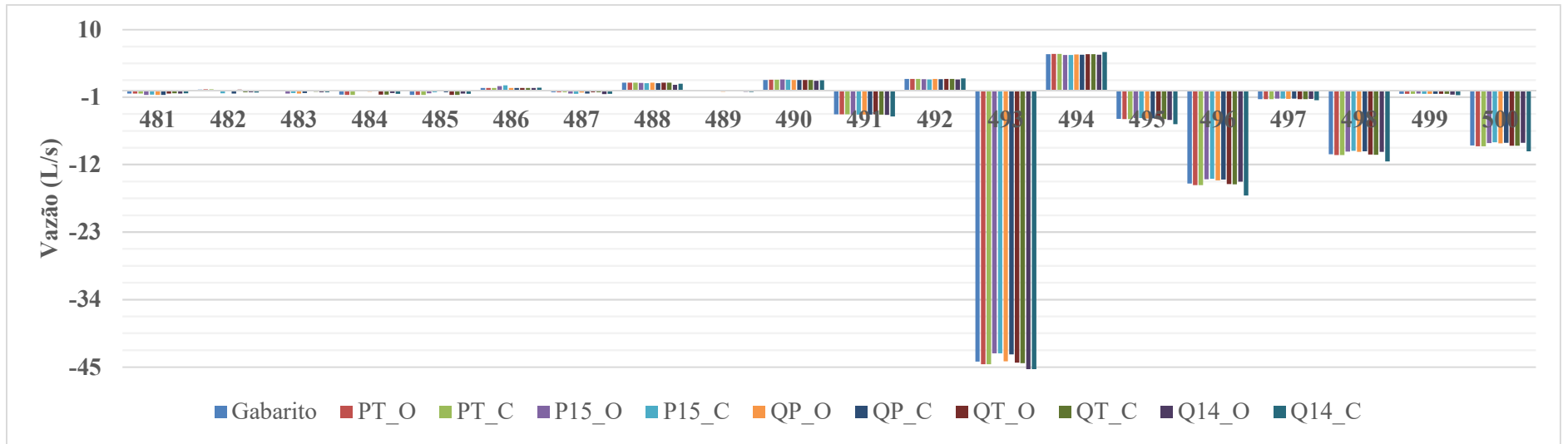
Fonte: Elaborado pelo autor



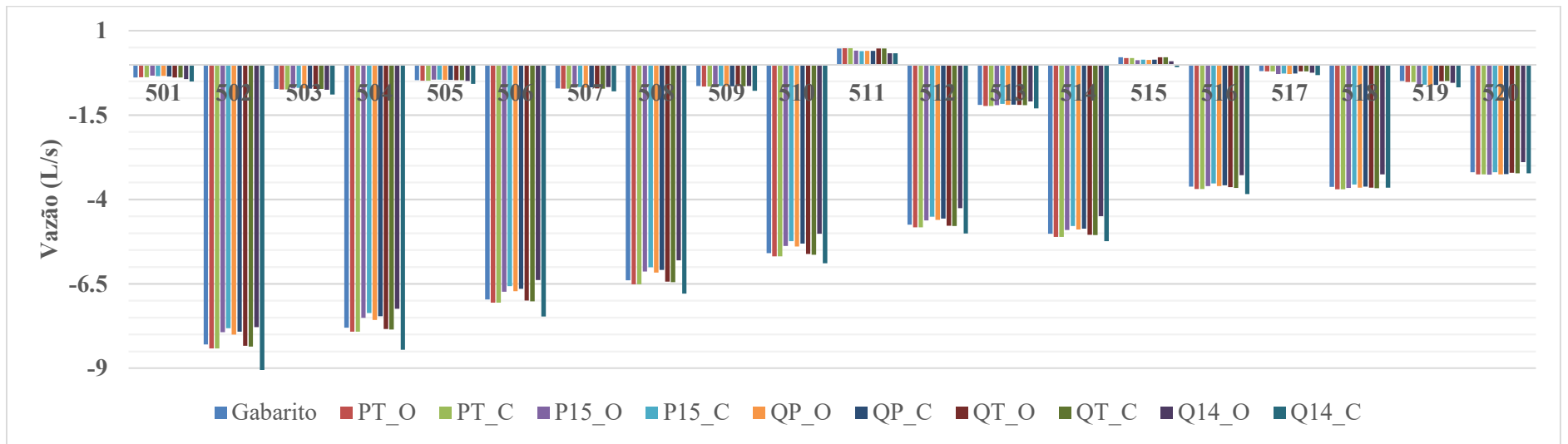
Fonte: Elaborado pelo autor



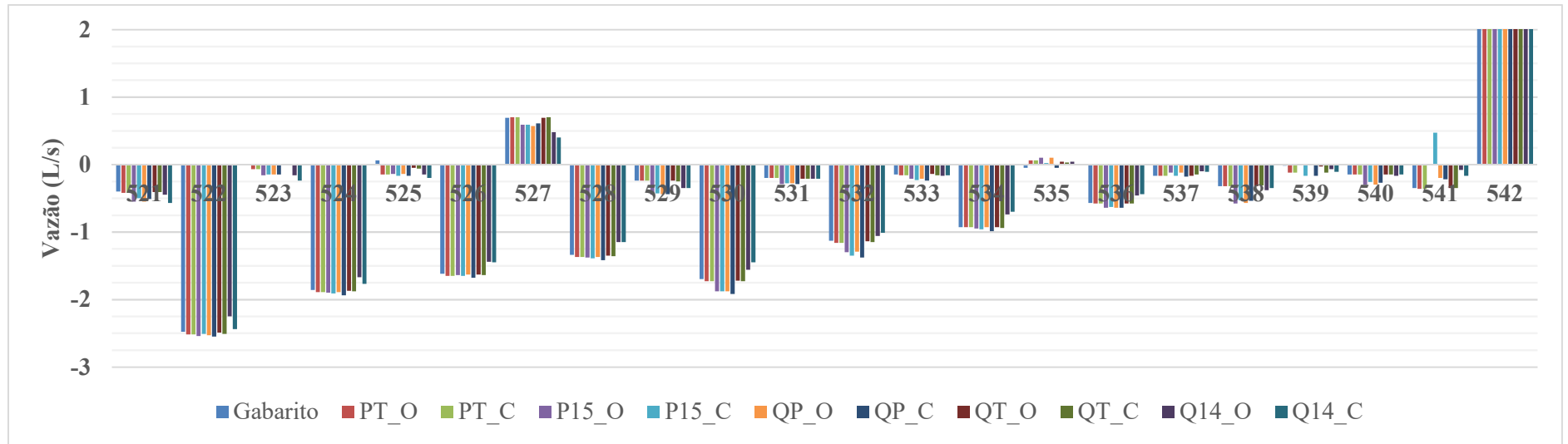
Fonte: Elaborado pelo autor



Fonte: Elaborado pelo autor

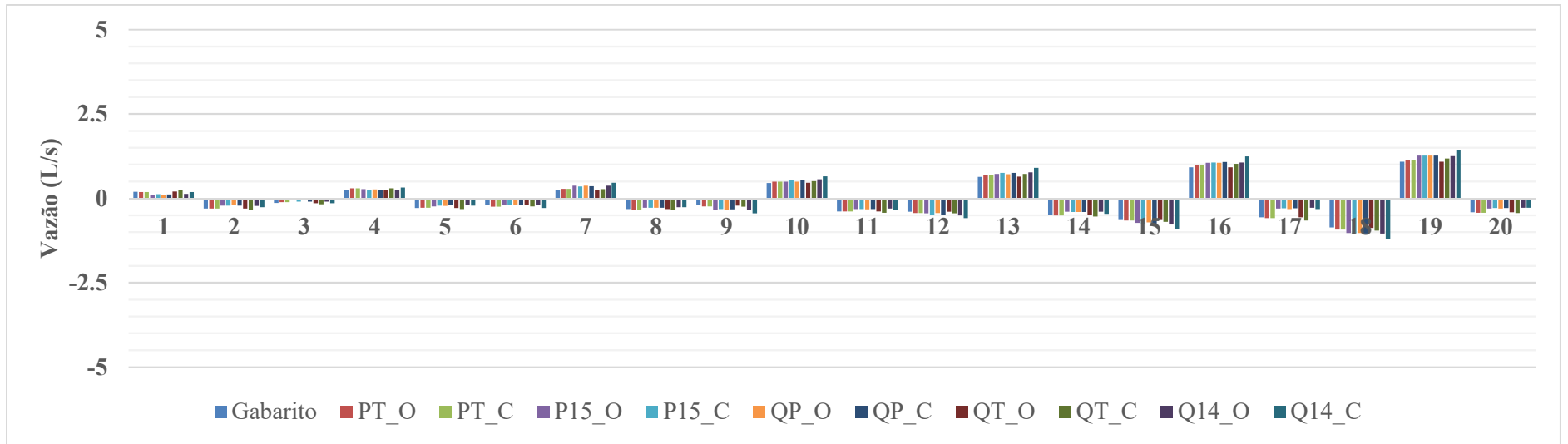


Fonte: Elaborado pelo autor

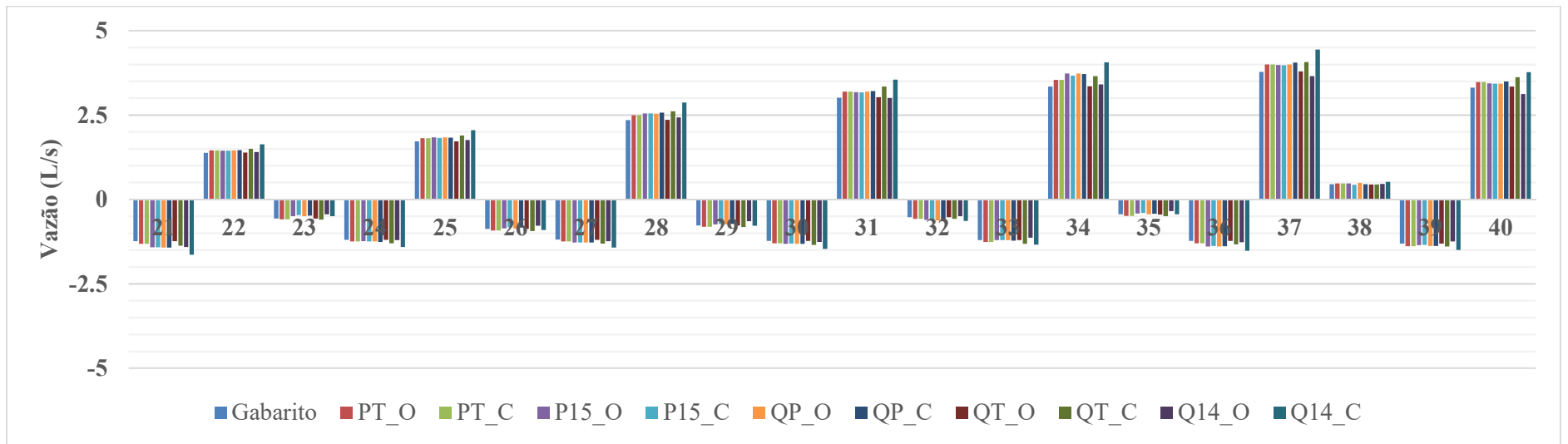


Fonte: Elaborado pelo autor

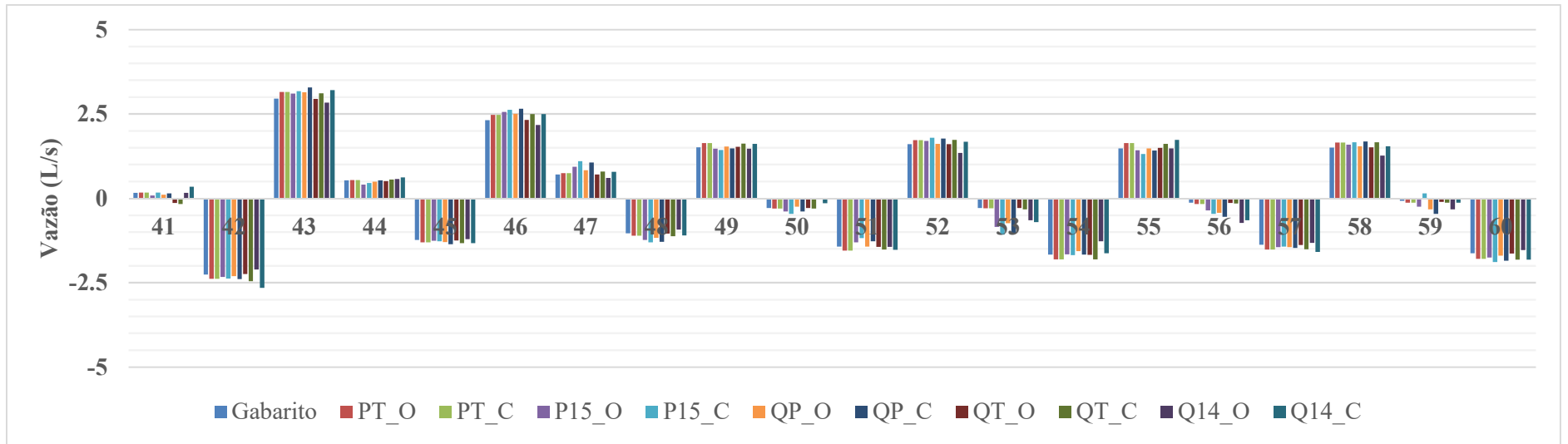
**APÊNDICE EB – Vazões encontradas na Calibração da vazão com gradiente hidráulico
calculado através da equação de Darcy-Weisbach com consumos nodais iniciais de 0,1
L/s: rede MIGHA**



