



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

DAVID LOPES DE SOUSA

**CALIBRAÇÃO DE RUGOSIDADES ABSOLUTAS E COEFICIENTES DE
DECAIMENTO DE CLORO NAS PAREDES DAS TUBULAÇÕES EM REDES DE
DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA: ABORDAGENS COM REDES NEURAIS ARTIFICIAIS
E MÉTODOS HÍBRIDOS MIGHA-RNA**

FORTALEZA

2024

DAVID LOPES DE SOUSA

CALIBRAÇÃO DE RUGOSIDADES ABSOLUTAS E COEFICIENTES DE
DECAIMENTO DE CLORO NAS PAREDES DAS TUBULAÇÕES EM REDES DE
DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA: ABORDAGENS COM REDES NEURAIS ARTIFICIAIS E
MÉTODOS HÍBRIDOS MIGHA-RNA

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: Professor Marco Aurélio Holanda de Castro, PhD.

Coorientador: Professor Doutor Alessandro de Araújo Bezerra.

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S696c Sousa, David Lopes de.
Calibração de rugosidades absolutas e coeficientes de decaimento de cloro nas paredes das tubulações em redes de distribuição de água : abordagens com redes neurais artificiais e métodos híbridos MIGHA-RNA / David Lopes de Sousa. – 2024.
259 f. : il. color.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2024.
Orientação: Prof. Dr. Marco Aurélio Holanda de Castro.
Coorientação: Prof. Dr. Alessandro de Araújo Bezerra.
1. rede de distribuição de água. 2. calibração. 3. rede neural artificial. 4. MIGHA. 5. método híbrido. I. Título.
-

DAVID LOPES DE SOUSA

CALIBRAÇÃO DE RUGOSIDADES ABSOLUTAS E COEFICIENTES DE
DECAIMENTO DE CLORO NAS PAREDES DAS TUBULAÇÕES EM REDES DE
DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA: ABORDAGENS COM REDES NEURAIS ARTIFICIAIS E
MÉTODOS HÍBRIDOS MIGHA-RNA

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: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Alessandro de Araújo Bezerra (Coorientador)
Universidade Federal do Piauí (UFPI)

Prof. Dr. Jean Leite Tavares
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN)

Prof. Dr. Ricardo de Aragão
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

Prof. Dr. Paulo Roberto Lacerda Tavares
Universidade Federal do Cariri (UFCA)

Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus pais, Edileusa e José Euicío.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 88887.483398/2020-00.

Expresso minha gratidão a Deus, que me concedeu a sabedoria e a determinação necessárias para alcançar mais este marco em minha jornada.

Aos meus pais, Edileusa Francisca da Silva e José Euício de Sousa, minha gratidão é imensurável. Seu amor incondicional, apoio constante e os valores que inculcaram em mim ao longo da minha vida foram a base do meu crescimento e sucesso.

Aos meus irmãos, Duaran e Donaldt, agradeço por serem pilares de apoio e inspiração, mesmo estando à distância.

À minha noiva, Ana Teresa, minha parceira e amor da minha vida, agradeço por sua compreensão e apoio constante, mesmo nos momentos em que a pesquisa exigiu minha total dedicação.

Ao meu orientador, Prof. Marco Aurélio Holanda de Castro, Ph.D., sou profundamente grato por compartilhar seu conhecimento, por sua orientação dedicada e pela confiança que depositou em mim ao longo desta jornada acadêmica.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Alessandro de Araújo Bezerra, agradeço pela paciência, pelas inúmeras reuniões produtivas e pela sua disponibilidade em colaborar ativamente no desenvolvimento deste trabalho. Sua orientação foi um elemento-chave para o sucesso desta pesquisa.

Aos participantes da banca examinadora, Prof. Dr. Jean Leite Tavares, Prof. Dr. Ricardo de Aragão, Prof. Dr. Paulo Roberto Lacerda Tavares e Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto, agradeço pelo tempo dedicado à avaliação do meu trabalho e pelas contribuições valiosas que enriqueceram esta tese.

A todos os colegas do Laboratório de Hidráulica Computacional – LHC, agradeço pela colaboração, amizade e pelo ambiente de apoio mútuo que tornaram possível este trabalho. Um agradecimento especial ao Rafael, cuja amizade e incentivo foram fundamentais ao longo deste percurso acadêmico.

Por fim, expresso minha gratidão à Universidade Federal do Ceará (UFC) por me acolher como pesquisador durante este doutorado, proporcionando um ambiente acadêmico rico em oportunidades de aprendizado e desenvolvimento.

“O saber a gente aprende com os mestres e os livros. A sabedoria se aprende é com a vida e com os humildes.” (Cora Coralina)

RESUMO

Um modelo computacional de rede de distribuição de água, capaz de realizar simulações hidráulicas e de transporte de cloro, representa um recurso valioso no contexto das empresas e companhias de saneamento. Contudo, a complexidade decorrente da grande quantidade de parâmetros e das incertezas associadas representa um desafio significativo na construção desses modelos. Nesta pesquisa, foram desenvolvidos e testados métodos de calibração para as rugosidades absolutas e para os coeficientes de decaimento de cloro nas paredes das tubulações (kw), utilizando algoritmos baseados em Redes Neurais Artificiais (RNA) e métodos híbridos que combinam o Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo (MIGHA) com um Perceptron Multicamadas (PMC). Quatro métodos foram desenvolvidos e avaliados em três redes fictícias com características distintas. Diferentes cenários foram explorados, variando a quantidade de dados observados nos testes. Os resultados obtidos pelos métodos desenvolvidos foram comparados entre si e também com os produzidos por calibrações que empregaram exclusivamente o MIGHA e Algoritmos Genéticos, considerando os parâmetros ajustados e as variáveis de estado do modelo, como cargas de pressão, vazões e concentrações de cloro retornadas pelas redes calibradas. Ademais, idealizou-se uma adaptação para o MIGHA a fim de viabilizar calibrações dinâmicas, além de se construir uma interface gráfica para um *software* que utiliza os algoritmos desenvolvidos. Os resultados sugerem que os métodos RNA-G e Híbrido-G, que empregam uma rotina de calibração por grupo de tubulações semelhantes, tendem a ser superiores, na maioria dos casos, aos modelos RNA-T e Híbrido-T, que realizam a atualização dos parâmetros trecho a trecho. Ensaio adicionais indicaram que os métodos de calibração por trecho têm potencial para superar aqueles baseados na metodologia por grupo, desde que a delimitação da faixa de variação dos parâmetros, usada na geração dos dados de treinamento e teste dos PMCs, seja precisa. Além disso, este trabalho também contemplou a modelagem da rede da Universidade Federal do Piauí (UFPI), onde se usou o método Híbrido-G para a calibração das rugosidades absolutas do modelo. Após a calibração, o erro absoluto médio para as cargas de pressão foi de 0,40 mca, resultado considerado satisfatório para as condições do estudo. Os métodos e adaptações desenvolvidos representam um avanço promissor para aprimorar a confiabilidade e a eficiência da calibração de redes de distribuição de água, contribuindo para a gestão mais precisa e segura dos sistemas de saneamento.

Palavras-chave: rede de distribuição de água; calibração; rede neural artificial; MIGHA; método híbrido.

ABSTRACT

A computational model of a water distribution network capable of performing hydraulic and chlorine transport simulations is a valuable resource for water utility companies. However, the complexity due to numerous parameters and associated uncertainties presents a significant challenge in constructing these models. In this research, calibration methods were developed and tested for pipe absolute roughness and chlorine wall decay coefficients (k_w), using algorithms based on Artificial Neural Networks (ANN) and hybrid methods that combine the Alternative Hydraulic Gradient Iterative Method (MIGHA) with a Multilayer Perceptron (MLP). Four methods were developed and evaluated in three fictitious networks with distinct characteristics. Different scenarios were explored, varying the amount of observed data used in the tests. The results obtained by the developed methods were compared to each other and to those produced by calibrations using only MIGHA and Genetic Algorithms, considering the adjusted parameters and state variables of the model, such as pressure heads, flows, and chlorine concentrations returned by the calibrated networks. Additionally, an adaptation for MIGHA was designed to enable dynamic calibrations, and a graphical interface was developed for a *software* application using the developed algorithms. The results suggest that the G-ANN and G-Hybrid methods, which use a group-based calibration routine for similar pipes, tend to outperform, in most cases, the S-ANN and S-Hybrid models, which update parameters segment by segment. Further tests indicated that segment-based calibration methods have the potential to surpass those based on group methodology, provided that the parameter variation range used in the training and testing data generation for the MLPs is precise. Furthermore, this study also involved the modeling of the Federal University of Piauí (UFPI) network, where the G-Hybrid method was used to calibrate the model's absolute roughness. After calibration, the mean absolute error for pressure heads was 0.40 mH₂O, a result deemed satisfactory for the study conditions. The developed methods and adaptations represent a promising advancement in improving the reliability and efficiency of water distribution network calibration, contributing to more accurate and safer water system management.

Keywords: water distribution network; calibration; artificial neural network; MIGHA; hybrid method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Exemplo simplificado de um sistema de abastecimento.....	28
Figura 2	– Exemplo de rede ramificada.....	29
Figura 3	– Exemplo de rede malhada.....	29
Figura 4	– Exemplo de variação horária do consumo de água em uma RDA.....	32
Figura 5	– Exemplo de variação horária do consumo de água em uma RDA, nos diferentes dias da semana.....	32
Figura 6	– Classificações quanto ao regime de escoamento.....	34
Figura 7	– Distribuição do ácido hipocloroso e do íon hipoclorito em função do pH, para a temperatura de 25 °C.....	40
Figura 8	– Exemplo de Rede Calculada e Rede Observada no MIGHA.....	50
Figura 9	– Exemplo de atuação da sub-rotina de uniformização em uma dada iteração.	53
Figura 10	– Modelo matemático de um neurônio.....	59
Figura 11	– Comparação entre função <i>ReLu</i> e <i>Leaky ReLu</i>	61
Figura 12	– Principais arquiteturas de Redes Neurais Artificiais.....	62
Figura 13	– Interface gráfica do EPANET.....	67
Figura 14	– Interface do UFC2 e UFC10 interna ao AutoCAD.....	69
Figura 15	– Exemplo de aplicação do UFC2 e UFC10.....	69
Figura 16	– Interface externa do UFC10.....	70
Figura 17	– Fluxograma geral das etapas da pesquisa.....	71
Figura 18	– Arquivos para UFC10.....	73
Figura 19	– Arquivo Dados.u10.....	74
Figura 20	– Fluxograma do MIGHA Dinâmico.....	75
Figura 21	– Exemplo do modelo RNA-G.....	79
Figura 22	– Exemplo do modelo RNA-T.....	79

Figura 23 – Fluxograma dos métodos com uso exclusivo de RNA.....	81
Figura 24 – Fluxograma dos métodos híbridos MIGHA-RNA.....	83
Figura 25 – Rede Heller-Pádua.....	84
Figura 26 – Rede Porto.....	86
Figura 27 – Rede Sousa.....	88
Figura 28 – Padrão de consumo da Rede Sousa.....	89
Figura 29 – Localização das RDAs da UFPI, na cidade de Teresina-PI: Rede CT-CCHL na região em vermelho e Rede CCN-CCS na região em azul.....	93
Figura 30 – Interface principal do <i>software</i> desenvolvido.....	97
Figura 31 – Desativação dos métodos MIGHA e Híbrido.....	97
Figura 32 – Desativação da opção de calibração por grupo.....	97
Figura 33 – Aba com dados observados.....	98
Figura 34 – Janela de carregamento.....	99
Figura 35 – Janela com resultados da calibração.....	99
Figura 36 – Reservatórios das redes CT-CCHL (esquerda) e CCN-CCS (direita) na UFPI.....	135
Figura 37 – Manômetros utilizados nas medições: digital (esquerda) e analógico (direita).....	135
Figura 38 – Medição das cargas de pressão em campo.....	136
Figura 39 – Traçado da Rede CT-CCHL com auxílio do UFC2.....	136
Figura 40 – Rede CT-CCHL no EPANET.....	137
Figura 41 – Grupos de tubulações da Rede CT-CCHL.....	138
Figura 42 – Localizações e valores dos dados observados da Rede CT-CCHL.....	139

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	– Rugosidades absolutas calculadas pelas calibrações da Rede Heller-Pádua empregando um dado observado.....	100
Gráfico 2	– Rugosidades absolutas calculadas pelas calibrações da Rede Heller-Pádua empregando três dados observados.....	101
Gráfico 3	– Rugosidades absolutas calculadas pelas calibrações da Rede Heller-Pádua empregando seis dados observados.....	101
Gráfico 4	– EAMs das rugosidades absolutas na Rede Heller-Pádua para os diferentes métodos.....	102
Gráfico 5	– EAMs das cargas de pressão na Rede Heller-Pádua para os diferentes métodos.....	103
Gráfico 6	– Rugosidades absolutas calculadas pelas calibrações da Rede Porto empregando um dado observado.....	104
Gráfico 7	– Rugosidades absolutas calculadas pelas calibrações da Rede Porto empregando três dados observados.....	104
Gráfico 8	– Rugosidades absolutas calculadas pelas calibrações da Rede Porto empregando sete dados observados.....	104
Gráfico 9	– EAMs das rugosidades absolutas na Rede Porto para os diferentes métodos.....	105
Gráfico 10	– EAMs das cargas de pressão na Rede Porto para os diferentes métodos.....	106
Gráfico 11	– EAMs das vazões na Rede Porto para os diferentes métodos.....	106
Gráfico 12	– EAMs das rugosidades absolutas na Rede Sousa para os diferentes métodos, nas calibrações que empregaram dados da hora 52.....	108
Gráfico 13	– EAMs das cargas de pressão na Rede Sousa para os diferentes métodos, nas calibrações que empregaram dados da hora 52.....	108
Gráfico 14	– EAMs das vazões na Rede Sousa para os diferentes métodos, nas calibrações que empregaram dados da hora 52.....	108

Gráfico 15 – EAMs das rugosidades absolutas na Rede Sousa para os diferentes métodos, nas calibrações que empregaram dados da hora 52 e da hora 60....	109
Gráfico 16 – EAMs das cargas de pressão na Rede Sousa para os diferentes métodos, nas calibrações que empregaram dados da hora 52 e da hora 60.....	110
Gráfico 17 – EAMs das vazões na Rede Sousa para os diferentes métodos, nas calibrações que empregaram dados da hora 52 e da hora 60.....	110
Gráfico 18 – Comparação entre os EAMs das rugosidades absolutas obtidos pelas calibrações com dados da hora 52 e dados das horas 52 e 60.....	111
Gráfico 19 – Comparação dos EAMs das rugosidades na Rede Heller-Pádua, utilizando os métodos Híbrido-G e AGs, nos cenários com maior quantidade de dados observados.....	114
Gráfico 20 – Comparação dos EAMs das cargas de pressão na Rede Heller-Pádua, utilizando os métodos Híbrido-G e AGs, nos cenários com maior quantidade de dados observados.....	114
Gráfico 21 – Comparação dos EAMs das rugosidades absolutas na Rede Porto, utilizando os métodos Híbrido-G e AGs, nos cenários com maior quantidade de dados observados.....	115
Gráfico 22 – Comparação dos EAMs das cargas de pressão na Rede Porto, utilizando os métodos Híbrido-G e AGs, nos cenários com maior quantidade de dados observados.....	115
Gráfico 23 – Comparação dos EAMs das vazões na Rede Porto, utilizando os métodos Híbrido-G e AGs, nos cenários com maior quantidade de dados observados.....	115
Gráfico 24 – Comparação dos EAMs das rugosidades absolutas na Rede Sousa, utilizando os métodos Híbrido-G e AGs, nos cenários com maior quantidade de dados observados.....	116
Gráfico 25 – Comparação dos EAMs das cargas de pressão na Rede Sousa, utilizando os métodos Híbrido-G e AGs, nos cenários com maior quantidade de dados observados.....	116

Gráfico 26 – Comparação dos EAMs das vazões na Rede Sousa, utilizando os métodos Híbrido-G e AGs, nos cenários com maior quantidade de dados observados.....	116
Gráfico 27 – Kws calculados pelas calibrações da Rede Heller-Pádua empregando um dado observado.....	118
Gráfico 28 – Kws calculados pelas calibrações da Rede Heller-Pádua empregando três dados observados.....	118
Gráfico 29 – Kws calculados pelas calibrações da Rede Heller-Pádua empregando seis dados observados.....	119
Gráfico 30 – EAMs dos kws na Rede Heller-Pádua para os diferentes métodos.....	120
Gráfico 31 – EAMs das concentrações de cloro residual na Rede Heller-Pádua para os diferentes métodos.....	120
Gráfico 32 – Kws calculados pelas calibrações da Rede Porto empregando um dado observado.....	121
Gráfico 33 – Kws calculados pelas calibrações da Rede Porto empregando três dados observados.....	121
Gráfico 34 – Kws calculados pelas calibrações da Rede Porto empregando sete dados observados.....	122
Gráfico 35 – EAMs dos kws na Rede Porto para os diferentes métodos.....	122
Gráfico 36 – EAMs das concentrações de cloro na Rede Porto para os diferentes métodos.....	123
Gráfico 37 – EAMs dos kws na Rede Sousa para os diferentes métodos, nas calibrações que empregaram dados da hora 52.....	124
Gráfico 38 – EAMs das concentrações de cloro na Rede Sousa para os diferentes métodos, nas calibrações que empregaram dados da hora 52.....	124
Gráfico 39 – EAMs dos kws na Rede Sousa para os diferentes métodos, nas calibrações que empregaram dados das horas 52 e 60.....	125
Gráfico 40 – EAMs das concentrações de cloro na Rede Sousa para os diferentes métodos, nas calibrações que empregaram dados das horas 52 e 60.....	125

Gráfico 41 – Comparação entre os EAMs dos kws calculados pelas calibrações com dados da hora 52 e dados das horas 52 e 60.....	126
Gráfico 42 – Comparação dos EAMs dos kws na Rede Heller-Pádua, utilizando os métodos RNA-G e AGs, nos cenários com maior quantidade de dados observados.....	128
Gráfico 43 – Comparação dos EAMs das concentrações de cloro na Rede Heller-Pádua, utilizando os métodos RNA-G e AGs, nos cenários com maior quantidade de dados observados.....	128
Gráfico 44 – Comparação dos EAMs dos kws na Rede Porto, utilizando os métodos RNA-G e AGs, nos cenários com maior quantidade de dados observados.....	129
Gráfico 45 – Comparação dos EAMs das concentrações de cloro na Rede Porto, utilizando os métodos RNA-G e AGs, nos cenários com maior quantidade de dados observados.....	129
Gráfico 46 – Comparação dos EAMs dos kws na Rede Sousa, utilizando os métodos RNA-G e AGs, nos cenários com maior quantidade de dados observados.....	129
Gráfico 47 – Comparação dos EAMs das concentrações de cloro na Rede Sousa, utilizando os métodos RNA-G e AGs, nos cenários com maior quantidade de dados observados.....	130
Gráfico 48 – Comparação entre as cargas de pressão medidas e retornadas pela simulação da Rede CT-CCHL na condição inicial e calibrada.....	139

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de rugosidade absoluta para diferentes materiais.....	36
Tabela 2 – Valores do coeficiente C para diferentes materiais.....	37
Tabela 3 – Calibrações em redes de distribuição de água.....	46
Tabela 4 – Parâmetros adotados no PMC.....	76
Tabela 5 – Número de neurônios por camada intermediária.....	77
Tabela 6 – Dados dos nós da Rede Héller-Pádua.....	84
Tabela 7 – Dados dos trechos da Rede Héller-Pádua.....	85
Tabela 8 – Dados dos nós da Rede Porto.....	86
Tabela 9 – Dados dos trechos da Rede Porto.....	86
Tabela 10 – Métodos empregados nos testes.....	90
Tabela 11 – Localização dos dados observados utilizados nos diferentes cenários de calibrações.....	91
Tabela 12 – Resumo das calibrações das rugosidades absolutas.....	112
Tabela 13 – Parâmetros dos AGs adotados nas calibrações.....	114
Tabela 14 – EAMs obtidos no teste final da calibração das rugosidades absolutas.....	132
Tabela 15 – EAMs obtidos no teste final da calibração dos kws.....	132
Tabela 16 – Comparação das Vantagens, Desvantagens e Indicações de Uso dos Métodos de Calibração.....	133

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AG	Algoritmo Genético
EAM	Erro Absoluto Médio
EPA	Environmental Protection Agency
EPANET	Programa computacional de dimensionamento de sistemas hidráulicos
<i>fobj</i>	Função Objetivo
Híbrido-G	Método híbrido de calibração de rugosidades por grupo de tubulações
Híbrido-T	Método híbrido de calibração de rugosidades por trecho
HOCl	Ácido hipocloroso
Migh	Método Iterativo do Gradiente Hidráulico
MIGHA	Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
OCl ⁻	Íon hipoclorito
PMC	Perceptron Multicamadas
PVC	Policloreto de Vinila
RDA	Rede de distribuição de água
RNA	Rede neural artificial
RNA-G	Método de calibração por grupo de tubulações com rede neural artificial
RNA-T	Método de calibração por trecho com rede neural artificial
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
THM	Trihalometanos
UFC	Universidade Federal do Ceará
UFC2	Módulo do sistema UFC responsável por desenhar o traçado de redes de distribuição de água
UFC10	Módulo do sistema UFC responsável por calibrar redes de distribuição de água
UFPI	Universidade Federal do Piauí
UV	Radiação Ultravioleta

LISTA DE VARIÁVEIS

Símbolo	Significado	Dimensão
C	Coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams	$[L^{0,367}T^{-1}]$
C_C	Concentração de cloro residual	$[ML^{-3}]$
C_{CJ}	Concentração de cloro residual a jusante	$[ML^{-3}]$
C_{CM}	Concentração de cloro residual a montante	$[ML^{-3}]$
d	Duração da simulação	[T]
D	Diâmetro do trecho	[L]
D_M	Coeficiente de difusão molecular do químico	$[L^2T^{-1}]$
D_x	Coeficiente de dispersão longitudinal	$[L^2T^{-1}]$
f	Fator de atrito	[-]
g	Aceleração da gravidade	$[LT^{-2}]$
i	Índice referente à iteração	[-]
j	Índice referente ao trecho	[-]
k_1	Coeficiente de variabilidade máxima diária do fluxo	[-]
k_2	Coeficiente de variabilidade máxima horária do fluxo	[-]
k_3	Coeficiente de variabilidade mínima do fluxo	[-]
K	Coeficiente de decaimento total de cloro	$[T^{-1}]$
kb	Coeficiente de decaimento de cloro no volume de escoamento	$[T^{-1}]$
Kf	Coeficiente de transferência de massa	$[LT^{-1}]$
kw	Coeficiente de decaimento de cloro na parede da tubulação	$[LT^{-1}]$
L	Comprimento do trecho	[L]
M	Valor do Z-score modificado	[-]
MAD	Mediana dos desvios absolutos das rugosidades absolutas calibradas em relação à mediana	[L]
nN	Número de nós da rede	[-]
nT	Número de trechos da rede	[-]
p	Pressão relativa interna na tubulação	$[ML^{-1}T^{-2}]$

P_c	Carga de Pressão no nó da Rede Calculada	[L]
P_o	Carga de Pressão no nó da Rede Observada	[L]
Pop	População a ser abastecida	[-]
Q	Vazão	$[L^3T^{-1}]$
Q_{dis}	Vazão de distribuição	$[L^3T^{-1}]$
q_m	Taxa ou cota de consumo per capita média da população do projeto	$[L^3T^{-1}]$
Q_c	Vazão no trecho da Rede Calculada	$[L^3T^{-1}]$
Q_o	Vazão no trecho da Rede Observada	$[L^3T^{-1}]$
Sc	Número de Schmidt	[-]
Sh	Número de Sherwood	[-]
Re_y	Número de Reynolds	[-]
R_H	Raio Hidráulico	[L]
T	Transmissividade	$[L^2T^{-1}]$
t	Tempo	[T]
V	Velocidade no trecho	$[LT^{-1}]$
z	Energia ou carga de posição	[L]
γ	Peso específico	$[ML^{-2}T^{-2}]$
ΔH	Perda de energia ou perda de carga	[L]
ε	Rugosidade absoluta	[L]
θ	Ângulo formado entre os vetores dos gradientes hidráulicos observados e calculados	[-]
λ	Comprimento de passo do Migh	[-]
μ	Viscosidade dinâmica do fluido	$[ML^{-1}T^{-1}]$
ν	Viscosidade cinemática do fluido	$[L^2T^{-1}]$
ρ	Massa específica do fluido	$[ML^{-3}]$
∇H	Gradiente Hidráulico (perda de carga unitária)	[-]
∇H_o	Gradiente Hidráulico no trecho da Rede Observada	[-]
∇H_c	Gradiente Hidráulico no trecho da Rede Calculada	[-]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Contextualização e Problematização.....	23
1.2	Objetivos.....	25
1.3	Estrutura do trabalho.....	26
2	REFERENCIAL TEÓRICO... ..	27
2.1	Redes de distribuição de água.....	27
2.2	Hidráulica das redes de distribuição de água.....	30
2.2.1	<i>Equação para o cálculo da Vazão de Distribuição.....</i>	<i>31</i>
2.2.2	<i>Equações para o cálculo das Perdas de Carga.....</i>	<i>33</i>
2.3	Qualidade da água em redes de distribuição.....	38
2.3.1	<i>Desinfecção com compostos de cloro.....</i>	<i>38</i>
2.3.2	<i>Transporte de cloro em redes de distribuição de água.....</i>	<i>40</i>
2.4	Modelagem e Calibração de redes de distribuição de água.....	45
2.5	Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo (MIGHA).....	47
2.5.1	<i>MIGHA na calibração de rugosidades absolutas.....</i>	<i>50</i>
2.5.2	<i>MIGHA na calibração do coeficiente de decaimento de cloro.....</i>	<i>55</i>
2.6	Redes Neurais Artificiais (RNAs).....	57
2.6.1	<i>Funções de ativação.....</i>	<i>60</i>
2.6.2	<i>Arquiteturas das Redes Neurais Artificiais.....</i>	<i>61</i>
2.6.3	<i>Treinamento e Generalização em RNAs do tipo PMC.....</i>	<i>63</i>
2.6.4	<i>Demais parâmetros e hiperparâmetros do PMC.....</i>	<i>64</i>
2.7	Softwares para modelagem e calibração de redes de distribuição de água....	66
2.7.1	<i>EPANET.....</i>	<i>66</i>
2.7.2	<i>UFC10.....</i>	<i>68</i>
3	METODOLOGIA.....	71
3.1	Adaptação do método MIGHA para calibrações dinâmicas.....	72
3.2	Métodos com utilização exclusiva de RNA.....	76
3.3	Métodos Híbridos MIGHA-RNA.....	81
3.4	Redes Calibradas.....	83
3.4.1	<i>Rede Heller-Pádua.....</i>	<i>84</i>
3.4.2	<i>Rede Porto.....</i>	<i>85</i>

3.4.3	<i>Rede Sousa</i>	87
3.5	Testes realizados.....	89
3.6	Desenvolvimento da interface gráfica do novo <i>software</i>	91
3.7	Modelagem e calibração das redes de distribuição de água da UFPI.....	92
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	96
4.1	Interface do <i>software</i> desenvolvido.....	96
4.2	Calibrações das rugosidades absolutas.....	100
4.2.1	<i>Calibrações das rugosidades absolutas na Rede Heller-Pádua</i>	100
4.2.2	<i>Calibrações das rugosidades absolutas na Rede Porto</i>	103
4.2.3	<i>Calibrações das rugosidades absolutas na Rede Sousa</i>	107
4.2.4	<i>Resumo das calibrações das rugosidades absolutas</i>	111
4.2.5	<i>Calibrações das rugosidades absolutas com Algoritmos Genéticos</i>	113
4.3	Calibrações dos kws.....	117
4.3.1	<i>Calibrações dos kws na Rede Heller-Pádua</i>	118
4.3.2	<i>Calibrações dos kws na Rede Porto</i>	121
4.3.3	<i>Calibrações dos kws na Rede Sousa</i>	123
4.3.4	<i>Resumo das calibrações dos kws</i>	127
4.3.5	<i>Calibrações dos kws com Algoritmos Genéticos</i>	127
4.4	Testes finais.....	131
4.5	Modelo da rede da UFPI.....	134
5	CONCLUSÃO	141
	REFERÊNCIAS	145
	APÊNDICE A – DADOS DOS NÓS DA CONFIGURAÇÃO GABARITO DA REDE SOUSA NA HORA 70	155
	APÊNDICE B – DADOS DOS TRECHOS DA CONFIGURAÇÃO GABARITO DA REDE SOUSA NA HORA 70	157
	APÊNDICE C – CARGAS DE PRESSÃO OBTIDAS NAS CALIBRAÇÕES DAS RUGOSIDADES ABSOLUTAS DA REDE HELLER-PÁDUA	159
	APÊNDICE D – CARGAS DE PRESSÃO E VAZÕES OBTIDAS NAS CALIBRAÇÕES DAS RUGOSIDADES ABSOLUTAS DA REDE PORTO	160

APÊNDICE E – RUGOSIDADES ABSOLUTAS CALCULADAS PARA A REDE SOUSA, NAS CALIBRAÇÕES QUE EMPREGARAM DADOS OBSERVADOS DA HORA 52.....	162
APÊNDICE F - CARGAS DE PRESSÃO E VAZÕES OBTIDAS NAS CALIBRAÇÕES DAS RUGOSIDADES ABSOLUTAS DA REDE SOUSA PARA A HORA 70, UTILIZANDO DADOS OBSERVADOS DA HORA 52.....	170
APÊNDICE G - RUGOSIDADES ABSOLUTAS CALCULADAS PARA A REDE SOUSA, NAS CALIBRAÇÕES QUE EMPREGARAM DADOS OBSERVADOS DAS HORAS 52 E 60.....	183
APÊNDICE H - CARGAS DE PRESSÃO E VAZÕES OBTIDAS NAS CALIBRAÇÕES DAS RUGOSIDADES ABSOLUTAS DA REDE SOUSA PARA A HORA 70, UTILIZANDO DADOS OBSERVADOS DAS HORAS 52 E 60.....	191
APÊNDICE I - RESULTADOS PARA CALIBRAÇÃO DAS RUGOSIDADES ABSOLUTAS DA REDE HELLER-PÁDUA COM O USO DE ALGORITMOS GENÉTICOS, NO CENÁRIO COM MAIS DADOS OBSERVADOS.....	204
APÊNDICE J - RESULTADOS PARA CALIBRAÇÃO DAS RUGOSIDADES ABSOLUTAS DA REDE PORTO COM O USO DE ALGORITMOS GENÉTICOS, NO CENÁRIO COM MAIS DADOS OBSERVADOS.....	205
APÊNDICE K – RESULTADOS PARA A CALIBRAÇÃO DAS RUGOSIDADES ABSOLUTAS DA REDE SOUSA COM O USO DE ALGORITMOS GENÉTICOS, NO CENÁRIO COM MAIS DADOS OBSERVADOS.....	206
APÊNDICE L – CONCENTRAÇÕES DE CLORO RESIDUAL OBTIDAS NAS CALIBRAÇÕES DOS KWS DA REDE HELLER-PÁDUA PARA A HORA 70.....	211
APÊNDICE M – CONCENTRAÇÕES DE CLORO RESIDUAL OBTIDAS NAS CALIBRAÇÕES DOS KWS DA REDE PORTO PARA A HORA 70.....	213

APÊNDICE N – KWS CALCULADOS PARA A REDE SOUSA, NAS CALIBRAÇÕES QUE EMPREGARAM DADOS OBSERVADOS DA HORA 52.....	214
APÊNDICE O – CONCENTRAÇÕES DE CLORO RESIDUAL OBTIDAS NAS CALIBRAÇÕES DOS KWS DA REDE SOUSA PARA A HORA 70, UTILIZANDO DADOS OBSERVADOS DA HORA 52.....	222
APÊNDICE P – KWS CALCULADOS PARA A REDE SOUSA, NAS CALIBRAÇÕES QUE EMPREGARAM DADOS OBSERVADOS DAS HORAS 52 E 60.....	227
APÊNDICE Q – CONCENTRAÇÕES DE CLORO RESIDUAL OBTIDAS NAS CALIBRAÇÕES DOS KWS DA REDE SOUSA PARA A HORA 70, UTILIZANDO DADOS OBSERVADOS DAS HORAS 52 E 60	235
APÊNDICE R – RESULTADOS PARA CALIBRAÇÃO DOS KWS DA REDE HELLER-PÁDUA COM O USO DE ALGORITMOS GENÉTICOS, NO CENÁRIO COM MAIS DADOS OBSERVADOS.....	240
APÊNDICE S – RESULTADOS PARA CALIBRAÇÃO DOS KWS DA REDE PORTO COM O USO DE ALGORITMOS GENÉTICOS, NO CENÁRIO COM MAIS DADOS OBSERVADOS.....	241
APÊNDICE T – RESULTADOS PARA CALIBRAÇÃO DOS KWS DA REDE SOUSA COM O USO DE ALGORITMOS GENÉTICOS, NO CENÁRIO COM MAIS DADOS OBSERVADOS.....	242
APÊNDICE U – RUGOSIDADES ABSOLUTAS CALCULADAS PARA A REDE SOUSA NOS TESTES FINAIS, COM FAIXA DE VARIAÇÃO DO PARÂMETRO INSERIDA DE MODO MANUAL NAS CALIBRAÇÕES.....	246
APÊNDICE V – CARGAS DE PRESSÃO E VAZÕES OBTIDAS PELAS CALIBRAÇÕES DAS RUGOSIDADES ABSOLUTAS DA REDE SOUSA NOS TESTES FINAIS, COM FAIXA DE VARIAÇÃO DO PARÂMETRO INSERIDA DE MODO MANUAL.....	248
APÊNDICE W – KWS CALCULADOS PARA A REDE SOUSA NOS TESTES FINAIS, COM FAIXA DE VARIAÇÃO DO PARÂMETRO INSERIDA DE MODO MANUAL NAS CALIBRAÇÕES.....	252

APÊNDICE X – CONCENTRAÇÕES DE CLORO RESIDUAL OBTIDAS PELAS CALIBRAÇÕES DOS KWS DA REDE SOUSA NOS TESTES FINAIS, COM FAIXA DE VARIAÇÃO DO PARÂMETRO INSERIDA DE MODO MANUAL.....	254
APÊNDICE Y – DADOS DOS NÓS OBTIDOS PELA SIMULAÇÃO DA REDE CT-CCHL, APÓS CALIBRAÇÃO.....	256
APÊNDICE Z – DADOS DOS TRECHOS OBTIDOS PELA SIMULAÇÃO DA REDE CT-CCHL, APÓS CALIBRAÇÃO.....	258

1 INTRODUÇÃO

A introdução deste trabalho oferece uma visão geral do tema abordado, destacando a importância dos modelos computacionais de redes de distribuição de água para o gerenciamento eficiente dos sistemas de abastecimento. Neste capítulo, é feita a contextualização do problema, enfatizando os desafios enfrentados na modelagem tradicional dessas redes e a necessidade essencial de calibrar os parâmetros hidráulicos e de qualidade da água, a fim de garantir a precisão dos modelos. São também discutidas as principais abordagens de calibração atualmente empregadas, incluindo o Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo e o uso de algoritmos de aprendizado de máquina, como as Redes Neurais Artificiais. Por fim, são apresentados os objetivos gerais e específicos deste trabalho, bem como a estrutura dos capítulos subsequentes.

1.1 Contextualização e Problematização

A construção de modelos computacionais de redes de distribuição de água (RDAs) é um recurso importante para o gerenciamento e controle operacional dos sistemas de abastecimento. A posse do modelo digital de uma RDA por parte da concessionária permite simular diferentes cenários de demandas, verificar o atendimento quanto a vazão, pressão e qualidade da água, além de contribuir na elaboração de projetos de ampliação da rede. A modelagem convencional de RDAs é normalmente baseada em uma abordagem determinística, com a adoção de diversos parâmetros geométricos, hidráulicos e de qualidade que direcionam os resultados das simulações (Magini; Boniforti; Guercio, 2019). No entanto, a definição desses parâmetros pode ser extremamente difícil, visto que várias ocorrências podem interferir nos seus valores e na própria natureza hidráulica do processo, como o envelhecimento das tubulações, vazamentos, crescimento da população, eventos extremos e outras ameaças à segurança da infraestrutura de água urbana (Wang *et al.*, 2020). Dessa forma, uma estratégia fundamental para tornar os modelos mais fidedignos é o processo de calibração.

A calibração de um modelo de RDA consiste em atualizar os parâmetros de entrada — necessários para realização das simulações —, tais como as rugosidades absolutas, coeficientes C de Hazen-Williams, consumos nodais, coeficientes de decaimento de cloro, entre outros. O intuito dessas atualizações é fazer com que as saídas retornadas pela simulação do modelo — especificamente as vazões, pressões e concentrações de algum constituinte — se aproximem dos valores reais (Jadhao; Gupta, 2018). Para realizar as calibrações, é necessário,

portanto, fazer o uso de dados observados, que, no caso das RDAs, costumam ser dados medidos de vazões nos trechos, pressões ou concentrações de cloro residual nos nós da rede (Moghaddam *et al.*, 2020).

Rathi *et al.* (2020) afirmam que os métodos aplicados para calibrar RDAs classificam-se em três categorias: (1) procedimentos de tentativa e erro, que costumam consumir mais tempo e depender de uma maior experiência e familiaridade do modelador; (2) métodos explícitos, que se baseiam na solução de um conjunto de equações de continuidade e perda de carga, necessitando que o número de medições equivalha ao número de parâmetros desconhecidos; (3) métodos implícitos, que adotam técnicas de otimização utilizando os dados observados, visando a minimização de uma função objetivo.

Um exemplo de método implícito empregado na calibração de RDAs em trabalhos recentes é o Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo (MIGHA). Essa técnica é uma adaptação do procedimento desenvolvido inicialmente por Guo e Zhang (1994) para a calibração da transmissividade hidráulica em aquíferos subterrâneos. Posteriormente, vários autores adequaram o MIGHA para a sua aplicação em RDAs, destacando o seu uso no ajuste da rugosidade absoluta das tubulações (Bezerra; Castro; Araújo, 2017; Sousa; Bezerra; Castro, 2020), na análise dos consumos nodais e vazamentos (Araújo; Bezerra; Castro, 2021) e na atualização do coeficiente de decaimento de cloro (Pereira; Castro, 2013).

Uma outra estratégia que tem crescido em relevância na modelagem de RDAs é a utilização de algoritmos de aprendizado de máquina, tais como as Redes Neurais Artificiais (RNAs), Máquina de Vetores de Suporte, Métodos Bayesianos e Sistemas *Fuzzy* (Giraldo-González; Rodrigues, 2020). Pela sua grande capacidade de reconhecer padrões, quando estimulados com dados, esses métodos têm sido empregados na localização de rompimentos nas tubulações e detecção de áreas de vazamento (Fan; Yu, 2021; Capelo *et al.*, 2021; Li *et al.* 2022; Yu *et al.*, 2022), na calibração de demandas (Perea *et al.*, 2021; Chu *et al.*, 2022) e na análise de parâmetros de qualidade (Zounemat-Kermani *et al.*, 2018).

As RNAs têm se notabilizado na literatura recente no que concerne à calibração de processos multivariados e não lineares, com destaque para o tipo Perceptron Multicamadas (PMC), arquitetura bastante popular nesses estudos (Chiappini *et al.*, 2020). As RNAs se apresentam como estruturas inspiradas nas redes neurais do cérebro humano, contendo vários nós conectados, em várias camadas — no caso do PMC —, chamados neurônios artificiais. Estes, por sua vez, são responsáveis por receber informações externas e propagá-las para outros neurônios artificiais, transmitindo dados de forma não linear. Este método conta com diversos

algoritmos de aprendizagem, que aprimoram os resultados obtidos após o estímulo com informações externas (Chen; Lu; He, 2020).

Apesar dos avanços já obtidos nos empregos desses métodos, ainda há margem para refinamento no seu uso em RDAs. O MIGHA ainda necessita de um número considerável de medições para alcançar bons resultados, principalmente no que tange a calibração do modelo de qualidade. O uso de RNAs, por sua vez, apresenta dificuldades relacionadas a definição dos hiperparâmetros, sensibilidade aos dados de entrada, problemas de *overfitting* e maior exigência computacional. Além disso, como é esperado nesse tipo de abordagem, uma RNA treinada para uma determinada RDA não pode ser aplicada diretamente a outra, exigindo que cada caso seja tratado de forma específica.

Com base nos desafios enfrentados na modelagem e calibração de RDAs, este trabalho explora novas abordagens para melhorar a precisão e a eficiência dos modelos. As técnicas propostas, que incluem o uso de RNAs e métodos híbridos, buscam abordar limitações relacionadas à coleta de dados e à sensibilidade dos parâmetros de modelagem.

A criação de um método híbrido MIGHA-RNA tem como propósito unir a eficiência computacional e praticidade do MIGHA com a capacidade de abstração e precisão das RNAs. Essa combinação visa superar as limitações de cada método quando aplicados de forma isolada, como a dependência de uma grande quantidade de dados observados do MIGHA e a sensibilidade das RNAs aos hiperparâmetros adotados. A expectativa é que essa abordagem híbrida possa equilibrar as vantagens de ambos os métodos, resultando em uma solução mais robusta e eficaz para a calibração de RDAs.

Além do desenvolvimento metodológico, este estudo também almeja a modelagem e calibração da RDA da Universidade Federal do Piauí (UFPI). A aplicação prática da metodologia proposta neste trabalho permitirá não apenas testar sua eficácia, mas também contribuir diretamente para a UFPI ao fornecer um modelo computacional preciso da rede. Esse modelo será uma ferramenta útil para o monitoramento e operação da rede de abastecimento, auxiliando na otimização de sua gestão.

1.2 Objetivos

Desenvolver uma metodologia inovadora para a calibração das rugosidades absolutas (ϵ) e dos coeficientes de decaimento de cloro nas paredes das tubulações (kw) em RDAs, aplicando métodos baseados em RNAs e abordagens híbridas que combinam o Método MIGHA com o uso de RNAs.

Para cumprir com os propósitos deste trabalho, os seguintes objetivos específicos foram traçados:

- Desenvolver algoritmos que utilizem RNAs para calibrar as rugosidades absolutas (ϵ) e os coeficientes de decaimento de cloro (k_w) em RDAs;
- Desenvolver algoritmos baseados em uma abordagem híbrida MIGHA-RNA para a calibração das rugosidades absolutas (ϵ) em RDAs;
- Adaptar o método MIGHA para que ele possa calibrar em simulações dinâmicas;
- Testar e validar os métodos propostos em redes fictícias com parâmetros e variáveis de estado previamente conhecidos;
- Avaliar o impacto do volume de dados observados utilizados na qualidade da calibração;
- Comparar os resultados obtidos pelos novos métodos com aqueles retornados por outras abordagens da literatura, como o MIGHA isolado e Algoritmos Genéticos;
- Desenvolver uma interface gráfica para um *software* que permita a aplicação prática dos métodos propostos;
- Aplicar a nova metodologia à modelagem das redes de distribuição de água da Universidade Federal do Piauí (UFPI).

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho encontra-se estruturado em cinco capítulos. O Capítulo 1 proporciona uma introdução ao tema, delimitando o objeto de estudo e apresentando os objetivos gerais e específicos a serem alcançados. No Capítulo 2, é realizada uma revisão teórica que abrange os conceitos essenciais para o desenvolvimento desta tese, além de revisar as pesquisas mais recentes relacionadas ao tema em estudo. O Capítulo 3 descreve a metodologia adotada neste trabalho, detalhando os métodos desenvolvidos, as redes fictícias empregadas, os testes conduzidos e os critérios adotados na modelagem das redes da UFPI. No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos nos testes e na modelagem, acompanhados das discussões pertinentes. Por fim, o Capítulo 5 traz as conclusões inferidas a partir deste trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo encontra-se uma revisão abrangente da literatura relacionada aos principais aspectos envolvidos na modelagem e calibração de redes de distribuição de água. Serão explorados temas como as características das redes de distribuição, os princípios da hidráulica aplicados a esses sistemas, a qualidade da água nas redes, métodos de modelagem e calibração utilizados, bem como abordagens específicas como o Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo (MIGHA) e as Redes Neurais Artificiais (RNAs). Adicionalmente, será delineado o papel dos *softwares* disponíveis que auxiliam nesses processos. O objetivo é fornecer ao leitor uma compreensão detalhada do estado da arte nesse campo, contextualizando os desafios enfrentados e as soluções propostas na literatura.

As pesquisas para este trabalho foram realizadas principalmente através do Portal de Periódicos Capes e do Google Acadêmico, com foco em trabalhos recentes publicados em periódicos reconhecidos e de impacto, como as revistas *Water, Water Resources Research e Engenharia Sanitária e Ambiental - ESA*. Além dos artigos, alguns livros consagrados na área também foram utilizados como referência, incluindo o *Manual de Hidráulica* (Netto; Fernández, 2015), *Fundamentos de Qualidade e Tratamento de Água* (Libânio, 2016) e *Redes Neurais Artificiais para Engenharias e Ciências Aplicadas* (Silva; Spatti; Flauzinno, 2016). Essas e outras obras forneceram uma base sólida para a compreensão dos conceitos e técnicas discutidos neste capítulo.

2.1 Redes de distribuição de água

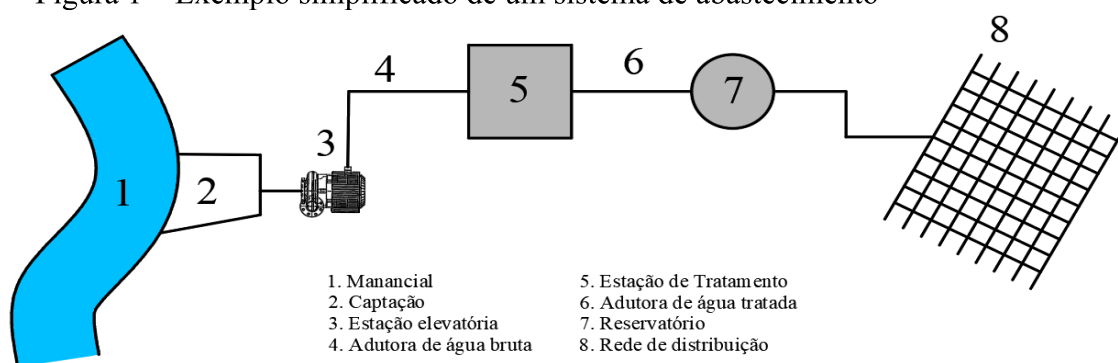
Sistemas de abastecimento de água são definidos como um conjunto de estruturas, processos e equipamentos que tem como objetivo a captação, tratamento e distribuição de água para uso doméstico, comercial, industrial e público. Segundo Viessman Jr. *et al.* (2014), esses sistemas visam garantir que a água esteja limpa, segura e acessível para consumo humano e demais atividades que necessitem de água. Os autores destacam ainda que os sistemas de abastecimento devem levar em consideração a sustentabilidade, eficiência e a capacidade de atender as demandas presentes e futuras da população.

De acordo com Netto e Fernández (2015), os sistemas de distribuição de água são compostos por um conjunto de obras, equipamentos e serviços que têm como objetivo fornecer água em quantidade, qualidade e pressão adequadas para atender às necessidades da população. O sistema é formado por diversas unidades, tais como o manancial, a captação, a adução, o

tratamento, a reservação, a distribuição e as estações elevatórias e de recalque. Assim, a rede de distribuição de água (RDA) é uma parte integrante do sistema de abastecimento.

A Figura 1 apresenta um exemplo de uma possível composição de um sistema de abastecimento de água.

Figura 1 – Exemplo simplificado de um sistema de abastecimento



Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com a NBR 12218/2017, que estabelece os procedimentos para elaboração de projetos de redes de distribuição de água para abastecimento público, a RDA é composta por tubulações e equipamentos auxiliares, e tem como objetivo fornecer água potável em quantidade e pressão adequadas aos consumidores do sistema de abastecimento. Conforme Sangroula *et al.* (2022), uma RDA é composta por diversos componentes, incluindo reservatórios, bombas, tubulações, tanques e válvulas. Segundo os autores, aproximadamente 80% do custo total de um projeto de abastecimento de água é destinado ao sistema de distribuição, tornando essencial a elaboração de uma RDA confiável e econômica.

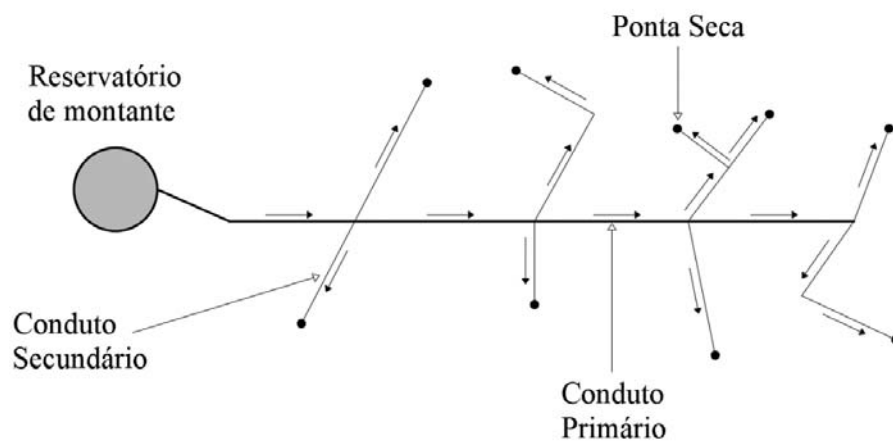
De acordo com Tsutiya (2006), as RDAs geralmente representam o maior custo nos sistemas de abastecimento, compreendendo cerca de 50 a 75% do custo total de todas as obras relacionadas. No entanto, o autor destaca que essas obras geralmente não recebem a devida atenção em termos de manutenção, o que pode levar a problemas de qualidade da água e vazamentos.

Nas RDAs, é comum a classificação dos condutos em principais e secundários. Conforme ressaltado por Porto (2006), os condutos principais são os que possuem maior diâmetro e têm a função de fornecer água para os condutos secundários, que, por sua vez, abastecem os pontos de consumo do sistema com diâmetro menor. Além disso, as redes podem ser classificadas como ramificadas ou malhadas, de acordo com a disposição dos condutos principais e o sentido do escoamento nas tubulações secundárias.

Segundo Tsutiya (2006), uma rede de abastecimento de água é classificada como ramificada quando ela fornece água a um setor específico através de uma tubulação tronco que é alimentada por um reservatório. A distribuição da água é feita por meio de condutos secundários, onde o sentido do fluxo é conhecido em todos os segmentos. Já a rede malhada é caracterizada por ter várias tubulações principais que formam anéis ou blocos, permitindo que cada ponto de consumo seja abastecido por mais de um caminho.

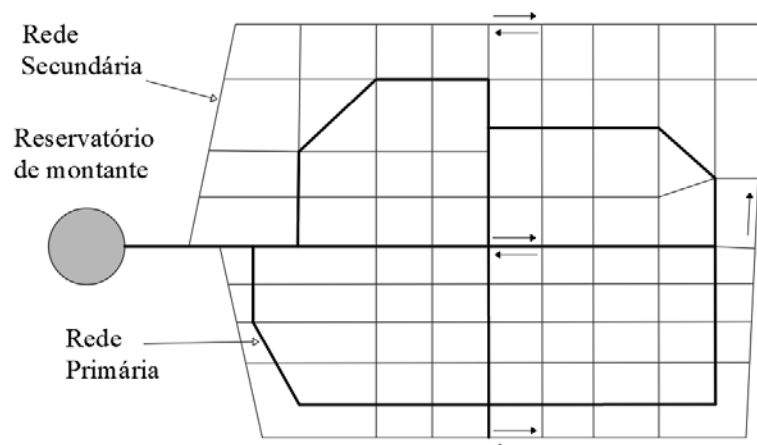
A Figura 2 e a Figura 3 apresentam exemplos de redes ramificada e malhada, respectivamente.

Figura 2 – Exemplo de rede ramificada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3 – Exemplo de rede malhada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Espartel (2017) aponta que as RDAs malhadas apresentam uma maior confiabilidade, pois estas permitem a operação de seções específicas da rede sem afetar o abastecimento em outras partes, sendo essa a configuração mais utilizada nos grandes centros

urbanos. Por outro lado, RDAs malhadas requerem um investimento inicial maior e exigem modelagem e operação mais complexas, quando comparadas com redes ramificadas, que são mais utilizadas em pequenas comunidades.

2.2 Hidráulica das redes de distribuição de água

A análise hidráulica das RDAs é fundamental para garantir que a água seja fornecida em quantidade e qualidade adequadas aos usuários finais. Essas redes geralmente trabalham como condutos forçados e por gravidade. Embora as pesquisas recentes tenham avançado na análise do comportamento transiente nas redes de distribuição (Weston; Collins; Boxall, 2021; Zecchin *et al.*, 2022; Ayati; Haghghi; Ghafouri, 2022), ainda é comum que o estudo desses sistemas seja baseado no regime permanente.

De acordo com Porto (2006), o escoamento é considerado permanente quando suas propriedades e características hidráulicas permanecem constantes no tempo em cada ponto e espaço. Para o caso particular do escoamento permanente, o balanço de energia por unidade de peso é representado pela Equação 1, conhecida como a Equação de Bernoulli, somada as perdas.

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta H_{12} \quad (1)$$

Onde:

- P/γ é a carga de pressão (m);
- z é a carga de posição (m);
- $V^2/2g$ é a carga cinética (m);
- ΔH_{12} é a perda de energia ou perda de carga (m), entre o ponto 1 e 2.

Conforme Espartel (2017), a perda de carga presente na Equação 1 corresponde à energia dissipada em forma de calor entre dois pontos do tubo. O autor classifica essas perdas como contínuas ou localizadas. As perdas contínuas ocorrem em todo o conduto e são causadas pela fricção entre a água e a parede interna do tubo. Já as perdas localizadas são causadas pela presença de peças especiais e outras singularidades, sendo mais relevantes em canalizações curtas, podendo ser desprezadas em sistemas maiores, como nas RDAs.

A análise hidráulica de uma RDA é responsável por determinar as vazões em todos os trechos e as cotas piezométricas em todos os nós. Essas vazões são comumente adotadas

como constantes ao longo de cada conduto, atribuindo-se consumos aos nós. De acordo com Porto (2006), a equação da continuidade é utilizada para estabelecer que, na condição de equilíbrio, a soma algébrica das vazões em cada nó da rede é nula. Além disso, é aplicada uma equação de perda de carga na forma de $\Delta H = KQ^n$.

A seguir estão relacionados alguns critérios e fórmulas utilizadas no dimensionamento e na análise hidráulica de uma rede de distribuição.

2.2.1 Equação para o cálculo da Vazão de Distribuição

A NBR 12218/2017 estabelece que a vazão para o dimensionamento da rede de distribuição de água deve ser capaz de atender toda a área abastecida, levando em consideração um horizonte de projeto pré-definido e considerando as perdas reais e aparentes previstas no sistema.

Porto (2006) enfatiza que o dimensionamento de uma rede de distribuição de água está diretamente relacionado à vazão de distribuição, a qual pode ser calculada utilizando a Equação 2.

$$Q_{\text{dis}} = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot \text{Pop} \cdot q_m}{86400} \quad (2)$$

Onde:

- Q_{dis} é a vazão de distribuição, em L/s;
- k_1 é o coeficiente adimensional do dia de maior consumo;
- k_2 é o coeficiente adimensional da hora de maior consumo;
- Pop é a população a ser abastecida, em número de habitantes;
- q_m é a taxa de consumo per capita média da comunidade, em L/hab/dia.

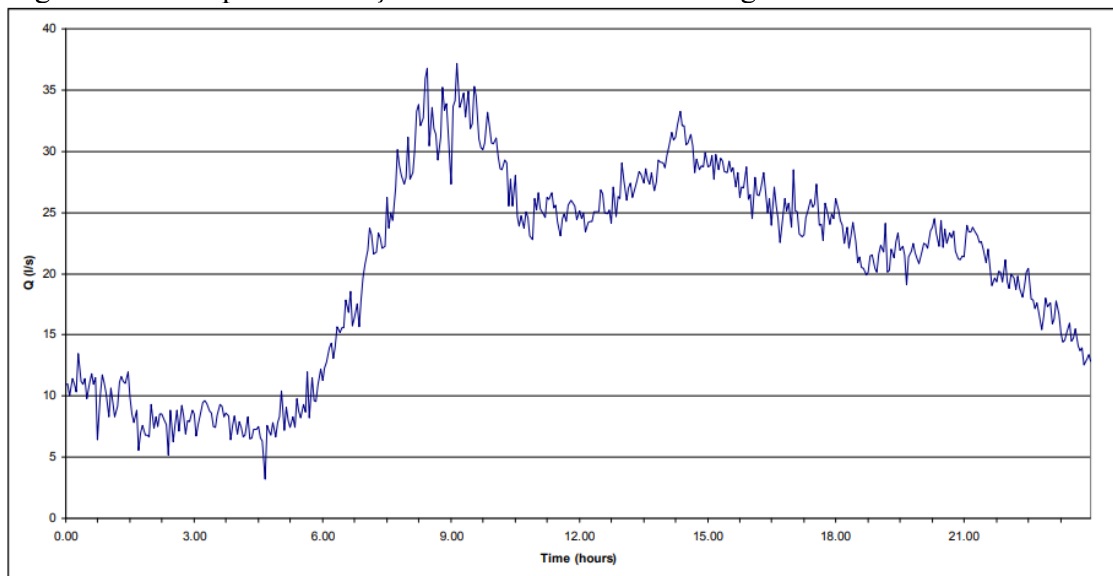
A variação horária do consumo de água em uma RDA pode variar de acordo com diversos fatores, como horários de pico de consumo, atividades sazonais, clima, entre outros. Em geral, é comum observar uma maior demanda de água em períodos de maior atividade humana, como no período da manhã, no início da tarde e no final da tarde/começo da noite. A variação diária também pode ser significativa, dependendo das características do sistema e dos hábitos de consumo da população (Herrera *et al.*, 2010; Balacco *et al.*, 2017).

Netto e Fernández (2015) afirmam que os valores recomendados para o coeficiente k_1 em projetos no Brasil variam entre 1,1 e 1,4, enquanto para o coeficiente k_2 , sugerem valores

entre 1,5 e 2,3. Por outro lado, Porto (2006) destaca que o valor de k_1 geralmente é assumido entre 1,25 e 1,50, enquanto k_2 é frequentemente adotado como 1,5.

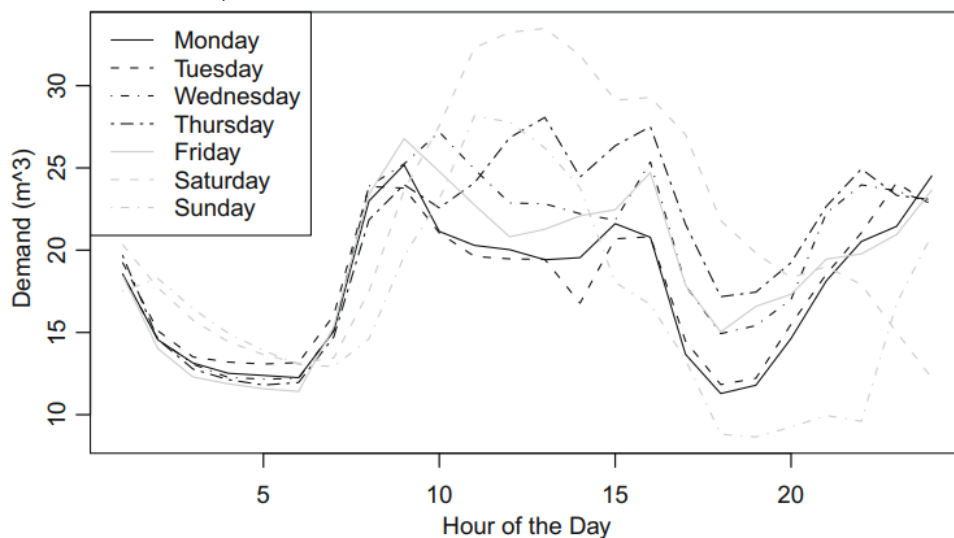
De acordo com a NBR 12218/2017, é necessário aplicar o coeficiente k_3 para verificar a pressão máxima noturna em uma rede de distribuição. Para obter esse coeficiente, a norma estabelece que sejam utilizados dados disponíveis na localidade. Caso não haja histórico desses dados, é sugerido o uso de um valor de 0,5. As Figuras 4 e 5 mostram exemplos de como pode se comportar a variação do consumo da água dentro de um dia.

Figura 4 – Exemplo de variação horária do consumo de água em uma RDA



Fonte: Balacco *et al.*, 2017.

Figura 5 – Exemplo de variação horária do consumo de água em uma RDA, nos diferentes dias da semana



Fonte: Herrera *et al.*, 2010.

O relatório do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), divulgado no final de 2023 indica que o consumo médio per capita de água no Brasil é de 148,2 L/hab/dia (Brasil, 2023). Porto (2006) afirma que, em cidades de médio porte, é comum adotar uma taxa de consumo per capita de 200 L/hab/dia.

2.2.2 Equações para o cálculo das Perdas de Carga

De acordo com Porto (2006), é comum desconsiderar as perdas de carga localizadas e as cargas cinéticas presentes na Equação de Bernoulli durante o cálculo das RDAs. Tsutiya (2006) aponta que as equações da fórmula de Darcy-Weisbach, também conhecida como Fórmula Universal, e de Hazen-Williams são frequentemente utilizadas para calcular as perdas de carga distribuídas ao longo das tubulações.

A fórmula de Darcy-Weisbach, expressa pela Equação 3, é amplamente reconhecida na literatura como a mais precisa para calcular a perda de carga contínua em um trecho. Além disso, é definido o conceito de perda de carga unitária como a relação entre a perda de carga de um determinado trecho e seu comprimento, conforme expresso na Equação 4.

$$\Delta H = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (3)$$

$$\nabla H = \frac{\Delta H}{L} = \frac{f}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (4)$$

Onde:

- ΔH é a perda de carga (m);
- ∇H é a perda de carga unitária, ou gradiente hidráulico;
- f é o fator de atrito;
- L é o comprimento do trecho (m);
- D é o diâmetro do trecho (m);
- V é a velocidade no trecho (m/s);
- g é a gravidade (m/s^2).

Para calcular o fator de atrito, é essencial determinar o regime de escoamento do fluido, que está diretamente ligado a trajetória das suas partículas. O escoamento pode ser

classificado em três regimes principais: laminar, de transição e turbulento. O regime turbulento, por sua vez, se subdivide em três categorias: turbulento hidraulicamente liso, turbulento hidraulicamente rugoso e turbulento hidraulicamente misto.

Para se determinar o tipo de regime de escoamento, é utilizado o número adimensional de Reynolds, que pode ser calculado pela Equação 5. A partir deste valor, é possível classificar o escoamento em laminar, de transição ou turbulento.

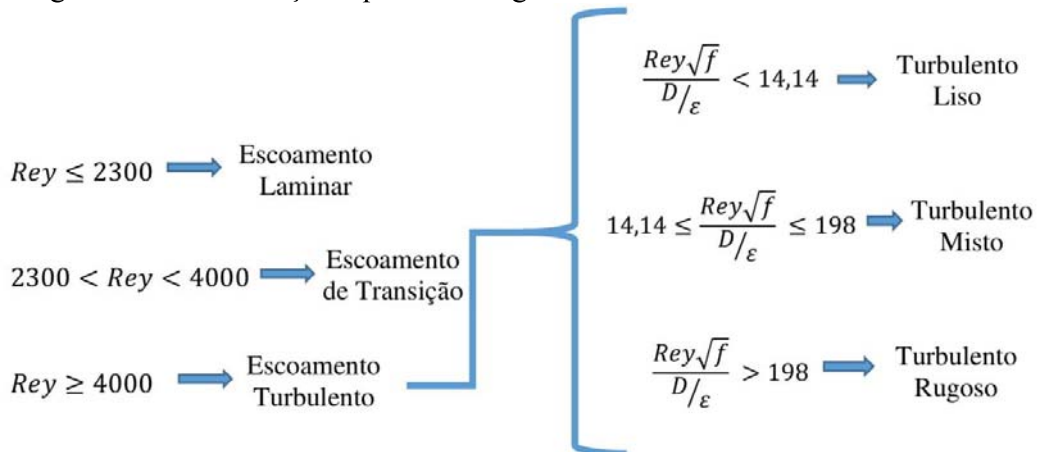
$$Rey = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (5)$$

Onde:

- ρ é a massa específica do fluido (kg/m^3);
- μ é a viscosidade dinâmica do fluido (N.s/m^2);
- ν é a viscosidade cinemática do fluido (m^2/s).

As faixas para o número de Reynolds e suas respectivas classificações podem ser encontradas na Figura 6.

Figura 6 – Classificações quanto ao regime do escoamento



Fonte: Sousa (2020).

Os cálculos para classificar as subdivisões do escoamento turbulento consideram, além dos parâmetros já relacionados, a rugosidade absoluta, ϵ , da tubulação, como nota-se na Figura 6.

A Equação 6, desenvolvida a partir de análises experimentais realizadas pelo engenheiro alemão Hagen e pelo fisiologista francês Poiseuille, permite calcular o fator de atrito para o regime de escoamento laminar. Esse regime é caracterizado por um fluxo suave e

ordenado, sem turbulências significativas, e é influenciado apenas pelas propriedades do fluido e pelo diâmetro da tubulação, como definido pelo número de Reynolds.

$$f = \frac{64}{\text{Rey}} \quad (6)$$

De acordo com Porto (2006), o regime de transição é caracterizado por um escoamento instável, que ocorre em uma faixa restrita do número de Reynolds, sendo pouco relevante na prática. Isso se deve, em grande parte, ao fato de que, na hidráulica, o fluido mais comum é a água, que apresenta baixa viscosidade e tende a gerar escoamentos turbulentos.

Netto e Fernández (2015) e Porto (2006) mencionam que existem diversas equações para calcular o fator de atrito em escoamentos turbulentos. Para tubulações hidráulicas lisas, as equações mais utilizadas são a de Blasius (Equação 7) e von Kármán (Equação 8). Já para o regime hidráulicamente rugoso, os autores citam as equações de Nikuradse (Equações 9 e 10). Em relação à zona de fluxo misto, as fórmulas de Colebrook-White (Equação 11) e Swamee-Jain (Equação 12) são comumente adotadas.

$$f = \frac{0,316}{\text{Rey}^{0,25}} \quad (7)$$

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

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \frac{D}{2\varepsilon} + 1,74 \quad (9)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \left(\frac{3,71D}{\varepsilon} \right) \quad (10)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3,71D} + \frac{2,51}{\text{Rey}\sqrt{f}} \right) \quad (11)$$

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{\text{Rey}^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (12)$$

Swamee (1993) apresentou uma equação para o cálculo do fator de atrito válida para qualquer tipo de escoamento, apresentada na Equação 13.

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{\text{Rey}} \right)^8 + 9,5 \left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{\text{Rey}^{0,9}} \right) - \left(\frac{2500}{\text{Rey}} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125} \quad (13)$$

Mais recentemente, diversas outras fórmulas explícitas foram desenvolvidas para o cálculo do fator de atrito para os diferentes regimes de escoamento (Brkić, 2011; Sousa; Neto, 2014; Avci; Karagoz, 2019; Díaz-Damacillo; Plascencia, 2019).

Observa-se que, para escoamentos turbulentos rugosos e mistos, mais frequentes nas redes de distribuição de água, as fórmulas para o cálculo do fator de atrito necessitam do valor da rugosidade absoluta. Conforme Espartel (2017), a rugosidade em tubulações resulta da presença de irregularidades e desvios microgeométricos, como saliências e reentrâncias, na superfície do tubo. Além disso, esse parâmetro é influenciado pelo material e pela idade da tubulação. A Tabela 1 apresenta algumas sugestões de rugosidades absolutas para determinados materiais.

Tabela 1 – Valores de rugosidade absoluta para diferentes materiais

Material	Rugosidade (mm)
Aço rebitado novo	1 a 3
Aço rebitado envelhecido	6
Aço soldado novo	0,05 a 0,10
Aço soldado envelhecido	0,15 a 0,20
Ferro fundido novo	0,25 a 0,50
Ferro fundido envelhecido	3 a 5
PVC	0,0015 a 0,010

Fonte: Adaptado de Porto (2006) e Netto e Fernández (2015).

Outra fórmula bastante reconhecida e amplamente utilizada na hidráulica para o cálculo das perdas de carga em tubulações é a equação de Hazen-Williams, a qual foi desenvolvida empiricamente a partir de análises estatísticas de resultados experimentais. A fórmula é expressa pela Equação 14, que relaciona a perda de carga com a vazão e o diâmetro interno da tubulação, bem como com o coeficiente de rugosidade C. A partir da fórmula de Hazen-Williams, é possível calcular a perda de carga unitária, que representa a perda de carga por unidade de comprimento da tubulação, pela Equação 15. É importante ressaltar que essa

equação é válida apenas para água em temperaturas entre 0°C e 25°C e para diâmetros internos de tubulação entre 0,01 m e 1,22 m.

$$\Delta H = 10,674 \cdot \frac{Q^{1,852}}{D^{4,871} \cdot C^{1,852}} \cdot L \quad (14)$$

$$\nabla H = \frac{\Delta H}{L} = 10,674 \cdot \frac{Q^{1,852}}{D^{4,871} \cdot C^{1,852}} \quad (15)$$

Onde:

- Q é a vazão no trecho (m³/s);
- C é o coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams (m^{0,367}/s).

Enquanto a rugosidade absoluta é um parâmetro que indica as irregularidades na superfície interna da tubulação, o coeficiente C da fórmula de Hazen-Williams representa a suavidade interna do tubo. Valores maiores para o coeficiente C indicam tubos mais lisos, resultando em menores perdas de carga, como pode ser visto nas Equações 14 e 15. De acordo com Netto e Fernández (2015), estas equações são amplamente utilizadas para escoamentos turbulentos, graças à sua simplicidade e eficácia. A popularidade da fórmula de Hazen-Williams também permitiu a obtenção de valores do coeficiente C para vários materiais, como apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores do coeficiente C para diferentes materiais

Material	C (m^{0,367}/s)
Aço soldado novo	130
Aço soldado envelhecido	90
Concreto novo	130
Concreto envelhecido	110
Ferro fundido novo	130
Ferro fundido envelhecido	100
PVC novo	150
PVC envelhecido	130

Fonte: Adaptado de Porto (2006) e Netto e Fernández (2015).

2.3 Qualidade da água em redes de distribuição

O tratamento da água é um processo complexo realizado em estações de tratamento, envolvendo várias etapas e processos como coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção, correção de pH, entre outros. O principal objetivo é remover impurezas e contaminantes, incluindo materiais orgânicos e inorgânicos, microrganismos e substâncias químicas prejudiciais à saúde humana, tornando-a segura para consumo e protegendo a saúde pública.

A desinfecção da água é uma das últimas etapas do tratamento e tem como objetivo produzir água potável livre de microrganismos patogênicos. A inativação dos micro-organismos pode ser realizada por meio de processos físicos ou químicos e é conhecida como desinfecção primária. Após a desinfecção primária, é realizada a manutenção residual, também chamada de desinfecção secundária, que ocorre no sistema de distribuição. O processo de inativação dos microrganismos é essencial para a garantia da qualidade da água fornecida à população (Howe *et al.*, 2016).

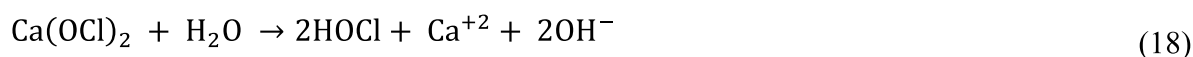
Existem dois grupos principais de desinfetantes utilizados para tratar a água destinada ao consumo humano: os agentes químicos e físicos. Os desinfetantes químicos são compostos que apresentam potencial de oxidação, incluindo o cloro, dióxido de cloro, peróxido de hidrogênio, ácido acético, bromo, iodo, permanganato de potássio, cloreto de bromo e ozônio. Por outro lado, os agentes físicos são caracterizados por sua ação referente à energia de radiação, sendo os principais a radiação UV, gama e solar. Para uso doméstico, a fervura da água também é uma opção. É importante ressaltar que a escolha do método de desinfecção deve ser avaliada considerando as características da água, o tipo de microrganismo presente e a finalidade da água tratada (Libânio, 2016).

2.3.1 Desinfecção com compostos de cloro

Segundo Seckler (2017), no Brasil e em toda a América Latina, o cloro é amplamente utilizado como desinfetante em função de sua eficiência e baixo custo. Ele pode ser encontrado em diferentes formas, como o cloro gasoso (Cl_2), hipoclorito de sódio (NaOCl) ou hipoclorito de cálcio (Ca(OCl)_2). Até a década de 1990, as estações de tratamento de água utilizavam predominantemente o cloro gasoso devido ao seu baixo custo em comparação com outras formas de cloro. No entanto, devido a preocupações ambientais associadas ao seu uso, muitas empresas de saneamento têm optado por mudar para o hipoclorito de sódio ou

hipoclorito de cálcio. Essa transição é um reflexo das preocupações crescentes com a segurança e a sustentabilidade ambiental das práticas de tratamento de água.

As Equações 16, 17 e 18 apresentam as reações principais do cloro gasoso, hipoclorito de sódio e hipoclorito de cálcio, respectivamente, quando utilizados no tratamento de águas para abastecimento.

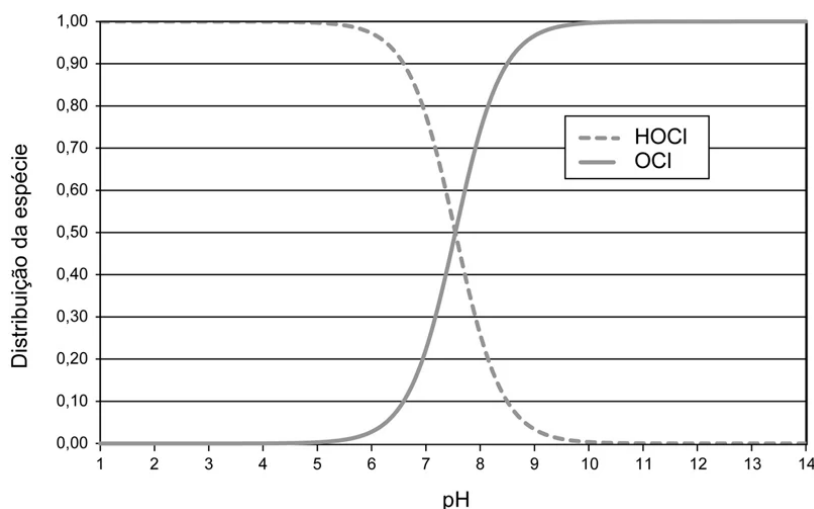


Observa-se nas Equações 16, 17 e 18, que, em todos os casos, há a formação do ácido hipocloroso (HOCl). Esse, por sua vez, dissocia-se na fase líquida, permitindo a formação do íon hipoclorito (OCl⁻), como mostra a Equação 19.



De acordo com Libânio (2016), tanto o ácido hipocloroso (HOCl) quanto o íon hipoclorito (OCl⁻) possuem propriedades desinfetantes, e a soma de suas concentrações é denominada cloro residual livre. Essas duas espécies químicas têm efeitos significativos sobre o processo de desinfecção da água, sendo que a proporção relativa entre elas é fortemente influenciada por fatores ambientais, como a temperatura e, principalmente, o pH, conforme ilustrado na Figura 7. Howe *et al.* (2016) explicam que o HOCl exibe uma cinética de desinfecção consideravelmente mais rápida e, por conseguinte, é reconhecido como um desinfetante mais potente do que o OCl⁻. Em função dessa característica, os autores recomendam que faixas de pH mais baixas sejam adotadas quando se utiliza cloro para desinfecção da água, assegurando uma maior concentração de ácido hipocloroso na solução. Isso contribui para uma eficácia de desinfecção mais elevada, tornando o processo mais seguro e eficiente para os padrões de qualidade de água exigidos.

Figura 7 – Distribuição do ácido hipocloroso e do íon hipoclorito em função do pH, para a temperatura de 25 °C.



Fonte: Seckler, 2017.

O cloro é amplamente utilizado como desinfetante devido à sua eficácia comprovada. Entretanto, é importante destacar que o uso excessivo de cloro pode acarretar efeitos colaterais indesejáveis e até mesmo prejudiciais à saúde. Uma superdosagem de cloro residual pode gerar problemas de sabor e odor, tornando a água imprópria para o consumo humano. É importante lembrar que a maioria das águas naturais contém matéria orgânica, que pode reagir quimicamente com o cloro e gerar compostos prejudiciais à saúde, como os trihalometanos (THMs), tais como o clorofórmio, diclorobromometano e bromofórmio. A formação desses compostos é influenciada pela dose de cloro, níveis totais de carbono orgânico, tempo de contato e pH da água, o que reforça a importância de um controle rigoroso da dosagem de cloro utilizada no processo de desinfecção (Tzatchkov *et al.*, 2014).

A Portaria de Consolidação nº 5/2017 do Ministério da Saúde estabelece como valor mínimo para o cloro residual livre a concentração de 0,2 mg/L em toda a extensão da rede de distribuição. Como limite máximo, a mesma portaria estabelece o valor de 5,0 mg/L.

2.3.2 Transporte de cloro em redes de distribuição de água

Durante o processo de distribuição, a qualidade da água que chega ao consumidor final pode ser afetada por diversas variáveis. A rede de distribuição é composta por uma série de elementos, como tubulações, cruzamentos, tanques, estações de bombeamento, entre outros, que atuam como um enorme reator físico-químico e biológico. É comum que ocorram mudanças na qualidade da água, como a redução do teor de desinfetante residual e o aumento

da população microbiana, influenciadas pelas características da água, dos materiais empregados e do tempo de contato com as superfícies internas das tubulações e tanques, o que é influenciado pela velocidade do fluxo e outras características hidráulicas. Assim, para garantir a qualidade da água para o consumidor final, é fundamental estudar o escoamento em tubulações e compreender o comportamento da água em RDAs (Tzatchkov *et al.*, 2014).

De acordo com Tzatchkov, Aldama e Arreguin (2002), a Equação 20 descreve o processo de advecção-dispersão-reação em um escoamento através de uma tubulação de seção plena para uma substância não conservativa, como é o caso do cloro.

$$\frac{\partial C_C}{\partial t} = -V \frac{\partial C_C}{\partial x} + D_x \frac{\partial^2 C_C}{\partial x^2} - K C_C \quad (20)$$

Onde:

- C_C é a concentração de cloro residual (mg/m^3);
- t é o tempo (s);
- x representa a distância longitudinal ao longo da tubulação (m);
- D_x é o coeficiente de dispersão longitudinal (m^2/s);
- K é a constante de decaimento total de cloro (s^{-1}).

O fenômeno da dispersão é o resultado da combinação do efeito da difusão e da não uniformidade da velocidade na seção transversal. A difusão pode ser descrita como um transporte de massa devido a movimentos randômicos da água. Este processo ocorre em diferentes escalas e pode ser classificado como difusão molecular ou turbulenta. A difusão molecular ocorre devido aos movimentos das moléculas das substâncias contidas na água. Essa tende a transportar o material contido na água de regiões de alta concentração para baixa concentração. Já a difusão turbulenta ocorre devido à interação de vórtices de diferentes tamanhos que se formam no fluxo. Assim como a molecular, esta tende a minimizar os gradientes de concentração das substâncias contidas na água (Chapra, 1997).

O EPANET, *software* desenvolvido pela agência estatal norte-americana *Environmental Protection Agency* (EPA) e amplamente utilizado para modelagem de RDAs, considera a dispersão longitudinal um mecanismo de transporte pouco importante para a maioria das condições operacionais, admitindo a não existência de mistura de massas entre segmentos adjacentes que se deslocam ao longo da tubulação (Rossman *et al.*, 2000). Dessa

forma, a equação de advecção com reação utilizada no EPANET despreza a dispersão longitudinal.

Conforme Chapra (1997), ao assumir um reator de fluxo de pistão, desprezar a dispersão e adotar um regime de escoamento permanente, a Equação 20 pode ser reformulada, como mostrado na Equação 21. Admitindo que $C_C = C_{C_M}$ em $x = 0$, essa equação pode ser resolvida, resultando na Equação 22.

$$V \frac{\partial C_C}{\partial x} + KC_C = 0 \quad (21)$$

$$C_{C_J} = C_{C_M} e^{-K \frac{x}{V}} \quad (22)$$

Onde:

- C_{C_J} é a concentração de cloro no nó de jusante (mg/L);
- C_{C_M} é a concentração de cloro no nó de montante (mg/L).

O decaimento da concentração de cloro residual, ao longo de uma RDA, se deve majoritariamente às reações que ocorrem no volume de escoamento e nas paredes das tubulações. No volume de escoamento, o cloro residual pode sofrer decaimento devido a diversos fatores, tais como as reações com matéria orgânica, amônia, ferro, manganês e sulfatos presentes na água. Além dessas reações químicas, a formação de biofilme nas paredes das tubulações pode contribuir para a redução do cloro residual, uma vez que as bactérias que compõem o biofilme podem consumir o cloro e reduzir sua eficácia como agente desinfetante (Libânio, 2016).

O coeficiente K , presente nas equações apresentadas de transporte de cloro, refere-se à ação conjugada das reações no volume de escoamento e nas paredes das tubulações. Essas reações podem ser analisadas, também, de forma isolada. Nesse caso, o decaimento de cloro no volume de escoamento é afetado pelo tipo de fonte da água, pela temperatura e pelo método de tratamento, enquanto o decaimento de cloro na parede da tubulação é afetado pelo material de que os tubos são feitos e pela condição em que esses tubos se encontram (Minaee *et al.*, 2019). Segundo Rossman, Clark e Grayman (1994), quando admitidas reações de primeira ordem tanto para o decaimento devido às reações no volume de escoamento como devido às reações na parede da tubulação, a Equação 23 pode ser empregada.

$$K = k_b + \frac{k_w K_f}{R_H(k_w + K_f)} \quad (23)$$

Onde:

- k_b é o coeficiente de decaimento de cloro no volume de escoamento (dia^{-1});
- k_w é o coeficiente de decaimento de cloro na parede da tubulação (m/dia);
- K_f é o coeficiente de transferência de massa (m/dia);
- R_H é o raio hidráulico (m).

Rossman *et al.* (2000) indica que é possível determinar o K_f utilizando o número adimensional de Sherwood (Sh), como mostrado na Equação 24. O Sh pode ser calculado usando as Equações 25 para o regime laminar e 26 para o regime de transição e turbulento, com base no número adimensional de Schmidt (Sc). O Sc pode ser determinado utilizando a Equação 27.

$$K_f = Sh \frac{D_M}{D} \quad (24)$$

$$Sh = 3,65 + \frac{0,0668(D/L)ReySc}{1 + 0,04[(D/L)ReySc]^{2/3}} \quad (25)$$

$$Sh = 0,0149Rey^{0,88}Sc^{1/3} \quad (26)$$

$$Sc = \frac{v}{D_M} \quad (27)$$

Onde:

- D_M é o coeficiente de difusão molecular do químico (m^2/s).

Para o EPANET, a 20°C , o valor considerado para o D_M do cloro é $1,204 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, e para a v é de $1,01 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Recentemente, diversos estudos têm sido conduzidos com o propósito de investigar o comportamento do coeficiente de decaimento k_b em RDAs (Fisher; Kastl; Sathasivan, 2016;

Saidan *et al.*, 2017; Ozdemir; Buyruk, 2018; Zhong *et al.*, 2021; Kang; Ahn, 2022). Devido à sua relação com a fonte de água, temperatura e concentração inicial, a literatura apresenta uma variedade de valores para esse parâmetro. Maleki *et al.* (2023) conduziram uma extensa revisão do estado da arte desse parâmetro, identificando valores que variam de -0,01/dia a -18/dia.

O coeficiente k_b é comumente determinado em laboratório por meio do teste da garrafa. Neste teste, uma amostra de água é retirada de uma tubulação e colocada em uma garrafa de vidro limpa. A concentração inicial de cloro livre é medida e a garrafa é mantida em um ambiente escuro e refrigerado para impedir a fotodegradação e a volatilização do cloro. Em seguida, a concentração é medida em intervalos regulares e o k_b é calculado a partir da queda da concentração de cloro livre em função do tempo (Silva *et al.*, 2019; Vargas *et al.*, 2021). Ozdemir e Buyruk (2018), em sua pesquisa, revelaram que não há diferença significativa entre os valores calculados para k_b pelo teste e os valores reais.

Enquanto existe um procedimento para medir o coeficiente k_b , não há uma técnica padrão para determinar o coeficiente k_w , que deve ser obtido por meio de calibrações do modelo de qualidade da água. Diversos estudos já foram realizados com o objetivo de desenvolver técnicas para determinar este coeficiente ou calcular valores de k_w para redes específicas, como os de Dini e Tabesh (2016), Minaee *et al.* (2019) e Mompremier *et al.* (2022). Outras abordagens incluem adaptações do método de calibração MIGHA (Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo), como proposto por Pereira e Castro (2013) e Bezerra (2018).

Diferentemente de alguns parâmetros hidráulicos, como as rugosidades absolutas e os coeficientes C de Hazen-Williams, que possuem valores mais estabelecidos e frequentemente são fornecidos pelos fabricantes para diferentes materiais, o coeficiente k_w ainda não possui uma padronização clara na literatura. Essa falta de uniformidade tem sido um estímulo para uma série de estudos dedicados à determinação desse parâmetro. Rossman *et al.* (2000) observa que o processo de envelhecimento das tubulações, que resulta no aumento da rugosidade, também pode intensificar a reatividade da parede com certas espécies químicas, como o cloro e outros desinfetantes. Além disso, o autor ressalta que, para reações de primeira ordem, o coeficiente k_w pode variar de 0 a um máximo de 1,5 m/dia. Minaee *et al.* (2019) calcularam um valor ótimo de -1,233 m/dia para o k_w em uma rede onde o material predominante era o Ferro Fundido. Buamah *et al.* (2014), em um estudo realizado na RDA da cidade de Kumasi, em Gana, determinaram os seguintes valores: -0,24 m/dia e -0,38 m/dia para o PVC e Ferro Fundido, respectivamente. Além disso, García-Ávila *et al.* (2021) calcularam, para uma rede localizada em Azogues, no Equador, com trechos de PVC, um valor médio de -0,066 m/dia.

2.4. Modelagem e Calibração em redes de distribuição de água

A modelagem computacional e a calibração dos parâmetros de RDAs são ferramentas importantes para o planejamento e gestão eficiente de sistemas de abastecimento de água. Através da modelagem, é possível entender o comportamento hidráulico e de qualidade da água na RDA, possibilitando a identificação de pontos críticos, aprimoramento do projeto e a antecipação de cenários de emergência. A calibração dos modelos é essencial para que as previsões geradas sejam confiáveis e representem de forma fiel o comportamento do sistema. Além disso, a calibração pode fornecer informações importantes sobre parâmetros que não podem ser facilmente medidos na rede, possibilitando a realização de ajustes que resultam em melhorias significativas na operação do sistema.

Segundo Meirelles *et al.* (2017), a calibração em RDAs é um processo essencial para minimizar as discrepâncias entre os valores observados e simulados, por meio do ajuste dos parâmetros de entrada do modelo. Moghaddam *et al.* (2020) afirmam que, tanto o modelo hidráulico quanto o modelo de qualidade da água em RDAs requerem calibração. No entanto, essa calibração é um desafio complexo, exigindo tempo, experiência e consideração de diversos parâmetros. Para os modelos hidráulicos, é comum calibrar parâmetros como a rugosidade da tubulação, a demanda nodal, o nível do tanque e as características da bomba. Já para os modelos de qualidade, os autores destacam a necessidade de se ajustar os coeficientes de decaimento de cloro na parede e no volume de escoamento.

Segundo Berardi e Giustolisi (2021), a calibração dos modelos hidráulicos envolve a determinação dos parâmetros que, ao serem inseridos em um modelo de simulação hidráulica, resultarão em uma correspondência satisfatória entre as pressões e vazões medidas e previstas na rede. Por outro lado, Fisher, Kastl e Sathasiva (2016) sugerem que um modelo de qualidade da água eficiente deve apresentar uma concordância entre os valores calculados e observados de concentração de cloro residual nos nós da rede.

Existem diversas técnicas empregadas na calibração de RDAs. Uma abordagem comumente utilizada é a otimização heurística, que inclui otimização por enxame de partículas e algoritmos genéticos (Torkomany *et al.*, 2021; Sangroula *et al.*, 2022). Esses métodos exploram de forma inteligente o espaço de soluções, buscando encontrar alternativas de boa qualidade sem examinar todas as combinações possíveis. Além disso, técnicas de regressão e estatística, como regressão linear e análise de sensibilidade, são aplicadas para identificar a relação entre os parâmetros do modelo e os resultados da simulação (Jafari *et al.*, 2021; Badeenezhad *et al.*, 2021). Algoritmos de aprendizado de máquina, como redes neurais

artificiais (RNAs) e máquinas de vetor de suporte, também são utilizados para calibrar os modelos hidráulicos e de qualidade da água (De Santi *et al.*, 2022; Hossain *et al.*, 2022). Essas técnicas oferecem uma abordagem mais automatizada e adaptativa, capaz de lidar com a complexidade e incertezas dos sistemas de distribuição de água. A escolha da técnica de calibração depende das características da rede, disponibilidade de dados e dos objetivos específicos do estudo.

Além das metodologias mencionadas, um método promissor que foi aprimorado nos últimos anos é o Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo (MIGHA). Esse método é uma abordagem implícita que utiliza um otimizador matemático em cada iteração para atualizar um parâmetro, buscando minimizar uma função objetivo específica. Diversos estudos têm se dedicado a adaptar o MIGHA para a calibração de diferentes parâmetros das RDAs, incluindo as rugosidades absolutas, coeficientes C de Hazen-Williams e coeficientes de decaimento de cloro (Sousa *et al.*, 2022).

A Tabela 3 apresenta uma compilação de estudos recentes sobre a modelagem e calibração de RDAs, explorando diferentes parâmetros e métodos de otimização. Os estudos abordam a calibração de rugosidades absolutas, coeficientes de decaimento de cloro, demandas e vazamentos, refletindo a complexidade das variáveis envolvidas. Além disso, utilizam métodos como Algoritmos Genéticos e Redes Neurais, buscando aprimorar a precisão dos modelos hidráulicos e da qualidade da água.

Tabela 3 – Calibrações em redes de distribuição de água (continua)

Referência	Parâmetro Calibrado ¹	Método de Otimização ²
Pereira e Castro (2013)	k_w	MIGHA
Salvino, Carvalho e Gomes (2015)	ϵ , DEM, PCL, CV, VZ, Z, DIA	AG
Bezerra, Castro e Araujo (2017)	ϵ	MIGHA
Meirelles <i>et al.</i> (2017)	C_{H-W}	OEP e RNA
Jadhao e Gupta (2018)	ϵ	MI
Minaee <i>et al.</i> (2019)	k_b e k_w	OEP e AG
Giraldo-Gozález e Rodrigues (2020)	VZ	RL, RP, RPE, AIG, MVS, RNA e Bayes
Moghaddam <i>et al.</i> (2020)	C_{H-W} e k_w	OEP
Sousa, Bezerra e Castro (2020)	ϵ	MIGHA

(conclusão)

Araujo, Bezerra e Castro (2021)	DEM e VZ	MIGHA
Perea <i>et al.</i> (2021)	DEM	RNA e AG
Pérez <i>et al.</i> (2022)	k_b e k_w	ACP
Gómez-Coronel <i>et al.</i> (2023)	k_b e k_w	AG

Fonte: Elaborado pelo autor.

Notas:

- 1) CV = Configuração de Válvula; DEM = Demandas; DIA = Diâmetros; PCL = Perdas de carga localizadas; VZ = Vazamentos; Z = Cotas;
 C_{H-W} = Coeficiente C de Hazen-Williams; ϵ = Rugosidades absolutas; k_b = Coeficiente de decaimento de cloro no volume de escoamento; k_w = Coeficiente de decaimento de cloro na parede da tubulação;
- 2) ACP = Análise dos Componentes Principais; AG = Algoritmo Genético; AIG = Árvore Impulsionada por Gradiente; MI = Método Iterativo; MIGHA = Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo; MVS = Máquina de Vetores de Suporte; OEP = Otimização por Enxame de Partículas; RL = Regressão Linear; RNA = Rede Neural Artificial; RP = Regressão Polinomial; RPE = Regressão Polinomial Evolutiva

2.5 Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo (MIGHA)

O Método Iterativo do Gradiente Hidráulico (MIGH), precursor do MIGHA, é uma abordagem implícita desenvolvida inicialmente para calibrar a transmissividade hidráulica em aquíferos subterrâneos. O objetivo desse método é aproximar os gradientes hidráulicos calculados e observados no aquífero. Para isso, utiliza-se a Equação 28 para otimizar a transmissividade e a Equação 29 como função objetivo a ser minimizada (Guo; Zhang, 1994; Guo; Zhang, 2000).

$$T_j^{i+1} = T_j^i - \lambda \left(\frac{\partial f_{obj}}{\partial T_j} \right) \quad (28)$$

$$f_{obj} = \int_R (\nabla H_c - \nabla H_o)^2 dx dy \quad (29)$$

Onde:

- T é a transmissividade (m^2/s);
- i e j são os índices que representam a iteração e a célula do aquífero, respectivamente (-);
- ∇H_c e ∇H_o são os gradientes hidráulicos calculados e observados (-), respectivamente;

- R é o domínio de fluxo;
- λ comprimento do passo do MIGH (-).

Uma adaptação do método foi proposta por Schuster e Araújo (2004), que substituíram a Equação 28 pela Equação 30. Essa modificação resultou no surgimento do Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo (MIGHA). Dessa forma, o MIGHA é uma variação do MIGH que utiliza a Equação 30 em vez da Equação 28 para otimizar a transmissividade hidráulica.

$$T_j^{i+1} = T_j^i \frac{|\nabla H_{c_j}^i|}{|\nabla H_{o_j}^i|} \quad (30)$$

Como critério de estabilidade, a cada iteração é calculado o ângulo θ formado entre os vetores dos gradientes hidráulicos observados e calculados, conforme a Equação 31. Caso o ângulo seja igual ou superior a 60° , a transmissividade não é modificada nesta iteração.

$$\cos\theta_j^i = \frac{\nabla H_{o_j}^i \nabla H_{c_j}^i}{|\nabla H_{o_j}^i| |\nabla H_{c_j}^i|} \quad (31)$$

Posteriormente, o MIGHA passou por adaptações em diversas pesquisas, com o objetivo de aplicá-lo a RDAs. Durante essas adaptações, tanto a equação de otimização quanto a função objetivo foram modificadas, buscando adequar-se à calibração de diferentes parâmetros, como destacado na Tabela 3.

A utilização do MIGHA em RDAs envolve o conceito de três redes distintas: a Rede Calculada, a Rede Observada e a Rede Gabarito (Sousa; Bezerra; Castro 2020). Cada uma dessas redes desempenha um papel crucial no processo de calibração e é descrita da seguinte forma:

- Rede Calculada: é o modelo computacional da RDA que será calibrado. Inicialmente, essa rede possui parâmetros estimados, como rugosidade das tubulações e coeficientes de decaimento de cloro, que serão atualizados ao longo do processo de calibração. A Rede Calculada representa a infraestrutura do sistema de distribuição de água, incluindo tubulações, tanques, bombas e outros componentes hidráulicos. Ao final da calibração,

ela será o modelo ajustado da rede, refletindo de forma mais precisa o comportamento do sistema real. Em resumo, a Rede Calculada é o ponto de partida do processo de calibração e, após a conclusão, servirá como o modelo computacional calibrado da RDA.

- Rede Observada: é uma variação da Rede Calculada, com a mesma configuração estrutural e parâmetros estimados. No entanto, a Rede Observada se distingue por forçar os valores das variáveis de estado (como a carga de pressão ou concentração de cloro residual) em alguns nós da rede a atingirem os valores observados empiricamente. Esses nós correspondem aos locais onde há medições disponíveis e são fundamentais para guiar a calibração. Dependendo do tipo de calibração a ser realizada, as variáveis de estado que precisam ser forçadas podem variar. Essa rede atua como um recurso auxiliar que contribui para ajustar os parâmetros da Rede Calculada.
- Rede Gabarito: representa a rede real, ou seja, a RDA com todos os seus parâmetros e variáveis de estado corretos. Na prática, porém, os parâmetros da rede real são desconhecidos — razão pela qual o processo de calibração é necessário. Assim, a Rede Gabarito é um conceito teórico que serve como um ideal de referência. Em estudos com redes fictícias, a Rede Gabarito é definida previamente, com todos os seus parâmetros conhecidos. Nesses casos, ela oferece uma base para comparar os resultados da calibração e verificar o quão próximos os parâmetros da Rede Calculada estão dos valores reais.

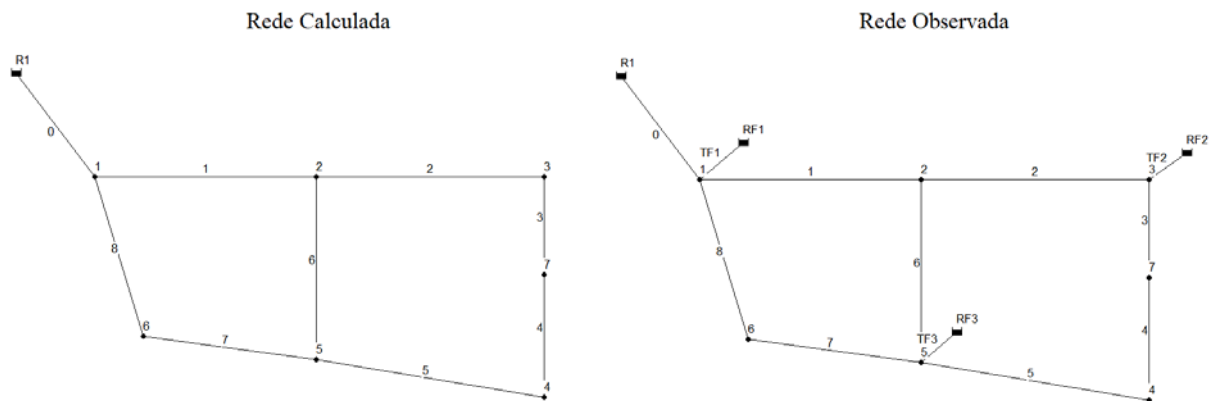
Para criar a Rede Observada durante a calibração das rugosidades absolutas das tubulações, o método MIGHA utiliza reservatórios de nível fixo fictícios. Esses reservatórios são empregados para forçar certos nós da Rede Observada a atingir os valores de carga de pressão testemunhados na Rede Gabarito. Para estabelecer a conexão entre o nó e o reservatório, é criada uma tubulação também fictícia, com um diâmetro extremamente grande e comprimento extremamente pequeno. Essa configuração visa minimizar a perda de carga e garantir que a pressão medida para aquele nó na Rede Gabarito seja igual à retornada na Rede Observada (Rocha, 2013; Bezerra, 2018).

A presença dos reservatórios fictícios no MIGHA na calibração das rugosidades absolutas, ao introduzir pequenas vazões no sistema, causa alterações nas configurações das perdas de carga unitárias nos trechos e nas pressões nos nós. Essa discrepância entre a Rede

Observada e a Rede Calculada é aproveitada para atualizar os parâmetros ao longo do processo, conforme será explicado posteriormente. Por outro lado, no caso da calibração do kw, adota-se uma abordagem diferente. Em vez de recorrer aos reservatórios fictícios, são utilizados fixadores de concentração. Esses fixadores são empregados para garantir que os nós da Rede Observada apresentem os valores de concentração de cloro residual medidos nos pontos correspondentes da rede (Pereira, 2009; Bezerra, 2018).

A Figura 8 ilustra um exemplo de calibração de rugosidades absolutas utilizando o MIGHA, mostrando a Rede Calculada e a Rede Observada. Nesse caso específico, foram utilizados 3 nós com cargas de pressão observadas para a realização do processo de calibração.

Figura 8 – Exemplo de Rede Calculada e Rede Observada no MIGHA



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.5.1 MIGHA na calibração de rugosidades absolutas

No seu trabalho, Rocha (2013) considerou a relação existente entre a rugosidade absoluta e o fator de atrito com a perda de carga calculada pela fórmula universal. Com base nessa consideração, o autor adaptou a equação de otimização do MIGHA e propôs a seguinte formulação, que é apresentada na Equação 32. Nessa abordagem, os valores de ∇H_c e ∇H_o são obtidos através das repetidas simulações da Rede Calculada e da Rede Observada. Cada simulação corresponde a uma iteração do método. A função objetivo a ser minimizada, nesse caso, é apresentada pela Equação 33.

$$\varepsilon_j^{i+1} = \varepsilon_j^i \frac{|\nabla H_{C_j}^i|}{|\nabla H_{O_j}^i|} \quad (32)$$

$$f_{obj} = \sum_{nT} (\nabla H_o - \nabla H_c)^2 \quad (33)$$

Onde:

- i e j são os índices que representam a iteração e o trecho, respectivamente (-);
- $\nabla H_{C_j}^i$ e $\nabla H_{O_j}^i$ são os gradientes hidráulicos (perdas de carga unitárias) obtidos pelas simulações da Rede Calculada e da Rede Observado, respectivamente (-);
- nT corresponde ao número total de trechos da rede (-).

Já na abordagem apresentada por Bezerra, Castro e Araújo (2017) e Bezerra (2018), a metodologia empregada consiste na calibração do fator de atrito pelo MIGHA, com posterior ajuste da rugosidade absoluta. A Equação 34 apresenta a formulação proposta pelos autores. Como critérios de parada do método, os autores admitiram um valor mínimo a ser alcançado para a Equação 33 de 0,000000001 e um número máximo de iterações igual a 100.

$$f_j^{i+1} = f_j^i \left(\frac{|\nabla H_{C_j}^i|}{|\nabla H_{O_j}^i|} \right)^{-1} \quad (34)$$

O modelo proposto pelos autores utiliza a biblioteca do EPANET para realizar simulações das redes. Essa biblioteca emprega a fórmula de Swamee-Jain para o cálculo do fator de atrito, conforme descrito na Equação 12. Com o objetivo de determinar as rugosidades absolutas em cada trecho para a respectiva iteração, os autores isolaram essa variável na Equação 12, resultando na Equação 35.

$$\varepsilon = \frac{3,7D \times \left(\text{Rey}^{0,9} - 5,74 \times 10^{0,5/\sqrt{f}} \right)}{\text{Rey}^{0,9} \times 10^{0,5/\sqrt{f}}} \quad (35)$$

O algoritmo proposto por Bezerra, Castro e Araújo (2017) e Bezerra (2018) utiliza a Equação 34 para calcular f_j^{i+1} , que é posteriormente aplicado na Equação 35 para determinar ε_j^{i+1} . Caso o valor resultante dessa equação esteja abaixo de 0 ou acima de 12 mm — o dobro

do valor máximo registrado por Porto (2006) para tubulações —, o resultado é descartado na iteração atual. Nesse cenário, o valor ε_j^i é mantido como a rugosidade para aquele trecho, sendo utilizado nas próximas simulações da Rede Calculada e da Rede Observada.

Além da verificação dos valores máximos e mínimos calculados para ε_j^{i+1} , os autores mantiveram como critério de estabilidade do método uma verificação semelhante a prevista pelo MIGHA original na Equação 31, onde se verificava o ângulo formado entre os vetores de ∇H_o e ∇H_c . Adaptando para RDAs, esse critério de controle apresenta a seguinte formulação, expressa pela Equação 36.

$$\cos\theta_j^i = \frac{Q_{o_j}^i Q_{c_j}^i}{|Q_{o_j}^i| |Q_{c_j}^i|} \quad (36)$$

Onde:

- $Q_{c_j}^i$ e $Q_{o_j}^i$ são as vazões obtidas pelas simulações da Rede Calculada e da Rede Observada, respectivamente (L/s).

Ao analisar a Equação 36, fica evidente que θ_j^i pode assumir apenas dois valores: 0° e 180° . O valor de 180° é alcançado quando o sentido do fluxo no trecho difere entre a Rede Calculada e a Rede Observada. Nesse caso, a rugosidade também não é atualizada nesta iteração.

Sousa (2020) e Sousa, Bezerra e Castro (2020) apresentaram uma nova sub-rotina de uniformização que aprimorou os resultados obtidos pelo MIGHA na calibração de rugosidades absolutas. Neste novo algoritmo, ao final de cada iteração, os valores calculados utilizando a Equação 35 passam por uma etapa de verificação. Para cada conjunto de materiais, é verificada a presença de valores atípicos dentro daquela família de tubulações. Em outras palavras, para cada material, uma lista de rugosidades absolutas calculadas é analisada em busca de resultados que se distanciam consideravelmente dos demais pertencentes ao mesmo grupo. Esses valores identificados como atípicos são, então, substituídos pela mediana das rugosidades absolutas encontradas para o respectivo material.

A Figura 9 ilustra o funcionamento dessa sub-rotina em uma iteração específica. Neste exemplo, é demonstrada a calibração de uma rede composta por 16 trechos, dos quais oito são de PVC e oito são de ferro, utilizando o MIGHA com a sub-rotina de uniformização acoplada. Essa análise oferece uma compreensão clara do impacto dessa sub-rotina no processo

de calibração, evidenciando como ela contribui para melhorar a precisão e a confiabilidade dos resultados obtidos.

Figura 9 – Exemplo de atuação da sub-rotina de uniformização em uma dada iteração

Rugosidades calibradas (ε_j^{i+1})		Sub-rotina de uniformização ➔	Rugosidades calibradas (ε_j^{i+1})	
PVC	Ferro		PVC	Ferro
0,06	0,33		0,06	0,33
0,05	0,29		0,05	0,29
0,07	0,44		0,07	0,44
0,77	0,35		0,06	0,35
0,08	0,31		0,08	0,31
0,04	0,90		0,04	0,34
0,06	0,41		0,06	0,41
0,04	0,01		0,04	0,34

Fonte: Sousa (2020).

Para a detecção dos valores atípicos dentro dos grupos de tubulações, essa sub-rotina de uniformização emprega um método conhecido como Z-score Modificado, proposto inicialmente por Iglewics e Hoaglin (1993) e desenvolvido com o intuito de detectar *outliers* dentro de um conjunto de dados. Nessa metodologia, um valor de Z modificado (M_j) é calculado para cada valor da amostra que está sendo analisada. Em seguida, verifica-se se esse valor está dentro dos limites aceitáveis. Caso contrário, ele é considerado um *outlier*. As Equações 37 e 38 apresentam a sequência de cálculos utilizada por esse método.

$$MAD_{amostra} = \text{mediana}|x_j - \hat{x}| \quad (37)$$

$$M_j = \frac{0,6745(x_j - \hat{x})}{MAD_{amostra}} \quad (38)$$

Onde:

- $MAD_{amostra}$ é a mediana dos desvios absolutos em relação à mediana da amostra;
- x_j representa os valores da amostra. Na calibração das rugosidades absolutas, são os valores calculados do parâmetro para cada trecho, em uma determinada iteração;
- \hat{x} representa a mediana dos valores de x_j .

Iglewics e Hoaglin (1993) sugerem que valores de M_j maiores que 3,5 e menores que -3,5 sejam considerados outliers. Essa escolha é baseada em um estudo dos autores com 10.000 replicações, no qual o valor de 3,5 foi identificado como o limite capaz de rotular uma proporção adequada de outliers. Na sub-rotina de uniformização, acoplada ao MIGHA, levou-se em consideração que amostras de menor tamanho apresentam maior dificuldade para detectar valores atípicos. Deste modo, para conjuntos com até cinco tubulações de mesmo material, os valores considerados como limite para M_j foram -0,5 e 0,5. Esses limites praticamente obrigam todos os trechos desse conjunto a ter uma única rugosidade, que é a mediana calculada para o grupo. Isso ocorre porque, se uma determinada rede contém apenas cinco ou menos trechos do mesmo material, é provável que eles tenham sido instalados ao mesmo tempo e sejam do mesmo fabricante, reforçando a ideia de que possuem rugosidades absolutas semelhantes. Para conjuntos que possuam entre seis e dez tubulações de mesmo material, os valores admissíveis de M_j adotados se encontram na faixa de -2,0 a 2,0. Já para grupos de 11 ou mais trechos semelhantes, os valores limites admitidos são -3,5 e 3,5. Essa abordagem permite a detecção de valores atípicos e a uniformização das rugosidades absolutas dentro de cada grupo de tubulações, garantindo maior consistência na calibração desse parâmetro (Sousa; Bezerra; Castro, 2020).

Os autores, além de implementarem a sub-rotina de uniformização, conduziram experimentos para avaliar o impacto da função objetivo na calibração. Além da fórmula proposta pela Equação 33, foram testadas outras três funções objetivo, definidas pelas Equações 39, 40 e 41. Os estudos revelaram que a escolha de qualquer uma das funções não impactou significativamente nos resultados.

$$f_{\text{obj}2} = \sum_{nN} \frac{(P_o - P_c)^2}{(P_o)^2} \quad (39)$$

$$f_{\text{obj}3} = \sum_{nT} \frac{(Q_o - Q_c)^2}{(Q_o)^2} \quad (40)$$

$$f_{\text{obj}4} = \sum_{nN} \frac{(P_o - P_c)^2}{(P_o)^2} + \sum_{nT} \frac{(Q_o - Q_c)^2}{(Q_o)^2} + \sum_{nT} \frac{(\nabla H_o - \nabla H_c)^2}{(\nabla H_o)^2} \quad (41)$$

Onde:

- P_O é a carga de pressão no nó da rede observada (mca);
- P_C é a carga de pressão no nó da rede calculada (mca);
- nN é o número de nós da rede.

Observando a rápida estabilização do algoritmo MIGHA, Sousa (2020) conduziu seus estudos utilizando 100 iterações por calibração. O resultado final do método é determinado pela iteração que apresenta o menor valor calculado para a função objetivo selecionada.

Desse modo, o algoritmo MIGHA, com a sub-rotina de uniformização na calibração das rugosidades absolutas, segue os passos a seguir: inicialmente, são simuladas as redes Calculada e Observada com os parâmetros estimados. Através das Equações 34 e 35, utilizando os gradientes hidráulicos de cada rede ($\nabla H_{C_j}^i$ e $\nabla H_{O_j}^i$), são calculados os novos valores das rugosidades absolutas (ϵ_j^{i+1}). Em seguida, são verificados os critérios de estabilidade do método, garantindo que o parâmetro calibrado esteja dentro dos limites aceitáveis e empregando a Equação 36 como critério adicional. Na sequência, a sub-rotina de uniformização é aplicada para corrigir valores atípicos que possam ter sido calculados pelo método. Por fim, a função objetivo é calculada para essa iteração. Se o critério de parada for atendido, a calibração é finalizada e o resultado é a rede correspondente à iteração que obteve o menor valor para a função objetivo.

2.5.2 MIGHA na calibração do coeficiente de decaimento de cloro

Com o objetivo de desenvolver um método de calibração específico para o coeficiente k_w , Pereira e Castro (2013) propuseram uma adaptação do método MIGHA, onde a equação de otimização foi modificada para permitir a atualização desse parâmetro. Nessa abordagem, os gradientes hidráulicos foram substituídos pelos gradientes de concentração de cloro, como ilustrado na Equação 42.

$$k_{w_j}^{i+1} = k_{w_j}^i \frac{|\nabla C_{C_{O_j}}^i|}{|\nabla C_{C_{C_j}}^i|} \quad (42)$$

Onde:

- $\nabla C_{C_{O_j}}^i$ e $\nabla C_{C_{C_j}}^i$ são, respectivamente, os gradientes de concentração de cloro observados e calculados.

Naturalmente, com a adaptação do método para a calibração do modelo de qualidade, a função objetivo empregada também foi modificada, empregando-se a Equação 43.

$$f_{obj} = \sum_{nN} (\nabla C_{C_{O_j}} - \nabla C_{C_{C_j}})^2 \quad (43)$$

Bezerra (2018), por sua vez, propôs a utilização da equação de otimização do MIGHA para calibrar o coeficiente de decaimento total de cloro, K. Analisando a relação proporcional existente entre as concentrações de cloro e esse coeficiente, conforme apresentada na Equação 22, o autor introduziu a Equação 44, substituindo os gradientes de concentração de cloro pelos gradientes logarítmicos de concentração de cloro ($\nabla \ln C_C$), calculados pela Equação 45. Essa equação, além de proporcionar uma melhor aderência à relação matemática entre K e a concentração de cloro, contribui para melhorar a sensibilidade do modelo em relação às pequenas flutuações de cloro residual nas RDAs.

$$K_j^{i+1} = K_j^i \left(\frac{|\nabla \ln C_{C_{O_j}}^i|}{|\nabla \ln C_{C_{C_j}}^i|} \right) \quad (44)$$

$$\nabla \ln C_C = \frac{\ln(C_{C_M}) - \ln(C_{C_J})}{L} \quad (45)$$

Onde:

- C_{C_M} e C_{C_J} são, respectivamente, as concentrações de cloro de montante e de jusante (mg/L).

Com os valores calibrados de K calculados pela Equação 45, Bezerra (2018) utilizou, então, a Equação 23, que relaciona esse coeficiente com o kw, o kb e o Kf, para propor as Equações 46 e 47 como método de definição, de forma iterativa, do coeficiente kw.

$$k_w = \frac{R_H(K - k_b)(k_w + K_f)}{K_f} \quad (46)$$

$$k_w = \frac{k_w \cdot K_f}{R_H(K - k_b)} - K_f \quad (47)$$

Assim, de acordo com Bezerra (2018), o processo de calibração do coeficiente k_w pelo MIGHA pode ser resumido da seguinte maneira: primeiro, obtêm-se os gradientes logarítmicos de concentração de cloro calculados e observados por meio da simulação das redes Calculada e Observada, utilizando a Equação 45; em seguida, calcula-se o coeficiente de decaimento total de cloro K_j^{i+1} utilizando a Equação 44; inicialmente, utiliza-se a Equação 46 para determinar o coeficiente k_w correspondente; caso a Equação 46 não retorne valores válidos, a Equação 47 é empregada; posteriormente, a rede é simulada com a nova configuração e a função objetivo é calculada; por fim, verifica-se se os critérios de parada do método foram atingidos.

É importante destacar que o método MIGHA, utilizado para a calibração do modelo de qualidade, não emprega reservatórios fictícios, diferentemente do que ocorre na calibração das rugosidades absolutas. No contexto do modelo de qualidade, o uso de reservatórios fictícios poderia ser considerado para forçar os nós a atingirem as concentrações de cloro medidas em campo. No entanto, se não houver uma diferença de cota piezométrica entre o reservatório e o nó, não ocorrerá transferência de massa. Para corrigir isso, seria necessário adicionar reservatórios com cotas piezométricas superiores às dos nós, o que resultaria em um surgimento indesejado de vazões na rede oriundas destes reservatórios fictícios, alterando a estrutura hidráulica da RDA. Por essa razão, o método, que pressupõe que a rede já esteja hidráulicamente calibrada, utiliza, para criar a Rede Observada, recursos da biblioteca do EPANET para fixar os valores medidos de concentração de cloro nos seus respectivos nós.

2.6 Redes Neurais Artificiais (RNAs)

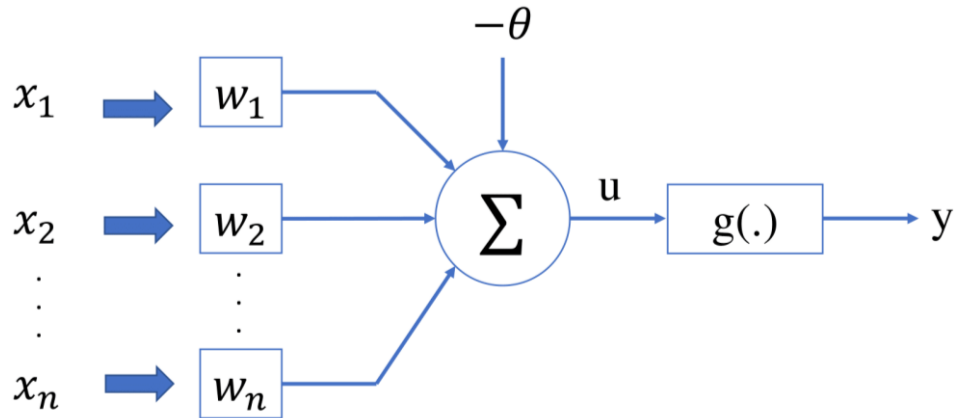
As Redes Neurais Artificiais (RNAs) são modelos computacionais inspirados pelo funcionamento dos neurônios biológicos. Elas foram desenvolvidas com o objetivo de imitar o processo de aprendizado e tomada de decisão do cérebro humano. O conceito de RNAs tem raízes antigas, remontando ao trabalho pioneiro de McCulloch e Pitts (1943), que propuseram

o primeiro modelo artificial de neurônio, como apresentado na Figura 10. Nessa pesquisa seminal, os autores se concentraram principalmente em descrever esse modelo e demonstrar suas capacidades computacionais, enquanto as técnicas de aprendizado não foram o foco central de sua investigação (Braga; Carvalho; Ludermir, 2007).

Considerando a Figura 10, Silva, Spatti e Flauzino (2016) definem o funcionamento do neurônio artificial a partir dos seguintes elementos:

- Sinais de entrada $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$: representam as medidas provenientes do ambiente externo, refletindo os valores das variáveis específicas de uma aplicação. Esses sinais são comumente normalizados para aumentar a eficiência dos algoritmos de aprendizagem;
- Pesos sinápticos $\{w_1, w_2, \dots, w_n\}$: são valores utilizados para ponderar cada uma das variáveis de entrada da rede, permitindo quantificar sua relevância em relação ao funcionamento do neurônio;
- Combinador linear $\{\Sigma\}$: sua função é agregar os sinais de entrada ponderados pelos pesos sinápticos, resultando em um valor de potencial de ativação;
- Limiar de ativação $\{\theta\}$: é uma variável que determina o patamar necessário para que o resultado do combinador linear possa gerar uma determinada saída do neurônio. É comum em alguns modelos adotar um valor unitário e atribuir também um peso sináptico (w_0) ao limiar de ativação;
- Potencial de ativação $\{u\}$: é obtido pela diferença entre o combinador linear e o limiar de ativação. Se o valor é positivo ($u \geq 0$), o neurônio produz um potencial excitatório; caso contrário, o potencial é inibitório;
- Função de ativação $\{g\}$: tem como objetivo introduzir não-linearidades nas saídas dos neurônios, permitindo que a rede seja capaz de aprender e representar relações complexas entre os dados de entrada e as saídas desejadas. Ela determina se um neurônio será ativado ou não com base no potencial de ativação, e também pode restringir a faixa de valores de saída do neurônio;
- Sinal de saída $\{y\}$: representa o valor final produzido pelo neurônio em relação a um conjunto específico de sinais de entrada, podendo ser utilizado por outros neurônios interligados sequencialmente.

Figura 10 – Modelo matemático de um neurônio



Fonte: Silva, Spatti e Flauzino (2016).

Desse modo, as Equações 48 e 59 sintetizam o resultado produzido por um neurônio artificial quando estimulado por n sinais de entrada.

$$u = \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i - \theta \quad (48)$$

$$y = g(u) \quad (49)$$

Dessa forma, o funcionamento de um neurônio artificial pode ser resumido em alguns passos. Primeiramente, um conjunto de valores que representa as variáveis de entrada do neurônio é apresentado. Em seguida, cada entrada é multiplicada pelo seu respectivo peso sináptico. A soma ponderada dos sinais de entrada, subtraída pelo limiar de ativação, resulta no potencial de ativação. Por fim, a saída é compilada a partir da aplicação da função de ativação neural em relação ao potencial de ativação.

Após compreender o funcionamento do neurônio artificial, a próxima etapa consiste em conectar esses neurônios para formar RNAs. Existem diversas formas de construir uma rede neural, envolvendo diferentes arquiteturas, funções de ativação, métodos de aprendizado e ajuste de parâmetros e hiperparâmetros. As seções a seguir abordarão esses temas de forma mais detalhada, fornecendo uma compreensão mais abrangente sobre as diferentes possibilidades na construção e configuração das RNAs. Um enfoque maior será dado aos conhecimentos necessários para a implementação de uma RNA do tipo Perceptron Multicamadas.

2.6.1 Funções de ativação

Bishop (2006) afirma que a escolha da função de ativação em redes neurais artificiais desempenha um papel essencial no modelamento e na capacidade de aprendizado do sistema. A seleção da função de ativação é baseada na natureza dos dados e na distribuição assumida pelas variáveis alvo, buscando introduzir a não-linearidade necessária para que a rede possa capturar relações complexas entre os dados.

Izbicki e Santos (2020) afirmam que as escolhas mais comuns para a função de ativação são as apresentadas nas Equações 50, 51, 52, 53 e 54, que são, respectivamente, a função identidade, logística, tangente hiperbólica, *ReLU (rectified linear)* e *Leaky ReLU*.

$$g(u) = u \quad (50)$$

$$g(u) = \frac{1}{1 + e^{-u}} \quad (51)$$

$$g(u) = \frac{e^u - e^{-u}}{e^u + e^{-u}} \quad (52)$$

$$g(u) = \max\{0, u\} \quad (53)$$

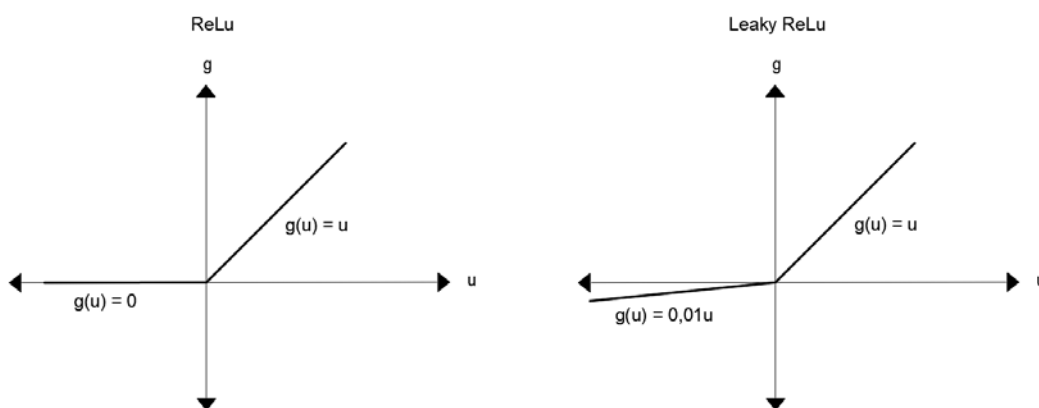
$$g(u) = \begin{cases} 0,01u, & u < 0 \\ u, & u \geq 0 \end{cases} \quad (54)$$

Deste modo, conforme estabelecido anteriormente, a escolha da função de ativação vai depender do tipo de problema, das características da saída do modelo, se este se trata de um modelo de regressão ou classificação e ainda se essa função é diferenciável, o que é importante para o processo de aprendizagem. Além disso, é relevante considerar se a função de ativação escolhida será aplicada em camadas intermediárias ou na camada de saída da RNA. Para as camadas intermediárias, a função de ativação introduz não-linearidades no modelo, permitindo que a RNA aprenda relações complexas nos dados. Enquanto isso, na camada de saída, a escolha da função de ativação é determinada pelo tipo de problema a ser resolvido, como uma função linear para tarefas de regressão ou funções não-lineares para problemas de classificação.

Hu (2018) destaca um fenômeno significativo na utilização da função *ReLU* na aprendizagem profunda. Embora essa função tenha ganhado destaque devido à sua eficácia em

acelerar o treinamento de redes neurais, o autor ressalta um problema comumente observado conhecido como “*ReLus morrendo*”. Esse problema ocorre quando alguns neurônios param de produzir saídas diferentes de zero durante o treinamento, o que pode prejudicar o desempenho do modelo. Em resposta a essa limitação, têm surgido adaptações da função *ReLU*, como a *Leaky ReLU*, que visa mitigar o problema ao permitir um pequeno fluxo de gradiente mesmo para entradas negativas, conforme expresso na Equação 54. O gráfico fornecido na Figura 11 oferece uma representação visual detalhada do comportamento dessas duas funções.

Figura 11 – Comparação entre a função *ReLU* e a *Leaky ReLU*



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.6.2 Arquiteturas das Redes Neurais Artificiais

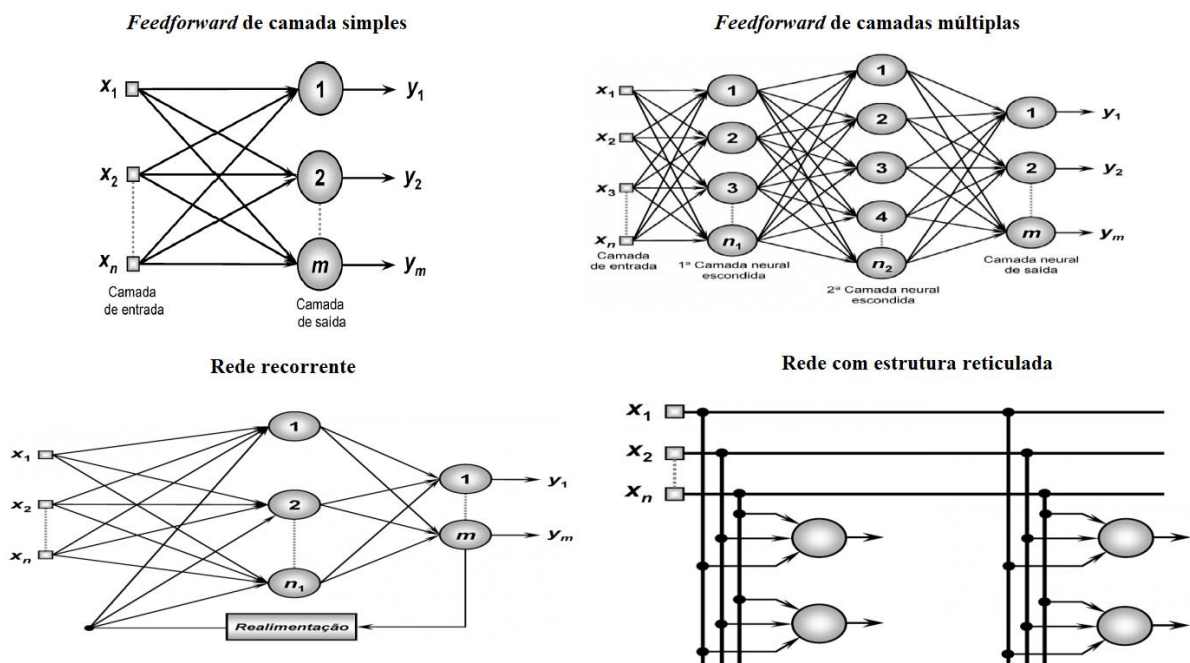
De acordo com Lima, Pinheiro e Santos (2014), as RNAs podem organizar seus neurônios em camadas direcionadas ou não, estabelecendo ligações em um único sentido (para a frente) ou em ambos sentidos (para a frente e para trás). As redes com conexões apenas para frente são chamadas de "diretas" ou *feedforward* e podem ser de camada simples ou multicamadas. Por outro lado, as redes com conexões em mais de um sentido, conhecidas como "redes com ciclos", se dividem em redes recorrentes e redes competitivas. Essas diferentes arquiteturas proporcionam abordagens distintas para resolver problemas e apresentam características específicas que as tornam adequadas para diferentes tipos de tarefas de aprendizado.

Braga, Carvalho e Ludermir (2007) afirmam que a definição da arquitetura de uma RNA é um parâmetro importante na sua concepção, uma vez que ela restringe o tipo de problema que pode ser tratado pelo modelo. Redes com uma camada única, por exemplo, só conseguem resolver problemas linearmente separáveis. Redes recorrentes, por sua vez, são mais

apropriadas para resolver problemas que envolvem processamento temporal. Os autores também enfatizam que fazem parte da definição da arquitetura os seguintes parâmetros: número de camadas da rede, número de neurônios em cada camada, tipo de conexão entre os neurônios e topologia da rede.

Silva, Spatti e Flauzino (2016) também apontam que as principais arquiteturas utilizadas nas RNAs são as *feedforward* de camada simples e múltiplas, bem como as recorrentes e as com estrutura reticulada. A Figura 12 apresenta exemplos de como se configuram essas arquiteturas.

Figura 12 – Principais arquiteturas de Redes Neurais Artificiais



Fonte: Silva, Spatti e Flauzino (2016).

Um exemplo de RNA *feedforward* de camadas múltiplas é o Perceptron Multicamadas (PMC). De acordo com Braga, Carvalho e Ludermir (2007), os PMCs são amplamente empregados em diversas aplicações de RNAs devido à sua implementação acessível e à sua simplicidade em comparação com outras arquiteturas. As aplicações dessas redes englobam áreas como reconhecimento de padrões, processamento de linguagem natural, visão computacional, previsões financeiras e diagnóstico médico, demonstrando a versatilidade e eficácia do Perceptron Multicamadas na resolução de uma variedade de problemas complexos.

2.6.3 Treinamento e Generalização em RNAs do tipo PMC

As regras de aprendizagem representam estratégias para atualizar os pesos sinápticos em uma RNA, visando alcançar um padrão de processamento específico. O processo de aprendizado pode ser categorizado em duas abordagens principais: aprendizado supervisionado e não supervisionado.

Segundo Lima, Pinheiro e Santos (2014), no aprendizado supervisionado, a RNA é treinada utilizando exemplos de entradas em conjunto com suas saídas correspondentes (conjunto de padrões). Nesse método, o foco reside na minimização do erro entre as saídas desejadas das unidades na última camada e as saídas calculadas pelo modelo. Com base nessa discrepância, os pesos da rede são ajustados a cada apresentação de um padrão de treinamento, buscando reduzir o erro total nas saídas para todo o conjunto de informações disponibilizado. Esse processo é iterado várias vezes até que a rede internalize o conhecimento contido nas informações fornecidas. Por outro lado, no aprendizado não supervisionado, apenas as entradas são apresentadas durante o treinamento da RNA em questão. Nesse caso, as unidades da rede respondem a características específicas das entradas apresentadas durante o processo de treinamento. Esse tipo de treinamento está especialmente ligado a topologias de redes que envolvem conexões competitivas.

O processo de treinamento de redes PMCs mais utilizado, tratando-se de aprendizado supervisionado, é o algoritmo *backpropagation* (retropropagação), também conhecido como Regra Delta Generalizada. Silva, Spatti e Flauzino (2016) explicam que este algoritmo é dividido em duas fases. Na primeira etapa, denominada de propagação adiante (*forward*), os sinais de entrada de uma amostra do conjunto de treinamento são inseridos na rede e são propagados até a última camada, produzindo suas respectivas saídas. Na sequência, as respostas produzidas pelas saídas da rede são comparadas com as respostas desejadas, obtendo-se os erros calculados pelo modelo para a dada configuração. Em seguida, aplica-se a segunda fase do método *backpropagation*, denominada de propagação reversa (*backward*). É nessa etapa em que os pesos sinápticos e limiares de todos os neurônios da rede são ajustados em função dos erros retropropagados, empregando o método do Gradiente Descendente.

Em suma, a aplicação sucessiva das etapas de *forward* e *backward* para as diferentes amostras do conjunto de treinamento é responsável pela atualização dos pesos sinápticos e limiares de ativação, resultando na gradativa diminuição dos erros produzidos pelo modelo.

De acordo com Braga, Carvalho e Ludermir (2007), outro aspecto importante a ser observado no processo de aprendizado é a frequência de atualização dos pesos e limiares.

Existem duas abordagens mais conhecidas: por padrão (*online*), na qual os pesos são ajustados após a apresentação de cada padrão de treinamento; e a abordagem por lote (*off-line* ou *batch*), na qual as atualizações nos pesos e limiares só são efetivadas após a apresentação de todo o conjunto de treinamento, pois cada passo de ajuste leva em consideração a totalidade dos desvios observados. Há ainda a abordagem por mini lotes (*mini-batches*), onde divide-se o conjunto de dados de treinamento em pequenos subconjuntos, e atualização dos parâmetros do modelo acontece após cada processamento de um mini lote.

De acordo com Montavon, Orr e Müller (2012), para resolver problemas de grande escala, uma alternativa eficaz ao uso do Gradiente Descendente convencional é o método do Gradiente Descendente Estocástico (GDE). Neste método, em vez de calcular gradientes precisos, estes são estimados com base em um subconjunto aleatório dos dados de treinamento. Essa abordagem permite reduzir significativamente a carga computacional, tornando o treinamento de modelos mais eficiente em cenários de grande escala.

2.6.4 Demais parâmetros e hiperparâmetros do PMC

Além da definição da arquitetura e do método de treinamento, o emprego de RNAs requer a caracterização de diversos parâmetros e hiperparâmetros inerentes ao processo. Cabe ao modelador determinar, por exemplo, a quantidade de camadas intermediárias (n_c); o número de neurônios em cada camada (n_n); a distribuição dos pesos sinápticos e limiares de ativação da primeira iteração; a função de ativação ($g(\cdot)$); o tamanho dos lotes de aprendizagem (l); o número de épocas (e); a taxa de aprendizado (η); o momentum (m) e a função de custo ($E(\cdot)$). A escolha apropriada de cada um desses elementos varia de acordo com o problema específico e a aplicação em questão. Normalmente, esse processo envolve experimentação e otimização iterativa, além da consideração de fatores como o tamanho do conjunto de dados, a complexidade do modelo, os recursos de hardware disponíveis e os objetivos do projeto.

De acordo com Silva, Spatti e Flauzino (2016), uma época, no contexto do treinamento de RNAs, representa única passagem completa por todo o conjunto de treinamento durante o processo de ajuste dos pesos da rede neural. A realização de múltiplas épocas é essencial para permitir que a rede aprenda progressivamente e melhore seu desempenho, uma vez que os pesos são ajustados iterativamente para minimizar os erros entre as saídas da rede e os valores desejados.

Braga, Carvalho e Ludermir (2007) definem a taxa de aprendizado como uma medida da rapidez com que o vetor de pesos é atualizado. Desse modo, uma taxa de aprendizado

maior pode acelerar o aprendizado, mas pode levar a oscilações e dificuldades na convergência, enquanto uma taxa menor pode tornar o processo mais estável, mas mais lento. Para acelerar o processo de treinamento e evitar os mínimos locais, os autores afirmam que é comum a adição do termo momentum no cálculo dos pesos ajustados. O momentum funciona incorporando uma porcentagem dos gradientes de iterações anteriores aos gradientes atuais durante a atualização dos pesos, o que permite ao método realizar passos maiores de incrementos quando a diferença entre os valores de duas iterações for consideravelmente grande.

A função de custo, também conhecida como função de perda, é um componente crítico no treinamento de modelos de aprendizado de máquina. Ela representa a medida da discrepância entre as previsões do modelo e os valores reais dos dados de treinamento. O objetivo principal da função de custo é avaliar quão bem o modelo está se ajustando aos dados. A sua escolha depende do tipo de problema, como regressão ou classificação, e pode variar de acordo com o algoritmo de aprendizado. O treinamento do modelo envolve a minimização dessa função, geralmente por meio de métodos como o Gradiente Descendente ou Gradiente Descendente Estocástico, a fim de melhor ajustar o modelo aos dados de treinamento e torná-lo capaz de fazer previsões mais precisas em novos dados. Montavon, Orr e Müller (2012) afirmam que a função de custo mais comum empregada em RNAs no âmbito das regressões é o Erro Quadrático Médio (EQM), calculada através das Equações 55 e 56.

$$E(k) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n (d_j(k) - y_j(k))^2 \quad (55)$$

$$E_{EQM} = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p E(k) \quad (56)$$

Onde:

- $y_j(k)$ é o valor produzido pelo j -ésimo neurônio de saída da rede, considerando-se a k -ésima amostra de treinamento, enquanto $d_j(k)$ é o seu respectivo valor desejado;
- p é o número de amostras de treinamento.

Outro aspecto importante ao modelar uma RNA é determinar o momento adequado para encerrar o processo de treinamento. Esse ponto é estabelecido por meio de orientações específicas conhecidas como critérios de parada. Os critérios de parada mais comuns incluem a interrupção após um número definido de épocas, a finalização quando a função de custo atinge um limite predefinido, e, por vezes, a combinação desses métodos.

2.7 Softwares para modelagem e calibração de redes de distribuição de água

Os *softwares* dedicados à modelagem de RDAs desempenham um papel fundamental na gestão e otimização de sistemas de abastecimento hídrico. Essas ferramentas oferecem uma plataforma para projetar, simular e analisar o comportamento hidráulico e a qualidade da água do modelo. Entre os programas disponíveis, Sonaje e Joshi (2015) destacam a existência daqueles de domínio público, tais como o EPANET, Branch e o Loop, bem como aqueles de cunho comercial, com o WaterGEMS, WaterCAD e Aquis. Os autores ressaltam que os *softwares* para modelagem de RDAs variam em vários aspectos, incluindo funcionalidade, compatibilidade com sistemas computacionais diversos, interfaces gráficas de usuário, algoritmos de busca e otimização, linguagens e programas utilizados em seus desenvolvimentos. A escolha daquele adequado depende da disponibilidade de dados, tempo, implicações financeiras, recursos, aplicabilidade e escopo geral do projeto.

2.7.1 EPANET

O EPANET, desenvolvido pela Environmental Protection Agency (EPA), é um *software* de domínio público amplamente utilizado para projetar e analisar RDAs. Este *software* permite simulações hidráulicas, tanto estáticas quanto dinâmicas, e oferece recursos para avaliação da qualidade da água em sistemas de distribuição pressurizados. As redes modeladas no EPANET incluem componentes como tubulações, nós, bombas, válvulas e reservatórios de nível fixo e/ou variável (Rossman *et al.*, 2000).

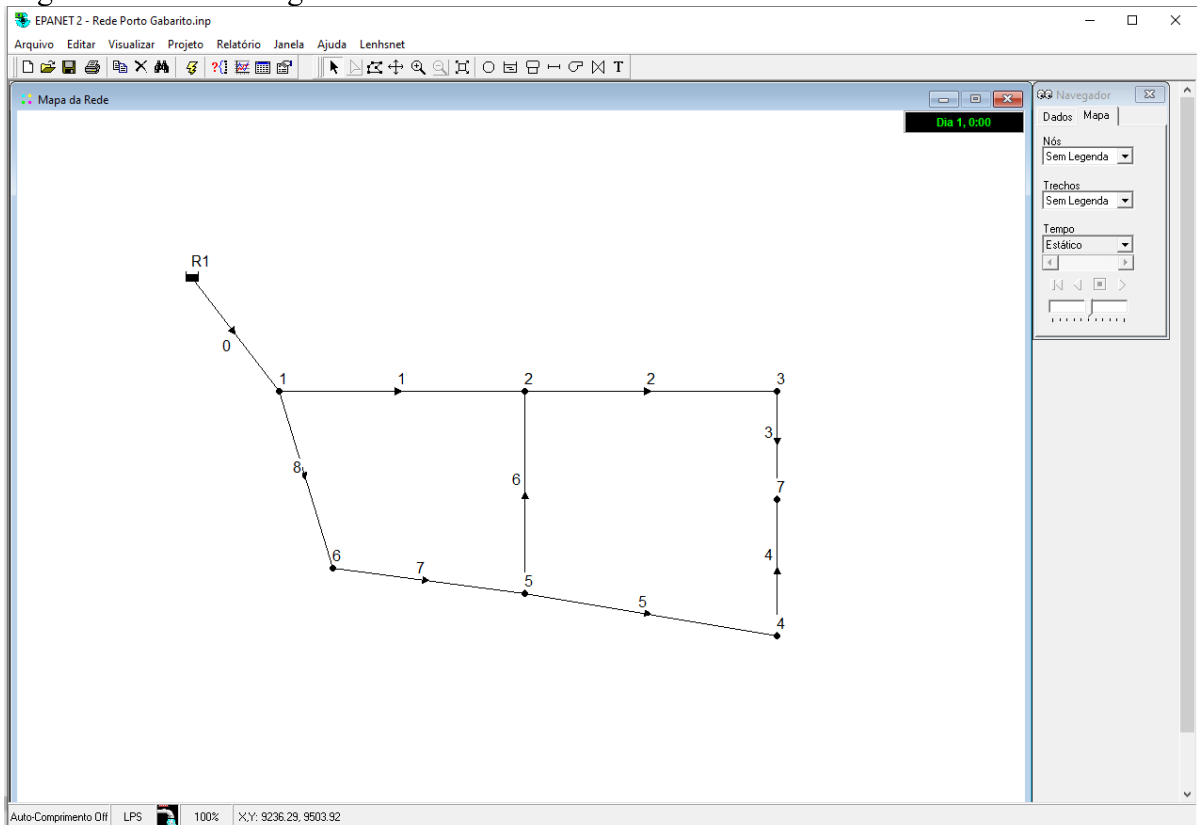
Segundo Rossman *et al.* (2000), o EPANET oferece uma ampla gama de funcionalidades para simulação de RDAs, incluindo uma análise hidráulica detalhada, permitindo o dimensionamento de redes, cálculo de perdas de carga, modelagem de bombas, válvulas e tanques, e a capacidade de considerar múltiplas categorias de demanda. Além disso, o *software* suporta a simulação da qualidade da água, permitindo o rastreamento de substâncias

reativas e não reativas, modelagem da idade da água e cálculo de reações químicas, tornando-o uma ferramenta valiosa para planejadores e engenheiros de sistemas de água.

Devido à sua natureza de domínio público, interface de usuário amigável e disponibilidade de código aberto em várias linguagens de programação, o EPANET é amplamente utilizado no meio científico e acadêmico. Dentre as principais aplicações observadas no emprego desse *software*, destaca-se o uso na modelagem e calibração dos parâmetros hidráulicos de RDAs (Bezerra; Castro; Araújo, 2017; Pordal; Noshadi; Masoudi, 2023; Marques *et al.*, 2023) e na calibração do modelo de qualidade (Ajaz; Ahmad, 2023; Zuthi *et al.*, 2023).

A Figura 13 demonstra um exemplo de uma RDA traçada, apresentando a interface gráfica desse *software*.

Figura 13 – Interface gráfica do EPANET



Fonte: Elaborado pelo autor com uso do EPANET.

2.7.2 UFC10

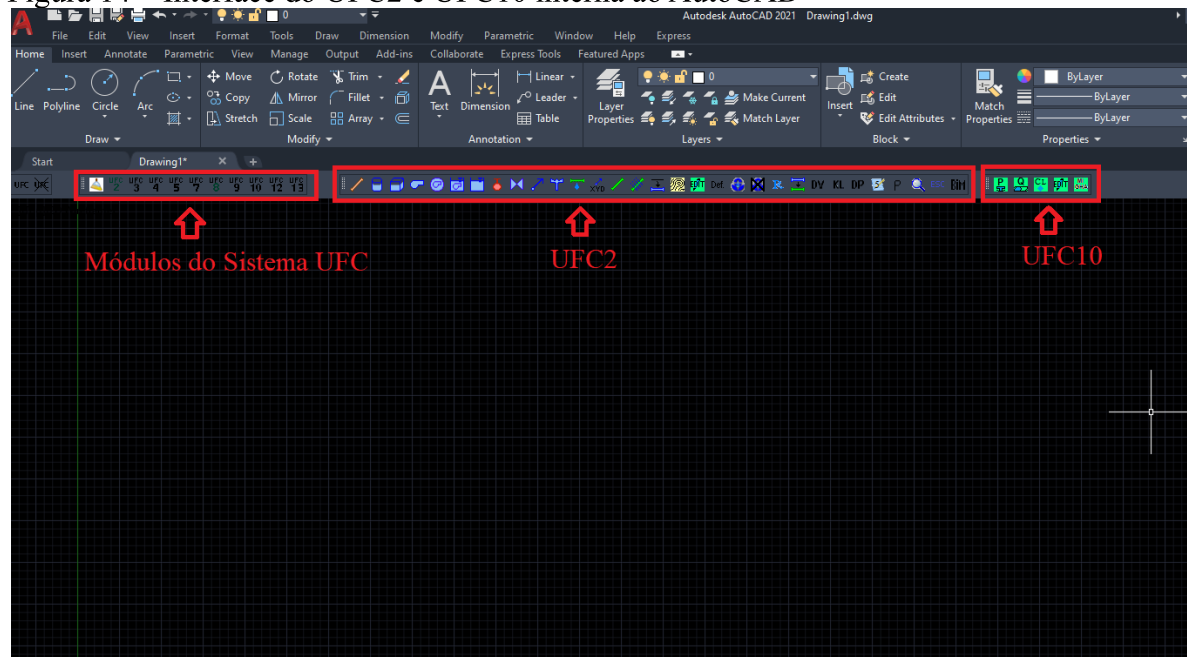
O Sistema UFC, desenvolvido pelo Laboratório de Hidráulica Computacional do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, consiste em um conjunto de *softwares* escritos em diversas linguagens de programação. Estes são capazes de realizar todas as tarefas relacionadas ao traçado e dimensionamento hidráulico de RDAs, adutoras e redes de esgoto sanitário, além de outras aplicações. No contexto da modelagem e dimensionamento de RDAs, destacam-se os seguintes componentes:

- UFC2 - Módulo que oferece ferramentas para o traçado de RDAs e/ou adutoras no AutoCAD e apresenta uma Interface AutoCAD/EPANET;
- UFC3 - Módulo de inserção de conexões, numeração dos nós e trechos e elaboração dos quantitativos em RDAs;
- UFC4 - Módulo de dimensionamento de RDAs;
- UFC5 – Módulo de seleção de bombas hidráulicas;
- UFC10 – Módulo de calibração de RDAs.

A atual versão do UFC10 tem como objetivo a calibração de rugosidades absolutas, coeficientes de Hazen-Williams e consumos nodais em RDAs. O *software* foi desenvolvido nas linguagens de programação AutoLISP, VBA e Java, sendo as duas primeiras linguagens internas ao AutoCAD, utilizadas para a elaboração dos elementos gráficos do programa e exportação de dados, enquanto que a terceira linguagem de programação citada, externa ao AutoCAD, é responsável pelos cálculos de calibração dos parâmetros hidráulicos, além da apresentação dos resultados (Sousa, 2020).

Para utilizar esse módulo de forma assertiva, o usuário deve inicialmente traçar a RDA no AutoCAD, utilizando as ferramentas do UFC2, e, em seguida, utilizar a opções oferecidas pelo UFC10 para a inserção de dados observados nos nós onde foram realizadas as medições. Estes passos são realizados de forma interna ao AutoCAD, com o Sistema UFC instalado, como mostra a Figura 14.

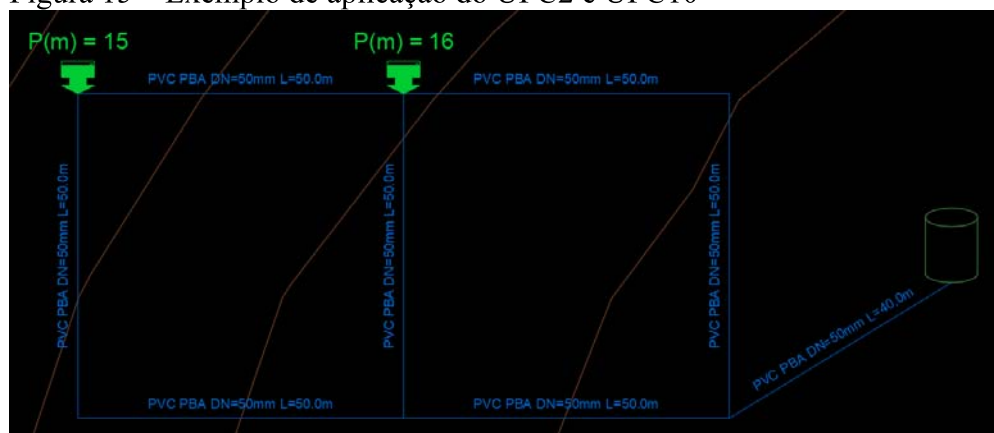
Figura 14 – Interface do UFC2 e UFC10 interna ao AutoCAD



Fonte: Elaborado pelo autor com uso do Sistema UFC.

Utilizando os comandos apresentados na Figura 14, e em posse das curvas de nível do local, é possível determinar a rede e os dados observados, como mostra a Figura 15.

Figura 15 – Exemplo de aplicação do UFC2 e UFC10



Fonte: Elaborado pelo autor com uso do Sistema UFC.

Após o traçado da rede e a especificação dos dados observados, a escolha do comando “MIGHA” aciona a etapa externa do UFC10, que se inicia com a abertura de uma nova janela que apresenta os resultados da simulação do modelo, antes da calibração. A Figura 16 apresenta um exemplo de como a interface externa do UFC10 se apresenta após o seu acionamento.

Figura 16 – Interface externa do UFC10

UFC10 - MIGHA

Calibrar Rugosidade Vazão

Dados da Rede Parâmetros medidos

Dados dos Reservatórios

ID	Carga Hidráulica (m)
9	61.328

Dados dos Nós

ID	Coordenada X	Coordenada y	Consumo (L/s)	Cota (m)	Pressão (m)	Carga Hidráulica (m)
1	712.08	146.86	2.0	47.511	13.3561	60.8671
2	685.58	138.04	1.6257	46.149	14.4447	60.5937
3	755.58	66.74	2.0997	50.011	10.0416	60.0526
4	525.85	144.73	1.2691	28.52	29.7689	58.2889
5	545.65	87.65	0.778	31.936	28.2136	60.1496

Dados dos Trechos

ID	Material	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	ε (mm) - DW / C - HW	Vazão (L/s)	Velocidade (m/s)	Fator de Atrito
9	PVC DEFoFo	32.9802	156.4	0.06	11.375	0.5921	0.0202
8	PVC PBA Classe 12	64.4093	100.0	0.06	5.7695	0.7346	0.0217
7	PVC PBA Classe 12	86.018	54.6	0.06	1.3658	0.5833	0.0262
6	PVC PBA Classe 12	56.7811	54.6	0.06	-0.7899	0.3374	0.0289
5	PVC PBA Classe 12	102.0016	77.2	0.06	-4.1586	0.8884	0.0226

Número Máximo de Iterações: 100

Função Objetivo: F.O.1 F.O.2 F.O.3 F.O.4 Rotina de Uniformização das Rugosidades

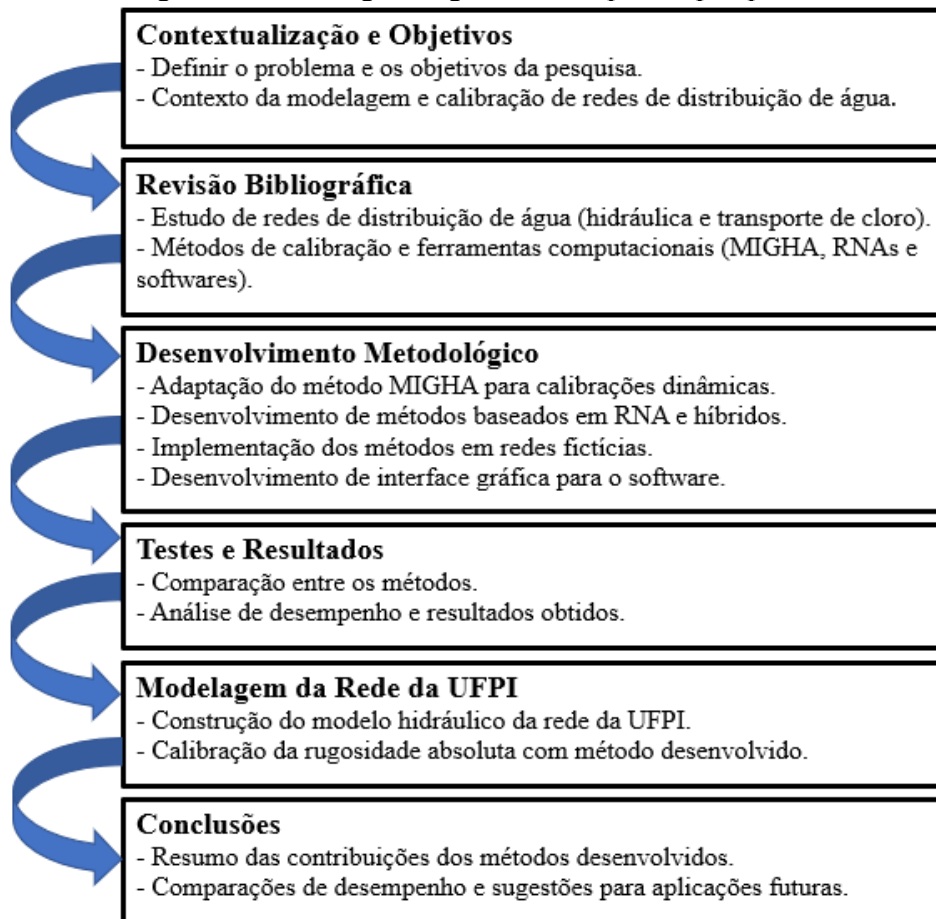
Fonte: Elaborado pelo autor com uso do Sistema UFC.