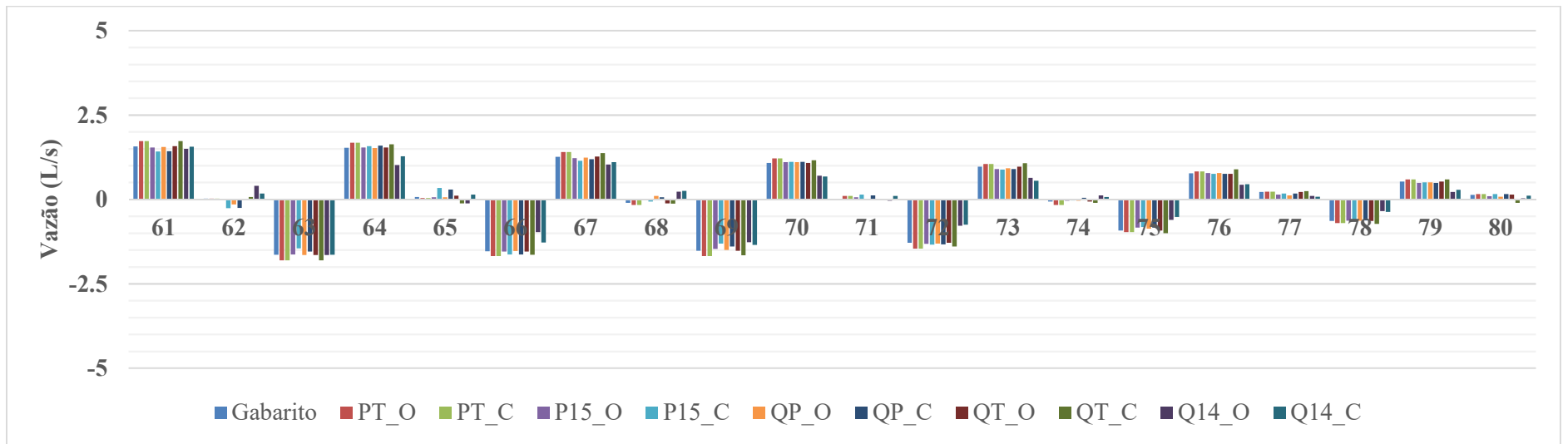
Fonte: Elaborado pelo autor



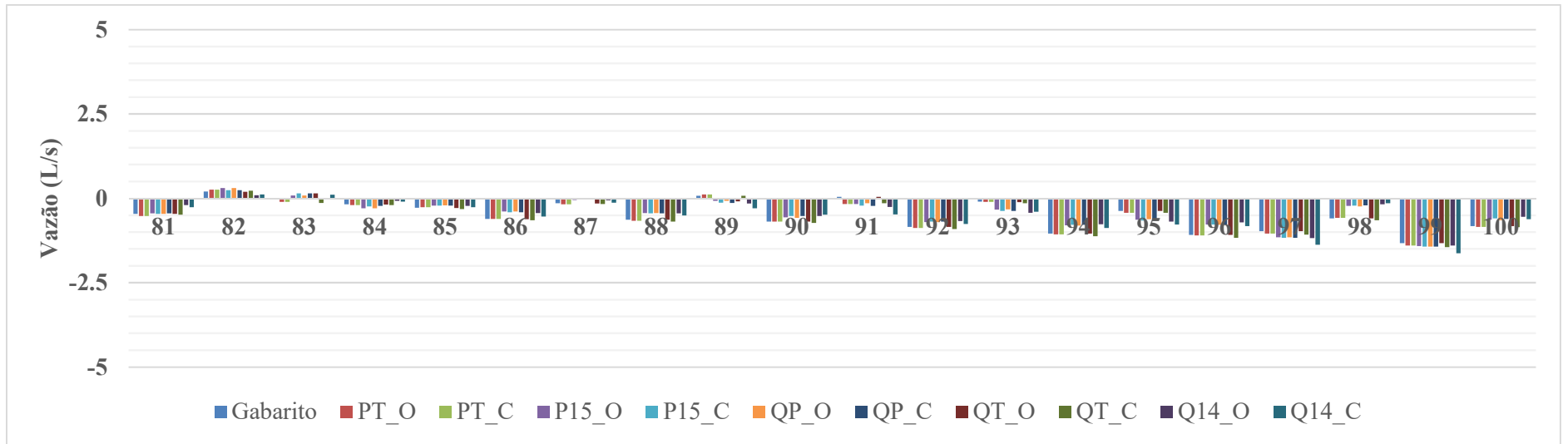
Fonte: Elaborado pelo autor



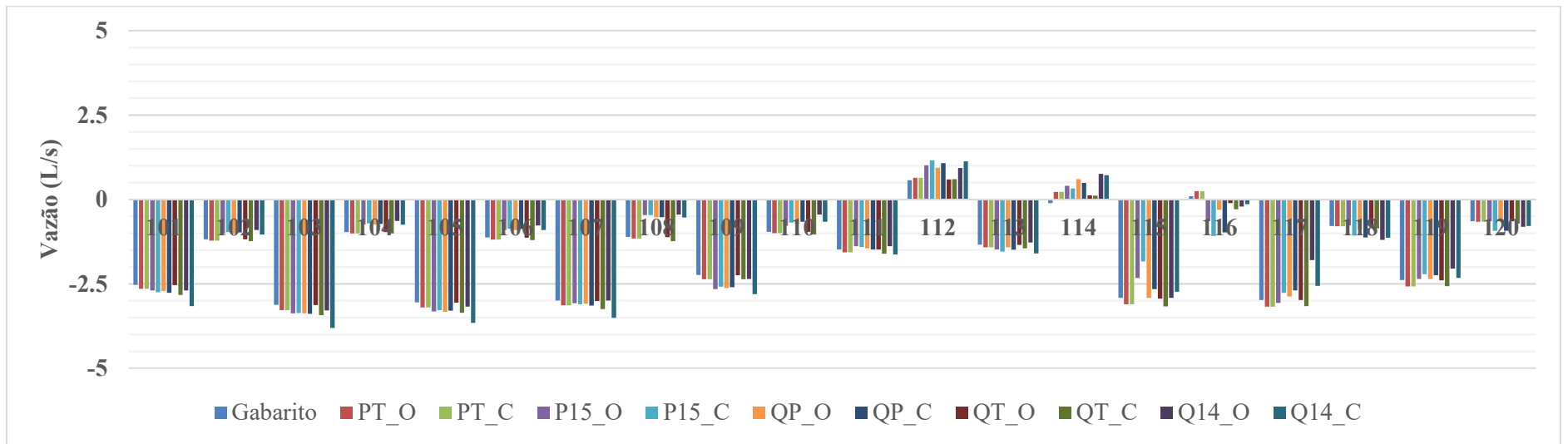
Fonte: Elaborado pelo autor



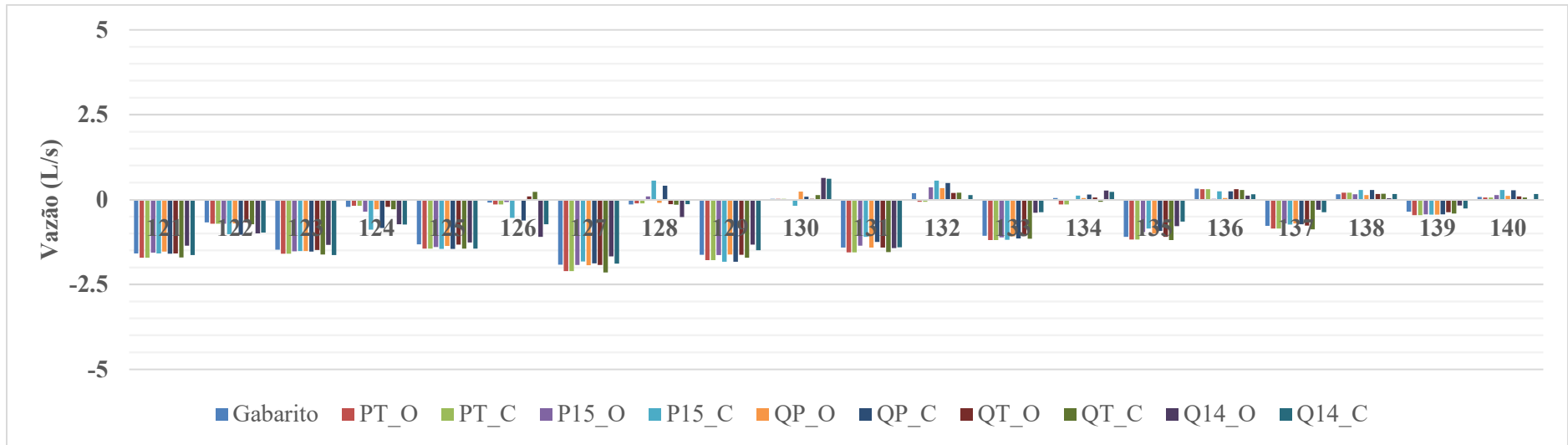
Fonte: Elaborado pelo autor



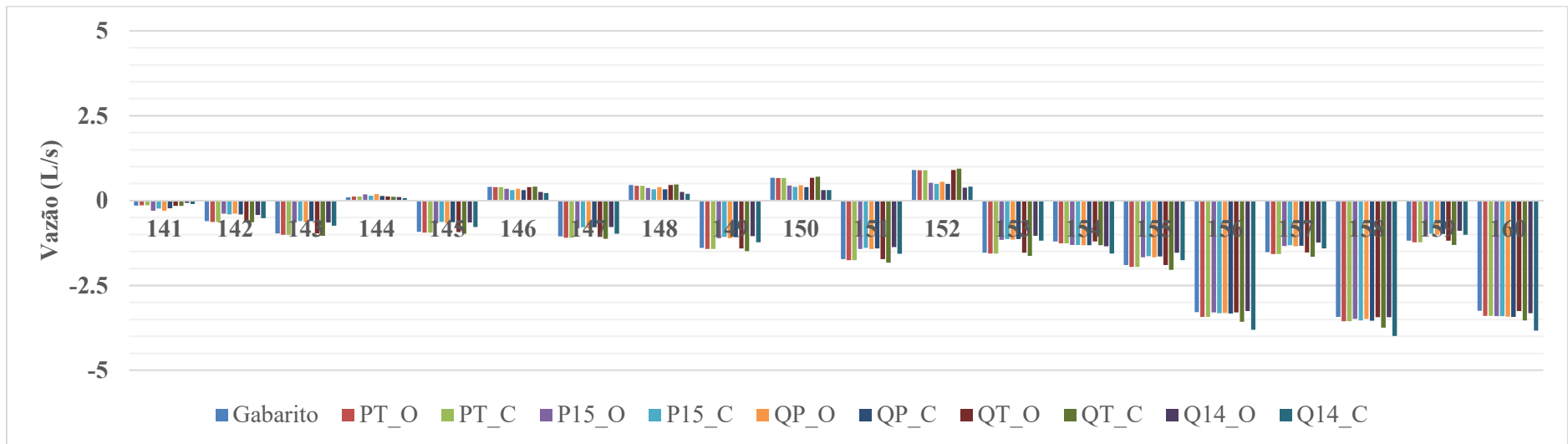
Fonte: Elaborado pelo autor



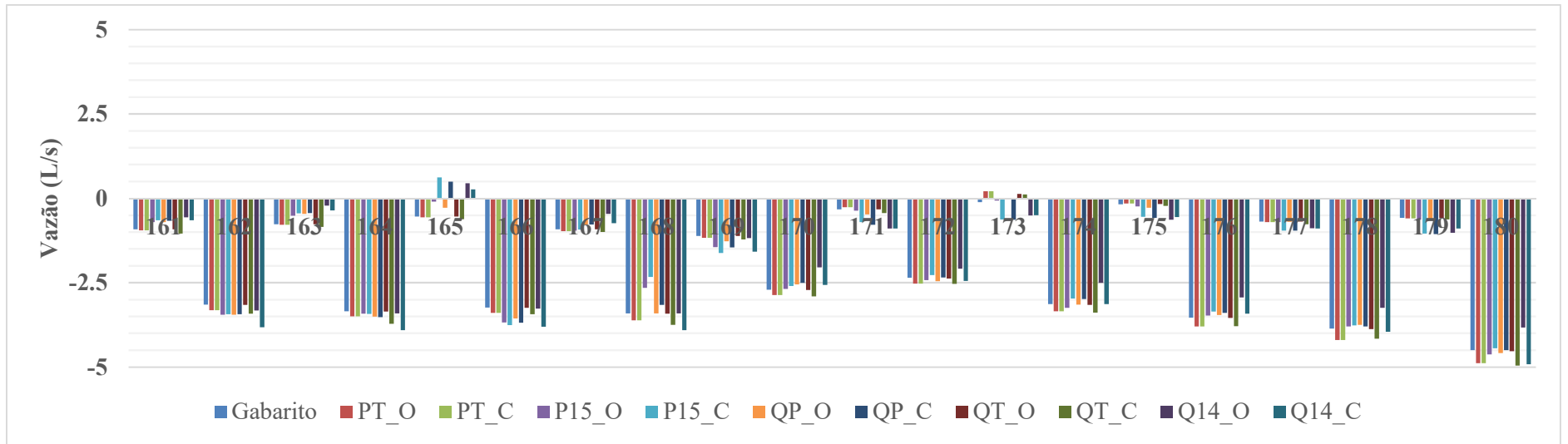
Fonte: Elaborado pelo autor



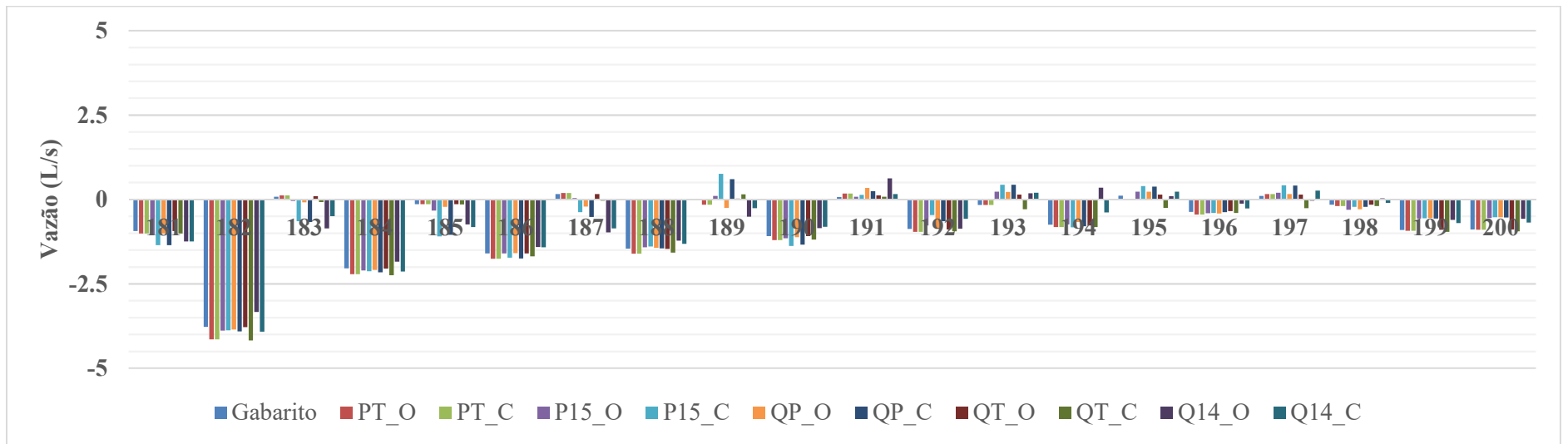
Fonte: Elaborado pelo autor



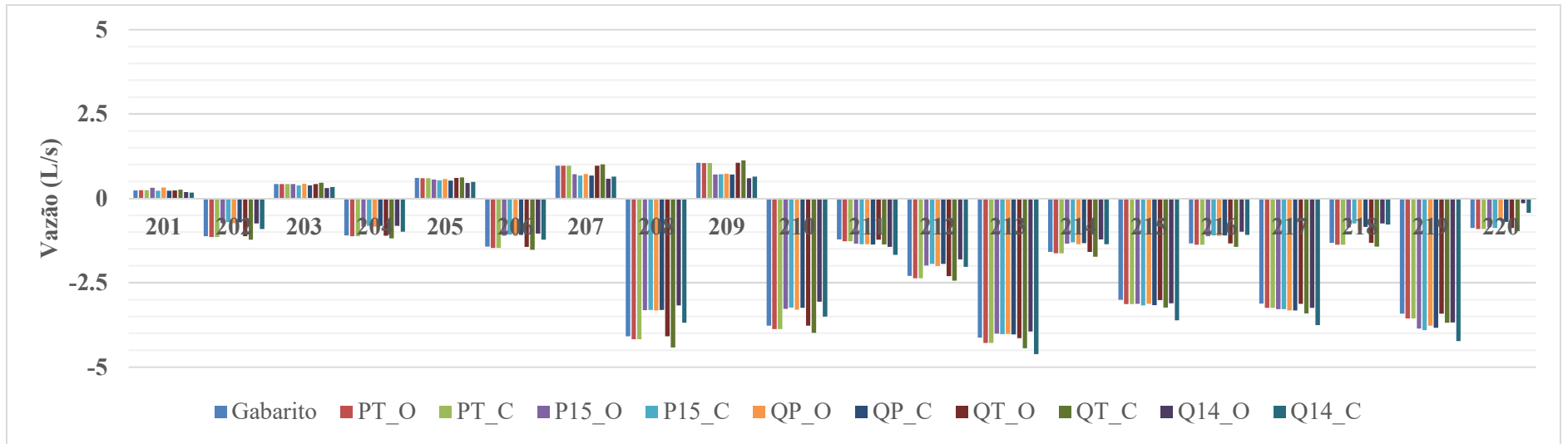
Fonte: Elaborado pelo autor



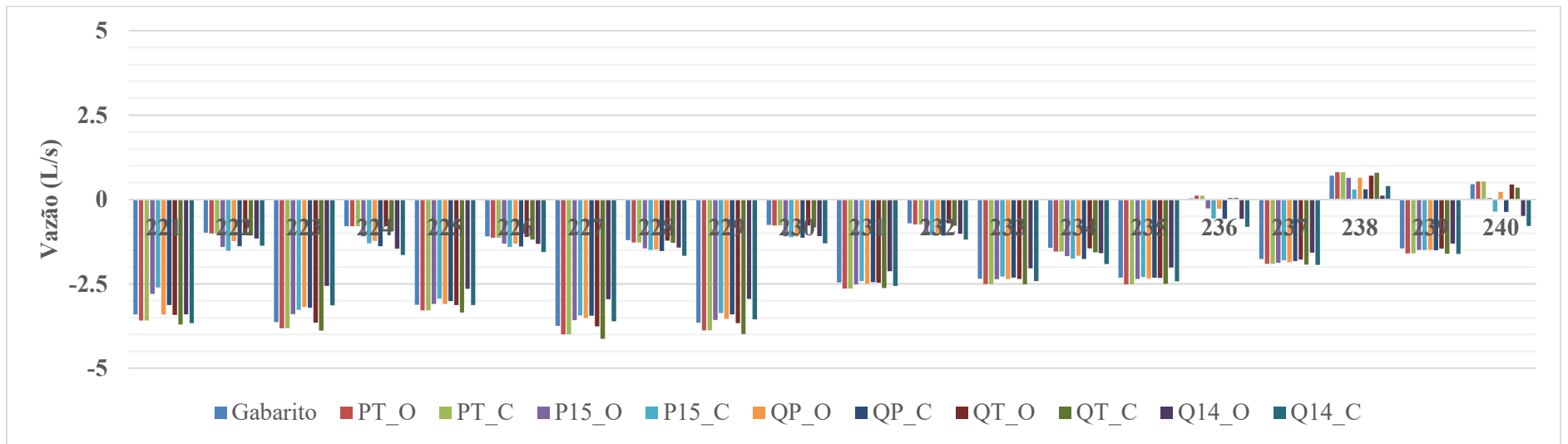
Fonte: Elaborado pelo autor



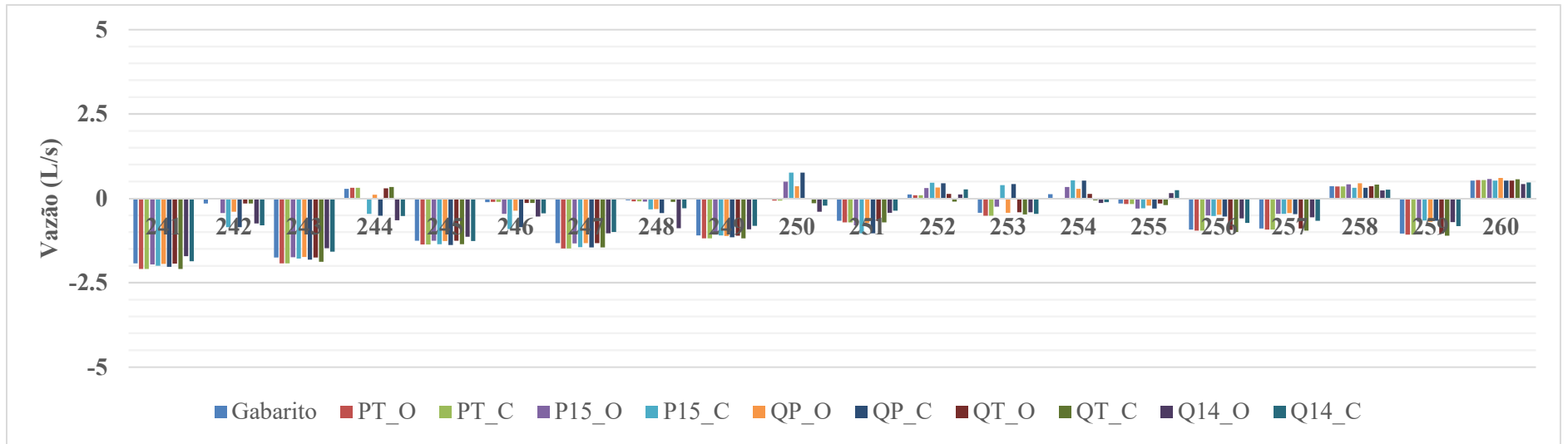
Fonte: Elaborado pelo autor



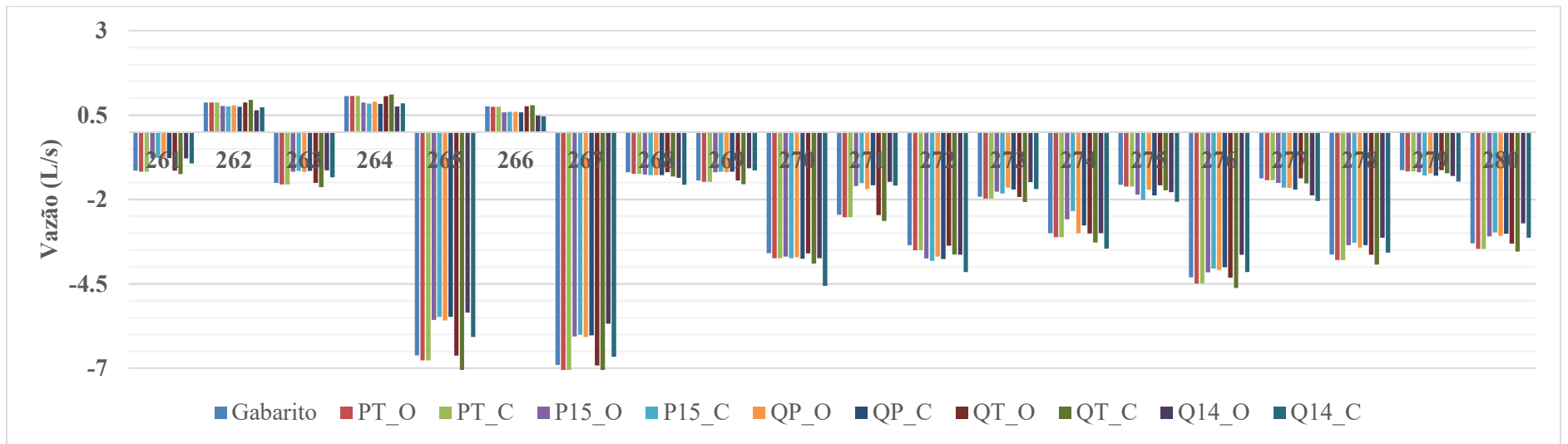
Fonte: Elaborado pelo autor



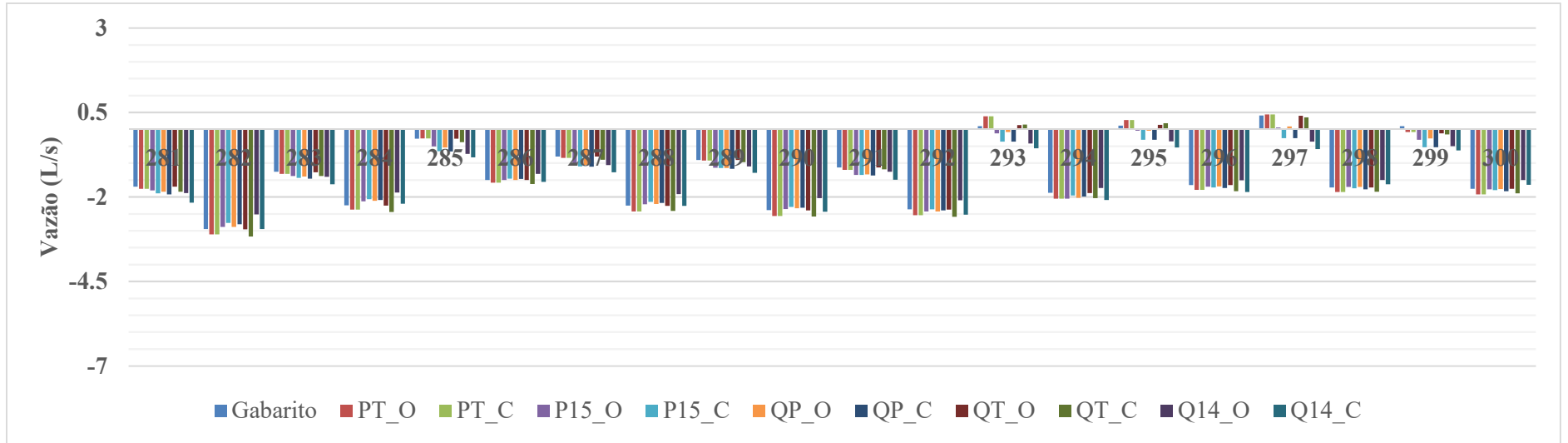
Fonte: Elaborado pelo autor



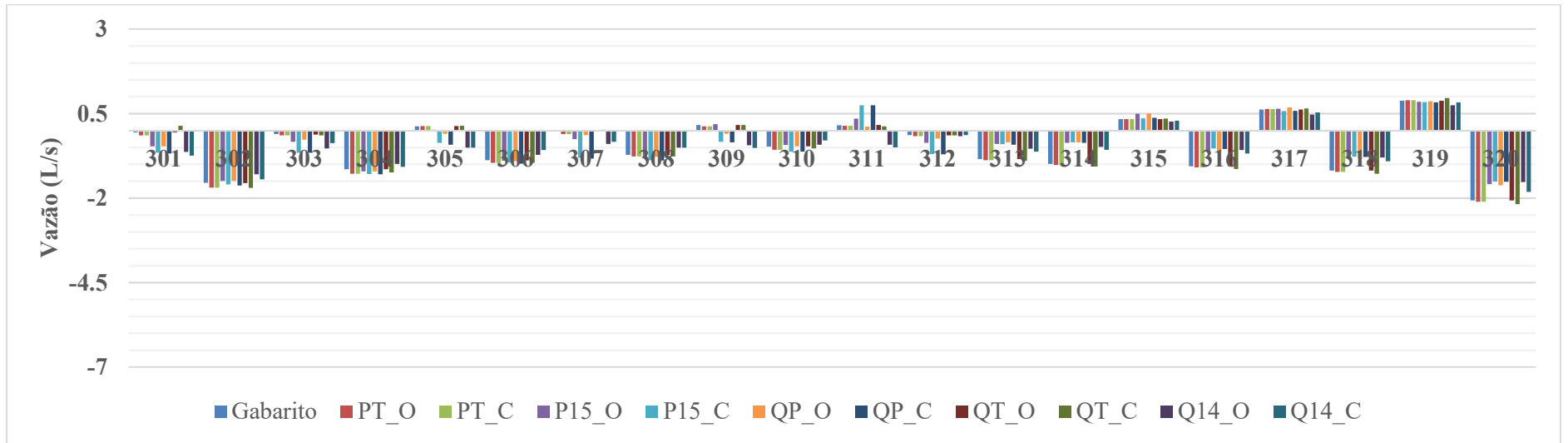
Fonte: Elaborado pelo autor



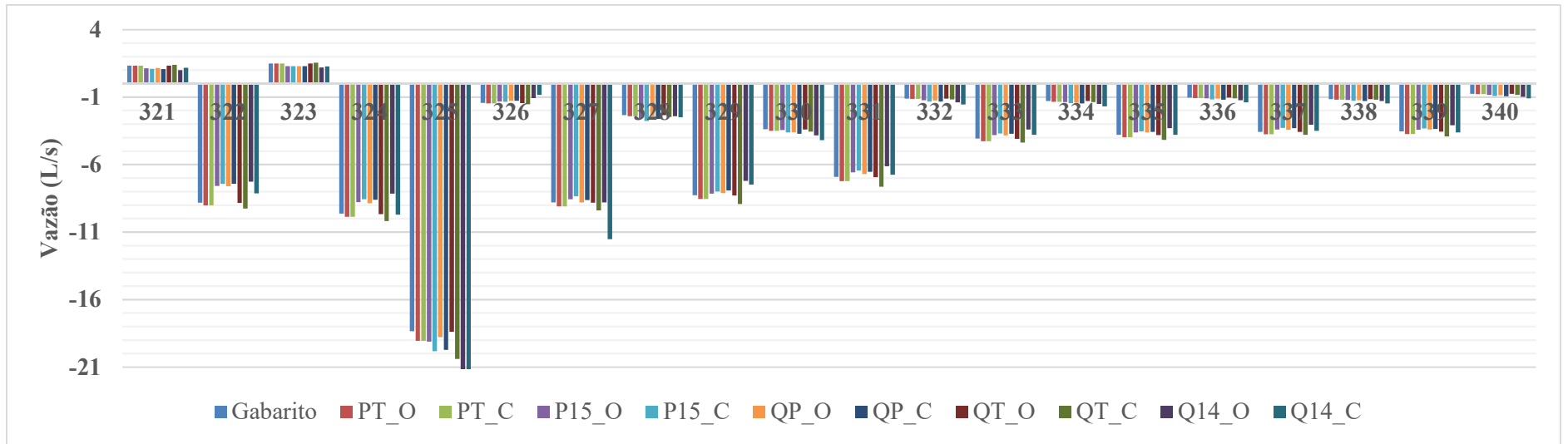
Fonte: Elaborado pelo autor



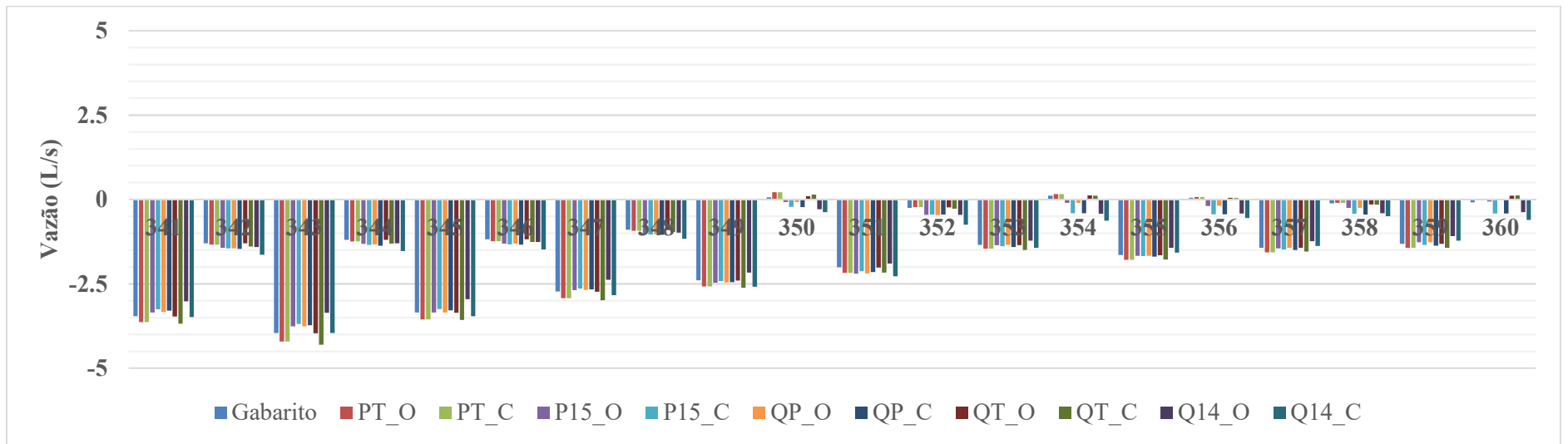
Fonte: Elaborado pelo autor



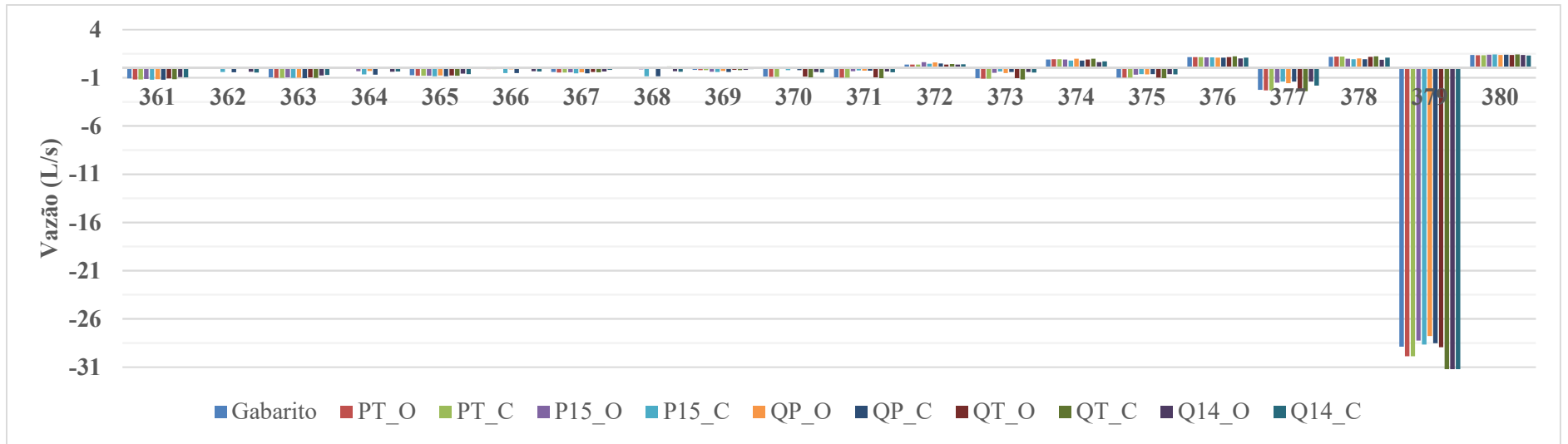
Fonte: Elaborado pelo autor



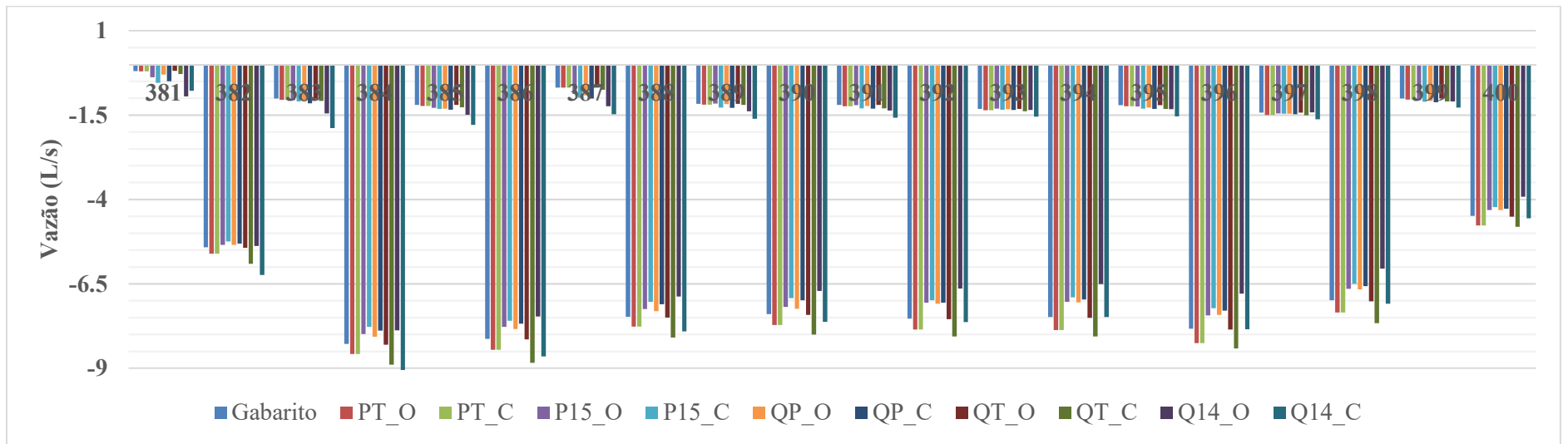
Fonte: Elaborado pelo autor



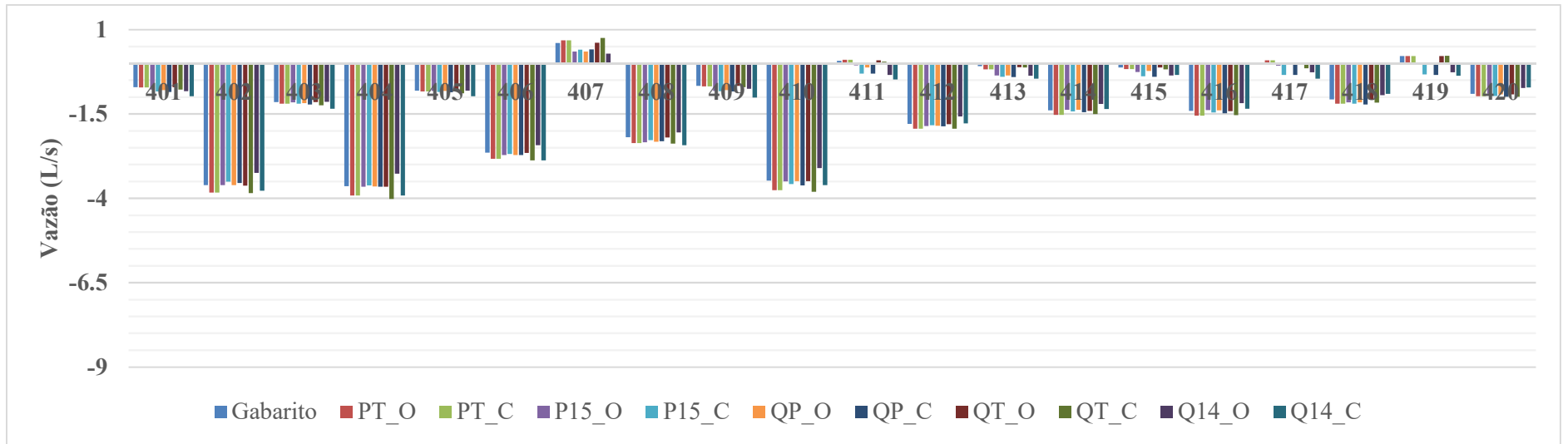
Fonte: Elaborado pelo autor



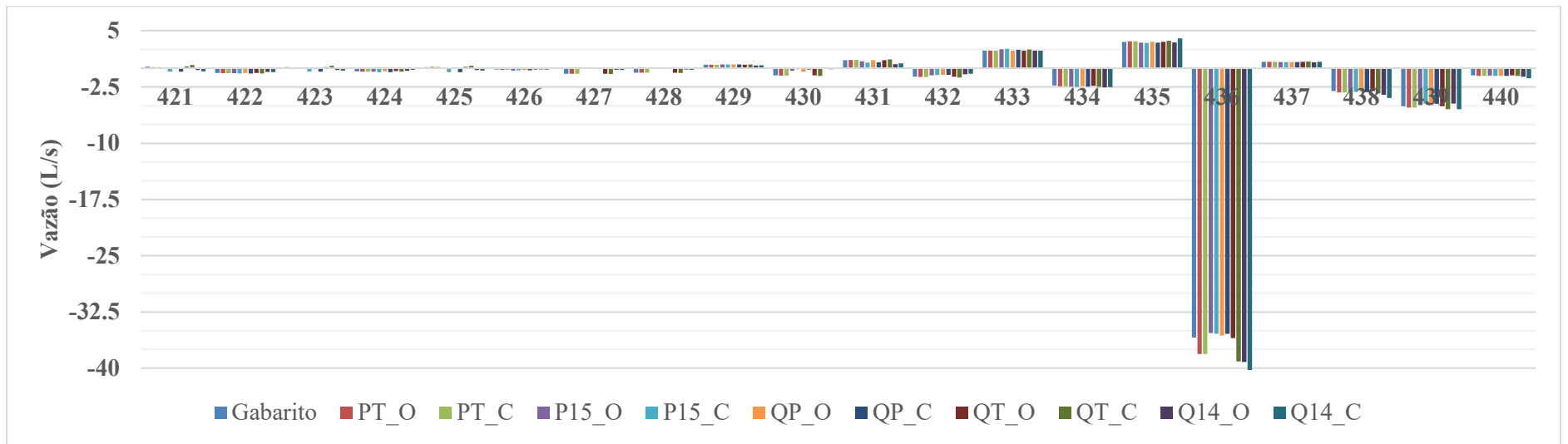
Fonte: Elaborado pelo autor



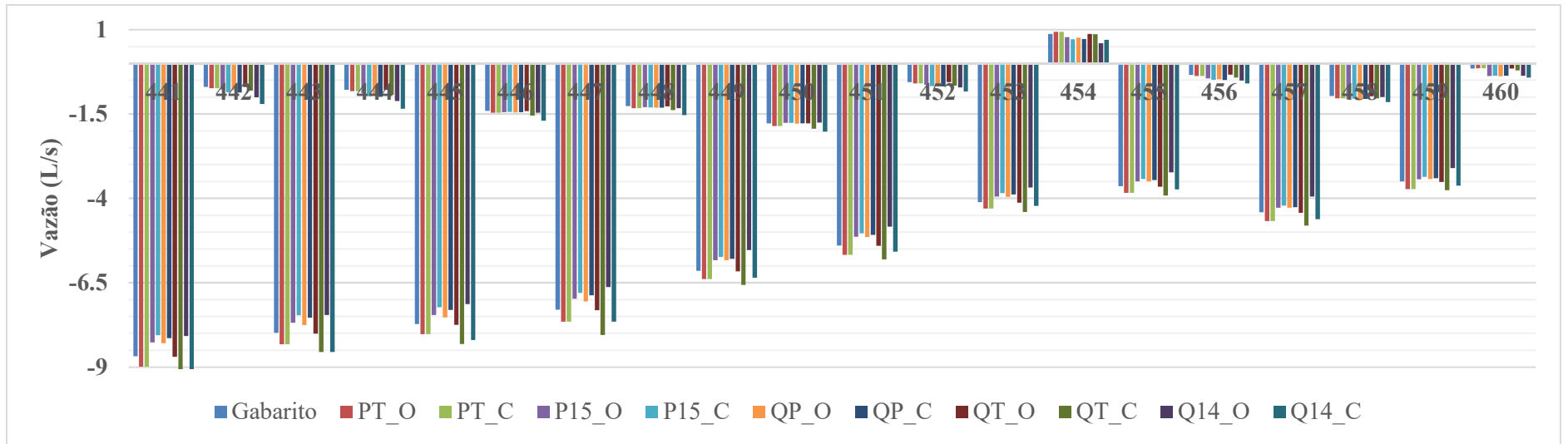
Fonte: Elaborado pelo autor



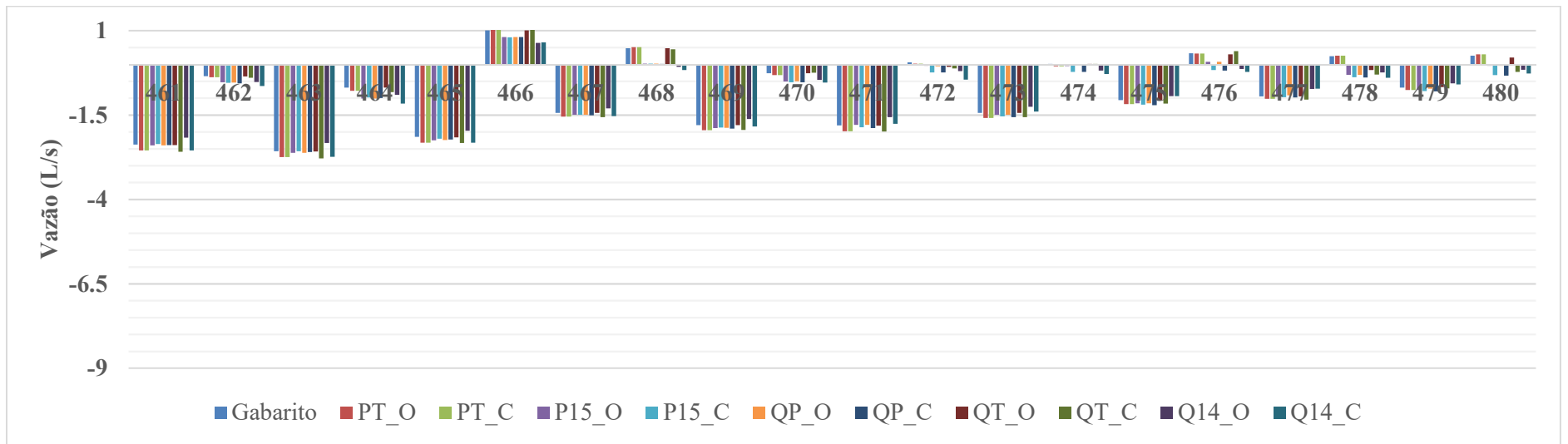
Fonte: Elaborado pelo autor



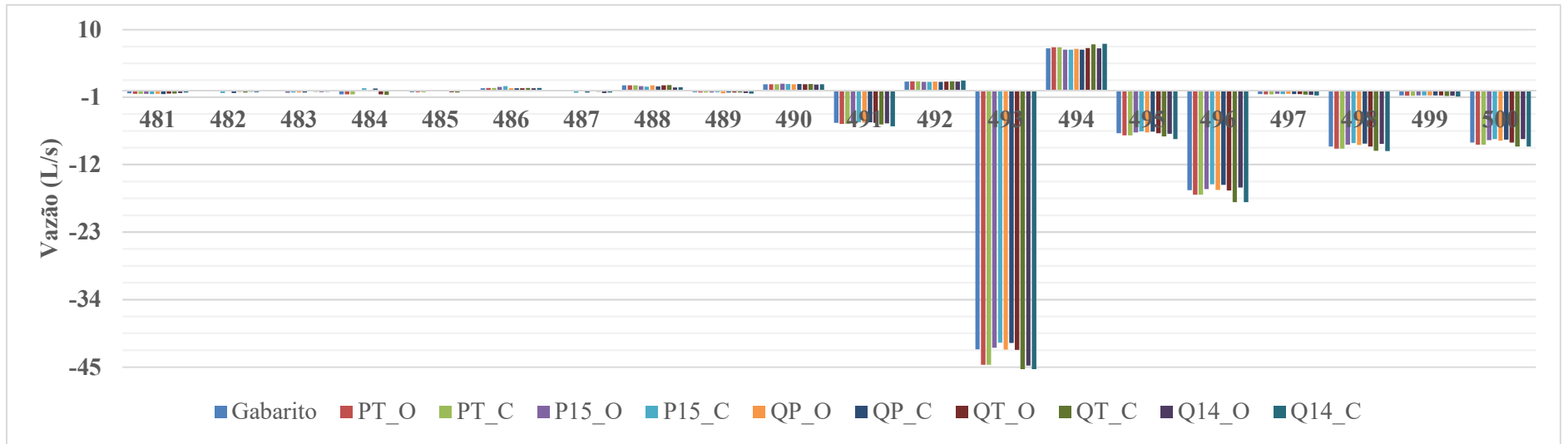
Fonte: Elaborado pelo autor



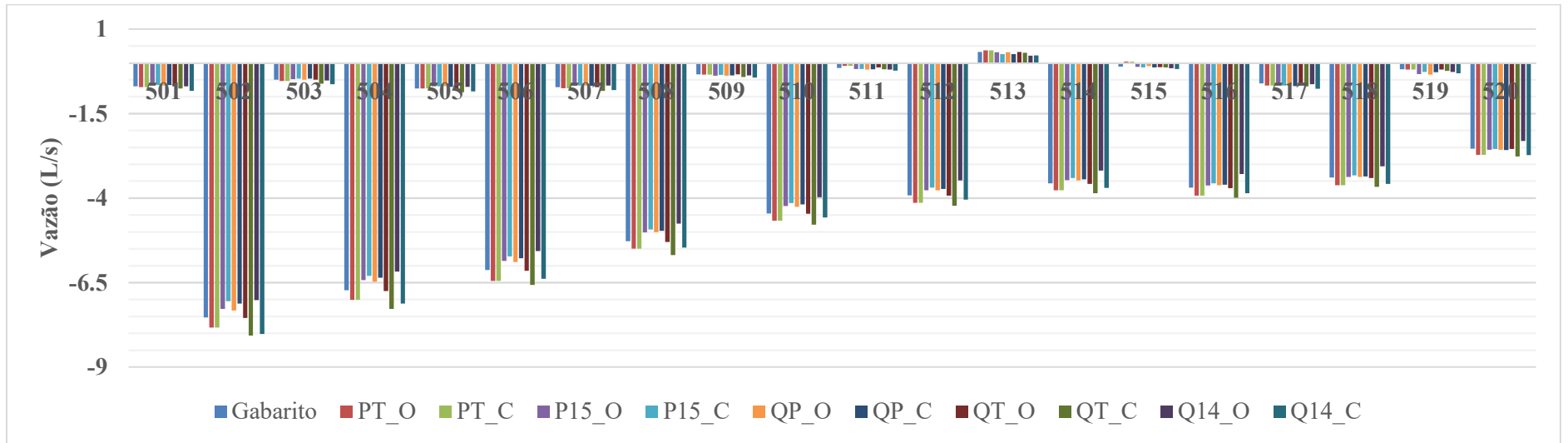
Fonte: Elaborado pelo autor



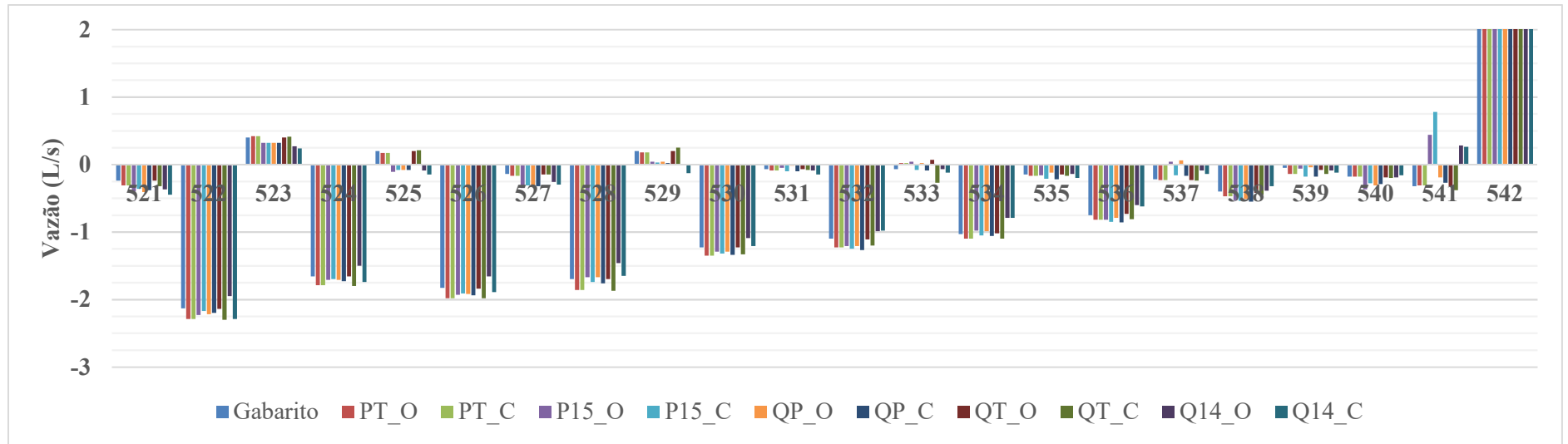
Fonte: Elaborado pelo autor



Fonte: Elaborado pelo autor

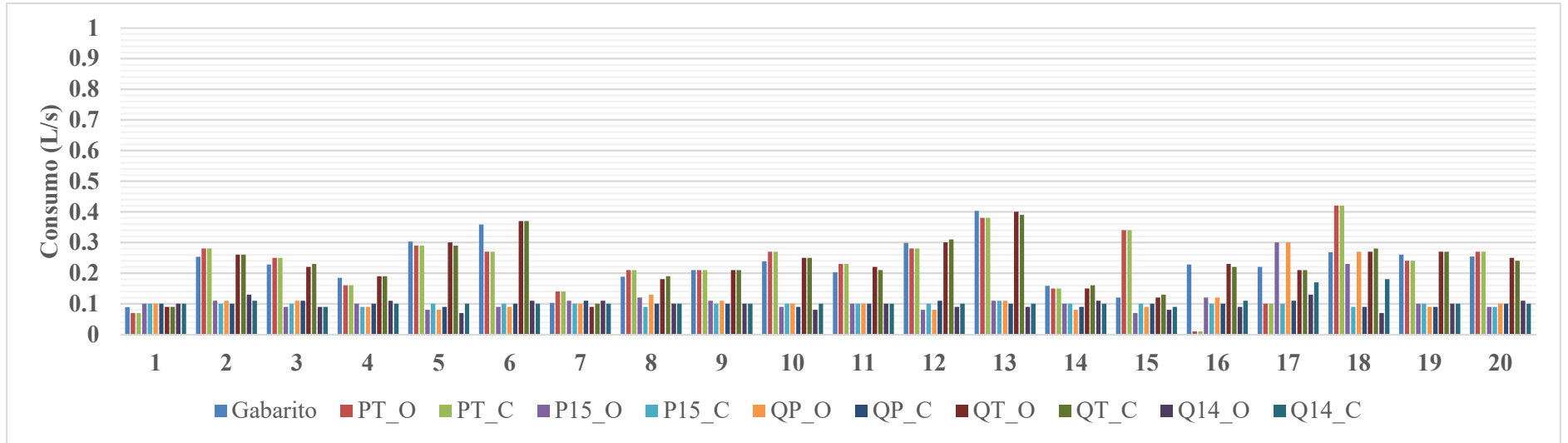


Fonte: Elaborado pelo autor

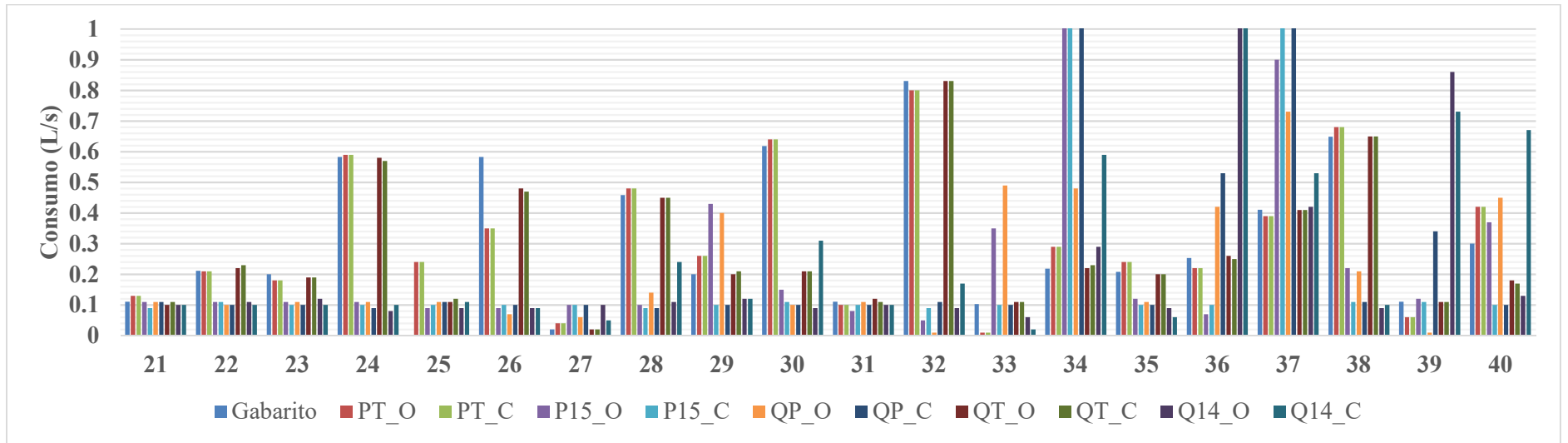


Fonte: Elaborado pelo autor

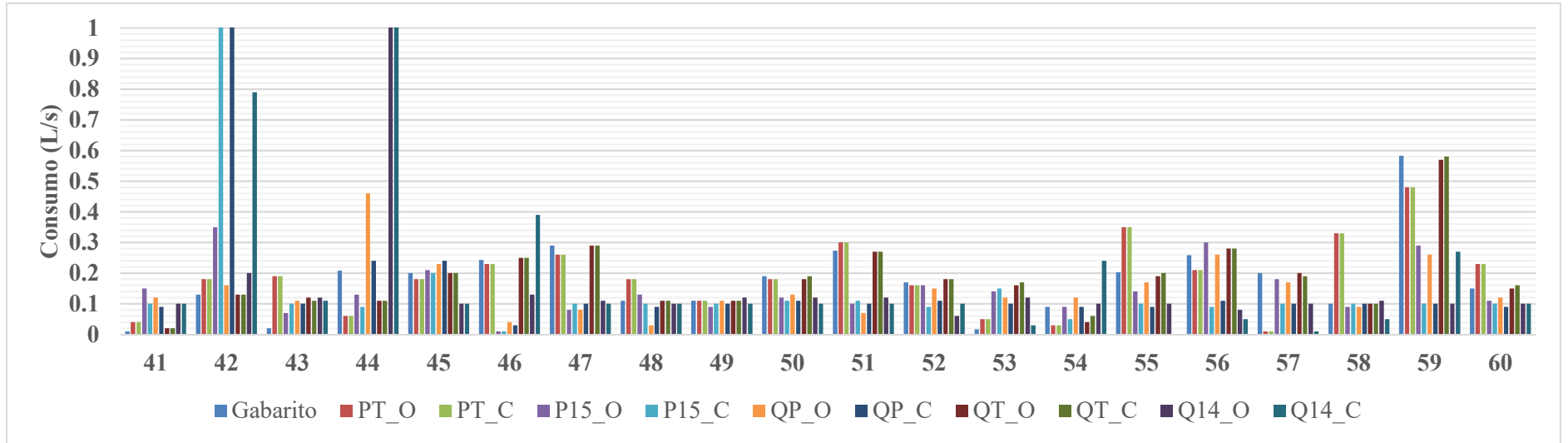
APÊNDICE EC – Consumos encontrados na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Hazen-Williams com consumos nodais iniciais de 0,1 L/s: rede MIGHA