Na interface apresentada na Figura 16, é possível observar os resultados obtidos pela simulação do modelo para sua configuração inicial, antes de se efetuar a calibração, bem como conferir os dados observados na aba “parâmetros medidos”. Nota-se, na parte inferior da janela, que o *software* permite a alteração de alguns critérios da calibração, como o número máximo de iterações, a escolha da função objetivo —representadas pelas Equações 33, 39, 40 e 41 — e a possibilidade de se empregar a rotina de uniformização de rugosidades absolutas. No canto superior, o botão “calibrar” inicia o procedimento de calibração das rugosidades absolutas, abrindo uma nova janela com os resultados obtidos pela simulação do modelo então calibrado. Há ainda a possibilidade de alterar o parâmetro de estudo para “Vazão”. Neste caso, o programa utiliza o método MIGHA para determinar novos consumos nodais. Este método não faz parte do escopo deste estudo.

3 METODOLOGIA

A metodologia deste estudo foi organizada de forma sistemática para atender aos objetivos propostos e explorar as etapas de modelagem, calibração e análise de RDAs. O processo abrangeu desde a adaptação de métodos existentes até o desenvolvimento de novas abordagens baseadas em RNAs e métodos híbridos. A Figura 17 apresenta o fluxograma geral deste trabalho, destacando as principais etapas realizadas, desde o planejamento inicial até a análise dos resultados obtidos, incluindo os testes com redes fictícias e a modelagem da rede da UFPI.

Figura 17 – Fluxograma geral das etapas da pesquisa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o objetivo de desenvolver um modelo que integre técnicas de aprendizado de máquina para a calibração de rugosidades absolutas e dos coeficientes k_{ws} em RDAs, foram realizados testes em três redes fictícias. A escolha por redes fictícias foi estratégica, pois essas redes permitem uma comparação direta entre os resultados obtidos para as rugosidades

absolutas e os valores de kw com os parâmetros de referência previamente conhecidos. Essa abordagem viabiliza uma avaliação mais precisa da performance dos modelos propostos.

Foram testadas diferentes abordagens baseadas em redes neurais artificiais (RNAs), assim como métodos híbridos que combinam RNAs com o método MIGHA. Os resultados dessas calibrações foram comparados com outras abordagens amplamente utilizadas na literatura, incluindo métodos que utilizam apenas o MIGHA ou que fazem uso de Algoritmos Genéticos. Essa comparação envolveu tanto os parâmetros calibrados — como rugosidades absolutas e kws — quanto as variáveis de estado retornadas pelas simulações, como cargas de pressão, vazões e concentrações de cloro residual.

As próximas seções deste capítulo detalharão o processo de desenvolvimento dos modelos testados, cobrindo tanto os métodos que utilizam exclusivamente RNAs quanto os métodos híbridos MIGHA-RNA. Será apresentada também uma modificação implementada no MIGHA para permitir calibrações dinâmicas, que consideram a variação horária dos consumos e, conseqüentemente, das variáveis de estado, como as cargas de pressão. Além disso, serão descritas as características das redes fictícias utilizadas, o procedimento para a condução dos testes, e o desenvolvimento da interface gráfica do *software* concebido com os algoritmos propostos. Por fim, será abordada a modelagem e calibração da RDA da Universidade Federal do Piauí (UFPI).

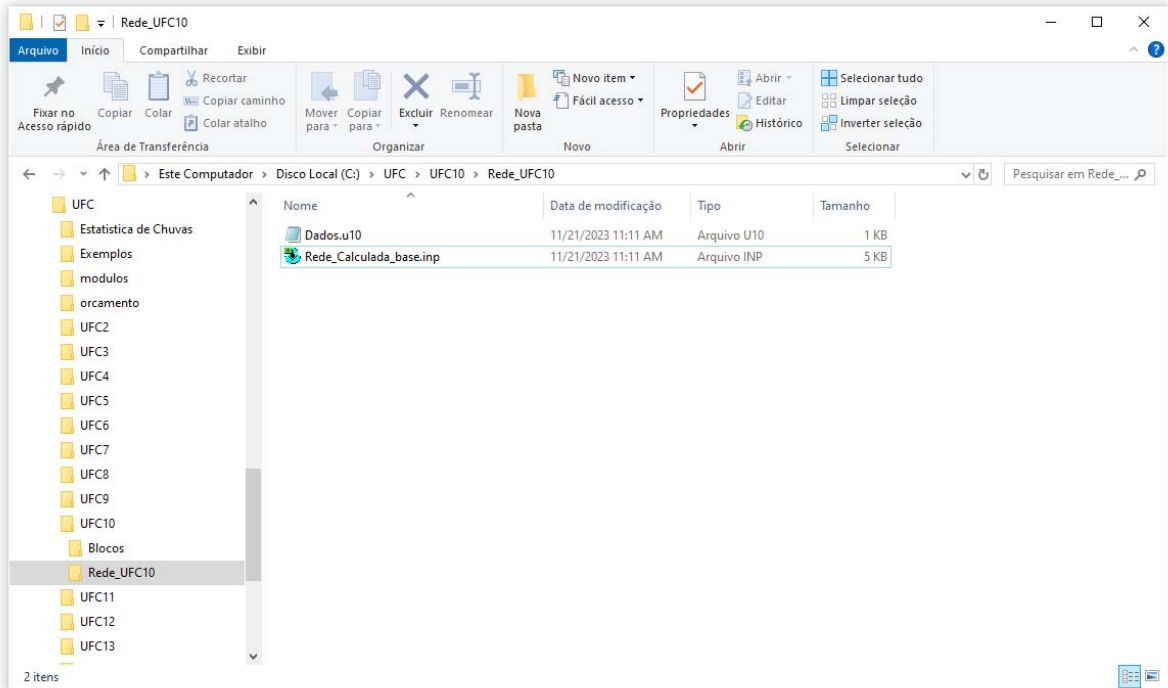
3.1 Adaptação do método MIGHA para calibrações dinâmicas

A versão atual do UFC10 incorpora o algoritmo MIGHA, projetado para calibrar os parâmetros relacionados as rugosidades absolutas da RDA em estado permanente, utilizando os resultados de uma simulação estática nos cálculos dos gradientes. Contudo, na prática, a demanda de água varia ao longo do dia, resultando em diferentes valores de gradientes hidráulicos na RDA. Por isso, foi desenvolvido um novo algoritmo que habilita o MIGHA a realizar a calibração por meio de uma simulação dinâmica. Neste caso, além do valor observado de pressão — ou de concentração de cloro, para a calibração do modelo de qualidade —, o usuário deve fornecer o horário da medição. Ressalta-se que o MIGHA utilizado neste trabalho emprega a rotina de uniformização proposta por Souza, Bezerra e Castro (2020).

Para o funcionamento adequado do UFC10, o *software* necessita de dois arquivos específicos, que devem estar localizados no diretório C:\UFC\UFC10\Rede_UFC10, conforme ilustrado na Figura 18. O arquivo denominado “Rede_Calculada_base.inp” representa a rede

que será calibrada, podendo ser criado com o auxílio do UFC2 ou diretamente pelo EPANET. Por outro lado, o arquivo “Dados.u10” contém as informações referentes aos dados observados.

Figura 18 – Arquivos para UFC10



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para esta nova adaptação do MIGHA, é necessário, no caso de simulações dinâmicas, a incorporação do horário da medição no arquivo “Dados.u10”, que agora apresenta o formato mostrado na Figura 19. Conforme ilustrado, o campo “Tipo” identifica a natureza da localização do dado observado. A letra “N” indica uma medição realizada em um nó, enquanto a letra “T” representa uma medição em um trecho, utilizada para dados de vazões, embora não esteja implementada na versão atual. No campo “Dado”, a letra “P” denota que o valor observado é uma carga de pressão, medida em metros, e a letra “C” sinaliza uma medição de concentração de cloro residual, em mg.L^{-1} . As coordenadas indicam a localização do nó em questão. “Valor 1” representa o valor da medição, e “Valor 2” corresponde ao horário da medição. Vale ressaltar que o formato proposto agora é semelhante ao anterior, com a diferença de que foi adicionada a coluna “Valor 2”, que registra o horário da medição do dado observado, uma informação essencial para as simulações dinâmicas.

Figura 19 – Arquivo Dados.u10

Dados de entrada de calibração do UFC10						
Tipo Dado		Coordenada x inicial	Coordenada y inicial	Coordenada x final	Coordenada y final	
N	P	744456.5897934	9440826.25403511			Valor 1 Valor 2
N	P	744406.5897934	9440826.25403511			16 12

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para permitir que o MIGHA realize calibrações que envolvem simulações dinâmicas, este trabalho sugere a aplicação da Equação 57 no cálculo da rugosidade absoluta de cada trecho. Esta equação propõe a realização de uma média ponderada das rugosidades absolutas calculadas em diferentes horários, permitindo a utilização eficiente dos dados coletados em campo em diversos momentos. Desta forma, a rotina de cálculo do método permanece praticamente inalterada.

$$\varepsilon_{j,\text{calib}} = \frac{\sum_{h=0}^d (\varepsilon_{j,h} \cdot q_h)}{\sum_{h=0}^d q_h} \quad (57)$$

Onde:

- d é a duração, em horas, da simulação dinâmica;
- h é a hora da simulação;
- $\varepsilon_{j,h}$ é a rugosidade do trecho j calculada pelo MIGHA para a hora h (mm);
- q_h é a quantidade de dados observados na hora h (-).

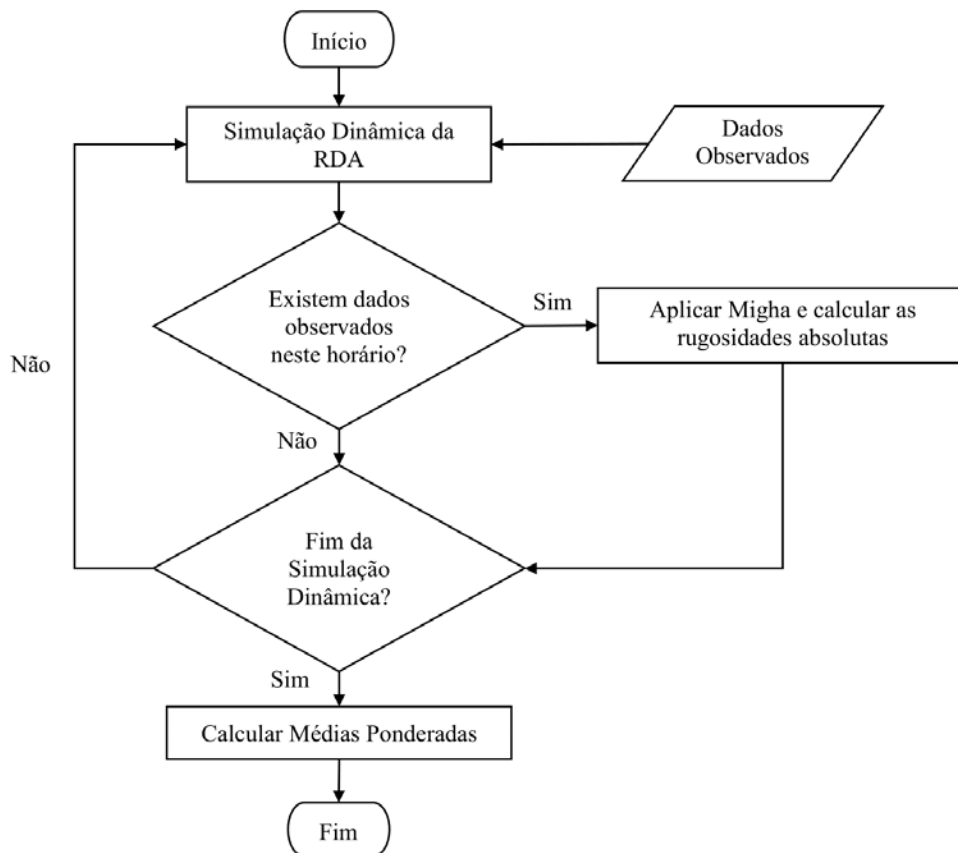
A adaptação proposta para o MIGHA dinâmico consiste na aplicação sucessiva do método MIGHA para cada horário em que há dados observados, realizando a calibração das rugosidades absolutas de forma individual em cada instante, utilizando as Equações 35 a 39. Após calcular as rugosidades absolutas para todos os momentos com medições, é realizada uma média ponderada dos valores calibrados, onde o fator de ponderação corresponde ao número de dados observados em cada horário. Essa ponderação é crucial para evitar que horários com menos medições influenciem de maneira desproporcional o valor final. Essa abordagem pode

ser facilmente estendida para a calibração de outros parâmetros, como kw, utilizando o mesmo princípio.

Para melhor compreender o funcionamento dessa rotina, considere o exemplo de uma RDA simulada por 24 horas, onde são registradas, em campo, quatro medições de pressão às 10 horas e oito medições às 18 horas. A rotina dinâmica aplicará o MIGHA em dois momentos: às 10 horas, a rede observada contará com quatro reservatórios fictícios, enquanto às 18 horas serão utilizados oito reservatórios. Ao final, os resultados da aplicação do MIGHA em cada momento serão ponderados para determinar os valores finais dos parâmetros em cada trecho. Como há o dobro de medições às 18 horas, o resultado final será mais influenciado pelos valores calculados nesse horário, garantindo que as calibrações reflitam adequadamente a quantidade de dados disponíveis.

A Figura 20 apresenta um fluxograma com o passo a passo da metodologia de aplicação do MIGHA em simulações dinâmicas.

Figura 20 – Fluxograma do MIGHA Dinâmico



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 Métodos com utilização exclusiva de RNA

Os métodos apresentados nesta seção têm como propósito a calibração das rugosidades absolutas ou coeficientes k_{ws} das RDAs. Esses métodos fazem uso de uma RNA do tipo Perceptron Multicamadas (PMC), em que as entradas são os valores de cargas de pressão ou concentrações de cloro residual medidos em campo, e as saídas são os valores de rugosidades absolutas ou k_{ws} calculados pelo método.

Após uma série de testes preliminares, foram desenvolvidos dois métodos de calibração que utilizam RNAs: o primeiro, denominado RNA-G, calcula um único valor para o parâmetro calibrado, considerando um grupo de tubulações com características semelhantes. O segundo, chamado neste trabalho de RNA-T, ajusta individualmente o valor do parâmetro em cada trecho. Ambos serão melhor explicados mais adiante.

Embora as RNAs possuam uma notável capacidade de reconhecer padrões, a construção de um modelo eficaz depende de diversos parâmetros e hiperparâmetros, o que pode tornar sua aplicação mais complexa. Ao definir a arquitetura de uma Perceptron Multicamadas (PMC), o modelador precisa ajustar uma série de elementos inerentes ao processo. Assim, a aplicação dessa metodologia em sistemas de abastecimento de água geralmente requer uma abordagem personalizada, buscando a melhor configuração da RNA para cada Rede de Distribuição de Água (RDA). No entanto, com o objetivo de desenvolver uma rotina de calibração única que pudesse ser aplicada a diferentes redes, a maioria desses parâmetros foi fixada neste trabalho, conforme indicado na Tabela 4. Esses parâmetros foram determinados após uma série de testes preliminares, que permitiram identificar valores adequados para garantir a consistência do modelo. A única exceção foi o número de neurônios em cada camada, que foi ajustado de acordo com o número de nós e trechos da RDA.

Tabela 4 – Parâmetros adotados no PMC

n_c	n_n	$g(.)$	w_i e θ	Método de Aprendizagem
6	Variável	<i>LeakyReLU</i>	Randômicos	GDE
e	l	η	m	$E(.)$
1.000	50	0,01	0,9	EQM

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme observado na Tabela 4, o número de neurônios em cada camada intermediária não é fixo para os métodos desenvolvidos. Em vez disso, ele é vinculado ao número de nós e de trechos da RDA que está sendo calibrada. A correlação entre o número de

neurônios e o número de nós e trechos da rede é uma tentativa de permitir que o modelo capte a complexidade e a não-linearidade do cálculo das rugosidades absolutas e coeficientes kws em RDAs de diferentes tamanhos. Assim, a configuração adotada para as seis camadas intermediárias é apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 – Número de neurônios por camada intermediária

Camada	n_n
1ª camada intermediária	8x número de nós da RDA
2ª camada intermediária	8x número de trechos da RDA
3ª camada intermediária	4x número de nós da RDA
4ª camada intermediária	4x número de trechos da RDA
5ª camada intermediária	2x número de nós da RDA
6ª camada intermediária	2x número de trechos da RDA

Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste trabalho, a construção das RNAs foi realizada utilizando a biblioteca de programação Deeplearning4J (DL4J). A DL4J é uma biblioteca de aprendizado profundo lançada pela Skymind em junho de 2014 e que é distribuída como código aberto na linguagem Java (Wang *et al.*, 2019). Entre as várias funcionalidades disponíveis em suas classes, destaca-se a capacidade de construir um PMC definindo os parâmetros de arquitetura da rede. Após a construção, a rede pode ser treinada para gerar um modelo não-linear capaz de prever um determinado comportamento, correlacionando dados de entrada e saída.

Além da definição da configuração do PMC, o treinamento do modelo é uma etapa crucial. No caso deste trabalho, os algoritmos propostos realizam 10 mil simulações da RDA em análise, utilizando a biblioteca EPANET Java fornecida pela Baseform. Esse número foi pré-estabelecido após uma série de testes preliminares, nos quais se verificou que essa quantidade de amostras era suficiente para alcançar calibrações consistentes e precisas. Durante as simulações, os valores das rugosidades absolutas, ou dos coeficientes kws — no caso de uma calibração do modelo de qualidade da água —, variam em cada execução. Das 10 mil amostras geradas, que incluem tanto os valores dos parâmetros quanto as variáveis de estado retornadas pelas simulações, 6,5 mil são utilizadas para o treinamento da RNA, ajustando seus pesos sinápticos e limiares de ativação. As 3,5 mil amostras restantes são reservadas para a fase de teste, garantindo a validação do modelo em dados não utilizados no treinamento. O tempo

necessário para esse processo pode variar de acordo com o tamanho da RDA calibrada e a capacidade do computador utilizado, sendo detalhado nos resultados deste trabalho.

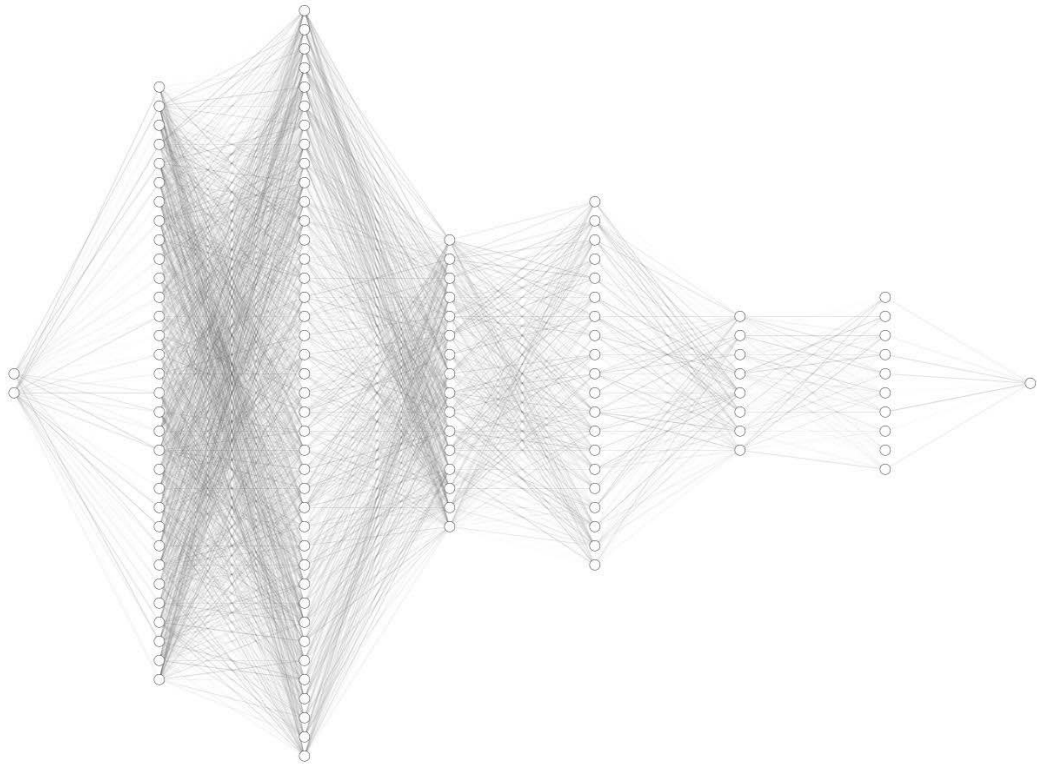
É importante destacar que, tanto no treinamento quanto nas fases de teste e aplicação do modelo, o número de entradas do PMC corresponderá ao número de dados observados, que posteriormente serão utilizados para calibrar a RDA. Assim, apesar de todos os dados de cargas de pressão e concentrações de cloro gerados nas 10 mil simulações realizadas, apenas os dados correspondentes aos nós com medições reais serão utilizados. Já o número de saídas do modelo varia conforme o método escolhido: o RNA-G calcula um único valor de rugosidade ou kw para cada grupo de tubulações com características semelhantes, enquanto o RNA-T realiza a calibração individualmente para cada trecho da rede. Portanto, no segundo método, o número de saídas será igual ao número de trechos da RDA.

Ambos os métodos foram testados em diferentes redes e cenários de dados observados, com o objetivo de avaliar qual abordagem se sobressai em cada situação específica. A escolha do método mais adequado dependerá das características da rede e da quantidade de dados disponíveis, cabendo ao usuário a decisão final. Um dos objetivos deste trabalho é o desenvolvimento de um *software* com interface gráfica, o que permitirá ao usuário selecionar a abordagem mais apropriada, baseando-se nos resultados obtidos neste trabalho e no problema específico que deseja resolver.

Para visualizar a construção da RNA nos dois modelos propostos, é útil considerar um exemplo de uma RDA composta por 4 nós e 5 trechos, onde dois dados observados são utilizados como entradas para a calibração. As Figuras 21 e 22 oferecem representações das configurações das RNAs para os dois métodos abordados: a calibração uniforme por grupos de tubulação, na qual, neste exemplo, todos os trechos são considerados como pertencentes a um único grupo, e a calibração individualizada, que trata cada trecho de forma independente. Essas representações visuais fornecem uma compreensão clara da arquitetura da RNA, obedecendo aos critérios estabelecidos na Tabela 5.

Conforme se observa nas Figuras 21 e 22, a única diferença entre os modelos ocorre na camada de saída. No exemplo em que a calibração é realizada de maneira individualizada, o método calcula cinco valores atualizados para o parâmetro em análise, ao contrário do modelo uniforme, que calcula apenas um. À primeira vista, essa diferença pode parecer insignificante, considerando a quantidade de neurônios e conexões nas outras camadas, que variam de 129 a 133 neurônios e de 2554 a 2594 conexões, dependendo do modelo. No entanto, espera-se que a abstração de cinco valores seja um desafio significativamente maior para a RNA, como será analisado posteriormente na seção de resultados.

Figura 21 – Exemplo do modelo RNA-G



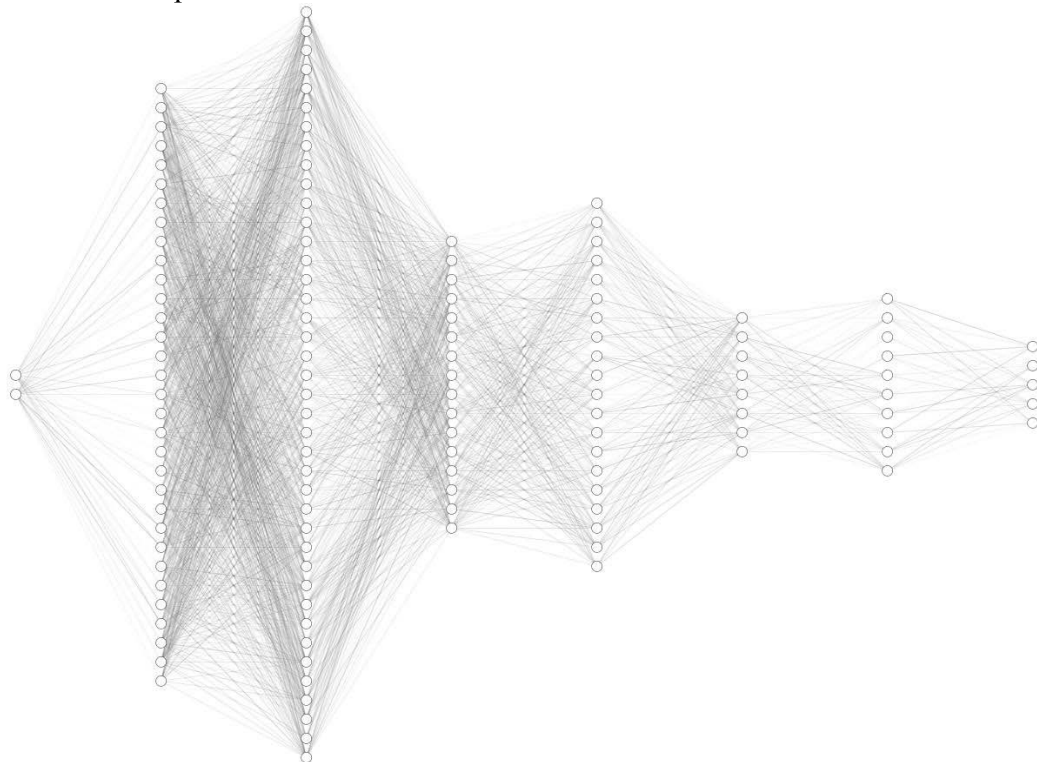
Camada de Entrada

Camadas Intermediárias

Camada de Saída

Fonte: Elaborado pelo autor com uso do NN-SVG tool.

Figura 22 – Exemplo do modelo RNA-T



Camada de Entrada

Camadas Intermediárias

Camada de Saída

Fonte: Elaborado pelo autor com uso do NN-SVG tool.

É fundamental destacar que esta metodologia, além de ser aplicável à calibração de vários parâmetros, pode ser empregada tanto em simulações estáticas quanto dinâmicas. No caso das simulações dinâmicas, a única alteração ocorre na camada de entrada da RNA, que deve incluir os dados referentes a todas as observações, independentemente do horário em que foram coletadas. Isso acontece porque o modelo deve ser capaz de identificar e integrar essas diferentes informações, utilizando a diversidade de neurônios distribuídos nas camadas intermediárias.

Levando em consideração o tamanho da amostra de treinamento, o número de épocas e o tamanho dos lotes de aprendizado adotados, cada calibração resulta em 130.000 iterações, correspondendo a 130.000 ajustes nos pesos sinápticos e limiares de ativação. No entanto, para determinar o PMC final, foi empregada a rotina de *Early Stopping*, disponível na biblioteca DL4J. Esta rotina envolve a verificação do desempenho do modelo no final de cada época, utilizando o conjunto de dados reservado para teste. Se, ao final de uma época específica, o PMC atual superar o modelo anterior, uma cópia do PMC dessa época é salva. Assim, ao final do treinamento, 1.000 configurações terão sido testadas, sendo o modelo final aquele que apresentou o melhor desempenho no conjunto de testes. Esta metodologia reduz a possibilidade de sobreajuste do modelo aos dados de treinamento.

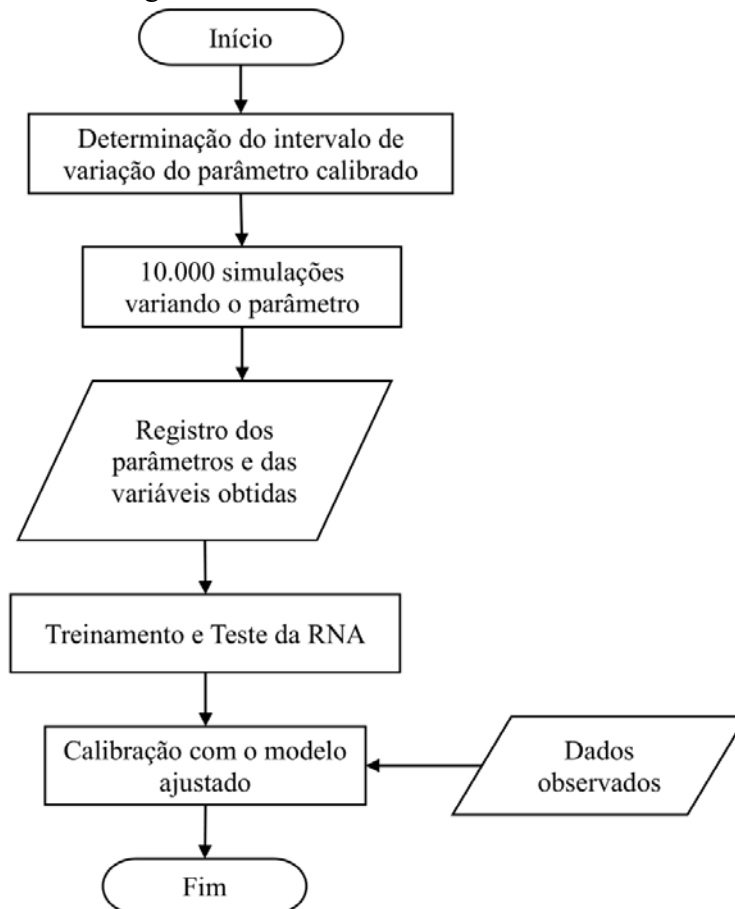
Um aspecto crucial para os métodos descritos nesta seção é a geração das 10 mil amostras, especialmente a definição da faixa de variação do parâmetro dentro das simulações. Se essa faixa for muito ampla, o método pode ter dificuldade em estimar valores precisos. Por outro lado, se a variação dos parâmetros for muito pequena, o modelo pode enfrentar dificuldades para extrapolar valores fora do intervalo observado durante o treinamento. Para mitigar esse problema, a metodologia proposta vincula o intervalo de variação à configuração inicial da RDA a ser calibrada, ajustando o parâmetro entre 50 vezes o maior valor inicial e 0,02 vezes o menor valor para cada grupo de tubulações. Esse intervalo foi estabelecido com base em testes preliminares e na variação observada na literatura para parâmetros como rugosidade absoluta e o coeficiente kw. Na Tabela 01, por exemplo, verifica-se que a maior diferença entre valores máximos e mínimos de rugosidades absolutas é de aproximadamente 6,67 vezes, o que evidencia que a faixa definida no estudo é ampla o suficiente para abranger com segurança os possíveis valores desses parâmetros. Assim, se o parâmetro a ser calibrado na RDA for a rugosidade absoluta e o valor inicial for de 0,01 mm para todos os trechos, as 10 mil simulações serão realizadas com valores de rugosidade variando entre 0,5 mm e 0,0002 mm.

Embora o recurso apresentado no parágrafo anterior seja extremamente importante, ele confere à configuração inicial um certo grau de relevância para o método, exigindo do

modelador um conhecimento especializado ao definir os parâmetros iniciais. Na tentativa de combater essa dependência da configuração inicial e de melhorar a performance da calibração, uma metodologia híbrida MIGHA-RNA, que será descrita na seção seguinte, também foi desenvolvida.

A Figura 23 apresenta um fluxograma com o passo a passo da metodologia de aplicação dos métodos desenvolvidos com uso exclusivo de RNA.

Figura 23- Fluxograma dos métodos com uso exclusivo de RNA



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 Métodos Híbridos MIGHA-RNA

Este trabalho desenvolveu uma metodologia que combina a praticidade do MIGHA com a robustez da estimação por RNA, com o objetivo de calibrar as rugosidades absolutas em RDAs. Semelhante aos modelos que utilizam exclusivamente uma RNA, são propostos dois métodos que se diferenciam pelo número de saídas do modelo: o primeiro, denominado Híbrido-G, calcula um único valor para o parâmetro calibrado, aplicável a todas as tubulações

pertencentes a um mesmo grupo; o segundo, chamado Híbrido-T, determina o valor do parâmetro individualmente para cada trecho da rede.

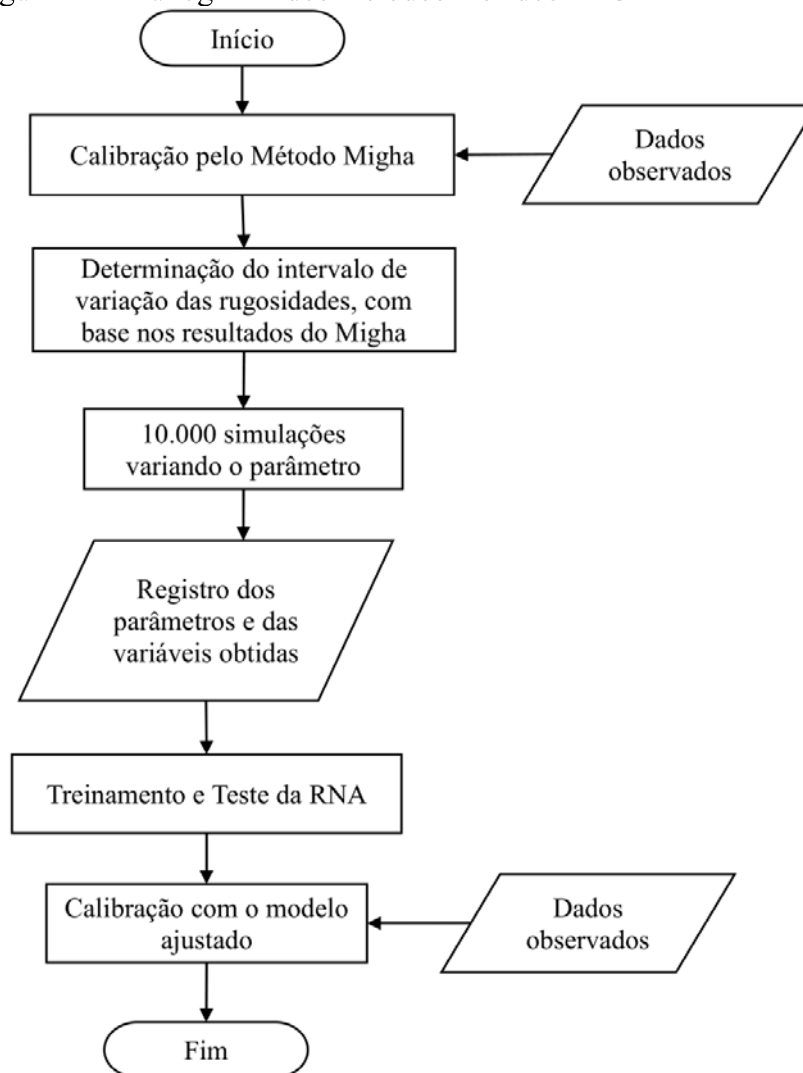
Embora esses métodos tenham sido desenvolvidos para calibrar rugosidades absolutas, eles não foram aplicados à calibração do kw devido a uma limitação imposta pelo simulador do modelo de qualidade da água utilizado nos algoritmos do MIGHA. Essa limitação, conseqüentemente, inviabilizou a aplicação do método híbrido para esse parâmetro em específico. Esse aspecto é abordado de forma mais detalhada na seção deste capítulo que apresenta os testes realizados, onde as dificuldades técnicas e limitações do simulador são explicadas.

A metodologia proposta é iniciada com a implementação do método MIGHA para realizar uma calibração preliminar da RDA. Após a calibração das rugosidades absolutas pelo MIGHA, os valores obtidos determinam o intervalo de variação do parâmetro que será utilizado para gerar as 10 mil amostras destinadas ao treinamento e teste da RNA. A importância desse intervalo, como discutido anteriormente, justifica a inclusão dessa etapa preliminar de calibração. Este novo intervalo varia de 1,25 vezes o maior valor calculado até 0,8 vezes o menor valor, sendo aplicado a cada grupo de tubulações. Em outras palavras, cada grupo de tubulações apresentará uma faixa de variação distinta, dependendo dos valores obtidos na calibração preliminar. É importante destacar que essa sub-rotina de definição da faixa de variação é aplicada tanto no método Híbrido-G quanto no Híbrido-T. A distinção entre esses dois métodos reside na quantidade de saídas do PMC, semelhante aos métodos que utilizam apenas RNAs.

Ressalta-se, no entanto, que essa faixa de variação nos métodos híbridos é apenas potencialmente menor do que a utilizada nos métodos que empregam unicamente uma RNA. Isso ocorre porque a faixa, nos métodos híbridos, depende dos valores retornados pelo MIGHA, enquanto nos outros métodos, ela se baseia na configuração inicial da rede, resultando em possíveis diferenças entre as duas abordagens.

A Figura 24 exibe um fluxograma detalhado que ilustra a metodologia completa de aplicação dos métodos híbridos para a calibração das rugosidades absolutas. Uma observação importante ao analisar a figura é o duplo uso dos dados observados ao longo do processo, uma vez que são empregados tanto na etapa inicial do MIGHA quanto na subsequente aplicação da RNA.

Figura 24 - Fluxograma dos métodos híbridos MIGHA-RNA



Fonte: Elaborado pelo autor.

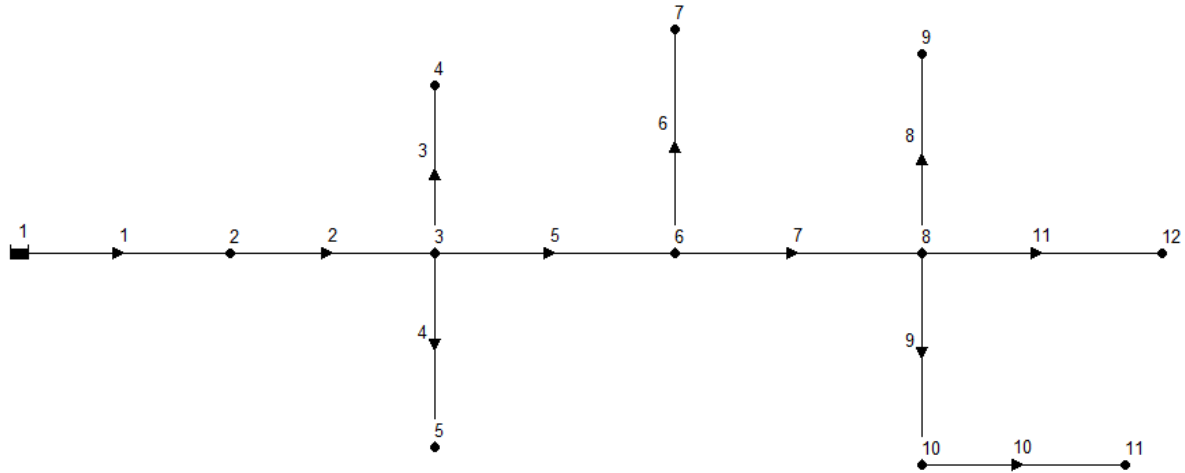
3.4 Redes Calibradas

Para avaliar a eficácia e o desempenho dos diferentes métodos de calibração, foram selecionadas três RDAs fictícias, cada uma possuindo características distintas. A utilização de redes fictícias, como já antecipado, é estratégica na fase de testes, pois possibilita a definição de uma “Rede Gabarito” — uma configuração considerada correta — facilitando assim a avaliação dos resultados obtidos após a calibração. Em todas as redes utilizadas, foi atribuído o valor de $-1/\text{dia}$ para o coeficiente k_b . Esse valor foi previamente definido pois o presente trabalho não tem como objetivo a calibração desse parâmetro, já que ele pode ser determinado experimentalmente em laboratório. Além disso, o valor atribuído está alinhado com resultados encontrados em estudos de abordagem similar. Nas seções subsequentes, serão apresentados detalhes sobre as configurações gabarito de cada rede.

3.4.1 Rede Heller-Pádua

A primeira RDA é uma adaptação da rede proposta por Heller e Pádua (2010), que é do tipo ramificada, com 11 trechos, 11 nós e 1 reservatório de nível fixo. A Figura 25 apresenta a configuração dessa rede desenhada no EPANET.

Figura 25 – Rede Heller-Pádua



Fonte: Heller e Pádua (2010).

Os dados do gabarito para a Rede Heller-Pádua estão especificados nas Tabelas 6 e 7, que apresentam, respectivamente, as informações dos nós e dos trechos. Nas tabelas, a letra “C” representa o consumo do nó, “P” indica a carga de pressão, “C_c” denota a concentração de cloro residual, “L” corresponde ao comprimento do trecho, “D” é o diâmetro, “ ϵ_g ” e “ kw_g ” são a rugosidade e o kw gabaritos, e “Q” é a vazão. Quanto ao reservatório, o nível de água foi estabelecido em 463,4 metros e a concentração de cloro residual em 2,00 mg/L.

Tabela 6 – Dados dos nós da Rede Héller-Pádua

Nó	Cota (m)	C (L/s)	P (mca)	C _c (mg/L)
2	440,8	0,1380	21,4666	1,6261
3	430,3	0,6469	31,1310	1,3259
4	432,0	0,1208	29,4214	0,9667
5	431,9	0,1811	29,4904	0,8717
6	431,6	0,5693	29,1945	1,1081
7	433,8	0,1984	26,9422	0,7095
8	433,4	0,6900	25,5822	0,7946
9	435,7	0,1380	23,2652	0,5614
10	437,1	0,3366	21,6242	0,5706
11	442,0	0,1294	16,7113	0,4094
12	435,7	0,1811	23,2416	0,5224

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 7 – Dados dos trechos da Rede Héller-Pádua

Trecho	L (m)	D (mm)	ϵ_g (mm)	kw_g (m/dia)	Q (L/s)
1	100	75	0,2500	-1,5000	3,3295
2	80	75	0,2500	-1,5000	3,1915
3	70	50	0,2500	-1,5000	0,1208
4	105	50	0,2500	-1,5000	0,1811
5	120	75	0,2500	-1,5000	2,2427
6	115	50	0,2500	-1,5000	0,1984
7	95	50	0,2500	-1,5000	1,4751
8	80	50	0,2500	-1,5000	0,1380
9	120	50	0,2500	-1,5000	0,4660
10	75	50	0,2500	-1,5000	0,1294
11	105	50	0,2500	-1,5000	0,1811

Fonte: Elaborado pelo autor.

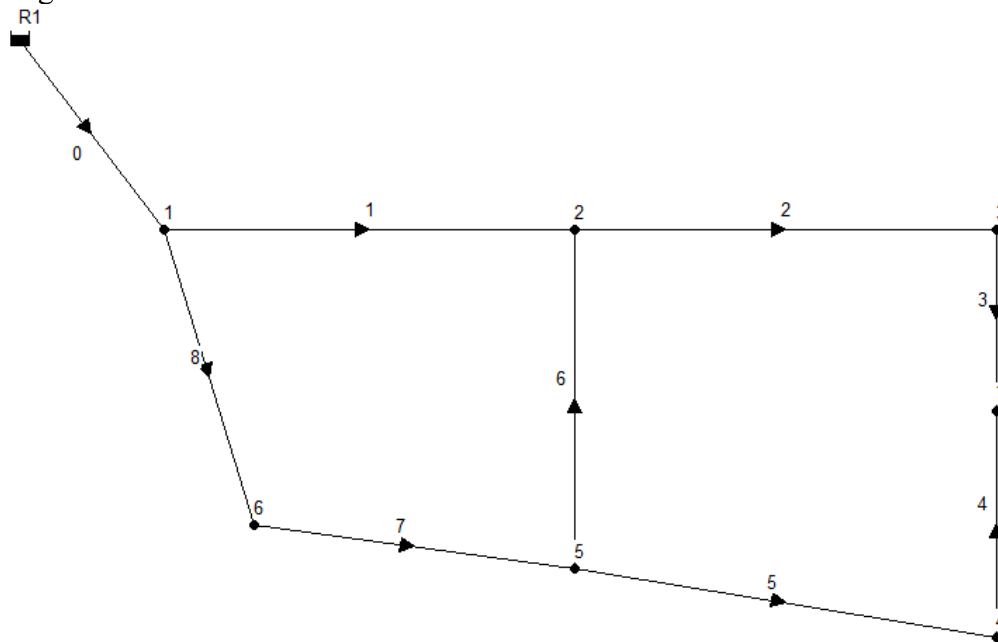
Ao observar a Tabela 7, verifica-se que esta rede apresenta um único valor de rugosidade e kw para todos os trechos. Neste caso, presume-se que todos os trechos pertencem ao mesmo grupo de tubulações. Isso implica que os métodos que utilizam RNAs para calcular os parâmetros de maneira uniforme também retornarão apenas um valor. Esses testes com a Rede Heller-Pádua são fundamentais para avaliar o comportamento dos métodos em uma situação mais simples, como uma rede ramificada de pequeno porte e com um único valor de rugosidade e kw .

Um detalhe relevante é que, nos testes com a Rede Heller-Pádua, não foi atribuído um padrão de variação de consumo na simulação. No entanto, devido à modelagem da qualidade da água, todas as simulações deste estudo, incluindo as realizadas para essa rede, tiveram uma duração de 72 horas. Esse período foi definido para garantir que houvesse tempo suficiente para o transporte completo do cloro por toda a rede, além de assegurar que o comportamento periódico dessa variável fosse alcançado de forma consistente em todas as simulações.

3.4.2 Rede Porto

A segunda RDA analisada neste estudo é uma modificação da rede proposta por Porto (2006), caracterizada por ser do tipo malhada, composta por dois anéis, totalizando nove trechos, sete nós e um reservatório de nível fixo. A Figura 26 ilustra a configuração dessa rede, conforme desenhada e modelada no *software* EPANET.

Figura 26 – Rede Porto



Fonte: Porto (2006)

Os dados do gabarito para a Rede Porto estão especificados nas Tabelas 8 e 9, que apresentam, respectivamente, as informações dos nós e dos trechos. Quanto ao reservatório, o nível de água foi estabelecido em 485,8 metros e a concentração de cloro residual em 2,00 mg/L.

Tabela 8 – Dados dos nós da Rede Porto

Nó	Cota (m)	C (L/s)	P (mca)	C _c (mg/L)
1	463,2	0,0	21,4965	1,8973
2	460,2	10,0	17,5970	1,3888
3	458,9	8,0	15,8822	1,1553
4	461,2	5,0	13,7116	1,2021
5	457,7	10,0	23,3066	1,5602
6	463,2	5,0	19,0801	1,7199
7	459,2	2,0	15,4869	0,6621

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 9 – Dados dos trechos da Rede Porto

Trecho	L (m)	D (mm)	ϵ_g (mm)	kw _g (m/dia)	Q (L/s)
0	520	250	0,0039	-0,4400	40,0000
1	1850	150	0,0056	-0,3800	13,9709
2	790	125	0,0036	-0,4800	8,7162
3	700	100	0,0088	-0,3200	0,7162
4	600	100	0,0079	-0,4100	1,2838
5	980	100	0,0049	-0,4900	6,2838
6	850	100	0,0068	-0,3900	4,7453
7	650	200	0,0077	-0,4500	21,0291
8	850	200	0,0017	-0,4100	26,0291

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme observado na Tabela 9, a Rede Porto apresenta uma variação moderada nos parâmetros a serem calibrados ao longo dos trechos, diferentemente da Rede Heller-Pádua. Apesar dessa variação, os trechos ainda foram classificados como pertencentes ao mesmo grupo, o que implica que métodos que calculam os parâmetros de maneira uniforme por grupo resultarão em um único valor para a rugosidade ou para o kw. Este teste é relevante, pois permitirá avaliar a adequação dos modelos para uma rede simples com parâmetros que apresentam uma certa variação.

Destaca-se também que, assim como na Rede Heller-Pádua, não foi atribuída uma variação no padrão de consumo na Rede Porto. No entanto, devido à necessidade imposta pela modelagem da qualidade da água, foram realizadas simulações com uma duração total de 72 horas.

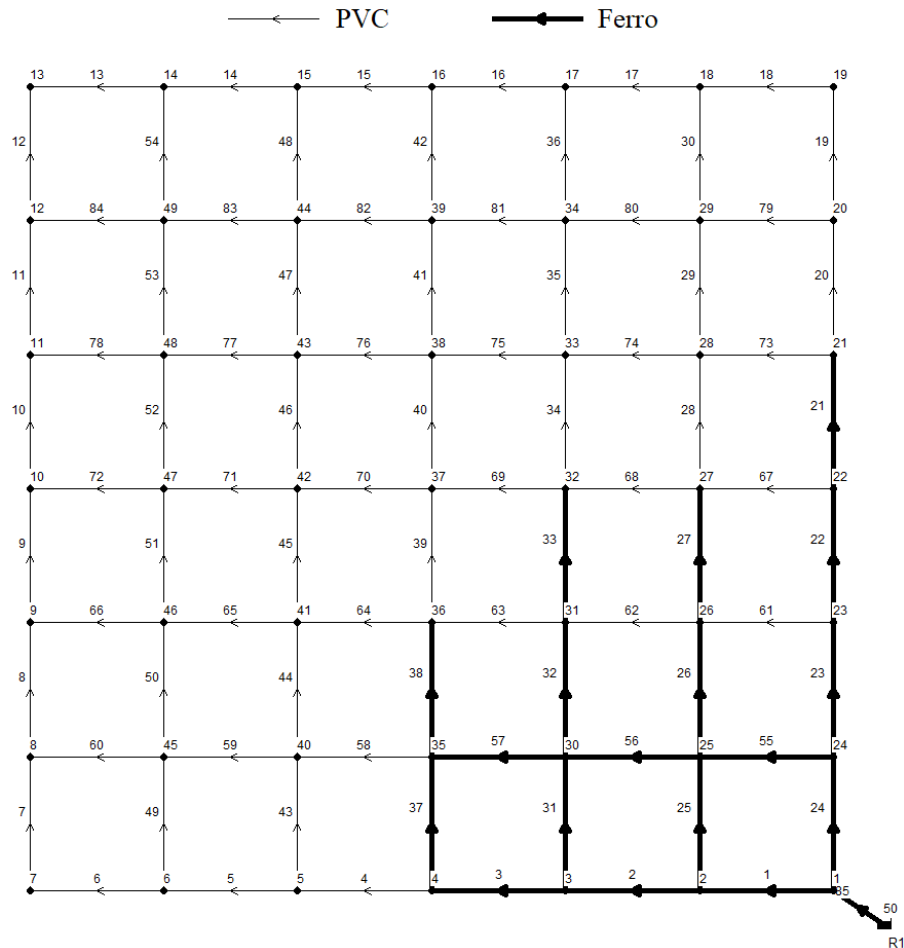
3.4.3 Rede Sousa

Com o intuito de estudar o comportamento dos métodos em uma rede que se aproxima de uma configuração real, a terceira RDA selecionada foi uma adaptação da rede proposta por Sousa (2020) e Sousa *et al.* (2022). Esta RDA é composta por dois materiais diferentes: PVC e Ferro Fundido. A construção da rede foi realizada com o auxílio do *software* UFC2, que permitiu o traçado e a exportação para o *software* EPANET. As cotas dos nós foram atribuídas com base nas curvas de nível obtidas de um arquivo exemplo disponível no sistema UFC. O dimensionamento dos trechos foi feito de modo a evitar perdas de carga unitárias superiores a 10 m/km nos trechos, conforme recomendado pela NBR 12218/2017. As demandas foram estabelecidas utilizando uma opção predefinida do *software*, considerando 20 ligações a cada 100 m de tubo, com cinco pessoas por ligação e um consumo per capita de 150 L/hab.dia. A rede é composta por 66 trechos de PVC e 19 de Ferro Fundido, 49 nós e um reservatório de nível fixo com uma carga de 223,0174 m e uma concentração de cloro de 2,0 mg/L.

Nesta RDA, considerou-se a existência de variação da rugosidade absoluta e do coeficiente kw em trechos com o mesmo material. Para os trechos de PVC, as rugosidades absolutas foram definidas de forma aleatória, com valores variando entre 0,0015 mm e 0,01 mm, enquanto, para o Ferro Fundido, elas ficaram entre 0,25 mm e 0,50 mm. No caso dos coeficientes kw, os valores de referência utilizados foram: entre -0,1 e -0,5 m/dia para os trechos de PVC, e entre -0,5 e -1,5 m/dia para os de Ferro Fundido. Esses valores gabarito foram estabelecidos com base em estudos e dados reportados na literatura para os respectivos materiais.

A Figura 27 apresenta a configuração da Rede Sousa, com a identificação dos trechos e dos materiais.

Figura 27 – Rede Sousa

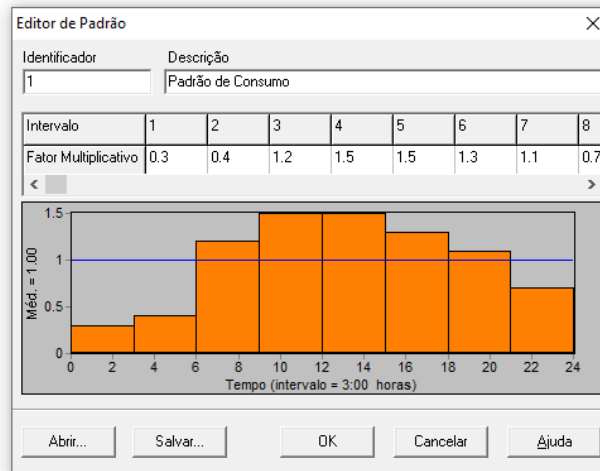


Fonte: Sousa *et al.* (2022)

Para simular a operação diária da Rede Sousa e possibilitar o teste de calibrações dinâmicas, foi estabelecido um padrão de variação de consumo ao longo do dia. Assim como nas outras redes, a simulação teve uma duração total de 72 horas. O padrão de consumo, apresentado na Figura 28, foi atribuído no EPANET e aplica um fator multiplicativo nos consumos base dos nós da rede, variando de acordo com o horário da simulação.

Os dados correspondentes aos nós e aos trechos da Rede Sousa estão disponíveis nos Apêndices A e B, respectivamente. Esses dados representam os resultados obtidos na hora 70 da simulação, que será utilizada como referência para a análise subsequente da qualidade das calibrações.

Figura 28 – Padrão de consumo da Rede Sousa



Fonte: Elaborado pelo autor com uso do EPANET.

3.5 Testes realizados

Nesta seção, serão detalhados os testes realizados para avaliar os diferentes métodos desenvolvidos. Esses métodos foram aplicados às três RDAs mencionadas anteriormente, em diversos cenários com variação na quantidade de dados observados. Além da comparação entre os métodos propostos, também foram utilizados o método MIGHA e Algoritmos Genéticos (AG) como critérios de comparação. Os resultados obtidos a partir das simulações das redes, após a calibração pelos diferentes modelos, foram comparados entre si e com a configuração inicial da rede, antes da calibração. Em todos os testes, o valor inicial da rugosidade dos trechos foi estabelecido em 0,01 mm, e o coeficiente kw foi fixado em -0,1 m/dia. A escolha desses valores iniciais atende à exigência dos métodos, que requerem uma configuração de partida. Optou-se por esses valores por serem próximos aos recomendados pela literatura para tubulações de PVC, um dos materiais mais utilizados em redes de abastecimento. Por questão de padronização, esses valores foram adotados em todos os testes realizados.

Com o objetivo de proporcionar uma apresentação clara e facilitar a discussão dos resultados obtidos, os métodos desenvolvidos e utilizados nas comparações neste estudo foram enumerados e estão detalhados na Tabela 10. Esta tabela oferece uma visão geral dos parâmetros que cada método busca calibrar. É essencial destacar que, ao realizar a calibração do coeficiente kw pelo RNA-G ou pelo RNA-T, parte-se do pressuposto de que a RDA em questão já esteja previamente calibrada hidráulicamente.

Tabela 10 – Métodos empregados nos testes.

Calibração	Método	Parâmetro
1	RNA-G	ε e kw
2	RNA-T	ε e kw
3	Híbrido-G	ε
4	Híbrido-T	ε
5	MIGHA	ε
6	AG	ε e kw

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme apresentado na Tabela 10, optou-se por não utilizar o método MIGHA, e, conseqüentemente, os métodos Híbrido-G e Híbrido-T, na calibração do coeficiente kw. Essa decisão foi baseada em testes preliminares que revelaram problemas relacionados ao método e ao simulador utilizado. A aplicação do MIGHA depende da criação de uma Rede Observada, que é analisada em paralelo à Rede Calculada. Os dados observados, obtidos em campo, são utilizados para forçar os nós da Rede Observada a atingir determinadas variáveis de estado, como as concentrações de cloro. Entretanto, conforme discutido no final da seção 2.5, a utilização do MIGHA na calibração de modelos de qualidade de água requer o uso de recursos do próprio EPANET para fixar os valores medidos de concentração de cloro na Rede Observada.

O recurso mais próximo dessa funcionalidade no EPANET é o reforço de concentração. No entanto, esse mecanismo só é capaz de alterar os gradientes de concentração a jusante do nó medido, o que implica que a atualização dos parâmetros kw pelo MIGHA ocorreria apenas nos trechos a jusante dos pontos de medição. Tal comportamento foi considerado inadequado para este estudo, uma vez que os dados observados de concentração de cloro deveriam fornecer informações sobre os trechos a montante, e não o contrário.

Este trabalho busca não apenas testar diferentes métodos, mas também avaliar o impacto do volume de dados medidos na qualidade da calibração. As observações mencionadas na Tabela 11 correspondem, no caso das calibrações de rugosidade, aos valores de cargas de pressão retirados da rede gabarito nos nós especificados. Para as calibrações do coeficiente kw, foram utilizados os mesmos nós, porém com dados de concentrações de cloro residual. No caso da Rede Sousa, que apresenta variação no padrão de consumo ao longo do dia, foram realizadas duas análises distintas: uma em que os dados observados nos nós da Tabela 11 correspondem aos valores para a hora 52; e outra em que foram utilizados os dados das horas 52 e 60, nos mesmos nós. As horas 52 e 60 foram escolhidas por estarem suficientemente afastadas do início da simulação, garantindo que todos os nós já estivessem recebendo influências adequadas do transporte de cloro e apresentassem um comportamento cíclico nas concentrações.

A escolha de realizar essas duas análises na Rede Sousa visa investigar a importância de coletar dados em diferentes horários para uma calibração dinâmica. Comparar os resultados com dados de um único horário (hora 52) e de dois horários (52 e 60) permite uma avaliação mais detalhada sobre a relevância de observar variáveis em momentos distintos e seu impacto na qualidade da calibração, especialmente em redes com padrões de consumo variáveis.

Tabela 11 – Localização dos dados observados utilizados nos diferentes cenários de calibrações

Rede	Nº de nós com observação	Nós com observação
Heller-Pádua	6	4; 5; 7; 9; 11; 12
	3	5; 7; 12
	1	12
Porto	7	1; 2; 3; 4; 5; 6; 7
	3	2; 5; 7
	1	7
Sousa	25	1; 3; 5; 7; 9; 11; 13; 15; 17; 19; 21; 23; 25; 27; 29; 31; 33; 35; 37; 39; 41; 43; 45; 47; 49
	13	1; 5; 9; 13; 17; 21; 25; 29; 33; 37; 41; 45; 49
	7	1; 9; 17; 25; 33; 41; 49
	4	1; 17; 33; 49

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.6 Desenvolvimento da interface gráfica do novo *software*

Para o desenvolvimento de um *software* com interface intuitiva, visando à aplicação dos métodos propostos neste trabalho, foi utilizada como base a interface do usuário do UFC10, fora do ambiente AutoCAD, realizando-se diversas adaptações. A escolha de modificar a interface foi necessária devido às diferenças nos métodos abordados neste estudo, que incluem a calibração de parâmetros como rugosidades absolutas e coeficientes kw, mas não a calibração de vazões. Assim, elementos da versão anterior relacionados a essa funcionalidade foram removidos, enquanto novos componentes foram adicionados para atender às exigências específicas dos novos métodos. O desenvolvimento da interface gráfica foi realizado com o uso da biblioteca JavaFX, uma plataforma multimídia baseada em Java desenvolvida pela Sun Microsystems. A nova interface está detalhada na seção de resultados.

Os elementos removidos da interface incluem:

- Botões de seleção e visualização das funções objetivo do método MIGHA;
- Campo para inserção do número de iterações do método MIGHA;

- Opção de calibração das vazões;
- Caixa de seleção para a rotina de uniformização dos parâmetros;
- Atualização dos coeficientes de Hazen-Williams.

Essas remoções foram feitas devido ao fato de o escopo deste trabalho não abranger a calibração de vazões, nem o uso de rotinas de uniformização dos coeficientes.

Por outro lado, novos elementos foram introduzidos para acomodar os métodos de calibração de rugosidade absoluta e kw desenvolvidos neste estudo. Entre as adições estão:

- Botão para calibrar os coeficientes kw, além das rugosidades absolutas;
- Botões para seleção do método de calibração (RNA-G, RNA-T, Híbrido-G, Híbrido-T);
- Caixa de seleção para ativar a rotina de calibração por grupo de tubulações;
- Novas colunas nas tabelas de resultados das simulações, com dados relacionados à qualidade da água;
- Uma coluna na tabela de dados observados com as concentrações de cloro medidas;
- Caixa de seleção para escolha da hora da simulação a ser visualizada.

Além disso, algumas nomenclaturas foram alteradas na nova versão do *software* para maior precisão técnica. Por exemplo, o termo “Carga Hidráulica” foi substituído por “Cota Piezométrica”, buscando maior clareza e aderência aos padrões utilizados em modelagem de RDAs.

3.7 Modelagem e calibração das redes de distribuição de água da UFPI

Além de desenvolver métodos de calibração e apresentar o *software* correspondente, este trabalho propõe-se a realizar a modelagem de duas redes reais, nas quais também foram conduzidas calibrações. Para esta finalidade, optou-se por abordar as RDAs localizadas na Universidade Federal do Piauí (UFPI), do Campus Universitário Ministro Petrônio Portella. A construção dos modelos computacionais dessas RDAs desempenha um papel crucial nesta pesquisa, pois permite verificar a aplicabilidade da metodologia desenvolvida em um contexto real. Além disso, contribui significativamente para a instituição, fornecendo um modelo confiável da infraestrutura de distribuição de água, com potencial para aprimorar os serviços prestados à toda a comunidade acadêmica.

A Figura 29 ilustra a localização das duas RDAs trabalhadas neste estudo. A primeira, denominada Rede CT-CCHL, é responsável pelo abastecimento do Centro de

Tecnologia, do Centro de Ciências Humanas e Letras, além de outras instalações como a biblioteca comunitária e o prédio do curso de Design de Moda. A segunda, denominada Rede CCN-CCS, atende ao Centro de Ciências da Natureza, ao Centro de Ciências da Saúde, à reitoria, ao almoxarifado e a outros edifícios. Não foram considerados alguns setores do campus que possuem sistemas próprios de abastecimento, como o Hospital Universitário e o Setor de Esportes.

Figura 29 – Localização das RDAs da UFPI, na cidade de Teresina-PI: Rede CT-CCHL na região em vermelho e Rede CCN-CCS na região em azul.



Fonte: Elaborado pelo autor com uso do Google Earth.

As RDAs discutidas nesta seção correspondem a dois sistemas independentes e autônomos, que operam isoladamente tanto entre si quanto em relação à rede pública de distribuição. Cada sistema possui seu próprio reservatório, alimentado por poços localizados dentro do campus. Este estudo, porém, delimita-se exclusivamente à modelagem das RDAs, ou seja, à rede de distribuição de água a partir dos reservatórios. Componentes relacionados à captação de água e às aduções de água bruta, que envolvem a condução da água até os reservatórios, não foram considerados nos modelos desenvolvidos. No entanto, os dados da captação foram utilizados para auxiliar na definição dos consumos nodais da rede.

Para conceber o layout das redes, foram realizadas várias reuniões com a Prefeitura Universitária (PREUNI) — órgão executivo da Administração Superior da UFPI responsável pela gestão da infraestrutura dos Campi — em conjunto com a Coordenadoria de Planejamento e Controle (CPC) e a Coordenadoria de Manutenção Patrimonial (CMP). A elaboração desses

traçados representou um desafio considerável, dada a escassez de informações sobre as tubulações, como comprimentos, diâmetros e conexões existentes. Um modelo pré-existente em formato .dwg da CPC serviu como base, mas ao longo das reuniões, foi frequentemente modificado para se alinhar com as perspectivas fornecidas pelos engenheiros da PREUNI. O traçado foi realizado utilizando as ferramentas do Sistema UFC.

Para definir as cotas dos nós nas RDAs, foram utilizados dados de um levantamento aerofotogramétrico de Teresina-PI, realizado pela empresa Topocart em 2013. Esse levantamento mapeou 31.027 pontos distribuídos por toda a cidade, permitindo o traçado de curvas de nível com intervalos de um metro. Com essas informações, utilizou-se o sistema UFC, especificamente o UFC2, para traçar a rede de distribuição dentro das curvas de nível e realizar uma interpolação linear, determinando assim as altitudes dos nós.

A definição dos consumos nodais foi uma etapa crucial e desafiadora, pois exerce um impacto significativo na hidráulica da RDA. A adoção de demandas pontuais nos nós do modelo já representa uma simplificação do cenário real. Além disso, a ausência de medições individualizadas nos diferentes centros da universidade dificultou uma determinação precisa dessa variável. Para abordar essa questão, foram utilizados dados de consumo provenientes dos quatro poços que abastecem os dois reservatórios das RDAs da universidade. Foram analisadas leituras de quatro meses consecutivos, permitindo o cálculo do consumo total mensal referente a três meses para cada rede (Rede CT-CCHL e Rede CCN-CCS).

Para definir as demandas de cada região da RDA de forma mais precisa, os nós foram agrupados conforme sua proximidade em relação aos diferentes centros (como o Centro de Tecnologia, o Centro de Ciências da Natureza, entre outros) e aos Restaurantes Universitários (RU). Inicialmente, foram estimados os consumos dos dois RUs, um em cada rede. A estimativa de consumo foi baseada na quantidade de refeições fornecida pela PREUNI para cada RU, utilizando um consumo médio de 17,5 litros por refeição, conforme o estudo de Souza, Oliveira e Pereira (2020). Após deduzir o consumo total da rede em relação ao consumo calculado para os RUs, os percentuais de consumo relativos a cada centro foram definidos com base no número de alunos matriculados em cada um deles.

Com o consumo mensal estimado para cada centro e para os RUs, foi possível calcular o consumo em litros por segundo para cada nó dos grupos definidos. Esse valor foi obtido dividindo o consumo total do centro pelo número de nós do grupo e pela quantidade de segundos em um mês. Além disso, foi considerado que há consumo nas redes durante 16 horas por dia (das 6 horas às 22 horas), o que buscou aproximar o modelo à realidade de uso da rede.

Assim, a configuração encontrada funciona como uma média, expressando um estado permanente na simulação.

Todas essas considerações foram realizadas com o objetivo de tornar o modelo o mais fidedigno possível, dadas as limitações de dados disponíveis e a importância dos consumos na modelagem da rede.

Como última etapa da modelagem das RDAs da UFPI, foi realizada a calibração das rugosidades absolutas utilizando a metodologia proposta neste trabalho. Inicialmente, adotou-se um valor de 0,01 mm para todos os trechos, dado que a escassez de informações detalhadas sobre os materiais das tubulações impediu uma determinação mais precisa do valor inicial. A calibração foi conduzida utilizando dados de cargas de pressão medidas em diversos pontos da rede, com o auxílio de um manômetro. Além disso, para possibilitar a aplicação da rotina de calibração por grupos, desenvolvida neste estudo, as RDAs foram segmentadas em conjuntos de trechos com base no período de instalação. Partiu-se do pressuposto de que tubulações instaladas na mesma época compartilham características como material, fabricante e idade, o que justificou a adoção de um único valor de rugosidade para cada grupo específico. Dessa forma, a metodologia buscou assegurar que o modelo fosse ajustado de forma mais precisa, mesmo diante das limitações de informações disponíveis.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, a análise dos resultados é dividida em cinco seções. Inicialmente, apresenta-se a interface do *software* desenvolvido, destacando as principais discrepâncias em relação à versão atual do UFC10. Em seguida, são discutidos os resultados das calibrações das rugosidades absolutas, incluindo uma análise dos valores obtidos para este parâmetro, bem como as cargas de pressão e vazões simuladas pelas redes calibradas. Esses resultados são comparados com a configuração da rede gabarito para avaliar a eficácia dos métodos empregados. Posteriormente, são abordados os resultados das calibrações dos coeficientes kw, com uma análise dos valores calculados para este parâmetro e das concentrações de cloro residual nos nós, também comparados com as configurações gabarito. Na quarta seção, são apresentados os testes finais realizados, nos quais foram feitas algumas alterações nos parâmetros das RNAs. Por fim, a quinta seção trata da modelagem das RDAs da UFPI.

4.1 Interface do *software* desenvolvido

A interface do *software* desenvolvido neste trabalho foi adaptada a partir da versão atual do UFC10, ilustrada na Figura 16. A nova configuração da interface principal preserva alguns elementos familiares, incluindo os dados referentes aos reservatórios, nós e trechos, que são retornados pela simulação da rede antes da calibração. Para atender às necessidades específicas deste estudo, certos componentes foram removidos e novos elementos foram adicionados. Além disso, algumas nomenclaturas foram alteradas para tornar as informações fornecidas mais claras e precisas ao usuário, melhorando a usabilidade e a interpretação dos resultados.

A Figura 30 fornece um exemplo da nova configuração da interface. Pode-se observar que alguns elementos foram removidos, como a opção de calibrar “Vazões”, uma vez que isso está fora do escopo deste trabalho. Na parte inferior da interface principal, o novo *software* permite ao usuário definir características específicas da calibração, como o parâmetro a ser calibrado, o método a ser utilizado e se a rotina de calibração por grupo será aplicada. Algumas restrições foram estabelecidas no *software*, incluindo a desativação das opções "MIGHA" e "Híbrido" quando o parâmetro kw é selecionado, uma vez que apenas os métodos que utilizam exclusivamente RNAs são permitidos pelo programa para a calibração desse parâmetro. Além disso, a opção "Calibração Uniforme por Grupo" é desativada quando

"MIGHA" é selecionado, pois essa função está relacionada à quantidade de saídas dos PMCs. Esses comportamentos do *software* são ilustrados nas Figuras 31 e 32.

Figura 30 – Interface principal do *software* desenvolvido

The screenshot shows the main interface of the software, titled 'UFC10'. It features a 'Simulação da Rede Inicial' section with a 'Hora' dropdown set to '0' and a 'Calibrar' button. Below this are three data tables: 'Dados dos Reservatórios', 'Dados dos Nós', and 'Dados dos Trechos'. At the bottom, there is a 'Calibração' section with radio buttons for 'Parâmetro' (Rugosidades Absolutas, Kw (qualidade)) and 'Método' (RNA, Migha, Híbrido (Migha-RNA), Calibração Uniforme Por Grupo).

ID	Cota Piezométrica (m)	Qualidade (mg/L)
50	223.0174	2.0

ID	Demanda (L/s)	Cota (m)	Cota Piezométrica (m)	Carga de Pressão (mca)	Qualidade (mg/L)
1	0.1406	217.591	222.9962	5.4052	0.0
2	0.1406	217.113	222.9316	5.8186	0.0
3	0.1406	214.687	222.8947	8.2077	0.0
4	0.1406	209.839	222.805	12.966	0.0
5	0.1406	202.331	222.7082	20.3772	0.0
6	0.1406	197.00	222.6601	24.6701	0.0

ID	Material	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	ϵ (mm)	Kw (m/dia)	Vazão (L/s)	Velocidade (m/s)
85	FERRO	50.0	200.0	0.345	-0.1	7.9222	0.2522
84	PVC	100.0	50.0	0.0047	-0.1	0.059	0.03
83	PVC	100.0	50.0	0.0024	-0.1	0.1498	0.0763
82	PVC	100.0	50.0	0.0066	-0.1	0.231	0.1176
81	PVC	100.0	50.0	0.0091	-0.1	0.2572	0.131
80	PVC	100.0	50.0	0.009	-0.1	0.295	0.1502

Calibração
 Parâmetro: Rugosidades Absolutas Kw (qualidade)
 Método: RNA Migha Híbrido (Migha-RNA) Calibração Uniforme Por Grupo

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 31 – Desativação dos métodos MIGHA e Híbrido

This close-up shows the 'Calibração' section. The 'Parâmetro' is set to 'Kw (qualidade)' (selected with a blue circle). The 'Método' is set to 'RNA' (selected with a blue circle). The 'Calibração Uniforme Por Grupo' checkbox is checked.

Calibração
 Parâmetro: Rugosidades Absolutas Kw (qualidade)
 Método: RNA Migha Híbrido (Migha-RNA) Calibração Uniforme Por Grupo

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 32 – Desativação da opção de calibração por grupo

This close-up shows the 'Calibração' section. The 'Parâmetro' is set to 'Rugosidades Absolutas' (selected with a blue circle). The 'Método' is set to 'Migha' (selected with a blue circle). The 'Calibração Uniforme Por Grupo' checkbox is unchecked.

Calibração
 Parâmetro: Rugosidades Absolutas Kw (qualidade)
 Método: RNA Migha Híbrido (Migha-RNA) Calibração Uniforme Por Grupo

Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma alteração significativa é a inclusão de uma caixa de seleção para a hora da simulação, localizada no canto superior da interface principal. Esta caixa contém todas as horas da simulação, levando em conta o intervalo de tempo do relatório definido no EPANET. À medida que o usuário modifica a hora nesta caixa, os valores retornados pelas variáveis de

estado — pressões, vazões e concentrações de cloro — também são atualizados na interface principal, refletindo o momento selecionado. Isso se aplica igualmente à aba “Dados Observados”, conforme ilustrado na Figura 33, que ajusta as medições de acordo com o horário estabelecido.

Figura 33 – Aba com dados observados

ID	Pressão medida (m)	Concentração de Cloro (mg/L)
1	-	1.913646
2	-	-
3	-	-
4	-	-
5	-	1.489321
6	-	-
7	-	-
8	-	-
9	-	0.833033
10	-	-
11	-	-
12	-	-
13	-	0.344783
14	-	-
15	-	-
16	-	-

Calibração

Parâmetro: Rugosidades Absolutas Kw (qualidade)

Método: RNA Migha Híbrido (Migha-RNA) Calibração Uniforme Por Grupo

Fonte: Elaborado pelo autor.

É importante enfatizar que a seleção do parâmetro pelo usuário deve estar em consonância com a natureza dos dados observados. Isso é crucial para garantir o funcionamento e a relevância dos resultados da calibração. Por exemplo, conforme ilustrado na Figura 32, os dados observados neste caso específico são referentes à concentração de cloro residual. Portanto, o parâmetro apropriado para ser calibrado neste contexto é o coeficiente kw.

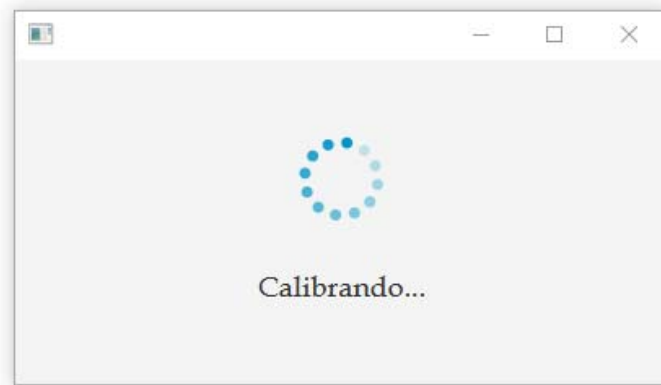
Após selecionar a configuração desejada, o usuário inicia o processo de calibração clicando no botão "Calibrar". Durante esse período, cuja duração varia conforme o método selecionado e o tamanho da rede, uma janela de carregamento é exibida. Após a conclusão dos cálculos, a janela de carregamento é fechada e uma nova é aberta, exibindo os resultados da simulação da rede calibrada.

Na janela que apresenta os resultados da calibração, é possível visualizar os dados relacionados aos reservatórios, nós e trechos da rede em qualquer momento da simulação. Após

a conclusão do processo, um arquivo chamado "Rede_Calculada.inp" é gerado. Esse arquivo, que representa a rede com os parâmetros já calibrados, é salvo no mesmo diretório que contém os arquivos com informações da rede e dos dados observados.

As Figuras 34 e 35 ilustram a janela de carregamento e a janela com os resultados obtidos pela calibração.

Figura 34 – Janela de Carregamento



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 35 – Janela com resultados da calibração

Dados dos Reservatórios		
ID	Cota Piezométrica (m)	Qualidade (mg/L)
50	223.0174	2.0

Dados dos Nós					
ID	Demanda (L/s)	Cota (m)	Cota Piezométrica (m)	Carga de Pressão (mca)	Qualidade (mg/L)
1	0.3282	217.591	222.91	5.319	1.8995
2	0.3282	217.113	222.5837	5.4707	1.7725
3	0.3282	214.687	222.3994	7.7124	1.6645
4	0.3282	209.839	221.9556	12.1166	1.5026
5	0.3282	202.331	221.5242	19.1932	1.4542

Dados dos Trechos							
ID	Material	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	ϵ (mm)	Kw (m/dia)	Vazão (L/s)	Velocidade (m/s)
85	FERRO	50.0	200.0	0.345	-0.9953	18.4851	0.5884
84	PVC	100.0	50.0	0.0047	-0.1674	0.1399	0.0713
83	PVC	100.0	50.0	0.0024	-0.1674	0.3654	0.1861
82	PVC	100.0	50.0	0.0066	-0.1674	0.5474	0.2788
81	PVC	100.0	50.0	0.0091	-0.1674	0.6013	0.3062
80	PVC	100.0	50.0	0.009	-0.1674	0.6909	0.3519

Fonte: Elaborado pelo autor.