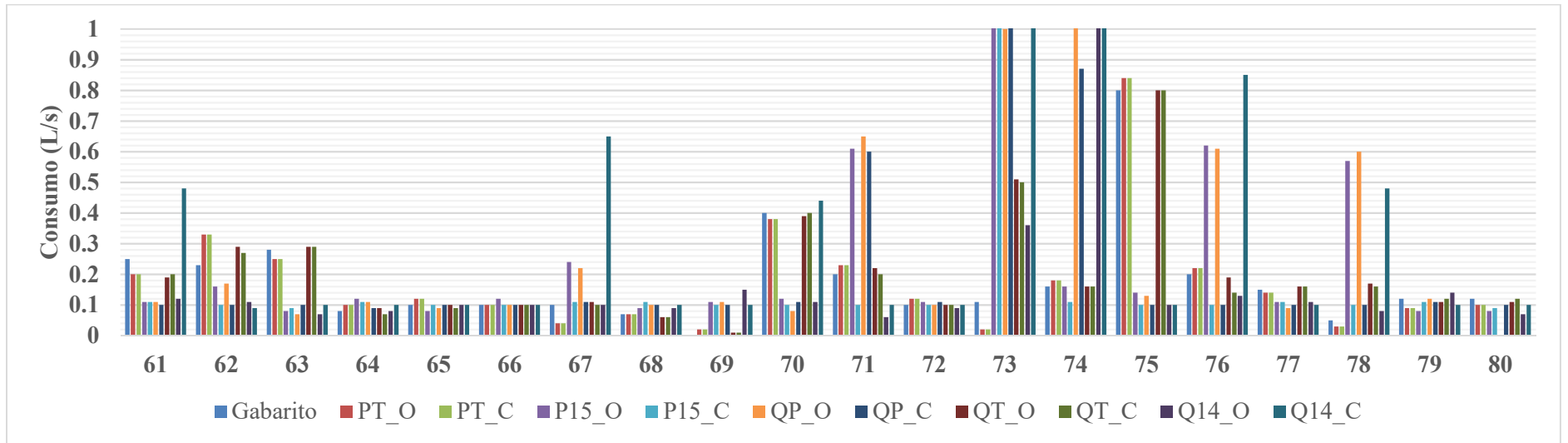
Fonte: Elaborado pelo autor



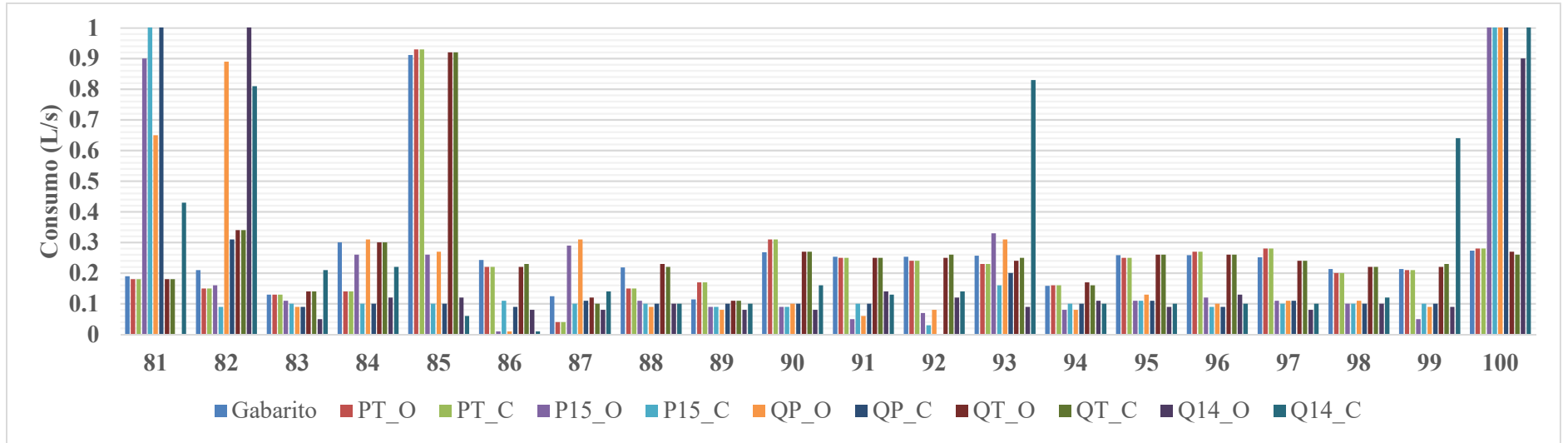
Fonte: Elaborado pelo autor



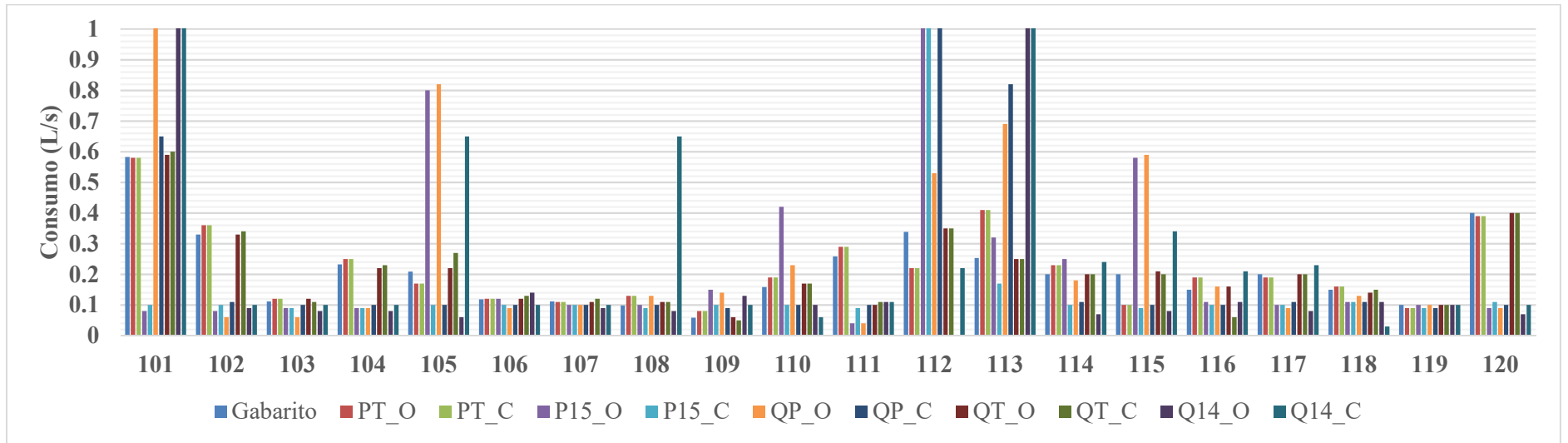
Fonte: Elaborado pelo autor



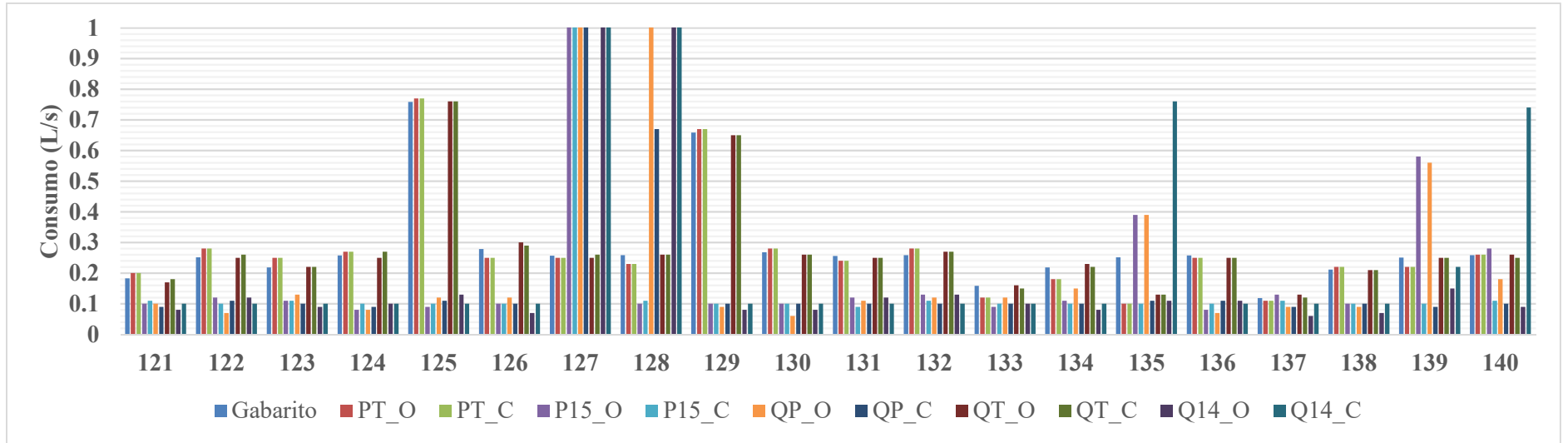
Fonte: Elaborado pelo autor



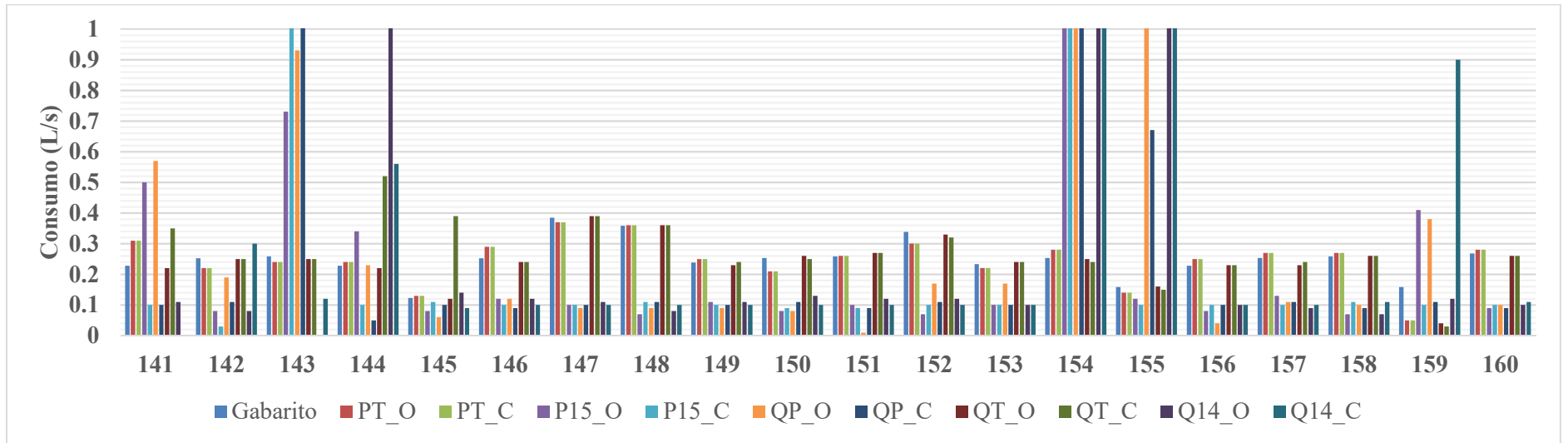
Fonte: Elaborado pelo autor



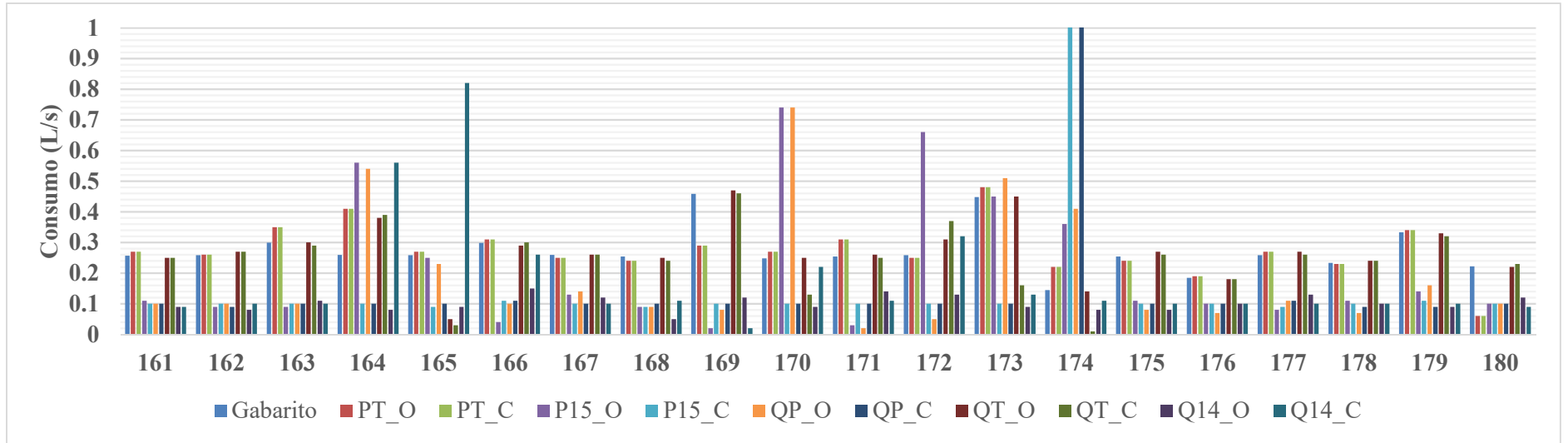
Fonte: Elaborado pelo autor



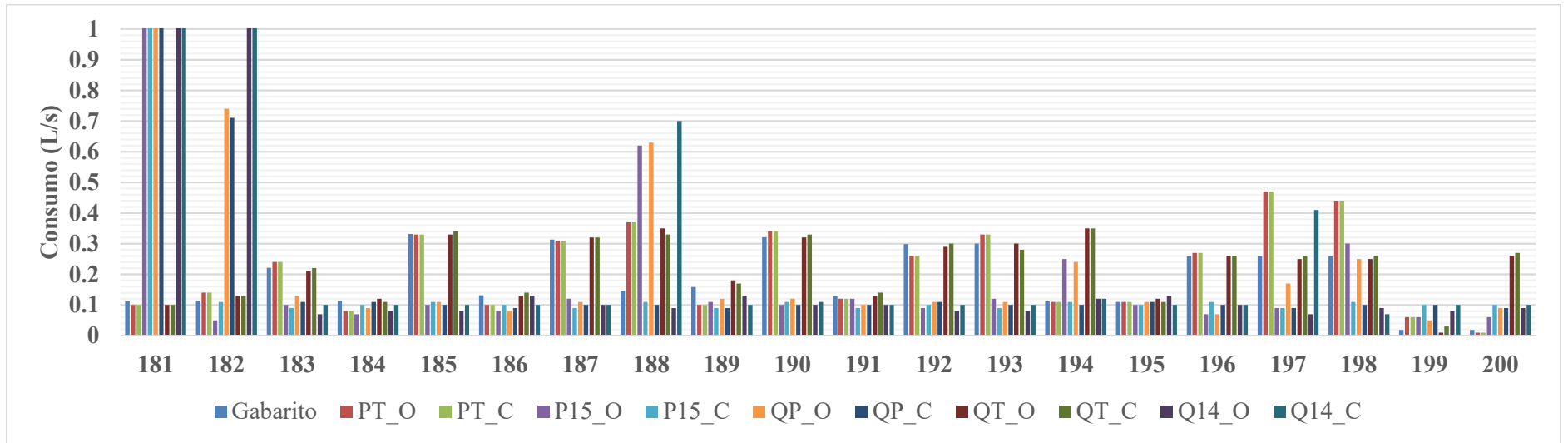
Fonte: Elaborado pelo autor



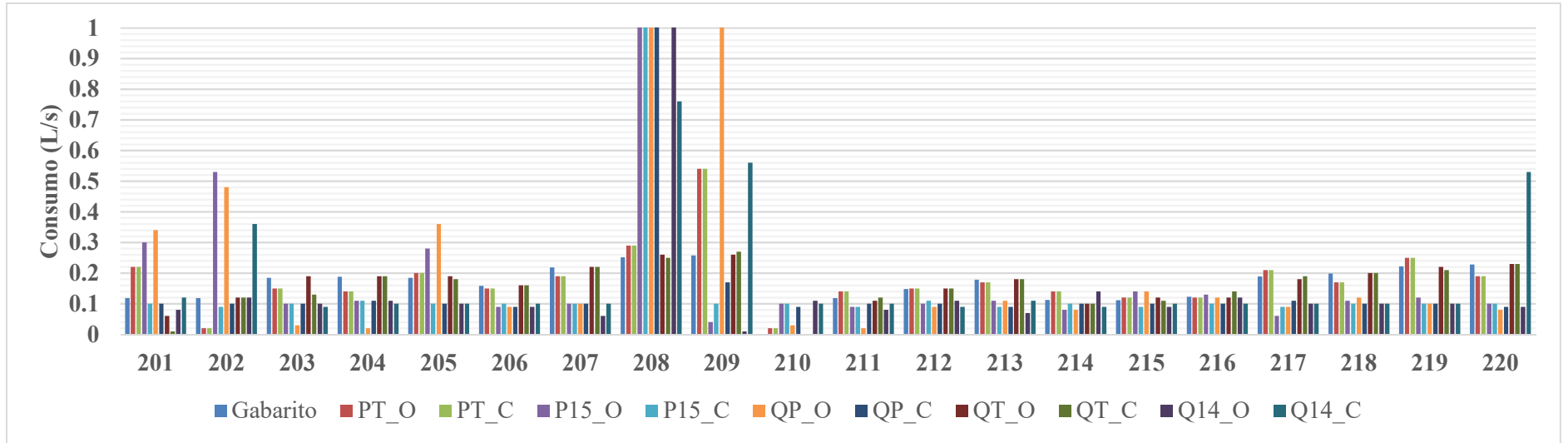
Fonte: Elaborado pelo autor



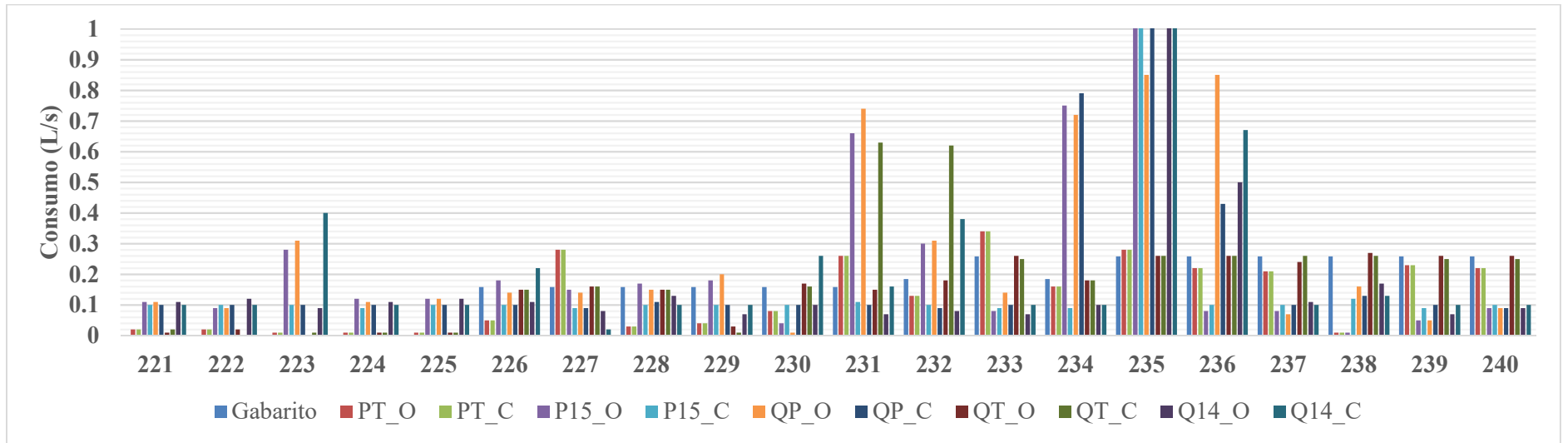
Fonte: Elaborado pelo autor



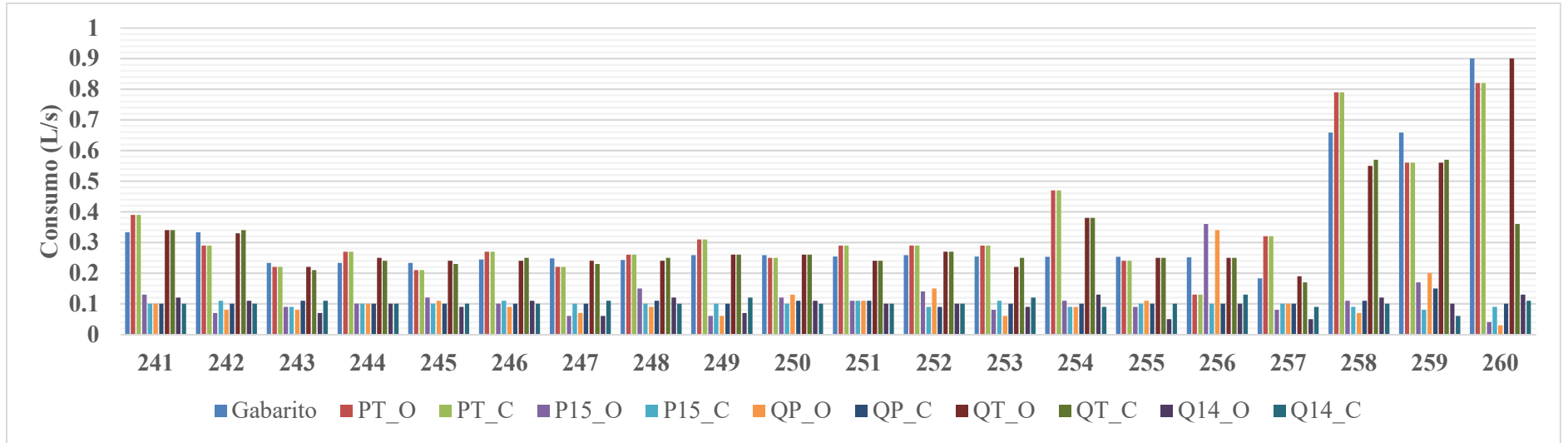
Fonte: Elaborado pelo autor



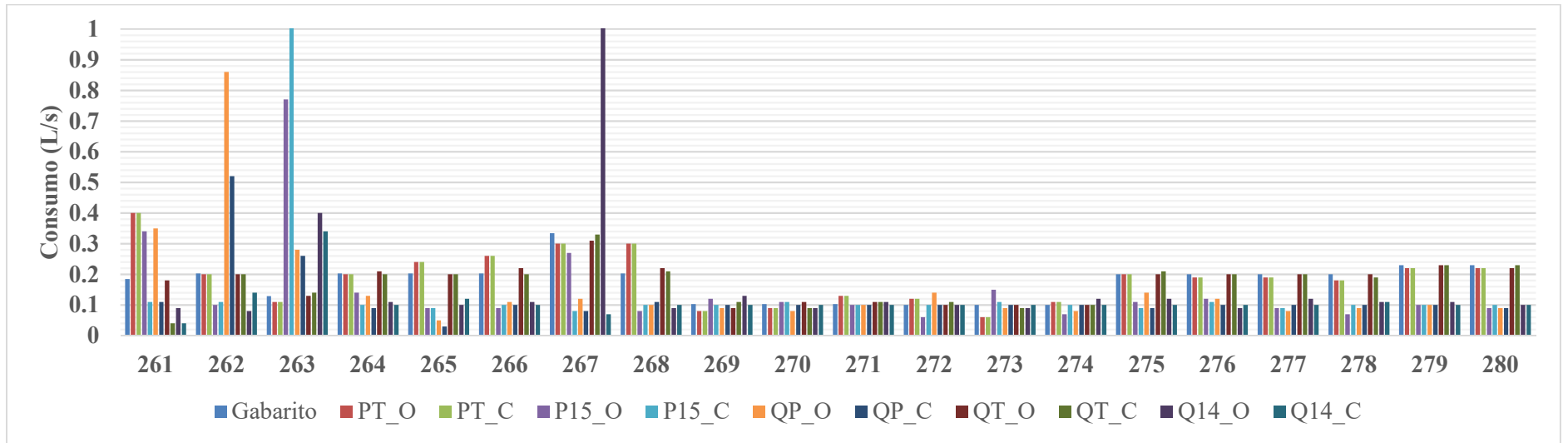
Fonte: Elaborado pelo autor



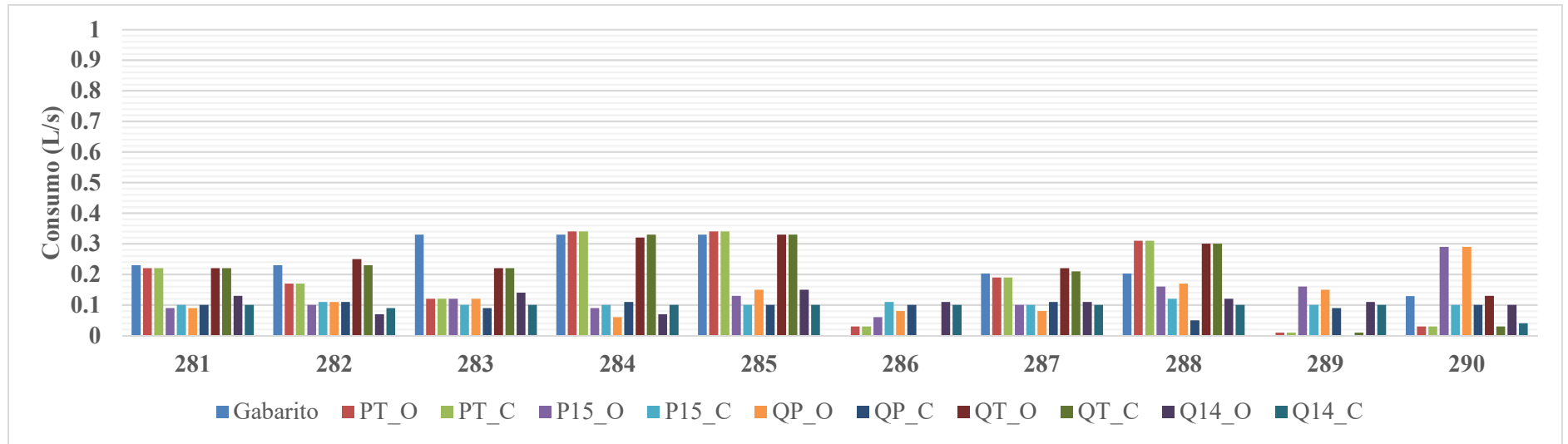
Fonte: Elaborado pelo autor



Fonte: Elaborado pelo autor

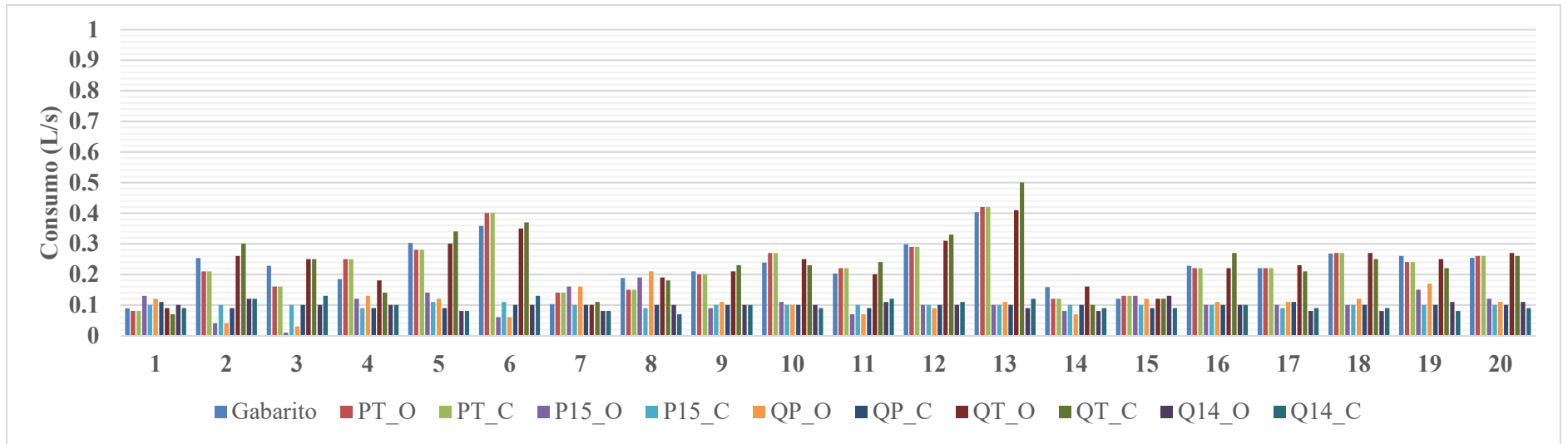


Fonte: Elaborado pelo autor

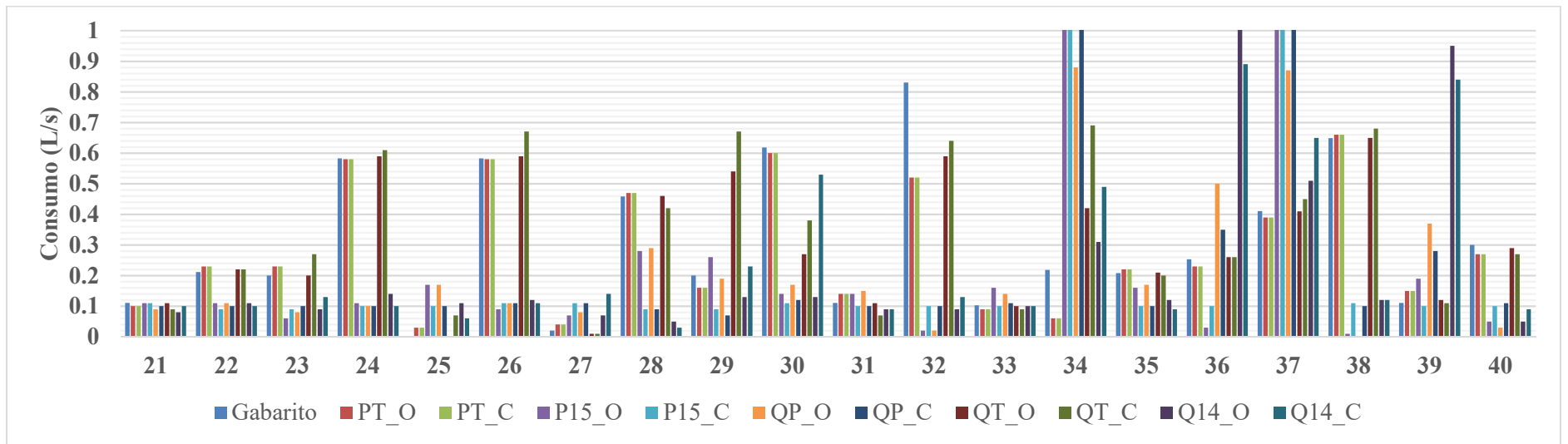


Fonte: Elaborado pelo autor

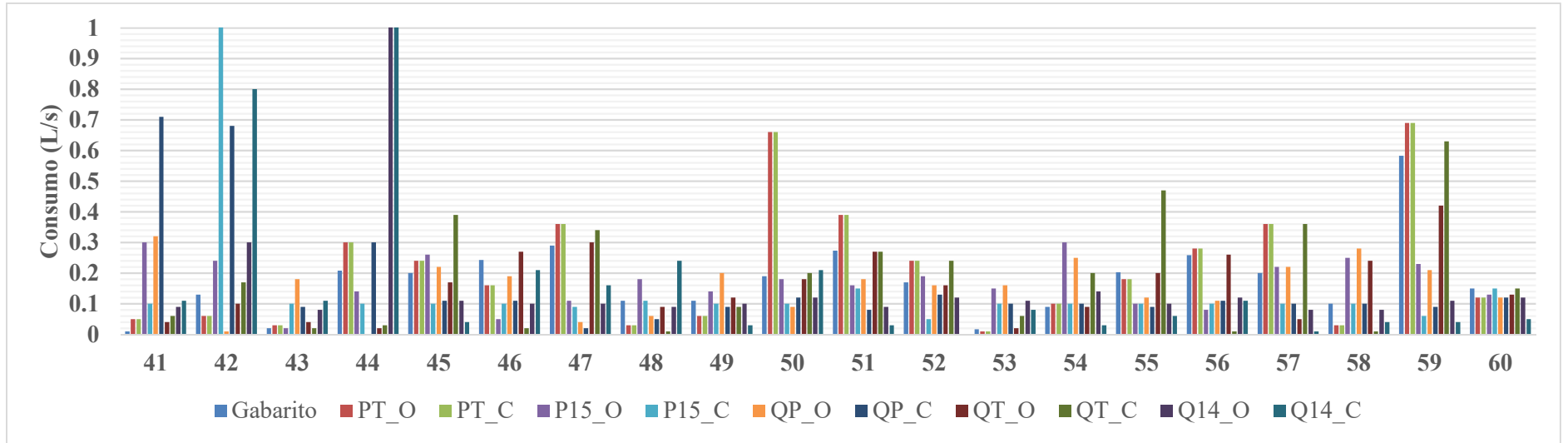
APÊNDICE ED – Consumos encontrados na Calibração da vazão com gradiente hidráulico calculado através da equação de Darcy-Weisbach com consumos nodais iniciais de 0,1 L/s: rede MIGHA



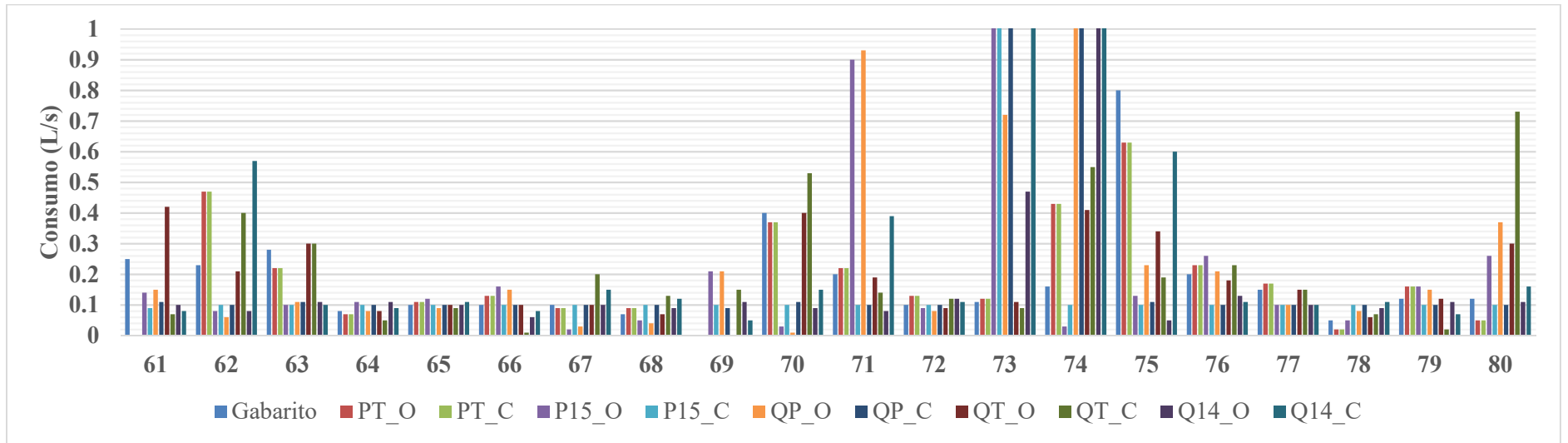
Fonte: Elaborado pelo autor



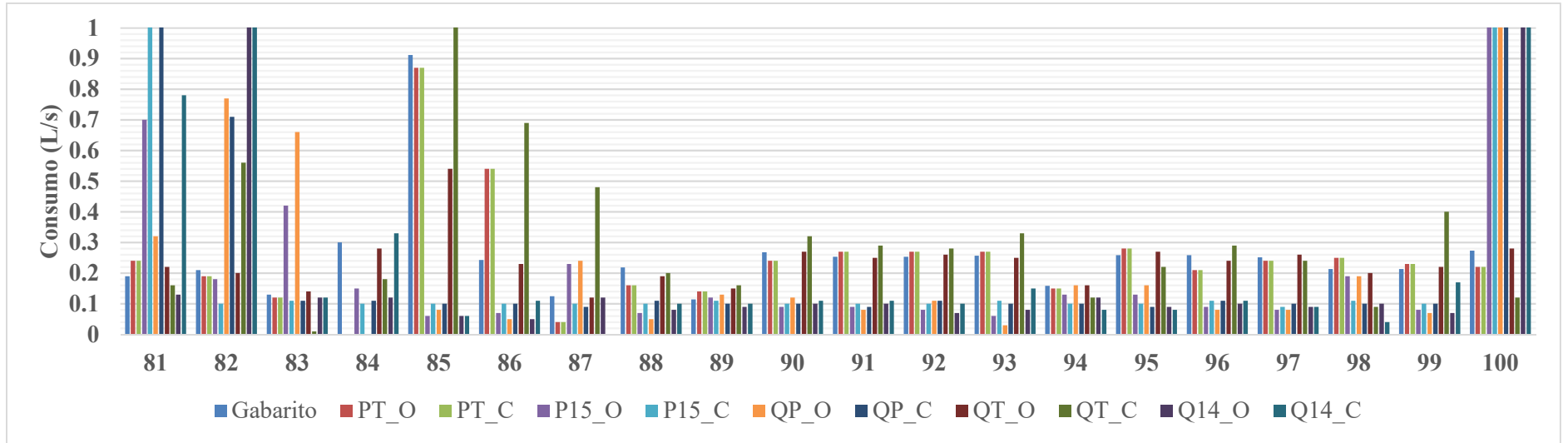
Fonte: Elaborado pelo autor



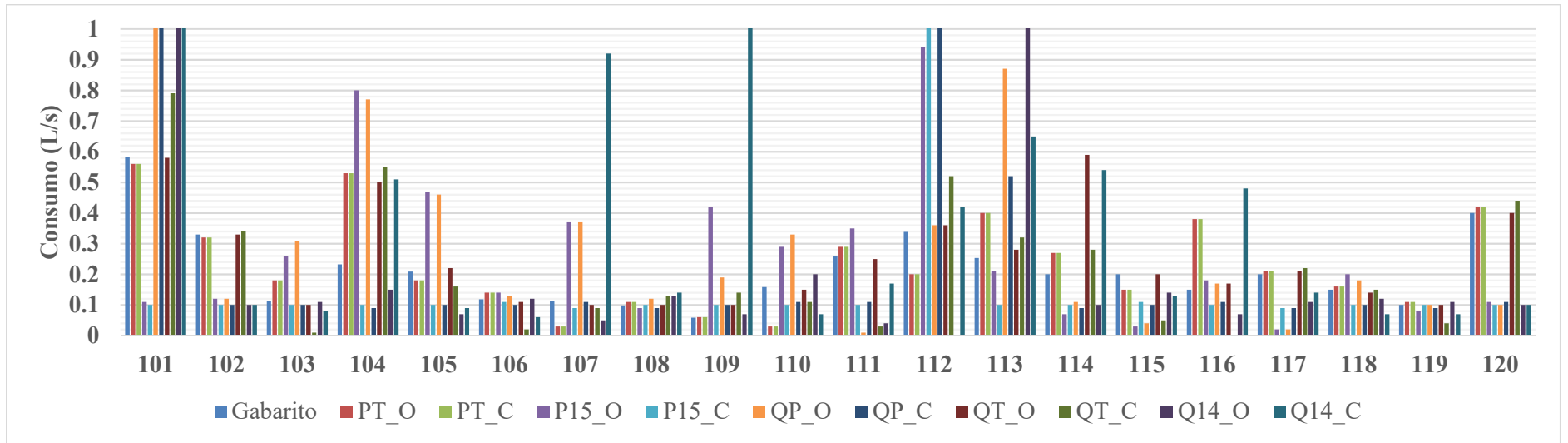
Fonte: Elaborado pelo autor



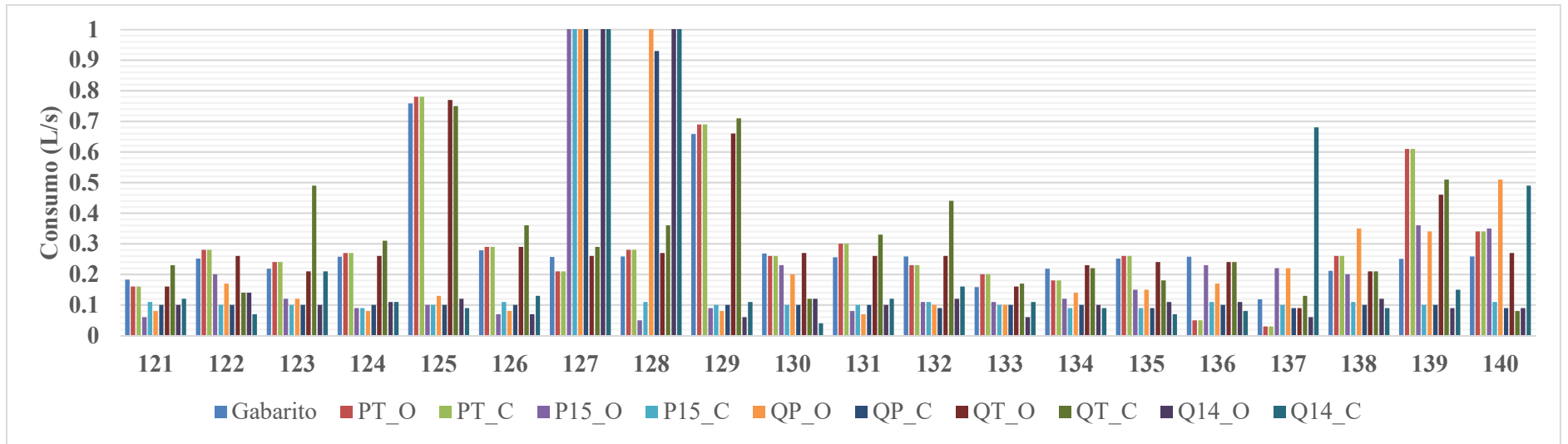
Fonte: Elaborado pelo autor



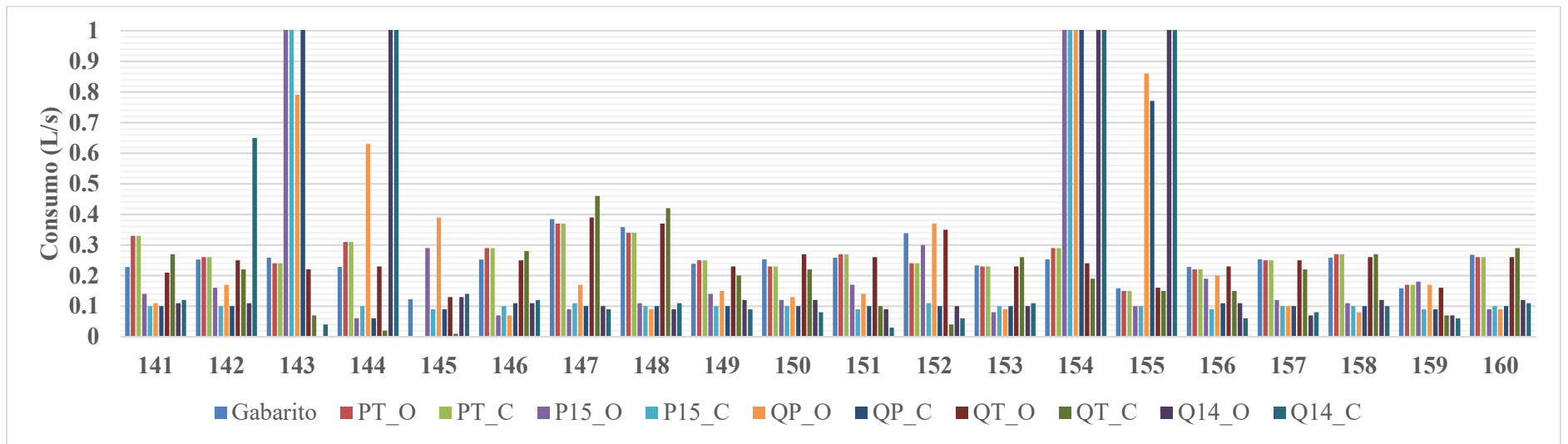
Fonte: Elaborado pelo autor



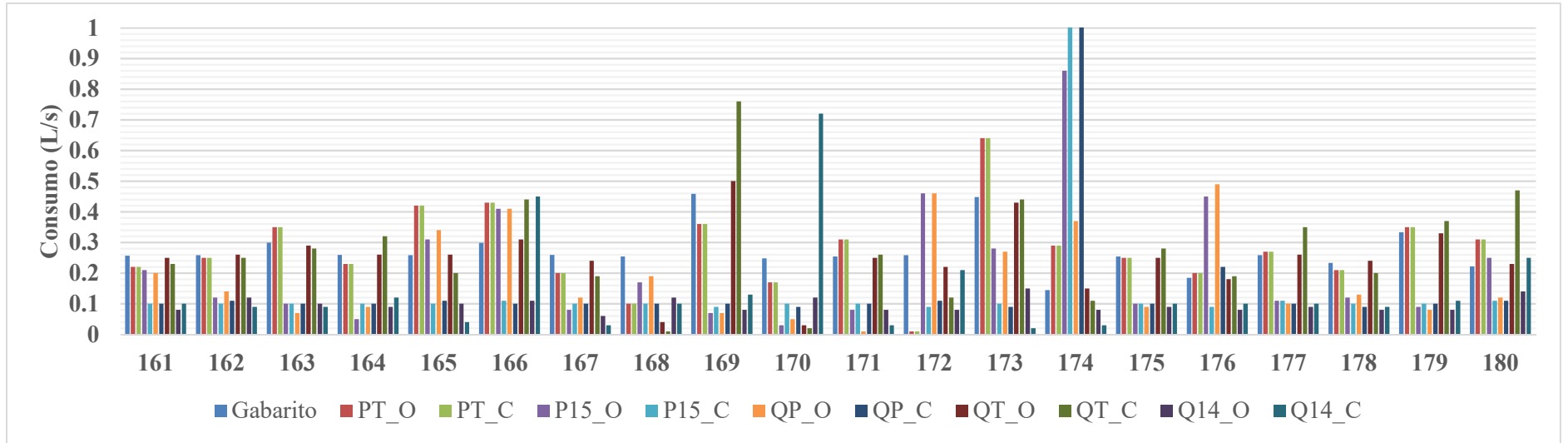
Fonte: Elaborado pelo autor



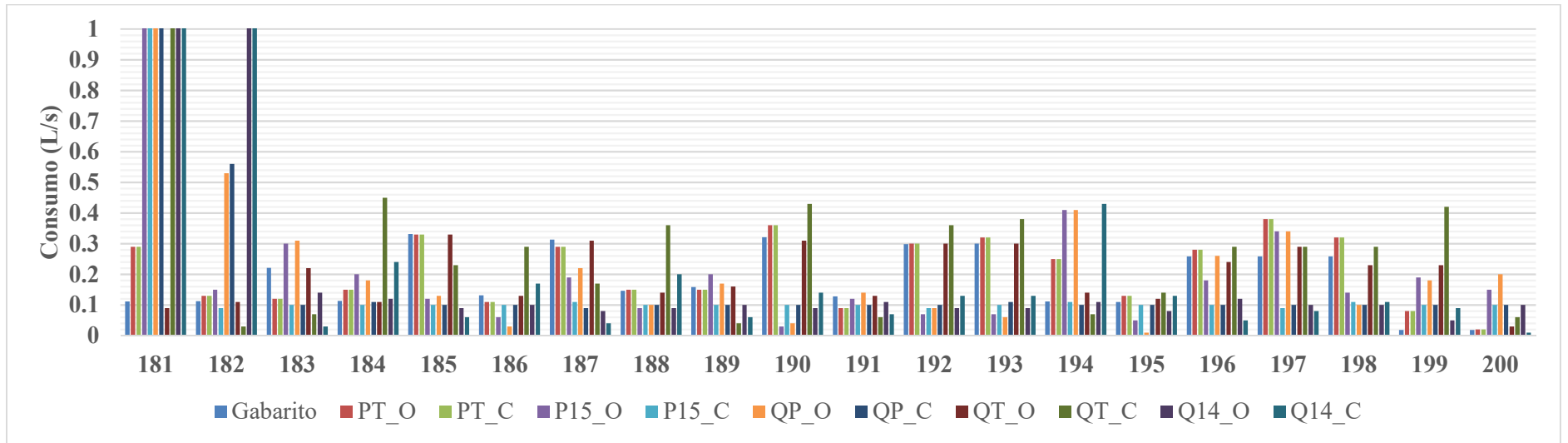
Fonte: Elaborado pelo autor



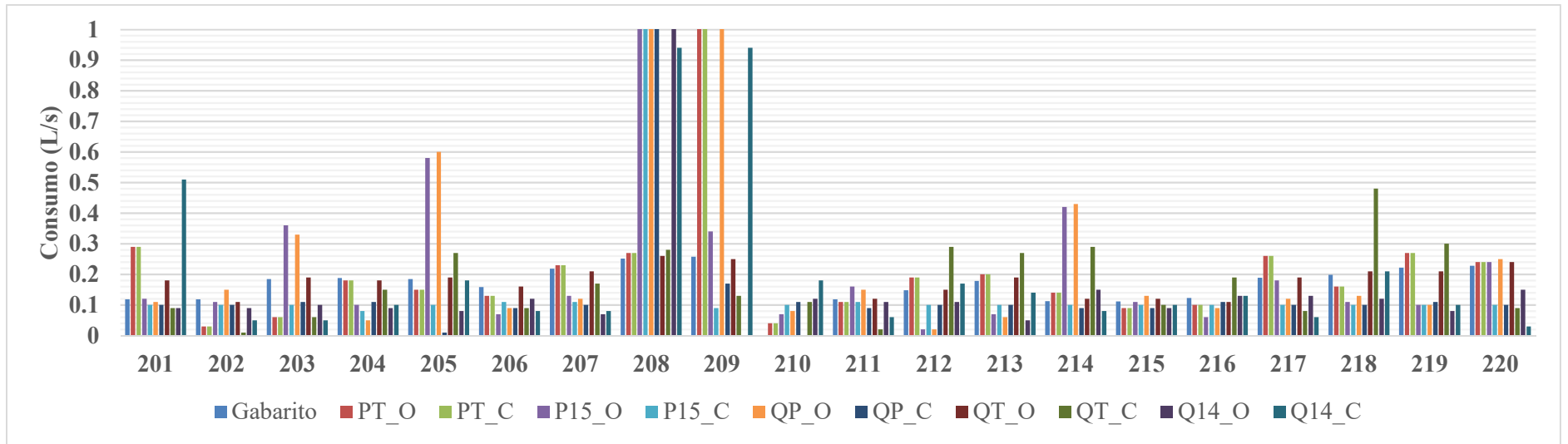
Fonte: Elaborado pelo autor



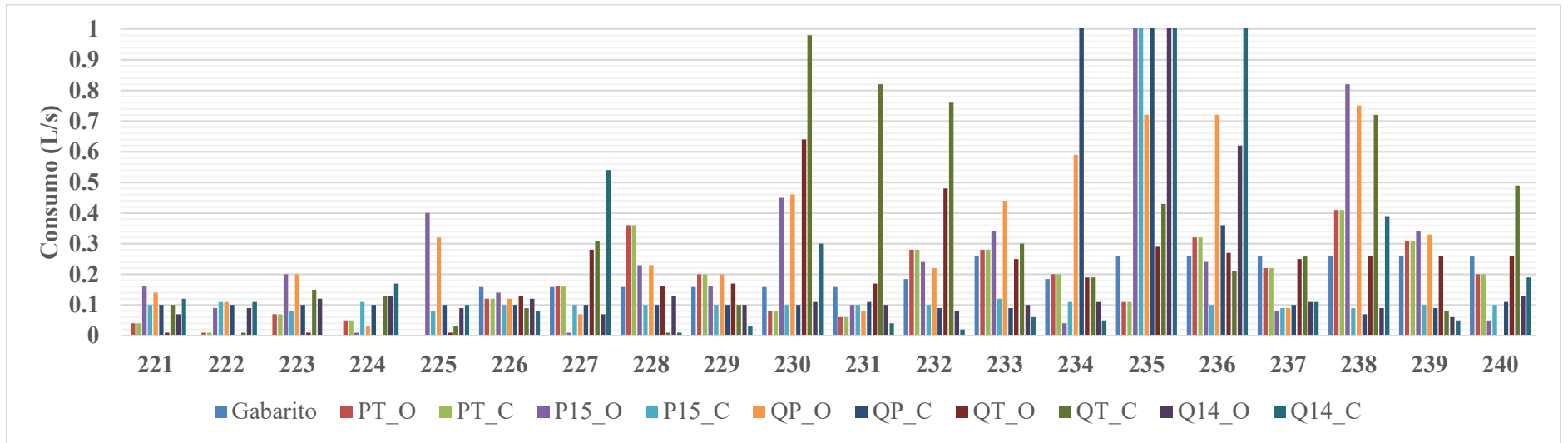
Fonte: Elaborado pelo autor



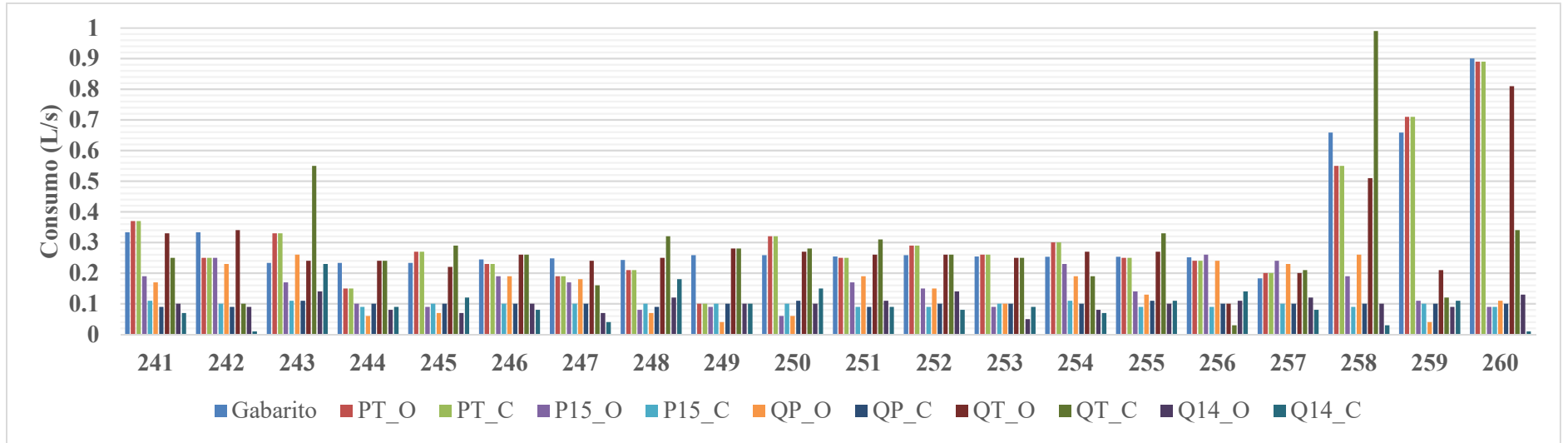
Fonte: Elaborado pelo autor



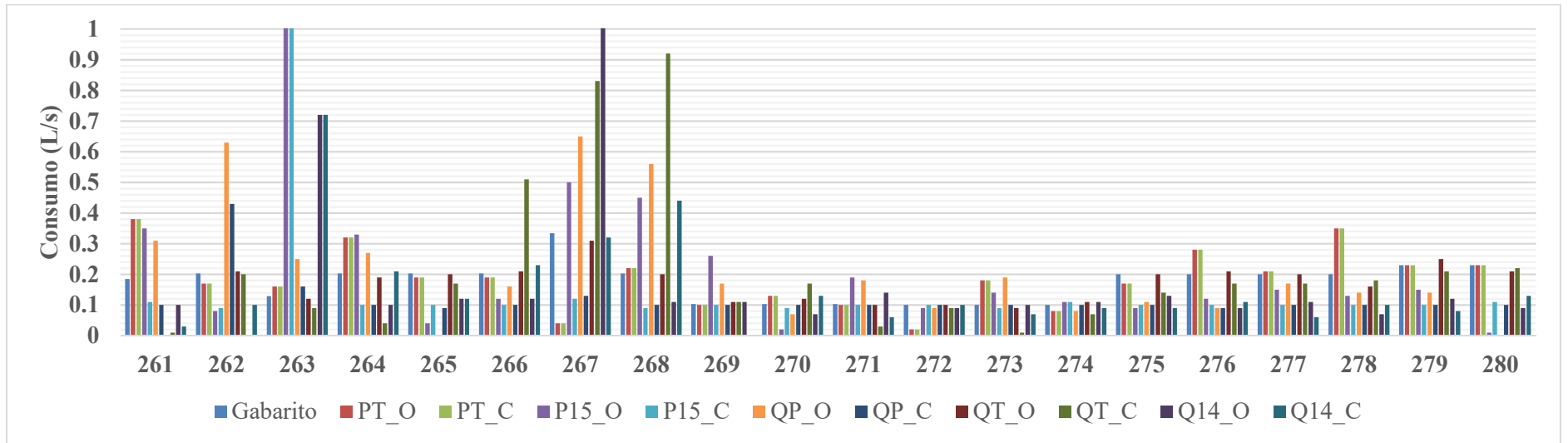
Fonte: Elaborado pelo autor



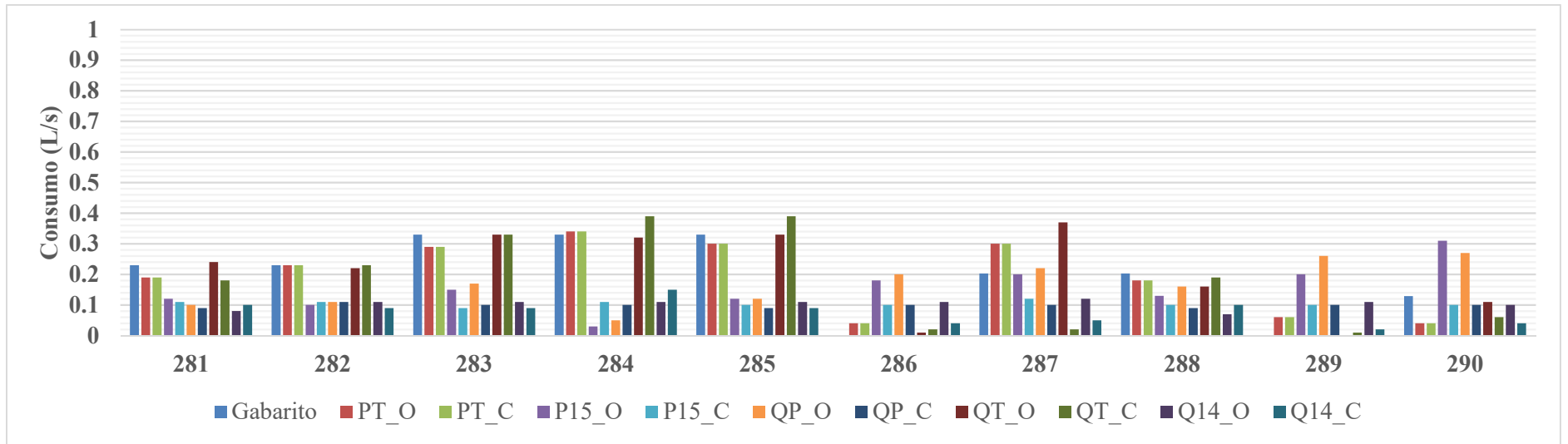
Fonte: Elaborado pelo autor



Fonte: Elaborado pelo autor

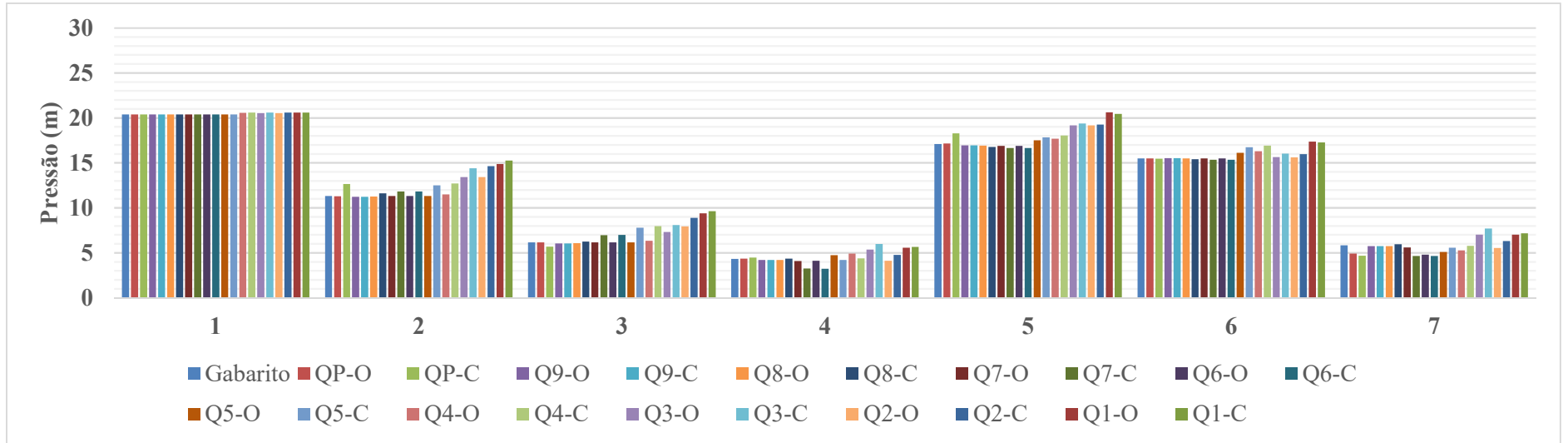


Fonte: Elaborado pelo autor

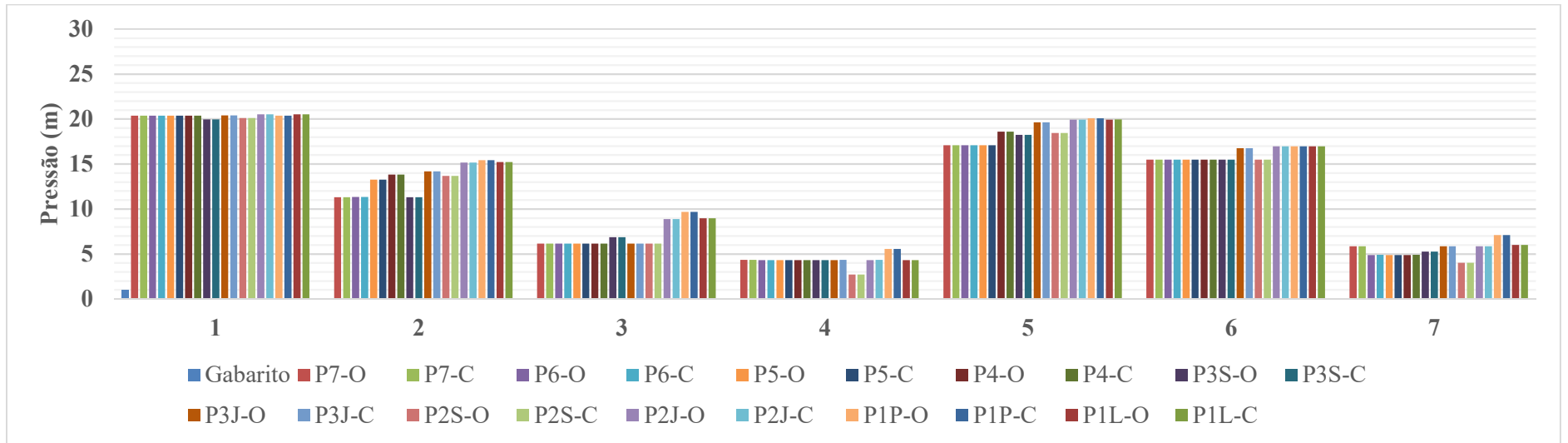


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE EE – Pressões encontradas na Calibração da vazão, considerando perdas de água ao longo do escoamento, com gradiente hidráulico calculado através da equação de Hazen-Williams com consumos nodais iniciais de 5,7 L/s: rede Porto (2006)

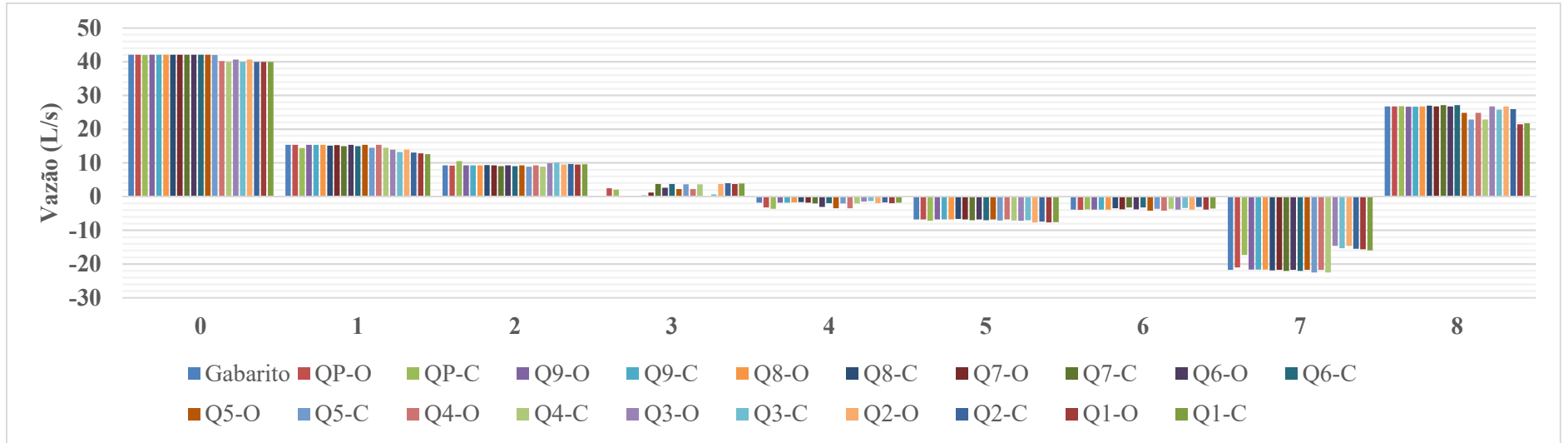


Fonte: Elaborado pelo autor

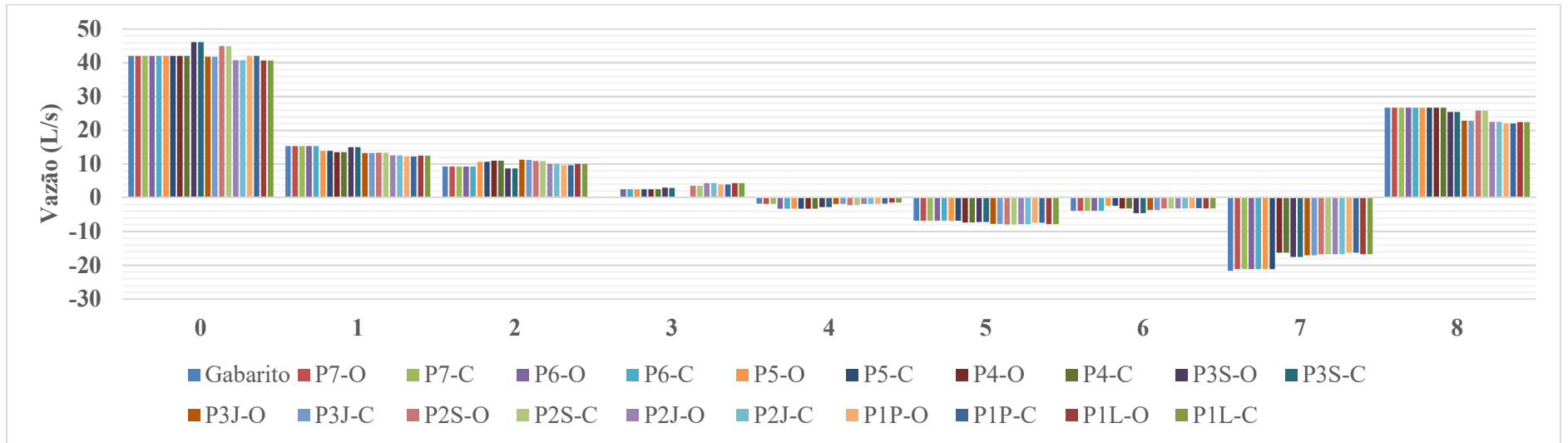


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE EF – Vazões encontradas na Calibração da vazão, considerando perdas de água ao longo do escoamento, com gradiente hidráulico calculado através da equação de Hazen-Williams com consumos nodais iniciais de 5,7 L/s: rede Porto (2006)

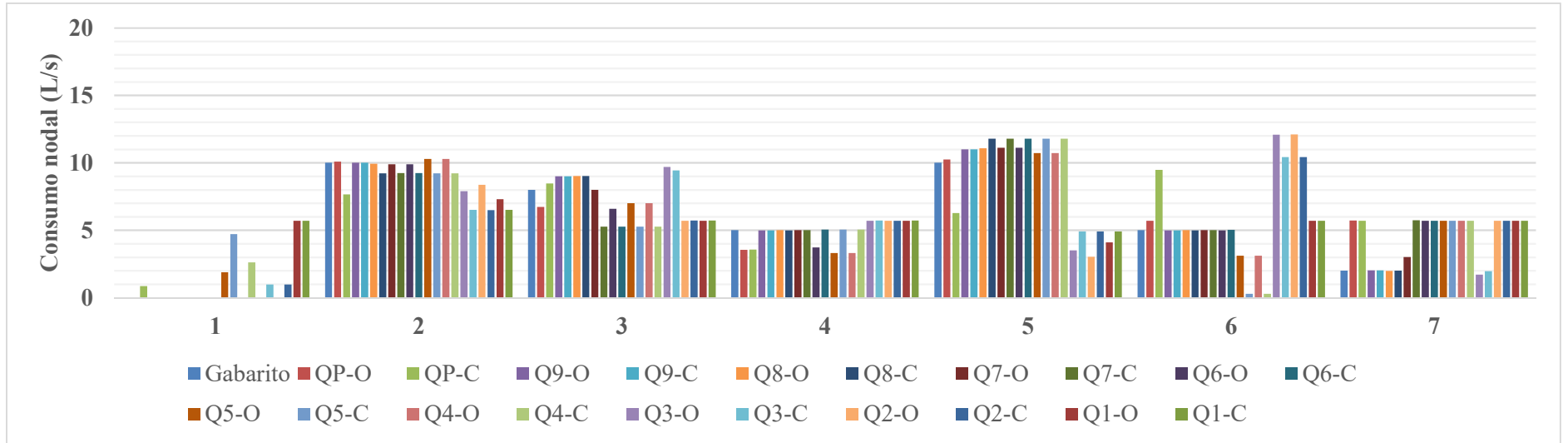


Fonte: Elaborado pelo autor

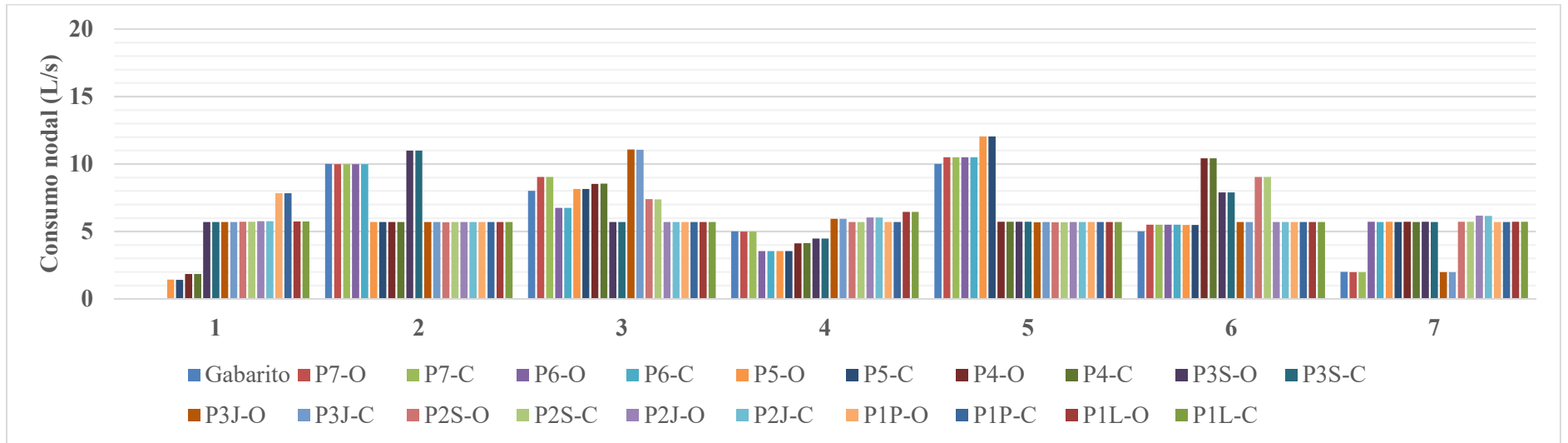


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE EG – Consumos nodais encontrados na Calibração da vazão, considerando perdas de água ao longo do escoamento, com gradiente hidráulico calculado através da equação de Hazen-Williams com consumos nodais iniciais de 5,7 L/s: rede Porto (2006)

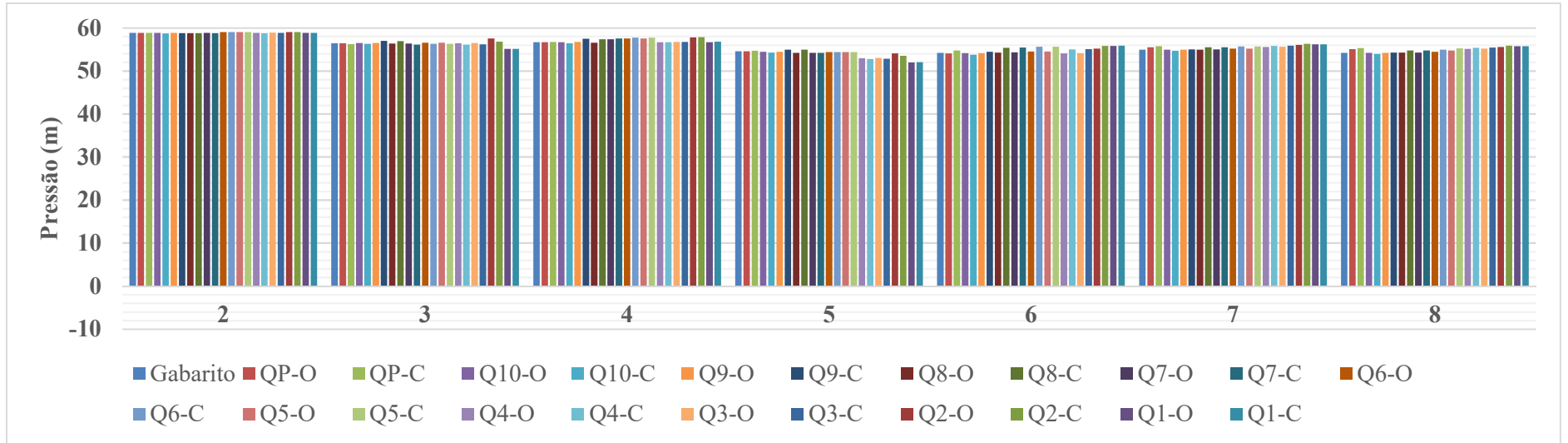


Fonte: Elaborado pelo autor

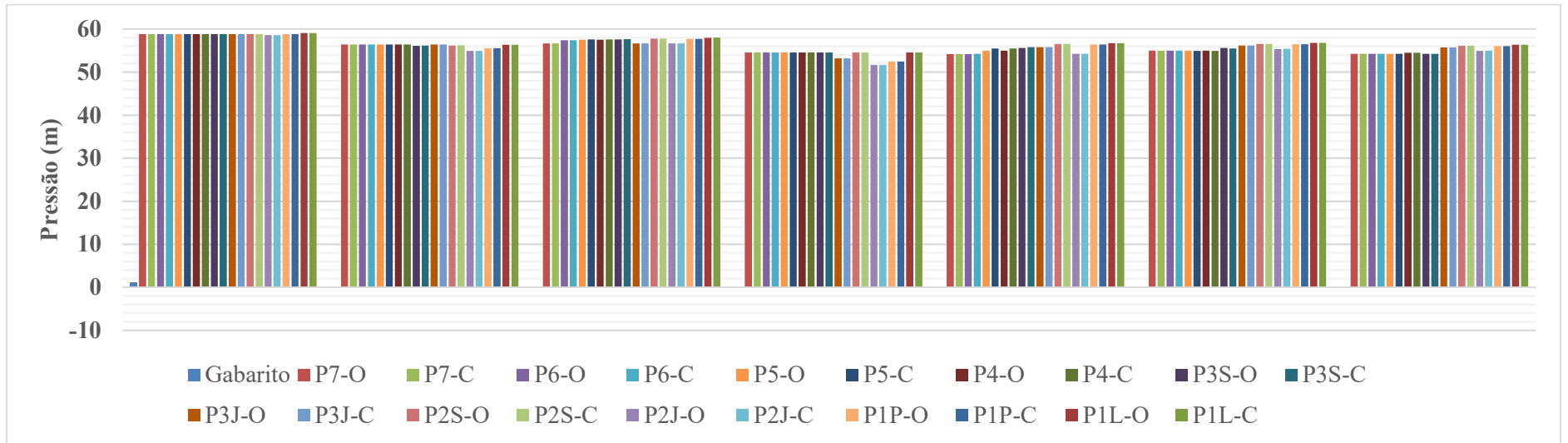


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE EH – Pressões encontradas na Calibração da vazão, considerando perdas de água ao longo do escoamento, com gradiente hidráulico calculado através da equação de Darcy-Weisbach com consumos nodais iniciais de 29 L/s: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

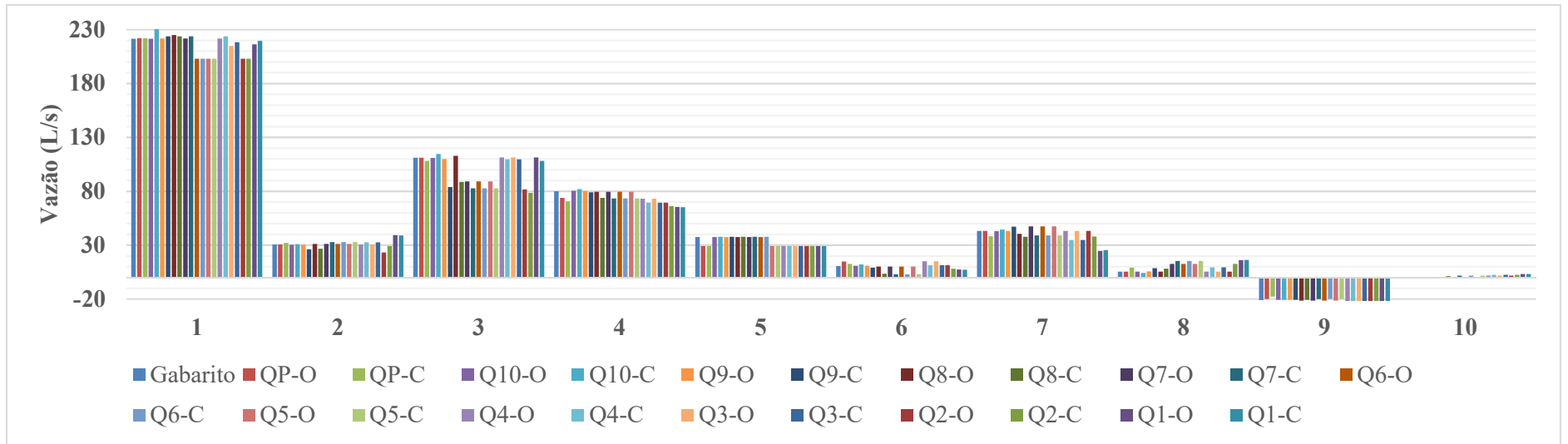


Fonte: Elaborado pelo autor

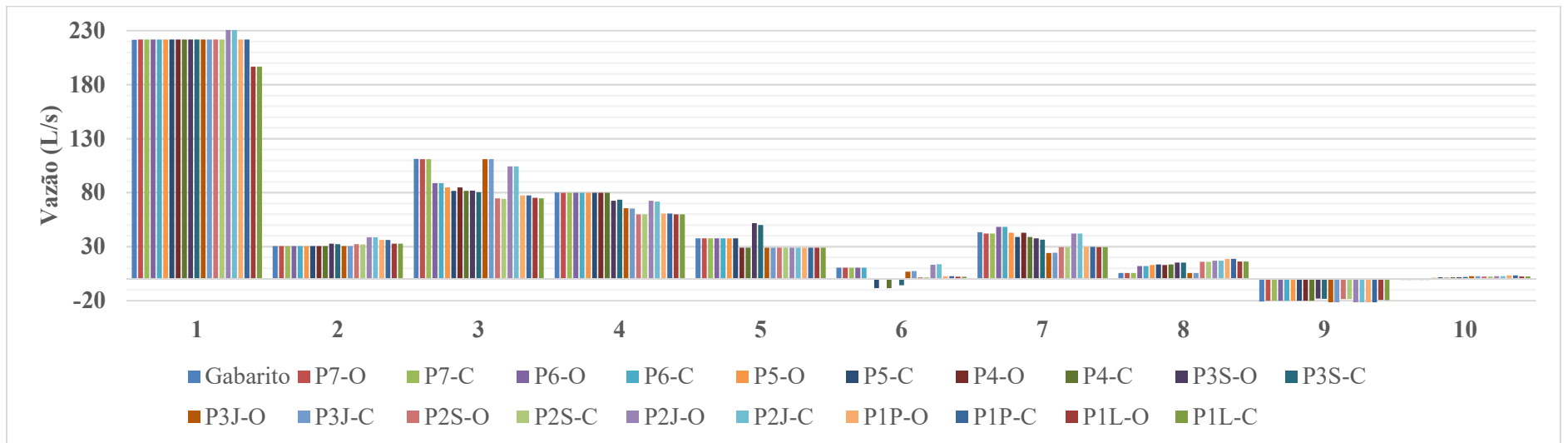


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE EI – Vazões encontradas na Calibração da vazão, considerando perdas de água ao longo do escoamento, com gradiente hidráulico calculado através da equação de Darcy-Weisbach com consumos nodais iniciais de 29 L/s: rede Walski (1983) – Gambale (2000)

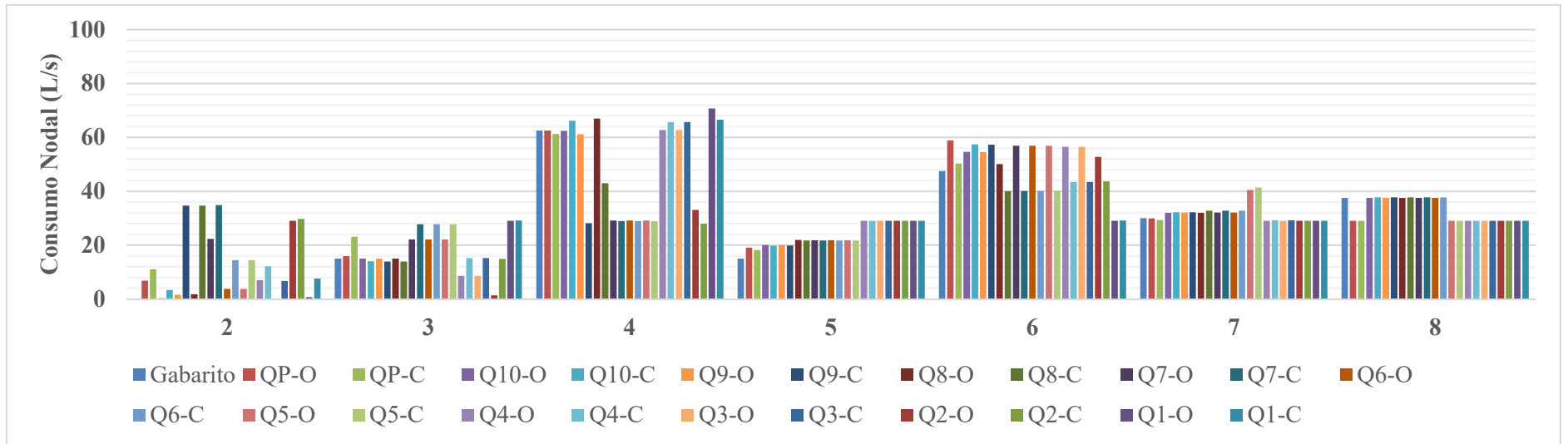


Fonte: Elaborado pelo autor

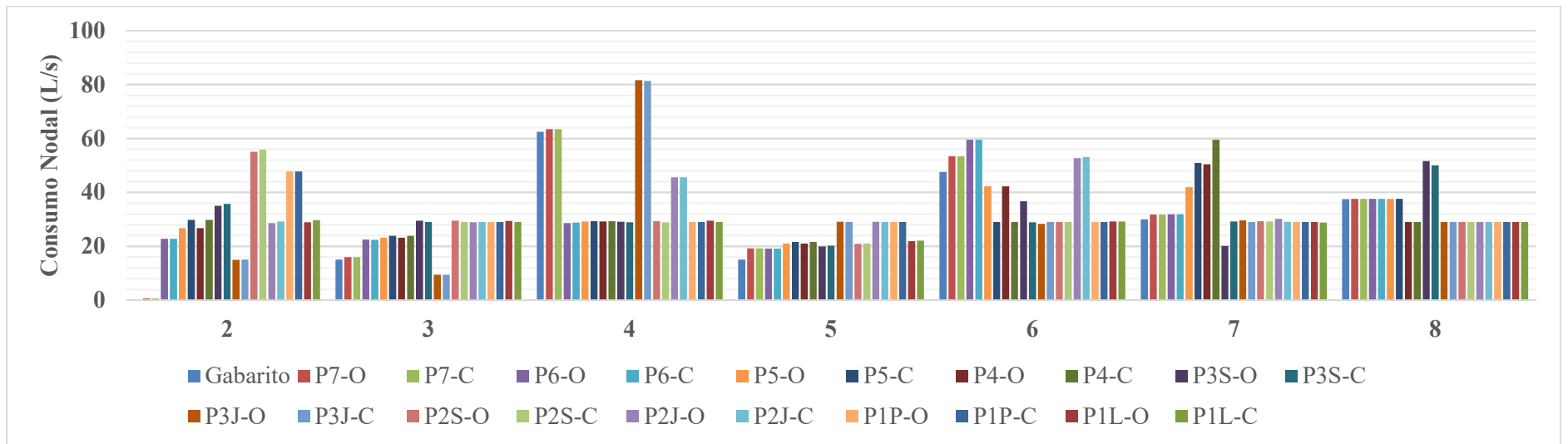


Fonte: Elaborado pelo autor

**APÊNDICE EJ – Consumos nodais encontrados na Calibração da vazão, considerando perdas de água ao longo do escoamento, com gradiente hidráulico calculado através da equação de Darcy-Weisbach com consumos nodais iniciais de 29 L/s: rede Walski (1983)
– Gambale (2000)**

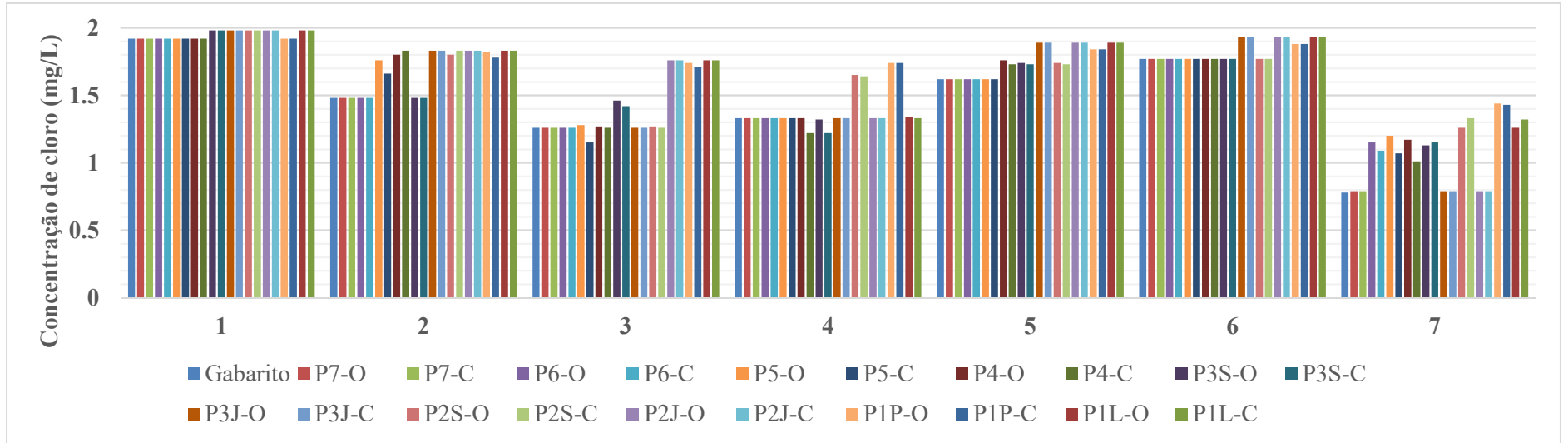


Fonte: Elaborado pelo autor

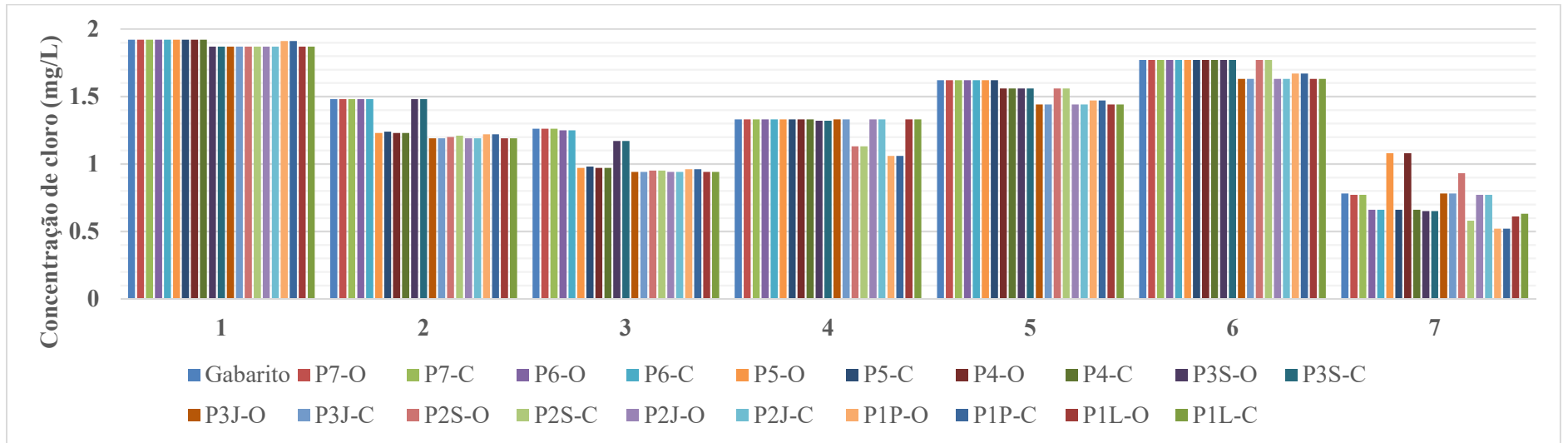


Fonte: Elaborado pelo autor

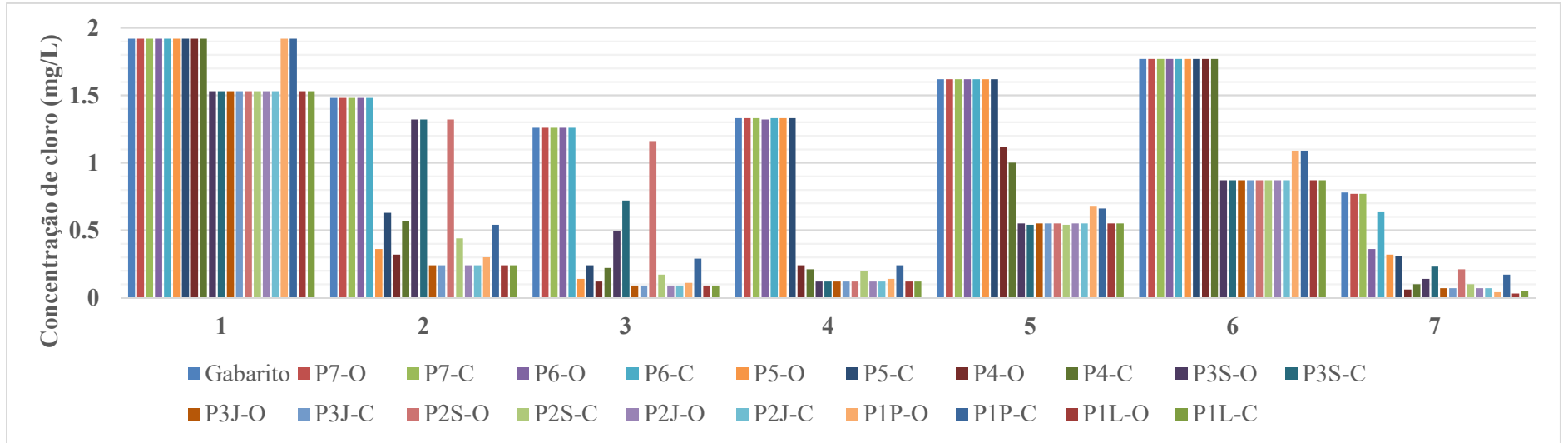
APÊNDICE EK – Concentrações de cloro encontradas na Calibração da constante K de decaimento total do cloro com coeficientes K_w iniciais iguais a, respectivamente, -0,1 m/s, -0,7 m/s, -10 m/s e calculado com uso da sub-rotina computacional: rede Porto (2006)



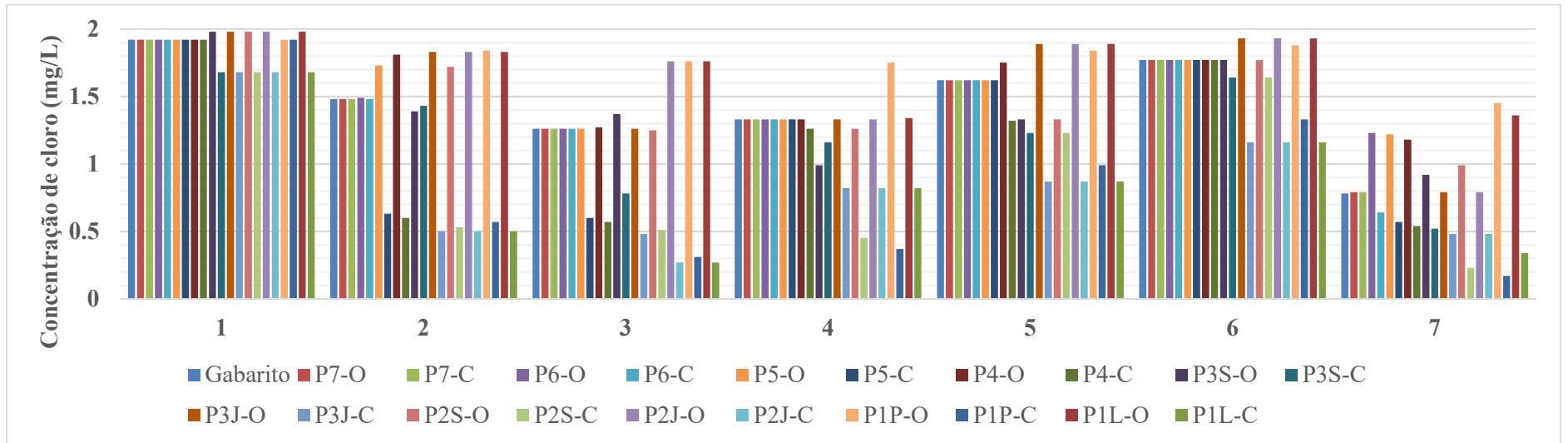
Fonte: Elaborado pelo autor



Fonte: Elaborado pelo autor

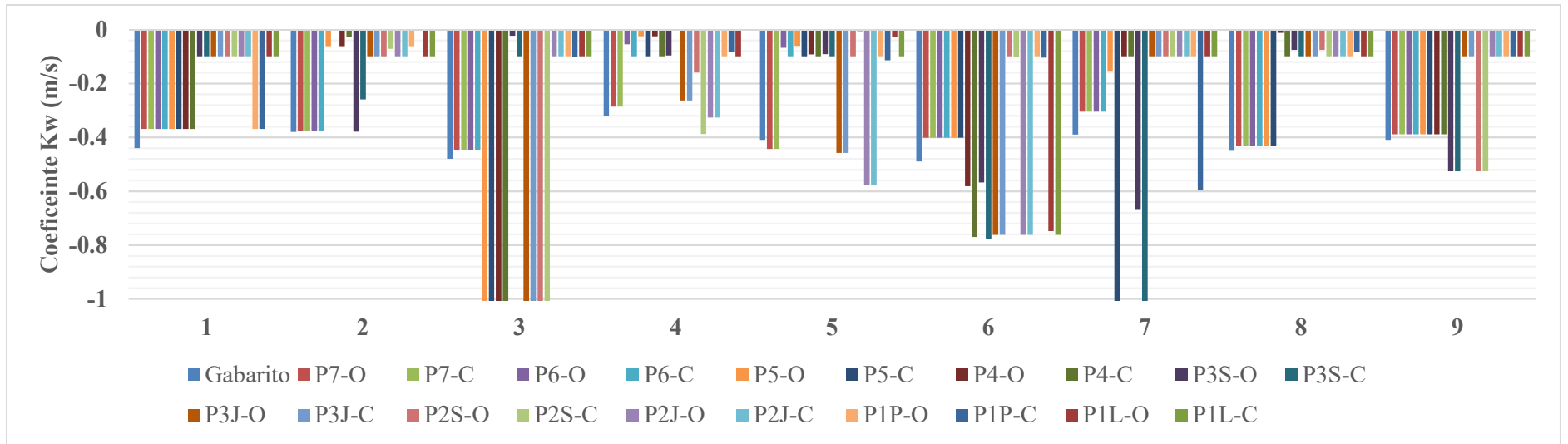


Fonte: Elaborado pelo autor

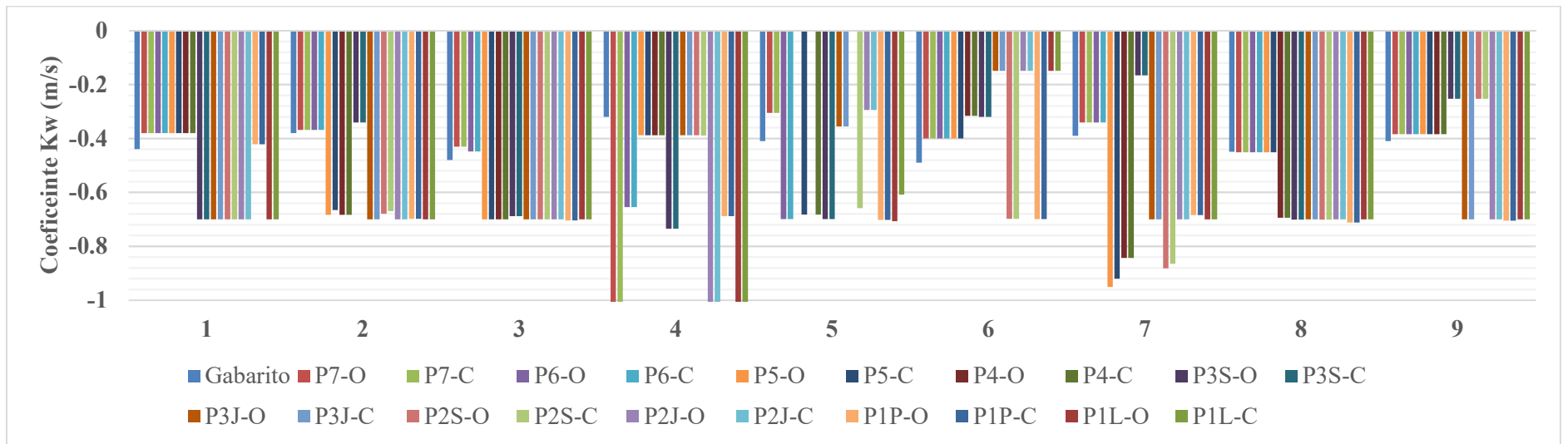


Fonte: Elaborado pelo autor

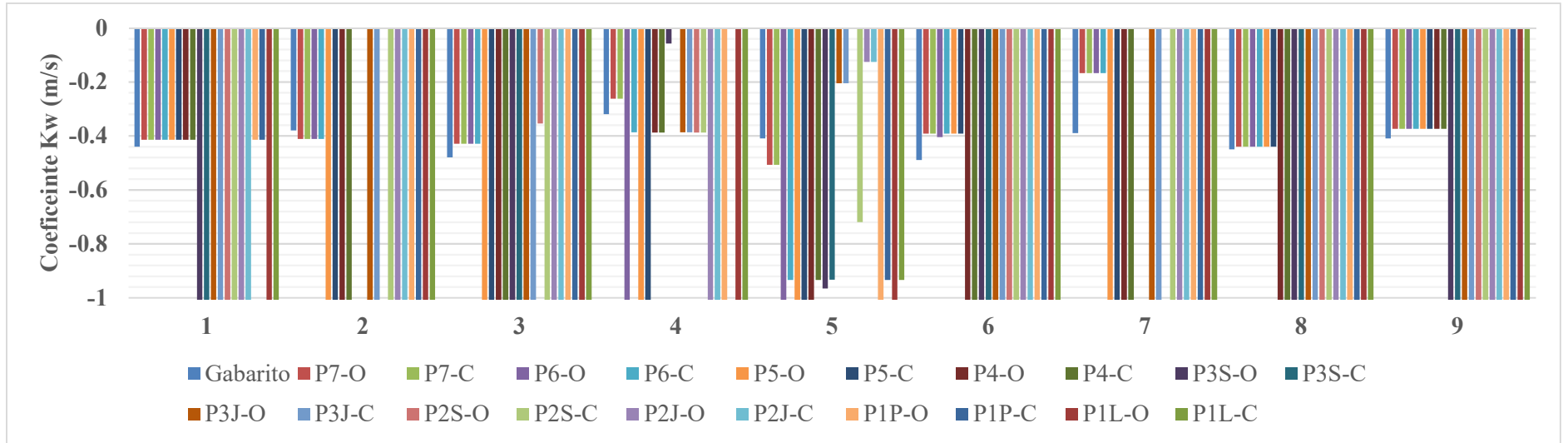
APÊNDICE EL – Coeficientes K_w encontrados na Calibração da constante K de decaimento total do cloro com coeficientes K_w iniciais iguais a, respectivamente, -0,1 m/s, -0,7 m/s, -10 m/s e calculado com uso da sub-rotina computacional: rede Porto (2006)



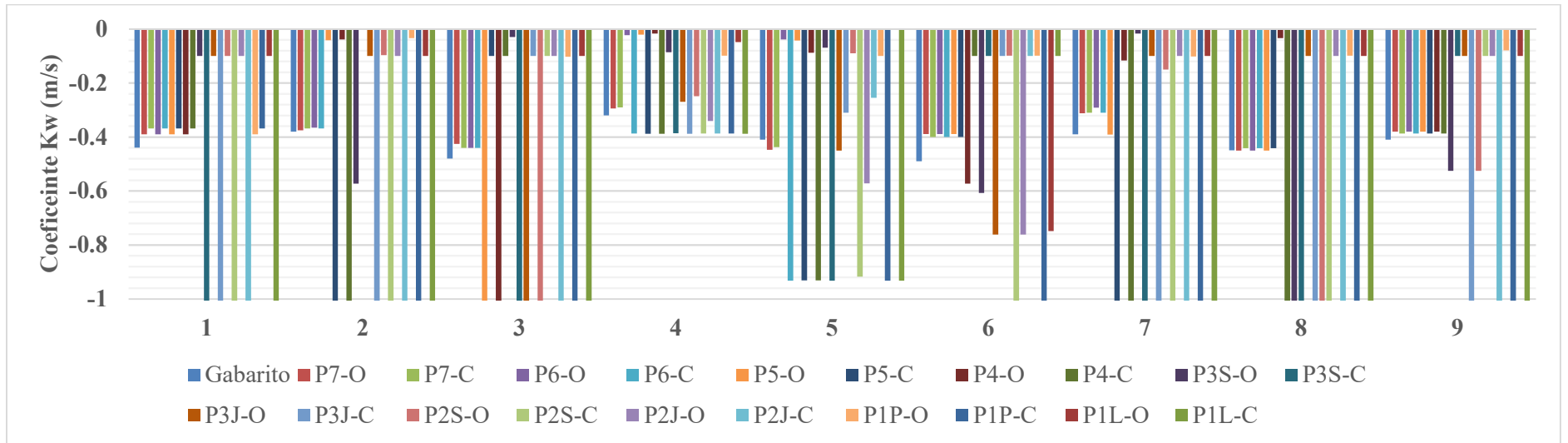
Fonte: Elaborado pelo autor



Fonte: Elaborado pelo autor

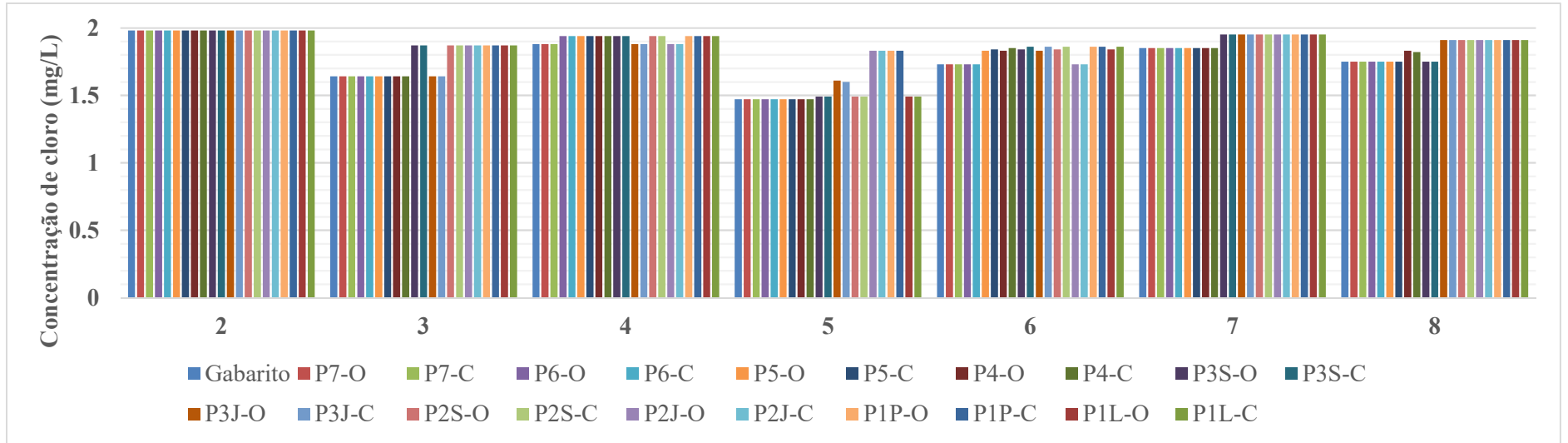


Fonte: Elaborado pelo autor

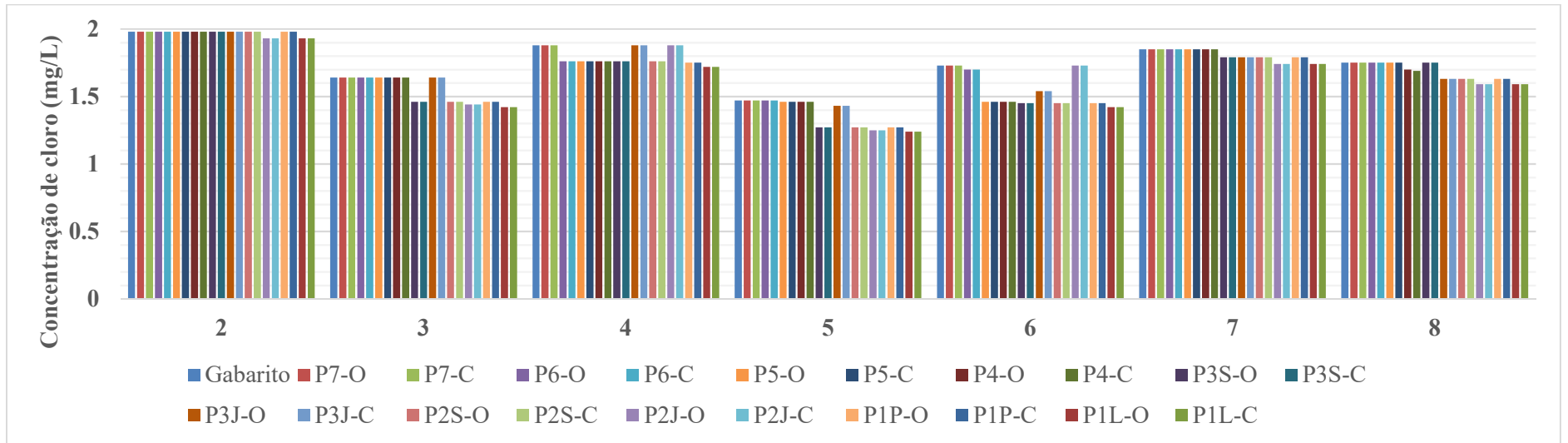


Fonte: Elaborado pelo autor

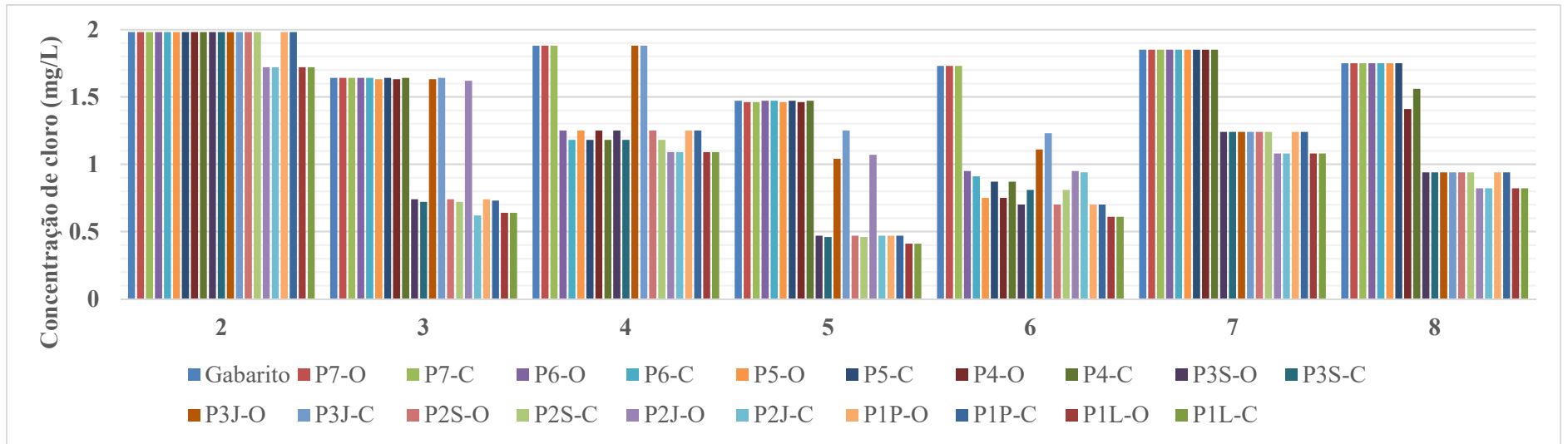
APÊNDICE EM – Concentrações de cloro encontradas na Calibração da constante K de decaimento total do cloro com coeficientes K_w iniciais iguais a, respectivamente, -0,1 m/s, -0,7 m/s, -10 m/s e calculado com uso da sub-rotina computacional: rede Walski (1983) – Gambale (2000)



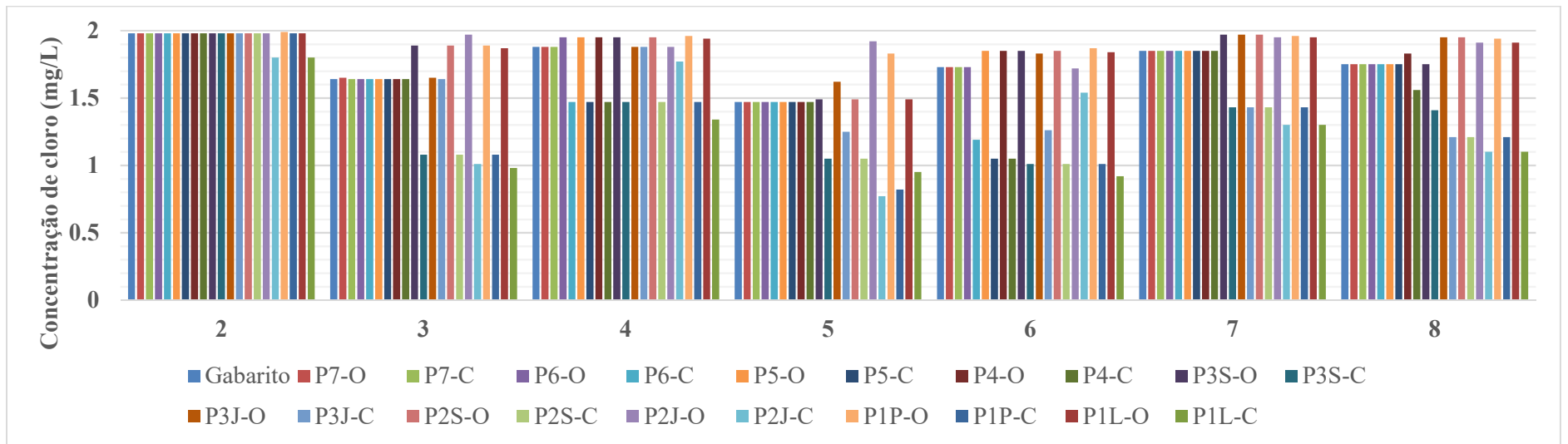
Fonte: Elaborado pelo autor



Fonte: Elaborado pelo autor

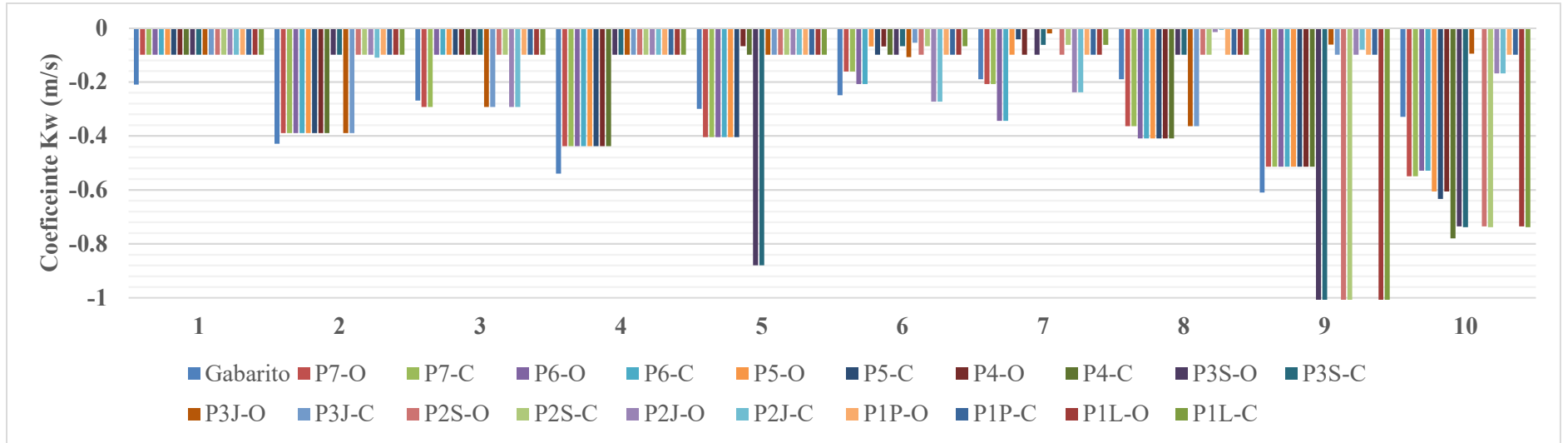


Fonte: Elaborado pelo autor

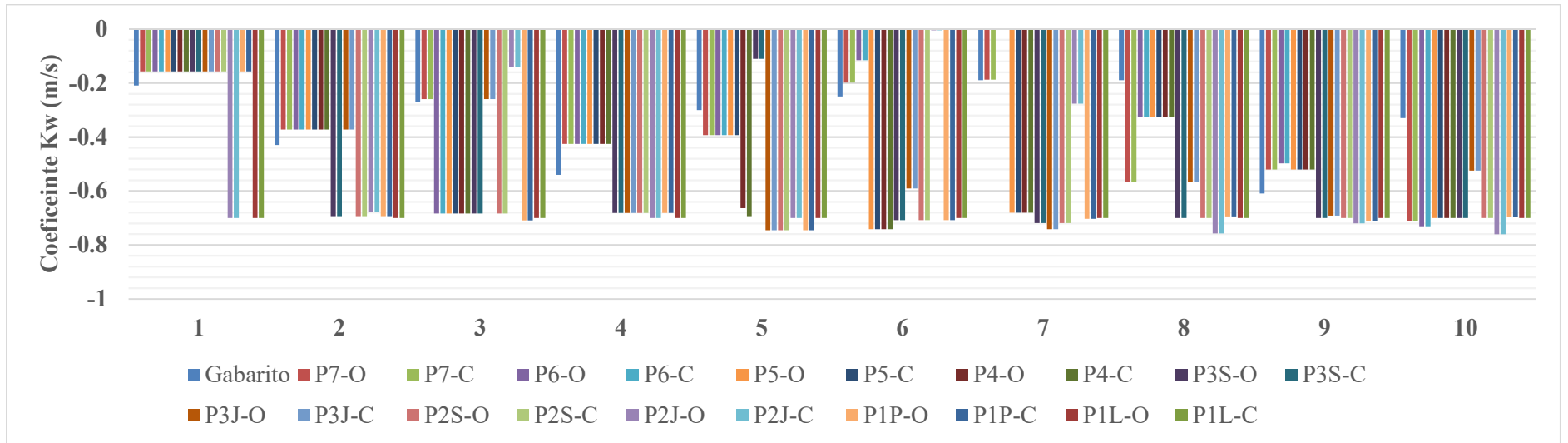


Fonte: Elaborado pelo autor

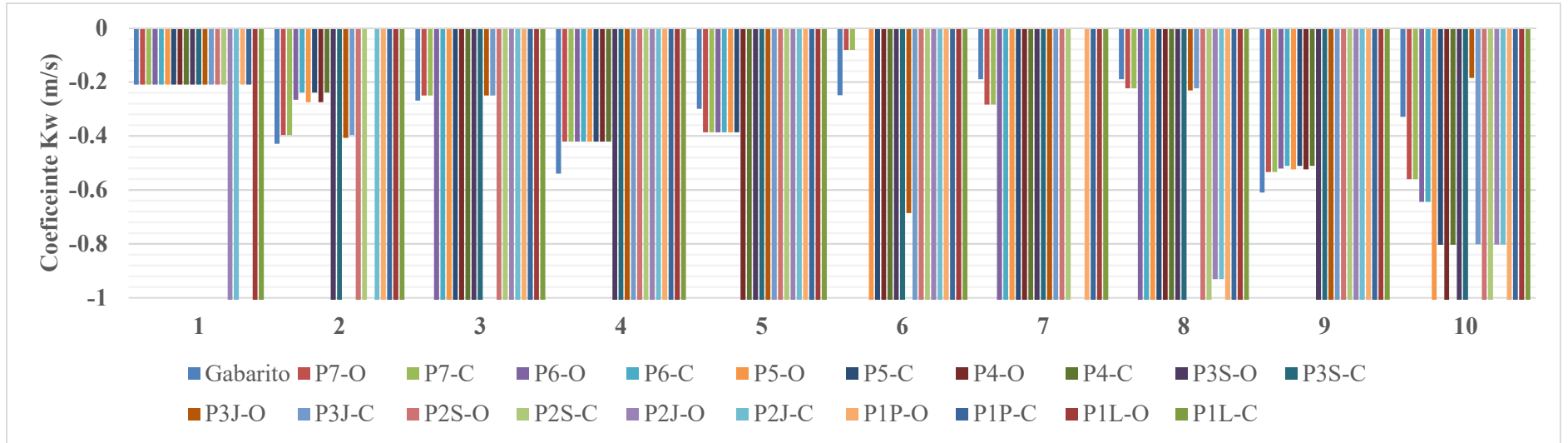
APÊNDICE EN – Coeficientes K_W encontrados na Calibração da constante K de decaimento total do cloro com coeficientes K_W iniciais iguais a, respectivamente, -0,1 m/s, -0,7 m/s, -10 m/s e calculado com uso da sub-rotina computacional: rede Walski (1983) – Gambale (2000)