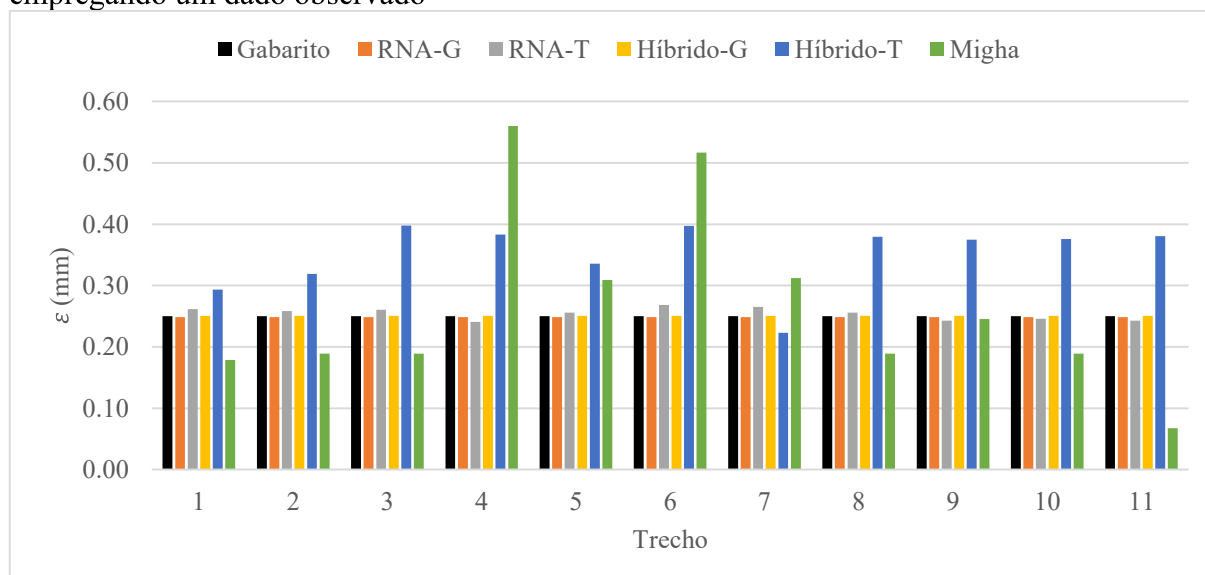
4.2 Calibrações das rugosidades absolutas

Esta seção apresenta os resultados das calibrações das rugosidades absolutas para as redes Heller-Pádua, Porto e Sousa, obtidos em diferentes cenários com variações na quantidade de dados observados. Em cada cenário, foram testados os quatro métodos desenvolvidos neste estudo (RNA-G, RNA-T, Híbrido-G e Híbrido-T), cujos resultados foram comparados entre si e com os obtidos pelo método MIGHA de Sousa, Bezerra e Castro (2020). Ao final da seção, os resultados gerados por Algoritmos Genéticos também foram analisados, proporcionando uma avaliação mais abrangente da eficiência dos métodos propostos.

4.2.1 Calibrações das rugosidades absolutas na Rede Heller-Pádua

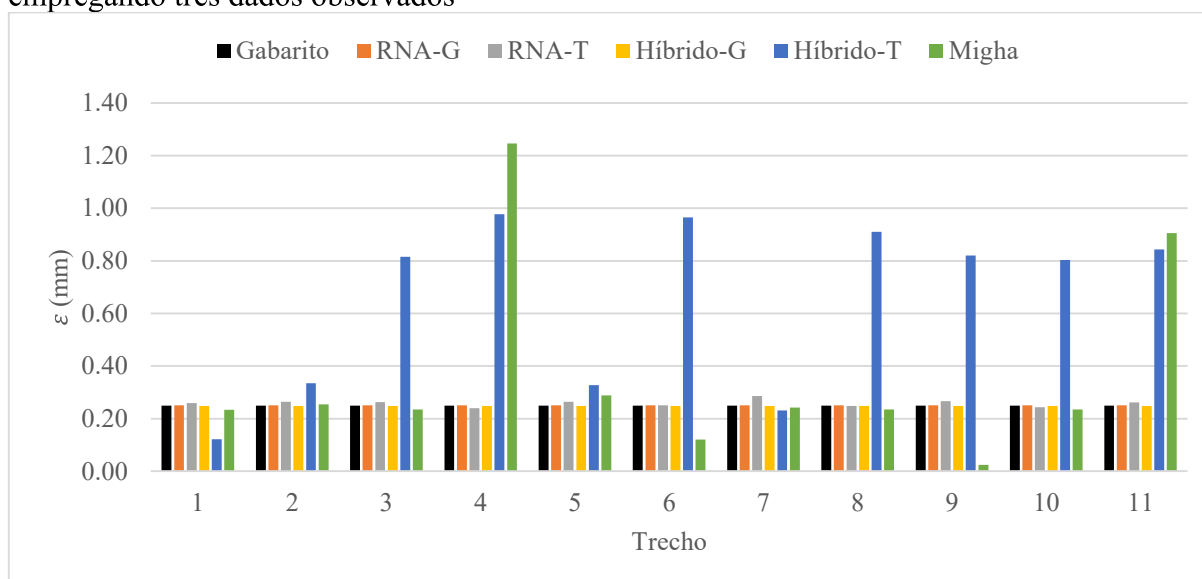
Os resultados obtidos para as rugosidades absolutas nas calibrações da Rede Heller-Pádua encontram-se resumidos nos Gráficos 1, 2 e 3. Esses resultados emergem de três cenários distintos, cada um com uma quantidade diferente de dados observados. Em cada cenário, os cinco métodos propostos foram aplicados e testados, conforme detalhado nas Tabelas 10 e 11.

Gráfico 1 – Rugosidades absolutas calculadas pelas calibrações da Rede Heller-Pádua empregando um dado observado



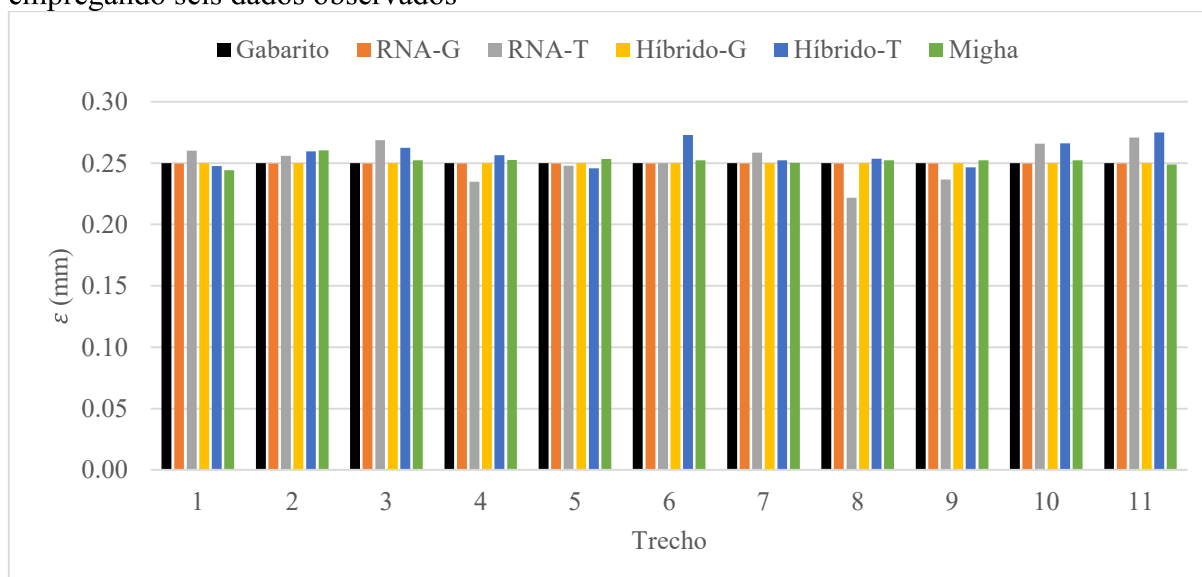
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 2 – Rugosidades absolutas calculadas pelas calibrações da Rede Heller-Pádua empregando três dados observados



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 3 – Rugosidades absolutas calculadas pelas calibrações da Rede Heller-Pádua empregando seis dados observados



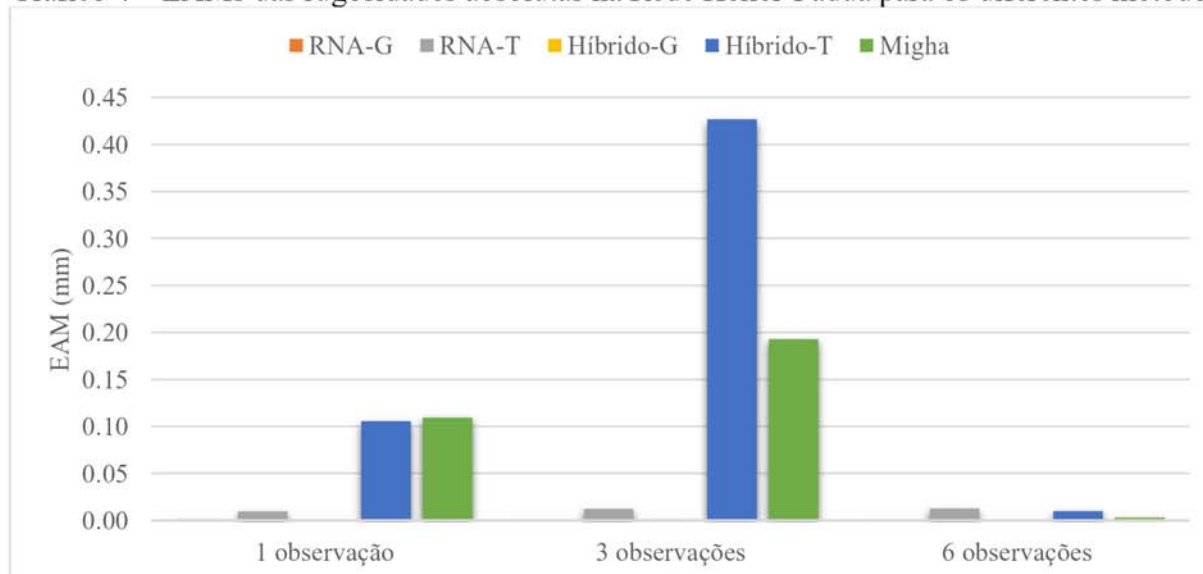
Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar os Gráficos 1, 2 e 3, nota-se que o cenário com 6 dados observados apresentou os resultados mais satisfatórios em todos os testes. Em particular, todos os métodos produziram valores de rugosidade muito próximos do valor gabarito de 0,2500 mm para todos os trechos. Isso sugere que a performance dos métodos tende a melhorar com o aumento do número de dados observados. No entanto, essa tendência parece não ser universal. Por exemplo, ao aumentar o número de dados de um para três, observou-se uma queda no desempenho do Híbrido-T e do MIGHA, que só melhoraram sua performance com a adição de mais dados.

Ao examinar os gráficos mencionados, nota-se que o RNA-G e o Híbrido-G se destacam em termos dos valores calculados para a rugosidade. Ambos empregam a rotina de calibração por grupo nas RNAs e, como todos os trechos dessa RDA pertencem ao mesmo grupo, calcularam um único valor de rugosidade para cada cenário. Notavelmente, mesmo no cenário com apenas um dado observado, estes métodos produziram valores de 0,2485 mm e 0,2505 mm, respectivamente, representando uma excelente aproximação ao valor gabarito. A superioridade desses modelos na Rede Heller-Pádua era esperada, dado que a rede gabarito apresenta um único valor de rugosidade para todas as tubulações.

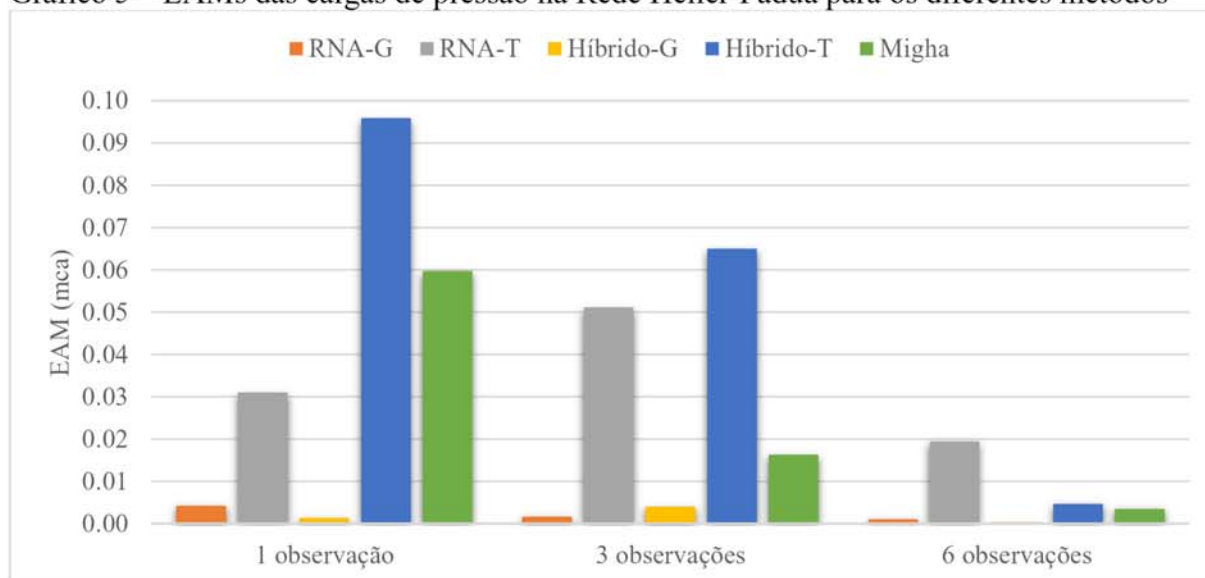
Os Gráficos 4 e 5 ilustram os Erros Absolutos Médios (EAM) para as rugosidades absolutas e cargas de pressão resultantes da simulação das redes calibradas pelos diferentes métodos. Destaca-se que as vazões na Rede Heller-Pádua, que é uma RDA ramificada, não foram analisadas devido ao funcionamento do EPANET, que utiliza um modelo orientado ao atendimento de demandas. Nesse tipo de modelo, as vazões nos trechos sempre se ajustam para atender as demandas dos nós, mesmo que isso possa resultar em cargas de pressão negativas. Em redes malhadas, as vazões nos trechos podem variar de acordo com suas diferentes configurações, desde que o consumo nodal seja atendido. Já nas ramificadas com apenas um reservatório, como a Heller-Pádua, um nó recebe vazão de apenas um trecho, o que faz com que a vazão nesta tubulação dependa exclusivamente dos consumos dos nós a jusante. Por essa razão, a rugosidade das tubulações não afeta diretamente as vazões nesse tipo de rede, e, portanto, essa variável não foi considerada na análise neste momento.

Gráfico 4 – EAMs das rugosidades absolutas na Rede Heller-Pádua para os diferentes métodos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 5 – EAMs das cargas de pressão na Rede Heller-Pádua para os diferentes métodos



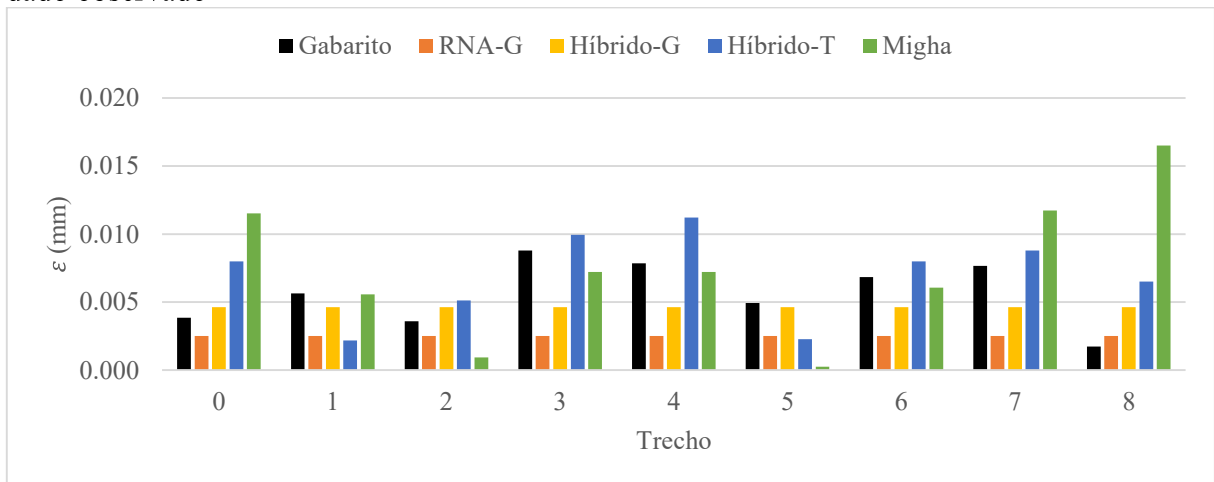
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os Gráficos 4 e 5 reiteram a superioridade dos métodos RNA-G e Híbrido-G em termos de desempenho. Eles também confirmam que o cenário com seis dados observados produziu os melhores resultados, com erros menores tanto para as rugosidades absolutas quanto para as cargas de pressão. Embora existam algumas anomalias, como a presença de aumento do erro nas pressões ou nas rugosidades absolutas no cenário com três dados em comparação com o cenário com apenas um dado em alguns métodos, vale destacar que quase todas as calibrações resultaram em EAMs inferiores aos existentes na rede inicial, que eram de 0,2400 mm e 0,9126 m. Isso reafirma a qualidade dos modelos testados. O Apêndice C apresenta as cargas de pressão calculadas para cada método, em todas as calibrações de rugosidade da Rede Heller-Pádua.

4.2.2 Calibrações das rugosidades absolutas na Rede Porto

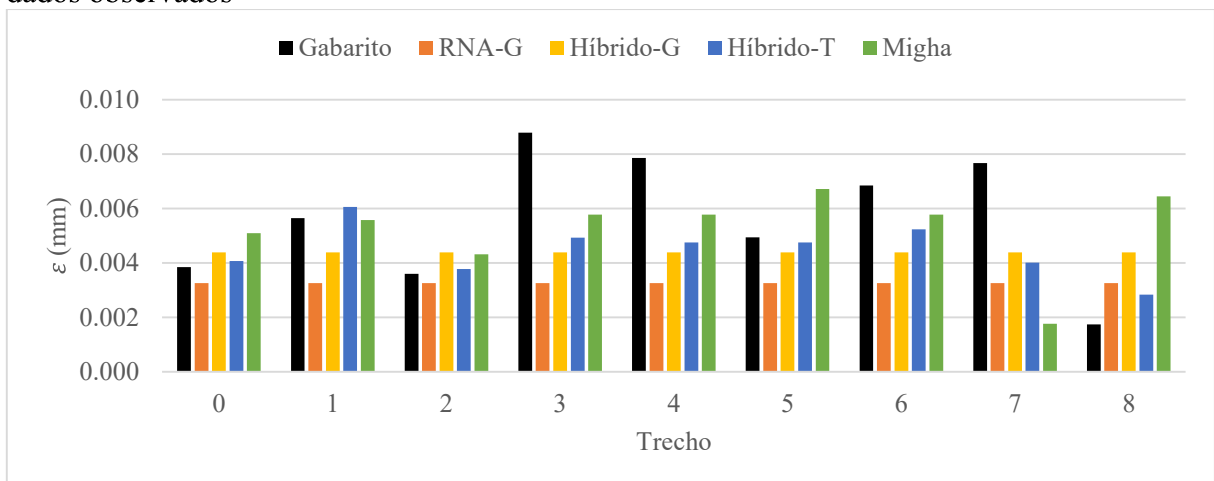
Os resultados obtidos para as rugosidades absolutas nas calibrações da Rede Porto estão sintetizados nos Gráficos 6, 7 e 8. De forma semelhante à apresentação dos resultados para a Rede Heller-Pádua, cada gráfico apresenta as rugosidades absolutas calculadas pelos diferentes métodos para cada cenário, variando o número de dados observados.

Gráfico 6 – Rugosidades absolutas calculadas pelas calibrações da Rede Porto empregando um dado observado



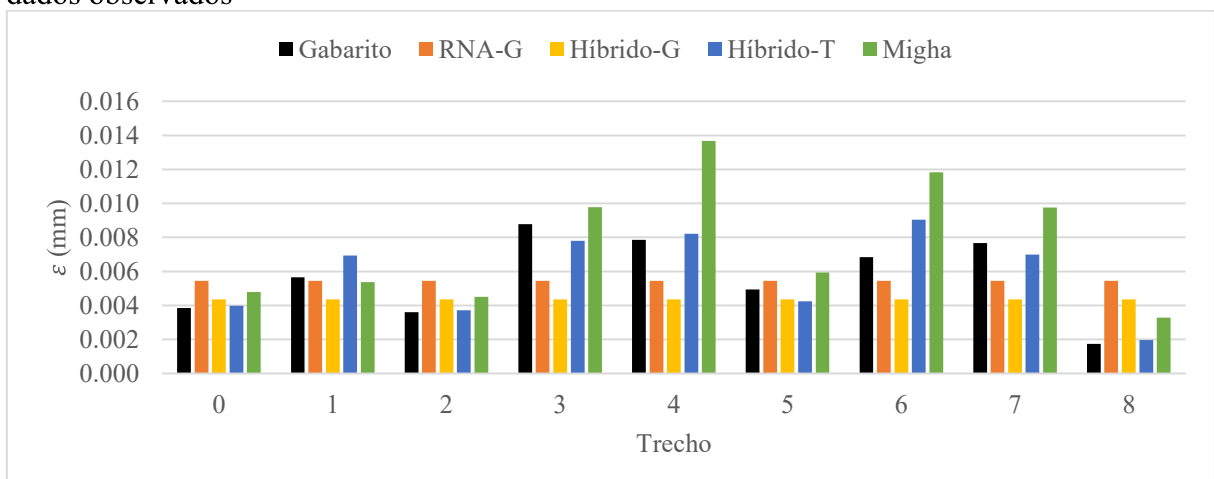
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 7 – Rugosidades absolutas calculadas pelas calibrações da Rede Porto empregando três dados observados



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 8 – Rugosidades absolutas calculadas pelas calibrações da Rede Porto empregando sete dados observados



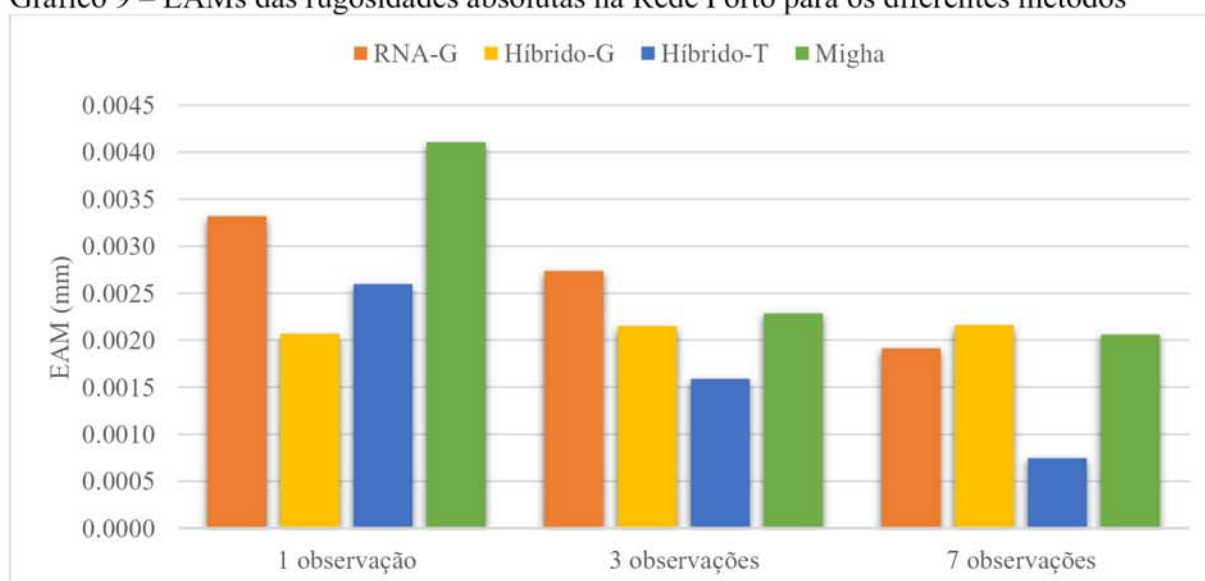
Fonte: Elaborado pelo autor.

Nos Gráficos 6, 7 e 8, os resultados do RNA-T foram intencionalmente omitidos para não prejudicar a visualização das demais respostas. Isso se deve ao fato de que este método apresentou um desempenho significativamente inferior aos outros, calculando valores que excediam 0,3000 mm para alguns trechos, mesmo no cenário com mais dados observados. Esses valores estão muito distantes do gabarito. Isso evidencia a dificuldade que um PMC enfrenta ao tentar abstrair muitos resultados, como no caso do RNA-T, que calcula nove valores de rugosidade para os nove trechos da RDA. Em contraste, o RNA-G, que também utiliza uma RNA, mas com apenas uma saída, demonstrou um desempenho muito superior.

Por sua vez, o Híbrido-T, que também calcula nove valores de rugosidade, apresentou os melhores resultados para a Rede Porto. Esse desempenho superior pode ser atribuído ao fato de que este método híbrido utiliza o MIGHA antes da RNA, delimitando assim a faixa de variação das rugosidades absolutas usadas na geração do banco de dados para o treinamento e teste do PMC. Isso sugere que a definição precisa dessa faixa de variação é crucial e pode permitir um cálculo mais preciso dos parâmetros calibrados.

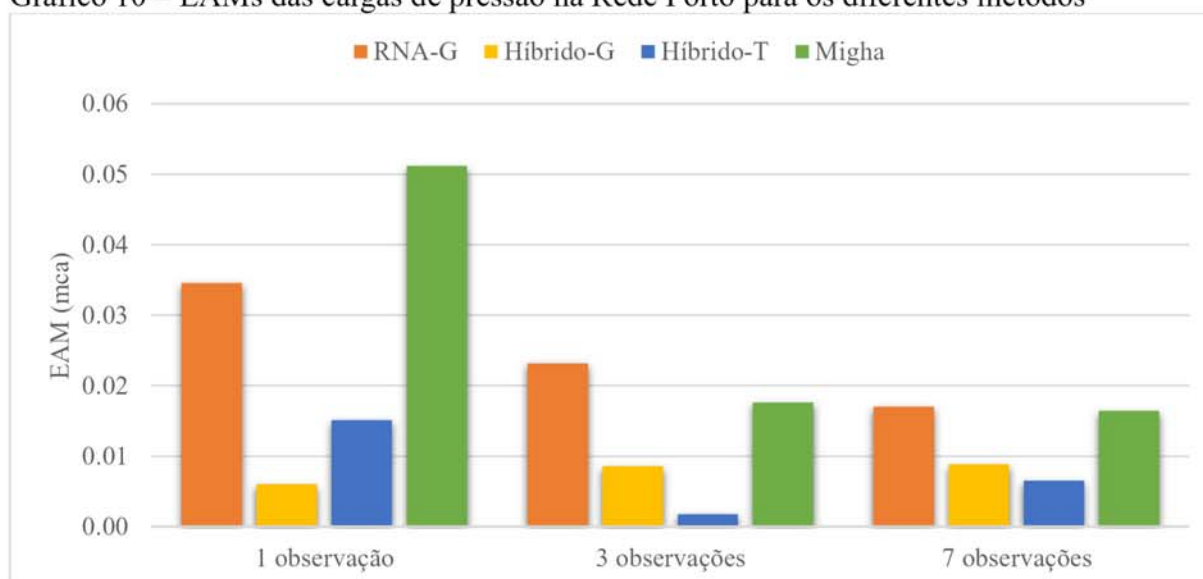
Os Gráficos 9, 10 e 11 exibem os Erros Absolutos Médios EAMs para as rugosidades absolutas, cargas de pressão e vazões resultantes das calibrações da Rede Porto, realizadas pelos diferentes métodos. Semelhante aos gráficos anteriores, os resultados do RNA-T foram intencionalmente omitidos para facilitar a visualização dos resultados dos demais métodos.

Gráfico 9 – EAMs das rugosidades absolutas na Rede Porto para os diferentes métodos



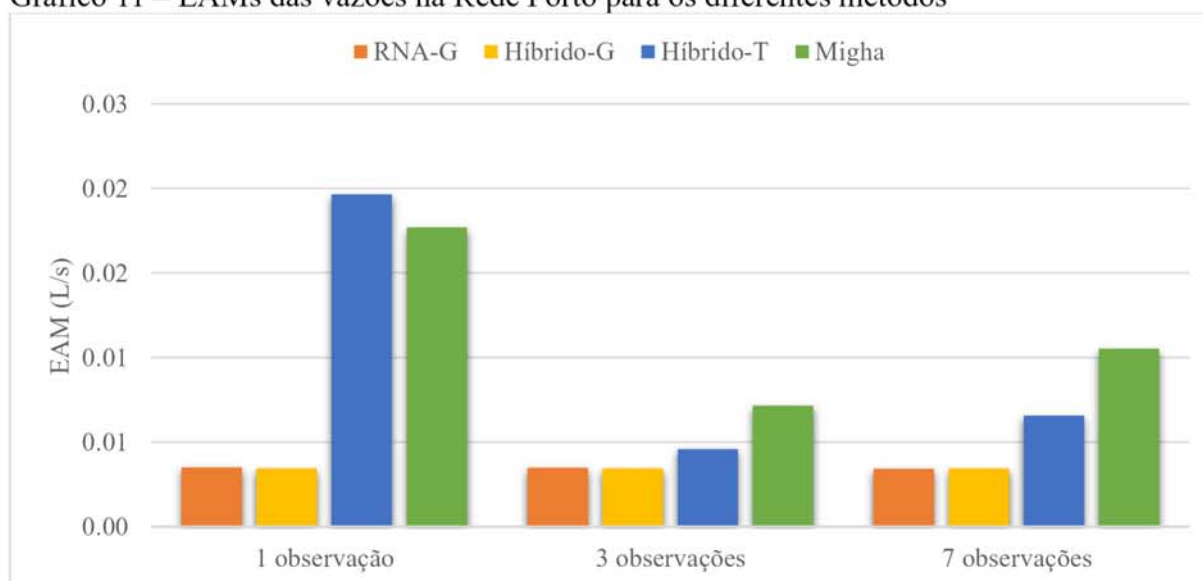
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 10 – EAMs das cargas de pressão na Rede Porto para os diferentes métodos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 11 – EAMs das vazões na Rede Porto para os diferentes métodos



Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise dos Gráficos 9, 10 e 11 indica que a ampliação do número de dados observados tende a aprimorar as calibrações. Ao examinar os resultados para as rugosidades absolutas e cargas de pressão, verifica-se que os métodos Híbrido-G e Híbrido-T apresentam os melhores desempenhos, corroborando a eficácia da metodologia híbrida. Por sua vez, para o RNA-G e o Híbrido-G, o aumento do número de dados observados não resultou em uma redução significativa dos erros. Isso se deve à limitação desses métodos, que calculam apenas um único valor de rugosidade para o grupo de tubulações. Como na Rede Porto existe uma variação na rugosidade dentro do grupo, esses modelos conseguem apenas se aproximar até

certo ponto da rede gabarito, calculando um valor intermediário para o parâmetro em todos os trechos.

Outro ponto a se destacar é a presença de valores mais elevados de EAMs para as vazões no Híbrido-T e no MIGHA. Acredita-se que isso possa ser atribuído ao uso de reservatórios fictícios pelo MIGHA, que podem introduzir pequenas vazões no modelo durante a fixação das cargas de pressão observadas. No entanto, esse problema não parece ter impactado as vazões do Híbrido-G, que apresentou erros baixos para essa variável de estado.

Antes das calibrações, a rede inicial apresentava EAMs de 0,0043 mm, 0,0944 mca e 0,0047 L/s para as rugosidades absolutas, cargas de pressão e vazões, respectivamente. Todas as calibrações realizadas na Rede Porto conseguiram reduzir esses erros, com exceção das que utilizaram o RNA-T e, em alguns cenários, os resultados das vazões para Híbrido-T e para o MIGHA. Apesar dos erros iniciais já serem baixos, a maioria das calibrações conseguiu reduzi-los ainda mais. Isso é um indicativo de que as metodologias testadas são promissoras.

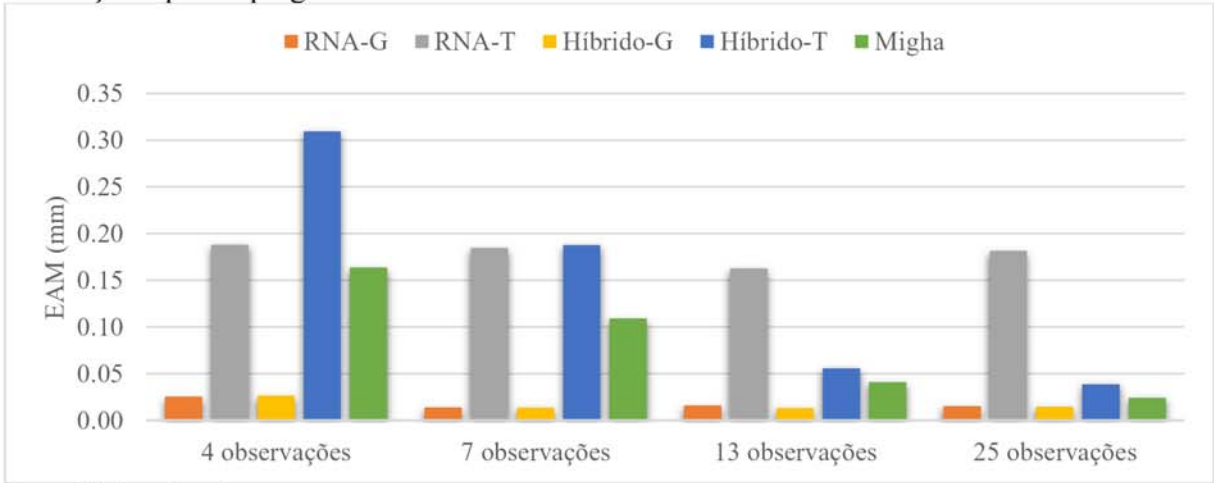
O Apêndice D apresenta as cargas de pressão e vazões calculadas para cada método, em todas as calibrações de rugosidade da Rede Porto.

4.2.3 Calibrações das rugosidades absolutas na Rede Sousa

As calibrações da Rede Sousa foram realizadas levando em conta duas situações distintas para os diferentes cenários de dados observados. Inicialmente, apenas os valores de carga de pressão medidos na hora 52 foram utilizados como entrada nos modelos, correspondendo aos nós listados na Tabela 11. Posteriormente, as calibrações foram executadas para os diferentes cenários e métodos, utilizando dados tanto da hora 52 quanto da hora 60.

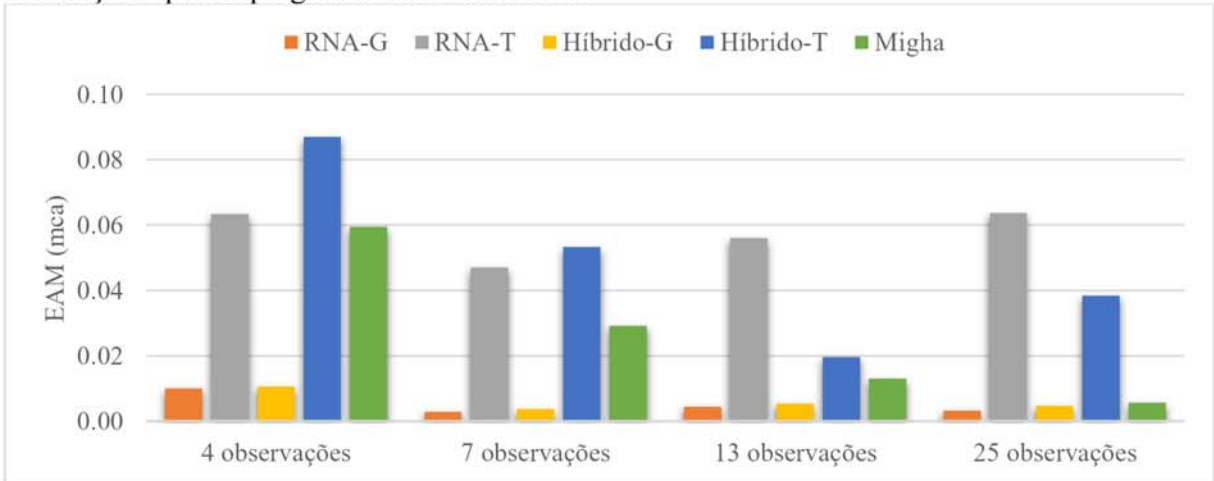
Os Gráficos 12, 13 e 14 apresentam os EAMs para as rugosidades absolutas, cargas de pressão e vazões, respectivamente, obtidos nas calibrações que utilizaram exclusivamente os dados da hora 52. Para efeito de comparação com a rede gabarito, foram consideradas as cargas de pressão e vazões retornadas pelas simulações das redes para a hora 70. Os valores calculados para esses parâmetros e variáveis de estado em cada calibração estão detalhados nos Apêndices E e F, apresentados na forma de tabelas. A opção por essa forma de apresentação se deve à grande discrepância nos resultados retornados pelos diferentes métodos, o que inviabilizou a representação conjunta em um único gráfico.

Gráfico 12 – EAMs das rugosidades absolutas na Rede Sousa para os diferentes métodos, nas calibrações que empregaram dados da hora 52



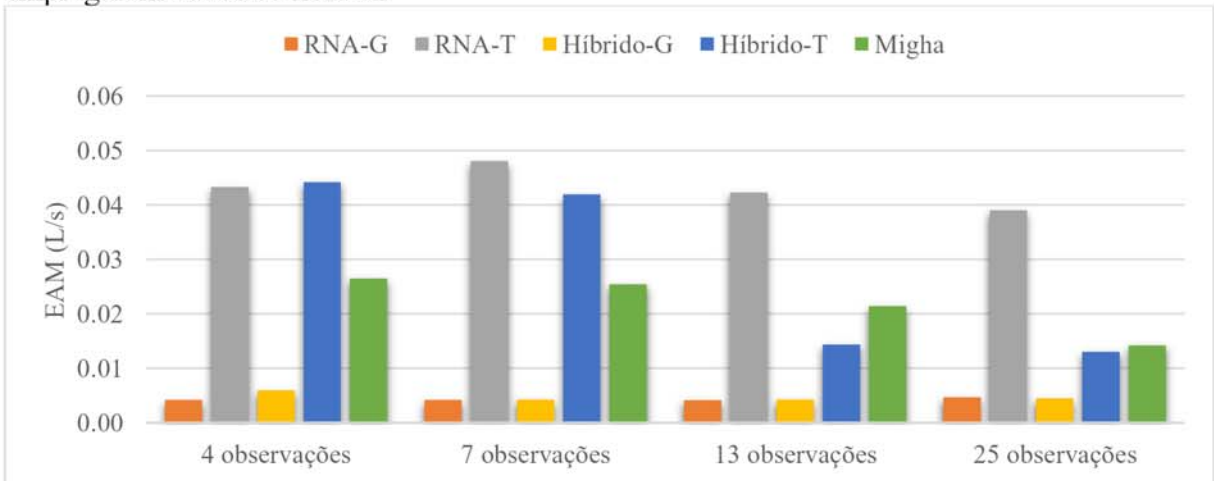
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 13 – EAMs das cargas de pressão na Rede Sousa para os diferentes métodos, nas calibrações que empregaram dados da hora 52



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 14 – EAMs das vazões na Rede Sousa para os diferentes métodos, nas calibrações que empregaram dados da hora 52



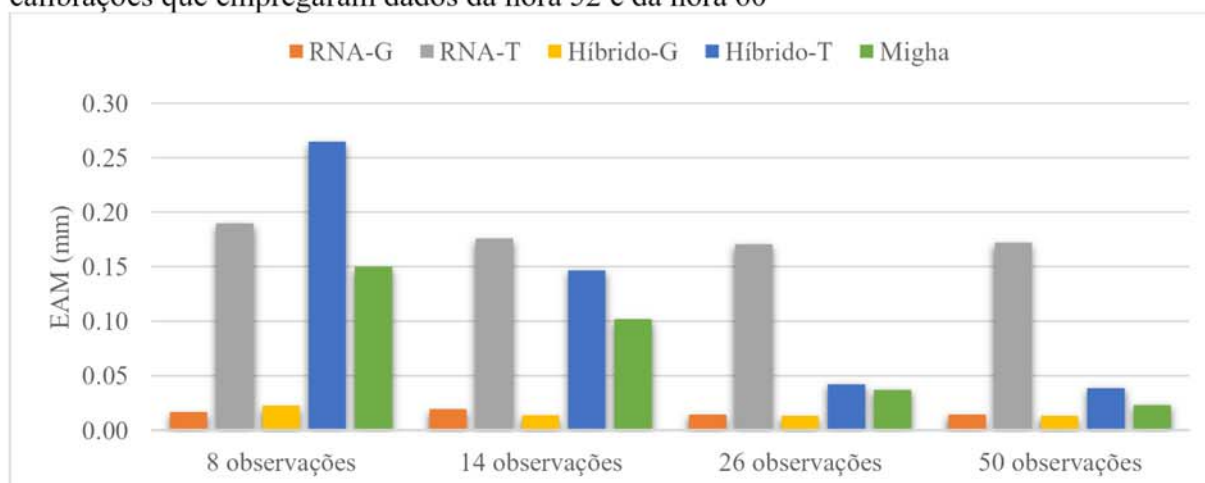
Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise dos Gráficos 12, 13 e 14 revela que o RNA-G e o Híbrido-G superaram os demais métodos em todos os cenários de dados observados, em todas as comparações, com destaque para o Híbrido-G no cenário com 13 observações, que reduziu o EAM das rugosidades absolutas para apenas 0,0134 mm. Nota-se que o RNA-T não conseguiu aprimorar seus resultados, mesmo com o aumento progressivo do número de observações. Isso sugere que as RNAs podem enfrentar desafios ao tentar inferir um grande número de saídas. No caso do RNA-T e do Híbrido-T, os PMCs têm 85 saídas, correspondendo a cada um dos trechos da Rede Sousa. Isso contrasta com os métodos RNA-G e Híbrido-G, que calculam apenas dois valores de rugosidade: um para as tubulações de ferro fundido e outro para os tubos de PVC.

Observa-se também que, em contraste com o RNA-T, o Híbrido-T consegue melhorar seu desempenho à medida que o número de dados observados aumenta. Isso pode ser atribuído ao fato de que este método híbrido depende dos resultados obtidos pelo MIGHA para estabelecer a faixa de variação da rugosidade nos dados de treinamento e teste do PMC. Conforme evidenciado nos Gráficos 12, 13 e 14, o MIGHA apresenta uma melhoria nos resultados à medida que o número de observações aumenta, o que consequentemente resulta em uma melhoria do desempenho Híbrido-T.

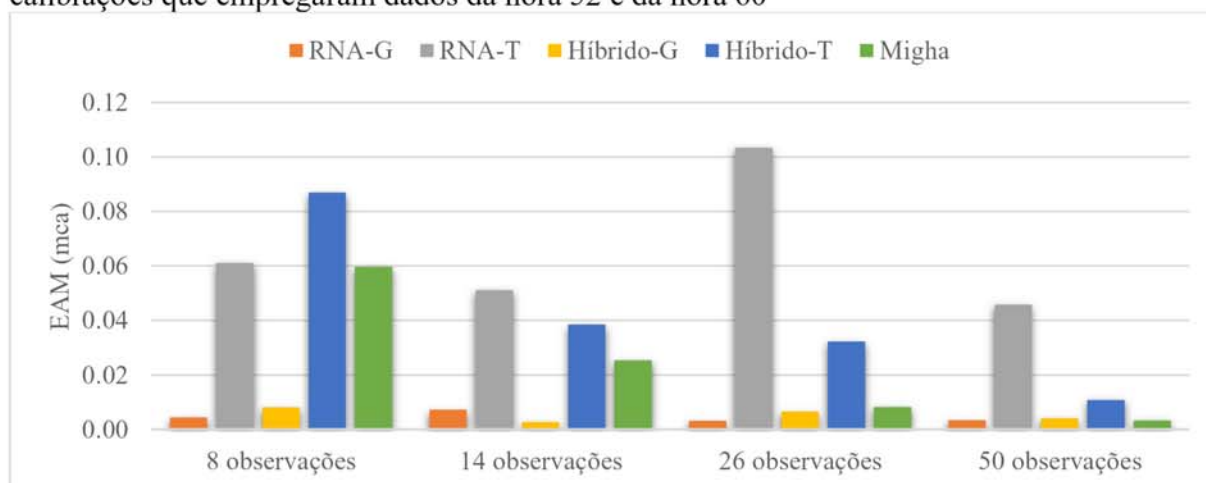
Os Gráficos 15, 16 e 17 representam os EAMs para as rugosidades absolutas, cargas de pressão e vazões, respectivamente, obtidos nas calibrações que utilizaram os dados da hora 52 e da hora 60. Os valores calculados para os parâmetros e variáveis de estado em cada calibração estão detalhados nos Apêndices G e H, apresentados na forma de tabelas.

Gráfico 15 – EAMs das rugosidades absolutas na Rede Sousa para os diferentes métodos, nas calibrações que empregaram dados da hora 52 e da hora 60



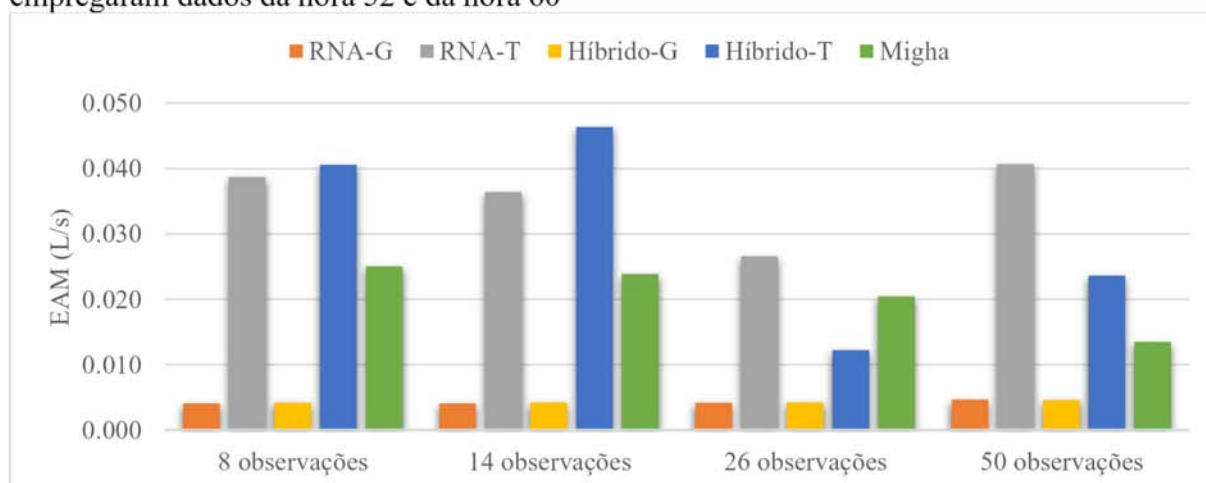
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 16 – EAMs das cargas de pressão na Rede Sousa para os diferentes métodos, nas calibrações que empregaram dados da hora 52 e da hora 60



Fonte: Elaborado pelo autor.

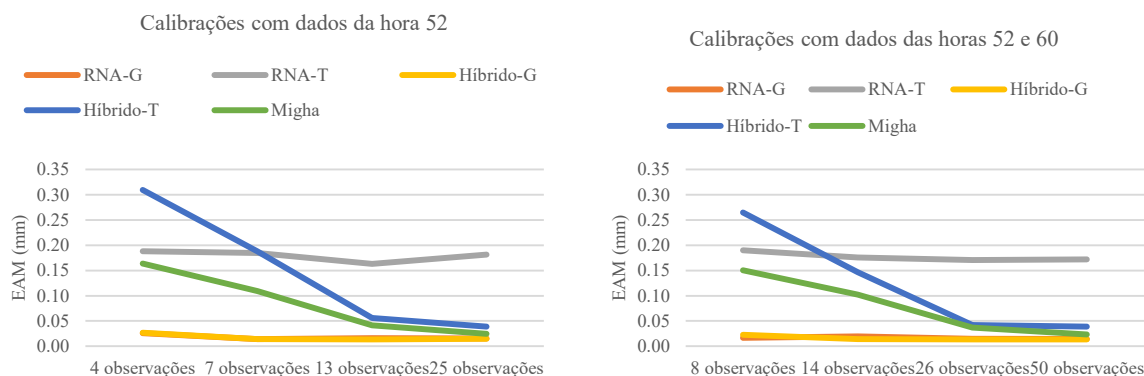
Gráfico 17 – EAMs das vazões na Rede Sousa para os diferentes métodos, nas calibrações que empregaram dados da hora 52 e da hora 60



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os Gráficos 15, 16 e 17 demonstram que os métodos, ao utilizar dados das horas 52 e 60, exibiram um comportamento semelhante aos cenários que utilizaram somente observações da hora 52. Assim, o RNA-G e o Híbrido-G continuaram a apresentar os melhores resultados, com EAMs menores tanto para as rugosidades absolutas quanto para as cargas de pressão e vazões calculadas. Contudo, é importante notar que a performance dos métodos não sofreu alterações significativas com o aumento do número de observações, conforme comparado com os testes que empregaram apenas dados da hora 52, evidenciado no Gráfico 18.

Gráfico 18 – Comparação entre os EAMs das rugosidades absolutas obtidos pelas calibrações com dados da hora 52 e dados das horas 52 e 60



Fonte: Elaborado pelo autor

A análise do Gráfico 18 indica que o aumento na quantidade de dados observados nos mesmos nós não tem um impacto significativo nos resultados das calibrações. A diferença mais notável ocorreu no Híbrido-T, especialmente ao comparar os cenários com 4 e 8 observações. Ainda assim, essa análise reforça a ideia de que, para a calibração, é mais benéfico coletar dados de diferentes nós do que obter mais informações do mesmo nó em diferentes horários.

Antes de qualquer calibração, a configuração inicial da Rede Sousa apresentava EAMs de 0,0857 mm, 0,2725 mca e 0,0215 L/s para as rugosidades absolutas, cargas de pressão e vazões, respectivamente. No que diz respeito às rugosidades absolutas calculadas nas calibrações, o RNA-G e o Híbrido-G foram os únicos que conseguiram reduzir significativamente esse erro em todos os cenários. Esses métodos também se destacaram nos resultados retornados para as vazões. Em relação aos EAMs das cargas de pressão, todas as calibrações realizadas conseguiram reduzir os erros para um valor abaixo de 0,1100 mca, demonstrando a eficácia desses métodos em produzir valores precisos para essa variável.

4.2.4 Resumo das calibrações das rugosidades absolutas

A Tabela 12 oferece um resumo simplificado dos resultados obtidos para as calibrações das rugosidades absolutas, permitindo uma visualização clara dos métodos que apresentaram os melhores e piores resultados em cada um dos 14 cenários de dados observados. Esses incluem 3 da Rede Heller-Pádua, 3 da Rede Porto e 8 da Rede Sousa. Pode-se observar que a soma dos valores em cada coluna da tabela é 14, representando o total de cenários com

diferença no número de observações. A única exceção é para as colunas das vazões, uma vez que essa variável não foi analisada na Rede Heller-Pádua, conforme mencionado anteriormente.

Tabela 12 – Resumo das calibrações das rugosidades absolutas

Método	Nº de cenários em que foi o melhor			Nº de cenários em que foi o pior		
	Rugosidades	Pressões	Vazões	Rugosidades	Pressões	Vazões
RNA-G	3x	7x	7x	0	0	0
RNA-T	0	0	0	9x	9x	8x
Híbrido-G	9x	4x	4x	0	0	0
Híbrido-T	2x	2x	0	4x	5x	3x
MIGHA	0	1x	0	1x	0	0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme observado na Tabela 12, os métodos RNA-G e Híbrido-G se sobressaíram, demonstrando ter a melhor performance na maioria dos testes para o parâmetro e as variáveis analisadas. Esses métodos compartilham a característica comum de utilizar a rotina de calibração por grupo. Isso reforça a ideia de que inferir um valor de rugosidade distinto para cada trecho representa um desafio para o modelo. No entanto, esse desafio pode ser atenuado ao calcular um único valor deste parâmetro para um grupo de tubulações com características semelhantes, como material e idade.

Um aspecto importante a ser destacado é a relevância da faixa de variação das rugosidades absolutas utilizada na geração dos dados de treinamento e teste da RNA. Embora a aplicação do MIGHA no método híbrido, que tem como objetivo delimitar essa faixa, não tenha influenciado significativamente os resultados ao comparar o RNA-G e o Híbrido-G, a situação é diferente ao comparar o RNA-T e o Híbrido-T, que calculam o parâmetro por trecho. Observa-se que, no modelo híbrido, os resultados foram superiores, apresentando até mesmo os menores erros absolutos em dois cenários da Rede Porto, que é caracterizada por ser uma rede de pequeno porte e por apresentar rugosidades absolutas que variam levemente entre suas tubulações. Isso sugere que a rotina híbrida, ou uma delimitação manual mais precisa da faixa de variação, é crucial quando se trata de calibrações realizadas trecho a trecho.

Uma observação relevante sobre essas calibrações diz respeito à discrepância na quantidade de épocas necessárias para atingir o desempenho máximo nos diversos modelos. A aplicação da rotina *Early Stopping* nas RNAs demandava cerca de 370 épocas para atingir a configuração ótima nos métodos RNA-G e Híbrido-G, que adotavam a calibração por grupos.

Em contrapartida, no RNA-T e no Híbrido-T, a época mais eficaz se encontrava, em média, nas 20 primeiras. Dada a performance inferior do RNA-T e do Híbrido-T, isso sugere que esses métodos podem ser excessivamente complexos, e que por isso a rotina enfrenta desafios para aprimorar seu desempenho ao longo das épocas. Uma outra explicação plausível pode estar relacionada à taxa de aprendizado, que pode estar excessivamente alta, induzindo oscilações em torno de um ponto ótimo, ou demasiadamente baixa, resultando na estagnação desses modelos em mínimos locais.

Na Rede Heller-Pádua, o *software* desenvolvido levou, em média, 420 segundos para realizar as calibrações que utilizaram exclusivamente uma RNA, 430 segundos para os métodos híbridos e 6 segundos para o MIGHA. Na Rede Porto, o tempo de processamento foi de aproximadamente 170 segundos para os métodos que utilizaram exclusivamente RNA, 180 segundos para os métodos híbridos e 4 segundos para o MIGHA. Na Rede Sousa, com exceção do MIGHA, que teve um tempo de processamento médio de 14 segundos, as calibrações duraram cerca de 610 segundos. Os testes foram realizados em um computador equipado com um processador Intel Core i5 de nona geração e 8 GB de RAM. Foi observado um pequeno aumento no tempo de processamento dos modelos com RNA quando as calibrações do tipo trecho a trecho eram escolhidas, pois isso aumentava o número de saídas do modelo. De maneira semelhante, o uso de um número maior de dados observados também resultava em um pequeno incremento na duração da calibração. No entanto, esses aumentos não foram considerados significativos.

4.2.5 Calibrações das rugosidades absolutas com Algoritmos Genéticos

Para uma análise adicional dos resultados obtidos e com o intuito de verificar a capacidade da metodologia proposta de superar outras abordagens presentes na literatura, foram comparadas as soluções alcançadas pela aplicação do Híbrido-G, método que apresentou a melhor performance na calibração das rugosidades absolutas, com os resultados gerados por um algoritmo baseado em Algoritmos Genéticos (AG). Esse método AG foi implementado com características semelhantes às utilizadas em estudos anteriores, como os de Silva (2003) e Santos (2010), aplicando os parâmetros especificados na Tabela 13. Dessa forma, buscou-se avaliar a robustez do Híbrido-G ao confrontá-lo diretamente com um método bem estabelecido, garantindo uma análise mais abrangente e uma comparação detalhada da eficácia dos métodos testados.

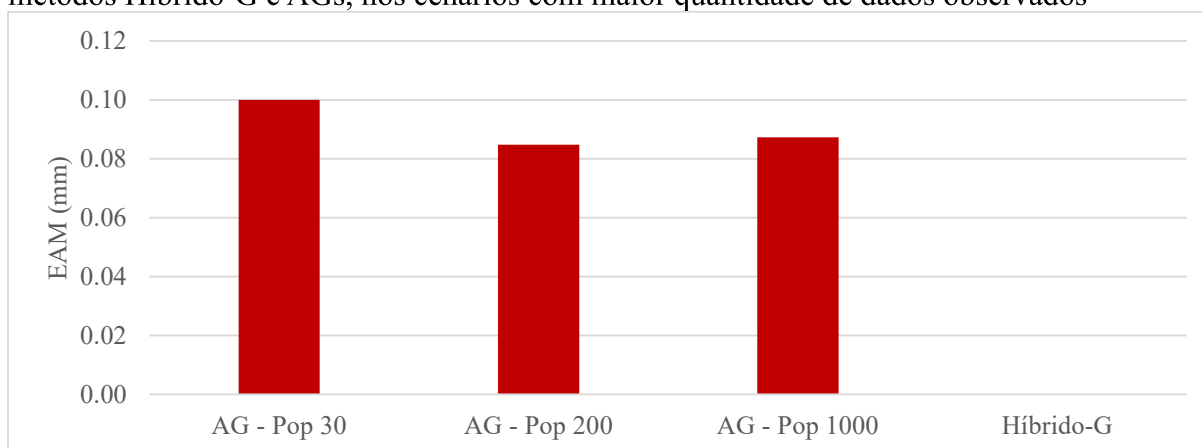
Tabela 13 – Parâmetros dos AGs adotados nas calibrações

População	Número de gerações	Seleção	% Cruzamento
30-200-1000	1000	Método da Roleta	100%
Tipo de cruzamento	% Mutação	Tipo de Mutação	Taxa de Elitismo
2 pontos de corte	1%	Gaussiana	0,166667

Fonte: Adaptado de Silva (2003) e Santos (2010).

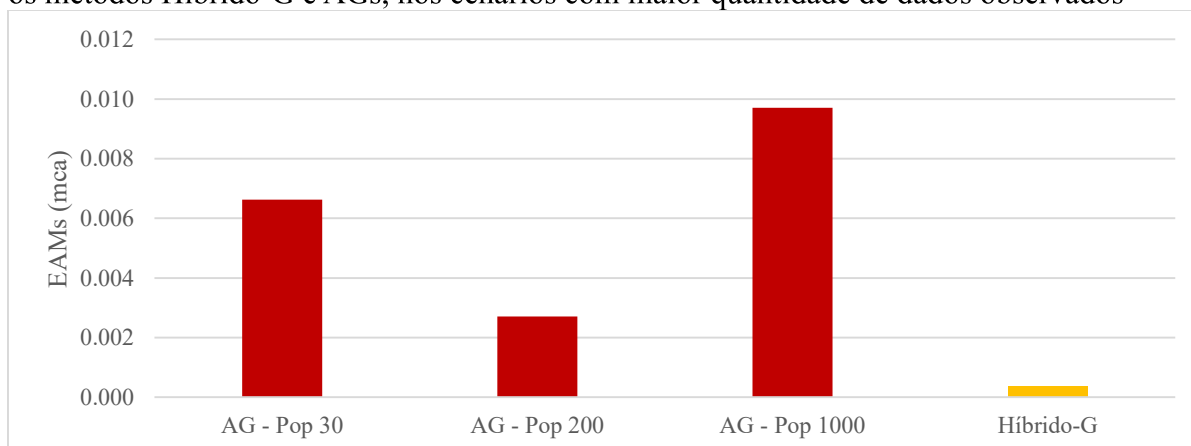
Os testes com AGs foram conduzidos nas três redes fictícias utilizadas neste estudo, considerando os cenários com a maior quantidade de dados observados. Conforme indicado na Tabela 13, diferentes tamanhos de população foram testados, incluindo 30, 200 e 1000 indivíduos. Na geração das populações iniciais, foram mantidas as mesmas faixas de variação utilizadas nas rotinas de calibração baseadas exclusivamente em RNAs. Com base nesses testes, os Gráficos 19 a 26 comparam os EAMs calculados pelos métodos Híbrido-G e os que utilizam AGs.

Gráfico 19 – Comparação dos EAMs das rugosidades na Rede Heller-Pádua, utilizando os métodos Híbrido-G e AGs, nos cenários com maior quantidade de dados observados



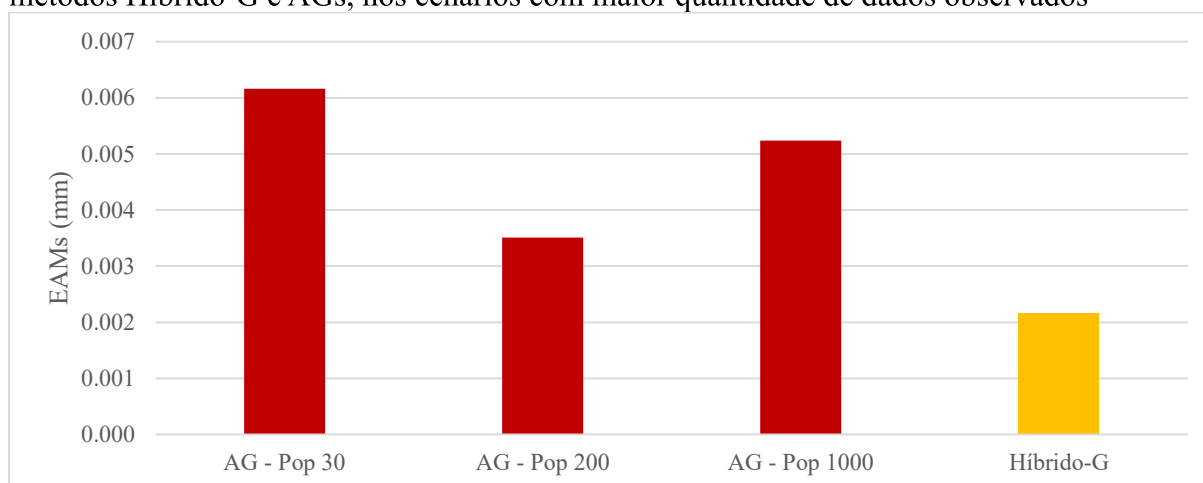
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 20 – Comparação dos EAMs das cargas de pressão na Rede Heller-Pádua, utilizando os métodos Híbrido-G e AGs, nos cenários com maior quantidade de dados observados



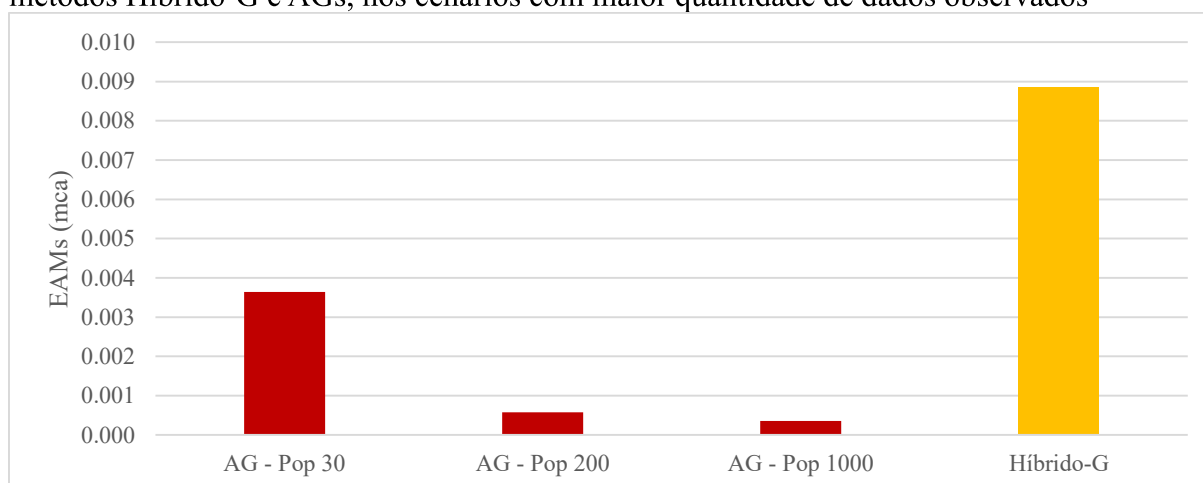
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 21 – Comparação dos EAMs das rugosidades absolutas na Rede Porto, utilizando os métodos Híbrido-G e AGs, nos cenários com maior quantidade de dados observados



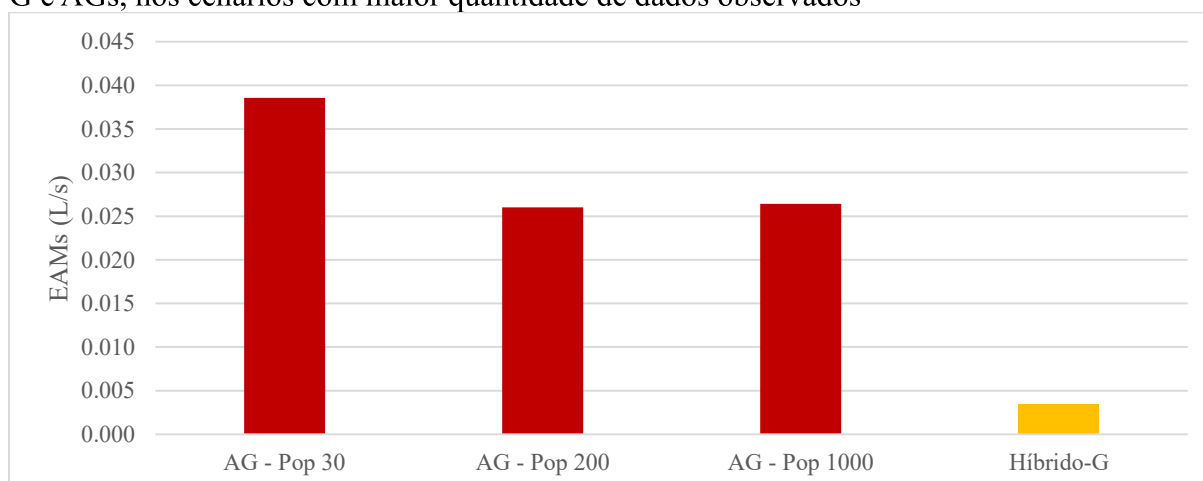
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 22 – Comparação dos EAMs das cargas de pressão na Rede Porto, utilizando os métodos Híbrido-G e AGs, nos cenários com maior quantidade de dados observados



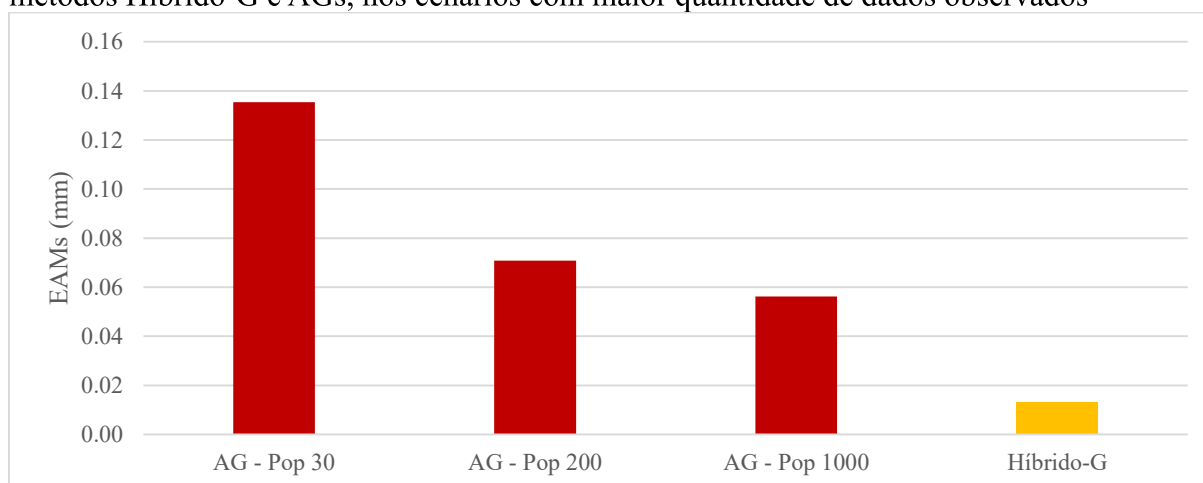
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 23 – Comparação dos EAMs das vazões na Rede Porto, utilizando os métodos Híbrido-G e AGs, nos cenários com maior quantidade de dados observados



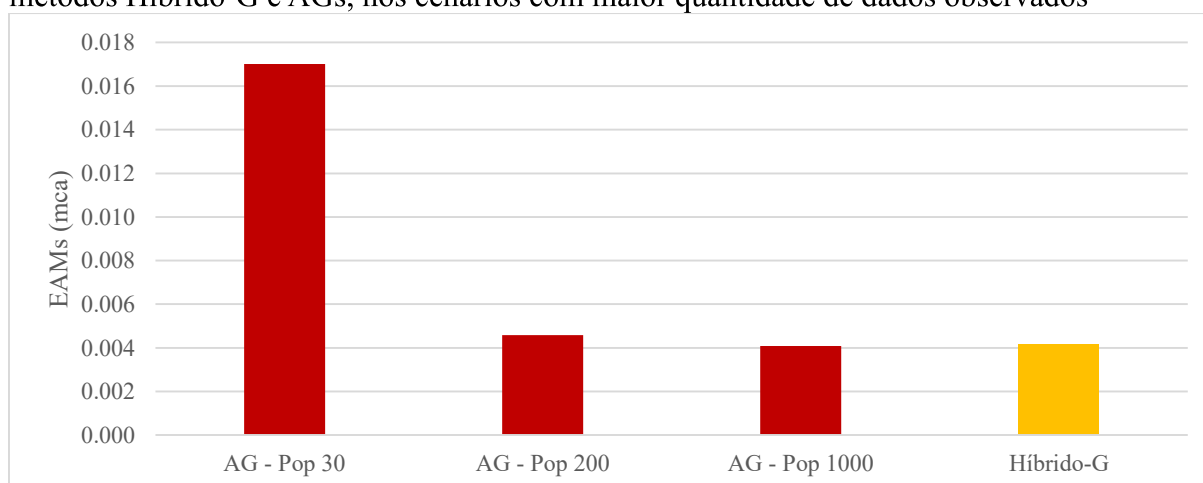
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 24 – Comparação dos EAMs das rugosidades absolutas na Rede Sousa, utilizando os métodos Híbrido-G e AGs, nos cenários com maior quantidade de dados observados



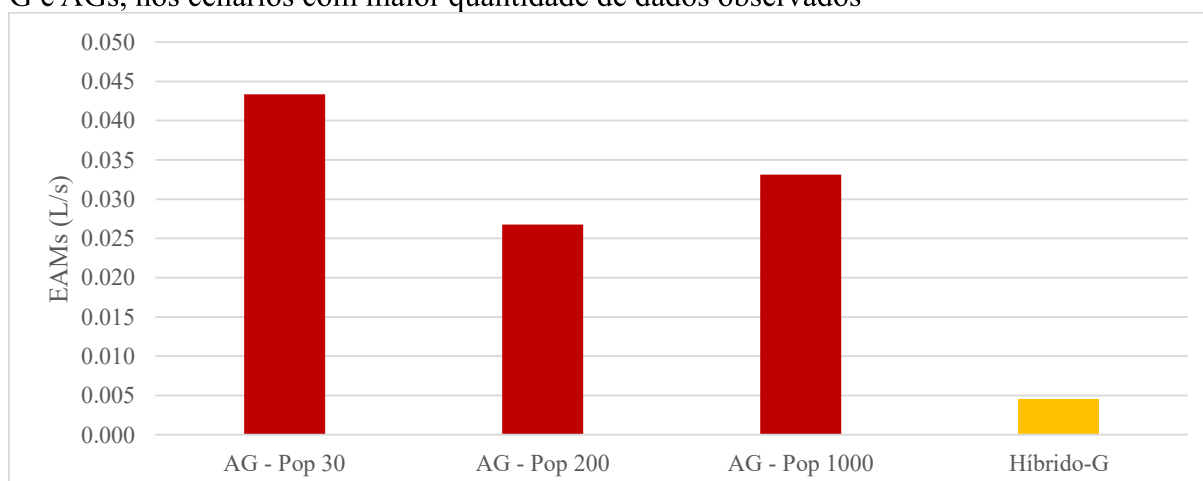
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 25 – Comparação dos EAMs das cargas de pressão na Rede Sousa, utilizando os métodos Híbrido-G e AGs, nos cenários com maior quantidade de dados observados



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 26 – Comparação dos EAMs das vazões na Rede Sousa, utilizando os métodos Híbrido-G e AGs, nos cenários com maior quantidade de dados observados



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme ilustrado nos Gráficos 19 a 26, o método Híbrido-G apresentou resultados consistentemente superiores às abordagens com AGs, gerando menores erros para as rugosidades absolutas, cargas de pressão e vazões na maioria dos cenários testados. A única exceção foi observada no Gráfico 22, onde o método proposto foi superado nas pressões calculadas para a Rede Porto. No entanto, para esse cenário, todos os métodos testados apresentaram erros na terceira casa decimal, o que destaca que, apesar de superado, o Híbrido-G também retornou resultados bastante precisos para essa variável.

Outra observação relevante é que o aumento do tamanho da população nos testes com AGs resultou em uma melhora nos resultados ao passar de 30 para 200 indivíduos. No entanto, esse padrão de melhoria não se repetiu quando o tamanho da população foi ampliado de 200 para 1000, sugerindo que o método atinge um ponto de estabilidade, onde um aumento adicional nesse parâmetro não necessariamente traz benefícios significativos aos resultados.

Apesar da performance inferior ao Híbrido-G, os resultados obtidos pelos AGs demonstram seu valor, superando, em diversos cenários, os métodos de calibração trecho a trecho testados e apresentando uma performance compatível com a do método MIGHA. No entanto, uma limitação significativa dos AGs é a sua alta demanda computacional. Na Rede Sousa, por exemplo, o teste com uma população de 1000 indivíduos exigiu cerca de seis horas de processamento, enquanto o MIGHA executou a calibração em aproximadamente 30 segundos no cenário com mais dados observados. Essa diferença ressalta a eficiência computacional do MIGHA frente aos AGs, especialmente em redes de maior porte.

Os resultados obtidos para as rugosidades absolutas, assim como os valores de carga de pressão e vazões calculados nas calibrações com AGs para as três redes, estão apresentados nos Apêndices I, J e K.

4.3 Calibrações dos kws

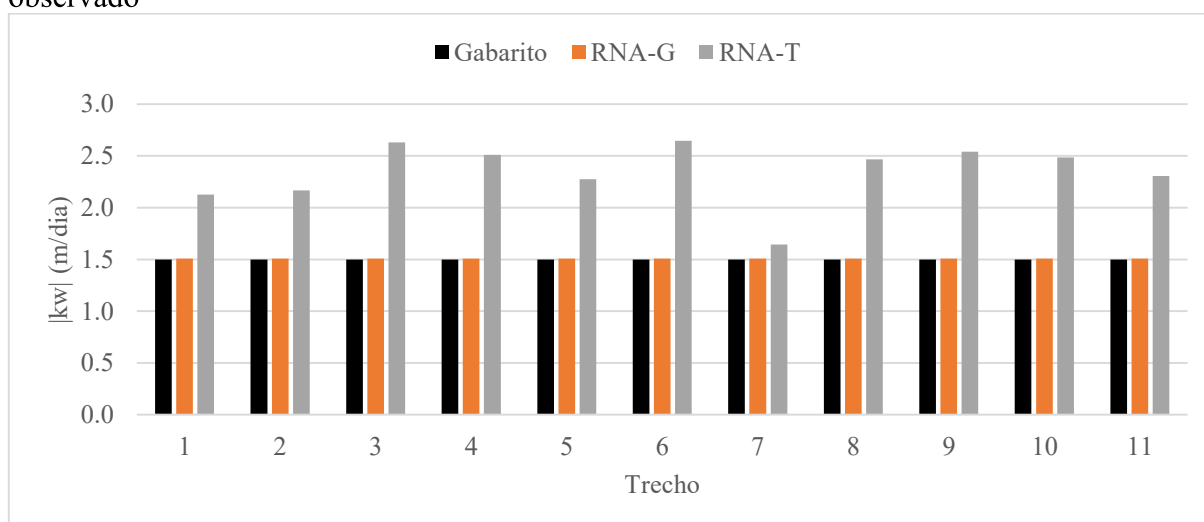
Nesta seção, são detalhados os resultados das calibrações dos coeficientes kws para as redes Heller-Pádua, Porto e Sousa, obtidos em diferentes cenários que variam na quantidade de dados observados. Para essas calibrações, apenas os métodos RNA-G e RNA-T foram aplicados, pelas razões previamente mencionadas. Vale destacar que, para os testes realizados, as redes foram consideradas hidraulicamente calibradas, com os valores corretos de rugosidades absolutas já atribuídos aos respectivos trechos. De maneira similar ao que foi feito nas calibrações das rugosidades absolutas, ao final da seção, são apresentadas comparações entre o

método desenvolvido que obteve melhor desempenho e os resultados gerados com o uso de Algoritmos Genéticos, proporcionando uma análise mais abrangente.