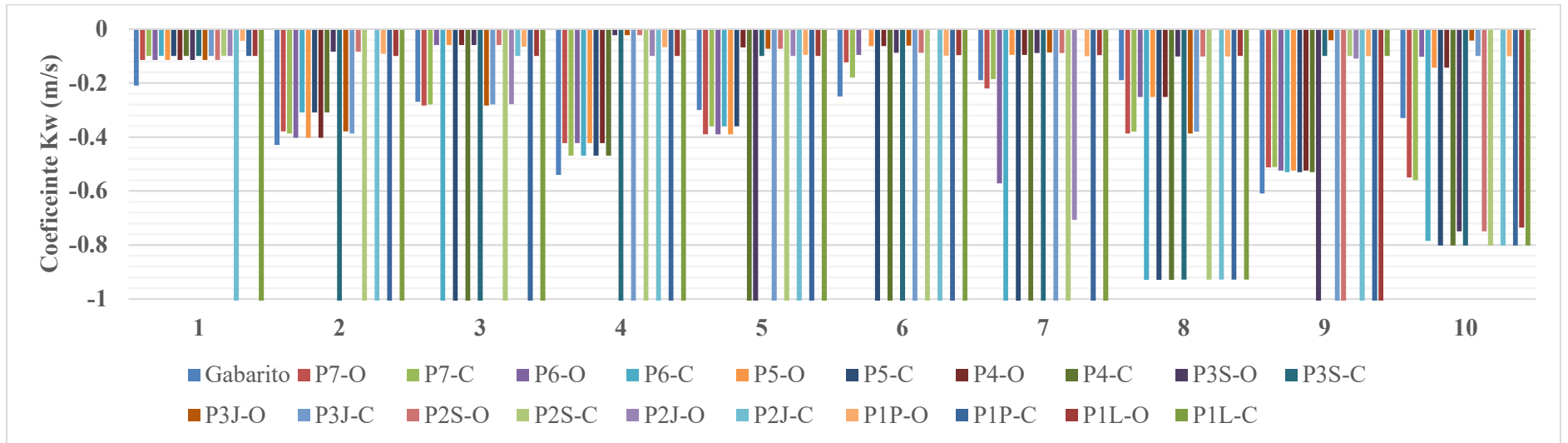
Fonte: Elaborado pelo autor



Fonte: Elaborado pelo autor

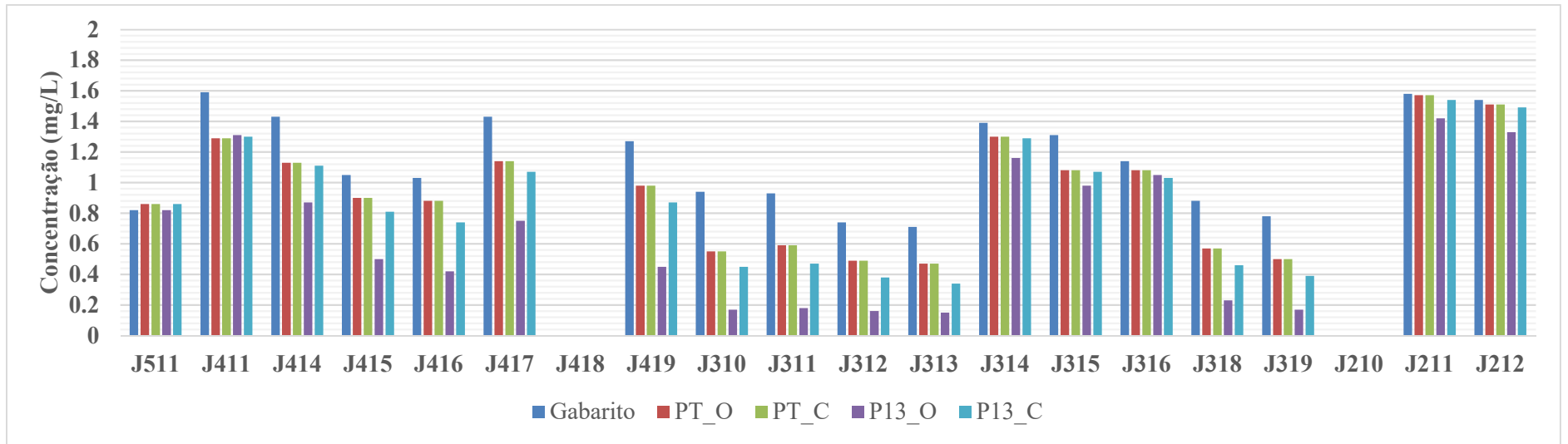


Fonte: Elaborado pelo autor

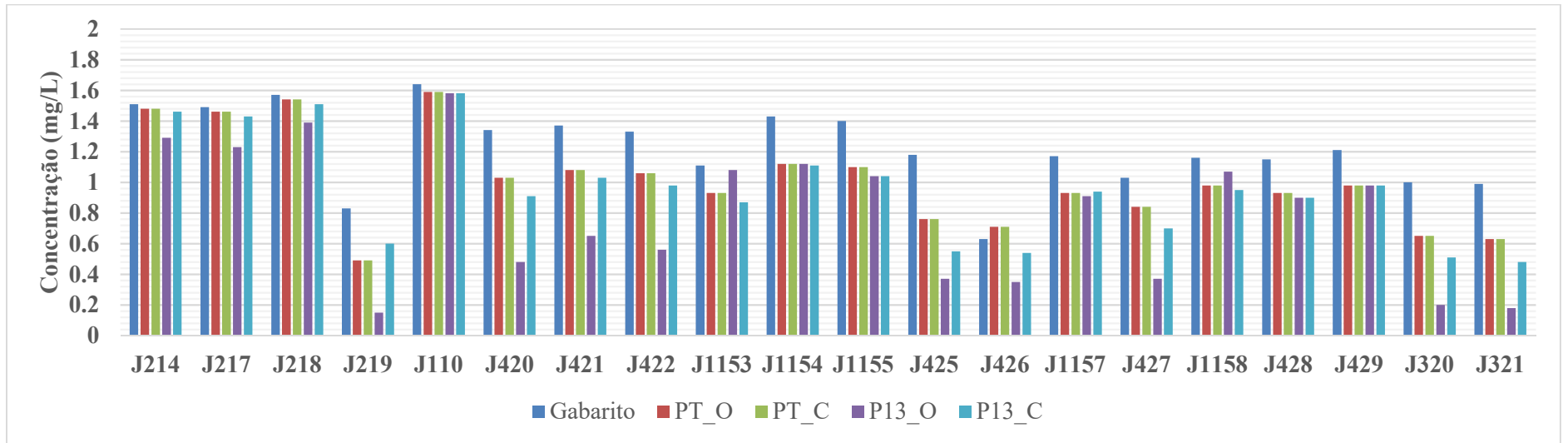


Fonte: Elaborado pelo autor

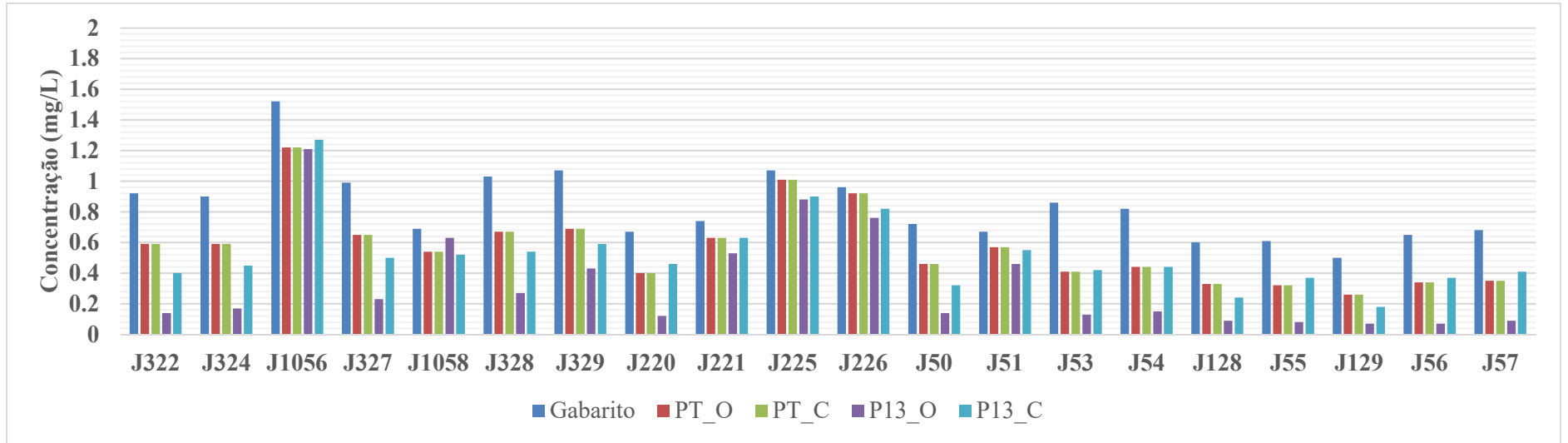
APÊNDICE EO – Concentrações de cloro encontradas na Calibração da constante K de decaimento total do cloro com coeficientes K_w iniciais iguais a -0,7 m/s: rede C-Town



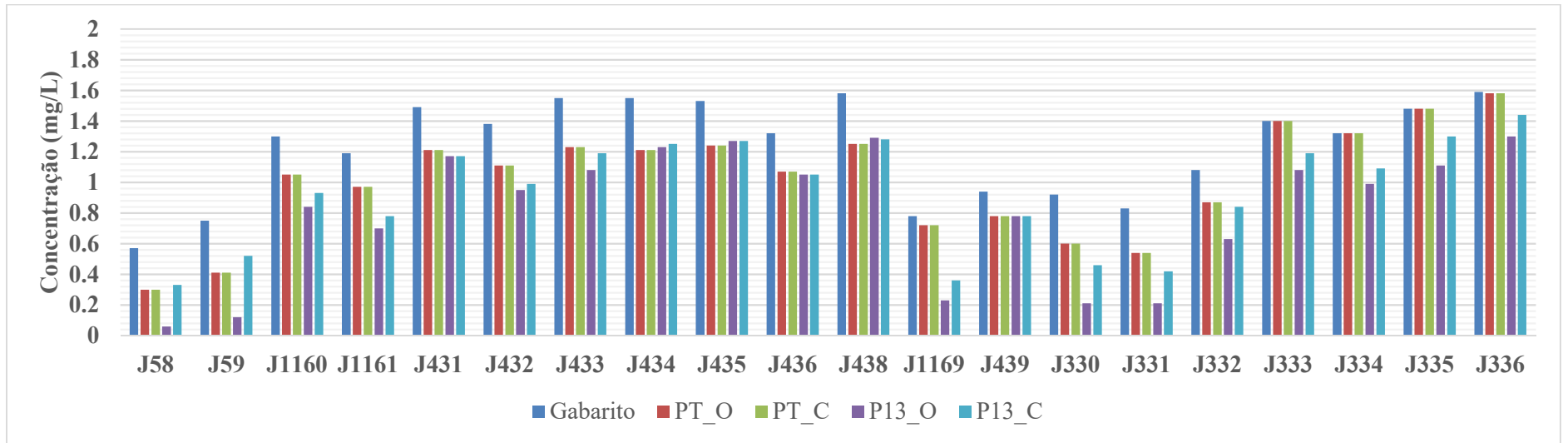
Fonte: Elaborado pelo autor



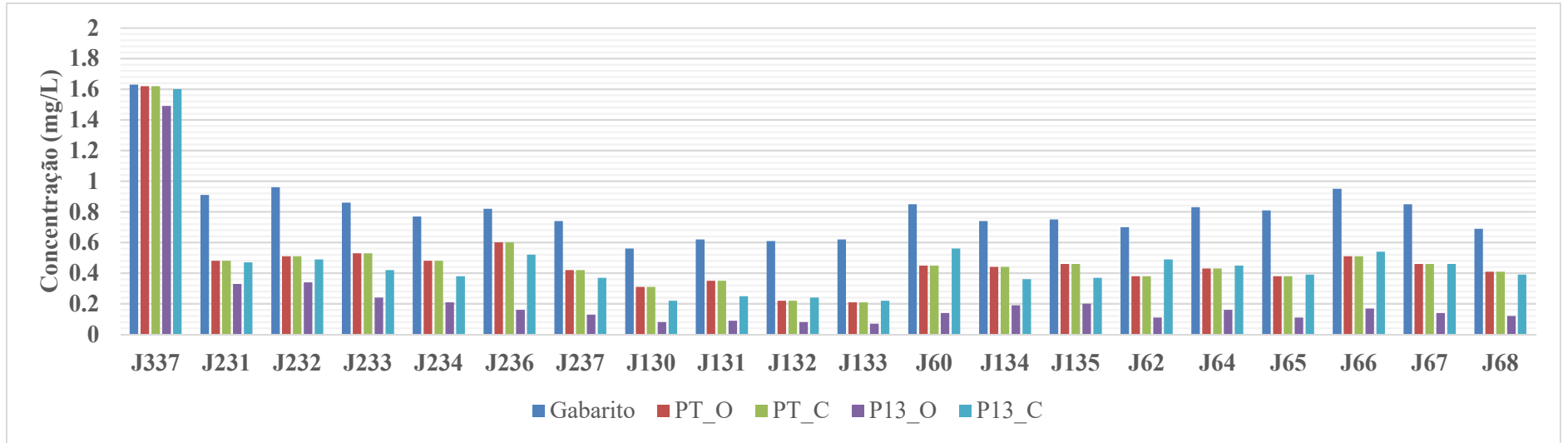
Fonte: Elaborado pelo autor



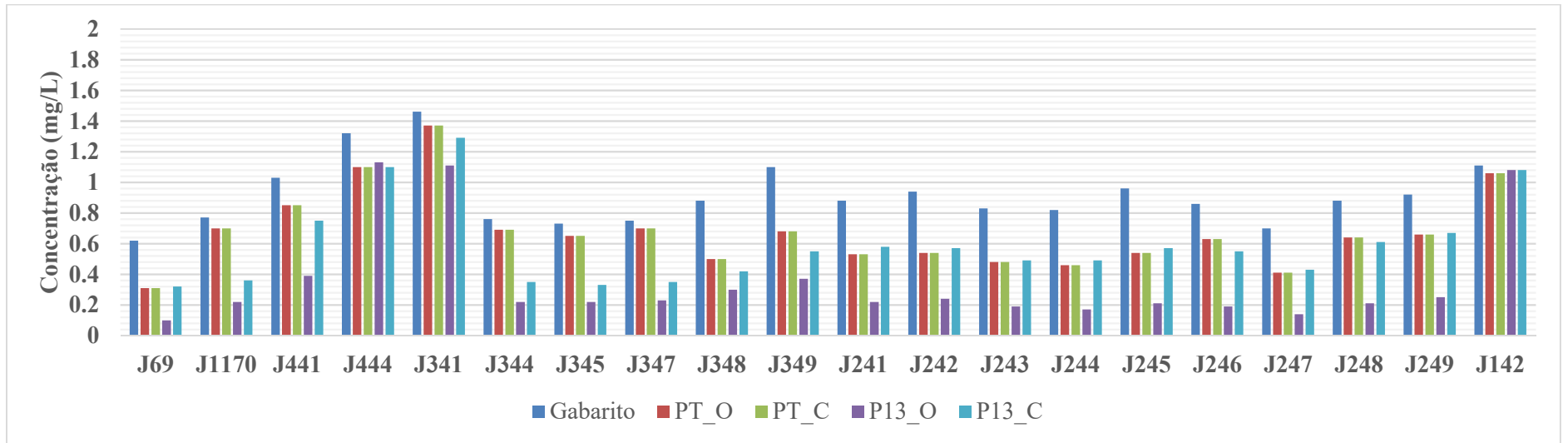
Fonte: Elaborado pelo autor



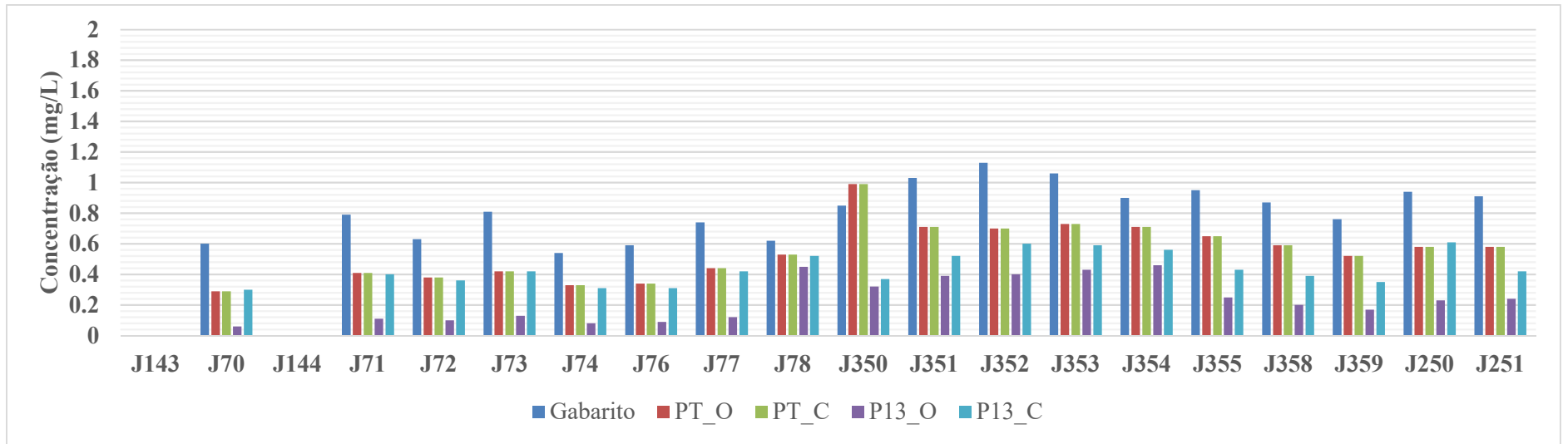
Fonte: Elaborado pelo autor



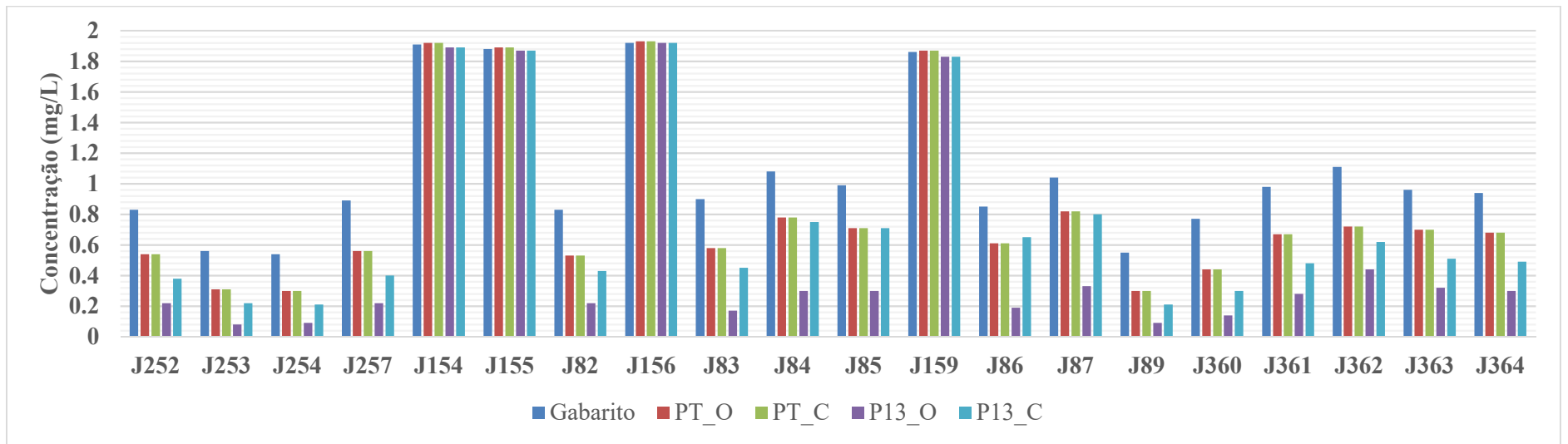
Fonte: Elaborado pelo autor



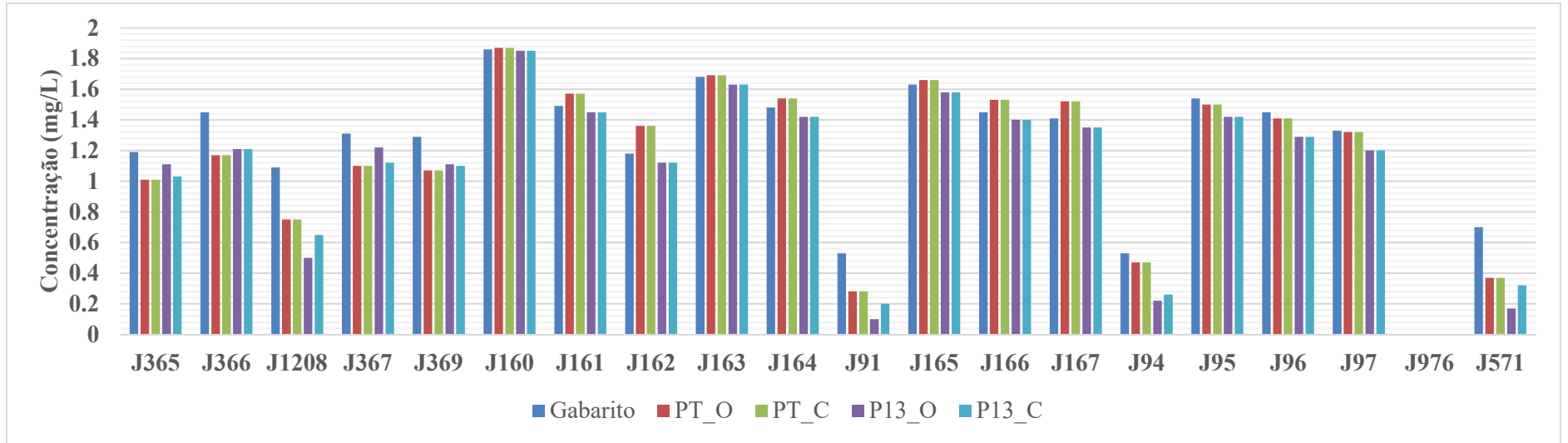
Fonte: Elaborado pelo autor



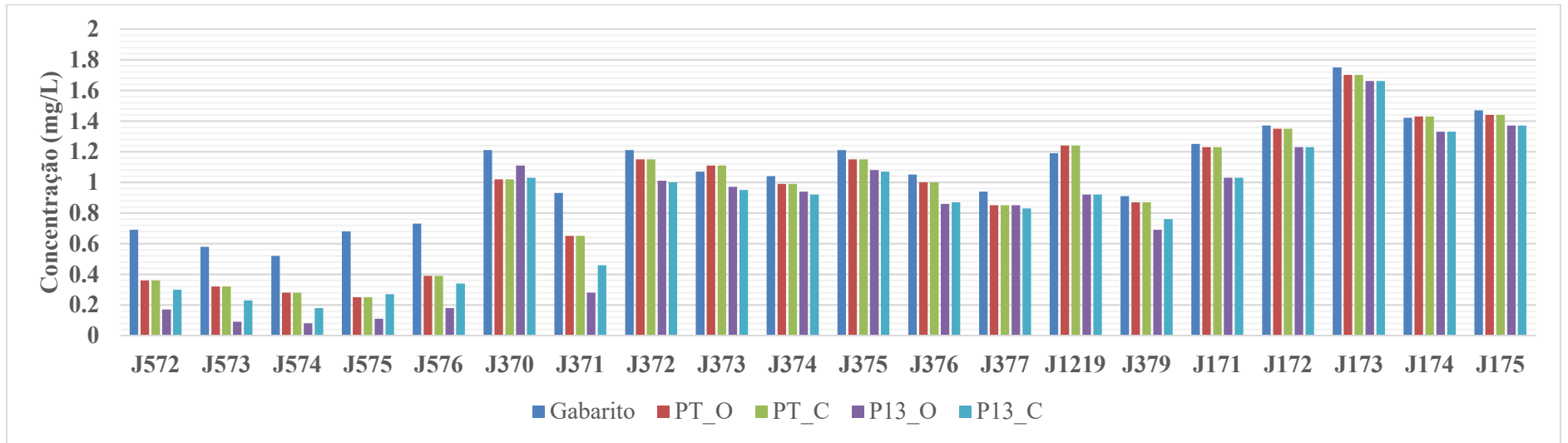
Fonte: Elaborado pelo autor



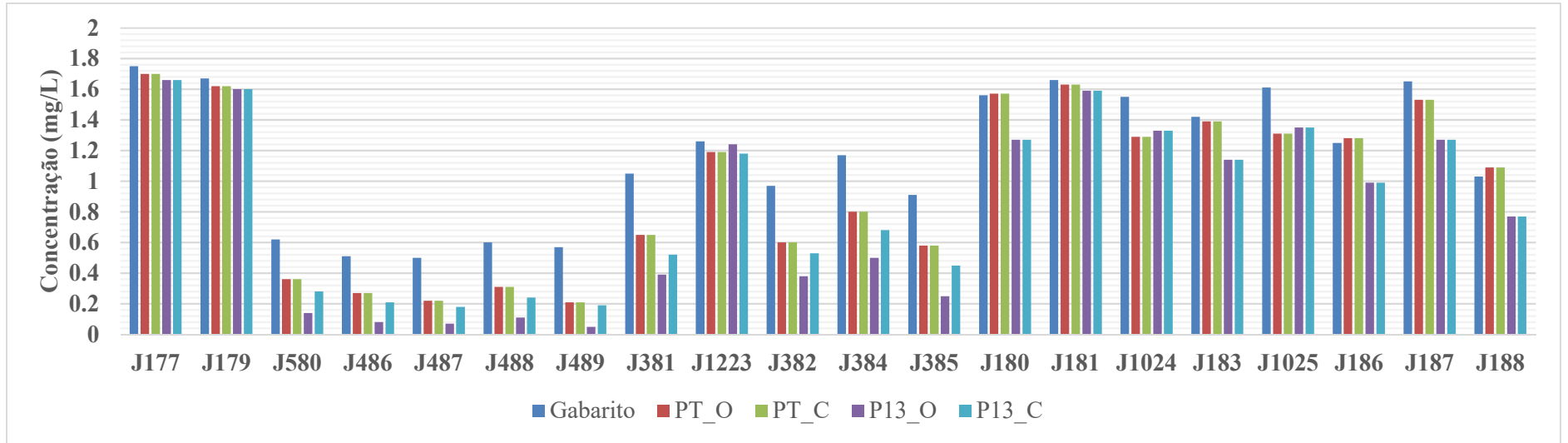
Fonte: Elaborado pelo autor



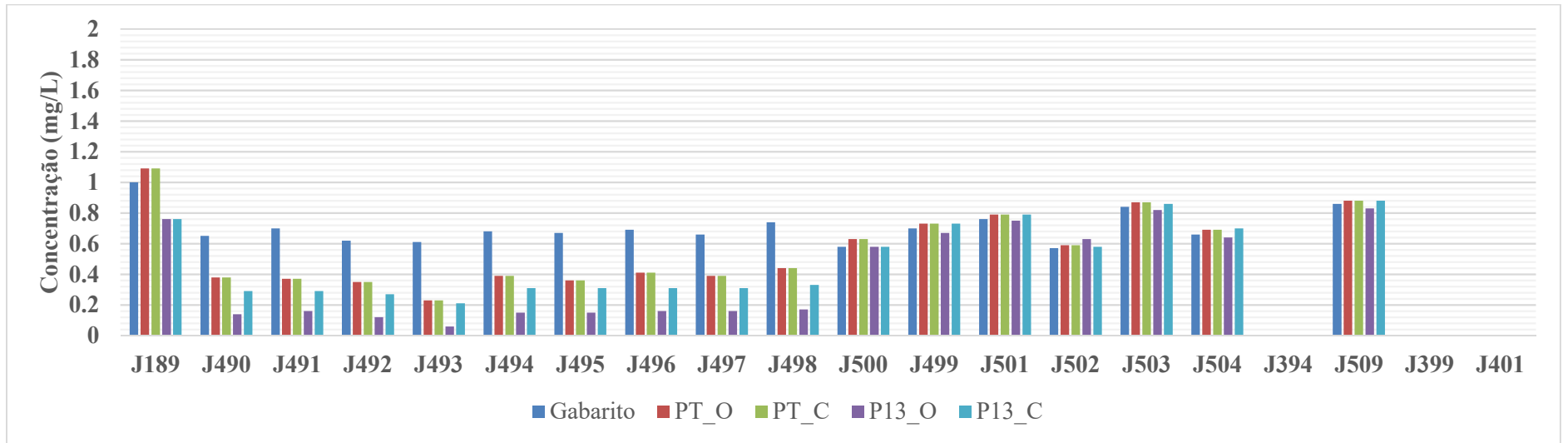
Fonte: Elaborado pelo autor



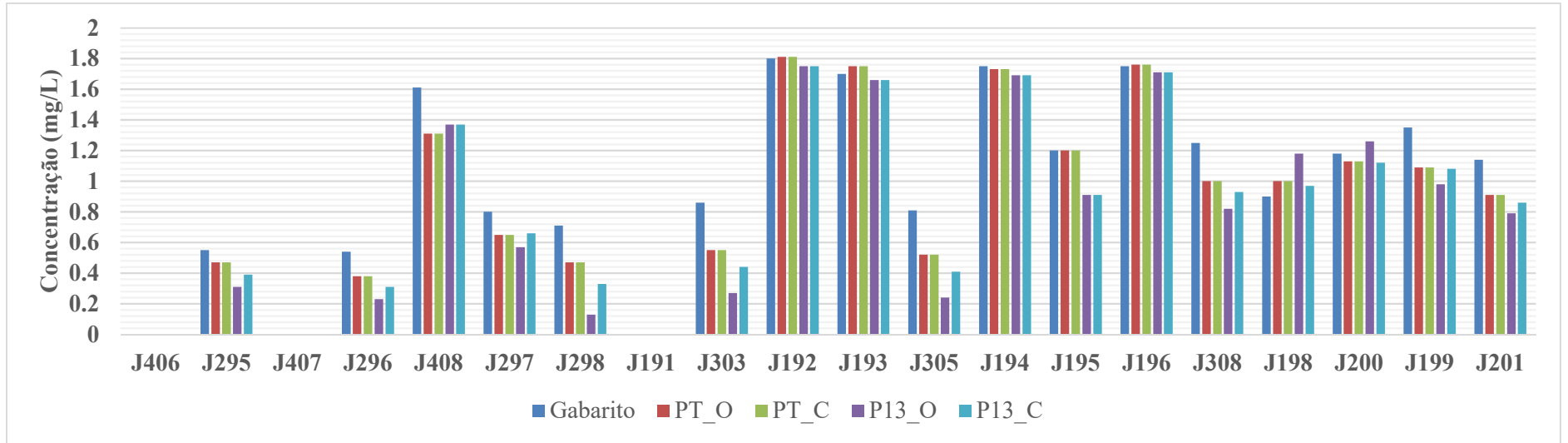
Fonte: Elaborado pelo autor



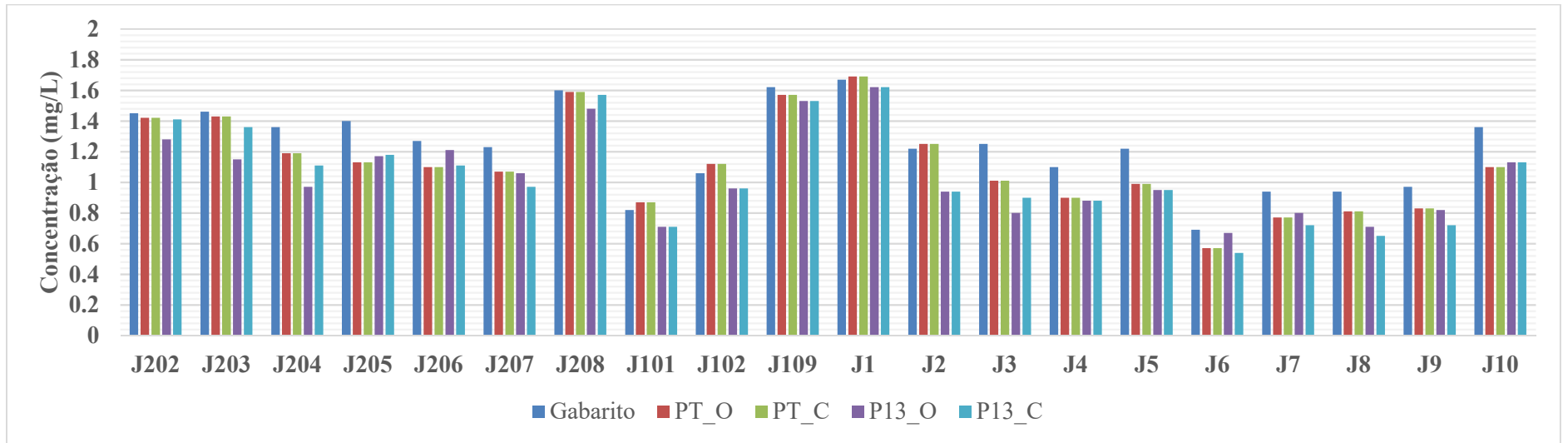
Fonte: Elaborado pelo autor



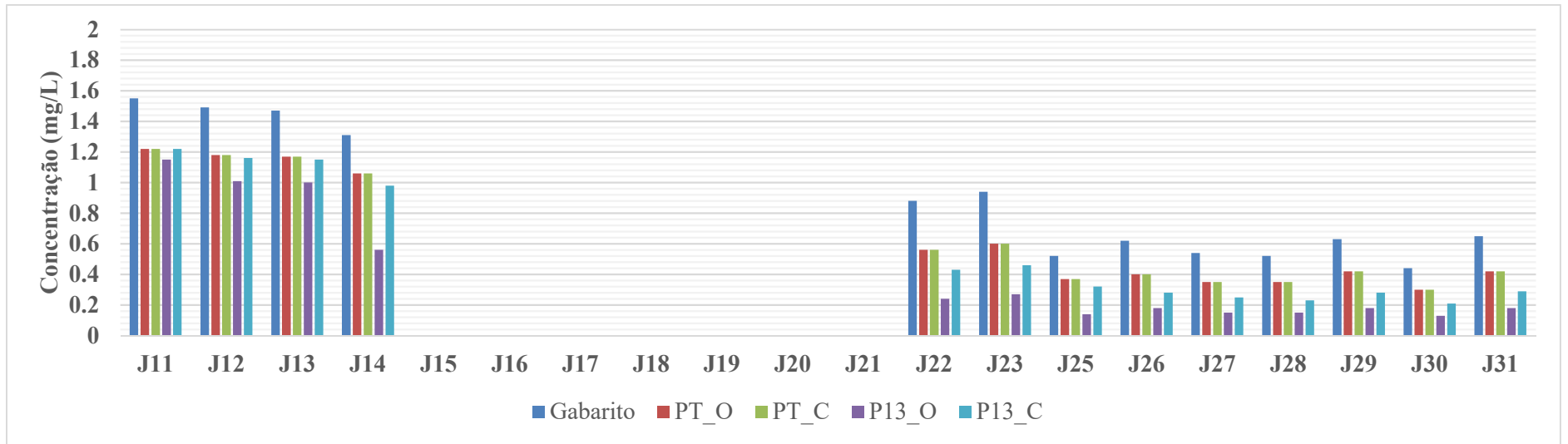
Fonte: Elaborado pelo autor



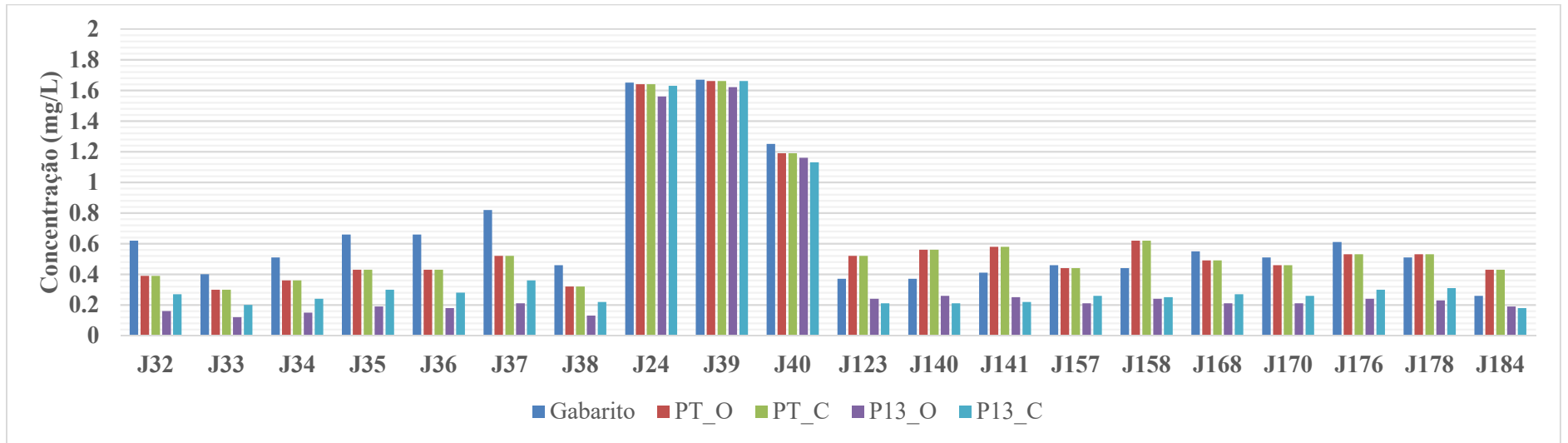
Fonte: Elaborado pelo autor



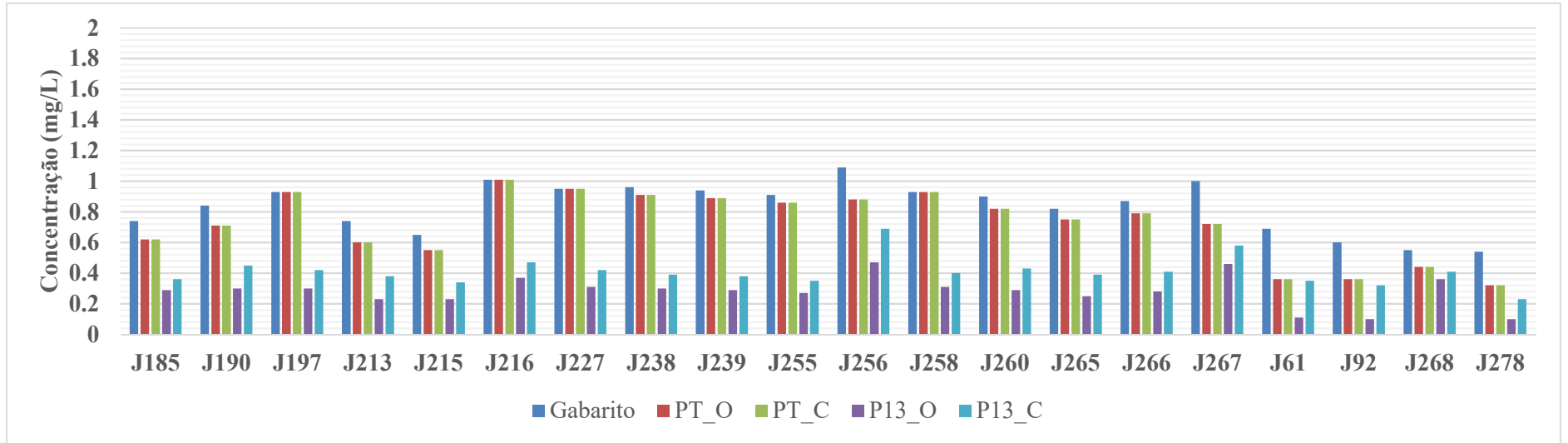
Fonte: Elaborado pelo autor



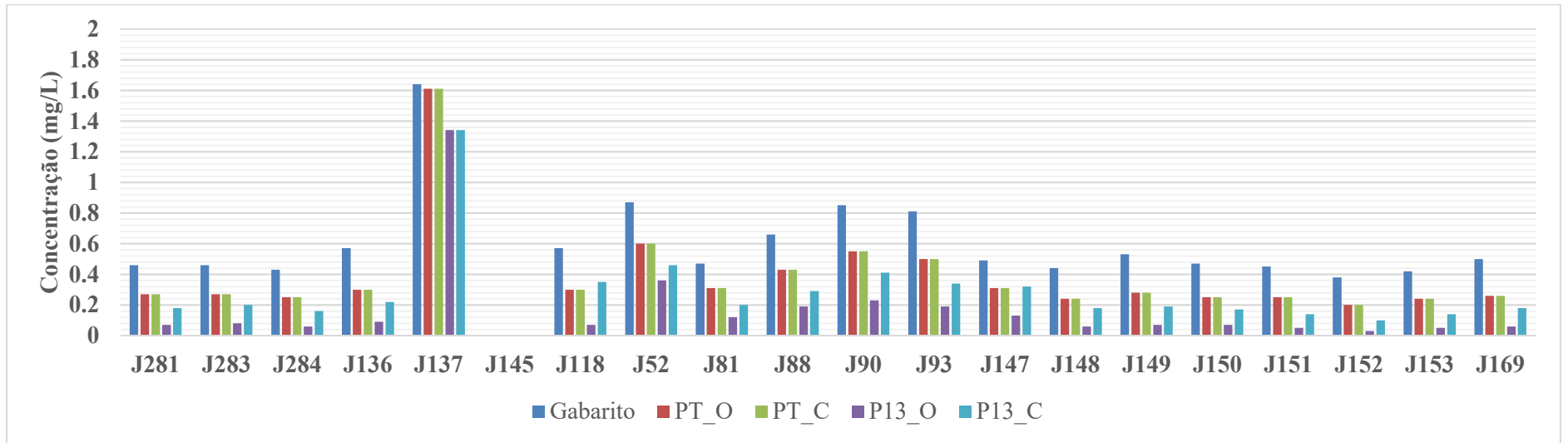
Fonte: Elaborado pelo autor



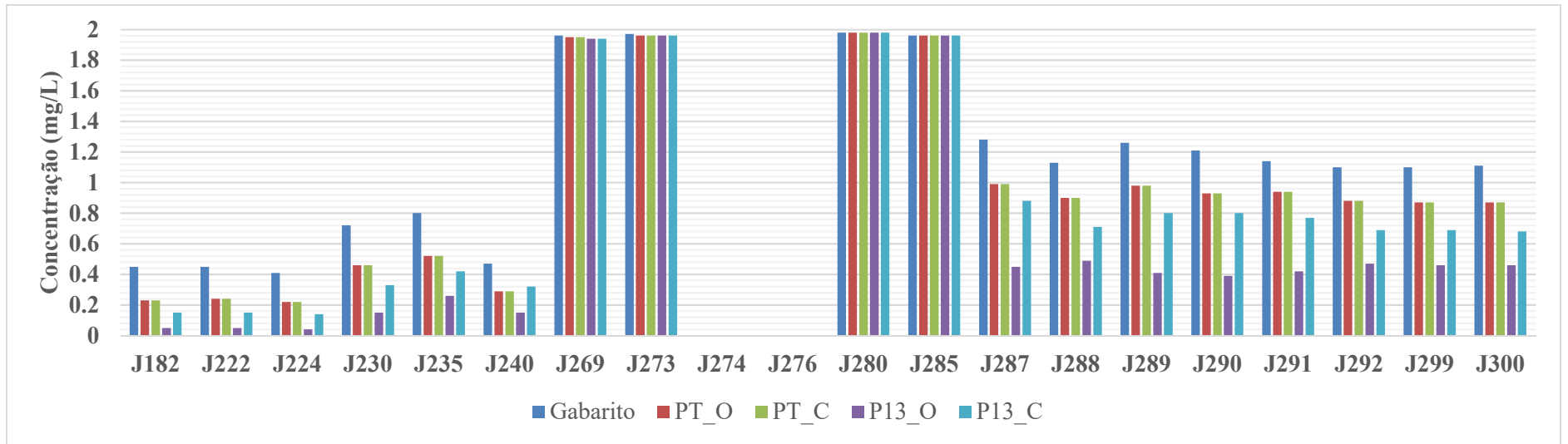
Fonte: Elaborado pelo autor



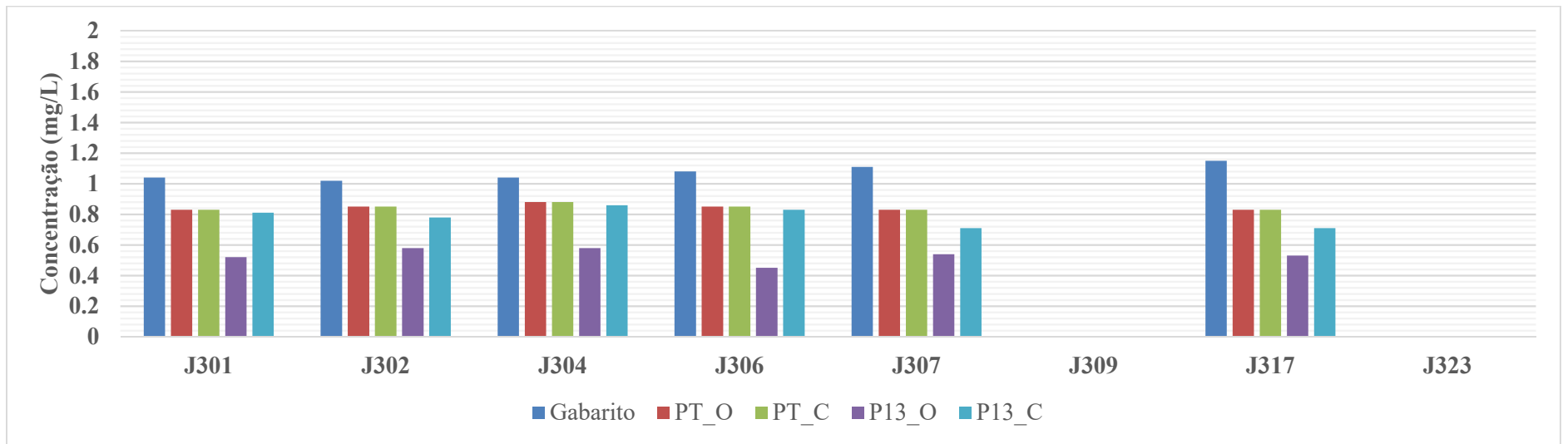
Fonte: Elaborado pelo autor



Fonte: Elaborado pelo autor

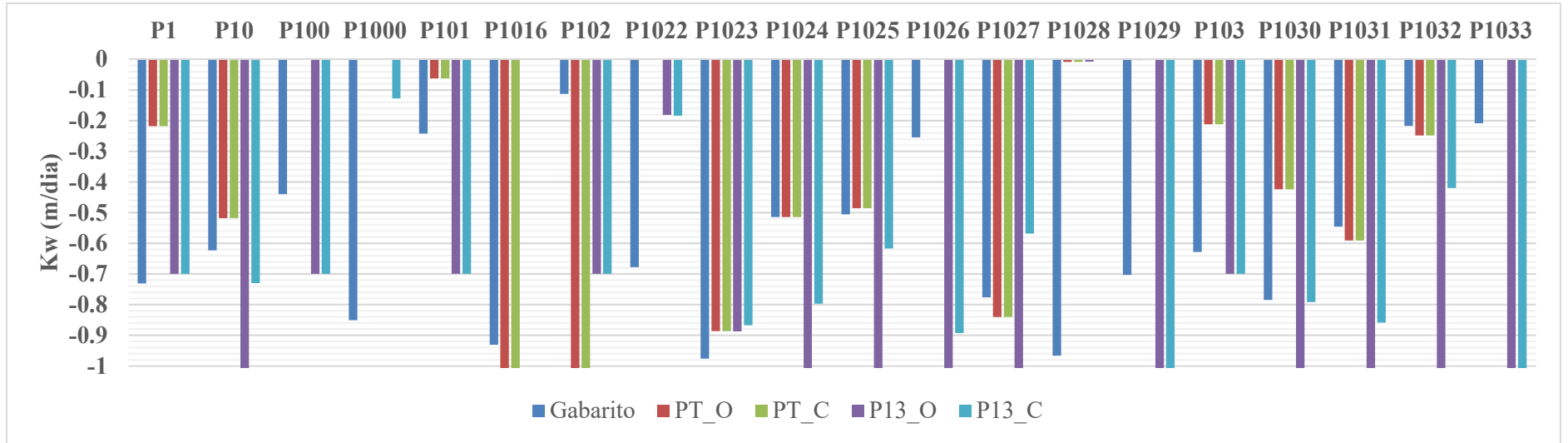


Fonte: Elaborado pelo autor

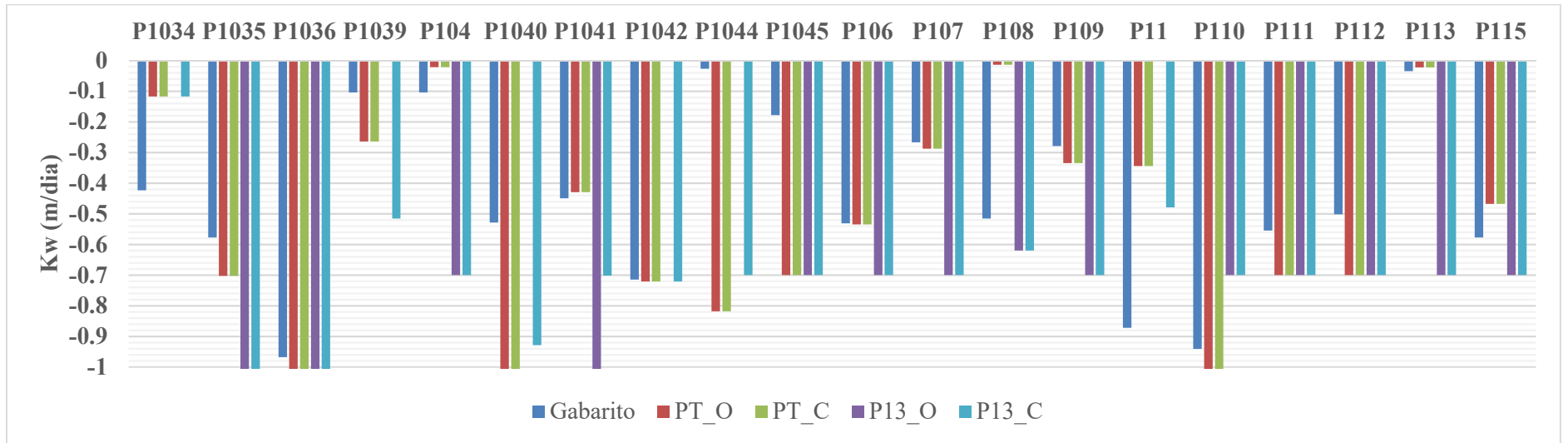


Fonte: Elaborado pelo autor

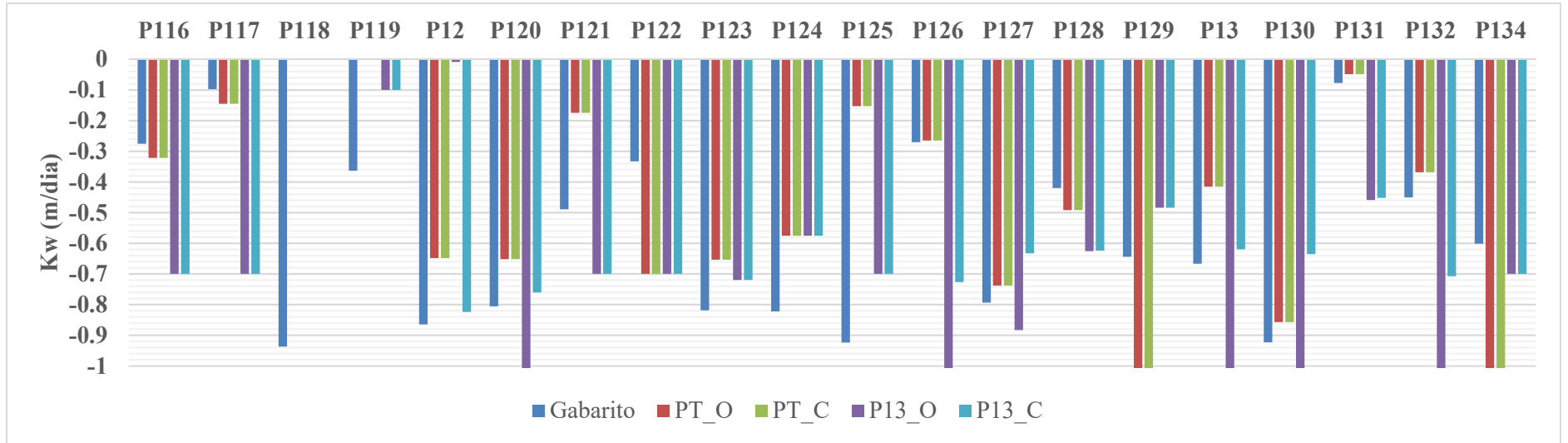
APÊNDICE EP – Coeficientes K_w encontrados na Calibração da constante K de decaimento total do cloro com coeficientes K_w iniciais iguais a -0,7 m/s: rede C-Town