4.3.1 Calibrações dos kws na Rede Heller-Pádua

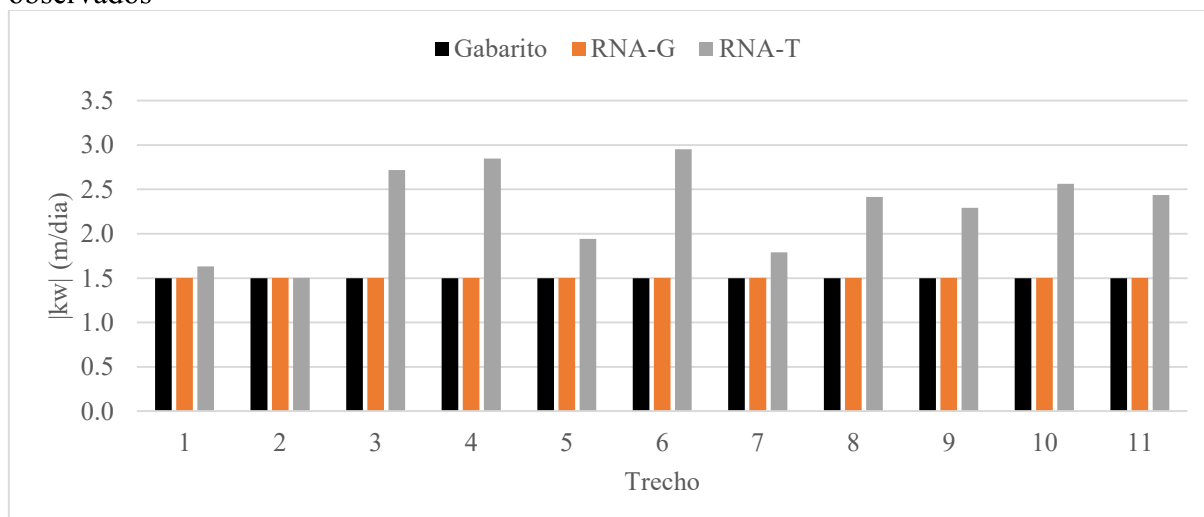
Os resultados obtidos para os kws nas calibrações da Rede Heller-Pádua encontram-se resumidos nos Gráficos 27, 28 e 29. Esses resultados emergem de três cenários distintos, cada um com uma quantidade diferente de dados observados de concentração de cloro residual. Em cada cenário, os métodos RNA-G e RNA-T foram testados, conforme as Tabelas 10 e 11.

Gráfico 27 – Kws calculados pelas calibrações da Rede Heller-Pádua empregando um dado observado



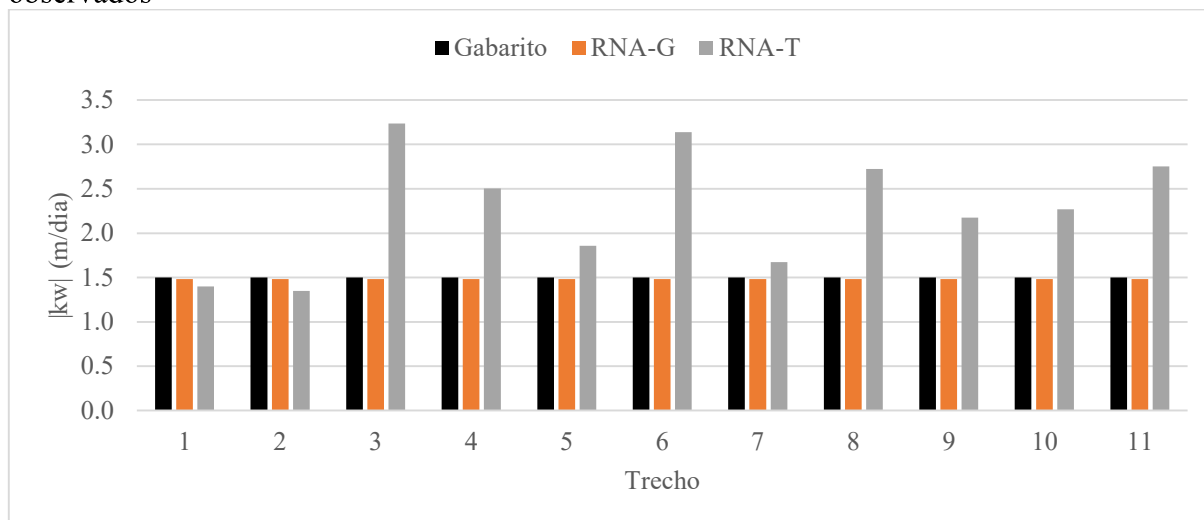
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 28 – Kws calculados pelas calibrações da Rede Heller-Pádua empregando três dados observados



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 29 – Kws calculados pelas calibrações da Rede Heller-Pádua empregando seis dados observados



Fonte: Elaborado pelo autor.

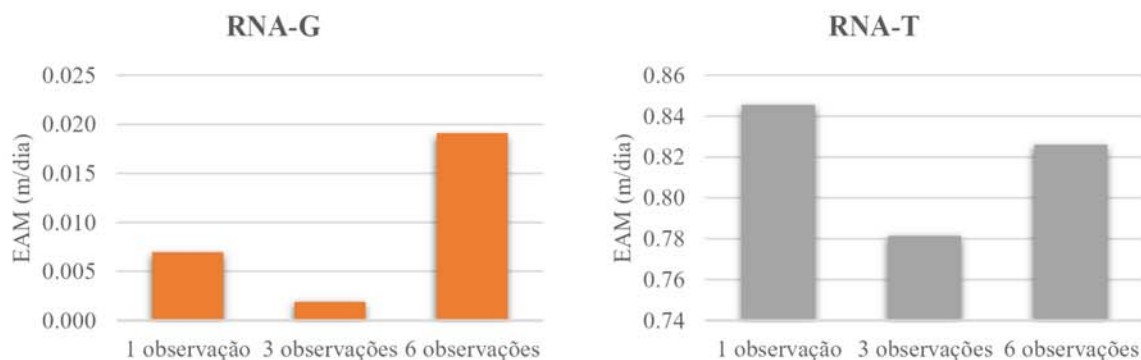
A análise dos Gráficos 27, 28 e 29 revela que o RNA-G, que emprega um PMC para determinar um valor único de kw, exibe um desempenho notável. Mesmo no cenário que utilizou apenas uma única observação, o método retornou um valor de kw de -1,5096 m/dia. Este valor está em estreita concordância com o gabarito da Rede Heller-Pádua, que é de -1,5000 m/dia. A eficácia deste método se manteve com o aumento do número de observações.

Em contraste, a análise dos gráficos mencionados indica que o RNA-T, que emprega um PMC para determinar valores distintos de kw para cada trecho, não apresentou uma melhora significativa no desempenho com o aumento do número de observações. É importante destacar que, apesar da metodologia ser semelhante à utilizada na calibração das rugosidades absolutas, este método parece ter encontrado mais dificuldades no ajuste do modelo de qualidade da água. Esta constatação é evidente ao comparar os resultados apresentados nos Gráficos 3 e 29.

Os Gráficos 30 e 31 apresentam os EAMs para os kws e para as concentrações de cloro residual retornadas pela simulação das redes calibradas. Estes gráficos reforçam a superioridade do RNA-G sobre o RNA-T, tanto em relação aos coeficientes kws calculados quanto às concentrações de cloro residual provenientes das simulações das redes calibradas. Nota-se que os erros calculados para o RNA-G não diminuem com o aumento no volume de dados observados, mas isso se deve à sua excelente performance já alcançada no cenário com apenas uma observação. Em contraste, para o RNA-T, observa-se que, embora o aumento no número de dados observados não tenha conduzido a uma melhoria substancial nos kws

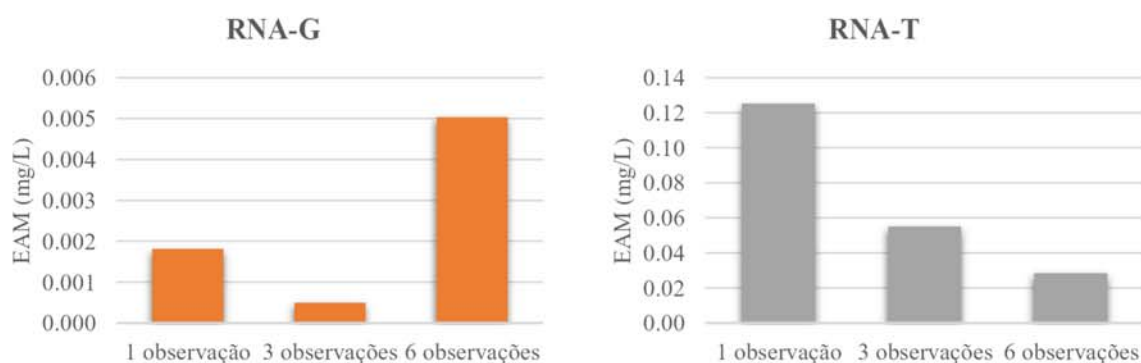
calculados, houve uma redução nos erros das concentrações de cloro residual estimadas, indicando que o acréscimo no número de observações é benéfico para o modelo.

Gráfico 30 – EAMs dos kws na Rede Heller-Pádua para os diferentes métodos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 31 – EAMs das concentrações de cloro residual na Rede Heller-Pádua para os diferentes métodos



Fonte: Elaborado pelo autor.

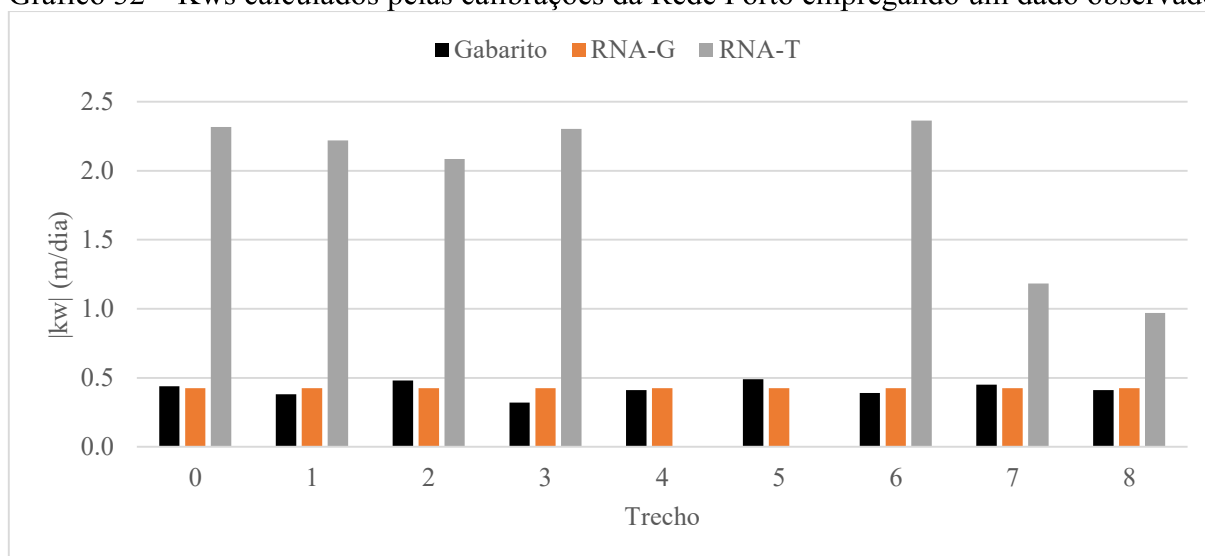
Embora a superioridade do RNA-G fosse antecipada para a Rede Heller-Pádua, devido à sua natureza uniforme para o parâmetro calibrado, o RNA-T também demonstrou eficácia ao minimizar os EAMs em comparação com a configuração inicial. Antes das calibrações, a rede exibia EAMs de 1,400 m/dia para os kws e 0,8958 mg/L para as concentrações de cloro. Estes valores são consideravelmente maiores do que os obtidos pelos modelos testados.

Os resultados obtidos para as concentrações de cloro residual em cada nó, para todas as calibrações da Rede Heller-Pádua, encontram-se no Apêndice L.

4.3.2 Calibrações dos kws na Rede Porto

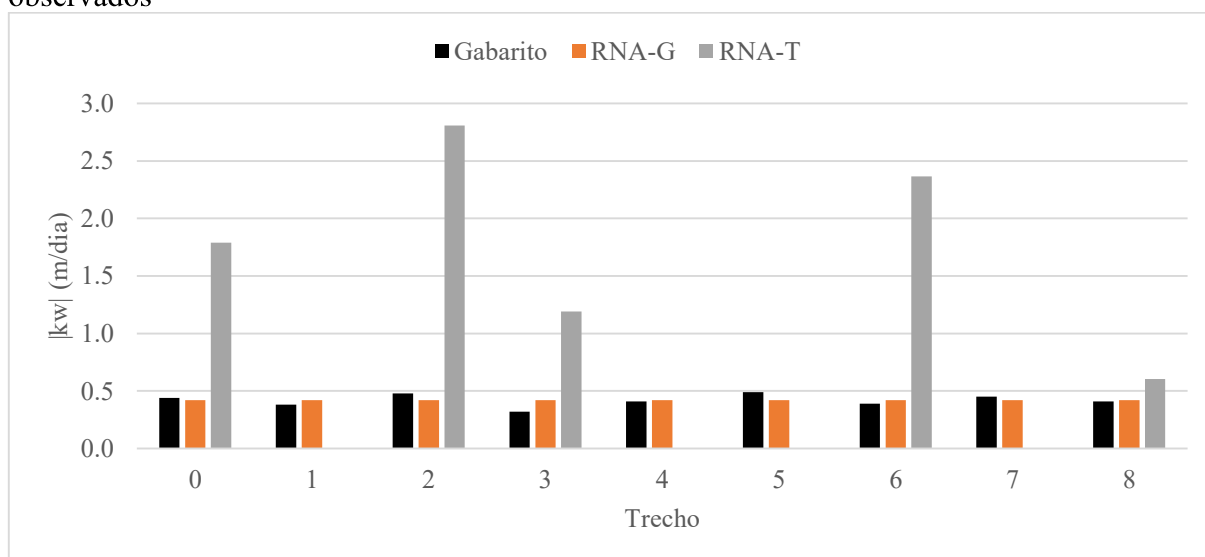
Os resultados derivados das calibrações dos coeficientes kws para a Rede Porto estão consolidados e apresentados nos Gráficos 32, 33 e 34. Analogamente à exposição dos resultados para a Rede Heller-Pádua, cada gráfico ilustra os kws adquiridos por meio dos diferentes métodos aplicados em cada cenário, com variação no número de dados observados.

Gráfico 32 – Kws calculados pelas calibrações da Rede Porto empregando um dado observado



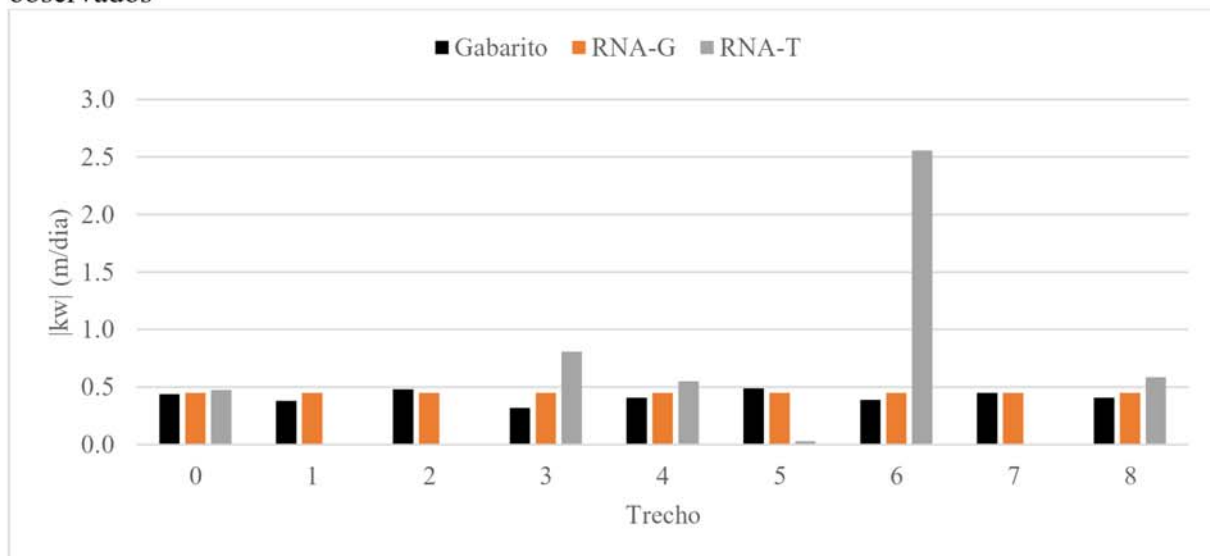
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 33 – Kws calculados pelas calibrações da Rede Porto empregando três dados observados



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 34 – Kws calculados pelas calibrações da Rede Porto empregando sete dados observados

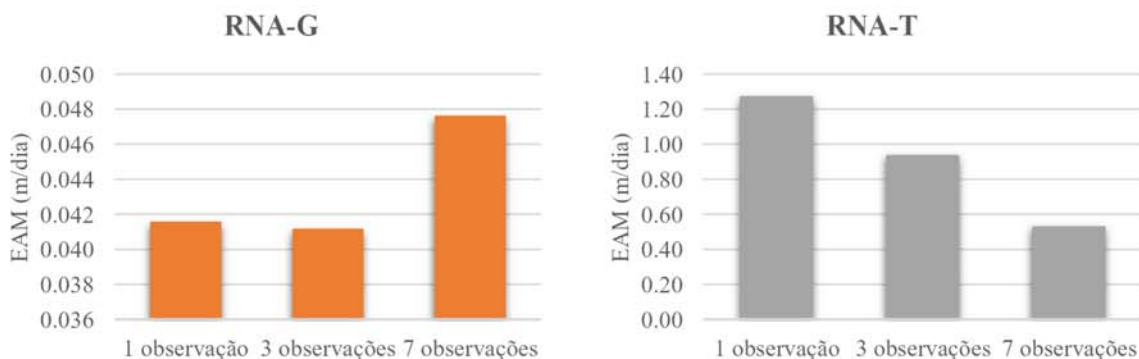


Fonte: Elaborado pelo autor.

É perceptível que, tanto na Rede Heller-Pádua quanto na Rede Porto, o RNA-G demonstrou um desempenho superior. Nos três cenários testados e apresentados nos Gráficos 32, 33 e 34 o RNA-T retornou valores positivos para o coeficiente kw em alguns trechos. Nestes casos, o algoritmo desenvolvido adota o valor mínimo de decaimento estabelecido para a faixa de variação utilizada na geração dos dados do PMC, que é de $-0,002\text{m/dia}$, para a respectiva tubulação. Consequentemente, nos gráficos, os resultados obtidos pelo RNA-T não são visíveis para alguns trechos.

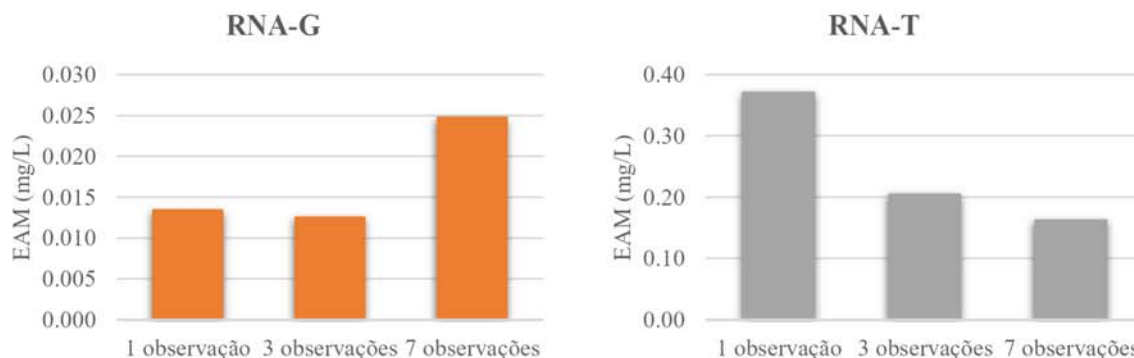
Os Gráficos 35 e 36 exibem os EAMs resultantes das calibrações dos coeficientes kws na Rede Porto. Com o intuito de proporcionar uma visualização mais acessível, optou-se por dispor os resultados de cada método de maneira contígua, seguindo a mesma abordagem adotada na análise da Rede Heller-Pádua.

Gráfico 35 – EAMs dos kws na Rede Porto para os diferentes métodos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 36 – EAMs das concentrações de cloro na Rede Porto para os diferentes métodos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os Gráficos 35 e 36 evidenciam a superioridade do RNA-G sobre o RNA-T, demonstrando EAMs inferiores tanto para os coeficientes kws calculados quanto para as concentrações de cloro residual obtidas nas simulações das redes calibradas. Observa-se que o aumento no número de dados observados contribui para a melhoria do desempenho do RNA-T, uma tendência não observada no RNA-G. Isso decorre da característica inerente ao modelo que utiliza a rotina de calibração por grupo, que neste caso computa um único valor de kw para todos os trechos da rede. Em algum ponto, essa abordagem pode limitar a redução do EAM, dada a pequena variação do parâmetro kw existente nas tubulações da Rede Porto.

A Rede Porto inicial exibia EAMs de 0,3189 m/dia e 0,3651 mg/L para os kws e as concentrações de cloro, respectivamente, antes das calibrações. Destaca-se que, mesmo diante do cenário com maior quantidade de dados observados, o RNA-T não conseguiu atenuar o erro nos kws . Em contrapartida, o RNA-G, mesmo no cenário com apenas um dado observado, promoveu uma redução significativa nos EAMs calculados, evidenciando o potencial deste modelo.

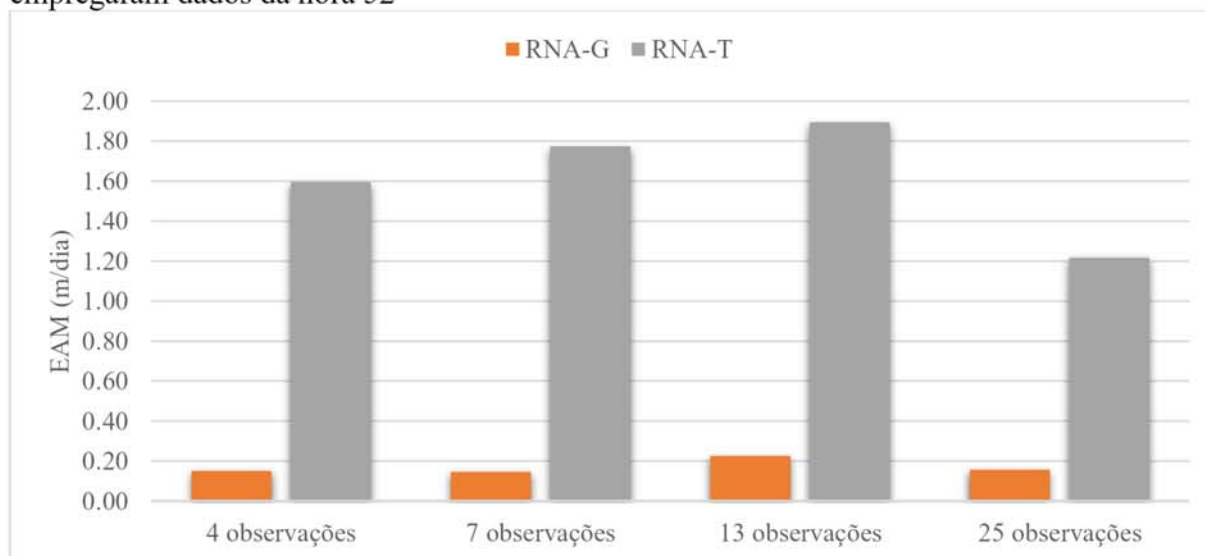
Os resultados obtidos para as concentrações de cloro residual em cada nó, para todas as calibrações da Rede Porto, encontram-se no Apêndice M.

4.3.3 Calibrações dos kws na Rede Sousa

Assim como na exposição dos resultados das calibrações das rugosidades absolutas na Rede Sousa, os valores calculados para os kws e para as concentrações de cloro em cada calibração são detalhados em tabelas nos Apêndices N, O, P e Q. Os Gráficos 37 e 38, por sua vez, oferecem os EAMs resultantes das calibrações dos kws utilizando apenas os dados da hora

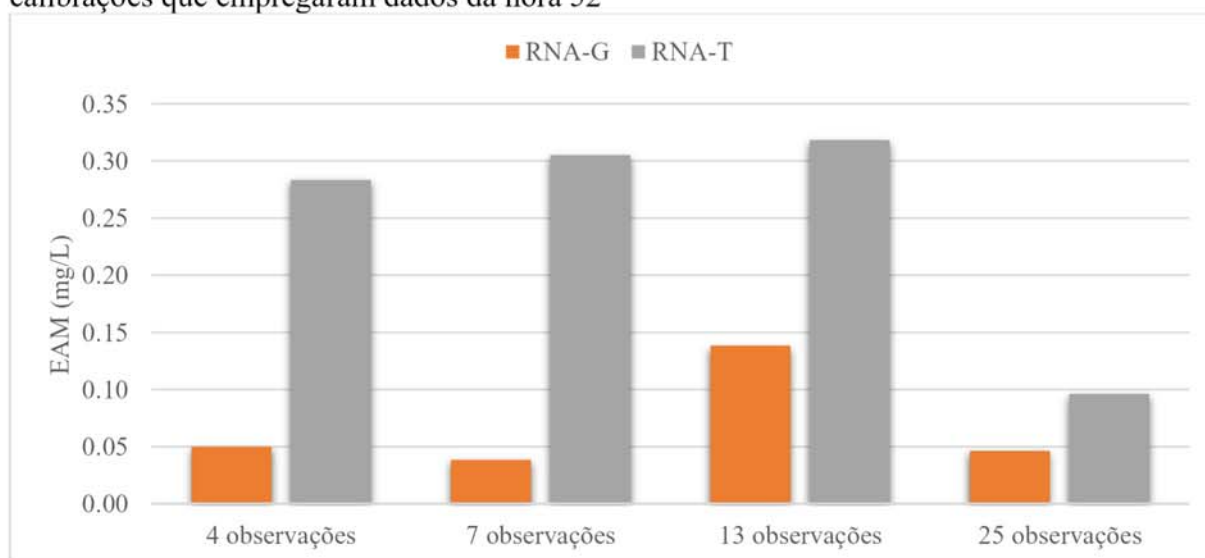
52. Para o cálculo dos EAMs das concentrações de cloro, foram utilizados os valores retornados pela simulação das redes calibradas para a hora 70.

Gráfico 37 – EAMs dos kws na Rede Sousa para os diferentes métodos, nas calibrações que empregaram dados da hora 52



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 38 – EAMs das concentrações de cloro na Rede Sousa para os diferentes métodos, nas calibrações que empregaram dados da hora 52



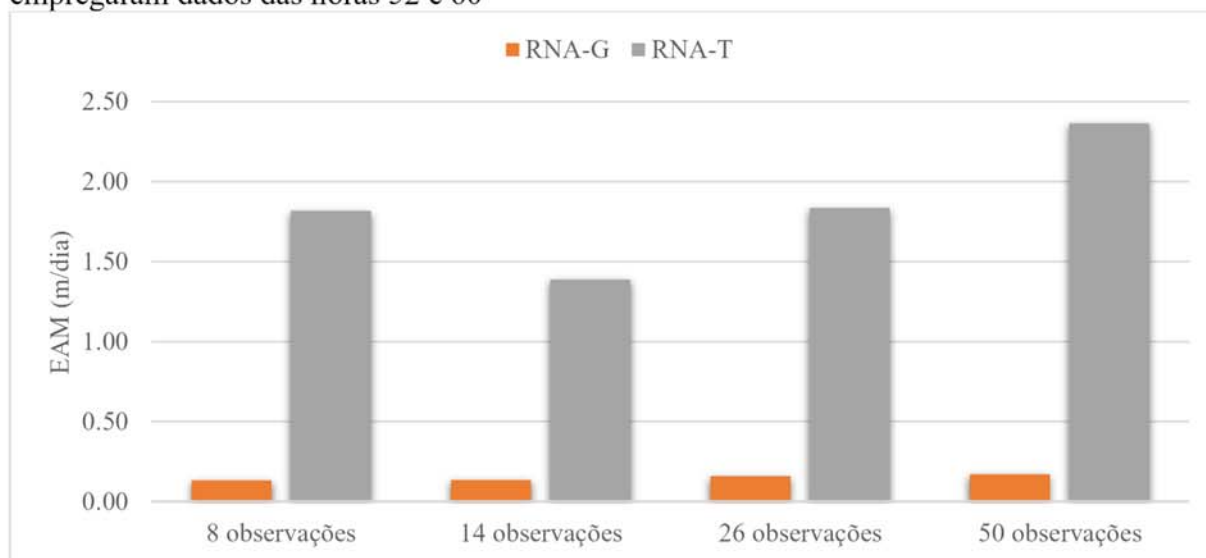
Fonte: Elaborado pelo autor.

Como evidenciado nos Gráficos 37 e 38, o desempenho do RNA-G foi consistentemente superior ao do RNA-T em todos os cenários analisados para a Rede Sousa. Cabe destacar que, em todas as calibrações executadas pelo RNA-T, o PMC retornou valores positivos de kw para alguns trechos, levando o algoritmo a substituir esses valores pelo mínimo

decaimento usado na faixa de variação durante a geração dos dados. Isso possivelmente afetou adversamente sua eficácia.

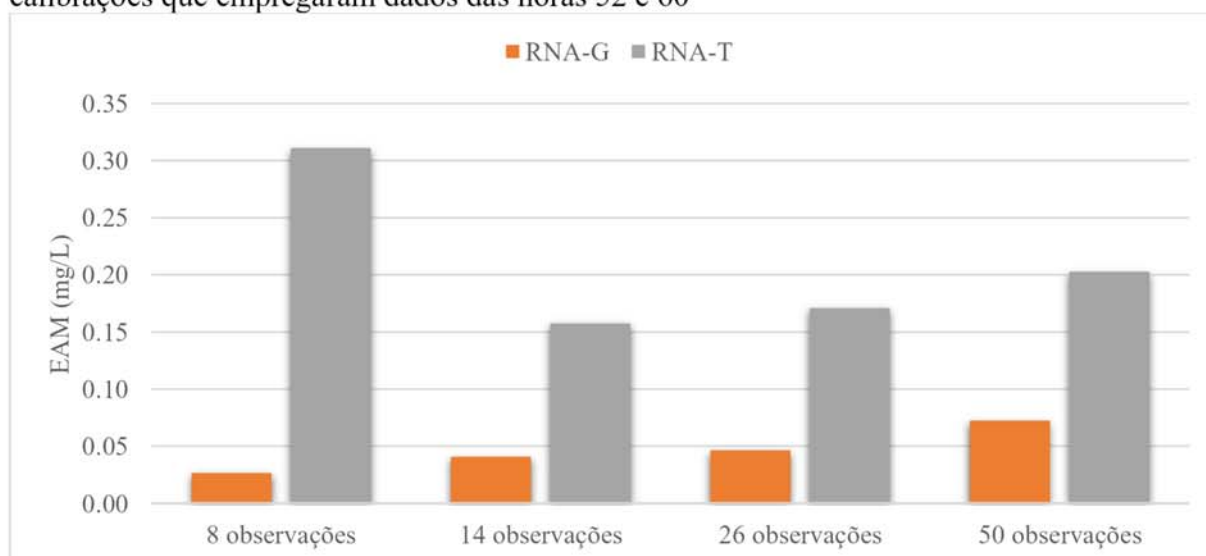
Os Gráficos 39 e 40, por sua vez, apresentam os EAMs obtidos nas calibrações dos kws na Rede Sousa utilizando dados das horas 52 e 60.

Gráfico 39 – EAMs dos kws na Rede Sousa para os diferentes métodos, nas calibrações que empregaram dados das horas 52 e 60



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 40 – EAMs das concentrações de cloro na Rede Sousa para os diferentes métodos, nas calibrações que empregaram dados das horas 52 e 60

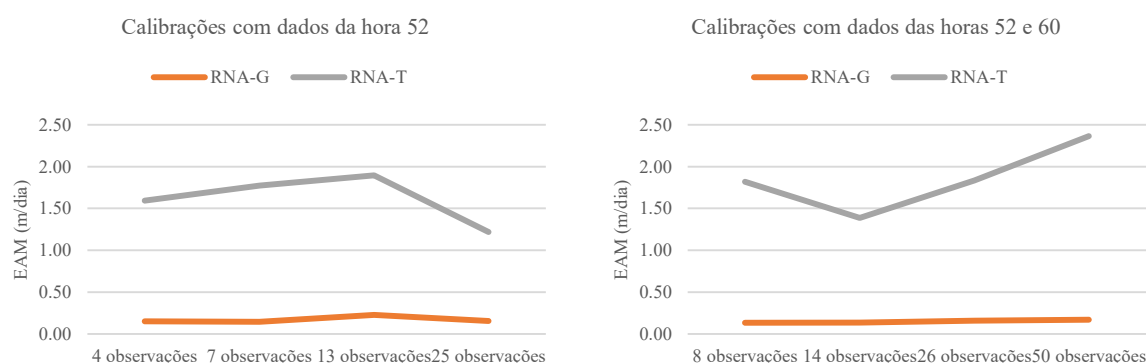


Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme demonstrado nos Gráficos 39 e 40, a inclusão dos dados da hora 60 nas calibrações dos kws na Rede Sousa teve um impacto pouco significativo no desempenho dos modelos. Apesar da adição de novas observações, o RNA-T continuou, em todos os cenários, a

retornar valores positivos para o kw em alguns trechos, levando à substituição desses por -0,0020 m/dia, que é o menor valor de decaimento da faixa de variação utilizada na geração dos dados do PMC. Isso contribuiu notavelmente para o aumento dos EAMs, especialmente nos trechos de Ferro Fundido, que possuem kws gabaritos variando entre -0,5 m/dia e -1,5 m/dia. Também se percebe que o RNA-T não apresentou uma melhoria em seu desempenho com o aumento progressivo do número de observações, indicando que o modelo desenvolvido enfrenta desafios ao lidar com a necessidade de estimar um grande número de valores para o parâmetro calibrado. Por sua vez, é notório que os EAMs calculados pelo RNA-G exibem certa estabilidade, possivelmente relacionada à natureza do algoritmo, que determina apenas um valor para o parâmetro em cada grupo de tubulações. Esses padrões podem ser mais bem observados no Gráfico 41, que compara a performance dos modelos ao utilizar apenas dados da hora 52 e dados das horas 52 e 60.

Gráfico 41 - Comparação entre os EAMs dos kws calculados pelas calibrações com dados da hora 52 e dados das horas 52 e 60



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Rede Sousa, antes de qualquer calibração, exibia EAMs de 0,3620 m/dia e 0,5395 mg/L para os kws e concentrações de cloro, respectivamente. O RNA-G demonstrou eficácia ao reduzir consistentemente esses erros em todas as calibrações, destacando-se no cenário com apenas 8 dados, das horas 52 e 60, onde os EAMs alcançaram 0,1332 m/dia e 0,0266 mg/L. Em contrapartida, o RNA-T, embora tenha apresentado erros para o parâmetro calibrado superiores aos iniciais, conseguiu retornar valores menores de EAM para as concentrações de cloro em todos os testes. Seu melhor desempenho foi no cenário com 25 dados da hora 52, no qual obteve um EAM de 0,0960 mg/L para essa variável.

4.3.4 Resumo das calibrações dos kws

Os 14 cenários empregados nas calibrações dos kws revelaram um padrão consistente, evidenciando a superioridade do RNA-G em todos eles, tanto para as concentrações de cloro quanto para os kws calculados. Uma observação notável é a maior dificuldade enfrentada pelo RNA-T na calibração do parâmetro de qualidade da água, quando comparado às calibrações das rugosidades absolutas usando o mesmo modelo. Em diversos cenários, o RNA-T gerou valores positivos para o decaimento de cloro, exigindo do algoritmo uma intervenção. Esse padrão sugere que o modelo pode enfrentar um maior desafio na calibração do kw, ou que as disparidades nos valores iniciais entre os diferentes parâmetros e, por conseguinte, na faixa de variação dos dados de treinamento e teste dos PMCs, impactaram significativamente nos resultados.

No que diz respeito às épocas determinadas pela rotina *Early Stopping*, observou-se um padrão semelhante ao ocorrido na calibração das rugosidades absolutas durante as calibrações dos kws. Nesta nova série de testes, o RNA-G, que calcula um único valor de kw para cada grupo de tubulações, exigiu, em média, 700 épocas para atingir a configuração ótima. Em contraste, o RNA-T apresentou uma média em torno de 17 épocas. As possíveis razões para essa discrepância foram previamente discutidas.

Quanto ao tempo necessário para realizar as calibrações, observa-se que, na Rede Heller-Pádua, o RNA-G demandou em média 216 segundos, enquanto o RNA-T necessitou de 249 segundos. Já na Rede Porto, as durações médias foram de 223 e 255 segundos para os dois modelos, respectivamente. Na Rede Sousa, o RNA-G consumiu em média 760 segundos para as calibrações, enquanto o RNA-T demandou cerca de 770 segundos. Nota-se que o modelo com maior número de saídas no PMC tende a exigir mais tempo de processamento. Resultados surpreendentes foram observados na Rede Heller-Pádua, onde o tempo de processamento na calibração do modelo de qualidade foi inferior em comparação com a calibração do modelo hidráulico, o que contraria o comportamento esperado. Cabe destacar que as modelagens foram realizadas no mesmo computador usado nas calibrações das rugosidades absolutas.

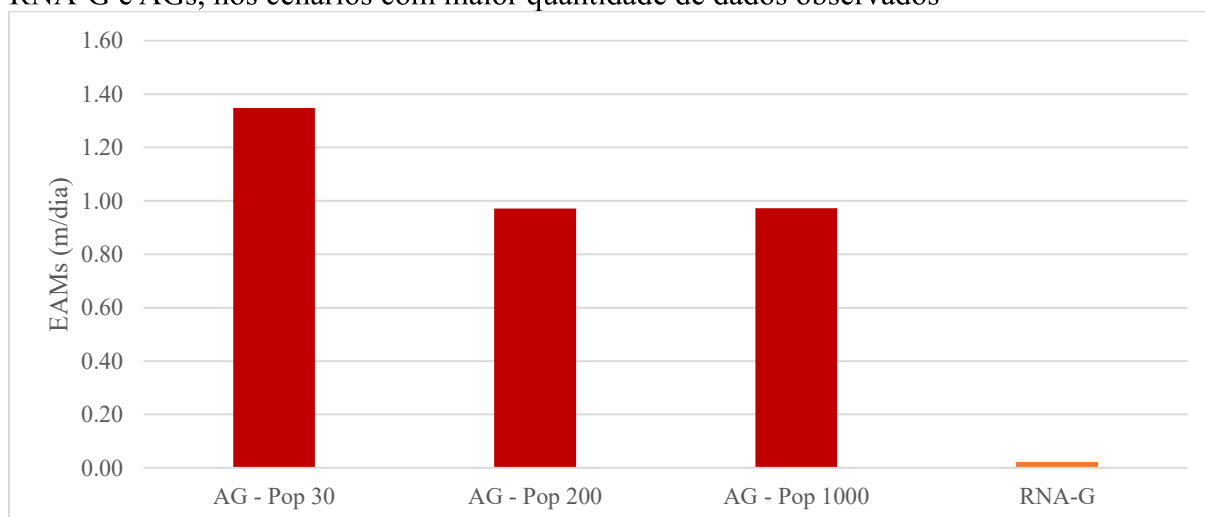
4.3.5 Calibrações dos kws com Algoritmos Genéticos

De maneira semelhante ao que foi feito na análise das rugosidades absolutas, uma avaliação adicional foi realizada para verificar a capacidade da metodologia desenvolvida de superar outras abordagens da literatura na calibração dos kws. Para isso, foram comparados os

resultados obtidos pelo RNA-G, que apresentou o melhor desempenho na calibração dos kws, com aqueles gerados por um algoritmo baseado em AG. A abordagem empregada no método AG, para efeito de comparação, segue um processo similar ao utilizado nos estudos de Silva (2003) e Santos (2010), utilizando os parâmetros descritos na Tabela 13.

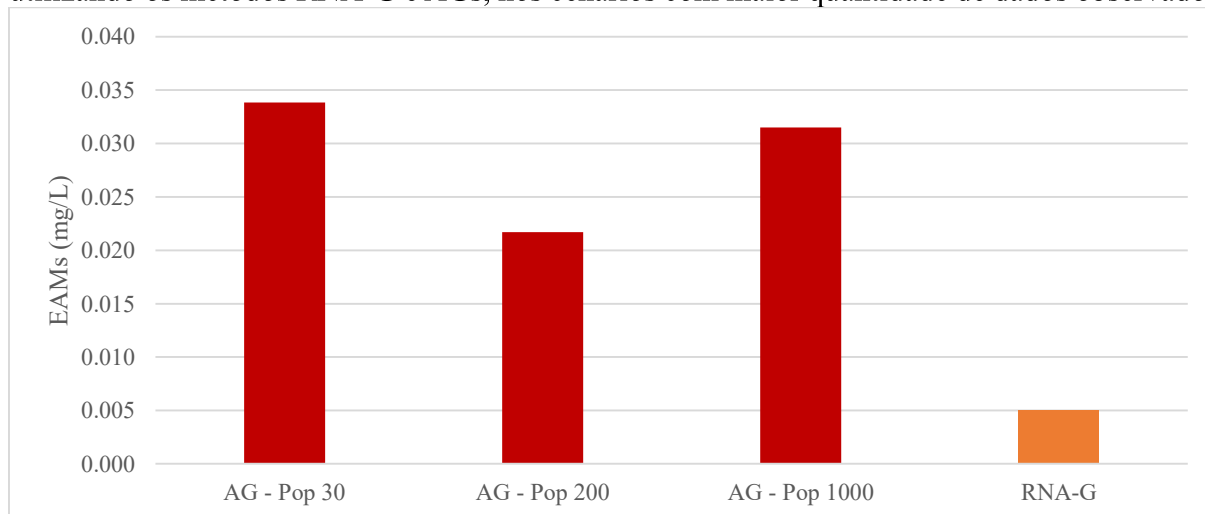
Os Gráficos 42 a 47 apresentam os EAMs dos kws e das concentrações de cloro, obtidos nas calibrações das redes Heller-Pádua, Porto e Sousa nos cenários com maior quantidade de dados observados, tanto pelo método RNA-G quanto pelos testes realizados com AGs.

Gráfico 42 - Comparação dos EAMs dos kws na Rede Heller-Pádua, utilizando os métodos RNA-G e AGs, nos cenários com maior quantidade de dados observados



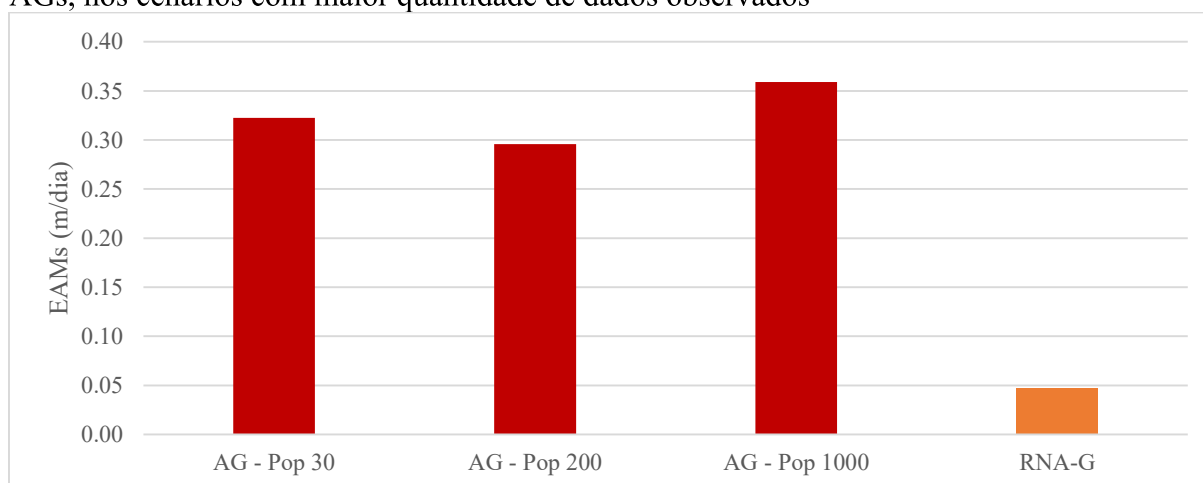
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 43 - Comparação dos EAMs das concentrações de cloro na Rede Heller-Pádua, utilizando os métodos RNA-G e AGs, nos cenários com maior quantidade de dados observados



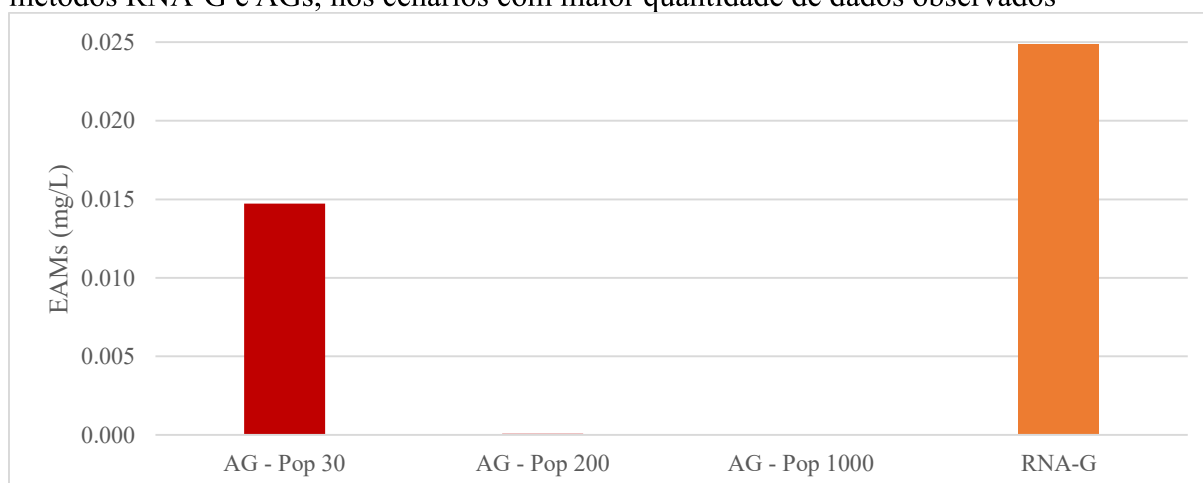
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 44 - Comparação dos EAMs dos kws na Rede Porto, utilizando os métodos RNA-G e AGs, nos cenários com maior quantidade de dados observados



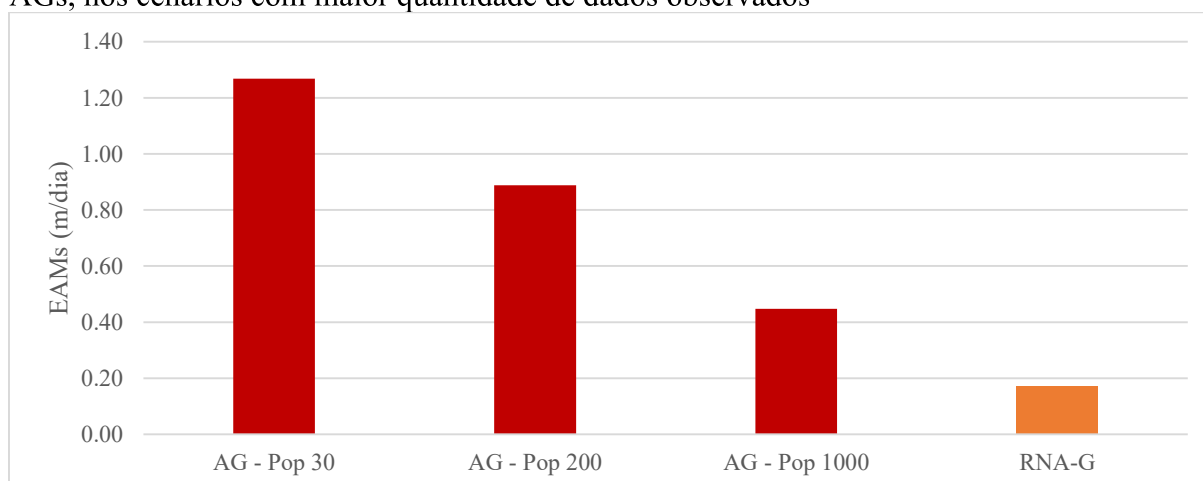
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 45 - Comparação dos EAMs das concentrações de cloro na Rede Porto, utilizando os métodos RNA-G e AGs, nos cenários com maior quantidade de dados observados



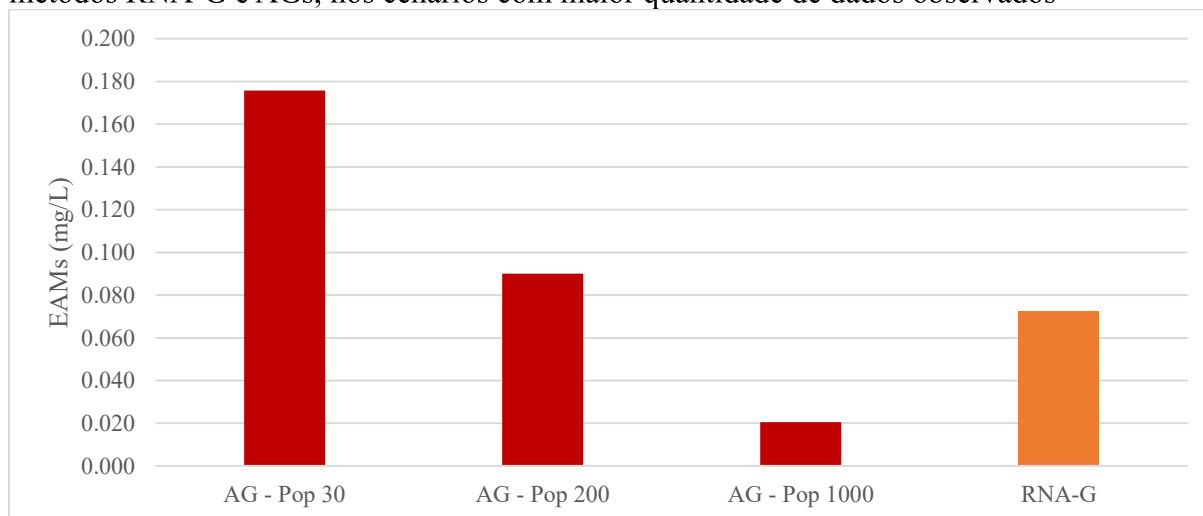
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 46 - Comparação dos EAMs dos kws na Rede Sousa, utilizando os métodos RNA-G e AGs, nos cenários com maior quantidade de dados observados



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 47 - Comparação dos EAMs das concentrações de cloro na Rede Sousa, utilizando os métodos RNA-G e AGs, nos cenários com maior quantidade de dados observados



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como mostrado nos gráficos, o método RNA-G apresentou resultados superiores na maioria dos cenários testados, tanto para os valores de kws quanto para as concentrações de cloro retornadas pela simulação das redes calibradas. No entanto, observa-se que as abordagens com AGs conseguiram obter erros menores para as concentrações de cloro na Rede Porto, mesmo no teste com uma população de apenas 30 indivíduos, como mostra o Gráfico 45. Além disso, no teste com uma população de 1000 indivíduos, o AG alcançou erros na sexta casa decimal, evidenciando a alta capacidade desse método em minimizar o erro dessa variável, que foi diretamente utilizada na função de aptidão do algoritmo.

Outra observação relevante é que, assim como na calibração das rugosidades absolutas, os AGs com populações maiores, de 200 e 1000 indivíduos, apresentaram resultados superiores aos obtidos por aqueles com uma população de 30. Notavelmente, diferentemente do observado na calibração das rugosidades absolutas na Rede Sousa, o aumento de 200 para 1000 indivíduos resultou em uma melhoria adicional nos resultados, comportamento que não se repetiu nas outras redes. Isso sugere que a definição de um tamanho ideal de população pode estar relacionada ao porte da rede em análise, uma vez que a Rede Sousa, sendo de maior extensão, apresentou essa diferença de comportamento em relação às redes menores.

Quanto ao tempo de processamento, o comportamento observado foi semelhante ao registrado nos testes de calibração das rugosidades. Os AGs demandaram aproximadamente 6 horas para calibrar a Rede Sousa no cenário com uma população de 1000 indivíduos, enquanto o método RNA-G completou o mesmo processo em cerca de 13 minutos.

Os resultados obtidos para os kws, assim como os valores de concentração e cloro calculados nas calibrações com AGs para as três redes, estão apresentados nos Apêndices R, S e T.

4.4 Testes finais

Com os resultados das calibrações das rugosidades absolutas e dos kws em mãos, observou-se a clara superioridade dos métodos que empregam uma RNA para calcular um único valor para os parâmetros por grupo de tubulações. Diante dessa constatação, foram realizados testes finais para avaliar a possibilidade de aprimorar o desempenho dos métodos que utilizam uma RNA para calcular um valor do parâmetro para cada trecho.

Nesta última série de testes, os métodos RNA-G, RNA-T e AGs foram comparados na calibração dos parâmetros da Rede Sousa. Em contraste com as experiências anteriores, as faixas de variação dos parâmetros usadas na geração dos dados dos PMCs foram delimitadas manualmente para corresponder exatamente à faixa em que se encontram os valores gabarito de cada grupo de tubulações. Assim, nas 10 mil configurações geradas para o treinamento e teste da RNA na calibração das rugosidades absolutas, o valor desse parâmetro variou entre 0,25 mm e 0,5 mm para os trechos de ferro fundido e entre 0,0015 mm e 0,01 mm para os trechos de PVC. Quanto às calibrações dos kws, as faixas utilizadas na geração dos dados foram de -0,5 a -1,5 m/dia para os trechos de ferro fundido e de -0,1 a -0,5 m/dia para os trechos de PVC. Para garantir uma comparação justa, a mesma faixa de variação foi utilizada na geração das populações e como limitação para os parâmetros calculados pelos AGs, sendo que, nos testes finais, os AGs empregados utilizaram uma população de tamanho igual a 1000.

Nos testes abordados nesta seção, foram adotados os cenários que incorporaram 50 dados observados, fazendo uso das informações das horas 52 e 60. Os resultados provenientes dessas avaliações estão sintetizados nas Tabelas 14 e 15, enquanto uma apresentação mais detalhada pode ser encontrada nos Apêndices U, V, W e X.

Conforme evidenciado nas Tabelas 14 e 15, o RNA-G apresentou um desempenho consistente nos testes de calibração, tanto para as rugosidades absolutas quanto para os kws. Mesmo no teste inicial, onde as faixas de variação dos parâmetros não estavam tão bem definidas, o método já obteve resultados satisfatórios. Nos testes finais, com a faixa de variação ajustada manualmente para coincidir com a faixa dos valores gabarito, os EAMs foram reduzidos, porém, de forma limitada. Isso indica que o RNA-G atinge rapidamente um ponto

de estabilidade, onde reduções adicionais nos erros são mínimas, independentemente da inclusão de novos dados ou do refinamento das faixas de variação dos parâmetros.

Tabela 14 – EAMs obtidos no teste final da calibração das rugosidades absolutas

Método	EAMs do Teste Inicial			EAMs do Teste Final		
	Rugosidades (mm)	Pressões (mca)	Vazões (L/s)	Rugosidades (mm)	Pressões (mca)	Vazões (L/s)
RNA-G	0,0143	0,0034	0,0047	0,0132	0,0035	0,0045
RNA-T	0,1720	0,0458	0,0406	0,0108	0,0026	0,0032
AG	0,0562	0,0041	0,0331	0,0201	0,0013	0,0077

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 15 – EAMs obtidos no teste final da calibração dos kws

Método	EAMs do Teste Inicial		EAMs do Teste Final	
	kws (m/dia)	Concentrações (mg/L)	kws (m/dia)	Concentrações (mg/L)
RNA-G	0,1697	0,0725	0,1361	0,0238
RNA-T	2,3646	0,2028	0,1257	0,0174
AG	0,4475	0,0205	0,1311	0,0110

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por outro lado, o RNA-T mostrou uma evolução significativa, beneficiando-se amplamente da delimitação mais precisa da faixa de variação. Isso resultou em uma redução substancial dos EAMs, tanto para os parâmetros calibrados, como as rugosidades absolutas e os kws, quanto para as variáveis de estado, como cargas de pressão, vazões e concentrações de cloro. Esse comportamento sugere que o RNA-T, ao ajustar os parâmetros individualmente para cada trecho, apresenta um elevado potencial de otimização, especialmente em cenários com uma faixa de variação mais precisa e uma maior quantidade de dados observados. Entretanto, vale ressaltar que este cenário final é altamente enviesado, uma vez que a faixa de variação dos parâmetros foi estabelecida com base nos valores gabarito, algo que não ocorre em situações práticas.

Já os resultados obtidos com AG indicam uma performance intermediária em relação aos outros dois métodos. Os EAMs das rugosidades absolutas e kws mostraram uma melhora significativa nos testes finais, mas os AGs se destacaram particularmente nas variáveis de estado obtidas pelas simulações das redes calibradas, como as cargas de pressão e

concentrações de cloro, que são os focos das suas funções de aptidão. Um ponto importante a ser destacado é a alta demanda computacional desse método, que precisou de aproximadamente seis horas de processamento para finalizar a calibração das redes, em contraste com os métodos baseados em RNAs, que concluíram o processo em cerca de 12 minutos.

Nos testes finais, apesar da notável melhoria do RNA-T, observou-se um comportamento semelhante ao demonstrado nos demais experimentos quanto à época determinada pela rotina *Early Stopping*. Esta rotina indicou as configurações ótimas nas épocas 15 e 10 para as calibrações das rugosidades absolutas e dos kws, respectivamente. Para investigar a possibilidade de o modelo não estar atingindo seu potencial máximo devido a uma convergência rápida, foram conduzidos novos ensaios variando a taxa de aprendizado, aumentando-a para 0,1 e, posteriormente, diminuindo-a para 0,001. Contudo, mesmo com essas alterações, que conseguiram atrasar ligeiramente a convergência em alguns casos, incluindo o retorno à época 131 na calibração das rugosidades absolutas com uma taxa de 0,001, os resultados obtidos não apresentaram mudanças significativas.

Com base nos resultados apresentados no capítulo 4, foi elaborada a Tabela 16, que sintetiza as principais vantagens e desvantagens dos métodos de calibração testados. A tabela também sugere em quais contextos cada método seria mais indicado, considerando as particularidades de desempenho observadas.

Tabela 16 - Comparação das Vantagens, Desvantagens e Indicações de Uso dos Métodos de Calibração (continua)

Método	Vantagens	Desvantagens	Indicações de uso
RNA-G	✓Capaz de gerar bons resultados mesmo com poucos dados observados.	✓Depende da configuração inicial para delimitar a faixa de variação e restringe-se a calcular um único valor de parâmetro por grupo, o que limita sua performance.	✓Ideal para cenários com poucos dados, mas com alto conhecimento prévio sobre os parâmetros, permitindo uma faixa de variação bem delimitada.
RNA-T	✓Potencial para produzir excelentes resultados ao calibrar cada trecho individualmente.	✓Alta dependência da configuração inicial e requer melhor refinamento para resultados precisos.	✓Recomendado para cenários com muitos dados observados e informações detalhadas das tubulações, possibilitando a definição precisa da faixa de variação.
Híbrido-G	✓Capaz de gerar bons resultados com poucos dados observados e menor dependência da configuração inicial em comparação ao RNA-G.	✓Calcula um único valor de parâmetro por grupo, limitando sua performance.	✓Adequado para cenários com poucos dados e onde a faixa de variação dos parâmetros é desconhecida, graças à calibração prévia com MIGHA.

(conclusão)

Híbrido-T	✓ Calibra cada trecho individualmente com menor dependência da configuração inicial, comparado ao RNA-T.	✓ Apesar de apresentar melhores resultados que o RNA-T, ainda não supera a performance dos outros métodos na maioria dos casos, devido à alta complexidade de calcular os parâmetros trecho a trecho.	✓ Indicado para cenários onde há grande variação de parâmetros dentro de um mesmo grupo ou quando há necessidade de calibração individual por trecho sem que haja informações detalhadas sobre as tubulações.
MIGHA	✓ Método mais rápido.	✓ Requer grande quantidade de dados observados e não foi avaliado para calibração de kw neste estudo.	✓ Ideal para situações que demandam rapidez, com quantidade considerável de dados observados.
AG	✓ Alta redução de erros nas variáveis de estado usadas na função de aptidão.	✓ Alta demanda computacional, resultando em tempos de processamento maiores.	✓ Ideal para minimizar erros nas variáveis de estado, sem que haja necessidade de respostas rápidas.

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5 Modelo da rede da UFPI

A modelagem e calibração das RDAs da UFPI foram realizadas para as redes CT-CCHL e CCN-CCS, com o objetivo de representar adequadamente as condições reais de cada sistema. Contudo, somente a Rede CT-CCHL apresentou resultados satisfatórios em termos de consistência e fidelidade nas simulações. Na Rede CCN-CCS, uma série de incertezas acumuladas, como possíveis imprecisões no traçado da rede, nas definições de diâmetros das tubulações, elevações e consumos nodais, resultaram em um modelo cuja simulação diverge consideravelmente das medições realizadas em campo. Esses fatores implicaram em valores de calibração que se mostraram incompatíveis com os relatados na literatura para rugosidades absolutas de tubulações, inviabilizando a obtenção de resultados confiáveis para a Rede CCN-CCS.

Na modelagem das RDAs da UFPI, o primeiro passo foi determinar o nível dos reservatórios que as abastece. Para isso, foram medidas as cargas de pressão em pontos próximos a essas estruturas, e os valores obtidos foram utilizados para calcular o nível correspondente. Inicialmente, as medições foram realizadas com um manômetro digital, mas, devido a falhas no equipamento, ele foi substituído por um manômetro analógico para dar

continuidade ao processo. As cargas de pressão foram coletadas em diferentes locais do campus, utilizando torneiras de jardim como pontos de medição. As Figuras 36, 37 e 38 ilustram os reservatórios das duas RDAs, os manômetros utilizados e o processo de medição em campo.

Figura 36- Reservatórios das redes CT-CCHL (esquerda) e CCN-CCS (direita) na UFPI



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 37- Manômetros utilizados nas medições: digital (esquerda) e analógico (direita)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 38- Medição das cargas de pressão em campo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após diversas reuniões com a Coordenadoria de Planejamento e Controle (CPC) e a Coordenadoria de Manutenção Patrimonial (CMP) da UFPI, foram definidos o traçado das RDAs e parâmetros essenciais das tubulações, como diâmetros e o período de instalação na universidade. Com base nessas informações e nas curvas de nível da área, foi possível realizar o traçado da rede utilizando o Sistema UFC e seus componentes. A Figura 39 ilustra a inserção do traçado da Rede CT-CCHL na interface do AutoCAD, com o auxílio do *software* UFC 2.

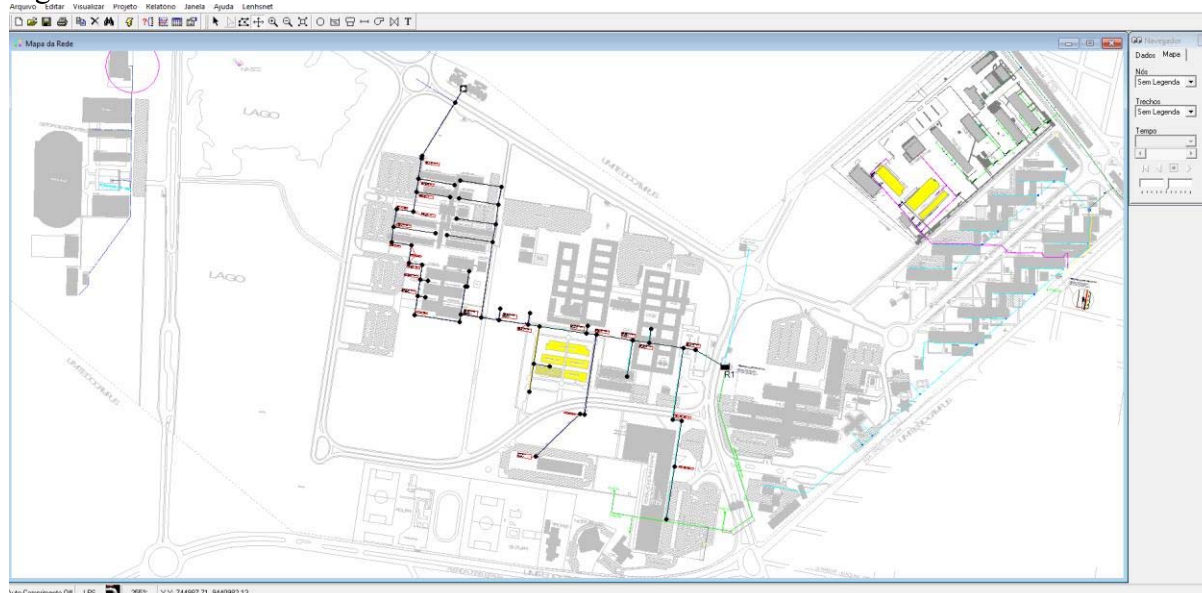
Figura 39- Traçado da Rede CT-CCHL com auxílio do UFC2



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com as funcionalidades do UFC-2, foi gerado um arquivo .inp, formato utilizado pelo *software* EPANET para executar as simulações das RDAs. A Figura 40 mostra a Rede CT-CCHL já integrada à interface do EPANET.

Figura 40 – Rede CT-CCHL no EPANET



Fonte: Elaborado pelo autor.

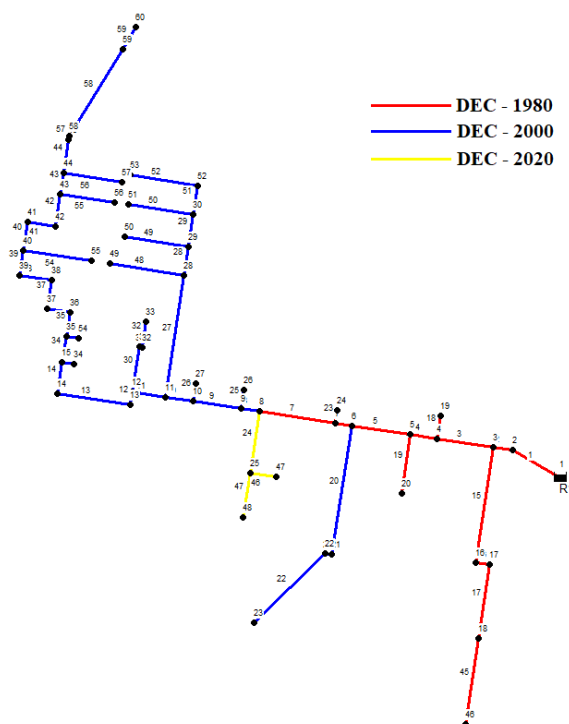
Para determinar os consumos nodais, foram coletadas leituras dos hidrômetros, próximos aos poços que abastecem os reservatórios, durante quatro meses consecutivos. Assim, foi possível calcular o consumo médio mensal de cada rede: 6.367.000 litros/mês na Rede CT-CCHL e 6.067.000 litros/mês na Rede CCN-CCS. Em seguida, realizou-se uma setorização das redes, dividindo-as em grupos de consumo locais para alocar as demandas com maior precisão. A criação dos grupos e o percentual de vazão para cada um foi estabelecido com base no número de alunos matriculados por centro, conforme dados do site da instituição. Para os Restaurantes Universitários (RUs), que formam um grupo específico em cada rede, o consumo foi calculado considerando as refeições diárias estimadas pela Prefeitura Universitária: 2.200 refeições/dia para o RU da Rede CT-CCHL e 2.100 refeições/dia para o RU da Rede CCN-CCS.

A Rede CT-CCHL foi dividida nos grupos nodais CT, CCHL, CCN2, CCE e RU2, enquanto a Rede CCN-CCS foi segmentada em CCN, CCS e RU1. Essa divisão tem o objetivo de aproximar o modelo às condições reais de vazão ao longo da rede. Embora outros fatores, como o número de servidores e potenciais vazamentos, também afetem os consumos e vazões, a utilização do número de alunos para definir percentuais de consumo por região foi considerada adequada aos objetivos do estudo, especialmente em função das informações disponíveis.

Um aspecto fundamental da modelagem foi a segmentação das tubulações das RDAs em grupos com propriedades semelhantes, necessária para a aplicação do método Híbrido-G de calibração, desenvolvido neste trabalho e o mais eficiente dentre os testados. Devido à ausência de informações detalhadas sobre os materiais utilizados nas tubulações, essa classificação foi baseada na data aproximada de instalação. A premissa adotada foi de que tubulações instaladas no mesmo período têm maior probabilidade de compartilhar características similares, como material, fabricante e lote, o que justifica a calibração conjunta de seus parâmetros.

Dessa forma, a Rede CT-CCHL foi dividida em três grupos de tubulações: o Grupo da década de 1980, que abrange as tubulações mais antigas; o Grupo da década de 2000, para as tubulações intermediárias; e o Grupo de 2020, referente às instalações mais recentes. Uma abordagem semelhante foi aplicada à Rede CCN-CCS, onde haviam sido definidos cinco grupos de tubulações. A Figura 41 ilustra a localização desses grupos dentro da Rede CT-CCHL.

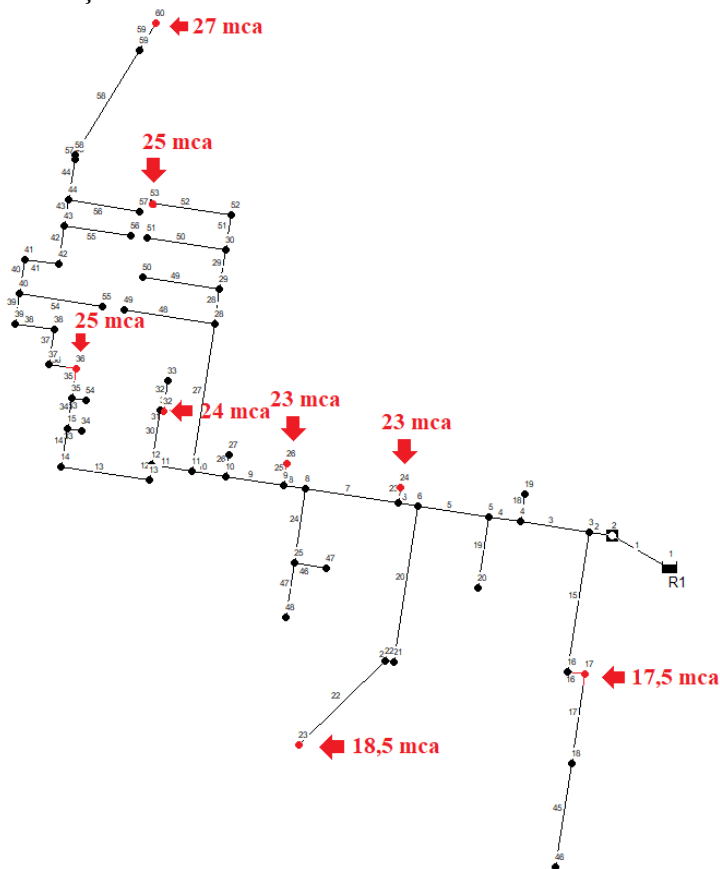
Figura 41 – Grupos de tubulações da Rede CT-CCHL



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após estabelecer a configuração inicial dos modelos e definir todos os parâmetros necessários para simular as RDAs, procedeu-se à calibração utilizando os dados observados em campo. A Figura 42 apresenta os pontos de medição e os valores de pressão registrados em cada um deles na Rede CT-CCHL.

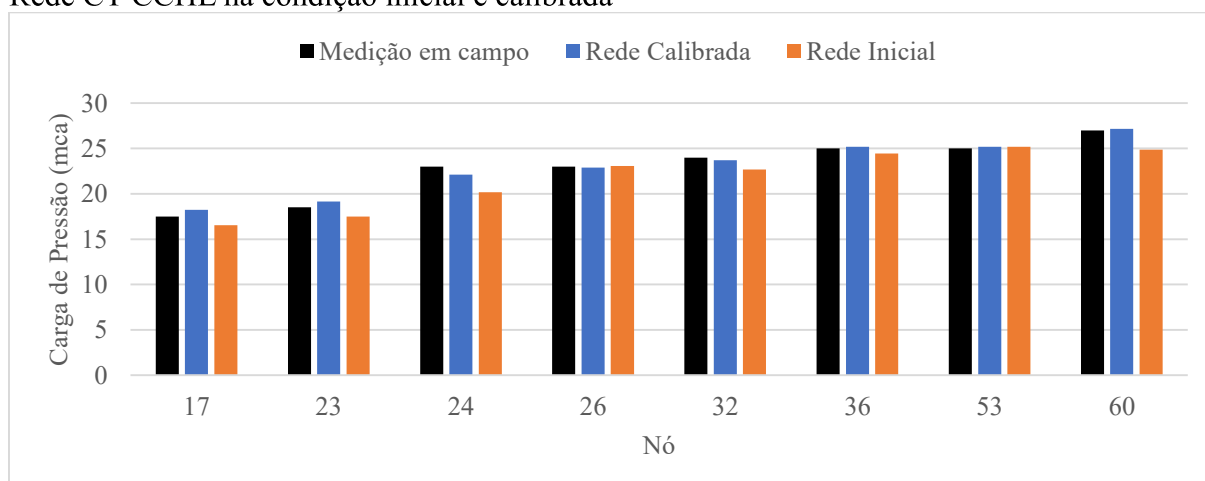
Figura 42 – Localizações e valores dos dados observados da Rede CT-CCHL



Fonte: Elaborado pelo autor.

De posse do modelo e dos dados de pressão medidos em campo, foi aplicado o método Híbrido-G para calibrar as redes CT-CCHL e CCN-CCS. O Gráfico 48 apresenta uma comparação entre as cargas de pressão medidas e as obtidas nas simulações para as configurações inicial e calibrada da Rede CT-CCHL.

Gráfico 48 – Comparação entre as cargas de pressão medidas e retornadas pela simulação da Rede CT-CCHL na condição inicial e calibrada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme ilustrado no Gráfico 48, a calibração da rede aproximou os valores simulados de pressão aos medidos em campo, reduzindo o EAM desta variável de 1,1371 mca para 0,4029 mca. Essa calibração resultou nas seguintes rugosidades absolutas para a Rede CT-CCHL: 2,5850 mm para os trechos do Grupo da década de 1980, 0,0817 mm para o Grupo da década de 2000 e 0,4689 mm para o Grupo de 2020. Esses valores foram considerados compatíveis com a literatura, a qual reporta variações semelhantes para tubulações de diferentes períodos e materiais. Em particular, o valor mais alto calculado para o grupo da década de 1980 condiz com materiais mais suscetíveis a desgastes elevados ao longo do tempo, como o ferro fundido, embora não haja confirmação sobre o material específico das tubulações. Os Apêndices Y e Z apresentam os resultados detalhados da simulação com a configuração calibrada desta RDA.