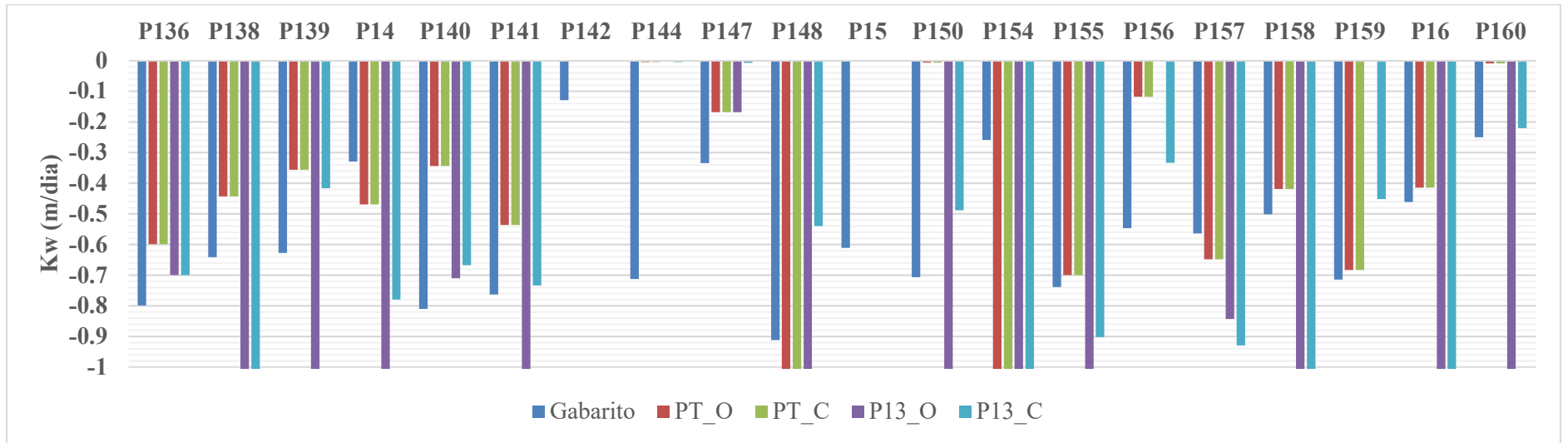
Fonte: Elaborado pelo autor



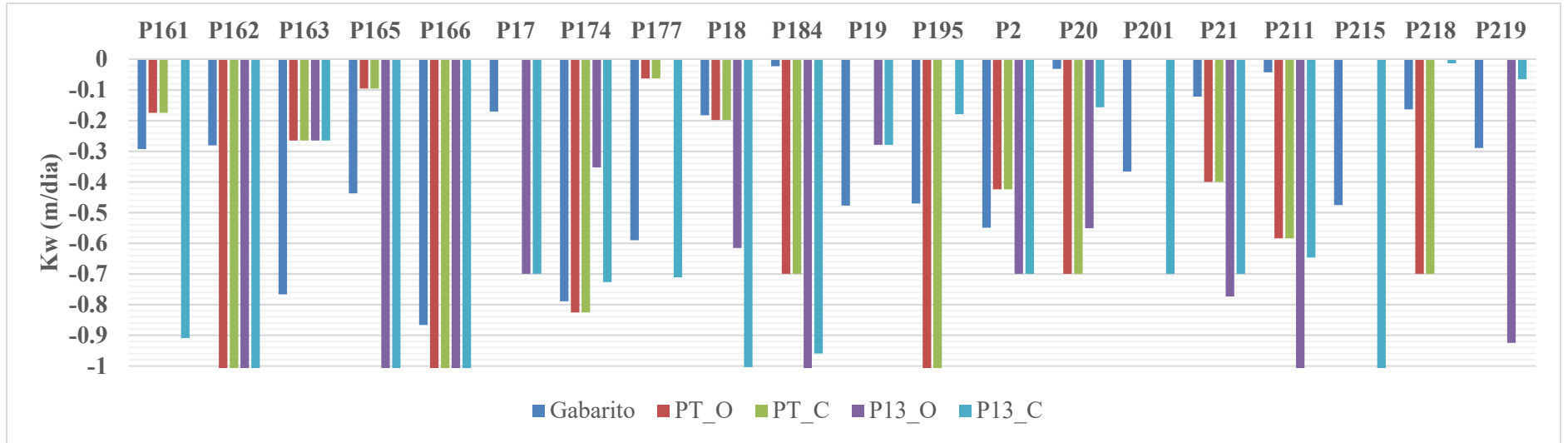
Fonte: Elaborado pelo autor



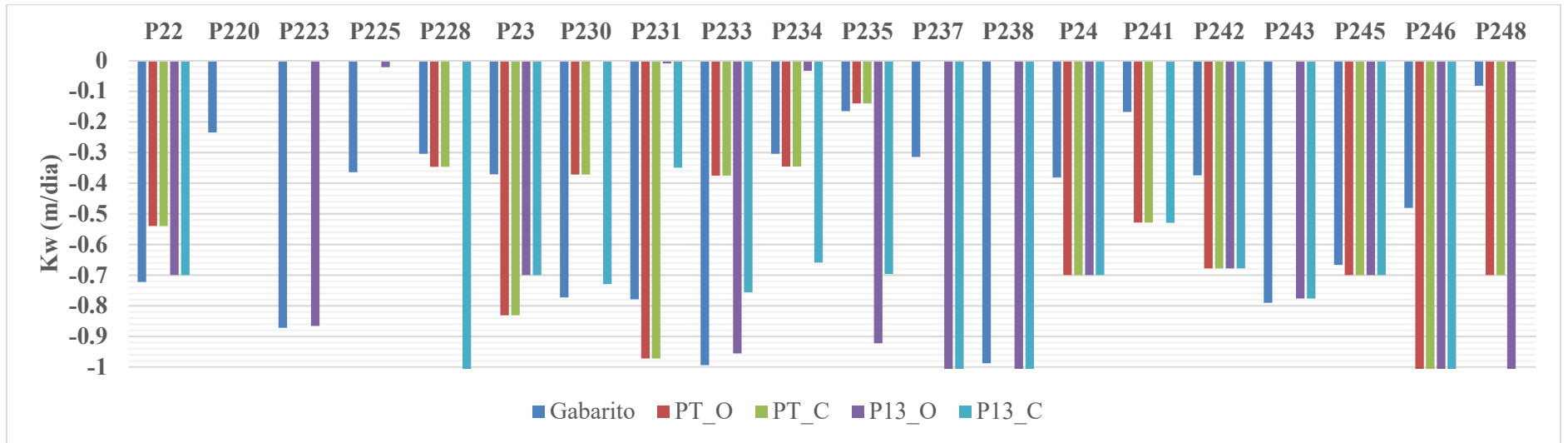
Fonte: Elaborado pelo autor



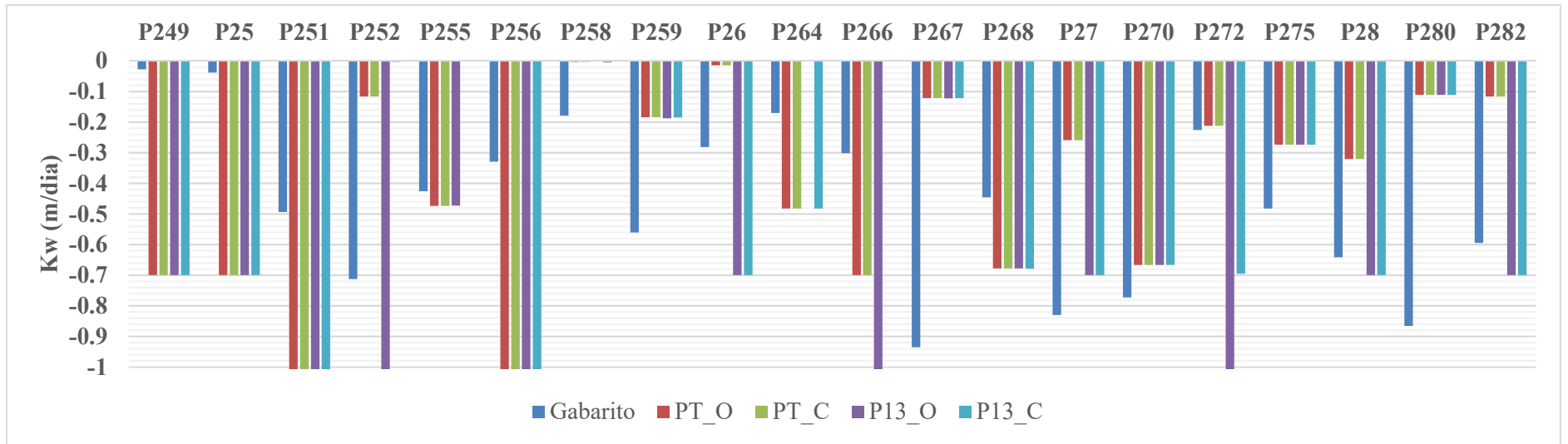
Fonte: Elaborado pelo autor



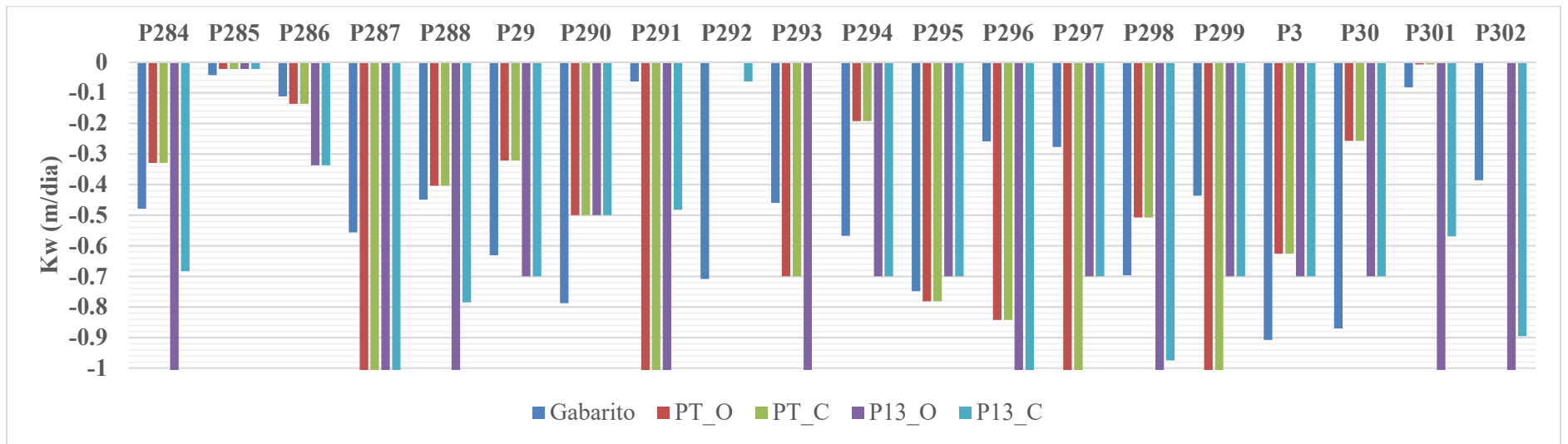
Fonte: Elaborado pelo autor



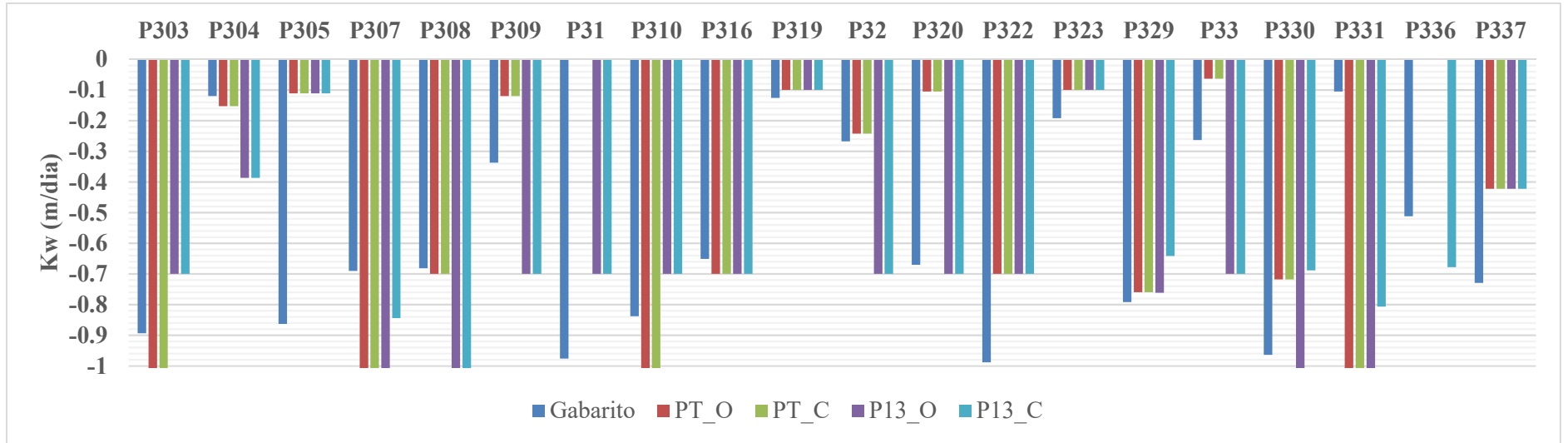
Fonte: Elaborado pelo autor



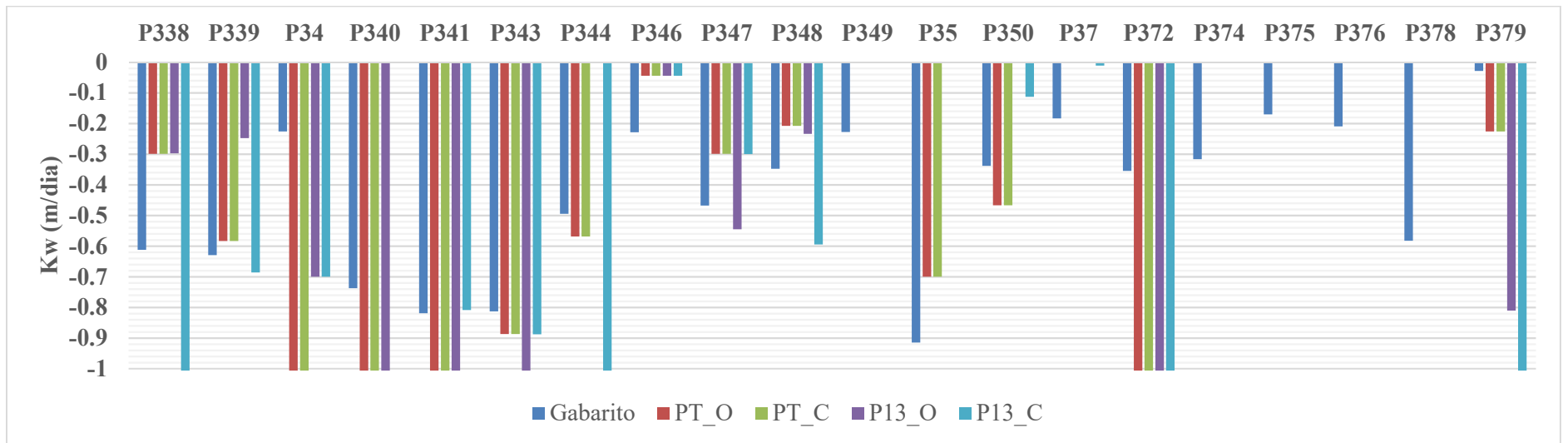
Fonte: Elaborado pelo autor



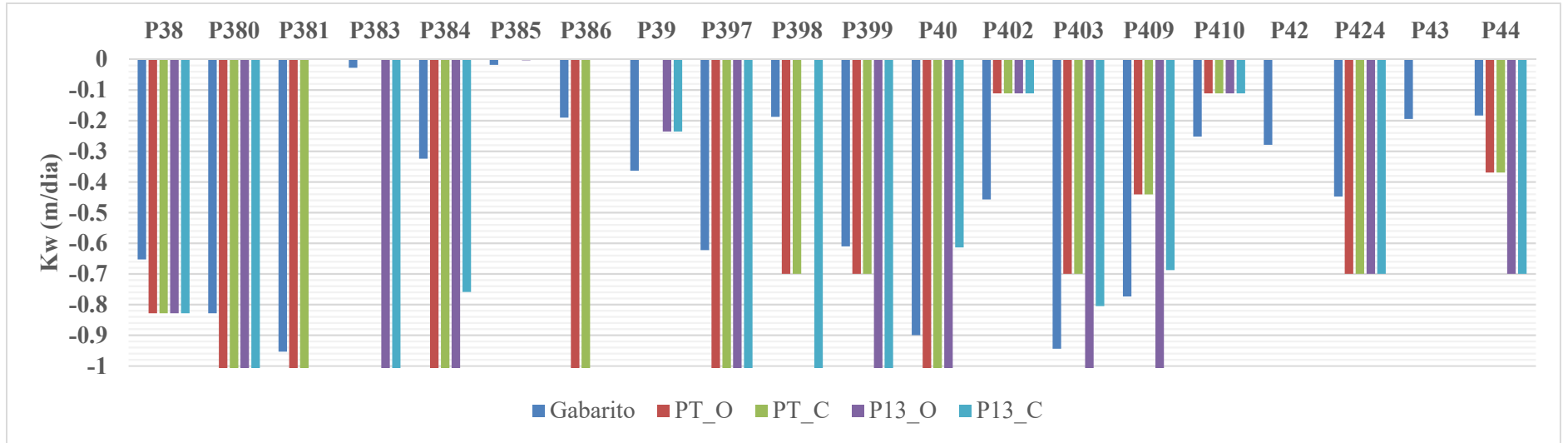
Fonte: Elaborado pelo autor



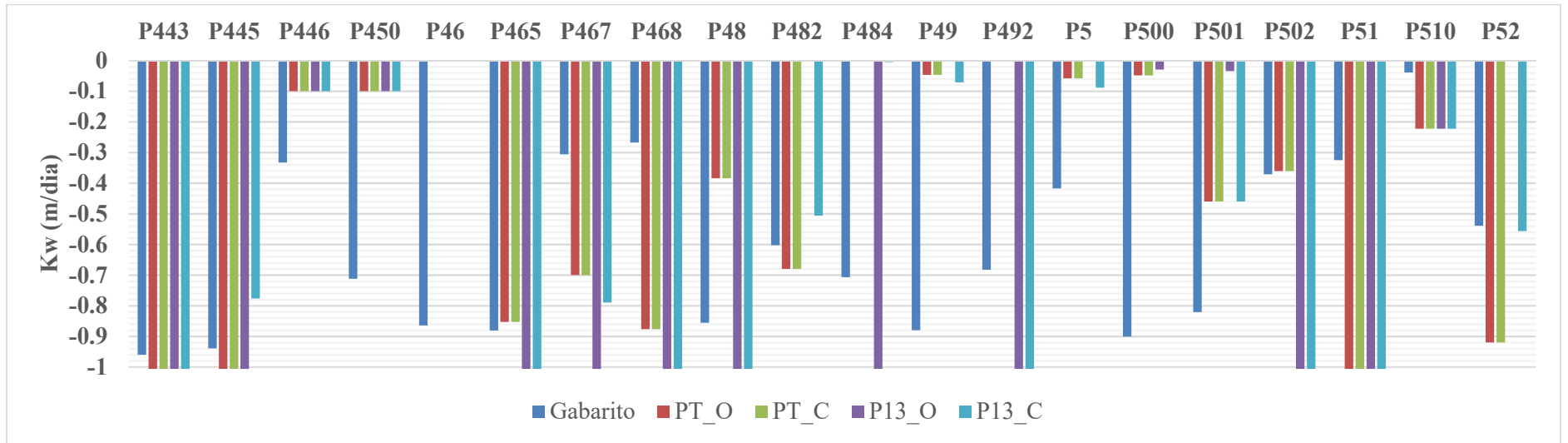
Fonte: Elaborado pelo autor



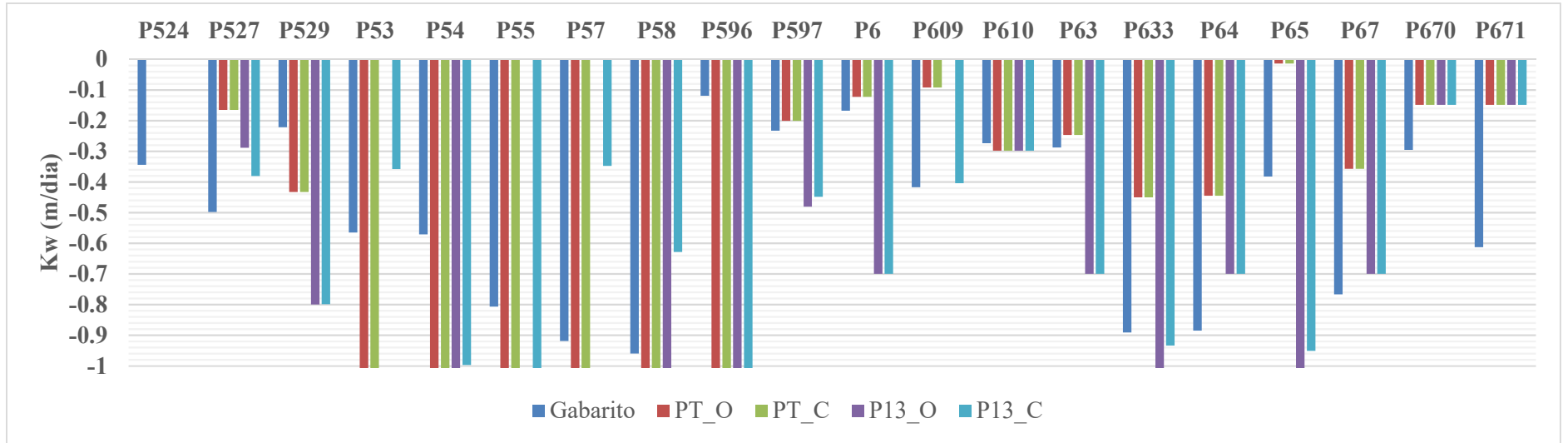
Fonte: Elaborado pelo autor



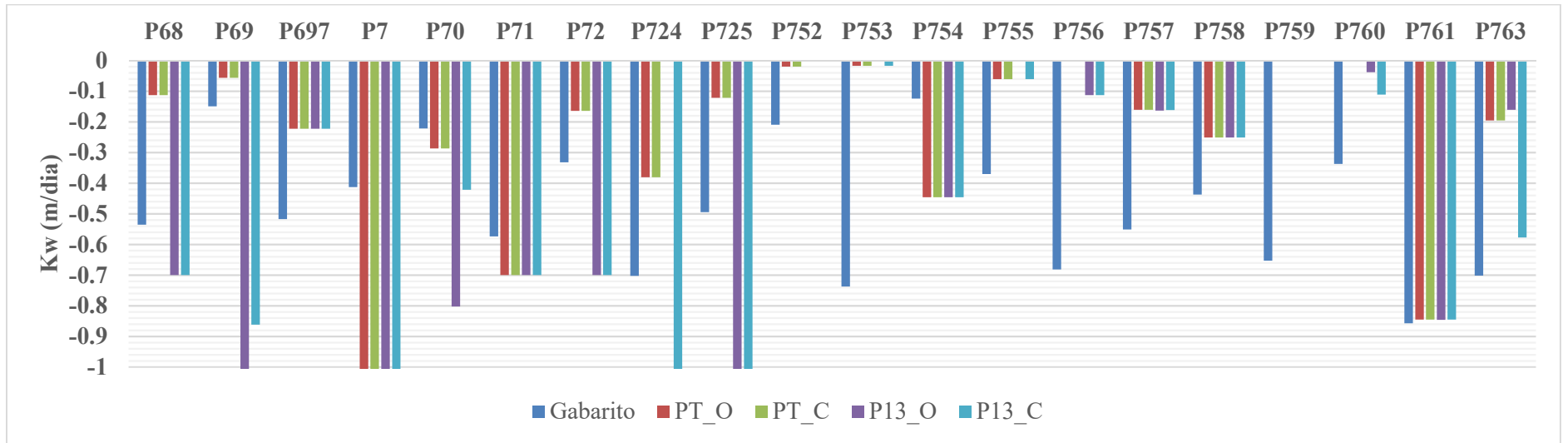
Fonte: Elaborado pelo autor



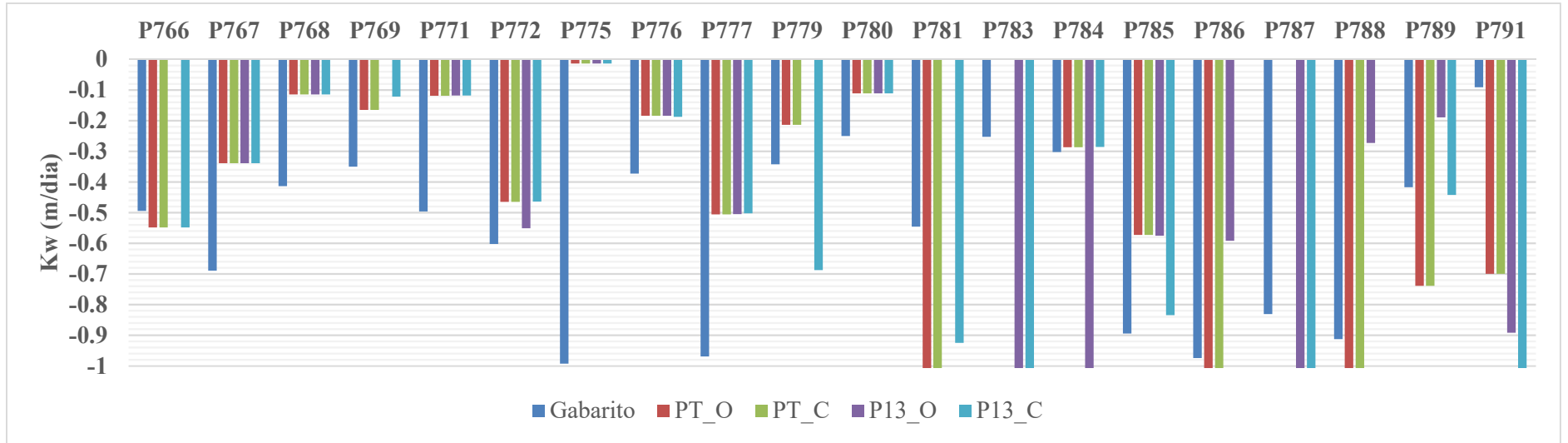
Fonte: Elaborado pelo autor



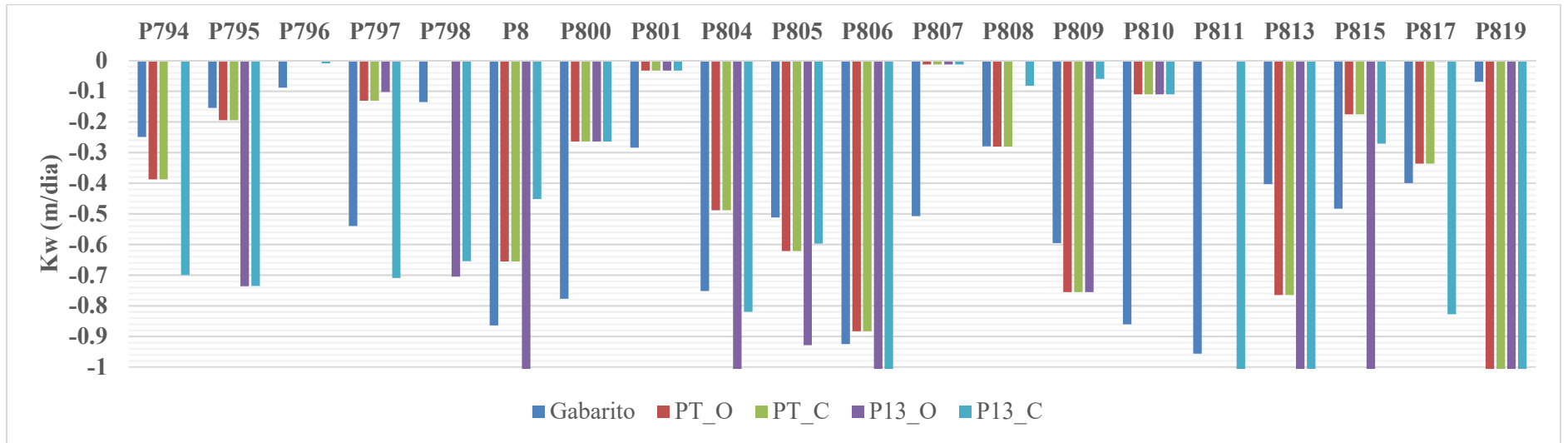
Fonte: Elaborado pelo autor



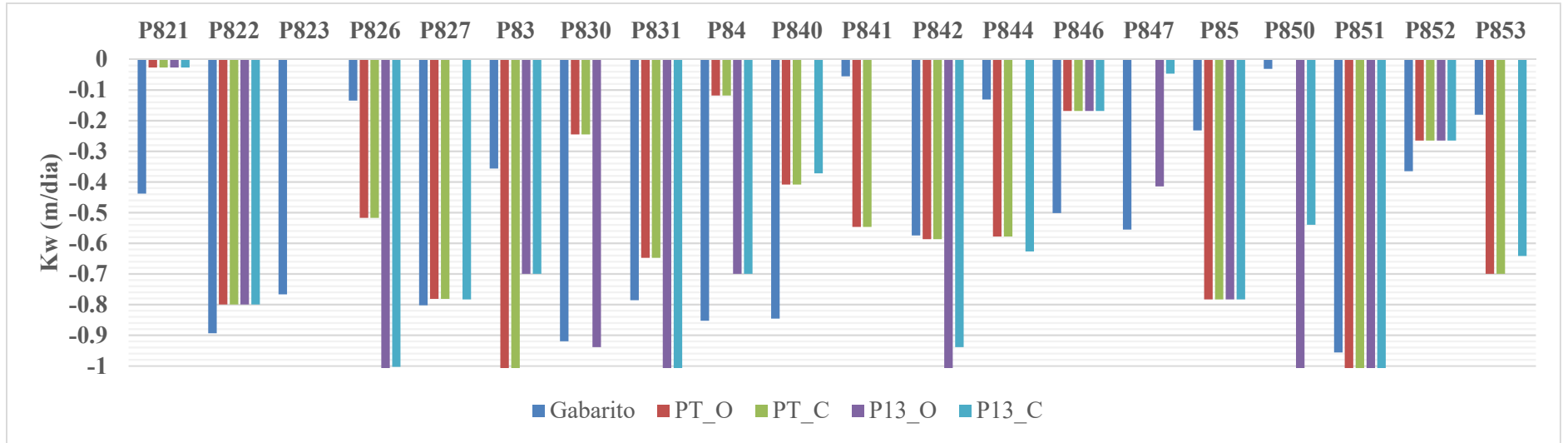
Fonte: Elaborado pelo autor



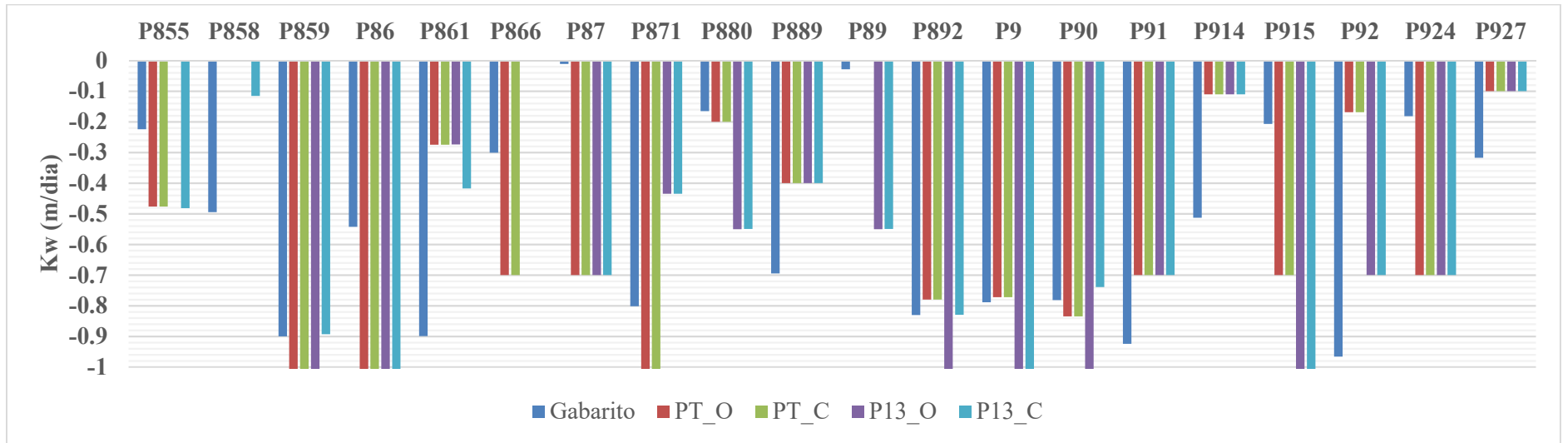
Fonte: Elaborado pelo autor



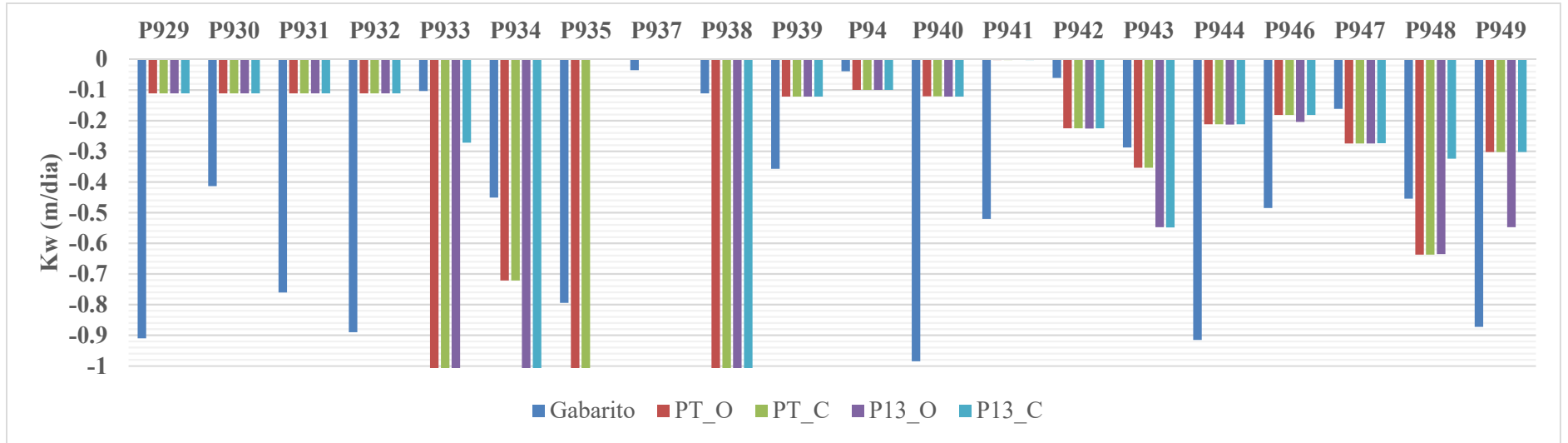
Fonte: Elaborado pelo autor



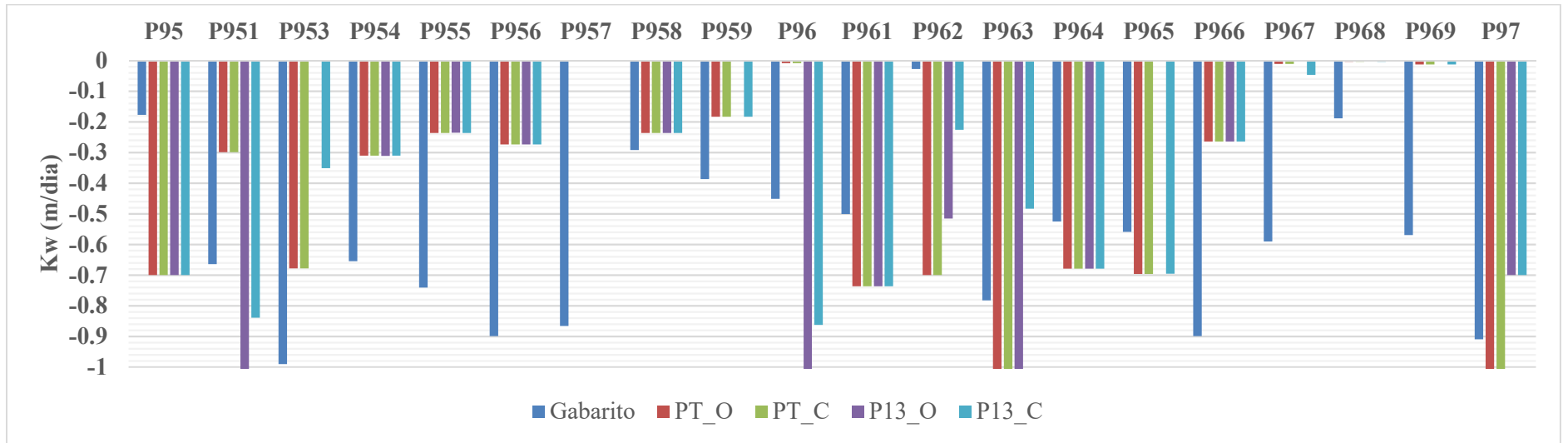
Fonte: Elaborado pelo autor



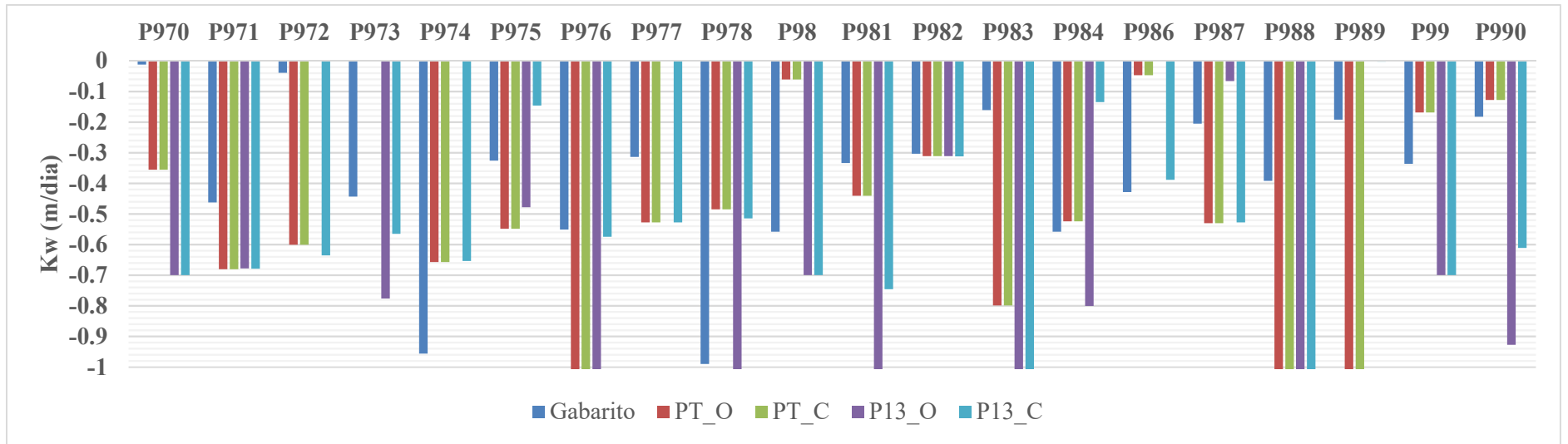
Fonte: Elaborado pelo autor



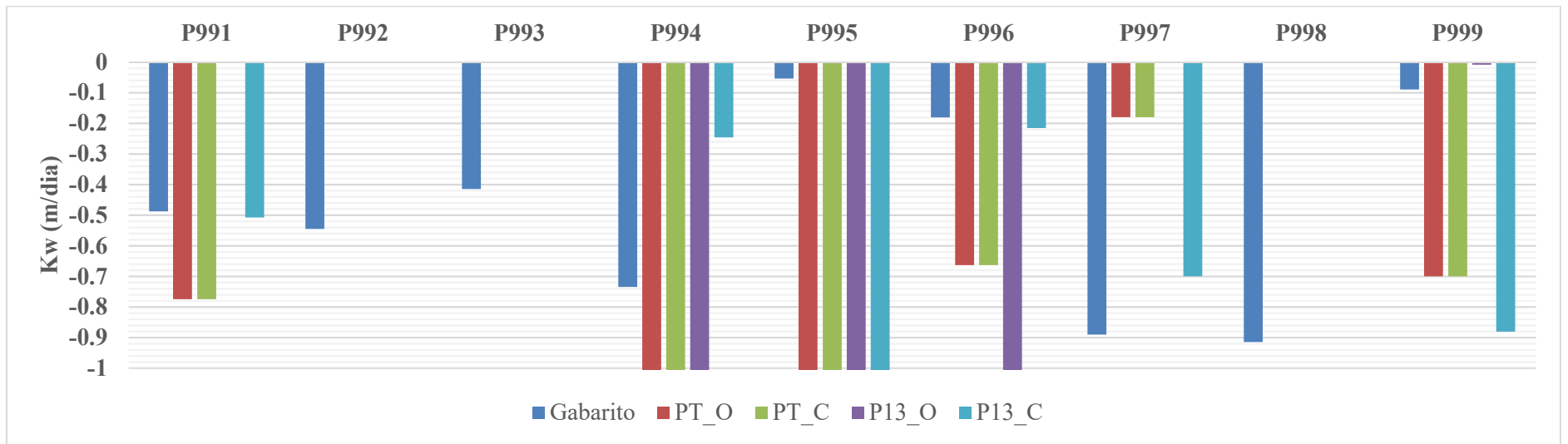
Fonte: Elaborado pelo autor



Fonte: Elaborado pelo autor

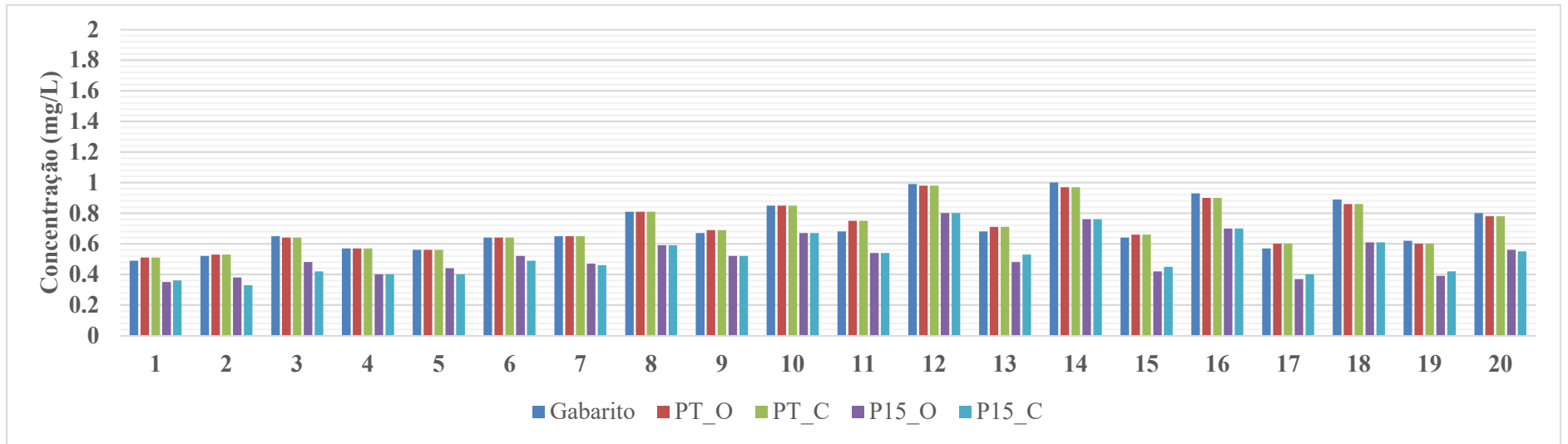


Fonte: Elaborado pelo autor

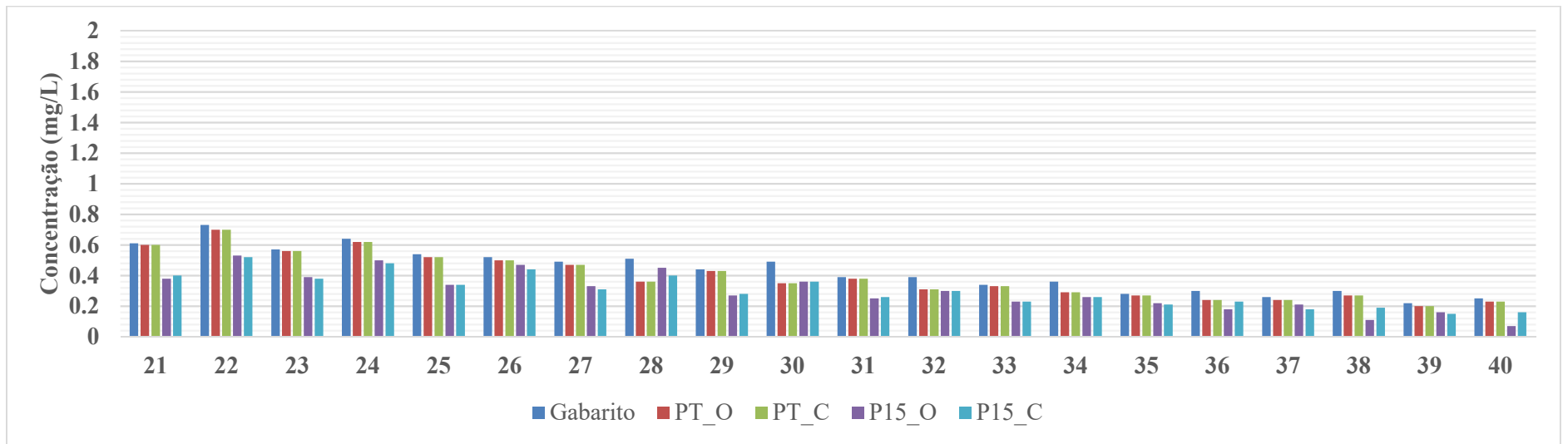


Fonte: Elaborado pelo autor

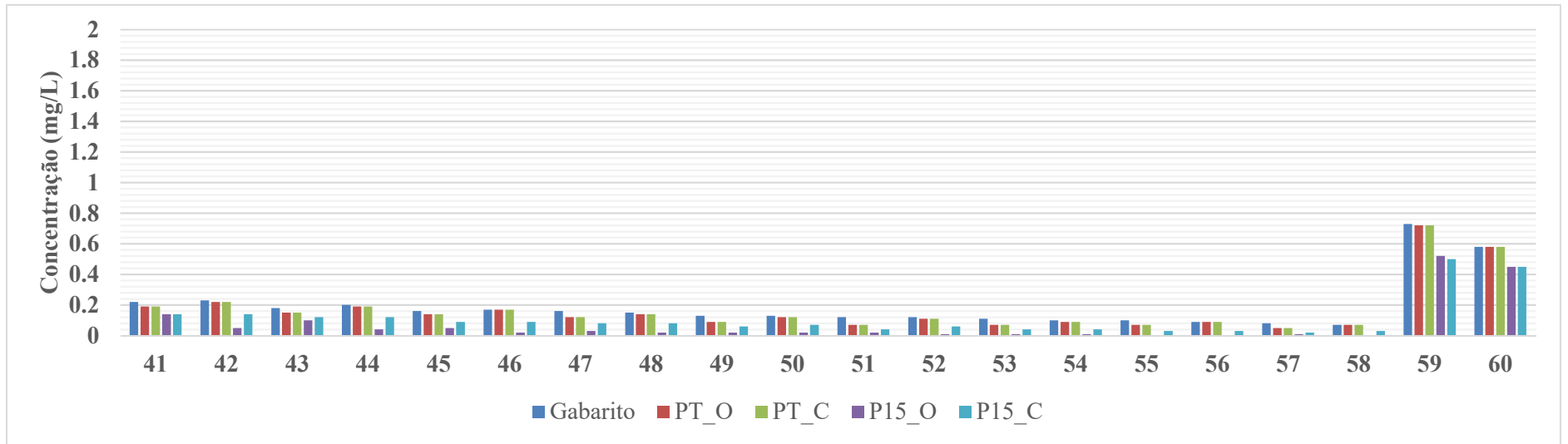
APÊNDICE EQ – Concentrações de cloro encontradas na Calibração da constante K de decaimento total do cloro com coeficientes K_w iniciais iguais a -0,7 m/s: rede MIGHA



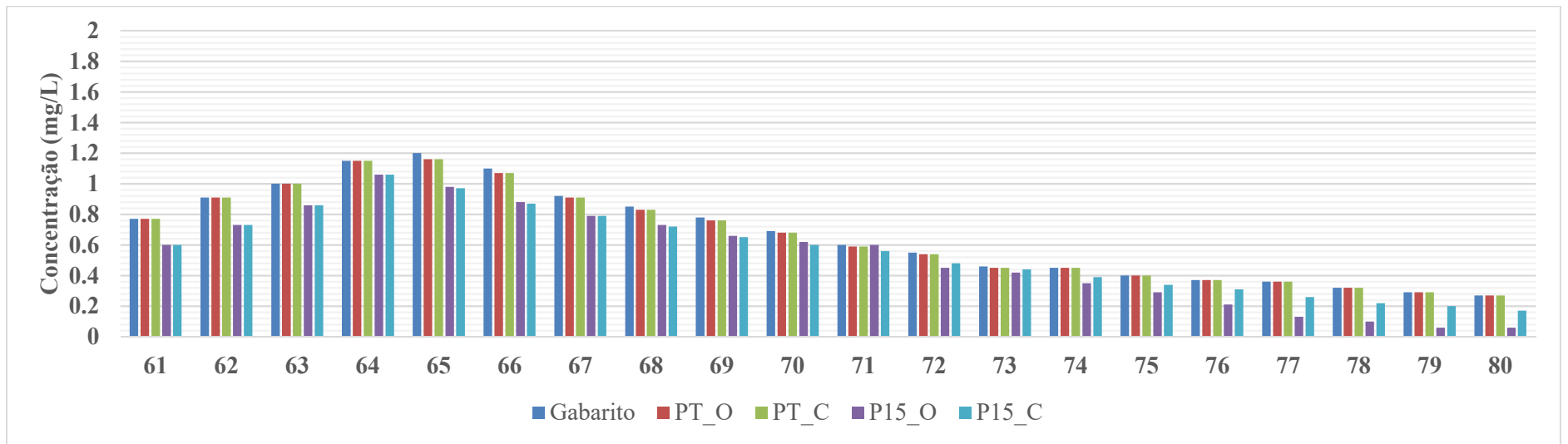
Fonte: Elaborado pelo autor



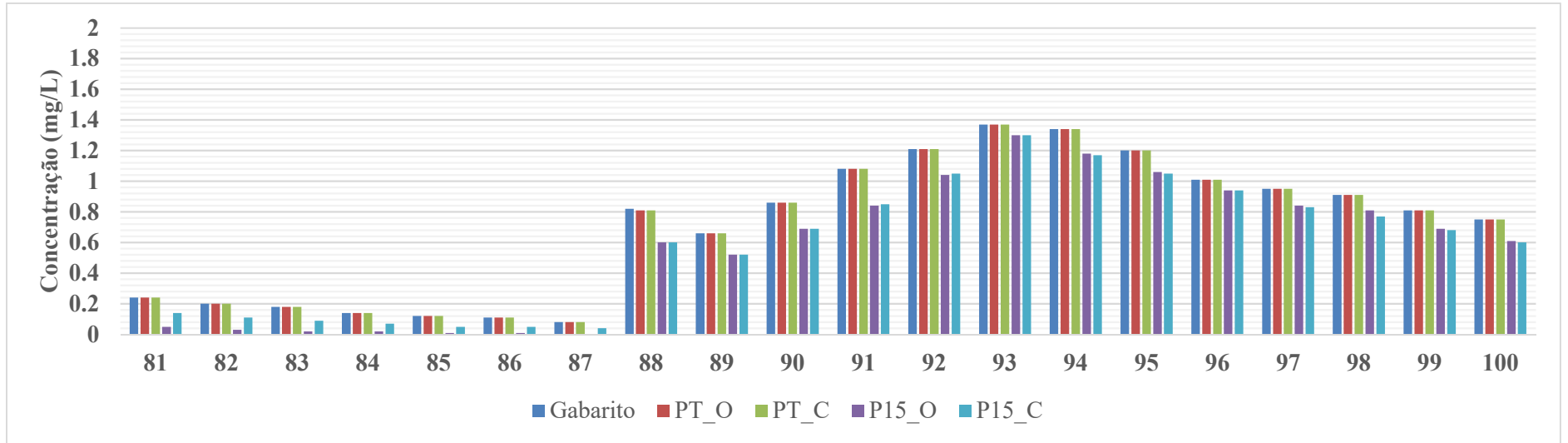
Fonte: Elaborado pelo autor



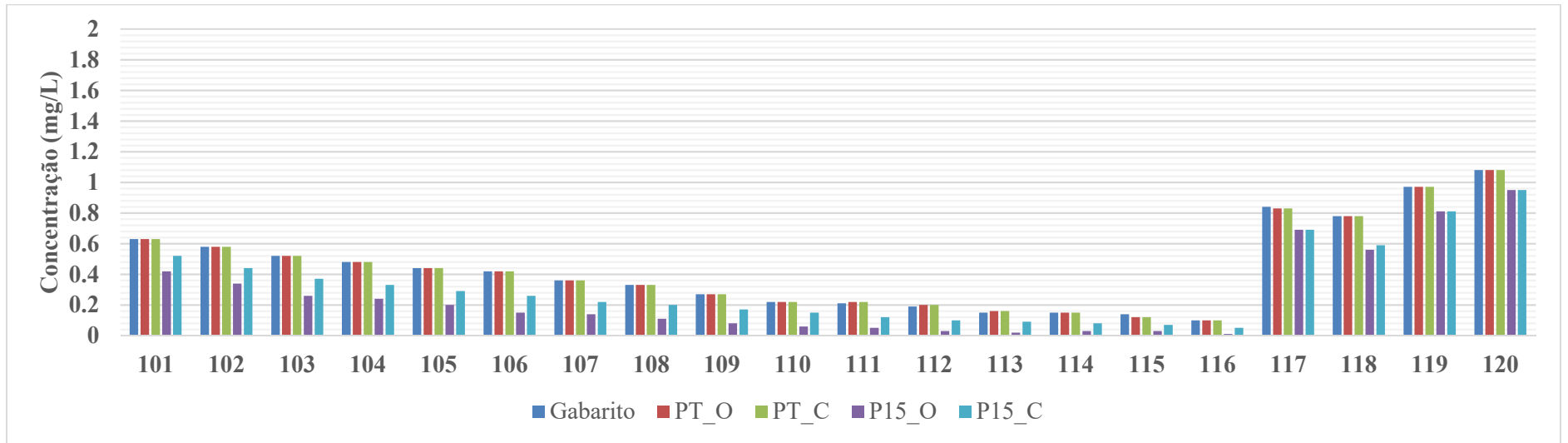
Fonte: Elaborado pelo autor



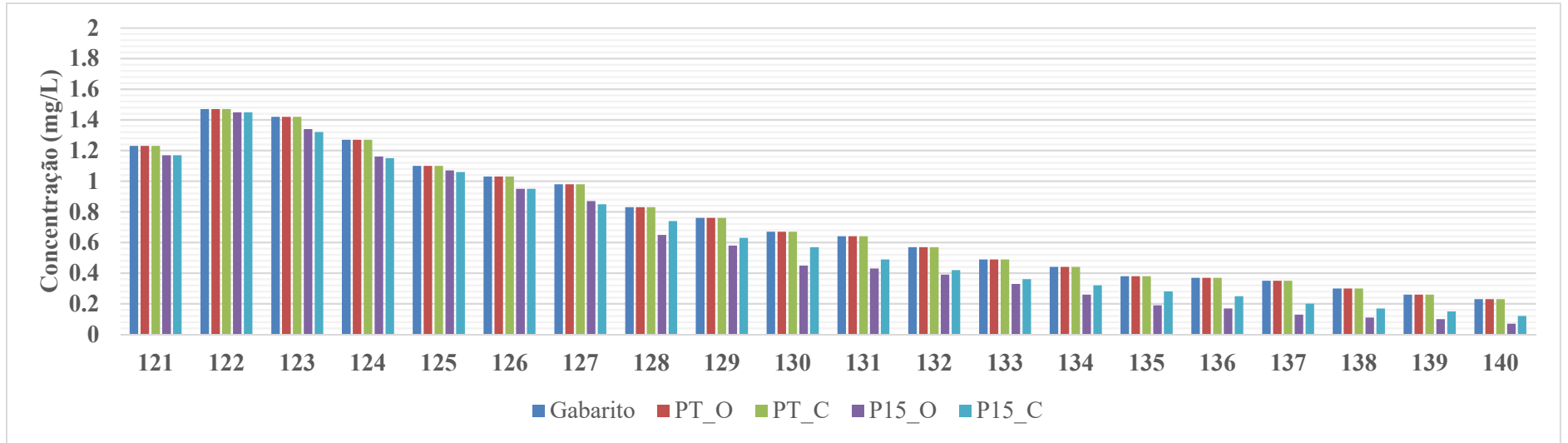
Fonte: Elaborado pelo autor



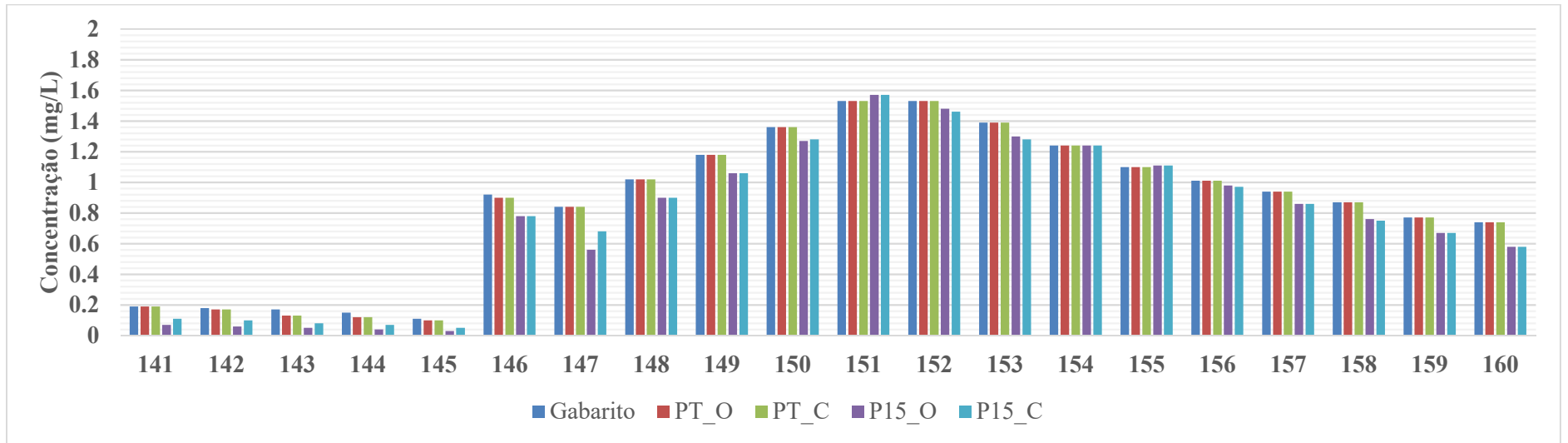
Fonte: Elaborado pelo autor



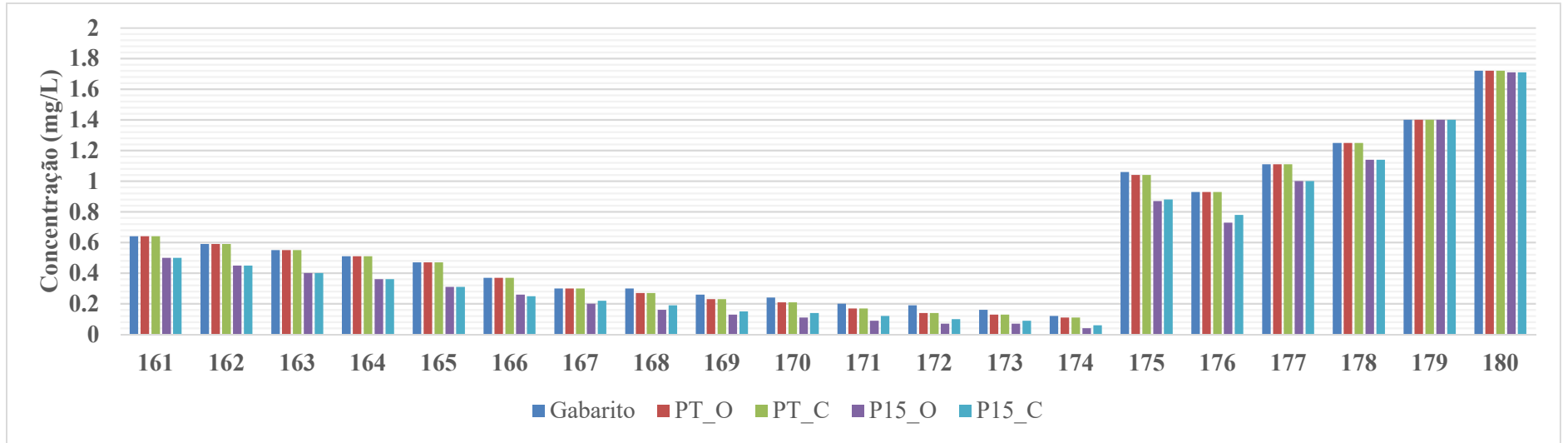
Fonte: Elaborado pelo autor



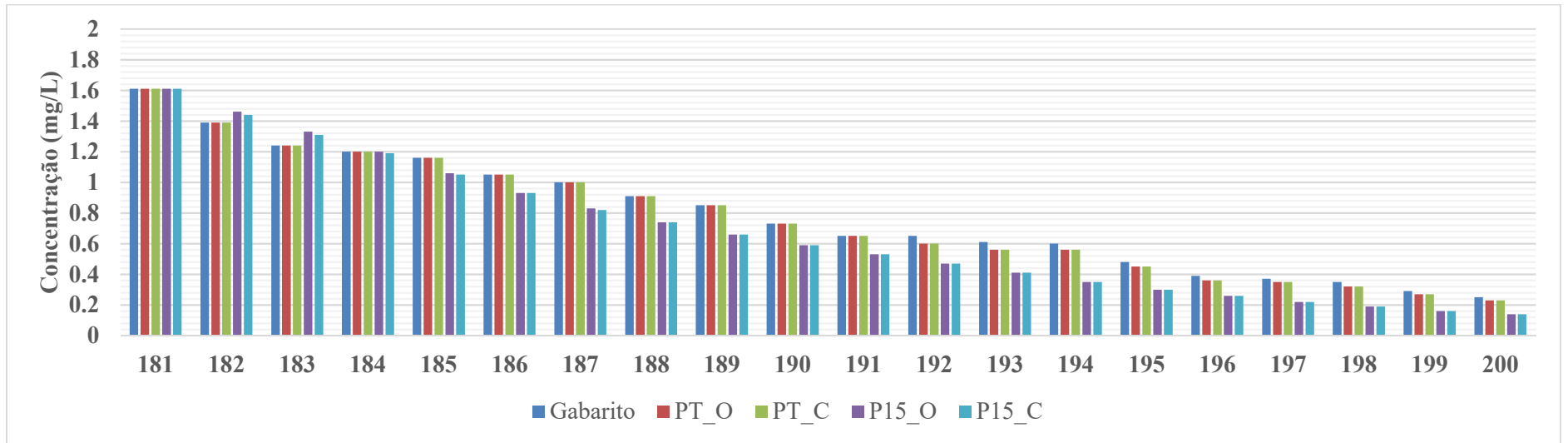
Fonte: Elaborado pelo autor



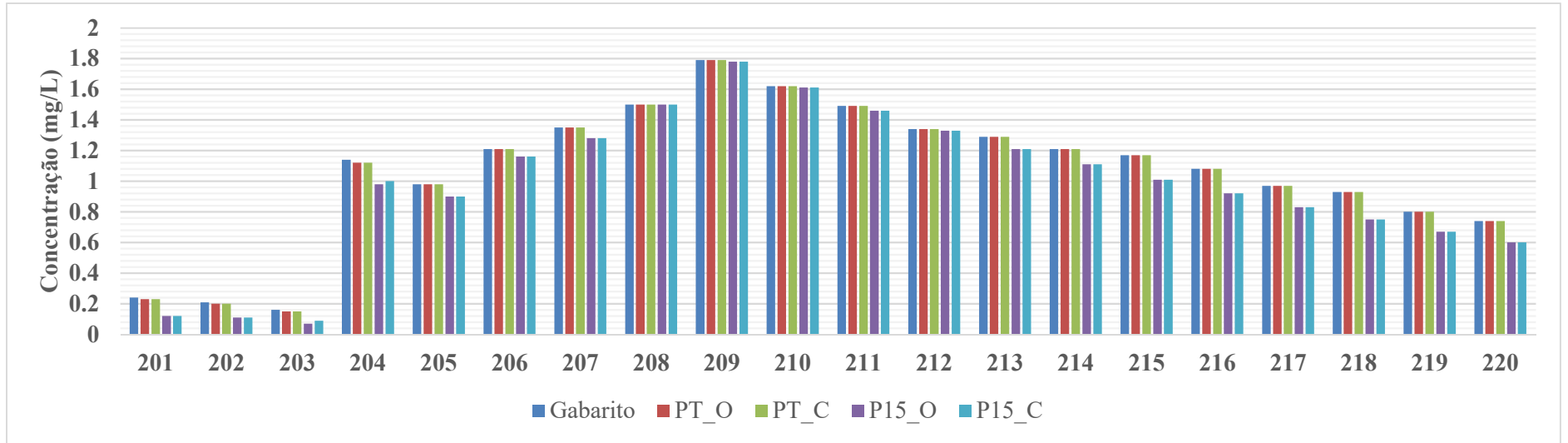
Fonte: Elaborado pelo autor



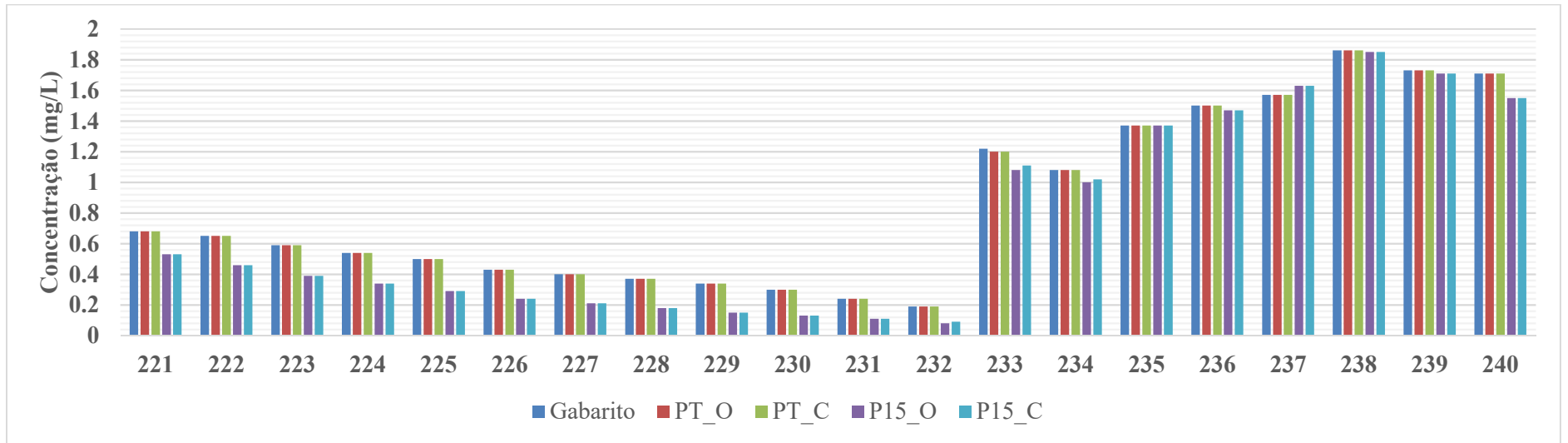
Fonte: Elaborado pelo autor



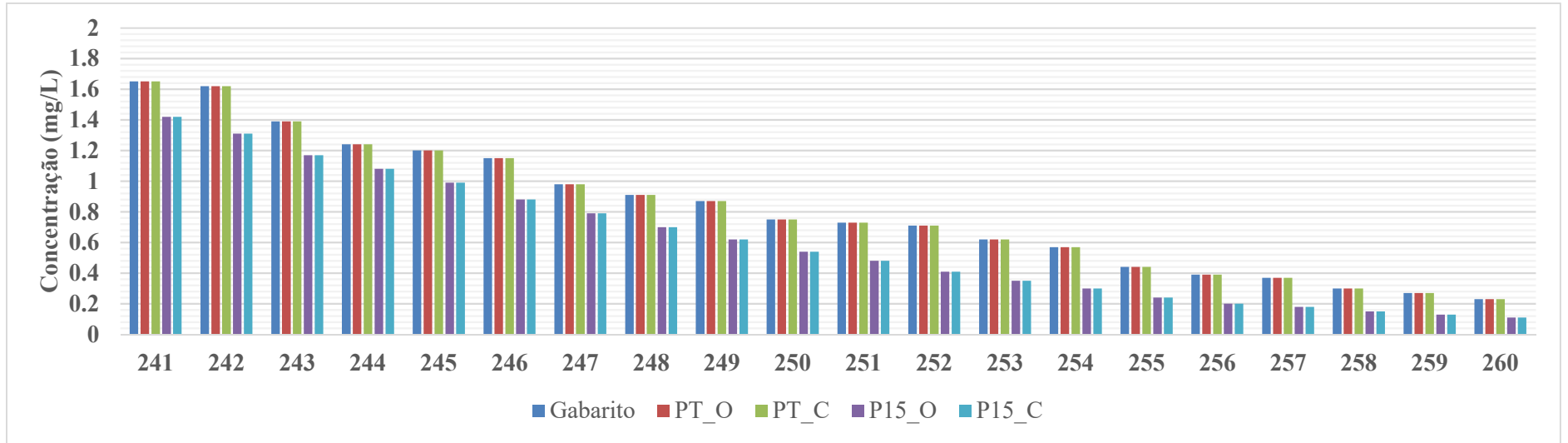
Fonte: Elaborado pelo autor



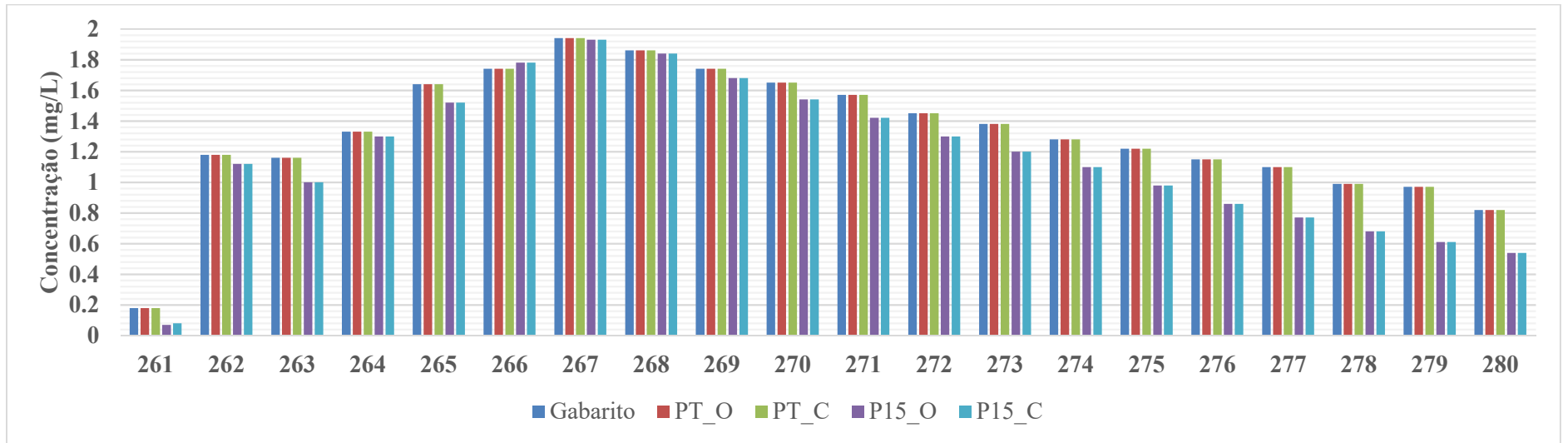
Fonte: Elaborado pelo autor



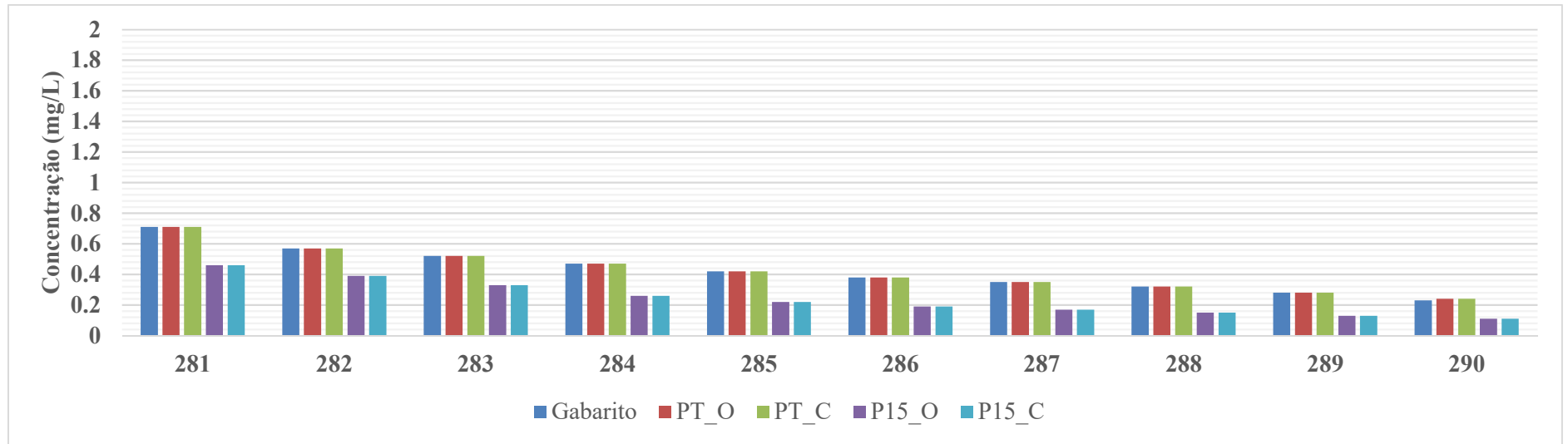
Fonte: Elaborado pelo autor



Fonte: Elaborado pelo autor

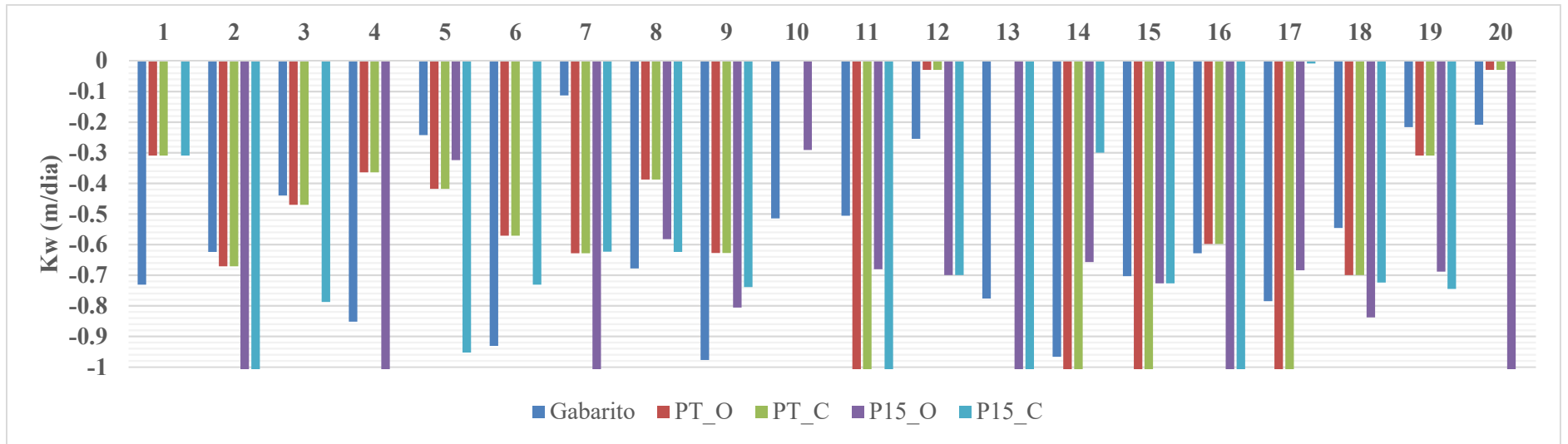


Fonte: Elaborado pelo autor

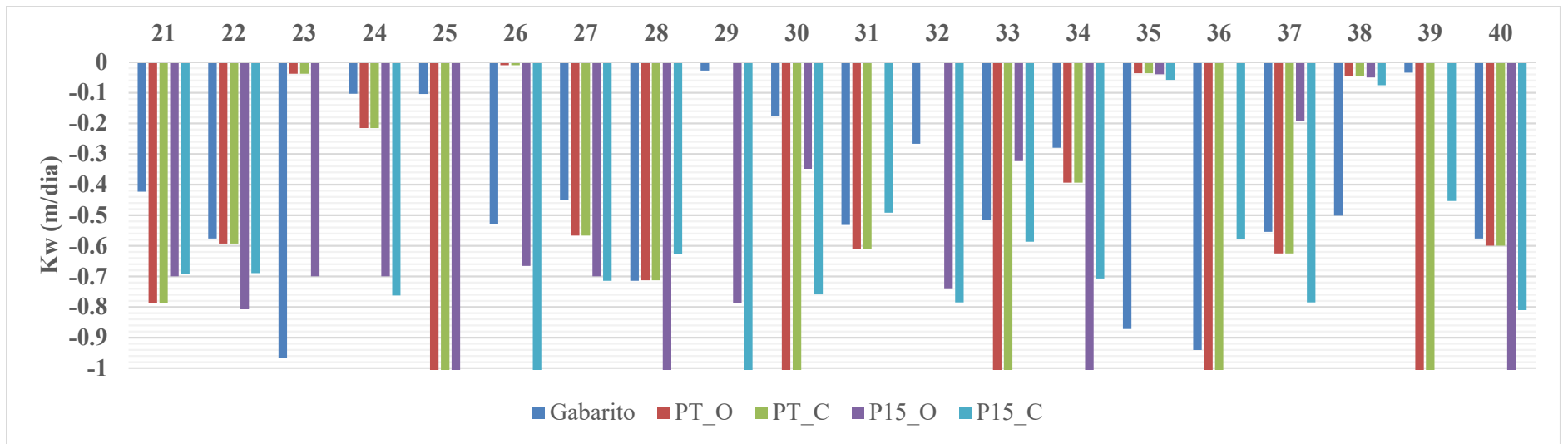


Fonte: Elaborado pelo autor

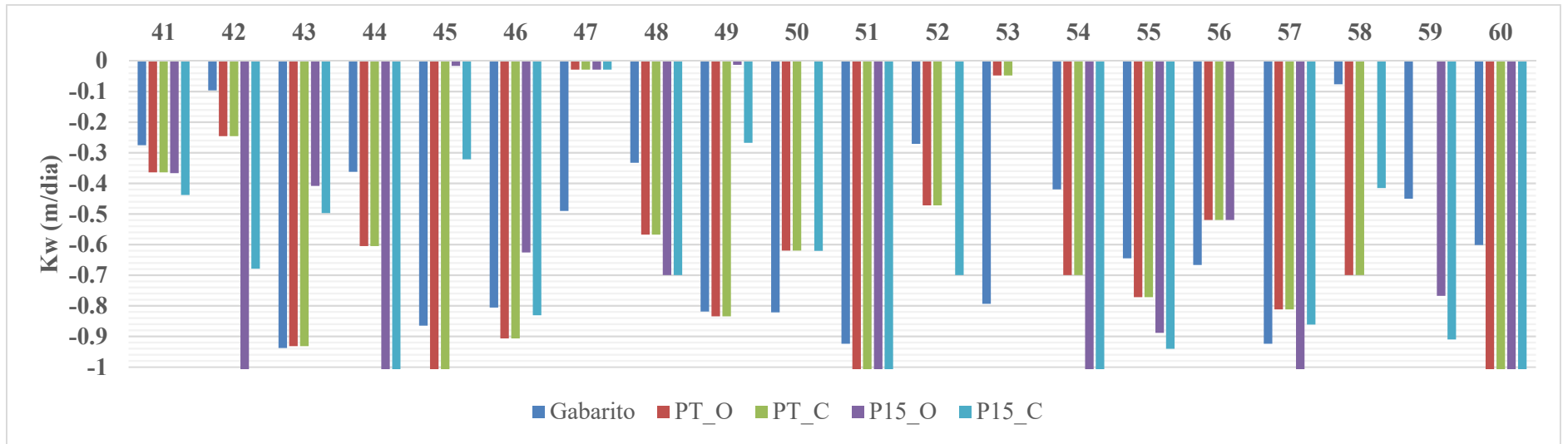
APÊNDICE ER – Coeficientes K_W encontrados na Calibração da constante K de decaimento total do cloro com coeficientes K_W iniciais iguais a -0,7 m/s: rede MIGHA