Assim, os resultados obtidos para a Rede CT-CCHL demonstram a efetividade do processo de calibração aplicado. No caso da Rede CCN-CCS, no entanto, a ausência de parâmetros mais precisos, como diâmetros, elevações e demandas nodais, gerou inconsistências no modelo e calibrações de rugosidade que não correspondem aos valores aceitos para os materiais usuais de tubulação. Diante de incertezas de base considerável, a calibração de um parâmetro como a rugosidade, que implica um nível elevado de refinamento, pode não ser a abordagem mais indicada para sistemas onde outros parâmetros fundamentais permanecem indefinidos. Embora não tenham sido satisfatórios na Rede CCN-CCS, os resultados apresentados para a Rede CT-CCHL confirmam a importância da calibração na melhoria dos modelos de redes hidráulicas e sugerem que a obtenção de informações mais detalhadas pode potencializar ainda mais a qualidade das simulações futuras.

5 CONCLUSÃO

Este estudo apresentou uma abordagem inovadora para a calibração de rugosidades absolutas e coeficientes kw em RDAs, explorando dois métodos que empregam RNAs e dois métodos híbridos MIGHA-RNA. As técnicas desenvolvidas foram testadas em diferentes cenários, evidenciando suas potencialidades e limitações na calibração dos parâmetros e na melhoria das variáveis de estado das redes.

Os testes conduzidos na Rede Heller-Pádua para a calibração das rugosidades absolutas destacaram a eficácia dos métodos RNA-G e Híbrido-G, os quais empregam a rotina de calibração por grupo. Esses métodos demonstraram excelentes resultados, mesmo quando apenas um único dado observado foi utilizado. Da mesma forma, na calibração do kw, o método RNA-G superou o RNA-T. Tal resultado era esperado devido à configuração gabarito da Rede Heller-Pádua, que apresenta valores uniformes para as rugosidades absolutas e para os kws, tornando mais convenientes as rotinas que calculam um único valor do parâmetro por grupo de tubulações.

Os resultados das calibrações das rugosidades absolutas na Rede Porto evidenciaram as discrepâncias entre o método RNA-T e o Híbrido-T. Enquanto o primeiro, baseado exclusivamente em um PMC, apresentou os piores resultados para esta RDA, o Híbrido-T demonstrou-se mais eficiente, produzindo as melhores calibrações. Essa disparidade destaca a importância da definição precisa da faixa de variação do parâmetro utilizada na geração dos dados de treinamento e teste do PMC. Notavelmente, o modelo híbrido foi superior devido à prévia aplicação do método MIGHA, o que resulta em uma redução dessa faixa de variação. Além disso, os métodos RNA-G e Híbrido-G também alcançaram bons resultados. No que diz respeito à calibração dos coeficientes kws na Rede Porto, o método RNA-G demonstrou superioridade em relação ao RNA-T, evidenciando a dificuldade do PMC em determinar múltiplos valores, especialmente quando utilizada uma faixa de variação do parâmetro ampla.

Na calibração das rugosidades absolutas na Rede Sousa, destacou-se a superioridade dos métodos RNA-G e Híbrido-G. Embora exista uma variação nos valores deste parâmetro dentro de cada grupo de tubulações na configuração gabarito, os métodos que calcularam um único valor por grupo se destacaram, evidenciando as dificuldades da calibração por trecho em redes de maior porte. Da mesma forma, o método RNA-G superou o RNA-T na calibração dos coeficientes kws nesta RDA.

Os testes realizados sugerem que, na maioria dos casos, é mais recomendável utilizar os métodos que empregam a calibração por grupos, como o RNA-G e o Híbrido-G, os quais conseguiram gerar resultados satisfatórios mesmo nos cenários com poucos dados observados. Esses dois métodos demonstraram performances semelhantes. No entanto, em cenários específicos, como na calibração das rugosidades absolutas de uma rede de pequeno porte e que apresente uma variação razoável desse parâmetro nos seus trechos, o método Híbrido-T pode ser mais vantajoso, desde que haja uma quantidade suficiente de dados observados para que o MIGHA possa contribuir com o modelo de forma apropriada na delimitação da faixa de variação. Os testes finais realizados neste trabalho apontam que, se a faixa de variação do parâmetro for bem delimitada, os métodos de calibração por trecho podem apresentar uma performance superior.

Uma nota relevante sobre os testes realizados é que o aumento da quantidade de observações empregadas não acarretou, na maioria dos casos, em uma melhoria significativa dos resultados obtidos pelo RNA-G e Híbrido-G. Isso ocorreu, em parte, devido ao fato de que esses métodos já produziram resultados satisfatórios para os parâmetros, mesmo em cenários com menos dados observados. Além disso, nos casos em que há variação do parâmetro na configuração gabarito dentro do mesmo grupo de tubulações, a capacidade dessas metodologias é limitada a calcular um valor intermediário para cada grupo, o que restringe suas performances até certo ponto.

Apesar dos resultados semelhantes entre os métodos RNA-G e Híbrido-G na calibração de rugosidades absolutas, o Híbrido-G é considerado uma escolha mais segura na maioria dos casos, especialmente quando há limitações de conhecimento e informações sobre a rede. A calibração inicial realizada pelo método MIGHA no Híbrido-G possibilita uma definição mais precisa da faixa de variação dos parâmetros, o que reduz a dependência da configuração inicial da rede. Em contraste, no RNA-G, a delimitação da faixa ocorre exclusivamente com base na configuração inicial. Assim, o Híbrido-G apresenta maior robustez, com melhor adaptação a diferentes cenários e menor margem de erro nas condições mais adversas de calibração.

Observou-se, em relação às variáveis de estado obtidas pelas simulações das redes calibradas, que quase todas as calibrações foram capazes de reduzir de maneira significativa os erros nas cargas de pressão e concentrações de cloro nos nós, com exceção de alguns testes realizados com o método RNA-T na Rede Porto. Esse padrão foi observado mesmo nos casos em que o erro do parâmetro calibrado não foi reduzido. Esse fenômeno decorre do fato de que as funções de custo utilizadas empregam essas variáveis para determinar a melhor configuração

do PMC. Quanto às vazões, apenas os métodos RNA-G e Híbrido-G conseguiram reduzir o erro em todos os testes, enquanto foi necessária uma quantidade considerável de dados observados para o método MIGHA e o Híbrido-T alcançarem resultados satisfatórios. Por outro lado, o método RNA-T não conseguiu reduzir o erro para essa variável em nenhum dos ensaios realizados. Esses resultados também são atribuíveis ao fato de que o EAM inicial das vazões para as redes testadas já era baixo.

As comparações entre os métodos de calibração por grupo e os testes com AGs indicaram, de forma geral, melhor desempenho dos métodos desenvolvidos neste trabalho, especialmente quando comparados aos testes que utilizaram populações menores. O desempenho do AG, entretanto, mostra-se sensível à faixa de variação dos parâmetros, com potencial de redução nos erros quando essa faixa é mais adequadamente delimitada nas populações. Além disso, o AG destaca-se pela eficácia nas variáveis de estado das redes calibradas, como cargas de pressão e concentrações de cloro, obtendo resultados satisfatórios para esses indicadores.

Um aspecto crucial a ser destacado é que — embora as variáveis de estado sejam os atributos mais relevantes para o usuário —, nas calibrações, a obtenção de parâmetros calculados próximos aos valores gabarito deve ser a principal meta. Ao modelar uma RDA, busca-se reproduzir fielmente a configuração real da rede, o que possibilita uma análise mais precisa de diferentes cenários de demanda e facilita a programação de futuras expansões. No entanto, nas calibrações de RDAs, há uma dificuldade inerente relacionada à natureza hidráulica do processo e à modelagem da qualidade da água: as cargas de pressão e concentrações de cloro observadas podem ser alcançadas por diferentes configurações de rugosidades absolutas e coeficientes de decaimento de cloro. Portanto, é fundamental utilizar uma quantidade substancial de observações sempre que possível, a fim de reduzir o número de combinações dos parâmetros que satisfaçam esses dados observados.

Com relação à modelagem e calibração das RDAs da UFPI, notou-se que o método Híbrido-G, na Rede CT-CCHL, permitiu bons ajustes de rugosidades absolutas e cargas de pressão que se alinharam aos dados de campo. Uma configuração inicial adequada, aliada à segmentação das tubulações por período de instalação, contribuiu para simulações próximas à realidade. Em contraste, a Rede CCN-CCS apresentou inconsistências devido às incertezas em parâmetros como traçado e características das tubulações, o que dificultou uma calibração confiável. Esses resultados destacam a importância de informações precisas para a eficácia da calibração, maximizando a representatividade dos modelos hidráulicos e sua aplicabilidade em operações de rede.

Em síntese, este estudo representa uma contribuição significativa para o campo da modelagem de RDAs, ao propor e validar uma metodologia de calibração inovadora. Os resultados obtidos destacam a eficácia dos métodos RNA-G e Híbrido-G, mesmo em cenários com poucos dados observados. Espera-se que os métodos desenvolvidos neste estudo possam ser aplicados em diversos contextos práticos, contribuindo para o aprimoramento das técnicas de modelagem e gestão de sistemas de distribuição de água em todo o mundo.

Para estudos posteriores, recomenda-se explorar a eficácia dos métodos RNA-T e Híbrido-T por meio de ajustes nos parâmetros e hiperparâmetros. A convergência rápida observada nesses métodos sugere que ainda há margem para melhorias em seus resultados. Dentre as diversas abordagens possíveis, destaca-se a investigação do impacto de diferentes funções de ativação, taxas de aprendizado variadas e até mesmo a exploração de arquiteturas distintas para as RNAs. Além disso, sugere-se implementar uma nova etapa no método Híbrido-T, em que seus resultados retroalimentem o MIGHA. Essa abordagem visa aproveitar a rapidez do MIGHA — mitigando sua dependência dos parâmetros iniciais — ao utilizar os resultados do Híbrido-T como base para um refinamento adicional, com potencial para alcançar soluções ainda mais precisas.

REFERÊNCIAS

- AJAZ, M.; AHMAD, D. Optimal Water Quality Simulation of the Proposed Water Distribution System for the University of Kashmir Using EPANET 2.2 and Leakage Modelling of the Network Using EPANET Extension—WaterNetGen. **Environmental Sciences Proceedings**, Basel, v. 25, n. 27, p. 1-7, 16 mar. 2023. MDPI. <http://dx.doi.org/10.3390/ecws-7-14251>.
- ARAUJO, R. B. A.; BEZERRA, A. A.; CASTRO, M. A. H. Detecção de vazamentos em redes de distribuição de água pela aplicação do Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo (MIGHA) para calibrar vazões mediante modelagem computacional. **Revista Dae**, São Paulo, v. 69, n. 232, p. 45-56, 24 set. 2021. <http://dx.doi.org/10.36659/dae.2021.060>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12.218**: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- AVCI, A.; KARAGOZ, I. A new explicit friction factor formula for laminar, transition and turbulent flows in smooth and rough pipes. **European Journal Of Mechanics - B/Fluids**, Amsterdam, v. 78, p. 182-187, nov. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.euromechflu.2019.07.007>.
- AYATI, A. H.; HAGHIGHI, A.; GHAFOURI, H. R. Machine Learning–Assisted Model for Leak Detection in Water Distribution Networks Using Hydraulic Transient Flows. **Journal Of Water Resources Planning And Management**, Reston, v. 148, n. 2, p. 1-14, fev. 2022. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0001508](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001508).
- BADEENEZHAD, A.; DARABI, K.; HEYDARI, M.; AMRANE, A.; GHELICHI-GHOJOGH, M.; PARSEH, I.; DARVISHMOTEVALLI, M.; AZADBAKHT, Omid; JAVANMARDI, P. Temporal distribution and zoning of nitrate and fluoride concentrations in Behbahan drinking water distribution network and health risk assessment by using sensitivity analysis and Monte Carlo simulation. **International Journal Of Environmental Analytical Chemistry**, Londres, v. 103, n. 13, p. 3163-3180, 29 mar. 2021. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/03067319.2021.1903455>.
- BALACCO, G.; CARBONARA, A.; GIOIA, A.; IACOBELLIS, V.; PICCINNI, A. Evaluation of Peak Water Demand Factors in Puglia (Southern Italy). **Water**, Basel, v. 9, n. 2, p. 1-14, 8 fev. 2017. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w9020096>.
- BERARDI, L.; GIUSTOLISI, O. Calibration of Design Models for Leakage Management of Water Distribution Networks. **Water Resources Management**, London, v. 35, n. 8, p. 2537-2551, 26 maio 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-021-02847-x>.
- BEZERRA, A. A.; CASTRO, M. A. H.; ARAUJO, R. S. A. Absolute roughness calculation by the friction factor calibration using the Alternative Hydraulic Gradient Iterative Method on water distribution networks. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.22, e24, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.021720160018>.

BEZERRA, A. A. **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.** 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Civil – Recursos Hídricos) - Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

BISHOP, C. M. **Pattern Recognition and Machine Learning.** Nova Iorque :Springer, 2006. 738p.

BRAGA, A. P.; LUDERMIR, T. B.; CARVALHO, A. C. P. L. F. **Redes Neurais Artificiais: Teoria e aplicações.** 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 248p.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. **Diagnóstico Temático dos Serviços de Água e Esgoto – Visão Geral: ano de referência 2022.** Brasília: SNSA/Ministério das Cidades, 2023.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria de consolidação nº 5:** Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. Brasília: Ministério da Saúde, 2017.

BRKIĆ, D. New explicit correlations for turbulent flow friction factor. **Nuclear Engineering And Design**, Amsterdam, v. 241, n. 9, p.4055-4059, set. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nucengdes.2011.07.042>.

BUAMAH, R.; AKODWAA-BOADI, K.; PAINTSIL, M.; BAAH-ENNUMH, E. K.; ADJAOTTOR, A. A. Modelling the chlorine decay process in a distribution network using a pilot system. **Water Practice And Technology**, Londres, v. 9, n. 4, p. 534-550, 1 dez. 2014. IWA Publishing. <http://dx.doi.org/10.2166/wpt.2014.060>.

CAPELO, M.; BRENTAN, B.; MONTEIRO, L.; COVAS, D. Near-Real Time Burst Location and Sizing in Water Distribution Systems Using Artificial Neural Networks. **Water**, Basel, v. 13, n. 13, p. 1-23, 1 jul. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w13131841>.

CHAPRA, S. C. **Surface water quality modeling.** Long Grove, IL: Waveland Press, 1997.

CHEN, H.; LU, F.; HE, B. Topographic property of backpropagation artificial neural network: from human functional connectivity network to artificial neural network. **Neurocomputing**, Amsterdam, v. 418, p. 200-210, dez. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.neucom.2020.07.103>.

CHIAPPINI, F. A.; ALLEGRINI, F.; GOICOECHEA, H. C.; OLIVIERI, A. C. Sensitivity for Multivariate Calibration Based on Multilayer Perceptron Artificial Neural Networks. **Analytical Chemistry**, Washington, v. 92, n. 18, p. 12265-12272, 19 ago. 2020. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/acs.analchem.0c01863>.

CHU, S.; ZHANG, T.; XU, C.; YU, T.; SHAO, Y. Dealing with Data Missing and Outlier to Calibrate Nodal Water Demands in Water Distribution Systems. **Water Resources Management**, Londres, v. 35, n. 9, p. 2863-2878, 17 jun. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-021-02873-9>.

DE SANTI, M.; ALI, S. I.; ARNOLD, M.; FESSELET, J-F; HYVÄRINEN, A. M. J.; TAYLOR, D.; KHAN, U. T. Modelling point-of-consumption residual chlorine in humanitarian response: can cost-sensitive learning improve probabilistic forecasts?. **Plos Water**, São Francisco, v. 1, n. 9, p. 1-30, 6 set. 2022. Public Library of Science (PLoS). <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pwat.0000040>.

DÍAZ-DAMACILLO, L.; PLASCENCIA, G. A new six parameter model to estimate the friction factor. **Aiche Journal**, Hoboken, v. 65, n. 4, p. 1144-1148, 28 jan. 2019. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/aic.16535>.

DINI, M.; TABESH, M. Water distribution network quality model calibration: a case study – Ahar. **Water Science And Technology: Water Supply**, Londres, v. 17, n. 3, p.759-770, 27 out. 2016. IWA Publishing. <http://dx.doi.org/10.2166/ws.2016.166>.

ESPARTEL, L. **Hidráulica Aplicada**. Porto Alegre: SAGAH, 2017. E-book. ISBN 9788595020276. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595020276/>. Acesso em: 09 mar. 2023.

FAN, X.; YU, X. An innovative machine learning based framework for water distribution network leakage detection and localization. **Structural Health Monitoring**, Thousand Oaks, p. 1626-1644, 29 ago. 2021. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/14759217211040269>.

FISHER, I.; KASTL, G.; SATHASIVAN, A. A comprehensive bulk chlorine decay model for simulating residuals in water distribution systems. **Urban Water Journal**, Londres, v. 14, n. 4, p.361-368, 28 fev. 2016. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/1573062x.2016.1148180>.

GARCÍA-ÁVILA, F.; AVILÉS-AÑAZCO, A.; ORDOÑEZ-JARA, J.; GUANUCHI-QUEZADA, C.; PINO, L. F.; RAMOS-FERNÁNDEZ, L. Modeling of residual chlorine in a drinking water network in times of pandemic of the SARS-CoV-2 (COVID-19). **Sustainable Environment Research**, Londres, v. 31, n. 1, p. 1-15, 11 mar. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1186/s42834-021-00084-w>.

GIRALDO-GONZÁLEZ, M. M.; RODRÍGUEZ, J. P. Comparison of Statistical and Machine Learning Models for Pipe Failure Modeling in Water Distribution Networks. **Water**, Basel, v. 12, n. 4, p. 1-22, 17 abr. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w12041153>.

GÓMEZ-CORONEL, L.; DELGADO-AGUIÑAGA, J. A.; SANTOS-RUIZ, I.; NAVARRO-DÍAZ, A. Estimation of Chlorine Concentration in Water Distribution Systems Based on a Genetic Algorithm. **Processes**, Basel, v. 11, n. 3, p. 1-17, 23 fev. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/pr11030676>.

GUO, X.; ZHANG, C. Use of the physical feature of groundwater flow system to reduce the mathematical complexity in parameter identification – A practical and efficient automated procedure. In: GROUNDWATER MODELING CONFERENCE. 1994. Fort Collins, Colorado. **Proceedings of the 1994 groundwater modeling conference**. Fort Collins, Colorado, p. 111-118, 1994.

GUO, X.; ZHANG, C. Hydraulic Gradient Comparison Method to Estimate Aquifer Hydraulic Parameters Under Steady-State Conditions. **Ground Water**, Hoboken, v. 38, n. 6, p.815-826, nov. 2000. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-6584.2000.tb00679.x>.

HELLER, L.; PÁDUA, V. L. **Abastecimento de água para consumo humano**, 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG. 2010. 872p.

HERRERA, M.; TORGO, L.; IZQUIERDO, J.; PÉREZ-GARCÍA, R. Predictive models for forecasting hourly urban water demand. **Journal Of Hydrology**, Amsterdam, v. 387, n. 1-2, p. 141-150, jun. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.04.005>.

HOSSAIN, Sharif; HEWA, Guna A.; CHOW, Christopher W. K.; COOK, David. Development and Comparison of Water Quality Network Model and Data Analytics Model for Monochloramine Decay Prediction. **Water**, Basel, v. 14, n. 13, p. 1-20, 24 jun. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w14132021>

HOWE, K. J.; HAND, D. W.; CRITTENDEN, J. C.; TRUSSELL, R. R.; TCHOBANOGLOUS, G. **Princípios de Tratamento de Água**. São Paulo: Cengage Learning Brasil, 2016. E-book. ISBN 9788522124084. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788522124084/>. Acesso em: 31 mar. 2023.

HU, H. VReLU Activation Functions for Artificial Neural Networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NATURAL COMPUTATION, 14., 2018, Huangshan, China. **Proceedings of the 2018 14Th International Conference On Natural Computation, Fuzzy Systems And Knowledge Discovery (Icnc-Fskd)**. Huangshan: IEEE, jul. 2018. p.1-5. <http://dx.doi.org/10.1109/fskd.2018.8687140>.

IGLEWICZ, B.; HOAGLIN, D. **How to Detect and Handle Outliers**. Vol. 16. Milwaukee: ASQC Quality Press, 1993.

IZBICKI, R.; SANTOS, T. M. **Aprendizado de máquina: uma abordagem estatística**. São Carlos: Uiclap, 2020. 270p. ISBN 978-65-00-02410-4. Disponível em: <https://tiagoms.com/publications/ame/>

JADHAO, R. D.; GUPTA, R. Calibration of water distribution network of the Ramnagar zone in Nagpur City using online pressure and flow data. **Applied Water Science**, Londres, v. 8, n. 1, p. 1-10, 1 fev. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s13201-018-0672-3>.

JAFARI, S. M.; ZAHIRI, A. R.; HADAD, O. B.; TABARI, M. M. R. A hybrid of six soft models based on ANFIS for pipe failure rate forecasting and uncertainty analysis: a case study of gorgan city water distribution network. **Soft Computing**, Londres, v. 25, n. 11, p. 7459-7478, 8 mar. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00500-021-05706-4>.

KANG, S-W; AHN, K-H. The Influence of Organic Matter Origin on the Chlorine Bulk Decay Coefficient in Reclaimed Water. **Water**, Basel, v. 14, n. 5, p. 1-11, 28 fev. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w14050765>.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de Qualidade e Tratamento de Água**. 4. ed. Campinas: Editora Átomo, 2016.

LIMA, I.; PINHEIRO, C. A. M.; SANTOS, F. A. O. **Inteligência Artificial**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. *E-book*. ISBN 9788595152724. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595152724/>. Acesso em: 28 fev. 2024.

LI, Z.; WANG, J.; YAN, H.; LI, S.; TAO, T.; XIN, K. Fast Detection and Localization of Multiple Leaks in Water Distribution Network Jointly Driven by Simulation and Machine Learning. **Journal Of Water Resources Planning And Management**, Reston, v. 148, n. 9, p. 1-13, set. 2022. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0001574](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001574).

MALEKI, M.; ARDILA, A.; ARGAUD, P-O; PELLETIER, G.; RODRIGUEZ, M. Full-scale determination of pipe wall and bulk chlorine degradation coefficients for different pipe categories. **Water Supply**, Londres, v. 23, n. 2, p. 657-670, 31 jan. 2023. IWA Publishing. <http://dx.doi.org/10.2166/ws.2023.020>.

MAGINI, R.; BONIFORTI, M.; GUERCIO, R. Generating Scenarios of Cross-Correlated Demands for Modelling Water Distribution Networks. **Water**, Basel, v. 11, n. 3, p. 1-20, 8 mar. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w11030493>.

MARQUES, S. M.; SILVA, F. G. B.; SILVA, A. T. Y. L.; BARBEDO, M. D. G.; MARCONDES, M. C.; ALVES, S. C. R.; REIS, J. A. T. Evaluation of hydraulic behavior of water distribution network varying reservoirs levels, roughness, and diameters with the use of R and EPANET. **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal Of Applied Science**, Taubaté, v. 18, p. 1-9, 17 mar. 2023. Instituto de Pesquisas Ambientais em Bacias Hidrograficas (IPABHi). <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.2893>.

MCCULLOCH, W. S.; PITTS, W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. **The Bulletin Of Mathematical Biophysics**, Londres, v. 5, n. 4, p. 115-133, dez. 1943. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/bf02478259>.

MEIRELLES, G.; MANZI, D.; BRENTAN, B.; GOULART, T.; LUVIZOTTO, E. Calibration Model for Water Distribution Network Using Pressures Estimated by Artificial Neural Networks. **Water Resources Management**, Londres, v. 31, n. 13, p. 4339-4351, 5 ago. 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-017-1750-2>.

MINAEE, R. P.; AFSHARNIA, M.; MOGHADDAM, A.; EBRAHIMI, A. A.; ASKARISHAHI, M.; MOKHTARI, M. Calibration of water quality model for distribution networks using genetic algorithm, particle swarm optimization, and hybrid methods. **Methodsx**, Amsterdam, v. 6, p. 540-548, 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mex.2019.03.008>.

MOGHADDAM, A.; MOKHTARI, M.; AFSHARNIA, M.; MINAEE, R. P. Simultaneous Hydraulic and Quality Model Calibration of a Real-World Water Distribution Network. **Journal Of Water Resources Planning And Management**, Reston, v. 146, n. 6, p. 1-7, jun. 2020. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0001209](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001209).

MOMPREMIER, R.; MARILES, O. A. F.; GHEBREMICHAEL, K.; NUÑEZ, J. G.; PÉREZ, T. R. Impact of pipe material on the wall reaction coefficients and its application in the rehabilitation of water supply system of San Pedro Nexapa, State of Mexico. **Water Supply**, Londres, v. 22, n. 4, p. 4296-4306, 14 fev. 2022. IWA Publishing. <http://dx.doi.org/10.2166/ws.2022.049>.

MONTAVON, G.; ORR, G. B.; MÜLLER, K.-R. **Neural Networks: Tricks of the Trade**. 2. ed. Nova Iorque: Springer, 2012. 754p.

NETTO, J. M. A.; FERNÁNDEZ, M. F. Y. **Manual de Hidráulica**. 9.ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2015. 632p.

OZDEMIR, O. N.; BUYRUK, T. Effect of Travel Time and Temperature on Chlorine Bulk Decay in Water Supply Pipes. **Journal Of Environmental Engineering**, Reston, v. 144, n. 3, p. 1-10, mar. 2018. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)ee.1943-7870.0001321](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)ee.1943-7870.0001321).

PEREA, R. G.; BALLESTEROS, R.; ORTEGA, J. F.; MORENO, M. Á. Water and energy demand forecasting in large-scale water distribution networks for irrigation using open data and machine learning algorithms. **Computers And Electronics In Agriculture**, Amsterdam, v. 188, p. 1-13, set. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2021.106327>.

PEREIRA, R. F. **Calibração do coeficiente de decaimento de cloro (kw) em redes de abastecimento de água utilizando o método iterativo do gradiente hidráulico alternativo (MIGHA)**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Recursos Hídricos) - Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

PEREIRA, R.; CASTRO, M. Calibração do Coeficiente de Decaimento do Cloro (kw) em Redes de Abastecimento de Água Utilizando o Método Iterativo do Gradiente. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 18, n. 4, p.67-76, 2013. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v18n4.p67-76>.

PÉREZ, R.; MARTÍNEZ-TORRENTS, A.; MARTÍNEZ, M.; GRAU, S.; VINARDELL, L.; TOMÀS, R.; MARTÍNEZ-LLADÓ, X.; JUBANY, I. Chlorine Concentration Modelling and Supervision in Water Distribution Systems. **Sensors**, Basel, v. 22, n. 15, p. 1-14, 26 jul. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/s22155578>.

PORDAL, A.; NOSHADI, M.; MASOUDI, M. H. Analysis of Drinking Water Distribution Network Using EPANET Model (Case Study: part of shiraz water distribution network). **Iranian Journal Of Science And Technology, Transactions Of Civil Engineering**, Londres, v. 47, n. 3, p. 1791-1799, 11 nov. 2022. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s40996-022-00973-z>.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**, 4. ed. São Carlos: EESC USP/Projeto REENGE. 2006. 519p.

RATHI, S.; GUPTA, R.; LABHASETWAR, P.; NAGARNAIK, P. Challenges in calibration of water distribution network: a case study of ramnagar elevated service reservoir command area in nagpur city, india. **Water Supply**, Londres, v. 20, n. 4, p. 1294-1312, 23 mar. 2020. IWA Publishing. <http://dx.doi.org/10.2166/ws.2020.047>.

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. Tese (Doutorado em Engenharia Civil – Recursos Hídricos) -Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

ROSSMAN, L. A.; CLARK, R. M.; GRAYMAN, W. M. Modeling Chlorine Residuals in Drinking-Water Distribution Systems. **Journal Of Environmental Engineering**, Reston, v. 120, n. 4, p. 803-820, jul. 1994. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9372\(1994\)120:4\(803\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9372(1994)120:4(803))

ROSSMAN, L. A.; WOO, H.; TRYBY, M.; SHANG, F.; JANKE, R.; HAXTON, T. **EPANET 2.2 User Manual**. Cincinnati, Ohio: United States Environmental Protection Agency (EPA), 2000. Disponível em: https://epanet2.readthedocs.io/_/downloads/en/latest/pdf/. Acesso em: 25 mar. 2023.

SALVINO, M. M.; CARVALHO, P. S. O.; GOMES, H. P. Calibração multivariada de redes de abastecimento de água via algoritmo genético multiobjetivo. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, São Paulo, v. 20, n. 3, p. 503-512, set. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522015020000099484>.

SAIDAN, M.; RAWAJFEH, K.; NASRALLAH, S.; MERIC, S.; MASHAL, A. Evaluation Of Factors Affecting Bulk Chlorine Decay Kinetics For The Zai Water Supply System In Jordan: Case Study. **Environment Protection Engineering**, Wrocław, v. 43, n. 4, p.223-231, abr. 2017. doi: 10.5277/epe170417.

SANGROULA, U.; HAN, K.-H.; KOO, K.-M.; GNAWALI, K.; YUM, K.-T. Optimization of Water Distribution Networks Using Genetic Algorithm Based SOP–WDN Program. **Water**, Basel, v. 14, n. 6, p. 1-24, 9 mar. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w14060851>.

SCHUSTER, H.; ARAUJO, H. Uma Formulação Alternativa do Método Iterativo de Gradiente Hidráulico no Procedimento de Calibração dos Parâmetros Hidrodinâmicos do Sistema Aquífero. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 9, n. 2, p. 31-37, 2004. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v9n2.p31-37>.

SECKLER, S. **Tratamento de Água - Concepção, Projeto e Operação de Estações de Tratamento**. Rio de Janeiro: LTC, 2017. E-book. ISBN 9788595153851. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595153851/>. Acesso em: 03 abr. 2023.

SANTOS, A. N. C. **Estudo de Calibração de uma rede de Distribuição de água de Itajubá-MG utilizando os Algoritmos Genéticos**. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos), Programa De Pós-Graduação Em Meio Ambiente E Recursos Hídricos, Universidade Federal De Itajubá, Itajubá, 2010.

SILVA, F. G. B. **Estudos de Calibração de Redes de Distribuição de Água Através de Algoritmos Genéticos**. 2003. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

SILVA, G. A. B.; MEIRA, C. M. B. S.; SANTANA, C. F. D.; COURA, M. A.; OLIVEIRA, R.; NASCIMENTO, R. S.; SANTOS, W. B. Simulação do decaimento de cloro residual livre em reservatórios de distribuição de água. **Revista Dae**, São Paulo, v. 67, n. 218, p. 92-103, 2019. Revista DAE. <http://dx.doi.org/10.4322/dae.2019.036>.

SILVA, I. N.; SPATTI, D. H.; FLAUZINO, R. A. **Redes Neurais Artificiais: Para engenharia e ciências aplicadas**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2016. 431p.

SONAJE, N. P.; JOSHI, M. G. A review of modeling and application of a water distribution networks (WDN) softwares. **International Journal Of Technical Research And Applications**, [S.l.], v. 3, n. 5, p.174-178, set. 2015. e-ISSN: 2320-8163.

SOUSA, D. L. **Calibração de rugosidades em redes de distribuição de água através de uma adaptação do método iterativo do gradiente hidráulico alternativo (MIGHA)**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Recursos Hídricos) - Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.

SOUSA, D. L.; BEZERRA, A. A.; CASTRO, M. A. H. Proposta de uma nova metodologia para calibração de rugosidades em redes com diferentes materiais. **Revista Dae**, São Paulo, v. 69, n. 228, p. 16-33, 8 dez. 2020. <http://dx.doi.org/10.36659/dae.2021.002>.

SOUSA, D. L.; BEZERRA, A. A.; CASTRO, M. A. H.; RODRIGUES NETO, G. C.; ARAUJO, R. B. A. Desenvolvimento de um modelo híbrido MIGHA-RNA para calibração de rugosidades absolutas em redes de distribuição de água. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, São Paulo, v. 27, n. 6, p. 1199-1207, nov. 2022. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-415220220151>.

SOUSA, J. S. C.; NETO, J. D. Equação explícita para cálculo do fator de atrito de Darcy-Weisbach em projetos de irrigação pressurizada. **Irriga**, Botucatu, v. 19, n. 1, p.137-148, jan. 2014. <https://doi.org/10.15809/irriga.2014v19n1p137>.

SOUSA, B. P.; OLIVEIRA, J. P. R. C.; PEREIRA, T. A. S. Estimativa do consumo de água no restaurante universitário do campus do sertão da universidade federal de alagoas. In: XV SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE. 2020. Caruaru, Pernambuco. **Anais do XV Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Caruaru, Pernambuco, 2020.

SWAMEE, P.K. Design of a Submarine Pipeline. **Journal of Transportation Engineering**, Reston, v.119, p.159-170. 1993. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1993\)119:1\(159\)n](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1993)119:1(159)n).

TORKOMANY, M. R.; HASSAN, H. S.; SHOUKRY, A.; ABDELRAZEK, A. M.; ELKHOLY, M. An Enhanced Multi-Objective Particle Swarm Optimization in Water Distribution Systems Design. **Water**, Basel, v. 13, n. 10, p. 1-21, 11 maio 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w13101334>.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de Água**. 3. ed. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2006. 644p.

TZATCHKOV, V. G.; ALDAMA, A. A.; ARREGUIN, F. I. Advection-Dispersion-Reaction Modeling in Water Distribution Networks. **Journal Of Water Resources Planning And Management**, Reston, v. 128, n. 5, p.334-342, set. 2002. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9496\(2002\)128:5\(334\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9496(2002)128:5(334)).

TZATCHKOV, V. G.; YAMANAKA, V.H.A.; ORTIZ, V.J.B.; CORTÉS, F.I.A. **Avances en la hidráulica de redes de distribución de agua potable**. Jiutepec: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2014. 500p.

VARGAS, T. F.; BAÍA, C. C.; MACHADO, T. L. S.; DÓREA, C. C.; BASTOS, W. R. Decay of Free Residual Chlorine in Wells Water of Northern Brazil. **Water**, Basel, v. 13, n. 7, p. 1-13, 4 abr. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w13070992>.

VISSMAN JUNIOR, W.; HAMMER, M. J.; PEREZ, E. M.; CHADIK, P. A. **Water Supply and Pollution Control**: pearson new international edition. 8. ed. Harlow: Pearson Education, 2014. 748 p.

WANG, S.; TAHA, A. F.; SELA, L.; GIACOMONI, M. H.; GATSI, N. A New Derivative-Free Linear Approximation for Solving the Network Water Flow Problem With Convergence Guarantees. **Water Resources Research**, Washington, v. 56, n. 3, p. 1-23, 25 fev. 2020. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2019wr025694>.

WANG, Z.; LIU, K.; LI, J.; ZHU, Y.; ZHANG, Y. Various Frameworks and Libraries of Machine Learning and Deep Learning: a survey. **Archives Of Computational Methods In Engineering**, Londres, v. 31, n. 1, p. 1-24, 1 fev. 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11831-018-09312-w>.

WESTON, S.L.; COLLINS, R.P.; BOXALL, J.B. An experimental study of how hydraulic transients cause mobilisation of material within drinking water distribution systems. **Water Research**, Amsterdam, v. 194, p. 1-11, abr. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2021.116890>.

YU, T.; CHEN, X.; YAN, W.; XU, Z.; YE, M. Leak detection in water distribution systems by classifying vibration signals. **Mechanical Systems And Signal Processing**, Amsterdam, v. 185, p. 1-16, fev. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109810>.

ZECCHIN, A. C.; DO, N.; GONG, J.; LEONARD, M.; LAMBERT, M. F.; STEPHENS, M. L. Optimal Pipe Network Sensor Layout Design for Hydraulic Transient Event Detection and Localization. **Journal Of Water Resources Planning And Management**, Reston, v. 148, n. 8, p. 1-16, ago. 2022. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0001536](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001536).

ZHONG, D.; FENG, W.; MA, W.; MA, J.; DU, X.; ZHOU, Z. A variable parabolic reaction coefficient model for chlorine decay in bulk water. **Water Research**, Amsterdam, v. 201, p. 1-10, ago. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2021.117302>.

ZOUNEMAT-KERMANI, M.; RAMEZANI-CHARMAHINEH, A.; ADAMOWSKI, J.; KISI, O. Investigating the management performance of disinfection analysis of water distribution networks using data mining approaches. **Environmental Monitoring And Assessment**, Londres, v. 190, n. 7, p. 1-15, 13 jun. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-018-6769-1>.

ZUTHI, M. F. R.; KHAN, F.; SAJOL, M. S. Z.; KABIR, M.; KAISER, N. M. E.; RAHMAN, M. S.; HASAN, S.M.F. Combined application of EPANET and empirical model for possible formation of trihalomethanes in water distribution network of Chattogram city to identify potential carcinogenic health risk zone. **Heliyon**, Amsterdam, v. 9, n. 6, p. 1-15, jun. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16615>.

**APÊNDICE A – DADOS DOS NÓS DA CONFIGURAÇÃO GABARITO DA REDE
SOUSA NA HORA 70**

(continua)

Nó	Cota (m)	C (L/s)	P (m)	C _c (mg/L)
1	217,5910	0,32816	5,3190	1,8969
2	217,1130	0,32816	5,4707	1,7885
3	214,6870	0,32816	7,7124	1,6696
4	209,8390	0,32816	12,1166	1,5262
5	202,3310	0,32816	19,1932	1,4614
6	197,9900	0,32816	23,3643	1,3535
7	195,4390	0,21875	25,7673	1,2601
8	192,9440	0,32816	28,2191	1,0688
9	193,9970	0,32816	27,0820	1,0168
10	193,8250	0,32816	27,1574	0,8831
11	193,5780	0,32816	27,2729	0,7450
12	192,2160	0,32816	28,5627	0,6445
13	189,2210	0,21875	31,5509	0,4933
14	193,6150	0,32816	27,1710	0,6425
15	196,1170	0,32816	24,7651	0,7704
16	199,1740	0,32816	21,9005	0,8755
17	204,2490	0,32816	17,0626	1,0014
18	208,7480	0,32816	12,7959	1,0844
19	207,0410	0,21875	14,6153	1,1321
20	209,3160	0,32816	12,5922	1,2034
21	212,0580	0,32816	10,0104	1,2644
22	214,5690	0,32816	7,6263	1,4118
23	216,3900	0,32816	6,0001	1,5622
24	217,1110	0,32816	5,6229	1,7572
25	217,0014	0,43750	5,4002	1,6204
26	216,6985	0,43750	5,5181	1,4518
27	215,0251	0,43750	7,0689	1,3444
28	213,1508	0,43750	8,7334	1,2503
29	210,5777	0,43750	11,1739	1,1601
30	215,0377	0,43750	7,1138	1,5149
31	214,3565	0,43750	7,6454	1,3699
32	213,3148	0,43750	8,5865	1,2409
33	211,9571	0,43750	9,7848	1,1550
34	208,1980	0,43750	13,2101	1,0797
35	209,1093	0,43750	12,7783	1,3642
36	209,8622	0,43750	11,9049	1,2193
37	208,3773	0,43750	13,1898	1,1579
38	206,2965	0,43750	15,1446	1,1018
39	203,2338	0,43750	17,9050	1,0183
40	203,0698	0,43750	18,4116	1,2961
41	204,0361	0,43750	17,3383	1,1956
42	202,9723	0,43750	18,3250	1,0841
43	202,0185	0,43750	19,0368	0,9931
44	198,6943	0,43750	22,2167	0,9340
45	197,3265	0,43750	23,9843	1,2455

(conclusão)				
Nó	Cota (m)	C (L/s)	P (m)	C _c (mg/L)
46	198,2400	0,43750	22,9459	1,1279
47	198,2789	0,43750	22,8317	1,0271
48	197,5003	0,43750	23,3944	0,9140
49	195,3173	0,43750	25,4813	0,8453

Fonte: Elaborado pelo autor.

**APÊNDICE B – DADOS DOS TRECHOS DA CONFIGURAÇÃO GABARITO DA
REDE SOUSA NA HORA 70**

(continua)

Trecho	L (m)	D (mm)	ϵ_g (mm)	kw _g (m/dia)	Q (L/s)
1	100	150	0,3857	-0,7888	10,5519
2	100	150	0,4841	-1,1582	7,6577
3	100	100	0,3600	-0,8267	4,2336
4	100	75	0,0075	-0,2336	2,3569
5	100	75	0,0062	-0,4899	1,3945
6	100	50	0,0049	-0,1791	0,4277
7	100	50	0,0030	-0,4001	0,2089
8	100	50	0,0068	-0,1064	0,3078
9	100	50	0,0079	-0,4381	0,3336
10	100	50	0,0026	-0,3794	0,3999
11	100	50	0,0022	-0,1952	0,2824
12	100	50	0,0077	-0,3890	0,0942
13	100	50	0,0084	-0,3235	0,1246
14	100	50	0,0073	-0,4447	0,3327
15	100	50	0,0081	-0,4564	0,4963
16	100	50	0,0037	-0,4756	0,5615
17	100	50	0,0024	-0,3194	0,5557
18	100	50	0,0094	-0,1017	0,3638
19	100	50	0,0015	-0,2056	0,5826
20	100	75	0,0035	-0,2656	1,3512
21	100	100	0,4209	-1,2665	2,1656
22	100	100	0,2727	-1,2218	2,8372
23	100	100	0,4283	-1,3379	3,6340
24	100	150	0,4171	-1,4085	7,6051
25	100	100	0,4977	-1,0476	2,5660
26	100	100	0,3826	-1,4400	2,6671
27	100	100	0,3462	-0,5254	2,1701
28	100	75	0,0018	-0,3769	1,5777
29	100	75	0,0099	-0,2476	1,2079
30	100	50	0,0047	-0,1813	0,5200
31	100	100	0,3948	-0,5733	3,0959
32	100	100	0,3117	-0,9426	2,4367
33	100	100	0,3198	-0,7878	1,9693
34	100	75	0,0058	-0,2659	1,3451
35	100	50	0,0056	-0,3205	0,6819
36	100	50	0,0045	-0,1013	0,3340
37	100	100	0,4441	-0,5464	1,5486
38	100	100	0,3248	-1,3203	2,1641
39	100	75	0,0020	-0,4433	1,5355
40	100	75	0,0032	-0,1435	1,1782
41	100	50	0,0021	-0,1361	0,6466
42	100	50	0,0081	-0,3467	0,2630
43	100	75	0,0045	-0,3706	0,6342
44	100	75	0,0079	-0,2737	1,0700
45	100	75	0,0041	-0,4184	0,8896

(conclusão)

Trecho	L (m)	D (mm)	ε_g (mm)	kw _g (m/dia)	Q (L/s)
46	100	50	0,0055	-0,3198	0,5673
47	100	50	0,0098	-0,2008	0,4200
48	100	50	0,0084	-0,1512	0,1645
49	100	75	0,0075	-0,2944	0,6387
50	100	75	0,0020	-0,3729	1,1739
51	100	75	0,0096	-0,3571	0,8744
52	100	50	0,0037	-0,3405	0,5321
53	100	50	0,0099	-0,1150	0,3321
54	100	50	0,0084	-0,2502	0,1201
55	100	100	0,3607	-0,8290	3,6430
56	100	100	0,4016	-1,1539	3,1043
57	100	100	0,2744	-1,4088	3,3261
58	100	75	0,0098	-0,2973	2,2731
59	100	75	0,0041	-0,1676	1,3998
60	100	50	0,0051	-0,3785	0,4271
61	100	50	0,0055	-0,2502	0,4686
62	100	50	0,0092	-0,4190	0,5281
63	100	50	0,0045	-0,4384	0,5579
64	100	50	0,0047	-0,1709	0,7489
65	100	50	0,0045	-0,4377	0,4919
66	100	50	0,0062	-0,1942	0,3539
67	100	50	0,0044	-0,2670	0,3434
68	100	50	0,0039	-0,3742	0,4984
69	100	50	0,0016	-0,1066	0,6851
70	100	50	0,0034	-0,2457	0,6049
71	100	50	0,0029	-0,1828	0,4897
72	100	50	0,0018	-0,3143	0,3945
73	100	50	0,0019	-0,1306	0,4863
74	100	50	0,0036	-0,4851	0,4185
75	100	50	0,0027	-0,2963	0,6442
76	100	50	0,0088	-0,4236	0,7384
77	100	50	0,0050	-0,2941	0,4482
78	100	50	0,0016	-0,4642	0,2107
79	100	50	0,0096	-0,2971	0,4405
80	100	50	0,0090	-0,2220	0,6909
81	100	50	0,0091	-0,4038	0,6013
82	100	50	0,0066	-0,2340	0,5474
83	100	50	0,0024	-0,2280	0,3654
84	100	50	0,0047	-0,4968	0,1399
85	50	200	0,3450	-1,0365	18,4851

Fonte: Elaborado pelo autor.

**APÊNDICE C – CARGAS DE PRESSÃO OBTIDAS NAS CALIBRAÇÕES DAS
RUGOSIDADES ABSOLUTAS DA REDE HELLER-PÁDUA**

Nó	Cargas de pressão obtidas pelas calibrações com uma observação (mca)						
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
2	21,4666	21,7952	21,4681	21,4661	21,4661	21,4244	21,5431
3	31,1310	31,6985	31,1336	31,1302	31,1302	31,0407	31,2549
4	29,4214	29,9895	29,4240	29,4205	29,4205	29,3307	29,5454
5	29,4904	30,0627	29,4931	29,4896	29,4896	29,3976	29,6088
6	29,1945	29,9223	29,1979	29,1934	29,1934	29,0622	29,2891
7	26,9422	27,6766	26,9456	26,9410	26,9410	26,8063	27,0305
8	25,5822	26,8685	25,5882	25,5803	25,5803	25,4972	25,5747
9	23,2652	24,5531	23,2712	23,2633	23,2633	23,1794	23,2581
10	21,6242	22,9611	21,6305	21,6222	21,6222	21,5181	21,6176
11	16,7113	18,0492	16,7175	16,7092	16,7092	16,6046	16,7049
12	23,2416	24,5327	23,2476	23,2396	23,2396	23,1542	23,2377

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nó	Cargas de pressão obtidas pelas calibrações com três observações (mca)						
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
2	21,4666	21,7952	21,4660	21,4569	21,4680	21,6125	21,4833
3	31,1310	31,6985	31,1301	31,1110	31,1335	31,2182	31,1448
4	29,4214	29,9895	29,4204	29,4013	29,4239	29,5072	29,4352
5	29,4904	30,0627	29,4894	29,4705	29,4929	29,5658	29,4887
6	29,1945	29,9223	29,1932	29,1675	29,1977	29,2435	29,1887
7	26,9422	27,6766	26,9408	26,9152	26,9454	26,9757	26,9398
8	25,5822	26,8685	25,5800	25,4956	25,5878	25,6643	25,5891
9	23,2652	24,5531	23,2629	23,1786	23,2709	23,3436	23,2722
10	21,6242	22,9611	21,6218	21,5347	21,6301	21,6227	21,6781
11	16,7113	18,0492	16,7089	16,6217	16,7172	16,7076	16,7652
12	23,2416	24,5327	23,2393	23,1548	23,2472	23,3139	23,2378

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nó	Cargas de pressão obtidas pelas calibrações com seis observações (mca)						
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
2	21,4666	21,7952	21,4670	21,4566	21,4667	21,4692	21,4725
3	31,1310	31,6985	31,1317	31,1168	31,1313	31,1266	31,1294
4	29,4214	29,9895	29,4221	29,4071	29,4216	29,4170	29,4197
5	29,4904	30,0627	29,4911	29,4764	29,4906	29,4859	29,4887
6	29,1945	29,9223	29,1953	29,1813	29,1948	29,1923	29,1910
7	26,9422	27,6766	26,9430	26,9289	26,9424	26,9394	26,9387
8	25,5822	26,8685	25,5837	25,5543	25,5827	25,5760	25,5784
9	23,2652	24,5531	23,2667	23,2375	23,2657	23,2590	23,2613
10	21,6242	22,9611	21,6258	21,5987	21,6247	21,6186	21,6200
11	16,7113	18,0492	16,7128	16,6857	16,7118	16,7056	16,7070
12	23,2416	24,5327	23,2431	23,2133	23,2421	23,2349	23,2378

Fonte: Elaborado pelo autor.

**APÊNDICE D – CARGAS DE PRESSÃO E VAZÕES OBTIDAS NAS CALIBRAÇÕES
DAS RUGOSIDADES ABSOLUTAS DA REDE PORTO**

Nó	Cargas de pressão obtidas pelas calibrações com uma observação (mca)						
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
1	21,4965	21,4812	21,4999	21,1422	21,4945	21,4861	21,4775
2	17,5970	17,5055	17,6481	16,7623	17,6068	17,6109	17,5463
3	15,8822	15,7423	15,9404	14,8448	15,8830	15,8875	15,8523
4	13,7116	13,5697	13,7684	12,7481	13,7107	13,7193	13,6829
5	23,3066	23,2381	23,3207	22,4337	23,2968	23,2761	23,2032
6	19,0802	19,0171	19,0801	18,3716	19,0618	19,0482	18,9830
7	15,4869	15,3461	15,5452	14,4642	15,4874	15,4930	15,4577

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nó	Cargas de pressão obtidas pelas calibrações com três observações (mca)						
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
1	21,4965	21,4812	21,4980	21,1877	21,4951	21,4960	21,4933
2	17,5970	17,5055	17,6335	16,9786	17,6117	17,5980	17,5882
3	15,8822	15,7423	15,9201	15,3233	15,8898	15,8826	15,8621
4	13,7116	13,5697	13,7480	13,2167	13,7175	13,7122	13,6860
5	23,3066	23,2381	23,3122	22,8591	23,2996	23,3064	23,2930
6	19,0802	19,0171	19,0736	18,7143	19,0640	19,0715	19,0504
7	15,4869	15,3461	15,5247	14,9356	15,4943	15,4878	15,4648

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nó	Cargas de pressão obtidas pelas calibrações com sete observações (mca)						
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
1	21,4965	21,4812	21,4924	21,3553	21,4952	21,4962	21,4941
2	17,5970	17,5055	17,5912	17,1056	17,6121	17,5816	17,5788
3	15,8822	15,7423	15,8613	14,7133	15,8904	15,8715	15,8568
4	13,7116	13,5697	13,6889	12,6604	13,7182	13,7058	13,6866
5	23,3066	23,2381	23,2877	23,2546	23,2999	23,3047	23,2959
6	19,0802	19,0171	19,0549	19,0311	19,0642	19,0772	19,0723
7	15,4869	15,3461	15,4656	14,3429	15,4949	15,4783	15,4613

Fonte: Elaborado pelo autor.

Trecho	Vazões obtidas pelas calibrações com uma observação (L/s)						
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
0	40,0000	40,0000	40,0000	40,0000	40,0000	40,0000	40,0000
1	13,9712	13,9769	13,9781	14,6179	13,9771	14,0109	14,0109
2	8,7164	8,7225	8,7178	8,6190	8,7188	8,7129	8,7129
3	0,7164	0,7225	0,7178	0,6190	0,7188	0,7129	0,7129
4	1,2836	1,2775	1,2822	1,3810	1,2812	1,2871	1,2871
5	6,2836	6,2775	6,2822	6,3810	6,2812	6,2871	6,2871
6	4,7452	4,7456	4,7397	4,0011	4,7416	4,7019	4,7019
7	21,0288	21,0231	21,0219	20,3822	21,0229	20,9891	20,9891
8	26,0288	26,0231	26,0219	25,3822	26,0229	25,9891	25,9891

Fonte: Elaborado pelo autor.

Trecho	Vazões obtidas pelas calibrações com três observações (L/s)						
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
0	40,0000	40,0000	40,0000	40,0000	40,0000	40,0000	40,0000
1	13,9712	13,9769	13,9777	14,4287	13,9773	13,9618	13,9618
2	8,7164	8,7225	8,7181	8,6613	8,7187	8,7152	8,7152
3	0,7164	0,7225	0,7181	0,6613	0,7187	0,7152	0,7152
4	1,2836	1,2775	1,2819	1,3387	1,2813	1,2848	1,2848
5	6,2836	6,2775	6,2819	6,3387	6,2813	6,2848	6,2848
6	4,7452	4,7456	4,7404	4,2326	4,7414	4,7535	4,7535
7	21,0288	21,0231	21,0223	20,5713	21,0228	21,0383	21,0383
8	26,0288	26,0231	26,0223	25,5713	26,0228	26,0383	26,0383

Fonte: Elaborado pelo autor.

Trecho	Vazões obtidas pelas calibrações com sete observações (L/s)						
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
0	40,0000	40,0000	40,0000	40,0000	40,0000	40,0000	40,0000
1	13,9712	13,9769	13,9768	14,4734	13,9773	13,9638	13,9638
2	8,7164	8,7225	8,7192	8,5956	8,7187	8,7075	8,7075
3	0,7164	0,7225	0,7192	0,5956	0,7187	0,7075	0,7075
4	1,2836	1,2775	1,2808	1,4044	1,2813	1,2925	1,2925
5	6,2836	6,2775	6,2808	6,4044	6,2813	6,2925	6,2925
6	4,7452	4,7456	4,7424	4,1222	4,7414	4,7437	4,7437
7	21,0288	21,0231	21,0232	20,5266	21,0227	21,0362	21,0362
8	26,0288	26,0231	26,0232	25,5266	26,0227	26,0362	26,0362

Fonte: Elaborado pelo autor.

**APÊNDICE E – RUGOSIDADES ABSOLUTAS CALCULADAS PARA A REDE
SOUSA, NAS CALIBRAÇÕES QUE EMPREGARAM DADOS OBSERVADOS DA
HORA 52**

(continua)

Trecho	Rugosidades calculadas pelas calibrações com quatro observações da hora 52 (mm)						
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
1	0,3857	0,0100	0,3550	0,4184	0,3493	0,1120	0,1370
2	0,4841	0,0100	0,3550	0,0864	0,3493	0,2123	0,1629
3	0,3600	0,0100	0,3550	0,0002	0,3493	0,1508	0,1047
4	0,0075	0,0100	0,0233	0,0002	0,0242	0,0003	0,0694
5	0,0062	0,0100	0,0233	0,3017	0,0242	0,4795	0,0870
6	0,0049	0,0100	0,0233	0,2192	0,0242	0,3932	0,0824
7	0,0030	0,0100	0,0233	0,3122	0,0242	0,5193	0,0100
8	0,0068	0,0100	0,0233	0,0957	0,0242	0,3285	0,2235
9	0,0079	0,0100	0,0233	0,1074	0,0242	0,3792	0,2738
10	0,0026	0,0100	0,0233	0,3056	0,0242	0,0003	0,3195
11	0,0022	0,0100	0,0233	0,2586	0,0242	0,3335	0,0004
12	0,0077	0,0100	0,0233	0,3781	0,0242	0,4726	0,1444
13	0,0084	0,0100	0,0233	0,2490	0,0242	0,3394	0,1444
14	0,0073	0,0100	0,0233	0,0959	0,0242	0,1668	0,1079
15	0,0081	0,0100	0,0233	0,3249	0,0242	0,7468	0,0485
16	0,0037	0,0100	0,0233	0,2355	0,0242	0,4709	0,1054
17	0,0024	0,0100	0,0233	0,2737	0,0242	0,5429	0,1951
18	0,0094	0,0100	0,0233	0,2887	0,0242	0,4041	0,3236
19	0,0015	0,0100	0,0233	0,3071	0,0242	0,2039	0,1528
20	0,0035	0,0100	0,0233	0,1514	0,0242	0,6632	0,1893
21	0,4209	0,0100	0,3550	0,3773	0,3493	0,3477	0,2460
22	0,2727	0,0100	0,3550	0,1162	0,3493	0,1809	0,2030
23	0,4283	0,0100	0,3550	0,1454	0,3493	0,2160	0,1636
24	0,4171	0,0100	0,3550	0,2415	0,3493	0,1225	0,1824
25	0,4977	0,0100	0,3550	0,3453	0,3493	0,2604	0,2370
26	0,3826	0,0100	0,3550	0,2432	0,3493	0,2887	0,2687
27	0,3462	0,0100	0,3550	0,1837	0,3493	0,2765	0,3570
28	0,0018	0,0100	0,0233	0,1315	0,0242	0,1751	0,3163
29	0,0099	0,0100	0,0233	0,1847	0,0242	0,8157	0,0647
30	0,0047	0,0100	0,0233	0,2751	0,0242	0,4633	0,0709
31	0,3948	0,0100	0,3550	0,2250	0,3493	0,3812	0,2205
32	0,3117	0,0100	0,3550	0,5371	0,3493	0,4456	0,2548
33	0,3198	0,0100	0,3550	0,4071	0,3493	0,2731	0,4608
34	0,0058	0,0100	0,0233	0,5055	0,0242	0,0894	0,7499
35	0,0056	0,0100	0,0233	0,0463	0,0242	0,2013	0,0079
36	0,0045	0,0100	0,0233	0,2542	0,0242	0,3552	0,0056
37	0,4441	0,0100	0,3550	0,2185	0,3493	0,2277	0,3410
38	0,3248	0,0100	0,3550	0,3114	0,3493	0,3128	0,2518
39	0,0020	0,0100	0,0233	0,3497	0,0242	0,0971	0,2442
40	0,0032	0,0100	0,0233	0,2452	0,0242	0,6316	0,4074
41	0,0021	0,0100	0,0233	0,2354	0,0242	0,6376	0,0579
42	0,0081	0,0100	0,0233	0,2658	0,0242	0,2321	0,0124

							(conclusão)
Trecho	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
43	0,0045	0,0100	0,0233	0,2830	0,0242	0,5423	0,2848
44	0,0079	0,0100	0,0233	0,1049	0,0242	0,4355	0,1927
45	0,0041	0,0100	0,0233	0,1723	0,0242	0,4174	0,2764
46	0,0055	0,0100	0,0233	0,3129	0,0242	0,1597	0,1947
47	0,0098	0,0100	0,0233	0,0388	0,0242	0,4832	0,1950
48	0,0084	0,0100	0,0233	0,1208	0,0242	0,4040	0,1444
49	0,0075	0,0100	0,0233	0,1828	0,0242	0,5346	0,2257
50	0,0020	0,0100	0,0233	0,1717	0,0242	0,3162	0,1428
51	0,0096	0,0100	0,0233	0,2188	0,0242	0,5907	0,2259
52	0,0037	0,0100	0,0233	0,2761	0,0242	0,0003	0,2082
53	0,0099	0,0100	0,0233	0,0002	0,0242	0,4001	0,0009
54	0,0084	0,0100	0,0233	0,2295	0,0242	0,3165	0,1444
55	0,3607	0,0100	0,3550	0,3024	0,3493	0,1257	0,1668
56	0,4016	0,0100	0,3550	0,2747	0,3493	0,3274	0,1855
57	0,2744	0,0100	0,3550	0,1404	0,3493	0,1806	0,0801
58	0,0098	0,0100	0,0233	0,0144	0,0242	0,0003	0,0613
59	0,0041	0,0100	0,0233	0,1763	0,0242	0,3296	0,0801
60	0,0051	0,0100	0,0233	0,0002	0,0242	0,5237	0,0944
61	0,0055	0,0100	0,0233	0,1999	0,0242	0,5216	0,3222
62	0,0092	0,0100	0,0233	0,2474	0,0242	0,4610	0,3933
63	0,0045	0,0100	0,0233	0,2361	0,0242	0,2687	0,0062
64	0,0047	0,0100	0,0233	0,0002	0,0242	0,2778	0,0587
65	0,0045	0,0100	0,0233	0,3759	0,0242	0,4869	0,0754
66	0,0062	0,0100	0,0233	0,0951	0,0242	0,6088	0,1068
67	0,0044	0,0100	0,0233	0,1720	0,0242	0,4980	0,6082
68	0,0039	0,0100	0,0233	0,2292	0,0242	0,3216	0,6757
69	0,0016	0,0100	0,0233	0,1821	0,0242	0,2966	0,0027
70	0,0034	0,0100	0,0233	0,0988	0,0242	0,3744	0,0072
71	0,0029	0,0100	0,0233	0,1690	0,0242	0,0026	0,0597
72	0,0018	0,0100	0,0233	0,1953	0,0242	0,3890	0,1431
73	0,0019	0,0100	0,0233	0,2169	0,0242	0,1539	0,4627
74	0,0036	0,0100	0,0233	0,2839	0,0242	0,3733	0,3135
75	0,0027	0,0100	0,0233	0,0002	0,0242	0,1245	0,0018
76	0,0088	0,0100	0,0233	0,0002	0,0242	0,1335	0,0017
77	0,0050	0,0100	0,0233	0,0694	0,0242	0,1890	0,0485
78	0,0016	0,0100	0,0233	0,2233	0,0242	0,5463	0,0100
79	0,0096	0,0100	0,0233	0,3382	0,0242	0,4207	0,4113
80	0,0090	0,0100	0,0233	0,4455	0,0242	0,2386	0,2136
81	0,0091	0,0100	0,0233	0,2530	0,0242	0,6236	0,0078
82	0,0066	0,0100	0,0233	0,1405	0,0242	0,2492	0,0138
83	0,0024	0,0100	0,0233	0,1089	0,0242	0,4753	0,1470
84	0,0047	0,0100	0,0233	0,1268	0,0242	0,3167	0,1444
85	0,3450	0,0100	0,3550	0,1239	0,3493	0,3164	0,3469

Fonte: Elaborado pelo autor.

(continua)

Trecho	Rugosidades calculadas pelas calibrações com sete observações da hora 52 (mm)						
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
1	0,3857	0,0100	0,3738	0,1750	0,3787	0,3007	0,2942
2	0,4841	0,0100	0,3738	0,3479	0,3787	0,4411	0,2361
3	0,3600	0,0100	0,3738	0,0153	0,3787	0,0405	0,1443
4	0,0075	0,0100	0,0085	0,0773	0,0082	0,1305	0,1095
5	0,0062	0,0100	0,0085	0,0796	0,0082	0,1066	0,0936
6	0,0049	0,0100	0,0085	0,2794	0,0082	0,3796	0,0694
7	0,0030	0,0100	0,0085	0,1649	0,0082	0,2473	0,0863
8	0,0068	0,0100	0,0085	0,4446	0,0082	0,3971	0,0972
9	0,0079	0,0100	0,0085	0,4615	0,0082	0,4807	0,0957
10	0,0026	0,0100	0,0085	0,0603	0,0082	0,1568	0,0014
11	0,0022	0,0100	0,0085	0,0902	0,0082	0,0653	0,0041
12	0,0077	0,0100	0,0085	0,2532	0,0082	0,3145	0,0863
13	0,0084	0,0100	0,0085	0,2680	0,0082	0,2641	0,0863
14	0,0073	0,0100	0,0085	0,2826	0,0082	0,2417	0,0000
15	0,0081	0,0100	0,0085	0,3135	0,0082	0,3625	0,0230
16	0,0037	0,0100	0,0085	0,2756	0,0082	0,1471	0,0482
17	0,0024	0,0100	0,0085	0,0299	0,0082	0,1635	0,1421
18	0,0094	0,0100	0,0085	0,2645	0,0082	0,1776	0,2503
19	0,0015	0,0100	0,0085	0,1223	0,0082	0,1593	0,1248
20	0,0035	0,0100	0,0085	0,3003	0,0082	0,4668	0,1579
21	0,4209	0,0100	0,3738	0,3341	0,3787	0,2754	0,2104
22	0,2727	0,0100	0,3738	0,1502	0,3787	0,2563	0,2118
23	0,4283	0,0100	0,3738	0,3500	0,3787	0,3743	0,2021
24	0,4171	0,0100	0,3738	0,2785	0,3787	0,2944	0,4028
25	0,4977	0,0100	0,3738	0,2853	0,3787	0,4876	0,3153
26	0,3826	0,0100	0,3738	0,2000	0,3787	0,3139	0,0289
27	0,3462	0,0100	0,3738	0,3106	0,3787	0,4391	0,1010
28	0,0018	0,0100	0,0085	0,1780	0,0082	0,1900	0,1334
29	0,0099	0,0100	0,0085	0,0002	0,0082	0,0000	0,0356
30	0,0047	0,0100	0,0085	0,1899	0,0082	0,2229	0,0554
31	0,3948	0,0100	0,3738	0,3316	0,3787	0,2479	0,3342
32	0,3117	0,0100	0,3738	0,2277	0,3787	0,6505	0,2993
33	0,3198	0,0100	0,3738	0,3832	0,3787	0,3360	0,4837
34	0,0058	0,0100	0,0085	0,2525	0,0082	0,2718	0,2851
35	0,0056	0,0100	0,0085	0,0002	0,0082	0,0479	0,0022
36	0,0045	0,0100	0,0085	0,2192	0,0082	0,3235	0,0021
37	0,4441	0,0100	0,3738	0,2673	0,3787	0,4712	0,4270
38	0,3248	0,0100	0,3738	0,1891	0,3787	0,2704	0,2174
39	0,0020	0,0100	0,0085	0,1008	0,0082	0,0153	0,1526
40	0,0032	0,0100	0,0085	0,2708	0,0082	0,1497	0,1597
41	0,0021	0,0100	0,0085	0,1167	0,0082	0,1618	0,0154
42	0,0081	0,0100	0,0085	0,3393	0,0082	0,2729	0,0113
43	0,0045	0,0100	0,0085	0,3354	0,0082	0,3389	0,1781
44	0,0079	0,0100	0,0085	0,3273	0,0082	0,4356	0,1739
45	0,0041	0,0100	0,0085	0,2516	0,0082	0,1719	0,0097
46	0,0055	0,0100	0,0085	0,1916	0,0082	0,1781	0,0002

							(conclusão)
Trecho	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
47	0,0098	0,0100	0,0085	0,0138	0,0082	0,0768	0,0002
48	0,0084	0,0100	0,0085	0,3702	0,0082	0,3591	0,0863
49	0,0075	0,0100	0,0085	0,3840	0,0082	0,5017	0,2634
50	0,0020	0,0100	0,0085	0,2411	0,0082	0,0487	0,1166
51	0,0096	0,0100	0,0085	0,1190	0,0082	0,2466	0,0481
52	0,0037	0,0100	0,0085	0,1312	0,0082	0,1076	0,0002
53	0,0099	0,0100	0,0085	0,1501	0,0082	0,0221	0,0048
54	0,0084	0,0100	0,0085	0,1079	0,0082	0,0884	0,0863
55	0,3607	0,0100	0,3738	0,4553	0,3787	0,4038	0,5562
56	0,4016	0,0100	0,3738	0,0806	0,3787	0,0358	0,0213
57	0,2744	0,0100	0,3738	0,0002	0,3787	0,0170	0,0885
58	0,0098	0,0100	0,0085	0,0515	0,0082	0,1267	0,1132
59	0,0041	0,0100	0,0085	0,3016	0,0082	0,0791	0,0470
60	0,0051	0,0100	0,0085	0,1077	0,0082	0,1497	0,0567
61	0,0055	0,0100	0,0085	0,5584	0,0082	0,4984	0,1933
62	0,0092	0,0100	0,0085	0,3703	0,0082	0,4046	0,1924
63	0,0045	0,0100	0,0085	0,2514	0,0082	0,1691	0,0609
64	0,0047	0,0100	0,0085	0,2483	0,0082	0,3340	0,1952
65	0,0045	0,0100	0,0085	0,0071	0,0082	0,0000	0,0111
66	0,0062	0,0100	0,0085	0,1532	0,0082	0,1299	0,0014
67	0,0044	0,0100	0,0085	0,1808	0,0082	0,1906	0,2532
68	0,0039	0,0100	0,0085	0,0623	0,0082	0,0000	0,3702
69	0,0016	0,0100	0,0085	0,2013	0,0082	0,3260	0,0486
70	0,0034	0,0100	0,0085	0,0787	0,0082	0,1686	0,1619
71	0,0029	0,0100	0,0085	0,1918	0,0082	0,1050	0,0085
72	0,0018	0,0100	0,0085	0,0299	0,0082	0,0926	0,0000
73	0,0019	0,0100	0,0085	0,2102	0,0082	0,2119	0,3984
74	0,0036	0,0100	0,0085	0,2724	0,0082	0,3343	0,4500
75	0,0027	0,0100	0,0085	0,1987	0,0082	0,2446	0,0089
76	0,0088	0,0100	0,0085	0,0345	0,0082	0,0351	0,0283
77	0,0050	0,0100	0,0085	0,2417	0,0082	0,2649	0,0007
78	0,0016	0,0100	0,0085	0,2548	0,0082	0,3232	0,0863
79	0,0096	0,0100	0,0085	0,2872	0,0082	0,2556	0,3334
80	0,0090	0,0100	0,0085	0,0930	0,0082	0,1338	0,1374
81	0,0091	0,0100	0,0085	0,2505	0,0082	0,2564	0,0182
82	0,0066	0,0100	0,0085	0,1056	0,0082	0,0651	0,0131
83	0,0024	0,0100	0,0085	0,1600	0,0082	0,1999	0,0026
84	0,0047	0,0100	0,0085	0,1964	0,0082	0,3040	0,0863
85	0,3450	0,0100	0,3738	0,4630	0,3787	0,5288	0,3469

Fonte: Elaborado pelo autor.

(continua)

Trecho	Rugosidades calculadas pelas calibrações com 13 observações da hora 52 (mm)						
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
1	0,3857	0,0100	0,3713	0,5661	0,3695	0,3609	0,3179
2	0,4841	0,0100	0,3713	0,0002	0,3695	0,2829	0,3192
3	0,3600	0,0100	0,3713	0,1890	0,3695	0,3960	0,2351
4	0,0075	0,0100	0,0115	0,2282	0,0065	0,0563	0,0902
5	0,0062	0,0100	0,0115	0,1261	0,0065	0,0367	0,0034
6	0,0049	0,0100	0,0115	0,1750	0,0065	0,0537	0,0176
7	0,0030	0,0100	0,0115	0,0570	0,0065	0,0736	0,0122
8	0,0068	0,0100	0,0115	0,2989	0,0065	0,0299	0,0032
9	0,0079	0,0100	0,0115	0,2762	0,0065	0,0689	0,0069
10	0,0026	0,0100	0,0115	0,2091	0,0065	0,0332	0,0012
11	0,0022	0,0100	0,0115	0,1837	0,0065	0,0445	0,0100
12	0,0077	0,0100	0,0115	0,1152	0,0065	0,0853	0,0122
13	0,0084	0,0100	0,0115	0,2572	0,0065	0,0461	0,0122
14	0,0073	0,0100	0,0115	0,3525	0,0065	0,0658	0,0041
15	0,0081	0,0100	0,0115	0,1742	0,0065	0,0634	0,0020
16	0,0037	0,0100	0,0115	0,7518	0,0065	0,0771	0,0861
17	0,0024	0,0100	0,0115	0,0335	0,0065	0,0569	0,0050
18	0,0094	0,0100	0,0115	0,3092	0,0065	0,0779	0,0341
19	0,0015	0,0100	0,0115	0,0002	0,0065	0,0469	0,0395
20	0,0035	0,0100	0,0115	0,1866	0,0065	0,0623	0,0448
21	0,4209	0,0100	0,3713	0,4428	0,3695	0,4344	0,4174
22	0,2727	0,0100	0,3713	0,1091	0,3695	0,4204	0,5793
23	0,4283	0,0100	0,3713	0,6414	0,3695	0,4387	0,4150
24	0,4171	0,0100	0,3713	0,5295	0,3695	0,3376	0,4862
25	0,4977	0,0100	0,3713	0,4505	0,3695	0,4136	0,3211
26	0,3826	0,0100	0,3713	0,1135	0,3695	0,4136	0,2429
27	0,3462	0,0100	0,3713	0,1077	0,3695	0,3939	0,3554
28	0,0018	0,0100	0,0115	0,2998	0,0065	0,0255	0,0729
29	0,0099	0,0100	0,0115	0,0002	0,0065	0,0662	0,0125
30	0,0047	0,0100	0,0115	0,2527	0,0065	0,0403	0,0356
31	0,3948	0,0100	0,3713	0,1542	0,3695	0,3096	0,3664
32	0,3117	0,0100	0,3713	0,1877	0,3695	0,5682	0,3772
33	0,3198	0,0100	0,3713	0,0695	0,3695	0,3904	0,5423
34	0,0058	0,0100	0,0115	0,0002	0,0065	0,0426	0,0631
35	0,0056	0,0100	0,0115	0,0002	0,0065	0,0106	0,0005
36	0,0045	0,0100	0,0115	0,0002	0,0065	0,0642	0,0020
37	0,4441	0,0100	0,3713	0,2186	0,3695	0,4747	0,4125
38	0,3248	0,0100	0,3713	0,3782	0,3695	0,5339	0,3586
39	0,0020	0,0100	0,0115	0,0078	0,0065	0,0774	0,0954
40	0,0032	0,0100	0,0115	0,1948	0,0065	0,0656	0,0150
41	0,0021	0,0100	0,0115	0,0320	0,0065	0,0096	0,0002
42	0,0081	0,0100	0,0115	0,0759	0,0065	0,0724	0,0100
43	0,0045	0,0100	0,0115	0,0906	0,0065	0,0603	0,0071
44	0,0079	0,0100	0,0115	0,0650	0,0065	0,0580	0,0524
45	0,0041	0,0100	0,0115	0,2552	0,0065	0,0634	0,0169
46	0,0055	0,0100	0,0115	0,0170	0,0065	0,0636	0,0000

							(conclusão)
Trecho	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
47	0,0098	0,0100	0,0115	0,0712	0,0065	0,0406	0,0009
48	0,0084	0,0100	0,0115	0,3028	0,0065	0,0489	0,0122
49	0,0075	0,0100	0,0115	0,2595	0,0065	0,0591	0,0014
50	0,0020	0,0100	0,0115	0,0358	0,0065	0,0345	0,0030
51	0,0096	0,0100	0,0115	0,0002	0,0065	0,0482	0,0001
52	0,0037	0,0100	0,0115	0,1824	0,0065	0,0438	0,0019
53	0,0099	0,0100	0,0115	0,3770	0,0065	0,0553	0,0100
54	0,0084	0,0100	0,0115	0,0754	0,0065	0,0484	0,0122
55	0,3607	0,0100	0,3713	0,2753	0,3695	0,3036	0,4568
56	0,4016	0,0100	0,3713	0,0850	0,3695	0,2165	0,1470
57	0,2744	0,0100	0,3713	0,0012	0,3695	0,1529	0,2193
58	0,0098	0,0100	0,0115	0,1863	0,0065	0,0298	0,0623
59	0,0041	0,0100	0,0115	0,3476	0,0065	0,0584	0,0245
60	0,0051	0,0100	0,0115	0,1248	0,0065	0,0506	0,0271
61	0,0055	0,0100	0,0115	0,4066	0,0065	0,0508	0,0866
62	0,0092	0,0100	0,0115	0,0762	0,0065	0,0258	0,0662
63	0,0045	0,0100	0,0115	0,0862	0,0065	0,0584	0,0960
64	0,0047	0,0100	0,0115	0,0002	0,0065	0,0296	0,0310
65	0,0045	0,0100	0,0115	0,2440	0,0065	0,0630	0,0007
66	0,0062	0,0100	0,0115	0,0002	0,0065	0,0461	0,0009
67	0,0044	0,0100	0,0115	0,0485	0,0065	0,0324	0,0928
68	0,0039	0,0100	0,0115	0,0002	0,0065	0,0518	0,0539
69	0,0016	0,0100	0,0115	0,2047	0,0065	0,0895	0,0773
70	0,0034	0,0100	0,0115	0,1155	0,0065	0,0343	0,0263
71	0,0029	0,0100	0,0115	0,2101	0,0065	0,0445	0,0001
72	0,0018	0,0100	0,0115	0,0002	0,0065	0,0210	0,0002
73	0,0019	0,0100	0,0115	0,1077	0,0065	0,0677	0,0660
74	0,0036	0,0100	0,0115	0,0821	0,0065	0,0439	0,0677
75	0,0027	0,0100	0,0115	0,4084	0,0065	0,0568	0,0327
76	0,0088	0,0100	0,0115	0,1330	0,0065	0,0187	0,0004
77	0,0050	0,0100	0,0115	0,1390	0,0065	0,0333	0,0009
78	0,0016	0,0100	0,0115	0,1662	0,0065	0,0646	0,0122
79	0,0096	0,0100	0,0115	0,0748	0,0065	0,0782	0,0468
80	0,0090	0,0100	0,0115	0,0002	0,0065	0,0231	0,0606
81	0,0091	0,0100	0,0115	0,3004	0,0065	0,0775	0,0480
82	0,0066	0,0100	0,0115	0,1363	0,0065	0,0486	0,0015
83	0,0024	0,0100	0,0115	0,2660	0,0065	0,0440	0,0045
84	0,0047	0,0100	0,0115	0,3497	0,0065	0,0524	0,0122
85	0,3450	0,0100	0,3713	0,4125	0,3695	0,3891	0,3469

Fonte: Elaborado pelo autor.

(continua)

Trecho	Rugosidades calculadas pelas calibrações com 25 observações da hora 52 (mm)						
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
1	0,3857	0,0100	0,3836	0,4334	0,3771	0,4418	0,3607
2	0,4841	0,0100	0,3836	0,3125	0,3771	0,4344	0,4595
3	0,3600	0,0100	0,3836	0,0276	0,3771	0,3365	0,2394
4	0,0075	0,0100	0,0002	0,2600	0,0014	0,0424	0,0408
5	0,0062	0,0100	0,0002	0,0595	0,0014	0,0198	0,0168
6	0,0049	0,0100	0,0002	0,0002	0,0014	0,0250	0,0027
7	0,0030	0,0100	0,0002	0,2737	0,0014	0,0409	0,0100
8	0,0068	0,0100	0,0002	0,3590	0,0014	0,0302	0,0002
9	0,0079	0,0100	0,0002	0,3438	0,0014	0,0326	0,0090
10	0,0026	0,0100	0,0002	0,0979	0,0014	0,0434	0,0006
11	0,0022	0,0100	0,0002	0,0800	0,0014	0,0461	0,0005
12	0,0077	0,0100	0,0002	0,2961	0,0014	0,0370	0,0100
13	0,0084	0,0100	0,0002	0,1896	0,0014	0,0333	0,0100
14	0,0073	0,0100	0,0002	0,1588	0,0014	0,0351	0,0431
15	0,0081	0,0100	0,0002	0,0363	0,0014	0,0501	0,0072
16	0,0037	0,0100	0,0002	0,5553	0,0014	0,0466	0,0402
17	0,0024	0,0100	0,0002	0,0002	0,0014	0,0349	0,0088
18	0,0094	0,0100	0,0002	0,2175	0,0014	0,0456	0,0588
19	0,0015	0,0100	0,0002	0,4867	0,0014	0,0327	0,0072
20	0,0035	0,0100	0,0002	0,3214	0,0014	0,0427	0,0184
21	0,4209	0,0100	0,3836	0,2905	0,3771	0,4663	0,4082
22	0,2727	0,0100	0,3836	0,4326	0,3771	0,2680	0,3060
23	0,4283	0,0100	0,3836	0,0821	0,3771	0,4053	0,4529
24	0,4171	0,0100	0,3836	0,4735	0,3771	0,4266	0,4717
25	0,4977	0,0100	0,3836	0,1992	0,3771	0,5150	0,5140
26	0,3826	0,0100	0,3836	0,1837	0,3771	0,4051	0,3658
27	0,3462	0,0100	0,3836	0,4361	0,3771	0,4278	0,4667
28	0,0018	0,0100	0,0002	0,1948	0,0014	0,0203	0,0399
29	0,0099	0,0100	0,0002	0,2847	0,0014	0,0225	0,0002
30	0,0047	0,0100	0,0002	0,1927	0,0014	0,0212	0,0267
31	0,3948	0,0100	0,3836	0,2678	0,3771	0,4729	0,3632
32	0,3117	0,0100	0,3836	0,2406	0,3771	0,4582	0,4313
33	0,3198	0,0100	0,3836	0,2437	0,3771	0,2719	0,2807
34	0,0058	0,0100	0,0002	0,1759	0,0014	0,0364	0,0111
35	0,0056	0,0100	0,0002	0,0002	0,0014	0,0297	0,0053
36	0,0045	0,0100	0,0002	0,1320	0,0014	0,0388	0,0003
37	0,4441	0,0100	0,3836	0,4085	0,3771	0,6111	0,6616
38	0,3248	0,0100	0,3836	0,1008	0,3771	0,3657	0,2154
39	0,0020	0,0100	0,0002	0,0002	0,0014	0,0212	0,0002
40	0,0032	0,0100	0,0002	0,4588	0,0014	0,0377	0,0017
41	0,0021	0,0100	0,0002	0,0002	0,0014	0,0042	0,0001
42	0,0081	0,0100	0,0002	0,3578	0,0014	0,0421	0,0100
43	0,0045	0,0100	0,0002	0,1825	0,0014	0,0255	0,0375
44	0,0079	0,0100	0,0002	0,1690	0,0014	0,0332	0,0070
45	0,0041	0,0100	0,0002	0,2778	0,0014	0,0232	0,0073
46	0,0055	0,0100	0,0002	0,1205	0,0014	0,0309	0,0001

							(conclusão)
Trecho	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
47	0,0098	0,0100	0,0002	0,0002	0,0014	0,0338	0,0001
48	0,0084	0,0100	0,0002	0,0768	0,0014	0,0336	0,0100
49	0,0075	0,0100	0,0002	0,2264	0,0014	0,0459	0,0183
50	0,0020	0,0100	0,0002	0,2782	0,0014	0,0506	0,0065
51	0,0096	0,0100	0,0002	0,1579	0,0014	0,0413	0,0003
52	0,0037	0,0100	0,0002	0,0061	0,0014	0,0262	0,0001
53	0,0099	0,0100	0,0002	0,2835	0,0014	0,0337	0,0000
54	0,0084	0,0100	0,0002	0,1896	0,0014	0,0437	0,0100
55	0,3607	0,0100	0,3836	0,4257	0,3771	0,6765	0,3943
56	0,4016	0,0100	0,3836	0,1986	0,3771	0,3858	0,3608
57	0,2744	0,0100	0,3836	0,0002	0,3771	0,3938	0,3918
58	0,0098	0,0100	0,0002	0,3240	0,0014	0,0464	0,0015
59	0,0041	0,0100	0,0002	0,2297	0,0014	0,0395	0,0002
60	0,0051	0,0100	0,0002	0,2078	0,0014	0,0331	0,0138
61	0,0055	0,0100	0,0002	0,1583	0,0014	0,0473	0,0464
62	0,0092	0,0100	0,0002	0,3413	0,0014	0,0394	0,0606
63	0,0045	0,0100	0,0002	0,1001	0,0014	0,0165	0,0260
64	0,0047	0,0100	0,0002	0,1846	0,0014	0,0411	0,0046
65	0,0045	0,0100	0,0002	0,4001	0,0014	0,0275	0,0079
66	0,0062	0,0100	0,0002	0,4376	0,0014	0,0301	0,0004
67	0,0044	0,0100	0,0002	0,2313	0,0014	0,0457	0,0561
68	0,0039	0,0100	0,0002	0,2692	0,0014	0,0457	0,0588
69	0,0016	0,0100	0,0002	0,1346	0,0014	0,0354	0,0452
70	0,0034	0,0100	0,0002	0,2900	0,0014	0,0343	0,0323
71	0,0029	0,0100	0,0002	0,1433	0,0014	0,0544	0,0013
72	0,0018	0,0100	0,0002	0,1411	0,0014	0,0472	0,0119
73	0,0019	0,0100	0,0002	0,2028	0,0014	0,0280	0,0353
74	0,0036	0,0100	0,0002	0,2362	0,0014	0,0336	0,0364
75	0,0027	0,0100	0,0002	0,0430	0,0014	0,0349	0,0337
76	0,0088	0,0100	0,0002	0,0526	0,0014	0,0157	0,0024
77	0,0050	0,0100	0,0002	0,0675	0,0014	0,0331	0,0088
78	0,0016	0,0100	0,0002	0,2148	0,0014	0,0489	0,0100
79	0,0096	0,0100	0,0002	0,0480	0,0014	0,0402	0,0102
80	0,0090	0,0100	0,0002	0,0002	0,0014	0,0311	0,0365
81	0,0091	0,0100	0,0002	0,3497	0,0014	0,0329	0,0090
82	0,0066	0,0100	0,0002	0,0758	0,0014	0,0470	0,0307
83	0,0024	0,0100	0,0002	0,2163	0,0014	0,0268	0,0002
84	0,0047	0,0100	0,0002	0,0756	0,0014	0,0378	0,0100
85	0,3450	0,0100	0,3836	0,2061	0,3771	0,2951	0,3469

Fonte: Elaborado pelo autor.

**APÊNDICE F – CARGAS DE PRESSÃO E VAZÕES OBTIDAS NAS CALIBRAÇÕES
DAS RUGOSIDADES ABSOLUTAS DA REDE SOUSA PARA A HORA 70,
UTILIZANDO DADOS OBSERVADOS DA HORA 52**

(continua)

Nó	Cargas de pressão obtidas pelas calibrações com quatro observações da hora 52 (mca)						
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
1	5,3190	5,3485	5,3184	5,3356	5,3187	5,3208	5,3189
2	5,4707	5,5953	5,4738	5,4799	5,4752	5,5304	5,5206
3	7,7124	7,8904	7,7265	7,7570	7,7284	7,7928	7,7905
4	12,1166	12,4154	12,1271	12,2569	12,1305	12,2278	12,2653
5	19,1932	19,4961	19,1919	19,3216	19,1947	19,2952	19,2995
6	23,3643	23,6668	23,3590	23,4381	23,3616	23,3867	23,4529
7	25,7673	26,0690	25,7589	25,8175	25,7613	25,7277	25,8395
8	28,2191	28,5207	28,2100	28,2656	28,2124	28,1610	28,2890
9	27,0820	27,3831	27,0714	27,1096	27,0738	26,9950	27,1351
10	27,1574	27,4576	27,1451	27,1609	27,1474	27,0337	27,1868
11	27,2729	27,5711	27,2577	27,2219	27,2599	27,1372	27,2602
12	28,5627	28,8596	28,5465	28,4929	28,5486	28,3883	28,5449
13	31,5509	31,8476	31,5347	31,4790	31,5368	31,3712	31,5319
14	27,1710	27,4674	27,1551	27,0966	27,1572	26,9862	27,1502
15	24,7651	25,0605	24,7511	24,6855	24,7533	24,5750	24,7466
16	21,9005	22,1926	21,8906	21,8342	21,8930	21,7557	21,8790
17	17,0626	17,3498	17,0591	17,0259	17,0617	16,9853	17,0493
18	12,7959	13,0784	12,7989	12,8076	12,8017	12,7760	12,8237
19	14,6153	14,8957	14,6196	14,6453	14,6225	14,6227	14,6688
20	12,5922	12,8728	12,6041	12,6960	12,6073	12,6501	12,6887
21	10,0104	10,2917	10,0269	10,1367	10,0303	10,1454	10,1391
22	7,6263	7,8748	7,6389	7,7488	7,6419	7,7534	7,7433
23	6,0001	6,2018	6,0220	6,1002	6,0242	6,1062	6,1022
24	5,6229	5,7058	5,6297	5,6580	5,6306	5,6607	5,6516
25	5,4002	5,5803	5,4135	5,4494	5,4155	5,4880	5,4759
26	5,5181	5,7531	5,5348	5,5968	5,5375	5,6229	5,6168
27	7,0689	7,3365	7,0849	7,1670	7,0880	7,1858	7,1742
28	8,7334	9,0101	8,7437	8,8064	8,7468	8,8266	8,7745
29	11,1739	11,4538	11,1820	11,2367	11,1850	11,2002	11,2136
30	7,1138	7,3612	7,1347	7,1968	7,1374	7,2045	7,2146
31	7,6454	7,9235	7,6612	7,7213	7,6643	7,7284	7,7410
32	8,5865	8,8829	8,5999	8,6611	8,6033	8,6731	8,6675
33	9,7848	10,0773	9,7937	9,7916	9,7968	9,8458	9,7759
34	13,2101	13,4981	13,2086	13,1857	13,2113	13,1720	13,1901
35	12,7783	13,0858	12,7892	12,9042	12,7926	12,8840	12,9208
36	11,9049	12,2287	11,9139	12,0179	11,9175	12,0024	12,0417
37	13,1898	13,4992	13,1923	13,2289	13,1955	13,2501	13,2595
38	15,1446	15,4479	15,1442	15,1482	15,1471	15,1469	15,1568
39	17,9050	18,1988	17,8961	17,8415	17,8985	17,7573	17,8876
40	18,4116	18,7161	18,4102	18,5236	18,4129	18,4923	18,5122
41	17,3383	17,6440	17,3348	17,4304	17,3375	17,3527	17,4217
42	18,3250	18,6297	18,3200	18,3890	18,3226	18,2946	18,3902

							(conclusão)
Nó	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
43	19,0368	19,3367	19,0257	19,0048	19,0281	18,9506	19,0454
44	22,2167	22,5132	22,2031	22,1489	22,2053	22,0462	22,2024
45	23,9843	24,2871	23,9785	24,0506	23,9811	23,9931	24,0671
46	22,9459	23,2478	22,9372	22,9845	22,9397	22,9066	23,0093
47	22,8317	23,1335	22,8221	22,8566	22,8246	22,7593	22,8804
48	23,3944	23,6928	23,3797	23,3438	23,3819	23,2790	23,3842
49	25,4813	25,7781	25,4653	25,4135	25,4674	25,3031	25,4628

Fonte: Elaborado pelo autor.

(continua)

Cargas de pressão obtidas pelas calibrações com sete observações da hora 52							
Nó	(mca)						
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
1	5,3190	5,3485	5,3172	5,3120	5,3169	5,3085	5,3189
2	5,4707	5,5953	5,4693	5,4959	5,4681	5,4719	5,4778
3	7,7124	7,8904	7,7206	7,7462	7,7190	7,7157	7,7442
4	12,1166	12,4154	12,1168	12,2512	12,1140	12,2149	12,2075
5	19,1932	19,4961	19,1931	19,2711	19,1905	19,1989	19,2101
6	23,3643	23,6668	23,3634	23,4153	23,3609	23,3491	23,3669
7	25,7673	26,0690	25,7657	25,7839	25,7633	25,7150	25,7597
8	28,2191	28,5207	28,2173	28,2334	28,2148	28,1667	28,2094
9	27,0820	27,3831	27,0798	27,0714	27,0774	27,0157	27,0670
10	27,1574	27,4576	27,1549	27,1192	27,1525	27,0618	27,1371
11	27,2729	27,5711	27,2698	27,2120	27,2675	27,1495	27,2541
12	28,5627	28,8596	28,5595	28,4902	28,5572	28,4329	28,5447
13	31,5509	31,8476	31,5477	31,4766	31,5455	31,4200	31,5329
14	27,1710	27,4674	27,1680	27,0945	27,1657	27,0391	27,1537
15	24,7651	25,0605	24,7626	24,6982	24,7603	24,6411	24,7469
16	21,9005	22,1926	21,8983	21,8585	21,8960	21,8049	21,8836
17	17,0626	17,3498	17,0621	17,0703	17,0597	16,9921	17,0512
18	12,7959	13,0784	12,7972	12,7974	12,7947	12,7483	12,8173
19	14,6153	14,8957	14,6163	14,6347	14,6137	14,5764	14,6554
20	12,5922	12,8728	12,5955	12,6421	12,5928	12,5907	12,6662
21	10,0104	10,2917	10,0150	10,0967	10,0122	10,0621	10,1091
22	7,6263	7,8748	7,6280	7,7032	7,6256	7,6648	7,7079
23	6,0001	6,2018	6,0136	6,0548	6,0117	6,0324	6,0679
24	5,6229	5,7058	5,6265	5,6401	5,6257	5,6279	5,6325
25	5,4002	5,5803	5,4071	5,4235	5,4054	5,3952	5,3981
26	5,5181	5,7531	5,5256	5,5725	5,5234	5,5349	5,5676
27	7,0689	7,3365	7,0738	7,1340	7,0711	7,0894	7,1402
28	8,7334	9,0101	8,7360	8,7682	8,7334	8,7250	8,7705
29	11,1739	11,4538	11,1764	11,2109	11,1738	11,1664	11,2080
30	7,1138	7,3612	7,1265	7,1757	7,1243	7,1546	7,1656
31	7,6454	7,9235	7,6517	7,7193	7,6491	7,6711	7,6966
32	8,5865	8,8829	8,5897	8,6596	8,5869	8,6189	8,6264
33	9,7848	10,0773	9,7870	9,8143	9,7842	9,7734	9,7769
34	13,2101	13,4981	13,2102	13,2339	13,2077	13,1688	13,1973

							(conclusão)
Nó	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
35	12,7783	13,0858	12,7790	12,9016	12,7761	12,8635	12,8640
36	11,9049	12,2287	11,9042	12,0179	11,9012	11,9671	11,9883
37	13,1898	13,4992	13,1885	13,2409	13,1857	13,2000	13,2216
38	15,1446	15,4479	15,1431	15,1476	15,1405	15,1122	15,1474
39	17,9050	18,1988	17,9029	17,8695	17,9005	17,8102	17,8914
40	18,4116	18,7161	18,4115	18,4855	18,4089	18,4060	18,4211
41	17,3383	17,6440	17,3374	17,3676	17,3349	17,2912	17,3252
42	18,3250	18,6297	18,3236	18,3417	18,3210	18,2721	18,3094
43	19,0368	19,3367	19,0345	19,0034	19,0321	18,9531	19,0216
44	22,2167	22,5132	22,2143	22,1625	22,2120	22,1073	22,2008
45	23,9843	24,2871	23,9833	24,0166	23,9808	23,9534	23,9819
46	22,9459	23,2478	22,9439	22,9467	22,9414	22,8977	22,9292
47	22,8317	23,1335	22,8297	22,8164	22,8273	22,7601	22,8127
48	23,3944	23,6928	23,3913	23,3362	23,3890	23,2772	23,3780
49	25,4813	25,7781	25,4783	25,4089	25,4760	25,3543	25,4647

Fonte: Elaborado pelo autor.

(continua)

Cargas de pressão obtidas pelas calibrações com 13 observações da hora 52							
Nó	(mca)						
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
1	5,3190	5,3485	5,3173	5,3149	5,3175	5,3163	5,3189
2	5,4707	5,5953	5,4699	5,4329	5,4704	5,4729	5,4738
3	7,7124	7,8904	7,7213	7,7284	7,7221	7,7344	7,7303
4	12,1166	12,4154	12,1181	12,1888	12,1195	12,1439	12,1604
5	19,1932	19,4961	19,1920	19,1552	19,1975	19,1902	19,1831
6	23,3643	23,6668	23,3616	23,2967	23,3683	23,3525	23,3537
7	25,7673	26,0690	25,7634	25,6805	25,7709	25,7470	25,7543
8	28,2191	28,5207	28,2149	28,1339	28,2225	28,1965	28,2057
9	27,0820	27,3831	27,0772	26,9938	27,0852	27,0568	27,0697
10	27,1574	27,4576	27,1520	27,0603	27,1605	27,1258	27,1451
11	27,2729	27,5711	27,2665	27,1496	27,2757	27,2326	27,2599
12	28,5627	28,8596	28,5560	28,4257	28,5655	28,5175	28,5484
13	31,5509	31,8476	31,5442	31,4136	31,5538	31,5053	31,5365
14	27,1710	27,4674	27,1645	27,0342	27,1740	27,1245	27,1562
15	24,7651	25,0605	24,7594	24,6530	24,7684	24,7210	24,7486
16	21,9005	22,1926	21,8959	21,8147	21,9036	21,8634	21,8779
17	17,0626	17,3498	17,0607	17,0823	17,0666	17,0404	17,0550
18	12,7959	13,0784	12,7968	12,7871	12,8010	12,7787	12,7840
19	14,6153	14,8957	14,6162	14,6274	14,6198	14,6004	14,6026
20	12,5922	12,8728	12,5965	12,5955	12,5983	12,5862	12,5880
21	10,0104	10,2917	10,0166	10,0369	10,0173	10,0125	10,0109
22	7,6263	7,8748	7,6296	7,6496	7,6301	7,6259	7,6233
23	6,0001	6,2018	6,0148	5,9901	6,0151	6,0115	6,0202
24	5,6229	5,7058	5,6269	5,6114	5,6271	5,6275	5,6247
25	5,4002	5,5803	5,4079	5,3823	5,4086	5,4080	5,3991
26	5,5181	5,7531	5,5268	5,5346	5,5275	5,5239	5,5324

							(conclusão)
Nó	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
27	7,0689	7,3365	7,0753	7,1104	7,0760	7,0722	7,0810
28	8,7334	9,0101	8,7368	8,7377	8,7389	8,7292	8,7280
29	11,1739	11,4538	11,1768	11,1842	11,1796	11,1618	11,1702
30	7,1138	7,3612	7,1276	7,1443	7,1286	7,1398	7,1435
31	7,6454	7,9235	7,6529	7,6836	7,6542	7,6531	7,6684
32	8,5865	8,8829	8,5910	8,6389	8,5925	8,5904	8,5969
33	9,7848	10,0773	9,7875	9,8270	9,7901	9,7789	9,7792
34	13,2101	13,4981	13,2091	13,2346	13,2145	13,1964	13,1995
35	12,7783	13,0858	12,7802	12,8540	12,7818	12,8088	12,8159
36	11,9049	12,2287	11,9053	11,9489	11,9074	11,9164	11,9306
37	13,1898	13,4992	13,1884	13,2011	13,1923	13,1746	13,1809
38	15,1446	15,4479	15,1425	15,1148	15,1473	15,1182	15,1303
39	17,9050	18,1988	17,9007	17,8368	17,9081	17,8718	17,8850
40	18,4116	18,7161	18,4104	18,3810	18,4159	18,4106	18,4046
41	17,3383	17,6440	17,3360	17,3106	17,3421	17,3296	17,3275
42	18,3250	18,6297	18,3220	18,2774	18,3284	18,3094	18,3120
43	19,0368	19,3367	19,0318	18,9525	19,0400	19,0018	19,0238
44	22,2167	22,5132	22,2112	22,1122	22,2201	22,1742	22,2015
45	23,9843	24,2871	23,9814	23,9053	23,9882	23,9700	23,9733
46	22,9459	23,2478	22,9416	22,8607	22,9491	22,9246	22,9341
47	22,8317	23,1335	22,8273	22,7460	22,8351	22,8063	22,8200
48	23,3944	23,6928	23,3881	23,2783	23,3972	23,3551	23,3817
49	25,4813	25,7781	25,4748	25,3451	25,4843	25,4359	25,4670

Fonte: Elaborado pelo autor.

(continua)

Cargas de pressão obtidas pelas calibrações com 25 observações da hora 52							
Nó	(mca)						
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
1	5,3190	5,3485	5,3166	5,3287	5,3170	5,3222	5,3189
2	5,4707	5,5953	5,4671	5,4644	5,4686	5,4584	5,4709
3	7,7124	7,8904	7,7176	7,7191	7,7197	7,7031	7,7111
4	12,1166	12,4154	12,1117	12,2264	12,1154	12,1011	12,1313
5	19,1932	19,4961	19,1948	19,1531	19,1976	19,1464	19,1872
6	23,3643	23,6668	23,3670	23,3048	23,3695	23,3129	23,3572
7	25,7673	26,0690	25,7707	25,6970	25,7731	25,7113	25,7600
8	28,2191	28,5207	28,2225	28,1329	28,2248	28,1613	28,2112
9	27,0820	27,3831	27,0857	26,9710	27,0879	27,0214	27,0743
10	27,1574	27,4576	27,1616	27,0371	27,1637	27,0940	27,1488
11	27,2729	27,5711	27,2778	27,1558	27,2797	27,2064	27,2641
12	28,5627	28,8596	28,5680	28,4438	28,5699	28,4951	28,5535
13	31,5509	31,8476	31,5563	31,4324	31,5581	31,4835	31,5415
14	27,1710	27,4674	27,1765	27,0550	27,1784	27,1044	27,1611
15	24,7651	25,0605	24,7702	24,6680	24,7722	24,7020	24,7564
16	21,9005	22,1926	21,9038	21,8065	21,9060	21,8482	21,8901
17	17,0626	17,3498	17,0647	17,0587	17,0673	17,0223	17,0570
18	12,7959	13,0784	12,7971	12,7600	12,8000	12,7663	12,7888

							(conclusão)
Nó	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
19	14,6153	14,8957	14,6152	14,5738	14,6183	14,5890	14,6123
20	12,5922	12,8728	12,5913	12,6265	12,5948	12,5763	12,5894
21	10,0104	10,2917	10,0088	10,0942	10,0126	10,0034	10,0101
22	7,6263	7,8748	7,6224	7,7016	7,6258	7,6237	7,6246
23	6,0001	6,2018	6,0092	6,0929	6,0118	6,0016	6,0004
24	5,6229	5,7058	5,6248	5,6331	5,6259	5,6292	5,6215
25	5,4002	5,5803	5,4038	5,4180	5,4060	5,3788	5,3993
26	5,5181	5,7531	5,5209	5,5767	5,5239	5,5011	5,5218
27	7,0689	7,3365	7,0680	7,1324	7,0716	7,0508	7,0684
28	8,7334	9,0101	8,7323	8,7658	8,7357	8,7115	8,7269
29	11,1739	11,4538	11,1739	11,1803	11,1772	11,1499	11,1713
30	7,1138	7,3612	7,1224	7,1498	7,1254	7,0993	7,1217
31	7,6454	7,9235	7,6470	7,6906	7,6504	7,6191	7,6428
32	8,5865	8,8829	8,5847	8,6355	8,5884	8,5632	8,5857
33	9,7848	10,0773	9,7839	9,7957	9,7873	9,7561	9,7813
34	13,2101	13,4981	13,2120	13,2253	13,2148	13,1717	13,2021
35	12,7783	13,0858	12,7740	12,8754	12,7778	12,7530	12,7749
36	11,9049	12,2287	11,8996	11,9943	11,9035	11,8757	11,9049
37	13,1898	13,4992	13,1872	13,2422	13,1906	13,1515	13,1844
38	15,1446	15,4479	15,1435	15,1242	15,1465	15,0993	15,1365
39	17,9050	18,1988	17,9078	17,8411	17,9102	17,8559	17,8976
40	18,4116	18,7161	18,4133	18,3721	18,4161	18,3638	18,4060
41	17,3383	17,6440	17,3400	17,2944	17,3427	17,2877	17,3319
42	18,3250	18,6297	18,3267	18,2661	18,3294	18,2740	18,3166
43	19,0368	19,3367	19,0406	18,9525	19,0428	18,9794	19,0292
44	22,2167	22,5132	22,2219	22,1258	22,2239	22,1543	22,2075
45	23,9843	24,2871	23,9870	23,9164	23,9896	23,9312	23,9777
46	22,9459	23,2478	22,9488	22,8502	22,9512	22,8873	22,9380
47	22,8317	23,1335	22,8352	22,7293	22,8375	22,7715	22,8241
48	23,3944	23,6928	23,3991	23,2918	23,4011	23,3297	23,3859
49	25,4813	25,7781	25,4868	25,3640	25,4886	25,4148	25,4723

Fonte: Elaborado pelo autor.

(continua)

Trecho	Vazões obtidas pelas calibrações com quatro observações da hora 52 (L/s)						
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
1	10,5519	10,6613	10,5883	10,5759	10,5892	10,6618	10,6712
2	7,6577	7,7707	7,6741	7,9006	7,6753	7,8167	7,7855
3	4,2336	4,3335	4,2581	4,5711	4,2589	4,4480	4,3328
4	2,3569	2,3381	2,3517	2,4151	2,3513	2,4064	2,3399
5	1,3945	1,3916	1,3941	1,3989	1,3940	1,4027	1,3948
6	0,4277	0,4275	0,4277	0,4172	0,4277	0,4388	0,4334
7	0,2089	0,2088	0,2090	0,1984	0,2090	0,2201	0,2146
8	0,3078	0,3083	0,3083	0,3310	0,3083	0,3205	0,3114
9	0,3336	0,3348	0,3341	0,3601	0,3341	0,3455	0,3374
10	0,3999	0,4017	0,3998	0,4226	0,3998	0,4214	0,4053
11	0,2824	0,2841	0,2818	0,2908	0,2818	0,3168	0,2941
12	0,0942	0,0954	0,0937	0,1044	0,0937	0,1141	0,1012
13	0,1246	0,1234	0,1250	0,1144	0,1250	0,1047	0,1175
14	0,3327	0,3302	0,3335	0,3086	0,3335	0,2998	0,3209
15	0,4963	0,4907	0,4968	0,4432	0,4968	0,4302	0,4785
16	0,5615	0,5520	0,5613	0,5262	0,5612	0,5226	0,5344
17	0,5557	0,5457	0,5550	0,5330	0,5549	0,4995	0,5425
18	0,3638	0,3598	0,3632	0,3511	0,3632	0,3518	0,3578
19	0,5826	0,5785	0,5820	0,5699	0,5820	0,5706	0,5766
20	1,3512	1,3482	1,3526	1,3300	1,3526	1,3095	1,3449
21	2,1656	2,1667	2,1687	2,1563	2,1689	2,1360	2,1664
22	2,8372	2,7983	2,8301	2,8426	2,8298	2,7684	2,7935
23	3,6340	3,5396	3,6288	3,6214	3,6276	3,4813	3,5307
24	7,6051	7,4957	7,5686	7,5811	7,5678	7,4952	7,4857
25	2,5660	2,5624	2,5861	2,3472	2,5858	2,5169	2,5576
26	2,6671	2,6021	2,6627	2,5455	2,6618	2,6093	2,5772
27	2,1701	2,1137	2,1720	2,0894	2,1711	2,0980	2,1014
28	1,5777	1,5276	1,5727	1,5390	1,5720	1,5013	1,5464
29	1,2079	1,1911	1,2077	1,1470	1,2074	1,1624	1,1731
30	0,5200	0,5141	0,5200	0,5100	0,5199	0,4758	0,5128
31	3,0959	3,1091	3,0878	3,0013	3,0882	3,0406	3,1246
32	2,4367	2,4734	2,4474	2,3517	2,4477	2,4079	2,5278
33	1,9693	2,0091	1,9748	1,9357	1,9753	1,9600	2,0388
34	1,3451	1,3593	1,3485	1,3271	1,3487	1,3822	1,3203
35	0,6819	0,6843	0,6828	0,6924	0,6828	0,6925	0,6933
36	0,3340	0,3344	0,3344	0,3213	0,3344	0,3512	0,3201
37	1,5486	1,6672	1,5783	1,8278	1,5795	1,7134	1,6647
38	2,1641	2,2965	2,1630	2,2937	2,1651	2,2496	2,2713
39	1,5355	1,5857	1,5357	1,5289	1,5365	1,5765	1,5662
40	1,1782	1,2050	1,1777	1,1977	1,1781	1,1550	1,2176
41	0,6466	0,6533	0,6445	0,6267	0,6446	0,6159	0,6510
42	0,2630	0,2668	0,2637	0,2452	0,2637	0,2358	0,2722
43	0,6342	0,6183	0,6294	0,6880	0,6291	0,6755	0,6169
44	1,0700	1,0618	1,0713	1,1146	1,0710	1,1722	1,0604
45	0,8896	0,8930	0,8896	0,9765	0,8895	0,9781	0,8925
46	0,5673	0,5715	0,5672	0,5800	0,5672	0,5777	0,5691

							(conclusão)
Trecho	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
47	0,4200	0,4259	0,4207	0,4678	0,4207	0,4477	0,4152
48	0,1645	0,1677	0,1648	0,1935	0,1649	0,1978	0,1706
49	0,6387	0,6359	0,6382	0,6536	0,6381	0,6357	0,6333
50	1,1739	1,1719	1,1721	1,1956	1,1720	1,2128	1,1748
51	0,8744	0,8752	0,8735	0,8766	0,8734	0,8833	0,8800
52	0,5321	0,5342	0,5313	0,5432	0,5313	0,5923	0,5408
53	0,3321	0,3353	0,3321	0,3674	0,3321	0,3774	0,3504
54	0,1201	0,1213	0,1197	0,1340	0,1197	0,1330	0,1248
55	3,6430	3,6279	3,6116	3,6315	3,6120	3,6857	3,6268
56	3,1043	3,1507	3,0975	2,9956	3,0984	3,1559	3,1697
57	3,3261	3,3490	3,3004	3,2078	3,3014	3,3510	3,3290
58	2,2731	2,2822	2,2782	2,3044	2,2782	2,3774	2,2849
59	1,3998	1,4012	1,3989	1,4403	1,3989	1,4432	1,4040
60	0,4271	0,4277	0,4275	0,4608	0,4275	0,4286	0,4250
61	0,4686	0,4132	0,4705	0,4507	0,4697	0,3847	0,4091
62	0,5281	0,4641	0,5237	0,4693	0,5228	0,4585	0,4474
63	0,5579	0,4908	0,5588	0,4477	0,5578	0,4689	0,4989
64	0,7489	0,7642	0,7486	0,7750	0,7489	0,7045	0,7664
65	0,4919	0,4955	0,4928	0,4757	0,4929	0,4611	0,4968
66	0,3539	0,3547	0,3540	0,3572	0,3540	0,3532	0,3541
67	0,3434	0,3034	0,3332	0,3582	0,3328	0,3043	0,2989
68	0,4984	0,4520	0,4950	0,4711	0,4944	0,4634	0,4164
69	0,6851	0,6644	0,6838	0,6422	0,6836	0,6038	0,6974
70	0,6049	0,6075	0,6043	0,5359	0,6044	0,5877	0,6086
71	0,4897	0,4915	0,4892	0,4948	0,4893	0,5506	0,4945
72	0,3945	0,3950	0,3939	0,3907	0,3939	0,4041	0,3961
73	0,4863	0,4904	0,4880	0,4981	0,4881	0,4984	0,4933
74	0,4185	0,3893	0,4155	0,4526	0,4151	0,3998	0,4291
75	0,6442	0,6268	0,6437	0,6498	0,6435	0,6519	0,6186
76	0,7384	0,7411	0,7395	0,7834	0,7395	0,7536	0,7476
77	0,4482	0,4492	0,4485	0,4581	0,4485	0,4461	0,4640
78	0,2107	0,2106	0,2101	0,1964	0,2101	0,2235	0,2169
79	0,4405	0,4415	0,4425	0,4319	0,4425	0,4107	0,4402
80	0,6909	0,6810	0,6927	0,6314	0,6925	0,6598	0,6630
81	0,6013	0,5934	0,6035	0,5650	0,6034	0,5636	0,5987
82	0,5474	0,5423	0,5468	0,5089	0,5468	0,5062	0,5400
83	0,3654	0,3630	0,3651	0,3457	0,3651	0,3185	0,3472
84	0,1399	0,1394	0,1401	0,1417	0,1401	0,1255	0,1353
85	18,4851	18,4851	18,4851	18,4851	18,4851	18,4851	18,4851

Fonte: Elaborado pelo autor.

(continua)

Trecho	Vazões obtidas pelas calibrações com sete observações da hora 52 (L/s)						
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
1	10,5519	10,6613	10,5826	10,8154	10,5820	10,6407	10,7430
2	7,6577	7,7707	7,6666	7,7464	7,6658	7,6950	7,6452
3	4,2336	4,3335	4,2534	4,4546	4,2528	4,3857	4,2993
4	2,3569	2,3381	2,3555	2,3635	2,3558	2,3671	2,3532
5	1,3945	1,3916	1,3953	1,4383	1,3954	1,3928	1,3758
6	0,4277	0,4275	0,4278	0,4219	0,4278	0,4119	0,4270
7	0,2089	0,2088	0,2090	0,2032	0,2091	0,1931	0,2083
8	0,3078	0,3083	0,3083	0,3046	0,3084	0,2910	0,3054
9	0,3336	0,3348	0,3340	0,3254	0,3340	0,3262	0,3289
10	0,3999	0,4017	0,3996	0,4230	0,3996	0,4109	0,3979
11	0,2824	0,2841	0,2817	0,2954	0,2817	0,2879	0,2802
12	0,0942	0,0954	0,0937	0,1035	0,0937	0,0998	0,0935
13	0,1246	0,1234	0,1250	0,1153	0,1250	0,1189	0,1252
14	0,3327	0,3302	0,3334	0,3134	0,3334	0,3148	0,3323
15	0,4963	0,4907	0,4967	0,4582	0,4967	0,4549	0,4927
16	0,5615	0,5520	0,5615	0,5387	0,5616	0,5423	0,5503
17	0,5557	0,5457	0,5553	0,5355	0,5553	0,5303	0,5469
18	0,3638	0,3598	0,3633	0,3534	0,3633	0,3501	0,3563
19	0,5826	0,5785	0,5821	0,5721	0,5821	0,5688	0,5750
20	1,3512	1,3482	1,3523	1,3047	1,3522	1,2968	1,3345
21	2,1656	2,1667	2,1673	2,1303	2,1672	2,1318	2,1391
22	2,8372	2,7983	2,8320	2,7954	2,8322	2,8055	2,7930
23	3,6340	3,5396	3,6369	3,5036	3,6378	3,5370	3,5690
24	7,6051	7,4957	7,5743	7,3415	7,5750	7,5163	7,4140
25	2,5660	2,5624	2,5878	2,7409	2,5881	2,6175	2,7696
26	2,6671	2,6021	2,6687	2,5728	2,6693	2,5497	2,6025
27	2,1701	2,1137	2,1779	2,0904	2,1786	2,0828	2,1384
28	1,5777	1,5276	1,5779	1,5220	1,5785	1,5091	1,5692
29	1,2079	1,1911	1,2095	1,2049	1,2097	1,2117	1,2018
30	0,5200	0,5141	0,5201	0,5103	0,5202	0,5084	0,5188
31	3,0959	3,1091	3,0850	2,9636	3,0848	2,9811	3,0177
32	2,4367	2,4734	2,4447	2,3983	2,4444	2,3558	2,4518
33	1,9693	2,0091	1,9716	1,9431	1,9712	1,8902	1,9956
34	1,3451	1,3593	1,3473	1,3495	1,3472	1,3408	1,3486
35	0,6819	0,6843	0,6824	0,6923	0,6824	0,6901	0,6899
36	0,3340	0,3344	0,3344	0,3313	0,3344	0,3402	0,3315
37	1,5486	1,6672	1,5697	1,7629	1,5688	1,6904	1,6179
38	2,1641	2,2965	2,1472	2,3688	2,1456	2,4152	2,2655
39	1,5355	1,5857	1,5292	1,6603	1,5286	1,7290	1,5796
40	1,1782	1,2050	1,1751	1,2352	1,1748	1,2744	1,2120
41	0,6466	0,6533	0,6434	0,6360	0,6433	0,6439	0,6582
42	0,2630	0,2668	0,2633	0,2477	0,2632	0,2407	0,2706
43	0,6342	0,6183	0,6321	0,5970	0,6323	0,6462	0,6493
44	1,0700	1,0618	1,0741	1,1266	1,0743	1,0806	1,0933
45	0,8896	0,8930	0,8906	0,8706	0,8907	0,8573	0,9025
46	0,5673	0,5715	0,5671	0,5631	0,5671	0,5460	0,5693

							(conclusão)
Trecho	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
47	0,4200	0,4259	0,4206	0,4527	0,4205	0,4428	0,4240
48	0,1645	0,1677	0,1649	0,1833	0,1649	0,1881	0,1677
49	0,6387	0,6359	0,6393	0,6882	0,6394	0,6527	0,6206
50	1,1739	1,1719	1,1737	1,1789	1,1737	1,2243	1,1662
51	0,8744	0,8752	0,8744	0,9245	0,8745	0,9186	0,8717
52	0,5321	0,5342	0,5317	0,5428	0,5317	0,5529	0,5299
53	0,3321	0,3353	0,3323	0,3361	0,3323	0,3489	0,3335
54	0,1201	0,1213	0,1198	0,1301	0,1198	0,1323	0,1211
55	3,6430	3,6279	3,6093	3,5098	3,6090	3,6511	3,5168
56	3,1043	3,1507	3,0909	3,2404	3,0902	3,2814	3,2464
57	3,3261	3,3490	3,2938	3,3682	3,2931	3,4692	3,3749
58	2,2731	2,2822	2,2788	2,3248	2,2788	2,3069	2,2898
59	1,3998	1,4012	1,3993	1,3578	1,3993	1,4351	1,4083
60	0,4271	0,4277	0,4275	0,4296	0,4275	0,4261	0,4253
61	0,4686	0,4132	0,4768	0,3800	0,4774	0,4033	0,4479
62	0,5281	0,4641	0,5300	0,4250	0,5307	0,4327	0,4745
63	0,5579	0,4908	0,5657	0,4426	0,5664	0,4608	0,4931
64	0,7489	0,7642	0,7462	0,7136	0,7459	0,7095	0,7414
65	0,4919	0,4955	0,4921	0,5321	0,4921	0,4952	0,4947
66	0,3539	0,3547	0,3538	0,3490	0,3538	0,3634	0,3517
67	0,3434	0,3034	0,3365	0,3369	0,3369	0,3456	0,3257
68	0,4984	0,4520	0,4990	0,4678	0,4994	0,4819	0,4574
69	0,6851	0,6644	0,6858	0,6239	0,6859	0,5938	0,6669
70	0,6049	0,6075	0,6024	0,6115	0,6023	0,6109	0,5971
71	0,4897	0,4915	0,4884	0,4814	0,4884	0,4847	0,4928
72	0,3945	0,3950	0,3937	0,4257	0,3937	0,4128	0,3971
73	0,4863	0,4904	0,4869	0,4974	0,4868	0,5068	0,4764
74	0,4185	0,3893	0,4178	0,3771	0,4181	0,3666	0,4063
75	0,6442	0,6268	0,6452	0,5968	0,6454	0,5799	0,6275
76	0,7384	0,7411	0,7394	0,7585	0,7394	0,7729	0,7438
77	0,4482	0,4492	0,4484	0,4314	0,4484	0,4386	0,4516
78	0,2107	0,2106	0,2103	0,2005	0,2103	0,2051	0,2106
79	0,4405	0,4415	0,4420	0,4045	0,4420	0,3998	0,4313
80	0,6909	0,6810	0,6939	0,6615	0,6940	0,6657	0,6768
81	0,6013	0,5934	0,6044	0,5850	0,6045	0,5781	0,5977
82	0,5474	0,5423	0,5470	0,5358	0,5471	0,5438	0,5478
83	0,3654	0,3630	0,3652	0,3677	0,3652	0,3611	0,3666
84	0,1399	0,1394	0,1402	0,1363	0,1402	0,1401	0,1414
85	18,4851	18,4851	18,4851	18,4851	18,4851	18,4851	18,4851

Fonte: Elaborado pelo autor.

(continua)

Trecho	Vazões obtidas pelas calibrações com 13 observações da hora 52 (L/s)						
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
1	10,5519	10,6613	10,5836	10,5976	10,5826	10,5481	10,7243
2	7,6577	7,7707	7,6679	7,8256	7,6666	7,6405	7,6691
3	4,2336	4,3335	4,2542	4,2181	4,2535	4,1600	4,2972
4	2,3569	2,3381	2,3548	2,2890	2,3558	2,3320	2,3336
5	1,3945	1,3916	1,3951	1,4121	1,3954	1,4019	1,3998
6	0,4277	0,4275	0,4278	0,4187	0,4278	0,4283	0,4280
7	0,2089	0,2088	0,2090	0,2000	0,2091	0,2096	0,2092
8	0,3078	0,3083	0,3083	0,2806	0,3083	0,3096	0,3060
9	0,3336	0,3348	0,3340	0,3136	0,3340	0,3350	0,3338
10	0,3999	0,4017	0,3996	0,4001	0,3996	0,4072	0,4016
11	0,2824	0,2841	0,2817	0,2887	0,2817	0,2873	0,2841
12	0,0942	0,0954	0,0937	0,0960	0,0937	0,0972	0,0954
13	0,1246	0,1234	0,1250	0,1228	0,1250	0,1216	0,1233
14	0,3327	0,3302	0,3334	0,3300	0,3333	0,3272	0,3299
15	0,4963	0,4907	0,4967	0,4851	0,4966	0,4880	0,4895
16	0,5615	0,5520	0,5615	0,5200	0,5615	0,5516	0,5487
17	0,5557	0,5457	0,5552	0,5036	0,5552	0,5402	0,5485
18	0,3638	0,3598	0,3633	0,3526	0,3633	0,3547	0,3572
19	0,5826	0,5785	0,5821	0,5714	0,5820	0,5734	0,5759
20	1,3512	1,3482	1,3523	1,3121	1,3522	1,3333	1,3334
21	2,1656	2,1667	2,1676	2,1254	2,1672	2,1359	2,1360
22	2,8372	2,7983	2,8317	2,7529	2,8319	2,7951	2,7638
23	3,6340	3,5396	3,6355	3,4423	3,6369	3,5862	3,5458
24	7,6051	7,4957	7,5733	7,5594	7,5744	7,6088	7,4327
25	2,5660	2,5624	2,5875	2,4438	2,5878	2,5795	2,7270
26	2,6671	2,6021	2,6676	2,6456	2,6687	2,6586	2,6649
27	2,1701	2,1137	2,1769	2,0937	2,1780	2,1651	2,1851
28	1,5777	1,5276	1,5770	1,4723	1,5780	1,5773	1,5633
29	1,2079	1,1911	1,2092	1,1844	1,2095	1,2035	1,1971
30	0,5200	0,5141	0,5201	0,4792	0,5201	0,5137	0,5195
31	3,0959	3,1091	3,0856	3,2793	3,0850	3,1523	3,0438
32	2,4367	2,4734	2,4452	2,4767	2,4447	2,4204	2,4448
33	1,9693	2,0091	1,9721	1,9947	1,9715	1,9701	1,9822
34	1,3451	1,3593	1,3475	1,3999	1,3473	1,3544	1,3636
35	0,6819	0,6843	0,6825	0,7061	0,6824	0,6877	0,6911
36	0,3340	0,3344	0,3344	0,3445	0,3344	0,3395	0,3283
37	1,5486	1,6672	1,5713	1,6010	1,5695	1,4999	1,6355
38	2,1641	2,2965	2,1501	2,4100	2,1468	2,2146	2,2524
39	1,5355	1,5857	1,5304	1,6645	1,5289	1,5566	1,5684
40	1,1782	1,2050	1,1755	1,2436	1,1750	1,1883	1,1973
41	0,6466	0,6533	0,6436	0,6739	0,6434	0,6502	0,6547
42	0,2630	0,2668	0,2633	0,2933	0,2633	0,2645	0,2690
43	0,6342	0,6183	0,6316	0,5487	0,6322	0,6019	0,6056
44	1,0700	1,0618	1,0735	1,0191	1,0743	1,0802	1,0622
45	0,8896	0,8930	0,8904	0,9075	0,8908	0,9045	0,8975
46	0,5673	0,5715	0,5671	0,6091	0,5671	0,5677	0,5699

							(conclusão)
Trecho	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
47	0,4200	0,4259	0,4206	0,4361	0,4206	0,4241	0,4264
48	0,1645	0,1677	0,1649	0,1730	0,1649	0,1674	0,1686
49	0,6387	0,6359	0,6391	0,6652	0,6394	0,6454	0,6437
50	1,1739	1,1719	1,1734	1,1792	1,1739	1,1840	1,1774
51	0,8744	0,8752	0,8742	0,8828	0,8746	0,8833	0,8788
52	0,5321	0,5342	0,5316	0,5156	0,5317	0,5352	0,5342
53	0,3321	0,3353	0,3323	0,3209	0,3324	0,3360	0,3353
54	0,1201	0,1213	0,1198	0,1210	0,1199	0,1225	0,1216
55	3,6430	3,6279	3,6097	3,7889	3,6093	3,6945	3,5587
56	3,1043	3,1507	3,0921	3,1496	3,0909	3,1779	3,1833
57	3,3261	3,3490	3,2950	3,5147	3,2937	3,4723	3,3448
58	2,2731	2,2822	2,2787	2,2681	2,2789	2,3200	2,2903
59	1,3998	1,4012	1,3992	1,3603	1,3994	1,4043	1,3962
60	0,4271	0,4277	0,4275	0,4088	0,4275	0,4282	0,4249
61	0,4686	0,4132	0,4756	0,3612	0,4768	0,4629	0,4538
62	0,5281	0,4641	0,5289	0,4756	0,5301	0,5189	0,4961
63	0,5579	0,4908	0,5644	0,5201	0,5657	0,5317	0,5212
64	0,7489	0,7642	0,7466	0,8282	0,7460	0,7522	0,7677
65	0,4919	0,4955	0,4922	0,5022	0,4920	0,4904	0,4949
66	0,3539	0,3547	0,3539	0,3611	0,3538	0,3536	0,3560
67	0,3434	0,3034	0,3359	0,2994	0,3366	0,3310	0,2997
68	0,4984	0,4520	0,4983	0,4833	0,4990	0,4813	0,4839
69	0,6851	0,6644	0,6854	0,6406	0,6858	0,6596	0,6650
70	0,6049	0,6075	0,6028	0,6240	0,6022	0,5904	0,5987
71	0,4897	0,4915	0,4886	0,4849	0,4884	0,4897	0,4888
72	0,3945	0,3950	0,3938	0,4147	0,3937	0,4003	0,3959
73	0,4863	0,4904	0,4871	0,4852	0,4868	0,4744	0,4744
74	0,4185	0,3893	0,4174	0,3356	0,4178	0,4108	0,4031
75	0,6442	0,6268	0,6450	0,5919	0,6452	0,6399	0,6381
76	0,7384	0,7411	0,7394	0,7241	0,7394	0,7405	0,7432
77	0,4482	0,4492	0,4484	0,4596	0,4484	0,4466	0,4492
78	0,2107	0,2106	0,2102	0,2168	0,2103	0,2083	0,2107
79	0,4405	0,4415	0,4421	0,4125	0,4420	0,4317	0,4294
80	0,6909	0,6810	0,6937	0,6802	0,6940	0,6840	0,6695
81	0,6013	0,5934	0,6042	0,6043	0,6044	0,5947	0,5948
82	0,5474	0,5423	0,5470	0,5475	0,5470	0,5429	0,5430
83	0,3654	0,3630	0,3652	0,3730	0,3652	0,3621	0,3633
84	0,1399	0,1394	0,1402	0,1354	0,1402	0,1380	0,1395
85	18,4851	18,4851	18,4851	18,4851	18,4851	18,4851	18,4851

Fonte: Elaborado pelo autor.

(continua)

Trecho	Vazões obtidas pelas calibrações com 25 observações da hora 52 (L/s)						
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
1	10,5519	10,6613	10,5794	10,6692	10,5804	10,6383	10,6269
2	7,6577	7,7707	7,6624	7,7301	7,6638	7,6888	7,7350
3	4,2336	4,3335	4,2508	4,3821	4,2517	4,2972	4,3424
4	2,3569	2,3381	2,3579	2,3427	2,3573	2,3638	2,3372
5	1,3945	1,3916	1,3961	1,4259	1,3959	1,4002	1,3882
6	0,4277	0,4275	0,4279	0,4469	0,4278	0,4296	0,4287
7	0,2089	0,2088	0,2091	0,2281	0,2091	0,2109	0,2099
8	0,3078	0,3083	0,3084	0,3115	0,3084	0,3098	0,3085
9	0,3336	0,3348	0,3340	0,3080	0,3340	0,3345	0,3352
10	0,3999	0,4017	0,3994	0,3742	0,3995	0,3955	0,4008
11	0,2824	0,2841	0,2816	0,2763	0,2817	0,2790	0,2836
12	0,0942	0,0954	0,0937	0,0903	0,0937	0,0925	0,0956
13	0,1246	0,1234	0,1250	0,1285	0,1250	0,1263	0,1231
14	0,3327	0,3302	0,3332	0,3428	0,3332	0,3345	0,3286
15	0,4963	0,4907	0,4965	0,4909	0,4965	0,4973	0,4941
16	0,5615	0,5520	0,5616	0,5307	0,5615	0,5590	0,5523
17	0,5557	0,5457	0,5554	0,5112	0,5553	0,5558	0,5507
18	0,3638	0,3598	0,3633	0,3220	0,3633	0,3625	0,3612
19	0,5826	0,5785	0,5821	0,5407	0,5821	0,5812	0,5799
20	1,3512	1,3482	1,3520	1,3404	1,3521	1,3537	1,3481
21	2,1656	2,1667	2,1664	2,1673	2,1666	2,1806	2,1603
22	2,8372	2,7983	2,8329	2,8262	2,8326	2,8732	2,8203
23	3,6340	3,5396	3,6414	3,6294	3,6400	3,6840	3,5994
24	7,6051	7,4957	7,5775	7,4877	7,5765	7,5186	7,5300
25	2,5660	2,5624	2,5888	2,6110	2,5885	2,6214	2,5638
26	2,6671	2,6021	2,6720	2,5018	2,6710	2,6170	2,6447
27	2,1701	2,1137	2,1813	2,0734	2,1803	2,1330	2,1402
28	1,5777	1,5276	1,5810	1,5131	1,5801	1,5686	1,5541
29	1,2079	1,1911	1,2105	1,1700	1,2102	1,2081	1,1957
30	0,5200	0,5141	0,5202	0,5174	0,5201	0,5215	0,5177
31	3,0959	3,1091	3,0835	3,0198	3,0839	3,0634	3,0644
32	2,4367	2,4734	2,4432	2,4132	2,4437	2,4328	2,4393
33	1,9693	2,0091	1,9697	1,9756	1,9703	1,9677	1,9744
34	1,3451	1,3593	1,3466	1,3720	1,3468	1,3402	1,3526
35	0,6819	0,6843	0,6822	0,6804	0,6822	0,6783	0,6873
36	0,3340	0,3344	0,3344	0,3477	0,3344	0,3314	0,3298
37	1,5486	1,6672	1,5648	1,7113	1,5662	1,6052	1,6770
38	2,1641	2,2965	2,1380	2,4397	2,1406	2,1757	2,2096
39	1,5355	1,5857	1,5254	1,6935	1,5264	1,5489	1,5614
40	1,1782	1,2050	1,1736	1,2523	1,1740	1,1875	1,1942
41	0,6466	0,6533	0,6428	0,6995	0,6429	0,6498	0,6469
42	0,2630	0,2668	0,2630	0,2884	0,2631	0,2665	0,2700
43	0,6342	0,6183	0,6337	0,5886	0,6333	0,6354	0,6209
44	1,0700	1,0618	1,0758	1,0091	1,0754	1,0692	1,0755
45	0,8896	0,8930	0,8913	0,8760	0,8912	0,8824	0,9010
46	0,5673	0,5715	0,5670	0,5558	0,5671	0,5644	0,5689

							(conclusão)
Trecho	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
47	0,4200	0,4259	0,4205	0,4340	0,4206	0,4219	0,4256
48	0,1645	0,1677	0,1649	0,1800	0,1649	0,1654	0,1626
49	0,6387	0,6359	0,6400	0,6509	0,6399	0,6424	0,6313
50	1,1739	1,1719	1,1747	1,1489	1,1745	1,1651	1,1767
51	0,8744	0,8752	0,8751	0,8571	0,8750	0,8701	0,8772
52	0,5321	0,5342	0,5319	0,5313	0,5319	0,5292	0,5350
53	0,3321	0,3353	0,3325	0,3215	0,3324	0,3314	0,3350
54	0,1201	0,1213	0,1199	0,1138	0,1199	0,1199	0,1227
55	3,6430	3,6279	3,6080	3,5302	3,6084	3,5065	3,6025
56	3,1043	3,1507	3,0873	3,2018	3,0884	3,0734	3,0841
57	3,3261	3,3490	3,2900	3,3709	3,2911	3,2666	3,2717
58	2,2731	2,2822	2,2792	2,2050	2,2792	2,2585	2,3017
59	1,3998	1,4012	1,3996	1,3470	1,3995	1,3872	1,4096
60	0,4271	0,4277	0,4275	0,4115	0,4275	0,4271	0,4267
61	0,4686	0,4132	0,4803	0,4750	0,4792	0,4826	0,4509
62	0,5281	0,4641	0,5336	0,4660	0,5325	0,5291	0,5179
63	0,5579	0,4908	0,5696	0,4661	0,5683	0,5567	0,5452
64	0,7489	0,7642	0,7447	0,7748	0,7451	0,7460	0,7559
65	0,4919	0,4955	0,4917	0,4704	0,4918	0,4953	0,4929
66	0,3539	0,3547	0,3537	0,3246	0,3538	0,3529	0,3549
67	0,3434	0,3034	0,3384	0,3307	0,3378	0,3644	0,3319
68	0,4984	0,4520	0,5012	0,4535	0,5005	0,4914	0,4805
69	0,6851	0,6644	0,6868	0,6196	0,6865	0,6814	0,6648
70	0,6049	0,6075	0,6012	0,6234	0,6014	0,6053	0,5945
71	0,4897	0,4915	0,4880	0,5061	0,4881	0,4858	0,4891
72	0,3945	0,3950	0,3936	0,3944	0,3937	0,3892	0,3938
73	0,4863	0,4904	0,4862	0,4988	0,4864	0,4988	0,4841
74	0,4185	0,3893	0,4191	0,4043	0,4187	0,4218	0,4050
75	0,6442	0,6268	0,6461	0,6584	0,6458	0,6461	0,6328
76	0,7384	0,7411	0,7394	0,7737	0,7394	0,7463	0,7426
77	0,4482	0,4492	0,4484	0,4580	0,4484	0,4513	0,4485
78	0,2107	0,2106	0,2103	0,2303	0,2103	0,2116	0,2109
79	0,4405	0,4415	0,4418	0,4715	0,4418	0,4443	0,4400
80	0,6909	0,6810	0,6946	0,6866	0,6944	0,6934	0,6805
81	0,6013	0,5934	0,6049	0,5819	0,6047	0,6029	0,6005
82	0,5474	0,5423	0,5471	0,5555	0,5471	0,5487	0,5399
83	0,3654	0,3630	0,3652	0,3719	0,3652	0,3677	0,3654
84	0,1399	0,1394	0,1403	0,1421	0,1402	0,1417	0,1402
85	18,4851	18,4851	18,4851	18,4851	18,4851	18,4851	18,4851

Fonte: Elaborado pelo autor.

**APÊNDICE G – RUGOSIDADES ABSOLUTAS CALCULADAS PARA A REDE
SOUSA, NAS CALIBRAÇÕES QUE EMPREGARAM DADOS OBSERVADOS DAS
HORAS 52 E 60**

(continua)

Trecho	Rugosidades calculadas pelas calibrações com oito observações das horas 52 e 60 (mm)						
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
1	0,3857	0,0100	0,3660	0,1312	0,3523	0,1841	0,1363
2	0,4841	0,0100	0,3660	0,2207	0,3523	0,2233	0,1592
3	0,3600	0,0100	0,3660	0,1569	0,3523	0,1934	0,1005
4	0,0075	0,0100	0,0121	0,0461	0,0190	0,0011	0,0630
5	0,0062	0,0100	0,0121	0,2659	0,0190	0,4265	0,0760
6	0,0049	0,0100	0,0121	0,2904	0,0190	0,4051	0,0722
7	0,0030	0,0100	0,0121	0,3713	0,0190	0,1946	0,0934
8	0,0068	0,0100	0,0121	0,2884	0,0190	0,1170	0,2016
9	0,0079	0,0100	0,0121	0,3522	0,0190	0,3542	0,2454
10	0,0026	0,0100	0,0121	0,0870	0,0190	0,1455	0,2877
11	0,0022	0,0100	0,0121	0,2087	0,0190	0,2843	0,0040
12	0,0077	0,0100	0,0121	0,2193	0,0190	0,1831	0,1251
13	0,0084	0,0100	0,0121	0,2170	0,0190	0,4302	0,1127
14	0,0073	0,0100	0,0121	0,2023	0,0190	0,4328	0,0716
15	0,0081	0,0100	0,0121	0,2278	0,0190	0,4103	0,0321
16	0,0037	0,0100	0,0121	0,1524	0,0190	0,3874	0,1138
17	0,0024	0,0100	0,0121	0,2482	0,0190	0,2819	0,1607
18	0,0094	0,0100	0,0121	0,1285	0,0190	0,3743	0,3057
19	0,0015	0,0100	0,0121	0,2926	0,0190	0,3350	0,1395
20	0,0035	0,0100	0,0121	0,4310	0,0190	0,7384	0,1804
21	0,4209	0,0100	0,3660	0,3882	0,3523	0,3450	0,2389
22	0,2727	0,0100	0,3660	0,3390	0,3523	0,2790	0,1991
23	0,4283	0,0100	0,3660	0,3758	0,3523	0,3492	0,1606
24	0,4171	0,0100	0,3660	0,2317	0,3523	0,2389	0,1790
25	0,4977	0,0100	0,3660	0,2261	0,3523	0,2590	0,2361
26	0,3826	0,0100	0,3660	0,1719	0,3523	0,2139	0,2738
27	0,3462	0,0100	0,3660	0,2684	0,3523	0,2568	0,3707
28	0,0018	0,0100	0,0121	0,2629	0,0190	0,2908	0,3378
29	0,0099	0,0100	0,0121	0,2290	0,0190	0,3553	0,0459
30	0,0047	0,0100	0,0121	0,2186	0,0190	0,3858	0,0480
31	0,3948	0,0100	0,3660	0,2037	0,3523	0,3058	0,2244
32	0,3117	0,0100	0,3660	0,3450	0,3523	0,3008	0,3321
33	0,3198	0,0100	0,3660	0,4288	0,3523	0,3495	0,3790
34	0,0058	0,0100	0,0121	0,4599	0,0190	0,6846	0,6084
35	0,0056	0,0100	0,0121	0,0576	0,0190	0,1837	0,0048
36	0,0045	0,0100	0,0121	0,1337	0,0190	0,3232	0,0121
37	0,4441	0,0100	0,3660	0,2175	0,3523	0,2741	0,3473
38	0,3248	0,0100	0,3660	0,1542	0,3523	0,3640	0,2568
39	0,0020	0,0100	0,0121	0,2622	0,0190	0,2400	0,2571
40	0,0032	0,0100	0,0121	0,2274	0,0190	0,2879	0,4626
41	0,0021	0,0100	0,0121	0,2301	0,0190	0,3430	0,0367
42	0,0081	0,0100	0,0121	0,3027	0,0190	0,6217	0,0083

							(conclusão)
Trecho	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
43	0,0045	0,0100	0,0121	0,2649	0,0190	0,3200	0,2667
44	0,0079	0,0100	0,0121	0,2306	0,0190	0,5013	0,1832
45	0,0041	0,0100	0,0121	0,2114	0,0190	0,2570	0,2727
46	0,0055	0,0100	0,0121	0,0876	0,0190	0,3160	0,1857
47	0,0098	0,0100	0,0121	0,1185	0,0190	0,2916	0,1614
48	0,0084	0,0100	0,0121	0,0724	0,0190	0,0100	0,1272
49	0,0075	0,0100	0,0121	0,0976	0,0190	0,3689	0,1980
50	0,0020	0,0100	0,0121	0,2292	0,0190	0,1287	0,1280
51	0,0096	0,0100	0,0121	0,2258	0,0190	0,3273	0,2060
52	0,0037	0,0100	0,0121	0,1984	0,0190	0,0338	0,1918
53	0,0099	0,0100	0,0121	0,1546	0,0190	0,0689	0,0016
54	0,0084	0,0100	0,0121	0,2789	0,0190	0,3783	0,2983
55	0,3607	0,0100	0,3660	0,2622	0,3523	0,1975	0,1657
56	0,4016	0,0100	0,3660	0,1103	0,3523	0,1967	0,1838
57	0,2744	0,0100	0,3660	0,2488	0,3523	0,1928	0,0721
58	0,0098	0,0100	0,0121	0,0960	0,0190	0,0512	0,0544
59	0,0041	0,0100	0,0121	0,2500	0,0190	0,6062	0,0684
60	0,0051	0,0100	0,0121	0,2718	0,0190	0,2396	0,0772
61	0,0055	0,0100	0,0121	0,1416	0,0190	0,4336	0,3210
62	0,0092	0,0100	0,0121	0,2894	0,0190	0,4055	0,4113
63	0,0045	0,0100	0,0121	0,1745	0,0190	0,1858	0,0045
64	0,0047	0,0100	0,0121	0,0507	0,0190	0,1034	0,0498
65	0,0045	0,0100	0,0121	0,2365	0,0190	0,1318	0,0604
66	0,0062	0,0100	0,0121	0,0369	0,0190	0,0237	0,0856
67	0,0044	0,0100	0,0121	0,1062	0,0190	0,3237	0,3830
68	0,0039	0,0100	0,0121	0,3340	0,0190	0,3364	0,4595
69	0,0016	0,0100	0,0121	0,2401	0,0190	0,4381	0,0020
70	0,0034	0,0100	0,0121	0,1644	0,0190	0,0815	0,0043
71	0,0029	0,0100	0,0121	0,1633	0,0190	0,4067	0,0434
72	0,0018	0,0100	0,0121	0,0527	0,0190	0,2209	0,1185
73	0,0019	0,0100	0,0121	0,0894	0,0190	0,1974	0,2828
74	0,0036	0,0100	0,0121	0,2586	0,0190	0,4573	0,3461
75	0,0027	0,0100	0,0121	0,0204	0,0190	0,1547	0,0019
76	0,0088	0,0100	0,0121	0,1364	0,0190	0,0880	0,0014
77	0,0050	0,0100	0,0121	0,1541	0,0190	0,3313	0,0255
78	0,0016	0,0100	0,0121	0,2647	0,0190	0,6213	0,0102
79	0,0096	0,0100	0,0121	0,2822	0,0190	0,4190	0,4394
80	0,0090	0,0100	0,0121	0,3134	0,0190	0,3042	0,2087
81	0,0091	0,0100	0,0121	0,3785	0,0190	0,5384	0,0054
82	0,0066	0,0100	0,0121	0,1000	0,0190	0,3957	0,0070
83	0,0024	0,0100	0,0121	0,2383	0,0190	0,3163	0,0910
84	0,0047	0,0100	0,0121	0,2030	0,0190	0,4184	0,1770
85	0,3450	0,0100	0,3660	0,4469	0,3523	0,4944	0,3462

Fonte: Elaborado pelo autor.

(continua)

Trecho	Rugosidades calculadas pelas calibrações com 14 observações das horas 52 e 60 (mm)						
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
1	0,3857	0,0100	0,3708	0,2697	0,3734	0,2880	0,2963
2	0,4841	0,0100	0,3708	0,2037	0,3734	0,1464	0,2303
3	0,3600	0,0100	0,3708	0,1609	0,3734	0,0202	0,1384
4	0,0075	0,0100	0,0157	0,0023	0,0083	0,0377	0,1002
5	0,0062	0,0100	0,0157	0,0150	0,0083	0,0256	0,0819
6	0,0049	0,0100	0,0157	0,2358	0,0083	0,1262	0,0606
7	0,0030	0,0100	0,0157	0,2136	0,0083	0,2917	0,1039
8	0,0068	0,0100	0,0157	0,0514	0,0083	0,2135	0,0887
9	0,0079	0,0100	0,0157	0,1545	0,0083	0,1036	0,0836
10	0,0026	0,0100	0,0157	0,2360	0,0083	0,1089	0,0009
11	0,0022	0,0100	0,0157	0,1844	0,0083	0,1616	0,0031
12	0,0077	0,0100	0,0157	0,0646	0,0083	0,1964	0,0715
13	0,0084	0,0100	0,0157	0,3813	0,0083	0,1456	0,0948
14	0,0073	0,0100	0,0157	0,1048	0,0083	0,0441	0,0003
15	0,0081	0,0100	0,0157	0,1897	0,0083	0,1263	0,0166
16	0,0037	0,0100	0,0157	0,2843	0,0083	0,2570	0,0569
17	0,0024	0,0100	0,0157	0,2132	0,0083	0,1215	0,1177
18	0,0094	0,0100	0,0157	0,2780	0,0083	0,2629	0,2286
19	0,0015	0,0100	0,0157	0,2127	0,0083	0,0846	0,1110
20	0,0035	0,0100	0,0157	0,3309	0,0083	0,2488	0,1477
21	0,4209	0,0100	0,3708	0,3234	0,3734	0,4962	0,2015
22	0,2727	0,0100	0,3708	0,1807	0,3734	0,2507	0,2053
23	0,4283	0,0100	0,3708	0,0687	0,3734	0,1965	0,1966
24	0,4171	0,0100	0,3708	0,2490	0,3734	0,4506	0,3986
25	0,4977	0,0100	0,3708	0,2282	0,3734	0,5577	0,2891
26	0,3826	0,0100	0,3708	0,0171	0,3734	0,1042	0,0398
27	0,3462	0,0100	0,3708	0,2488	0,3734	0,3210	0,1101
28	0,0018	0,0100	0,0157	0,0303	0,0083	0,0426	0,1413
29	0,0099	0,0100	0,0157	0,2254	0,0083	0,1317	0,0243
30	0,0047	0,0100	0,0157	0,2254	0,0083	0,1175	0,0393
31	0,3948	0,0100	0,3708	0,3045	0,3734	0,4477	0,3401
32	0,3117	0,0100	0,3708	0,2993	0,3734	0,6309	0,3439
33	0,3198	0,0100	0,3708	0,3610	0,3734	0,4283	0,6330
34	0,0058	0,0100	0,0157	0,2575	0,0083	0,2496	0,2374
35	0,0056	0,0100	0,0157	0,0105	0,0083	0,1234	0,0019
36	0,0045	0,0100	0,0157	0,2216	0,0083	0,1391	0,0043
37	0,4441	0,0100	0,3708	0,2196	0,3734	0,4088	0,4301
38	0,3248	0,0100	0,3708	0,1083	0,3734	0,4857	0,2180
39	0,0020	0,0100	0,0157	0,0379	0,0083	0,0353	0,1575
40	0,0032	0,0100	0,0157	0,2679	0,0083	0,2602	0,1709
41	0,0021	0,0100	0,0157	0,0002	0,0083	0,0699	0,0082
42	0,0081	0,0100	0,0157	0,2266	0,0083	0,1657	0,0059
43	0,0045	0,0100	0,0157	0,2641	0,0083	0,1904	0,1624
44	0,0079	0,0100	0,0157	0,3388	0,0083	0,0886	0,1612
45	0,0041	0,0100	0,0157	0,2897	0,0083	0,1682	0,0119
46	0,0055	0,0100	0,0157	0,2641	0,0083	0,1433	0,0017

							(conclusão)
Trecho	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
47	0,0098	0,0100	0,0157	0,1275	0,0083	0,0441	0,0001
48	0,0084	0,0100	0,0157	0,0764	0,0083	0,0905	0,0456
49	0,0075	0,0100	0,0157	0,0330	0,0083	0,1176	0,2332
50	0,0020	0,0100	0,0157	0,2419	0,0083	0,1474	0,1049
51	0,0096	0,0100	0,0157	0,2386	0,0083	0,2136	0,0426
52	0,0037	0,0100	0,0157	0,3113	0,0083	0,1888	0,0003
53	0,0099	0,0100	0,0157	0,0732	0,0083	0,1286	0,0043
54	0,0084	0,0100	0,0157	0,2145	0,0083	0,1523	0,1997
55	0,3607	0,0100	0,3708	0,4350	0,3734	0,7592	0,5716
56	0,4016	0,0100	0,3708	0,1489	0,3734	0,0202	0,0252
57	0,2744	0,0100	0,3708	0,1684	0,3734	0,1203	0,0802
58	0,0098	0,0100	0,0157	0,0051	0,0083	0,0582	0,1023
59	0,0041	0,0100	0,0157	0,0002	0,0083	0,1114	0,0405
60	0,0051	0,0100	0,0157	0,0642	0,0083	0,1540	0,0469
61	0,0055	0,0100	0,0157	0,3781	0,0083	0,2584	0,1743
62	0,0092	0,0100	0,0157	0,2432	0,0083	0,1287	0,2050
63	0,0045	0,0100	0,0157	0,2347	0,0083	0,1475	0,0413
64	0,0047	0,0100	0,0157	0,1308	0,0083	0,0643	0,1760
65	0,0045	0,0100	0,0157	0,2068	0,0083	0,2247	0,0061
66	0,0062	0,0100	0,0157	0,1040	0,0083	0,1560	0,0012
67	0,0044	0,0100	0,0157	0,2278	0,0083	0,1200	0,2435
68	0,0039	0,0100	0,0157	0,2495	0,0083	0,1502	0,2505
69	0,0016	0,0100	0,0157	0,2499	0,0083	0,2173	0,0333
70	0,0034	0,0100	0,0157	0,2210	0,0083	0,1711	0,1294
71	0,0029	0,0100	0,0157	0,0002	0,0083	0,0412	0,0048
72	0,0018	0,0100	0,0157	0,0783	0,0083	0,1065	0,0001
73	0,0019	0,0100	0,0157	0,2425	0,0083	0,1036	0,2449
74	0,0036	0,0100	0,0157	0,2063	0,0083	0,1823	0,2860
75	0,0027	0,0100	0,0157	0,3585	0,0083	0,1029	0,0064
76	0,0088	0,0100	0,0157	0,1445	0,0083	0,0020	0,0168
77	0,0050	0,0100	0,0157	0,0608	0,0083	0,1806	0,0004
78	0,0016	0,0100	0,0157	0,4289	0,0083	0,2184	0,0471
79	0,0096	0,0100	0,0157	0,1320	0,0083	0,1446	0,2060
80	0,0090	0,0100	0,0157	0,1516	0,0083	0,1944	0,1321
81	0,0091	0,0100	0,0157	0,1931	0,0083	0,2482	0,0113
82	0,0066	0,0100	0,0157	0,0498	0,0083	0,0849	0,0066
83	0,0024	0,0100	0,0157	0,2744	0,0083	0,1684	0,0025
84	0,0047	0,0100	0,0157	0,2725	0,0083	0,2264	0,1983
85	0,3450	0,0100	0,3708	0,5254	0,3734	0,5175	0,3462

Fonte: Elaborado pelo autor.

(continua)

Trecho	Rugosidades calculadas pelas calibrações com 26 observações das horas 52 e 60 (mm)						
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
1	0,3857	0,0100	0,3723	0,8107	0,3672	0,3635	0,3261
2	0,4841	0,0100	0,3723	0,3185	0,3672	0,4264	0,3284
3	0,3600	0,0100	0,3723	0,3046	0,3672	0,4082	0,2496
4	0,0075	0,0100	0,0092	0,2972	0,0057	0,0343	0,0684
5	0,0062	0,0100	0,0092	0,2308	0,0057	0,0334	0,0045
6	0,0049	0,0100	0,0092	0,2740	0,0057	0,0386	0,0119
7	0,0030	0,0100	0,0092	0,1676	0,0057	0,0455	0,0063
8	0,0068	0,0100	0,0092	0,1464	0,0057	0,0378	0,0020
9	0,0079	0,0100	0,0092	0,2126	0,0057	0,0402	0,0064
10	0,0026	0,0100	0,0092	0,2292	0,0057	0,0263	0,0008
11	0,0022	0,0100	0,0092	0,1768	0,0057	0,0443	0,0070
12	0,0077	0,0100	0,0092	0,3346	0,0057	0,0511	0,0101
13	0,0084	0,0100	0,0092	0,3357	0,0057	0,0547	0,0183
14	0,0073	0,0100	0,0092	0,0162	0,0057	0,0364	0,0022
15	0,0081	0,0100	0,0092	0,0002	0,0057	0,0397	0,0012
16	0,0037	0,0100	0,0092	0,4197	0,0057	0,0340	0,0633
17	0,0024	0,0100	0,0092	0,1307	0,0057	0,0463	0,0025
18	0,0094	0,0100	0,0092	0,3183	0,0057	0,0568	0,0280
19	0,0015	0,0100	0,0092	0,0002	0,0057	0,0499	0,0342
20	0,0035	0,0100	0,0092	0,1336	0,0057	0,0578	0,0429
21	0,4209	0,0100	0,3723	0,3142	0,3672	0,5501	0,4040
22	0,2727	0,0100	0,3723	0,1973	0,3672	0,4243	0,5981
23	0,4283	0,0100	0,3723	0,4035	0,3672	0,5085	0,4216
24	0,4171	0,0100	0,3723	0,6173	0,3672	0,5230	0,4871
25	0,4977	0,0100	0,3723	0,3674	0,3672	0,5687	0,2925
26	0,3826	0,0100	0,3723	0,3554	0,3672	0,3516	0,2461
27	0,3462	0,0100	0,3723	0,1173	0,3672	0,4148	0,3591
28	0,0018	0,0100	0,0092	0,2081	0,0057	0,0326	0,0464
29	0,0099	0,0100	0,0092	0,0002	0,0057	0,0515	0,0169
30	0,0047	0,0100	0,0092	0,1980	0,0057	0,0466	0,0237
31	0,3948	0,0100	0,3723	0,1901	0,3672	0,3549	0,3674
32	0,3117	0,0100	0,3723	0,2581	0,3672	0,4073	0,3820
33	0,3198	0,0100	0,3723	0,5336	0,3672	0,3913	0,5671
34	0,0058	0,0100	0,0092	0,3356	0,0057	0,0358	0,0448
35	0,0056	0,0100	0,0092	0,0887	0,0057	0,0431	0,0006
36	0,0045	0,0100	0,0092	0,2518	0,0057	0,0555	0,0010
37	0,4441	0,0100	0,3723	0,1244	0,3672	0,4223	0,3768
38	0,3248	0,0100	0,3723	0,1100	0,3672	0,3253	0,3573
39	0,0020	0,0100	0,0092	0,3200	0,0057	0,0323	0,0671
40	0,0032	0,0100	0,0092	0,3931	0,0057	0,0310	0,0128
41	0,0021	0,0100	0,0092	0,0002	0,0057	0,0392	0,0001
42	0,0081	0,0100	0,0092	0,3491	0,0057	0,0395	0,0051
43	0,0045	0,0100	0,0092	0,2966	0,0057	0,0417	0,0090
44	0,0079	0,0100	0,0092	0,0002	0,0057	0,0383	0,0364
45	0,0041	0,0100	0,0092	0,1971	0,0057	0,0416	0,0095
46	0,0055	0,0100	0,0092	0,2159	0,0057	0,0382	0,0001

							(conclusão)
Trecho	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
47	0,0098	0,0100	0,0092	0,0141	0,0057	0,0344	0,0005
48	0,0084	0,0100	0,0092	0,0767	0,0057	0,0377	0,0061
49	0,0075	0,0100	0,0092	0,1278	0,0057	0,0428	0,0016
50	0,0020	0,0100	0,0092	0,2092	0,0057	0,0439	0,0028
51	0,0096	0,0100	0,0092	0,1428	0,0057	0,0443	0,0000
52	0,0037	0,0100	0,0092	0,0693	0,0057	0,0280	0,0010
53	0,0099	0,0100	0,0092	0,2234	0,0057	0,0320	0,0053
54	0,0084	0,0100	0,0092	0,0002	0,0057	0,0334	0,0167
55	0,3607	0,0100	0,3723	0,5735	0,3672	0,4939	0,4562
56	0,4016	0,0100	0,3723	0,1495	0,3672	0,2802	0,1589
57	0,2744	0,0100	0,3723	0,0729	0,3672	0,3175	0,2341
58	0,0098	0,0100	0,0092	0,2705	0,0057	0,0201	0,0424
59	0,0041	0,0100	0,0092	0,0027	0,0057	0,0451	0,0180
60	0,0051	0,0100	0,0092	0,1572	0,0057	0,0500	0,0182
61	0,0055	0,0100	0,0092	0,2749	0,0057	0,0475	0,0565
62	0,0092	0,0100	0,0092	0,3587	0,0057	0,0310	0,0442
63	0,0045	0,0100	0,0092	0,0272	0,0057	0,0400	0,0718
64	0,0047	0,0100	0,0092	0,2034	0,0057	0,0374	0,0230
65	0,0045	0,0100	0,0092	0,2358	0,0057	0,0422	0,0041
66	0,0062	0,0100	0,0092	0,0734	0,0057	0,0486	0,0006
67	0,0044	0,0100	0,0092	0,0982	0,0057	0,0358	0,0599
68	0,0039	0,0100	0,0092	0,1082	0,0057	0,0285	0,0422
69	0,0016	0,0100	0,0092	0,0453	0,0057	0,0584	0,0545
70	0,0034	0,0100	0,0092	0,1787	0,0057	0,0375	0,0299
71	0,0029	0,0100	0,0092	0,0898	0,0057	0,0328	0,0034
72	0,0018	0,0100	0,0092	0,0023	0,0057	0,0267	0,0002
73	0,0019	0,0100	0,0092	0,3302	0,0057	0,0314	0,0506
74	0,0036	0,0100	0,0092	0,3554	0,0057	0,0367	0,0608
75	0,0027	0,0100	0,0092	0,0665	0,0057	0,0462	0,0331
76	0,0088	0,0100	0,0092	0,0002	0,0057	0,0134	0,0018
77	0,0050	0,0100	0,0092	0,1624	0,0057	0,0313	0,0005
78	0,0016	0,0100	0,0092	0,3332	0,0057	0,0416	0,0066
79	0,0096	0,0100	0,0092	0,2373	0,0057	0,0447	0,0319
80	0,0090	0,0100	0,0092	0,1843	0,0057	0,0426	0,0496
81	0,0091	0,0100	0,0092	0,2175	0,0057	0,0324	0,0442
82	0,0066	0,0100	0,0092	0,1034	0,0057	0,0186	0,0008
83	0,0024	0,0100	0,0092	0,1116	0,0057	0,0245	0,0027
84	0,0047	0,0100	0,0092	0,1095	0,0057	0,0638	0,0212
85	0,3450	0,0100	0,3723	0,1706	0,3672	0,3079	0,3462

Fonte: Elaborado pelo autor.