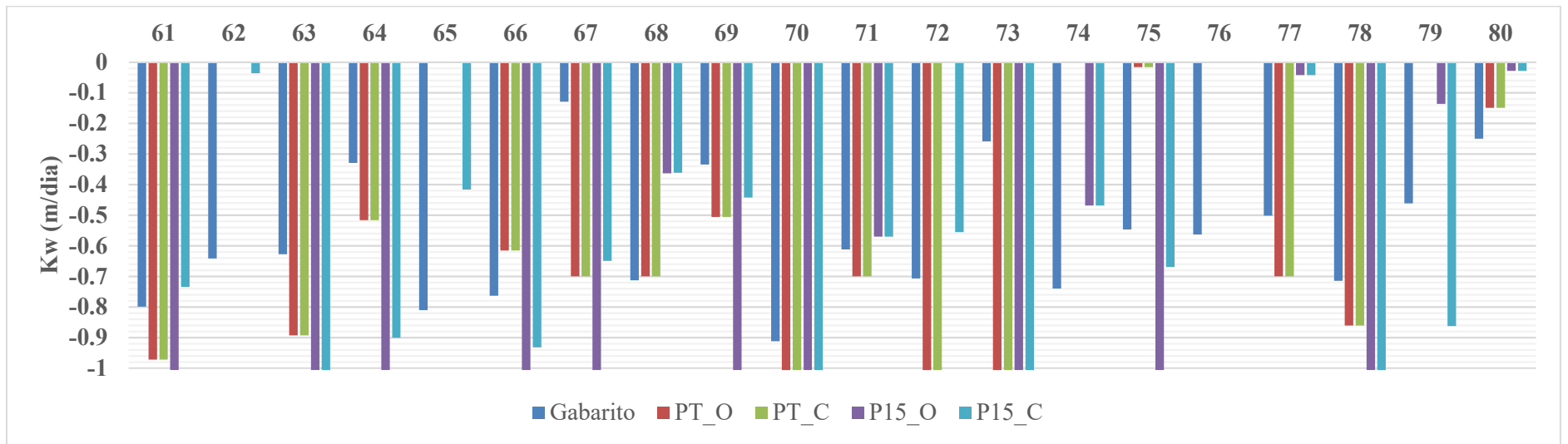
Fonte: Elaborado pelo autor



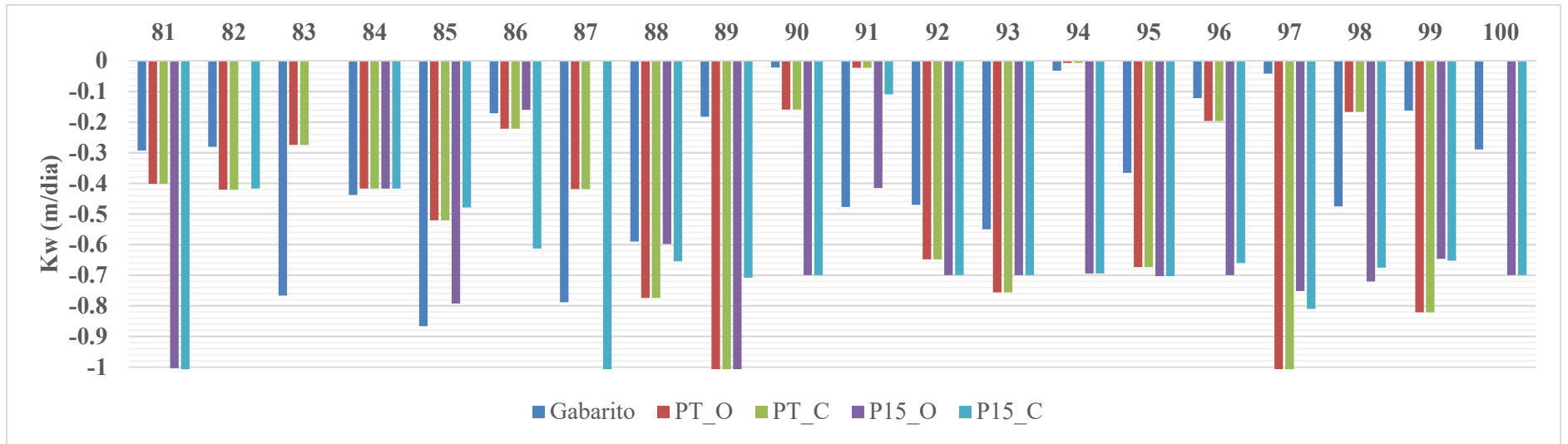
Fonte: Elaborado pelo autor



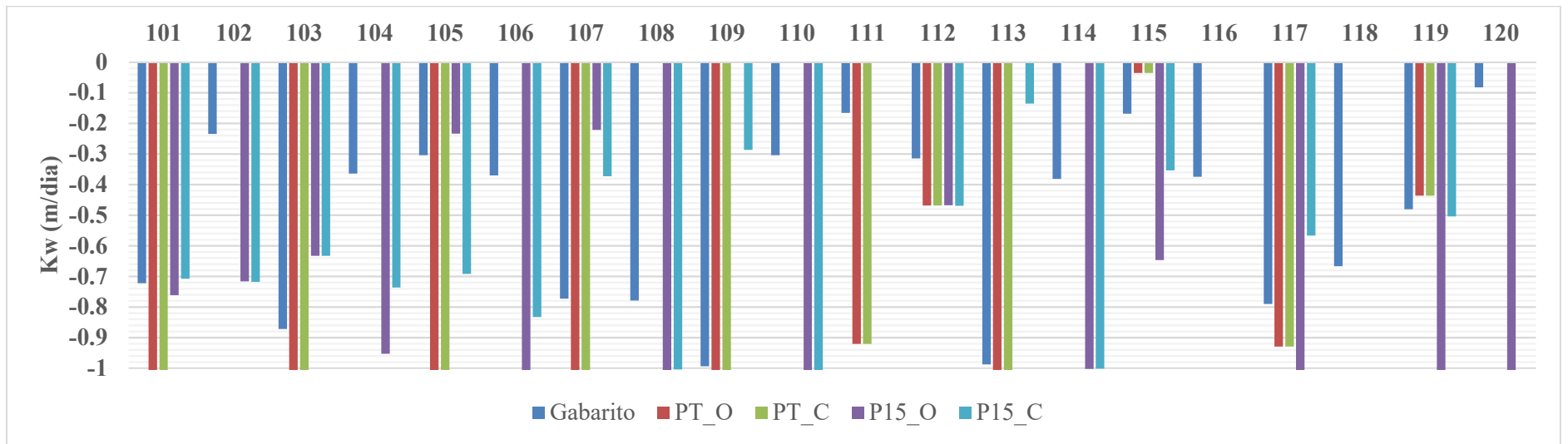
Fonte: Elaborado pelo autor



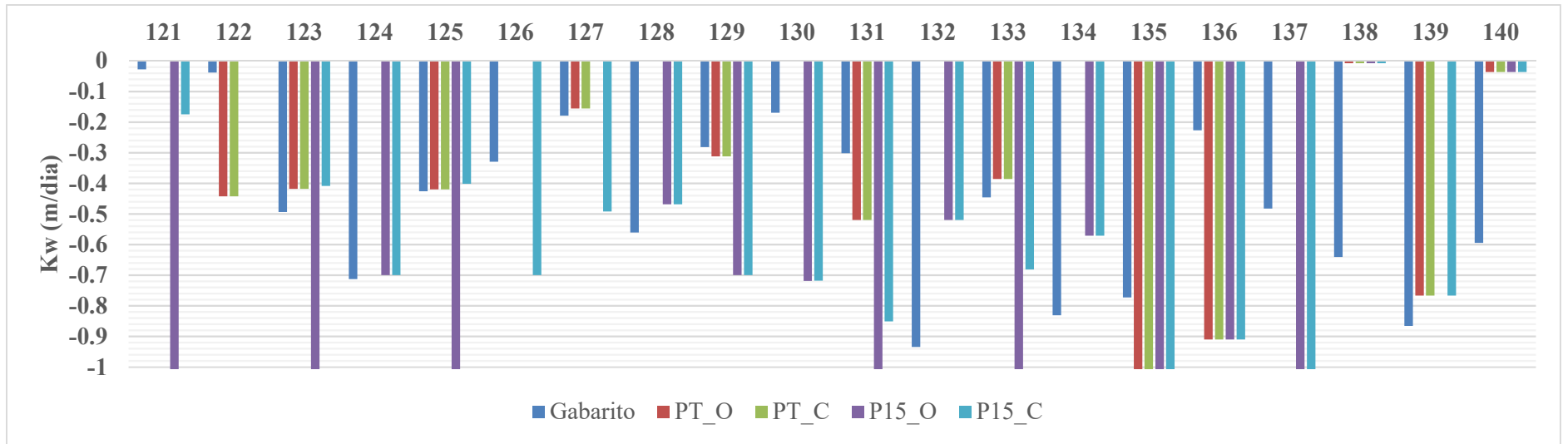
Fonte: Elaborado pelo autor



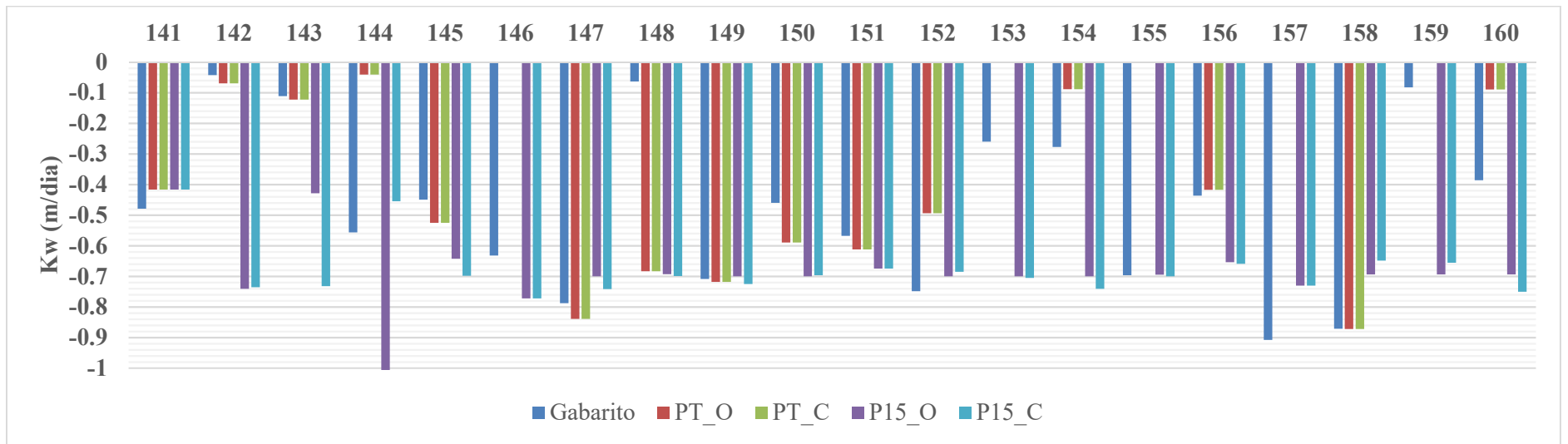
Fonte: Elaborado pelo autor



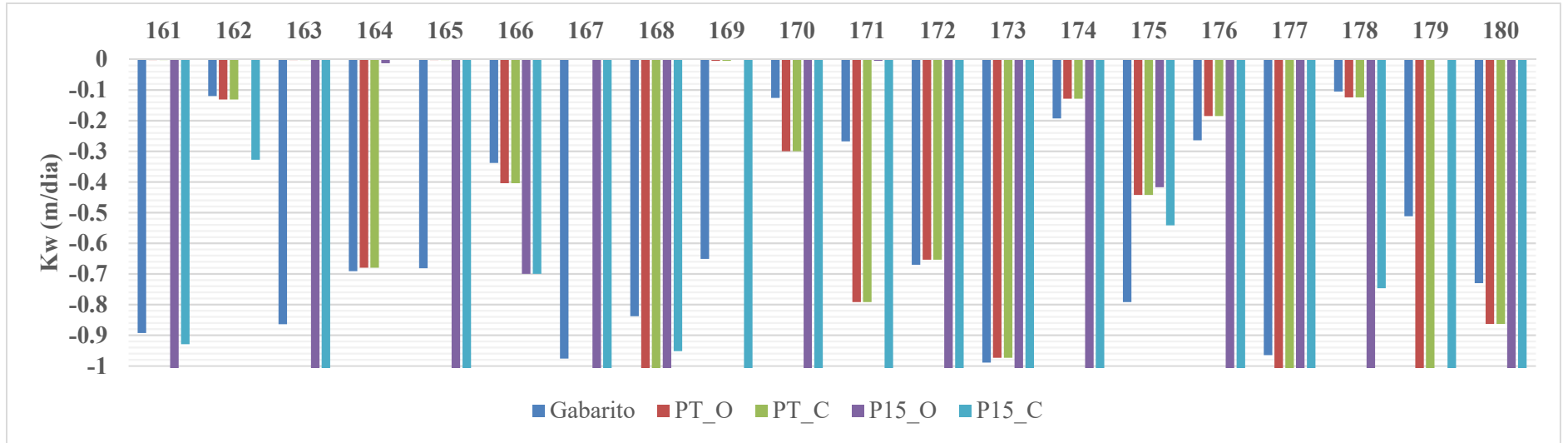
Fonte: Elaborado pelo autor



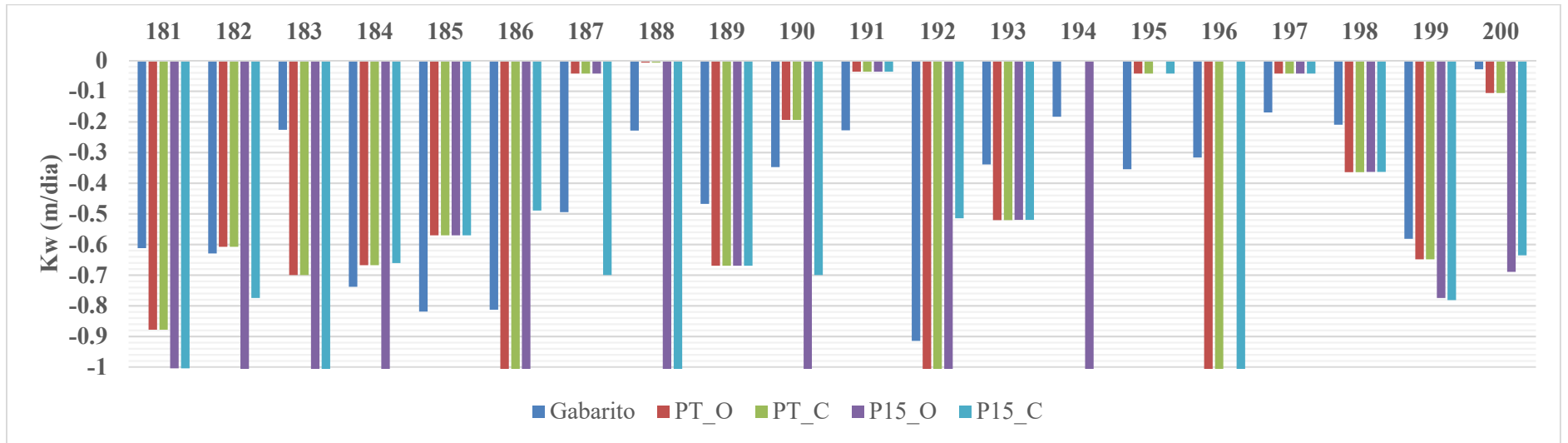
Fonte: Elaborado pelo autor



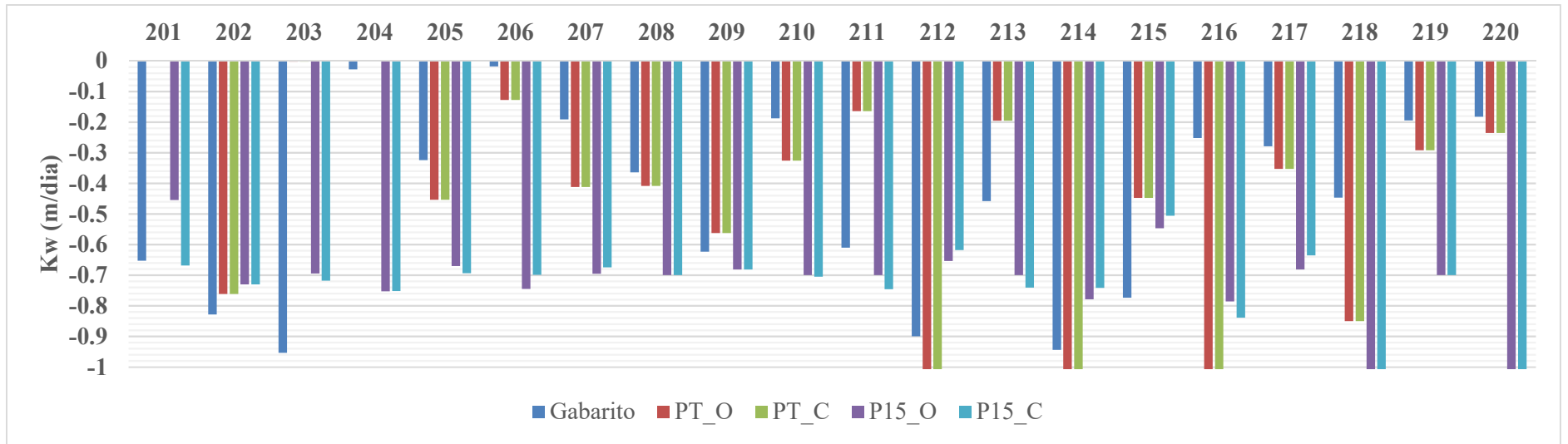
Fonte: Elaborado pelo autor



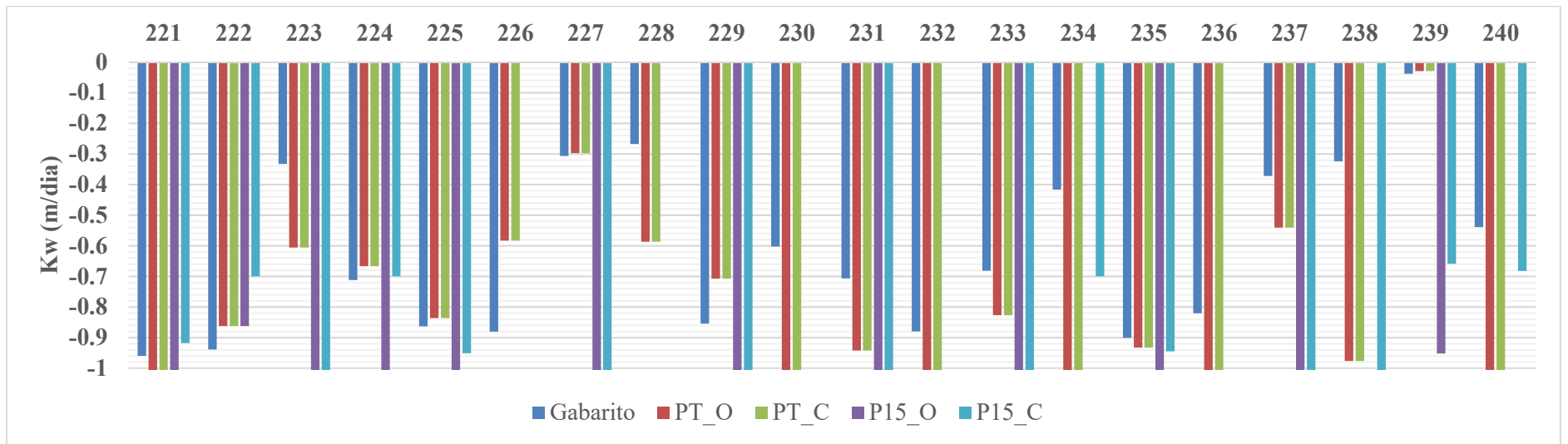
Fonte: Elaborado pelo autor



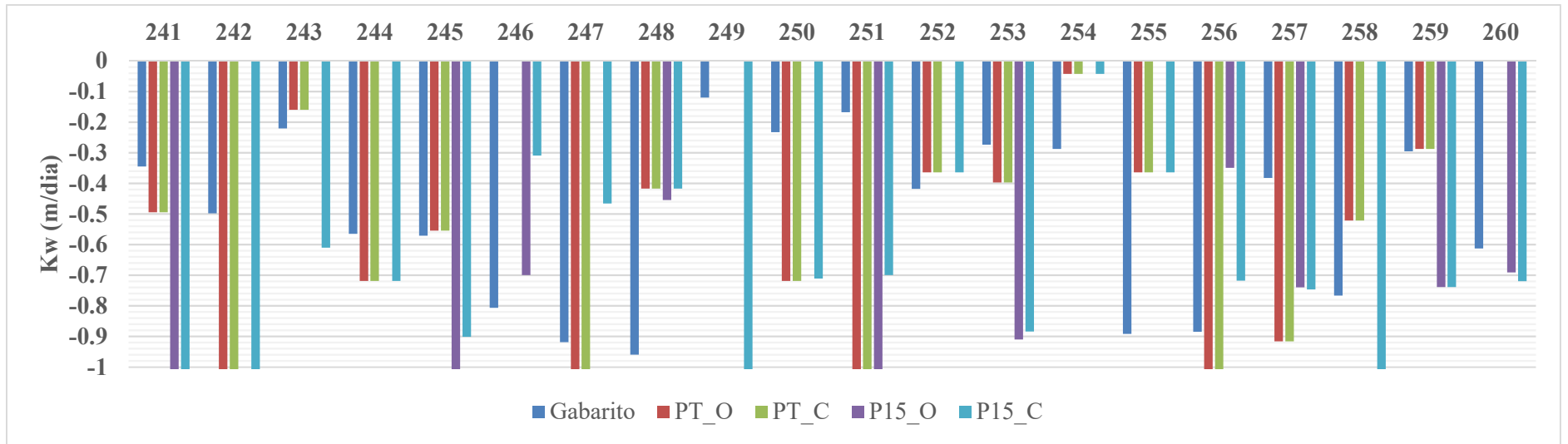
Fonte: Elaborado pelo autor



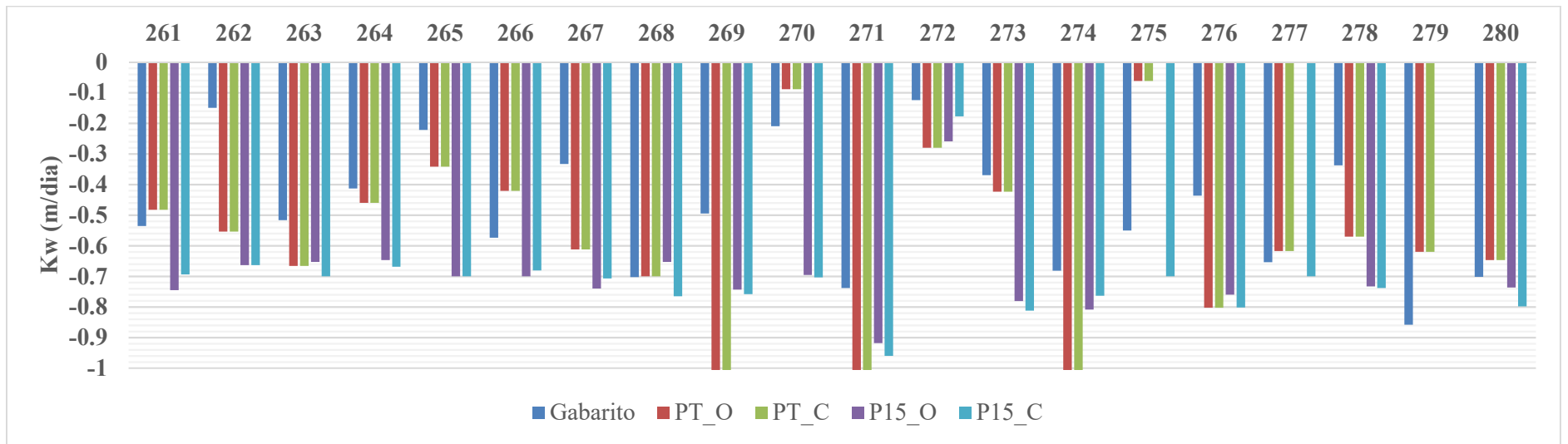
Fonte: Elaborado pelo autor



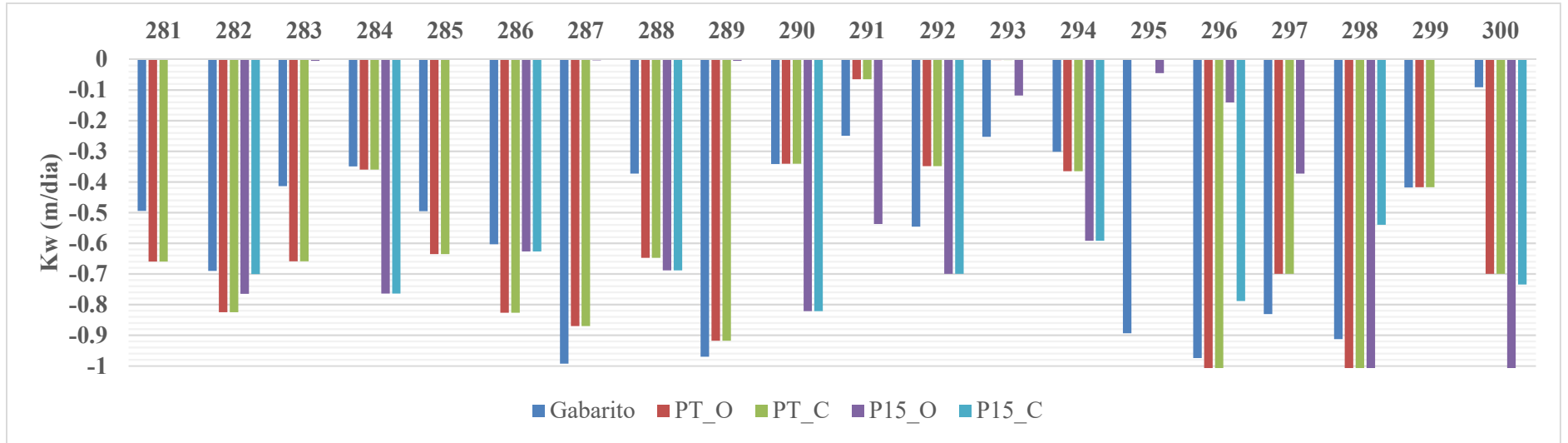
Fonte: Elaborado pelo autor



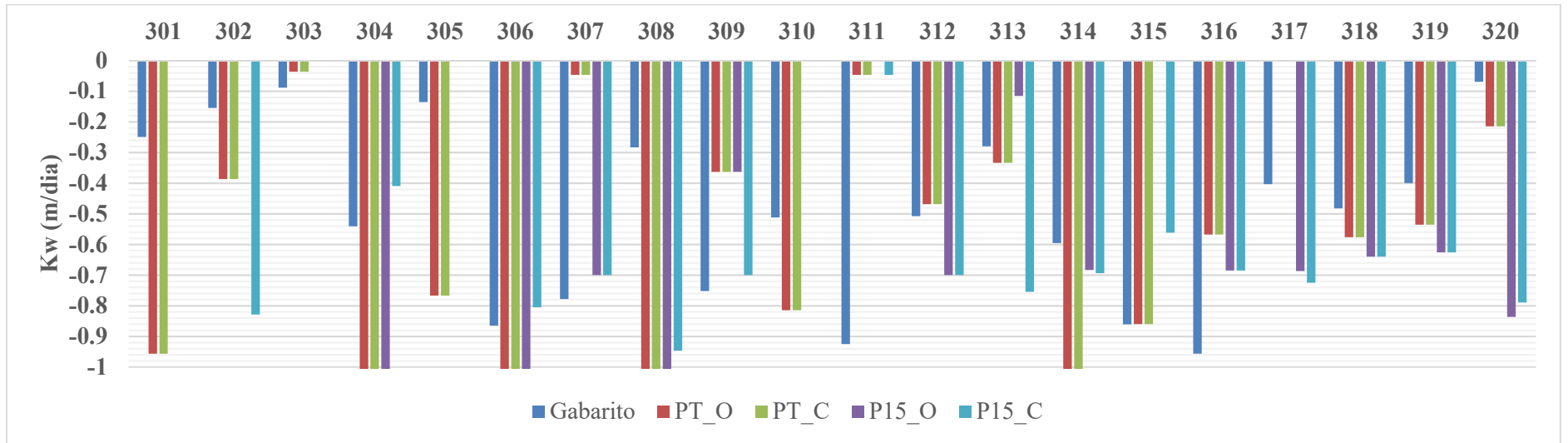
Fonte: Elaborado pelo autor



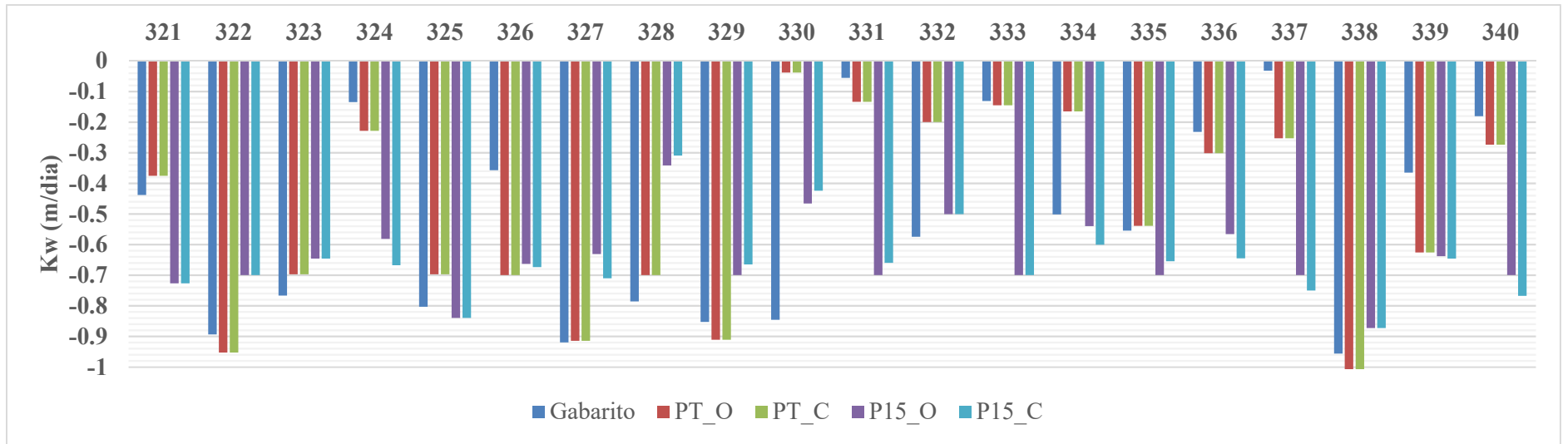
Fonte: Elaborado pelo autor



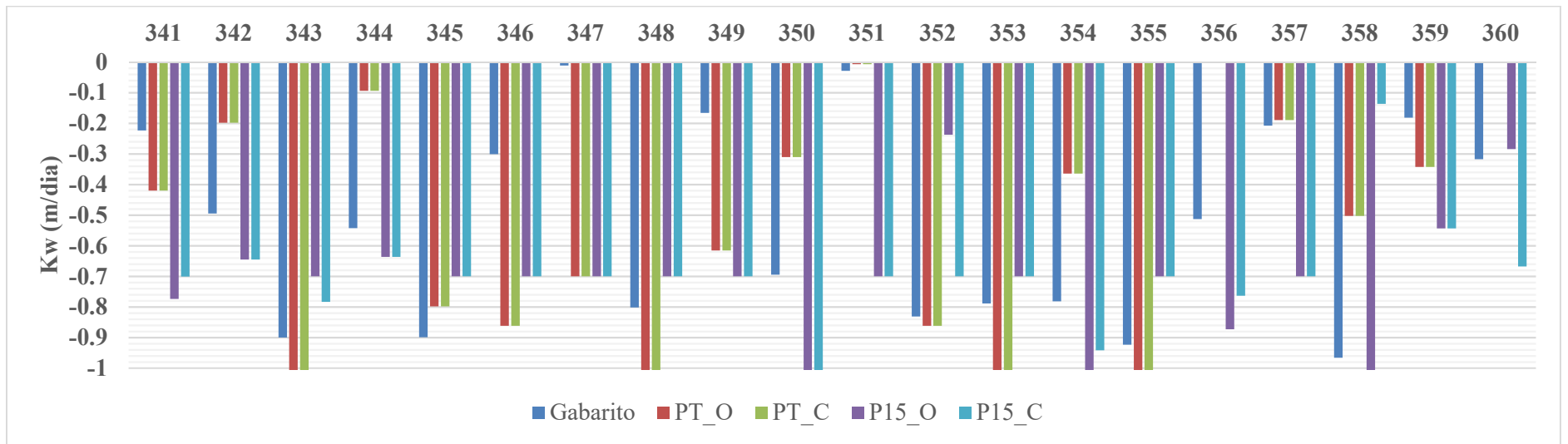
Fonte: Elaborado pelo autor



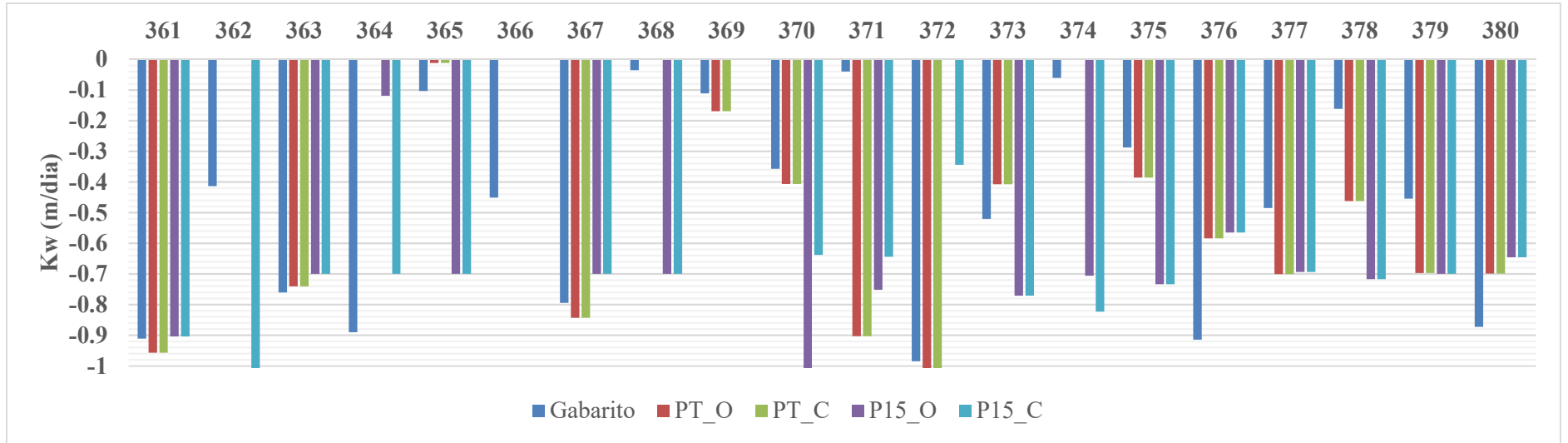
Fonte: Elaborado pelo autor



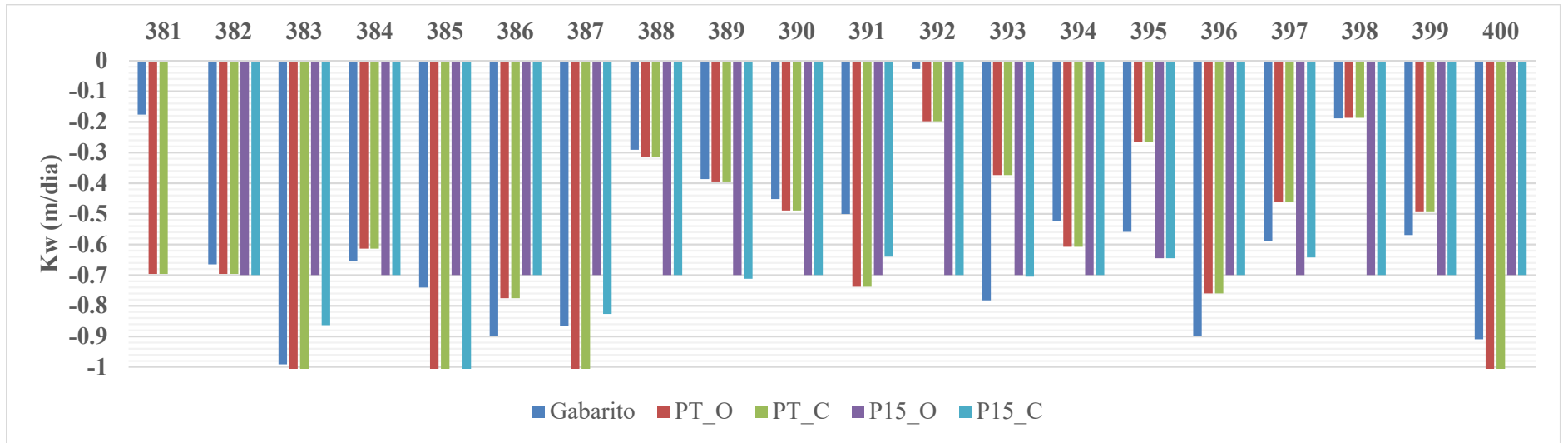
Fonte: Elaborado pelo autor



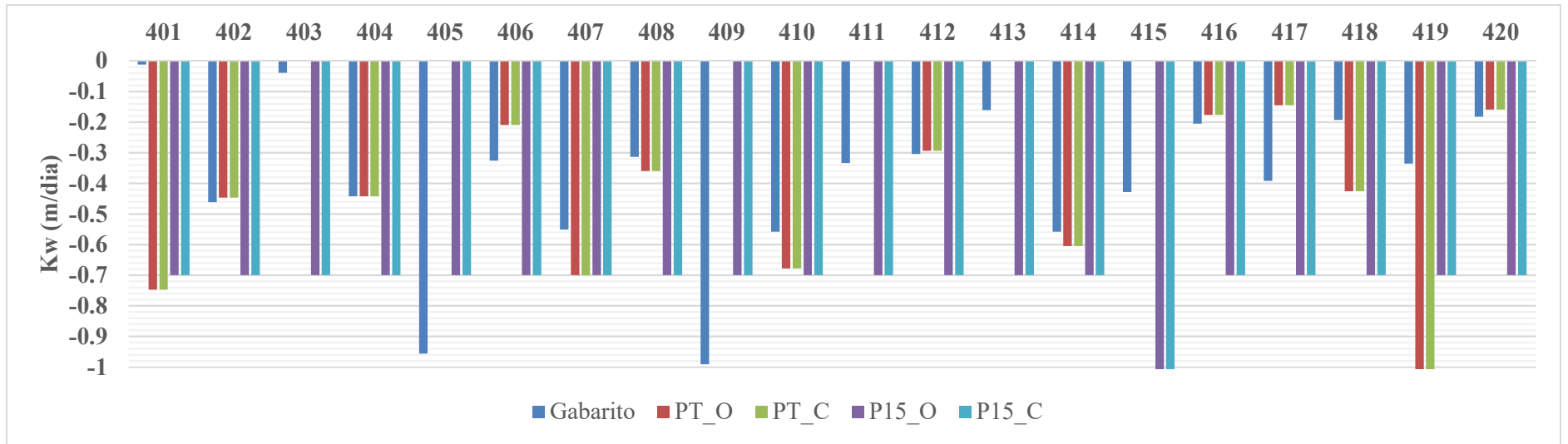
Fonte: Elaborado pelo autor



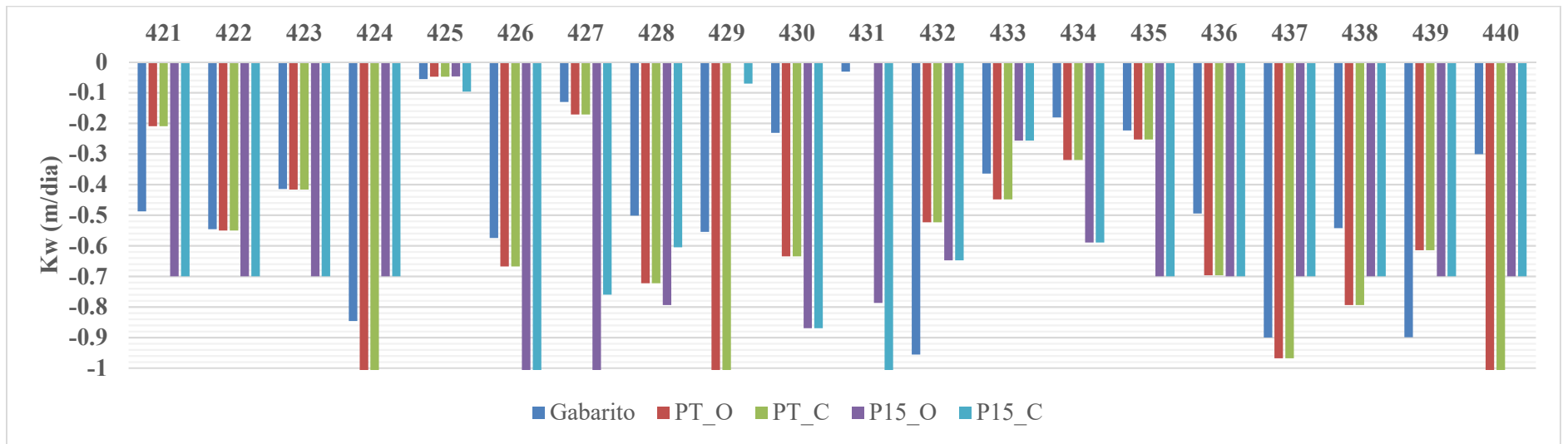
Fonte: Elaborado pelo autor



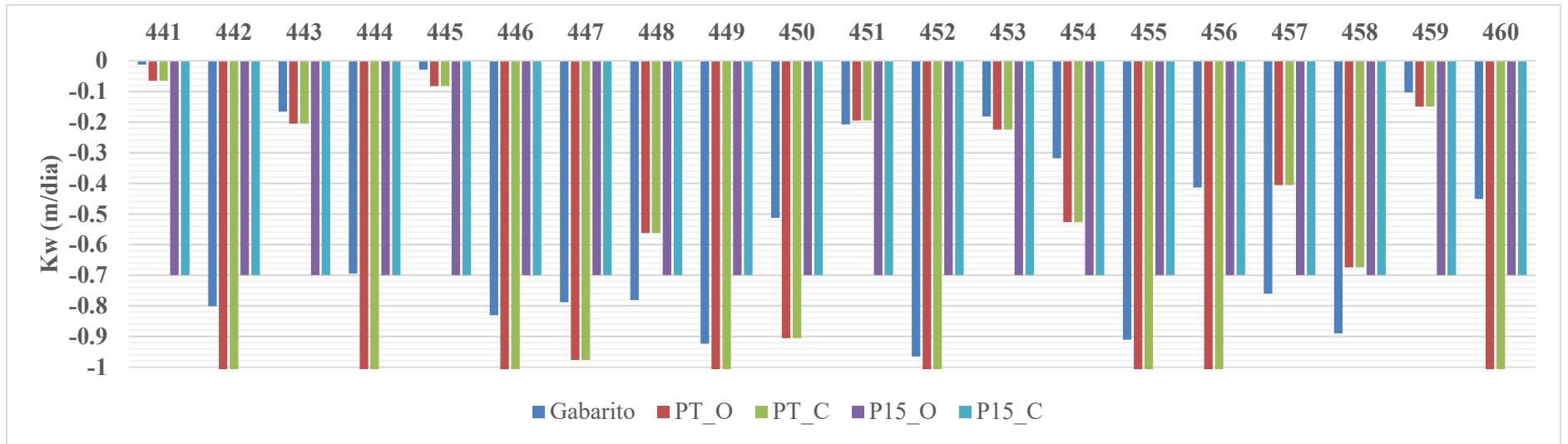
Fonte: Elaborado pelo autor



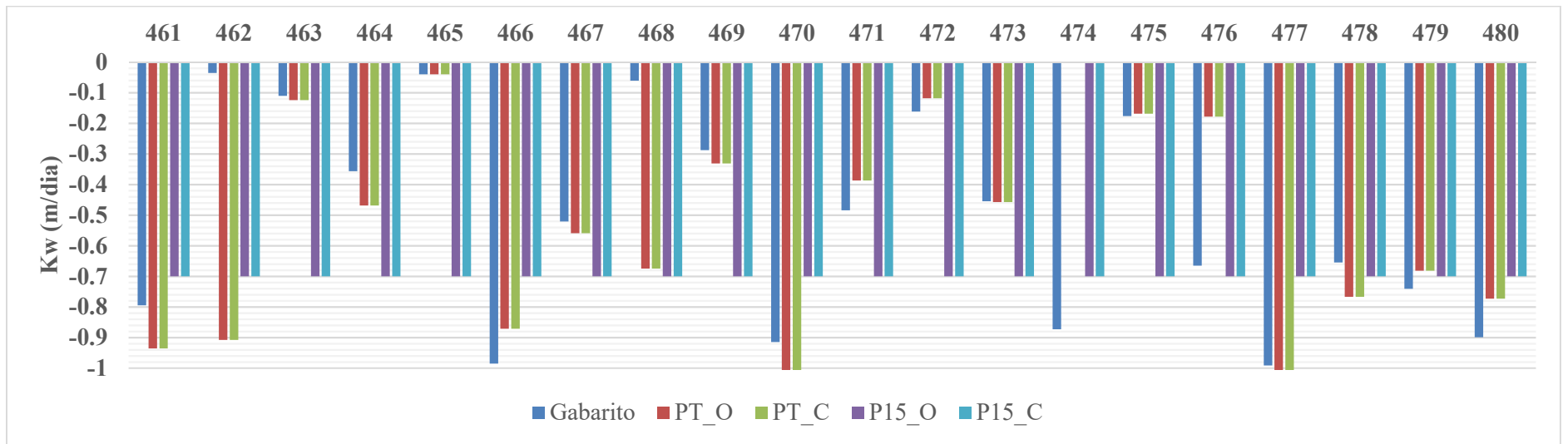
Fonte: Elaborado pelo autor



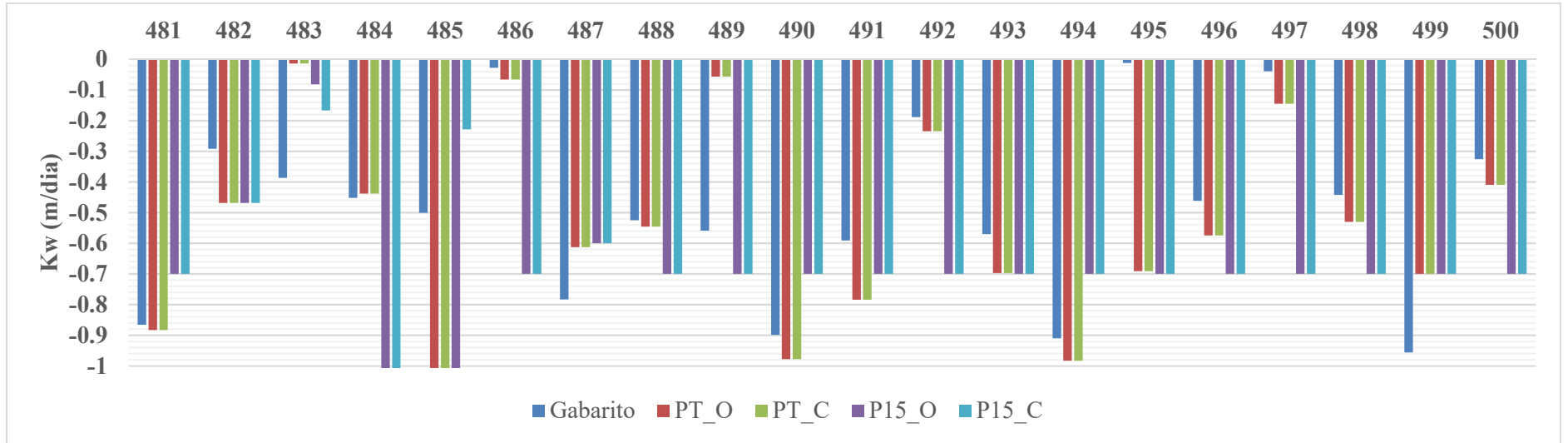
Fonte: Elaborado pelo autor



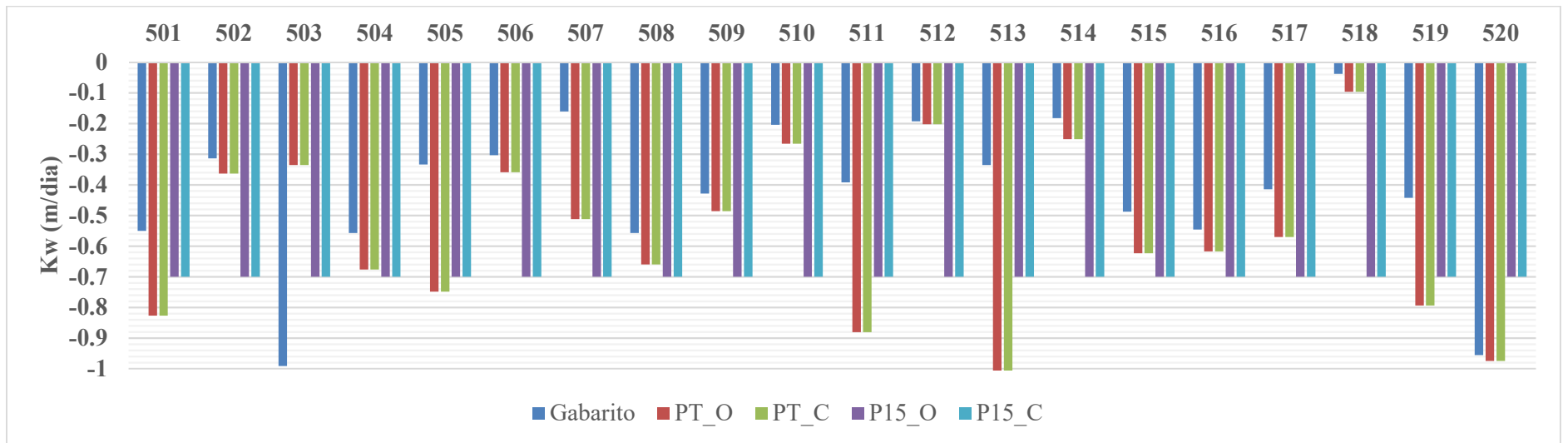
Fonte: Elaborado pelo autor



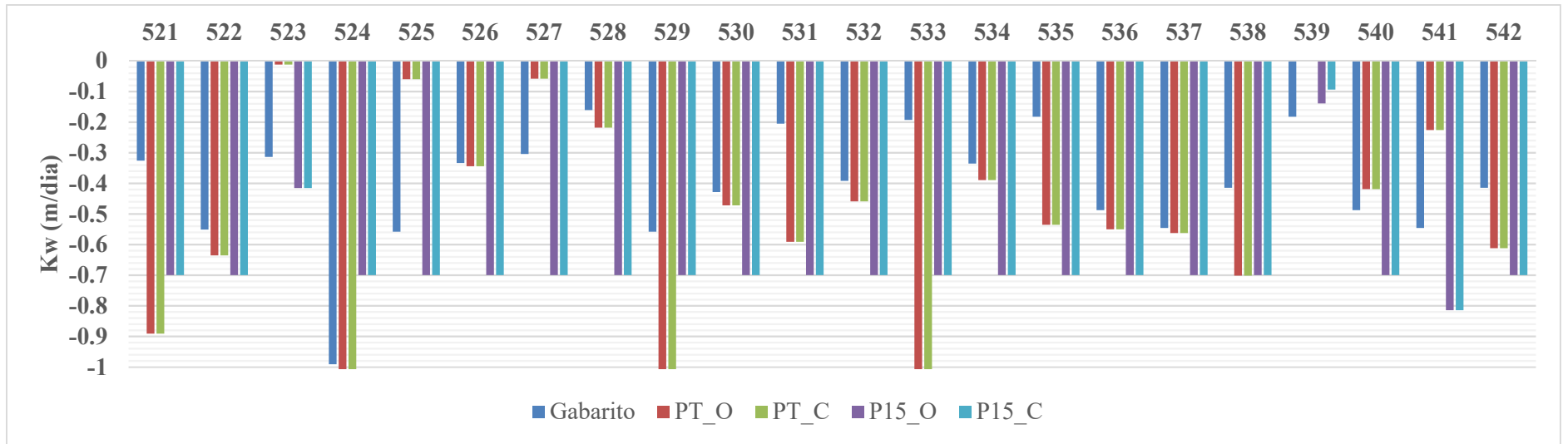
Fonte: Elaborado pelo autor



Fonte: Elaborado pelo autor

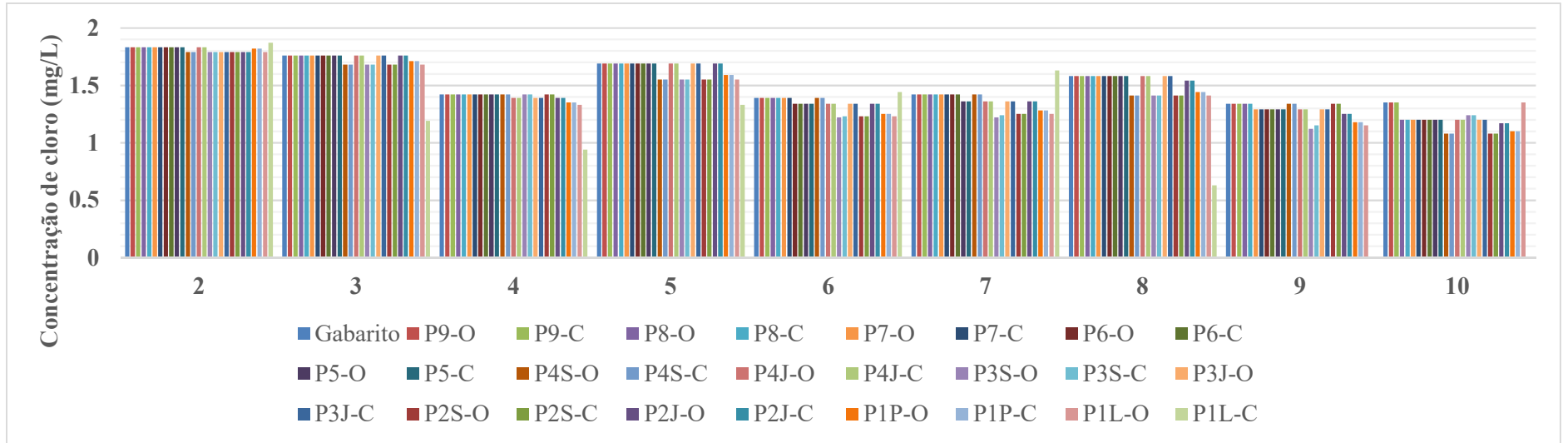


Fonte: Elaborado pelo autor

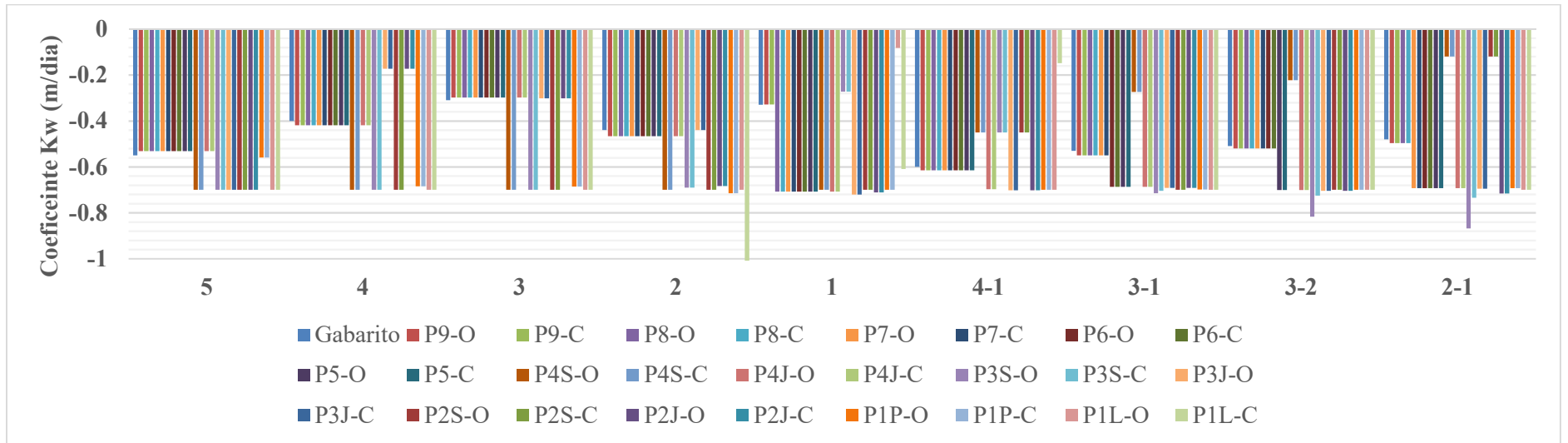


Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE ES – Concentrações de cloro e Coeficientes K_w encontrados na Calibração da constante K de decaimento total do cloro com coeficientes K_w iniciais iguais a -0,7 m/s: rede Porto (2006) Ramificada



Fonte: Elaborado pelo autor



Fonte: Elaborado pelo autor