(continua)

Trecho	Rugosidades calculadas pelas calibrações com 50 observações das horas 52 e 60 (mm)						
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
1	0,3857	0,0100	0,3895	0,4054	0,3876	0,5349	0,3625
2	0,4841	0,0100	0,3895	0,1095	0,3876	0,5282	0,4525
3	0,3600	0,0100	0,3895	0,1651	0,3876	0,0618	0,2352
4	0,0075	0,0100	0,0017	0,0532	0,0039	0,0176	0,0359
5	0,0062	0,0100	0,0017	0,1553	0,0039	0,0241	0,0150
6	0,0049	0,0100	0,0017	0,0002	0,0039	0,0347	0,0045
7	0,0030	0,0100	0,0017	0,5105	0,0039	0,0285	0,0142
8	0,0068	0,0100	0,0017	0,3137	0,0039	0,0404	0,0018
9	0,0079	0,0100	0,0017	0,0791	0,0039	0,0249	0,0061
10	0,0026	0,0100	0,0017	0,2938	0,0039	0,0318	0,0003
11	0,0022	0,0100	0,0017	0,3013	0,0039	0,0278	0,0003
12	0,0077	0,0100	0,0017	0,2348	0,0039	0,0268	0,0082
13	0,0084	0,0100	0,0017	0,0002	0,0039	0,0327	0,0053
14	0,0073	0,0100	0,0017	0,0794	0,0039	0,0285	0,0367
15	0,0081	0,0100	0,0017	0,1826	0,0039	0,0217	0,0084
16	0,0037	0,0100	0,0017	0,0991	0,0039	0,0286	0,0309
17	0,0024	0,0100	0,0017	0,5000	0,0039	0,0303	0,0104
18	0,0094	0,0100	0,0017	0,3944	0,0039	0,0306	0,0422
19	0,0015	0,0100	0,0017	0,0002	0,0039	0,0303	0,0061
20	0,0035	0,0100	0,0017	0,4477	0,0039	0,0314	0,0133
21	0,4209	0,0100	0,3895	0,2020	0,3876	0,4282	0,4104
22	0,2727	0,0100	0,3895	0,3502	0,3876	0,3640	0,3041
23	0,4283	0,0100	0,3895	0,9773	0,3876	0,5037	0,4561
24	0,4171	0,0100	0,3895	0,3748	0,3876	0,4397	0,4688
25	0,4977	0,0100	0,3895	0,4619	0,3876	0,5049	0,5088
26	0,3826	0,0100	0,3895	0,1290	0,3876	0,1807	0,3648
27	0,3462	0,0100	0,3895	0,4137	0,3876	0,2451	0,4796
28	0,0018	0,0100	0,0017	0,0002	0,0039	0,0155	0,0341
29	0,0099	0,0100	0,0017	0,3067	0,0039	0,0189	0,0004
30	0,0047	0,0100	0,0017	0,0002	0,0039	0,0206	0,0203
31	0,3948	0,0100	0,3895	0,1949	0,3876	0,3436	0,3619
32	0,3117	0,0100	0,3895	0,4879	0,3876	0,5161	0,4309
33	0,3198	0,0100	0,3895	0,2696	0,3876	0,4580	0,2534
34	0,0058	0,0100	0,0017	0,1870	0,0039	0,0355	0,0117
35	0,0056	0,0100	0,0017	0,0002	0,0039	0,0202	0,0030
36	0,0045	0,0100	0,0017	0,3714	0,0039	0,0256	0,0006
37	0,4441	0,0100	0,3895	0,1472	0,3876	0,5336	0,6707
38	0,3248	0,0100	0,3895	0,1895	0,3876	0,4568	0,2129
39	0,0020	0,0100	0,0017	0,3078	0,0039	0,0265	0,0020
40	0,0032	0,0100	0,0017	0,5067	0,0039	0,0250	0,0071
41	0,0021	0,0100	0,0017	0,1477	0,0039	0,0133	0,0001
42	0,0081	0,0100	0,0017	0,2453	0,0039	0,0299	0,0109
43	0,0045	0,0100	0,0017	0,0895	0,0039	0,0213	0,0282
44	0,0079	0,0100	0,0017	0,1751	0,0039	0,0303	0,0069
45	0,0041	0,0100	0,0017	0,3367	0,0039	0,0227	0,0042
46	0,0055	0,0100	0,0017	0,0002	0,0039	0,0209	0,0001

							(conclusão)
Trecho	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
47	0,0098	0,0100	0,0017	0,1024	0,0039	0,0239	0,0001
48	0,0084	0,0100	0,0017	0,0002	0,0039	0,0339	0,0052
49	0,0075	0,0100	0,0017	0,2220	0,0039	0,0306	0,0194
50	0,0020	0,0100	0,0017	0,0540	0,0039	0,0292	0,0047
51	0,0096	0,0100	0,0017	0,2735	0,0039	0,0235	0,0003
52	0,0037	0,0100	0,0017	0,2815	0,0039	0,0316	0,0001
53	0,0099	0,0100	0,0017	0,1716	0,0039	0,0246	0,0003
54	0,0084	0,0100	0,0017	0,2559	0,0039	0,0198	0,0061
55	0,3607	0,0100	0,3895	0,2282	0,3876	0,4626	0,3902
56	0,4016	0,0100	0,3895	0,1608	0,3876	0,4251	0,3510
57	0,2744	0,0100	0,3895	0,0760	0,3876	0,2610	0,3910
58	0,0098	0,0100	0,0017	0,0002	0,0039	0,0345	0,0017
59	0,0041	0,0100	0,0017	0,2767	0,0039	0,0233	0,0006
60	0,0051	0,0100	0,0017	0,2147	0,0039	0,0264	0,0095
61	0,0055	0,0100	0,0017	0,3405	0,0039	0,0294	0,0344
62	0,0092	0,0100	0,0017	0,0792	0,0039	0,0342	0,0434
63	0,0045	0,0100	0,0017	0,0002	0,0039	0,0240	0,0203
64	0,0047	0,0100	0,0017	0,0817	0,0039	0,0247	0,0031
65	0,0045	0,0100	0,0017	0,1701	0,0039	0,0260	0,0044
66	0,0062	0,0100	0,0017	0,1167	0,0039	0,0262	0,0010
67	0,0044	0,0100	0,0017	0,0845	0,0039	0,0288	0,0452
68	0,0039	0,0100	0,0017	0,2258	0,0039	0,0166	0,0447
69	0,0016	0,0100	0,0017	0,0723	0,0039	0,0326	0,0390
70	0,0034	0,0100	0,0017	0,0321	0,0039	0,0220	0,0282
71	0,0029	0,0100	0,0017	0,2518	0,0039	0,0260	0,0020
72	0,0018	0,0100	0,0017	0,0779	0,0039	0,0220	0,0066
73	0,0019	0,0100	0,0017	0,0208	0,0039	0,0182	0,0327
74	0,0036	0,0100	0,0017	0,0773	0,0039	0,0305	0,0309
75	0,0027	0,0100	0,0017	0,0002	0,0039	0,0267	0,0275
76	0,0088	0,0100	0,0017	0,0002	0,0039	0,0279	0,0027
77	0,0050	0,0100	0,0017	0,2710	0,0039	0,0314	0,0079
78	0,0016	0,0100	0,0017	0,3305	0,0039	0,0283	0,0114
79	0,0096	0,0100	0,0017	0,1065	0,0039	0,0271	0,0072
80	0,0090	0,0100	0,0017	0,3258	0,0039	0,0446	0,0295
81	0,0091	0,0100	0,0017	0,2739	0,0039	0,0325	0,0086
82	0,0066	0,0100	0,0017	0,0304	0,0039	0,0232	0,0260
83	0,0024	0,0100	0,0017	0,1502	0,0039	0,0256	0,0002
84	0,0047	0,0100	0,0017	0,0110	0,0039	0,0315	0,0058
85	0,3450	0,0100	0,3895	0,6297	0,3876	0,2423	0,3462

Fonte: Elaborado pelo autor.

**APÊNDICE H – CARGAS DE PRESSÃO E VAZÕES OBTIDAS NAS CALIBRAÇÕES
DAS RUGOSIDADES ABSOLUTAS DA REDE SOUSA PARA A HORA 70,
UTILIZANDO DADOS OBSERVADOS DAS HORAS 52 E 60**

(continua)

Nó	Cargas de pressão obtidas pelas calibrações com oito observações das horas 52 e 60 (mca)						
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
1	5,3190	5,3485	5,3177	5,3129	5,3185	5,3104	5,3189
2	5,4707	5,5953	5,4712	5,5105	5,4745	5,4976	5,5214
3	7,7124	7,8904	7,7231	7,7729	7,7275	7,7601	7,7922
4	12,1166	12,4154	12,1212	12,2147	12,1290	12,1888	12,2689
5	19,1932	19,4961	19,1947	19,2457	19,1972	19,2451	19,3068
6	23,3643	23,6668	23,3642	23,3654	23,3653	23,3299	23,4622
7	25,7673	26,0690	25,7659	25,7347	25,7658	25,6824	25,8519
8	28,2191	28,5207	28,2174	28,1806	28,2171	28,1303	28,2998
9	27,0820	27,3831	27,0797	27,0329	27,0789	26,9859	27,1474
10	27,1574	27,4576	27,1544	27,0814	27,1529	27,0175	27,2007
11	27,2729	27,5711	27,2687	27,1695	27,2662	27,0960	27,2760
12	28,5627	28,8596	28,5582	28,4410	28,5552	28,3600	28,5606
13	31,5509	31,8476	31,5464	31,4278	31,5434	31,3449	31,5475
14	27,1710	27,4674	27,1667	27,0461	27,1638	26,9612	27,1657
15	24,7651	25,0605	24,7617	24,6489	24,7594	24,5643	24,7594
16	21,9005	22,1926	21,8983	21,8004	21,8978	21,7251	21,8891
17	17,0626	17,3498	17,0632	16,9953	17,0648	16,9470	17,0610
18	12,7959	13,0784	12,7995	12,7656	12,8031	12,7164	12,8307
19	14,6153	14,8957	14,6189	14,5832	14,6233	14,5533	14,6735
20	12,5922	12,8728	12,5994	12,6186	12,6063	12,5992	12,6886
21	10,0104	10,2917	10,0198	10,0839	10,0282	10,0933	10,1351
22	7,6263	7,8748	7,6324	7,6932	7,6399	7,6996	7,7397
23	6,0001	6,2018	6,0169	6,0613	6,0227	6,0617	6,1005
24	5,6229	5,7058	5,6278	5,6447	5,6300	5,6379	5,6516
25	5,4002	5,5803	5,4098	5,4541	5,4145	5,4466	5,4770
26	5,5181	5,7531	5,5293	5,6005	5,5359	5,5878	5,6178
27	7,0689	7,3365	7,0782	7,1599	7,0861	7,1495	7,1753
28	8,7334	9,0101	8,7397	8,7725	8,7461	8,7589	8,7787
29	11,1739	11,4538	11,1796	11,1887	11,1851	11,1598	11,2185
30	7,1138	7,3612	7,1300	7,2070	7,1362	7,1785	7,2166
31	7,6454	7,9235	7,6558	7,7312	7,6630	7,7100	7,7376
32	8,5865	8,8829	8,5941	8,6636	8,6018	8,6519	8,6691
33	9,7848	10,0773	9,7905	9,7873	9,7966	9,7645	9,7849
34	13,2101	13,4981	13,2117	13,1643	13,2139	13,1221	13,2005
35	12,7783	13,0858	12,7835	12,8746	12,7913	12,8503	12,9245
36	11,9049	12,2287	11,9087	12,0004	11,9164	11,9607	12,0450
37	13,1898	13,4992	13,1914	13,2150	13,1963	13,1682	13,2639
38	15,1446	15,4479	15,1454	15,1403	15,1489	15,0830	15,1594
39	17,9050	18,1988	17,9031	17,8067	17,9030	17,7435	17,8982
40	18,4116	18,7161	18,4131	18,4524	18,4155	18,4494	18,5197
41	17,3383	17,6440	17,3387	17,3518	17,3406	17,3198	17,4295
42	18,3250	18,6297	18,3246	18,3121	18,3260	18,2863	18,3977

							(conclusão)
Nó	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
43	19,0368	19,3367	19,0343	18,9650	19,0333	18,9095	19,0533
44	22,2167	22,5132	22,2135	22,1087	22,2113	22,0215	22,2145
45	23,9843	24,2871	23,9840	23,9799	23,9849	23,9313	24,0767
46	22,9459	23,2478	22,9441	22,9075	22,9441	22,8655	23,0201
47	22,8317	23,1335	22,8298	22,7773	22,8293	22,7199	22,8920
48	23,3944	23,6928	23,3904	23,2933	23,3880	23,2289	23,3994
49	25,4813	25,7781	25,4770	25,3593	25,4740	25,2810	25,4788

Fonte: Elaborado pelo autor.

(continua)

Nó	Cargas de pressão obtidas pelas calibrações com 14 observações das horas 52 e 60 (mca)						
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
1	5,3190	5,3485	5,3174	5,3087	5,3172	5,3091	5,3189
2	5,4707	5,5953	5,4700	5,4748	5,4694	5,4662	5,4776
3	7,7124	7,8904	7,7214	7,7417	7,7207	7,7377	7,7453
4	12,1166	12,4154	12,1181	12,1837	12,1171	12,2250	12,2115
5	19,1932	19,4961	19,1886	19,2558	19,1935	19,2500	19,2200
6	23,3643	23,6668	23,3573	23,4183	23,3639	23,4042	23,3785
7	25,7673	26,0690	25,7584	25,7909	25,7662	25,7833	25,7730
8	28,2191	28,5207	28,2098	28,2386	28,2178	28,2244	28,2222
9	27,0820	27,3831	27,0718	27,0851	27,0804	27,0679	27,0800
10	27,1574	27,4576	27,1462	27,1359	27,1555	27,1270	27,1506
11	27,2729	27,5711	27,2599	27,1998	27,2704	27,2120	27,2670
12	28,5627	28,8596	28,5492	28,4763	28,5601	28,4873	28,5567
13	31,5509	31,8476	31,5374	31,4641	31,5483	31,4747	31,5449
14	27,1710	27,4674	27,1578	27,0851	27,1686	27,0939	27,1656
15	24,7651	25,0605	24,7531	24,6873	24,7632	24,6884	24,7586
16	21,9005	22,1926	21,8907	21,8458	21,8989	21,8270	21,8924
17	17,0626	17,3498	17,0569	17,0567	17,0625	17,0276	17,0603
18	12,7959	13,0784	12,7944	12,8174	12,7976	12,7828	12,8215
19	14,6153	14,8957	14,6142	14,6497	14,6166	14,6185	14,6560
20	12,5922	12,8728	12,5961	12,6720	12,5958	12,6130	12,6604
21	10,0104	10,2917	10,0172	10,1377	10,0152	10,0647	10,1033
22	7,6263	7,8748	7,6302	7,7447	7,6282	7,6820	7,7038
23	6,0001	6,2018	6,0153	6,1048	6,0137	6,0520	6,0658
24	5,6229	5,7058	5,6270	5,6356	5,6265	5,6212	5,6327
25	5,4002	5,5803	5,4081	5,4198	5,4072	5,3765	5,3998
26	5,5181	5,7531	5,5272	5,5928	5,5258	5,5404	5,5672
27	7,0689	7,3365	7,0758	7,1571	7,0740	7,1022	7,1382
28	8,7334	9,0101	8,7362	8,8157	8,7363	8,7606	8,7704
29	11,1739	11,4538	11,1755	11,2348	11,1767	11,1872	11,2111
30	7,1138	7,3612	7,1276	7,1673	7,1267	7,1593	7,1675
31	7,6454	7,9235	7,6529	7,7107	7,6520	7,6791	7,6974
32	8,5865	8,8829	8,5910	8,6566	8,5900	8,6216	8,6235
33	9,7848	10,0773	9,7865	9,8254	9,7873	9,7881	9,7833
34	13,2101	13,4981	13,2057	13,2264	13,2107	13,1782	13,2046

							(conclusão)
Nó	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
35	12,7783	13,0858	12,7802	12,8436	12,7793	12,8660	12,8682
36	11,9049	12,2287	11,9049	11,9741	11,9045	11,9634	11,9928
37	13,1898	13,4992	13,1864	13,2242	13,1889	13,2151	13,2260
38	15,1446	15,4479	15,1397	15,1288	15,1436	15,1232	15,1517
39	17,9050	18,1988	17,8957	17,8640	17,9034	17,8393	17,9003
40	18,4116	18,7161	18,4069	18,4665	18,4119	18,4600	18,4317
41	17,3383	17,6440	17,3322	17,3584	17,3379	17,3683	17,3375
42	18,3250	18,6297	18,3179	18,3211	18,3241	18,3328	18,3218
43	19,0368	19,3367	19,0263	18,9692	19,0350	18,9988	19,0334
44	22,2167	22,5132	22,2049	22,1459	22,2149	22,1494	22,2123
45	23,9843	24,2871	23,9770	24,0334	23,9838	24,0141	23,9939
46	22,9459	23,2478	22,9367	22,9558	22,9444	22,9494	22,9424
47	22,8317	23,1335	22,8221	22,8266	22,8303	22,8218	22,8260
48	23,3944	23,6928	23,3817	23,3216	23,3919	23,3338	23,3902
49	25,4813	25,7781	25,4680	25,3957	25,4789	25,4052	25,4770

Fonte: Elaborado pelo autor.

(continua)

Cargas de pressão obtidas pelas calibrações com 26 observações das horas 52 e 60 (mca)							
Nó	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
1	5,3190	5,3485	5,3173	5,3315	5,3176	5,3214	5,3189
2	5,4707	5,5953	5,4697	5,4174	5,4710	5,4708	5,4722
3	7,7124	7,8904	7,7210	7,6749	7,7228	7,7154	7,7282
4	12,1166	12,4154	12,1177	12,1138	12,1209	12,1060	12,1545
5	19,1932	19,4961	19,1934	19,0593	19,1996	19,1649	19,1909
6	23,3643	23,6668	23,3636	23,2098	23,3706	23,3291	23,3615
7	25,7673	26,0690	25,7658	25,5888	25,7733	25,7254	25,7629
8	28,2191	28,5207	28,2173	28,0430	28,2250	28,1754	28,2144
9	27,0820	27,3831	27,0798	26,9042	27,0878	27,0354	27,0779
10	27,1574	27,4576	27,1548	26,9743	27,1631	27,1077	27,1530
11	27,2729	27,5711	27,2696	27,0700	27,2784	27,2188	27,2677
12	28,5627	28,8596	28,5593	28,3558	28,5683	28,5054	28,5564
13	31,5509	31,8476	31,5475	31,3448	31,5565	31,4934	31,5445
14	27,1710	27,4674	27,1678	26,9696	27,1768	27,1134	27,1642
15	24,7651	25,0605	24,7625	24,5727	24,7711	24,7085	24,7566
16	21,9005	22,1926	21,8984	21,7086	21,9060	21,8461	21,8861
17	17,0626	17,3498	17,0624	16,9495	17,0688	17,0122	17,0588
18	12,7959	13,0784	12,7977	12,7227	12,8029	12,7529	12,7873
19	14,6153	14,8957	14,6168	14,5865	14,6216	14,5730	14,6044
20	12,5922	12,8728	12,5962	12,5782	12,5997	12,5607	12,5868
21	10,0104	10,2917	10,0159	10,0244	10,0186	9,9863	10,0089
22	7,6263	7,8748	7,6289	7,6347	7,6312	7,6067	7,6200
23	6,0001	6,2018	6,0142	6,0009	6,0159	5,9930	6,0182
24	5,6229	5,7058	5,6267	5,6190	5,6275	5,6214	5,6246
25	5,4002	5,5803	5,4076	5,3573	5,4094	5,3853	5,3996
26	5,5181	5,7531	5,5263	5,4913	5,5286	5,5071	5,5314

							(conclusão)
Nó	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
27	7,0689	7,3365	7,0746	7,0631	7,0772	7,0535	7,0788
28	8,7334	9,0101	8,7367	8,6845	8,7403	8,7086	8,7311
29	11,1739	11,4538	11,1770	11,1310	11,1812	11,1419	11,1717
30	7,1138	7,3612	7,1272	7,0965	7,1298	7,1158	7,1420
31	7,6454	7,9235	7,6525	7,6265	7,6555	7,6374	7,6672
32	8,5865	8,8829	8,5906	8,5543	8,5939	8,5737	8,5953
33	9,7848	10,0773	9,7877	9,6970	9,7917	9,7631	9,7827
34	13,2101	13,4981	13,2105	13,1025	13,2166	13,1648	13,2042
35	12,7783	13,0858	12,7799	12,7870	12,7833	12,7670	12,8118
36	11,9049	12,2287	11,9051	11,9186	11,9090	11,8908	11,9285
37	13,1898	13,4992	13,1891	13,1161	13,1942	13,1610	13,1875
38	15,1446	15,4479	15,1436	15,0090	15,1493	15,1087	15,1369
39	17,9050	18,1988	17,9030	17,7425	17,9105	17,8522	17,8922
40	18,4116	18,7161	18,4118	18,2706	18,4181	18,3840	18,4119
41	17,3383	17,6440	17,3377	17,2067	17,3443	17,3052	17,3354
42	18,3250	18,6297	18,3238	18,1832	18,3306	18,2879	18,3199
43	19,0368	19,3367	19,0345	18,8643	19,0425	18,9897	19,0311
44	22,2167	22,5132	22,2142	22,0294	22,2228	22,1620	22,2092
45	23,9843	24,2871	23,9834	23,8336	23,9905	23,9478	23,9813
46	22,9459	23,2478	22,9440	22,7726	22,9515	22,9032	22,9419
47	22,8317	23,1335	22,8298	22,6529	22,8376	22,7864	22,8276
48	23,3944	23,6928	23,3912	23,2006	23,3999	23,3413	23,3893
49	25,4813	25,7781	25,4781	25,2774	25,4871	25,4245	25,4750

Fonte: Elaborado pelo autor.

(continua)

Nó	Cargas de pressão obtidas pelas calibrações com 50 observações das horas 52 e 60 (m)						
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
1	5,3190	5,3485	5,3163	5,3035	5,3164	5,3259	5,3189
2	5,4707	5,5953	5,4656	5,4468	5,4661	5,4494	5,4708
3	7,7124	7,8904	7,7156	7,7230	7,7162	7,6829	7,7119
4	12,1166	12,4154	12,1082	12,1773	12,1092	12,1580	12,1336
5	19,1932	19,4961	19,1899	19,2297	19,1891	19,2076	19,1915
6	23,3643	23,6668	23,3617	23,3637	23,3604	23,3711	23,3617
7	25,7673	26,0690	25,7652	25,7600	25,7635	25,7681	25,7645
8	28,2191	28,5207	28,2169	28,1928	28,2152	28,2186	28,2158
9	27,0820	27,3831	27,0800	27,0390	27,0781	27,0773	27,0789
10	27,1574	27,4576	27,1557	27,1024	27,1536	27,1489	27,1536
11	27,2729	27,5711	27,2717	27,1715	27,2693	27,2568	27,2688
12	28,5627	28,8596	28,5618	28,4447	28,5593	28,5435	28,5582
13	31,5509	31,8476	31,5501	31,4324	31,5475	31,5314	31,5462
14	27,1710	27,4674	27,1703	27,0516	27,1678	27,1511	27,1658
15	24,7651	25,0605	24,7642	24,6492	24,7619	24,7455	24,7607
16	21,9005	22,1926	21,8982	21,7867	21,8965	21,8809	21,8944
17	17,0626	17,3498	17,0597	16,9576	17,0587	17,0464	17,0594
18	12,7959	13,0784	12,7927	12,7670	12,7924	12,7858	12,7915

							(conclusão)
Nó	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
19	14,6153	14,8957	14,6110	14,5973	14,6109	14,6042	14,6132
20	12,5922	12,8728	12,5877	12,5488	12,5884	12,5869	12,5898
21	10,0104	10,2917	10,0056	10,0108	10,0069	10,0082	10,0095
22	7,6263	7,8748	7,6196	7,6035	7,6207	7,6224	7,6240
23	6,0001	6,2018	6,0071	5,9670	6,0080	6,0021	5,9996
24	5,6229	5,7058	5,6239	5,6149	5,6243	5,6296	5,6216
25	5,4002	5,5803	5,4018	5,3905	5,4024	5,3857	5,3997
26	5,5181	5,7531	5,5182	5,5265	5,5192	5,5201	5,5221
27	7,0689	7,3365	7,0650	7,0715	7,0661	7,0735	7,0679
28	8,7334	9,0101	8,7287	8,7338	8,7293	8,7309	8,7278
29	11,1739	11,4538	11,1701	11,1438	11,1703	11,1698	11,1720
30	7,1138	7,3612	7,1197	7,1426	7,1204	7,1118	7,1233
31	7,6454	7,9235	7,6437	7,6568	7,6446	7,6385	7,6444
32	8,5865	8,8829	8,5811	8,5942	8,5821	8,5784	8,5884
33	9,7848	10,0773	9,7800	9,7504	9,7804	9,7751	9,7833
34	13,2101	13,4981	13,2072	13,1399	13,2064	13,1946	13,2053
35	12,7783	13,0858	12,7703	12,8417	12,7712	12,8009	12,7774
36	11,9049	12,2287	11,8955	11,9705	11,8963	11,9139	11,9081
37	13,1898	13,4992	13,1827	13,1859	13,1827	13,1861	13,1880
38	15,1446	15,4479	15,1388	15,0915	15,1383	15,1356	15,1399
39	17,9050	18,1988	17,9023	17,7928	17,9007	17,8872	17,9013
40	18,4116	18,7161	18,4083	18,4527	18,4075	18,4206	18,4102
41	17,3383	17,6440	17,3349	17,3537	17,3338	17,3405	17,3361
42	18,3250	18,6297	18,3215	18,3124	18,3203	18,3231	18,3211
43	19,0368	19,3367	19,0348	18,9850	19,0329	19,0230	19,0334
44	22,2167	22,5132	22,2158	22,1126	22,2136	22,1981	22,2119
45	23,9843	24,2871	23,9817	23,9754	23,9804	23,9886	23,9819
46	22,9459	23,2478	22,9432	22,9233	22,9416	22,9437	22,9426
47	22,8317	23,1335	22,8296	22,7895	22,8278	22,8270	22,8286
48	23,3944	23,6928	23,3930	23,2960	23,3907	23,3781	23,3905
49	25,4813	25,7781	25,4806	25,3641	25,4780	25,4619	25,4769

Fonte: Elaborado pelo autor.

(continua)

Trecho	Vazões obtidas pelas calibrações com oito observações das horas 52 e 60 (L/s)						
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
1	10,5519	10,6613	10,5844	10,7900	10,5876	10,7017	10,6600
2	7,6577	7,7707	7,6690	7,7932	7,6732	7,7819	7,7765
3	4,2336	4,3335	4,2549	4,3944	4,2577	4,3868	4,3320
4	2,3569	2,3381	2,3544	2,3953	2,3524	2,4379	2,3422
5	1,3945	1,3916	1,3950	1,4060	1,3944	1,4429	1,3956
6	0,4277	0,4275	0,4278	0,4194	0,4277	0,4243	0,4311
7	0,2089	0,2088	0,2090	0,2007	0,2090	0,2056	0,2123
8	0,3078	0,3083	0,3083	0,2947	0,3083	0,3067	0,3112
9	0,3336	0,3348	0,3340	0,3341	0,3341	0,3578	0,3381
10	0,3999	0,4017	0,3996	0,4240	0,3998	0,4258	0,4071
11	0,2824	0,2841	0,2817	0,2948	0,2818	0,3005	0,2940
12	0,0942	0,0954	0,0937	0,1019	0,0937	0,1099	0,1015
13	0,1246	0,1234	0,1250	0,1168	0,1250	0,1089	0,1173
14	0,3327	0,3302	0,3334	0,3204	0,3334	0,2995	0,3211
15	0,4963	0,4907	0,4967	0,4622	0,4967	0,4452	0,4797
16	0,5615	0,5520	0,5614	0,5495	0,5613	0,5283	0,5339
17	0,5557	0,5457	0,5552	0,5263	0,5550	0,5187	0,5459
18	0,3638	0,3598	0,3633	0,3397	0,3632	0,3412	0,3566
19	0,5826	0,5785	0,5820	0,5584	0,5820	0,5599	0,5754
20	1,3512	1,3482	1,3524	1,2900	1,3525	1,2866	1,3350
21	2,1656	2,1667	2,1677	2,1242	2,1685	2,1216	2,1767
22	2,8372	2,7983	2,8314	2,7325	2,8303	2,7400	2,8134
23	3,6340	3,5396	3,6344	3,4642	3,6298	3,4502	3,5475
24	7,6051	7,4957	7,5726	7,3669	7,5693	7,4552	7,4969
25	2,5660	2,5624	2,5873	2,6687	2,5862	2,5917	2,5553
26	2,6671	2,6021	2,6668	2,6277	2,6635	2,6274	2,5741
27	2,1701	2,1137	2,1761	2,1388	2,1728	2,1239	2,0927
28	1,5777	1,5276	1,5763	1,5384	1,5734	1,5326	1,5260
29	1,2079	1,1911	1,2089	1,1864	1,2079	1,1953	1,1831
30	0,5200	0,5141	0,5200	0,5148	0,5199	0,5057	0,5175
31	3,0959	3,1091	3,0859	3,0707	3,0874	3,0669	3,1164
32	2,4367	2,4734	2,4455	2,4736	2,4470	2,4460	2,5102
33	1,9693	2,0091	1,9726	1,9984	1,9744	1,9448	2,0330
34	1,3451	1,3593	1,3477	1,3635	1,3483	1,3260	1,3386
35	0,6819	0,6843	0,6825	0,7042	0,6827	0,6707	0,6937
36	0,3340	0,3344	0,3344	0,3514	0,3344	0,3378	0,3161
37	1,5486	1,6672	1,5723	1,6709	1,5771	1,6208	1,6616
38	2,1641	2,2965	2,1520	2,3085	2,1607	2,2877	2,2706
39	1,5355	1,5857	1,5311	1,5653	1,5346	1,6007	1,5550
40	1,1782	1,2050	1,1759	1,1813	1,1774	1,1975	1,2058
41	0,6466	0,6533	0,6437	0,6521	0,6443	0,6292	0,6526
42	0,2630	0,2668	0,2634	0,2408	0,2636	0,2450	0,2739
43	0,6342	0,6183	0,6313	0,6611	0,6299	0,6668	0,6184
44	1,0700	1,0618	1,0733	1,0906	1,0718	1,1177	1,0628
45	0,8896	0,8930	0,8904	0,9540	0,8899	0,9085	0,8957
46	0,5673	0,5715	0,5671	0,6045	0,5672	0,5726	0,5709

							(conclusão)
Trecho	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
47	0,4200	0,4259	0,4206	0,4480	0,4207	0,4558	0,4153
48	0,1645	0,1677	0,1649	0,1864	0,1649	0,1825	0,1696
49	0,6387	0,6359	0,6390	0,6584	0,6385	0,6905	0,6364
50	1,1739	1,1719	1,1733	1,1943	1,1725	1,2178	1,1772
51	0,8744	0,8752	0,8742	0,8867	0,8737	0,9342	0,8818
52	0,5321	0,5342	0,5316	0,5300	0,5314	0,5899	0,5409
53	0,3321	0,3353	0,3323	0,3467	0,3322	0,3839	0,3485
54	0,1201	0,1213	0,1198	0,1246	0,1197	0,1376	0,1244
55	3,6430	3,6279	3,6100	3,5746	3,6114	3,6769	3,6213
56	3,1043	3,1507	3,0930	3,1780	3,0966	3,2037	3,1650
57	3,3261	3,3490	3,2958	3,3376	3,2995	3,3871	3,3337
58	2,2731	2,2822	2,2787	2,2625	2,2784	2,2827	2,2872
59	1,3998	1,4012	1,3992	1,3956	1,3990	1,3942	1,4053
60	0,4271	0,4277	0,4275	0,4222	0,4275	0,4293	0,4270
61	0,4686	0,4132	0,4748	0,4036	0,4714	0,3820	0,4060
62	0,5281	0,4641	0,5281	0,4550	0,5246	0,4480	0,4498
63	0,5579	0,4908	0,5635	0,4927	0,5597	0,5117	0,4895
64	0,7489	0,7642	0,7469	0,7984	0,7482	0,7613	0,7676
65	0,4919	0,4955	0,4923	0,4975	0,4927	0,5330	0,4973
66	0,3539	0,3547	0,3539	0,3675	0,3539	0,3792	0,3551
67	0,3434	0,3034	0,3355	0,2801	0,3337	0,2903	0,3085
68	0,4984	0,4520	0,4978	0,4430	0,4955	0,4442	0,4377
69	0,6851	0,6644	0,6852	0,6404	0,6841	0,6254	0,6947
70	0,6049	0,6075	0,6029	0,5868	0,6039	0,5911	0,6064
71	0,4897	0,4915	0,4887	0,4989	0,4890	0,4894	0,4937
72	0,3945	0,3950	0,3938	0,4181	0,3938	0,3962	0,3971
73	0,4863	0,4904	0,4872	0,5060	0,4878	0,5068	0,5136
74	0,4185	0,3893	0,4171	0,4205	0,4158	0,4065	0,4190
75	0,6442	0,6268	0,6448	0,6424	0,6439	0,6243	0,6264
76	0,7384	0,7411	0,7394	0,7342	0,7395	0,7551	0,7420
77	0,4482	0,4492	0,4485	0,4531	0,4485	0,4344	0,4601
78	0,2107	0,2106	0,2102	0,1989	0,2102	0,2028	0,2150
79	0,4405	0,4415	0,4422	0,4034	0,4424	0,3985	0,4314
80	0,6909	0,6810	0,6936	0,6375	0,6929	0,6507	0,6595
81	0,6013	0,5934	0,6041	0,5528	0,6036	0,5461	0,5996
82	0,5474	0,5423	0,5470	0,5266	0,5468	0,4928	0,5408
83	0,3654	0,3630	0,3652	0,3507	0,3651	0,3286	0,3491
84	0,1399	0,1394	0,1402	0,1353	0,1401	0,1375	0,1357
85	18,4851	18,4851	18,4851	18,4851	18,4851	18,4851	18,4851

Fonte: Elaborado pelo autor.

(continua)

Trecho	Vazões obtidas pelas calibrações com 14 observações das horas 52 e 60 (L/s)						
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
1	10,5519	10,6613	10,5847	10,7124	10,5826	10,7986	10,7386
2	7,6577	7,7707	7,6694	7,7298	7,6666	7,8047	7,6305
3	4,2336	4,3335	4,2551	4,3840	4,2534	4,5573	4,2961
4	2,3569	2,3381	2,3539	2,3860	2,3556	2,4308	2,3533
5	1,3945	1,3916	1,3948	1,4236	1,3953	1,4493	1,3779
6	0,4277	0,4275	0,4278	0,4235	0,4278	0,4344	0,4267
7	0,2089	0,2088	0,2090	0,2048	0,2091	0,2157	0,2079
8	0,3078	0,3083	0,3083	0,3333	0,3083	0,3169	0,3061
9	0,3336	0,3348	0,3341	0,3536	0,3340	0,3474	0,3301
10	0,3999	0,4017	0,3997	0,4295	0,3996	0,4240	0,3989
11	0,2824	0,2841	0,2817	0,2880	0,2817	0,2926	0,2824
12	0,0942	0,0954	0,0937	0,0965	0,0937	0,0986	0,0940
13	0,1246	0,1234	0,1251	0,1222	0,1250	0,1202	0,1247
14	0,3327	0,3302	0,3335	0,3319	0,3334	0,3270	0,3318
15	0,4963	0,4907	0,4968	0,4778	0,4966	0,4665	0,4908
16	0,5615	0,5520	0,5615	0,5361	0,5615	0,5312	0,5474
17	0,5557	0,5457	0,5552	0,5235	0,5553	0,5403	0,5483
18	0,3638	0,3598	0,3633	0,3445	0,3633	0,3511	0,3536
19	0,5826	0,5785	0,5820	0,5632	0,5821	0,5698	0,5723
20	1,3512	1,3482	1,3524	1,3297	1,3523	1,3180	1,3408
21	2,1656	2,1667	2,1679	2,1416	2,1673	2,1388	2,1643
22	2,8372	2,7983	2,8314	2,8295	2,8320	2,8300	2,8160
23	3,6340	3,5396	3,6340	3,5912	3,6369	3,6086	3,5935
24	7,6051	7,4957	7,5722	7,4445	7,5743	7,3583	7,4184
25	2,5660	2,5624	2,5872	2,6544	2,5878	2,6658	2,7799
26	2,6671	2,6021	2,6664	2,5857	2,6687	2,5443	2,6059
27	2,1701	2,1137	2,1757	2,1039	2,1779	2,0811	2,1474
28	1,5777	1,5276	1,5759	1,5651	1,5780	1,5514	1,5560
29	1,2079	1,1911	1,2088	1,1758	1,2095	1,1906	1,1949
30	0,5200	0,5141	0,5201	0,5072	0,5201	0,5174	0,5229
31	3,0959	3,1091	3,0862	3,0176	3,0850	2,9192	3,0062
32	2,4367	2,4734	2,4457	2,3429	2,4447	2,3403	2,4274
33	1,9693	2,0091	1,9728	1,8962	1,9716	1,8987	1,9662
34	1,3451	1,3593	1,3478	1,2965	1,3473	1,3085	1,3391
35	0,6819	0,6843	0,6826	0,7065	0,6824	0,6616	0,6891
36	0,3340	0,3344	0,3344	0,3408	0,3344	0,3190	0,3273
37	1,5486	1,6672	1,5730	1,6699	1,5697	1,7983	1,6146
38	2,1641	2,2965	2,1534	2,3079	2,1471	2,3244	2,2618
39	1,5355	1,5857	1,5318	1,6310	1,5292	1,6279	1,5762
40	1,1782	1,2050	1,1761	1,2447	1,1751	1,2349	1,2068
41	0,6466	0,6533	0,6438	0,6781	0,6434	0,6612	0,6570
42	0,2630	0,2668	0,2634	0,2699	0,2633	0,2636	0,2715
43	0,6342	0,6183	0,6309	0,6343	0,6321	0,6534	0,6473
44	1,0700	1,0618	1,0728	1,0832	1,0741	1,1166	1,0913
45	0,8896	0,8930	0,8901	0,9179	0,8907	0,9478	0,9008
46	0,5673	0,5715	0,5671	0,5599	0,5671	0,5718	0,5694

							(conclusão)
Trecho	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
47	0,4200	0,4259	0,4206	0,3989	0,4206	0,4567	0,4246
48	0,1645	0,1677	0,1648	0,1823	0,1649	0,1886	0,1692
49	0,6387	0,6359	0,6388	0,6719	0,6394	0,6867	0,6230
50	1,1739	1,1719	1,1729	1,2094	1,1737	1,2025	1,1676
51	0,8744	0,8752	0,8740	0,8776	0,8745	0,8768	0,8732
52	0,5321	0,5342	0,5314	0,5287	0,5317	0,5366	0,5315
53	0,3321	0,3353	0,3322	0,3451	0,3323	0,3414	0,3334
54	0,1201	0,1213	0,1197	0,1184	0,1198	0,1214	0,1211
55	3,6430	3,6279	3,6101	3,5252	3,6093	3,4216	3,4967
56	3,1043	3,1507	3,0934	3,1564	3,0909	3,1056	3,2332
57	3,3261	3,3490	3,2963	3,3936	3,2938	3,2470	3,3745
58	2,2731	2,2822	2,2784	2,3182	2,2788	2,2834	2,2899
59	1,3998	1,4012	1,3991	1,4317	1,3993	1,3827	1,4084
60	0,4271	0,4277	0,4275	0,4566	0,4275	0,4294	0,4264
61	0,4686	0,4132	0,4744	0,4335	0,4768	0,4504	0,4493
62	0,5281	0,4641	0,5276	0,4778	0,5300	0,4761	0,4704
63	0,5579	0,4908	0,5631	0,4870	0,5657	0,4803	0,4941
64	0,7489	0,7642	0,7472	0,7264	0,7461	0,7393	0,7422
65	0,4919	0,4955	0,4924	0,4542	0,4921	0,4705	0,4952
66	0,3539	0,3547	0,3539	0,3485	0,3538	0,3587	0,3521
67	0,3434	0,3034	0,3353	0,3598	0,3365	0,3630	0,3235
68	0,4984	0,4520	0,4975	0,4611	0,4990	0,4552	0,4774
69	0,6851	0,6644	0,6850	0,6233	0,6858	0,6079	0,6669
70	0,6049	0,6075	0,6033	0,5721	0,6024	0,5634	0,5989
71	0,4897	0,4915	0,4888	0,4926	0,4884	0,5019	0,4927
72	0,3945	0,3950	0,3938	0,4040	0,3937	0,4047	0,3969
73	0,4863	0,4904	0,4873	0,4838	0,4869	0,4927	0,4954
74	0,4185	0,3893	0,4169	0,4355	0,4178	0,4160	0,4190
75	0,6442	0,6268	0,6447	0,5880	0,6452	0,6253	0,6316
76	0,7384	0,7411	0,7394	0,7171	0,7394	0,7615	0,7438
77	0,4482	0,4492	0,4484	0,4406	0,4484	0,4391	0,4511
78	0,2107	0,2106	0,2102	0,1866	0,2103	0,1968	0,2117
79	0,4405	0,4415	0,4422	0,4383	0,4420	0,4200	0,4403
80	0,6909	0,6810	0,6934	0,6695	0,6939	0,6558	0,6748
81	0,6013	0,5934	0,6041	0,5977	0,6044	0,5609	0,5991
82	0,5474	0,5423	0,5470	0,5684	0,5470	0,5210	0,5471
83	0,3654	0,3630	0,3652	0,3475	0,3652	0,3516	0,3650
84	0,1399	0,1394	0,1401	0,1367	0,1402	0,1341	0,1398
85	18,4851	18,4851	18,4851	18,4851	18,4851	18,4851	18,4851

Fonte: Elaborado pelo autor.

(continua)

Trecho	Vazões obtidas pelas calibrações com 26 observações das horas 52 e 60 (L/s)						
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
1	10,5519	10,6613	10,5830	10,5518	10,5826	10,6618	10,7232
2	7,6577	7,7707	7,6670	7,6476	7,6667	7,7040	7,6588
3	4,2336	4,3335	4,2537	4,1361	4,2536	4,2360	4,2918
4	2,3569	2,3381	2,3553	2,2687	2,3559	2,3430	2,3358
5	1,3945	1,3916	1,3952	1,3155	1,3954	1,3971	1,3985
6	0,4277	0,4275	0,4278	0,4095	0,4278	0,4292	0,4282
7	0,2089	0,2088	0,2090	0,1908	0,2091	0,2105	0,2095
8	0,3078	0,3083	0,3083	0,2927	0,3083	0,3090	0,3074
9	0,3336	0,3348	0,3340	0,3143	0,3340	0,3338	0,3345
10	0,3999	0,4017	0,3996	0,3880	0,3995	0,4017	0,4018
11	0,2824	0,2841	0,2817	0,2709	0,2817	0,2836	0,2842
12	0,0942	0,0954	0,0937	0,0871	0,0937	0,0953	0,0954
13	0,1246	0,1234	0,1250	0,1316	0,1250	0,1235	0,1233
14	0,3327	0,3302	0,3334	0,3485	0,3333	0,3294	0,3300
15	0,4963	0,4907	0,4967	0,5001	0,4965	0,4886	0,4901
16	0,5615	0,5520	0,5615	0,5405	0,5614	0,5537	0,5511
17	0,5557	0,5457	0,5553	0,5583	0,5552	0,5471	0,5489
18	0,3638	0,3598	0,3633	0,3839	0,3633	0,3558	0,3556
19	0,5826	0,5785	0,5821	0,6026	0,5820	0,5745	0,5744
20	1,3512	1,3482	1,3523	1,3630	1,3522	1,3341	1,3315
21	2,1656	2,1667	2,1674	2,1792	2,1672	2,1395	2,1313
22	2,8372	2,7983	2,8319	2,8599	2,8319	2,7972	2,7613
23	3,6340	3,5396	3,6364	3,6335	3,6368	3,5868	3,5497
24	7,6051	7,4957	7,5740	7,6052	7,5743	7,4952	7,4338
25	2,5660	2,5624	2,5877	2,5760	2,5878	2,6296	2,7362
26	2,6671	2,6021	2,6683	2,5624	2,6687	2,6616	2,6744
27	2,1701	2,1137	2,1776	2,1306	2,1780	2,1699	2,1938
28	1,5777	1,5276	1,5776	1,5442	1,5780	1,5761	1,5714
29	1,2079	1,1911	1,2094	1,1845	1,2095	1,2111	1,2015
30	0,5200	0,5141	0,5201	0,5026	0,5200	0,5195	0,5214
31	3,0959	3,1091	3,0852	3,1833	3,0849	3,1398	3,0389
32	2,4367	2,4734	2,4449	2,4939	2,4447	2,4518	2,4392
33	1,9693	2,0091	1,9717	1,9925	1,9716	1,9788	1,9754
34	1,3451	1,3593	1,3474	1,3522	1,3473	1,3566	1,3575
35	0,6819	0,6843	0,6824	0,6601	0,6824	0,6861	0,6897
36	0,3340	0,3344	0,3344	0,3104	0,3344	0,3348	0,3303
37	1,5486	1,6672	1,5702	1,5392	1,5696	1,5648	1,6278
38	2,1641	2,2965	2,1481	2,2943	2,1467	2,1909	2,2352
39	1,5355	1,5857	1,5296	1,5836	1,5289	1,5585	1,5642
40	1,1782	1,2050	1,1752	1,2376	1,1751	1,1929	1,1986
41	0,6466	0,6533	0,6435	0,6801	0,6434	0,6460	0,6540
42	0,2630	0,2668	0,2633	0,2877	0,2632	0,2630	0,2672
43	0,6342	0,6183	0,6319	0,6250	0,6323	0,6178	0,6091
44	1,0700	1,0618	1,0739	1,0205	1,0744	1,0805	1,0690
45	0,8896	0,8930	0,8906	0,8739	0,8909	0,8963	0,9010
46	0,5673	0,5715	0,5671	0,5368	0,5671	0,5661	0,5707

(conclusão)							
Trecho	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
47	0,4200	0,4259	0,4206	0,4432	0,4206	0,4259	0,4258
48	0,1645	0,1677	0,1649	0,1766	0,1649	0,1690	0,1680
49	0,6387	0,6359	0,6393	0,5779	0,6395	0,6397	0,6421
50	1,1739	1,1719	1,1736	1,1563	1,1739	1,1731	1,1786
51	0,8744	0,8752	0,8744	0,8550	0,8746	0,8753	0,8796
52	0,5321	0,5342	0,5316	0,5279	0,5318	0,5331	0,5347
53	0,3321	0,3353	0,3323	0,3203	0,3324	0,3352	0,3354
54	0,1201	0,1213	0,1198	0,1112	0,1199	0,1222	0,1215
55	3,6430	3,6279	3,6094	3,6435	3,6093	3,5803	3,5559
56	3,1043	3,1507	3,0913	3,2196	3,0909	3,1108	3,1803
57	3,3261	3,3490	3,2942	3,4715	3,2937	3,3614	3,3424
58	2,2731	2,2822	2,2788	2,2789	2,2790	2,2978	2,2975
59	1,3998	1,4012	1,3993	1,4460	1,3994	1,3976	1,4001
60	0,4271	0,4277	0,4275	0,4301	0,4275	0,4267	0,4261
61	0,4686	0,4132	0,4764	0,4455	0,4768	0,4614	0,4602
62	0,5281	0,4641	0,5296	0,4398	0,5300	0,5156	0,5034
63	0,5579	0,4908	0,5653	0,5037	0,5657	0,5510	0,5297
64	0,7489	0,7642	0,7463	0,7769	0,7460	0,7460	0,7633
65	0,4919	0,4955	0,4921	0,4860	0,4920	0,4927	0,4938
66	0,3539	0,3547	0,3538	0,3498	0,3538	0,3530	0,3552
67	0,3434	0,3034	0,3363	0,3526	0,3365	0,3295	0,3019
68	0,4984	0,4520	0,4988	0,5015	0,4990	0,4858	0,4867
69	0,6851	0,6644	0,6856	0,7043	0,6858	0,6705	0,6672
70	0,6049	0,6075	0,6025	0,6128	0,6021	0,5986	0,5952
71	0,4897	0,4915	0,4885	0,5123	0,4883	0,4913	0,4880
72	0,3945	0,3950	0,3937	0,4019	0,3937	0,3960	0,3955
73	0,4863	0,4904	0,4869	0,4880	0,4868	0,4772	0,4716
74	0,4185	0,3893	0,4177	0,4103	0,4178	0,4047	0,4039
75	0,6442	0,6268	0,6451	0,6648	0,6452	0,6378	0,6342
76	0,7384	0,7411	0,7394	0,7848	0,7394	0,7471	0,7414
77	0,4482	0,4492	0,4484	0,4409	0,4484	0,4498	0,4488
78	0,2107	0,2106	0,2103	0,2110	0,2103	0,2101	0,2105
79	0,4405	0,4415	0,4421	0,4322	0,4420	0,4315	0,4290
80	0,6909	0,6810	0,6939	0,6766	0,6940	0,6856	0,6716
81	0,6013	0,5934	0,6043	0,5889	0,6044	0,5994	0,5934
82	0,5474	0,5423	0,5470	0,5438	0,5470	0,5449	0,5427
83	0,3654	0,3630	0,3652	0,3729	0,3652	0,3643	0,3629
84	0,1399	0,1394	0,1402	0,1444	0,1402	0,1398	0,1394
85	18,4851	18,4851	18,4851	18,4851	18,4851	18,4851	18,4851

Fonte: Elaborado pelo autor.

(continua)

Trecho	Vazões obtidas pelas calibrações com 50 observações das horas 52 e 60 (L/s)						
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
1	10,5519	10,6613	10,5792	10,6319	10,5799	10,5905	10,6223
2	7,6577	7,7707	7,6621	7,8224	7,6631	7,7512	7,7303
3	4,2336	4,3335	4,2505	4,3036	4,2511	4,4667	4,3422
4	2,3569	2,3381	2,3578	2,3215	2,3572	2,4108	2,3423
5	1,3945	1,3916	1,3960	1,4199	1,3958	1,4095	1,3892
6	0,4277	0,4275	0,4279	0,4402	0,4278	0,4291	0,4280
7	0,2089	0,2088	0,2091	0,2215	0,2091	0,2104	0,2093
8	0,3078	0,3083	0,3084	0,3025	0,3084	0,3113	0,3085
9	0,3336	0,3348	0,3340	0,3437	0,3340	0,3378	0,3351
10	0,3999	0,4017	0,3995	0,4141	0,3995	0,4057	0,4013
11	0,2824	0,2841	0,2816	0,2833	0,2816	0,2856	0,2836
12	0,0942	0,0954	0,0937	0,0968	0,0937	0,0960	0,0955
13	0,1246	0,1234	0,1250	0,1220	0,1250	0,1227	0,1232
14	0,3327	0,3302	0,3333	0,3271	0,3333	0,3295	0,3289
15	0,4963	0,4907	0,4966	0,4533	0,4966	0,4914	0,4938
16	0,5615	0,5520	0,5617	0,5371	0,5617	0,5550	0,5536
17	0,5557	0,5457	0,5554	0,5219	0,5554	0,5517	0,5503
18	0,3638	0,3598	0,3634	0,3298	0,3634	0,3577	0,3611
19	0,5826	0,5785	0,5821	0,5486	0,5821	0,5764	0,5798
20	1,3512	1,3482	1,3520	1,2731	1,3521	1,3380	1,3483
21	2,1656	2,1667	2,1664	2,0810	2,1666	2,1471	2,1591
22	2,8372	2,7983	2,8331	2,6889	2,8329	2,7975	2,8205
23	3,6340	3,5396	3,6418	3,3646	3,6407	3,5865	3,6013
24	7,6051	7,4957	7,5778	7,5251	7,5770	7,5665	7,5346
25	2,5660	2,5624	2,5889	2,4813	2,5887	2,5111	2,5639
26	2,6671	2,6021	2,6722	2,7739	2,6714	2,7229	2,6466
27	2,1701	2,1137	2,1815	2,1840	2,1807	2,2157	2,1398
28	1,5777	1,5276	1,5811	1,5895	1,5804	1,5885	1,5554
29	1,2079	1,1911	1,2106	1,1787	1,2104	1,2087	1,1963
30	0,5200	0,5141	0,5202	0,5202	0,5202	0,5222	0,5174
31	3,0959	3,1091	3,0834	3,1907	3,0838	2,9564	3,0599
32	2,4367	2,4734	2,4432	2,4588	2,4435	2,3457	2,4403
33	1,9693	2,0091	1,9696	2,0398	1,9700	1,9107	1,9793
34	1,3451	1,3593	1,3466	1,3798	1,3468	1,3238	1,3550
35	0,6819	0,6843	0,6822	0,7267	0,6823	0,6795	0,6875
36	0,3340	0,3344	0,3344	0,3434	0,3344	0,3315	0,3314
37	1,5486	1,6672	1,5645	1,6540	1,5657	1,7277	1,6717
38	2,1641	2,2965	2,1377	2,2440	2,1399	2,2088	2,2050
39	1,5355	1,5857	1,5254	1,5375	1,5263	1,5576	1,5569
40	1,1782	1,2050	1,1735	1,1578	1,1738	1,1883	1,1910
41	0,6466	0,6533	0,6428	0,6455	0,6429	0,6505	0,6464
42	0,2630	0,2668	0,2630	0,2444	0,2631	0,2645	0,2684
43	0,6342	0,6183	0,6336	0,5734	0,6332	0,6732	0,6250
44	1,0700	1,0618	1,0757	1,1067	1,0753	1,0925	1,0753
45	0,8896	0,8930	0,8912	0,9244	0,8910	0,9060	0,9003
46	0,5673	0,5715	0,5670	0,6212	0,5670	0,5758	0,5693

							(conclusão)
Trecho	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	Híbrido-G	Híbrido-T	MIGHA
47	0,4200	0,4259	0,4205	0,4737	0,4205	0,4242	0,4251
48	0,1645	0,1677	0,1649	0,2019	0,1649	0,1663	0,1633
49	0,6387	0,6359	0,6400	0,6515	0,6398	0,6522	0,6330
50	1,1739	1,1719	1,1745	1,2030	1,1743	1,1859	1,1765
51	0,8744	0,8752	0,8750	0,8915	0,8748	0,8844	0,8778
52	0,5321	0,5342	0,5319	0,5226	0,5318	0,5367	0,5348
53	0,3321	0,3353	0,3324	0,3410	0,3324	0,3356	0,3350
54	0,1201	0,1213	0,1199	0,1230	0,1199	0,1214	0,1225
55	3,6430	3,6279	3,6078	3,8323	3,6081	3,6517	3,6051
56	3,1043	3,1507	3,0870	3,1022	3,0879	3,0025	3,0849
57	3,3261	3,3490	3,2898	3,3966	3,2907	3,1757	3,2671
58	2,2731	2,2822	2,2791	2,3690	2,2790	2,2571	2,2963
59	1,3998	1,4012	1,3995	1,3982	1,3994	1,4003	1,4084
60	0,4271	0,4277	0,4275	0,4092	0,4275	0,4291	0,4273
61	0,4686	0,4132	0,4805	0,3475	0,4797	0,4609	0,4526
62	0,5281	0,4641	0,5338	0,4999	0,5329	0,5306	0,5219
63	0,5579	0,4908	0,5698	0,4815	0,5689	0,5280	0,5454
64	0,7489	0,7642	0,7447	0,7505	0,7450	0,7417	0,7560
65	0,4919	0,4955	0,4917	0,4954	0,4918	0,4907	0,4935
66	0,3539	0,3547	0,3537	0,3694	0,3538	0,3547	0,3548
67	0,3434	0,3034	0,3385	0,2798	0,3381	0,3223	0,3333
68	0,4984	0,4520	0,5014	0,4368	0,5009	0,5120	0,4802
69	0,6851	0,6644	0,6869	0,6593	0,6866	0,6614	0,6670
70	0,6049	0,6075	0,6013	0,6015	0,6016	0,5932	0,5953
71	0,4897	0,4915	0,4880	0,4672	0,4881	0,4859	0,4888
72	0,3945	0,3950	0,3936	0,3985	0,3937	0,3960	0,3944
73	0,4863	0,4904	0,4862	0,4797	0,4864	0,4809	0,4826
74	0,4185	0,3893	0,4192	0,4529	0,4189	0,4232	0,4043
75	0,6442	0,6268	0,6461	0,6685	0,6459	0,6300	0,6344
76	0,7384	0,7411	0,7393	0,7433	0,7393	0,7303	0,7415
77	0,4482	0,4492	0,4484	0,4533	0,4484	0,4444	0,4481
78	0,2107	0,2106	0,2103	0,1974	0,2103	0,2080	0,2105
79	0,4405	0,4415	0,4418	0,3964	0,4418	0,4335	0,4403
80	0,6909	0,6810	0,6946	0,6174	0,6945	0,6825	0,6817
81	0,6013	0,5934	0,6049	0,5632	0,6048	0,5929	0,6002
82	0,5474	0,5423	0,5472	0,5268	0,5471	0,5415	0,5408
83	0,3654	0,3630	0,3653	0,3611	0,3653	0,3619	0,3651
84	0,1399	0,1394	0,1403	0,1416	0,1402	0,1386	0,1401
85	18,4851	18,4851	18,4851	18,4851	18,4851	18,4851	18,4851

Fonte: Elaborado pelo autor.

**APÊNDICE I – RESULTADOS PARA CALIBRAÇÃO DAS RUGOSIDADES
ABSOLUTAS DA REDE HELLER-PÁDUA COM O USO DE ALGORITMOS
GENÉTICOS, NO CENÁRIO COM MAIS DADOS OBSERVADOS**

Trecho	Rugosidades da Rede Heller-Pádua calculadas com AG (mm)				
	Gabarito	Inicial	AG - Pop 30	AG - Pop 200	AG - Pop 1000
1	0,2500	0,0100	0,1972	0,2719	0,1592
2	0,2500	0,0100	0,3263	0,2225	0,4013
3	0,2500	0,0100	0,5000	0,0002	0,0002
4	0,2500	0,0100	0,4077	0,2033	0,2113
5	0,2500	0,0100	0,2728	0,2585	0,2372
6	0,2500	0,0100	0,0002	0,0550	0,5000
7	0,2500	0,0100	0,2442	0,2461	0,2535
8	0,2500	0,0100	0,4161	0,5000	0,2285
9	0,2500	0,0100	0,2537	0,2577	0,2523
10	0,2500	0,0100	0,3134	0,2878	0,1183
11	0,2500	0,0100	0,3020	0,3343	0,2415

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nó	Cargas de pressão da Rede Heller-Pádua calculadas após calibrações com AG (mca)				
	Gabarito	Inicial	AG - Pop 30	AG - Pop 200	AG - Pop 1000
1	21,4666	21,7952	21,5222	21,4450	21,5660
2	31,1310	31,6985	31,1337	31,1301	31,1303
3	29,4214	29,9895	29,4234	29,4212	29,4214
4	29,4904	30,0627	29,4902	29,4904	29,4904
5	29,1945	29,9223	29,1855	29,1892	29,2004
6	26,9422	27,6766	26,9401	26,9422	26,9422
7	25,5822	26,8685	25,5832	25,5838	25,5821
8	23,2652	24,5531	23,2652	23,2653	23,2652
9	21,6242	22,9611	21,6246	21,6244	21,6237
10	16,7113	18,0492	16,7114	16,7113	16,7113
11	23,2416	24,5327	23,2416	23,2416	23,2416

Fonte: Elaborado pelo autor.

**APÊNDICE J – RESULTADOS PARA CALIBRAÇÃO DAS RUGOSIDADES
ABSOLUTAS DA REDE PORTO COM O USO DE ALGORITMOS GENÉTICOS, NO
CENÁRIO COM MAIS DADOS OBSERVADOS**

Trecho	Rugosidades da Rede Porto calculadas com AG (mm)				
	Gabarito	Inicial	AG - Pop 30	AG - Pop 200	AG - Pop 1000
0	0,0039	0,0100	0,0088	0,0048	0,0040
1	0,0056	0,0100	0,0007	0,0026	0,0029
2	0,0036	0,0100	0,0031	0,0034	0,0026
3	0,0088	0,0100	0,0002	0,0002	0,0002
4	0,0079	0,0100	0,0219	0,0126	0,0303
5	0,0049	0,0100	0,0054	0,0052	0,0060
6	0,0068	0,0100	0,0201	0,0167	0,0145
7	0,0077	0,0100	0,0155	0,0106	0,0099
8	0,0017	0,0100	0,0009	0,0028	0,0031

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nó	Cargas de pressão da Rede Porto calculadas após calibrações com AG (mca)				
	Gabarito	Inicial	AG - Pop 30	AG - Pop 200	AG - Pop 1000
1	21,4965	21,4812	21,4840	21,4941	21,4962
2	17,5970	17,5055	17,5983	17,5973	17,5970
3	15,8822	15,7423	15,8831	15,8823	15,8831
4	13,7116	13,5697	13,7119	13,7116	13,7115
5	23,3066	23,2381	23,3026	23,3065	23,3067
6	19,0802	19,0171	19,0866	19,0812	19,0803
7	15,4869	15,3461	15,4868	15,4869	15,4860

Fonte: Elaborado pelo autor.

Trecho	Vazões da Rede Porto calculadas após calibrações com AG (L/s)				
	Gabarito	Inicial	AG - Pop 30	AG - Pop 200	AG - Pop 1000
0	40,0000	40,0000	40,0000	40,0000	40,0000
1	13,9712	13,9769	14,0530	14,0279	14,0231
2	8,7164	8,7225	8,7230	8,7189	8,7264
3	0,7164	0,7225	0,7230	0,7189	0,7264
4	1,2836	1,2775	1,2770	1,2811	1,2736
5	6,2836	6,2775	6,2770	6,2811	6,2736
6	4,7452	4,7456	4,6700	4,6910	4,7033
7	21,0288	21,0231	20,9470	20,9722	20,9769
8	26,0288	26,0231	25,9470	25,9722	25,9769

Fonte: Elaborado pelo autor.

**APÊNDICE K – RESULTADOS PARA A CALIBRAÇÃO DAS RUGOSIDADES
ABSOLUTAS DA REDE SOUSA COM O USO DE ALGORITMOS GENÉTICOS, NO
CENÁRIO COM MAIS DADOS OBSERVADOS**

(continua)

Trecho	Rugosidades da Rede Sousa calculadas com AG (mm)				
	Gabarito	Inicial	AG - Pop 30	AG - Pop 200	AG - Pop 1000
1	0,3857	0,0100	0,5000	0,4684	0,4524
2	0,4841	0,0100	0,1667	0,2064	0,1830
3	0,3600	0,0100	0,1384	0,1927	0,1146
4	0,0075	0,0100	0,0002	0,0597	0,0540
5	0,0062	0,0100	0,1016	0,0002	0,0026
6	0,0049	0,0100	0,4219	0,0597	0,0171
7	0,0030	0,0100	0,1865	0,2783	0,0445
8	0,0068	0,0100	0,2198	0,0002	0,0002
9	0,0079	0,0100	0,1894	0,0165	0,0046
10	0,0026	0,0100	0,0002	0,0004	0,0002
11	0,0022	0,0100	0,0088	0,0014	0,0002
12	0,0077	0,0100	0,2744	0,0879	0,0002
13	0,0084	0,0100	0,1395	0,3184	0,0002
14	0,0073	0,0100	0,2880	0,0002	0,0002
15	0,0081	0,0100	0,0002	0,0002	0,0002
16	0,0037	0,0100	0,0002	0,0005	0,0433
17	0,0024	0,0100	0,0345	0,0002	0,0002
18	0,0094	0,0100	0,0002	0,0516	0,0599
19	0,0015	0,0100	0,0002	0,0143	0,0002
20	0,0035	0,0100	0,0002	0,0002	0,0002
21	0,4209	0,0100	0,0605	0,3468	0,4524
22	0,2727	0,0100	0,4981	0,4159	0,3421
23	0,4283	0,0100	0,5000	0,5000	0,5000
24	0,4171	0,0100	0,3995	0,5000	0,5000
25	0,4977	0,0100	0,3250	0,3354	0,4176
26	0,3826	0,0100	0,1716	0,5000	0,5000
27	0,3462	0,0100	0,2021	0,4698	0,4514
28	0,0018	0,0100	0,1053	0,0002	0,0048
29	0,0099	0,0100	0,4082	0,0364	0,0690
30	0,0047	0,0100	0,3492	0,0044	0,0515
31	0,3948	0,0100	0,4938	0,4654	0,4797
32	0,3117	0,0100	0,2120	0,1687	0,2383
33	0,3198	0,0100	0,0835	0,0255	0,0002
34	0,0058	0,0100	0,1673	0,0193	0,0321
35	0,0056	0,0100	0,0002	0,0002	0,0002
36	0,0045	0,0100	0,2393	0,0002	0,0549
37	0,4441	0,0100	0,1505	0,4848	0,4555
38	0,3248	0,0100	0,0401	0,0002	0,0002
39	0,0020	0,0100	0,0002	0,0541	0,0712
40	0,0032	0,0100	0,0002	0,0002	0,0007

(conclusão)					
Trecho	Gabarito	Inicial	AG - Pop 30	AG - Pop 200	AG - Pop 1000
41	0,0021	0,0100	0,0002	0,0009	0,0002
42	0,0081	0,0100	0,1251	0,1645	0,0205
43	0,0045	0,0100	0,1607	0,2157	0,1136
44	0,0079	0,0100	0,0002	0,0579	0,0134
45	0,0041	0,0100	0,0275	0,0190	0,0029
46	0,0055	0,0100	0,0002	0,0139	0,0104
47	0,0098	0,0100	0,2487	0,0002	0,0002
48	0,0084	0,0100	0,4333	0,0879	0,0243
49	0,0075	0,0100	0,4336	0,1112	0,0749
50	0,0020	0,0100	0,0002	0,0002	0,0002
51	0,0096	0,0100	0,0002	0,0002	0,0048
52	0,0037	0,0100	0,0010	0,0002	0,0002
53	0,0099	0,0100	0,0002	0,0444	0,0034
54	0,0084	0,0100	0,1378	0,2538	0,1338
55	0,3607	0,0100	0,3870	0,3200	0,4204
56	0,4016	0,0100	0,0635	0,3676	0,5000
57	0,2744	0,0100	0,3258	0,2679	0,4489
58	0,0098	0,0100	0,0002	0,0002	0,0002
59	0,0041	0,0100	0,0260	0,0002	0,0002
60	0,0051	0,0100	0,1136	0,0002	0,0108
61	0,0055	0,0100	0,2211	0,0670	0,0002
62	0,0092	0,0100	0,3567	0,4182	0,2975
63	0,0045	0,0100	0,0204	0,3441	0,3094
64	0,0047	0,0100	0,0035	0,0002	0,0078
65	0,0045	0,0100	0,0019	0,0015	0,0002
66	0,0062	0,0100	0,0002	0,0009	0,0002
67	0,0044	0,0100	0,3248	0,1635	0,3921
68	0,0039	0,0100	0,0002	0,0611	0,0050
69	0,0016	0,0100	0,0930	0,0131	0,0286
70	0,0034	0,0100	0,0002	0,0002	0,0363
71	0,0029	0,0100	0,0002	0,0002	0,0002
72	0,0018	0,0100	0,0665	0,0002	0,0002
73	0,0019	0,0100	0,3825	0,0054	0,0002
74	0,0036	0,0100	0,0500	0,3228	0,3627
75	0,0027	0,0100	0,2649	0,0058	0,0045
76	0,0088	0,0100	0,0002	0,0002	0,0017
77	0,0050	0,0100	0,0042	0,0002	0,0002
78	0,0016	0,0100	0,2857	0,1749	0,0057
79	0,0096	0,0100	0,3303	0,0143	0,0027
80	0,0090	0,0100	0,3035	0,0002	0,0002
81	0,0091	0,0100	0,0002	0,0249	0,0002
82	0,0066	0,0100	0,1116	0,0002	0,0002
83	0,0024	0,0100	0,3301	0,0002	0,0424
84	0,0047	0,0100	0,2473	0,1914	0,0470
85	0,3450	0,0100	0,4249	0,3858	0,3528

Fonte: Elaborado pelo autor.

(continua)

Nó	Cargas de pressão da Rede Sousa calculadas após calibrações com AG (mca)				
	Gabarito	Inicial	AG - Pop 30	AG - Pop 200	AG - Pop 1000
1	5,3190	5,3485	5,3142	5,3165	5,3185
2	5,4707	5,5953	5,4409	5,4488	5,4498
3	7,7124	7,8904	7,7137	7,7132	7,7128
4	12,1166	12,4154	12,1487	12,1414	12,1490
5	19,1932	19,4961	19,2304	19,1970	19,1970
6	23,3643	23,6668	23,3898	23,3713	23,3694
7	25,7673	26,0690	25,7610	25,7713	25,7706
8	28,2191	28,5207	28,2181	28,2198	28,2214
9	27,0820	27,3831	27,0825	27,0848	27,0850
10	27,1574	27,4576	27,1474	27,1599	27,1603
11	27,2729	27,5711	27,2589	27,2747	27,2755
12	28,5627	28,8596	28,5422	28,5645	28,5648
13	31,5509	31,8476	31,5287	31,5525	31,5530
14	27,1710	27,4674	27,1466	27,1739	27,1730
15	24,7651	25,0605	24,7523	24,7673	24,7670
16	21,9005	22,1926	21,8823	21,8991	21,8976
17	17,0626	17,3498	17,0285	17,0632	17,0627
18	12,7959	13,0784	12,7683	12,7934	12,7889
19	14,6153	14,8957	14,6111	14,6141	14,6138
20	12,5922	12,8728	12,6218	12,5910	12,5901
21	10,0104	10,2917	10,0446	10,0066	10,0075
22	7,6263	7,8748	7,6306	7,6152	7,6237
23	6,0001	6,2018	6,0153	5,9973	5,9979
24	5,6229	5,7058	5,6231	5,6167	5,6215
25	5,4002	5,5803	5,3818	5,3998	5,3997
26	5,5181	5,7531	5,5309	5,5197	5,5193
27	7,0689	7,3365	7,0939	7,0665	7,0665
28	8,7334	9,0101	8,7485	8,7383	8,7402
29	11,1739	11,4538	11,1719	11,1733	11,1730
30	7,1138	7,3612	7,1342	7,1097	7,1133
31	7,6454	7,9235	7,6693	7,6473	7,6464
32	8,5865	8,8829	8,6267	8,6011	8,6038
33	9,7848	10,0773	9,7994	9,7863	9,7855
34	13,2101	13,4981	13,1858	13,2141	13,2129
35	12,7783	13,0858	12,8027	12,7828	12,7804
36	11,9049	12,2287	11,9415	11,9264	11,9260
37	13,1898	13,4992	13,2042	13,1941	13,1928
38	15,1446	15,4479	15,1447	15,1477	15,1464
39	17,9050	18,1988	17,8999	17,9079	17,9064
40	18,4116	18,7161	18,4383	18,4156	18,4147
41	17,3383	17,6440	17,3610	17,3419	17,3415
42	18,3250	18,6297	18,3417	18,3284	18,3267
43	19,0368	19,3367	19,0468	19,0408	19,0392
44	22,2167	22,5132	22,2053	22,2209	22,2205
45	23,9843	24,2871	23,9992	23,9878	23,9875
46	22,9459	23,2478	22,9568	22,9493	22,9489

(conclusão)

Trecho	Gabarito	Inicial	AG - Pop 30	AG - Pop 200	AG - Pop 1000
47	22,8317	23,1335	22,8402	22,8356	22,8346
48	23,3944	23,6928	23,3906	23,4005	23,3972
49	25,4813	25,7781	25,4605	25,4850	25,4833

Fonte: Elaborado pelo autor.

(continua)

Trecho	Vazões da Rede Sousa calculadas após calibrações com AG (L/s)				
	Gabarito	Inicial	AG – Pop 30	AG – Pop 200	AG – Pop 1000
1	10,6613	10,5519	10,6284	10,6250	10,6863
2	7,7707	7,6577	7,6993	7,7862	7,8967
3	4,3335	4,2336	4,4790	4,3906	4,5370
4	2,3381	2,3569	2,3621	2,2998	2,3320
5	1,3916	1,3945	1,3595	1,3861	1,3920
6	0,4275	0,4277	0,4007	0,4181	0,4272
7	0,2088	0,2089	0,1819	0,1994	0,2085
8	0,3083	0,3078	0,2791	0,3045	0,3073
9	0,3348	0,3336	0,3259	0,3325	0,3344
10	0,4017	0,3999	0,4077	0,4018	0,4012
11	0,2841	0,2824	0,2959	0,2826	0,2838
12	0,0954	0,0942	0,1024	0,0949	0,0944
13	0,1234	0,1246	0,1164	0,1238	0,1243
14	0,3302	0,3327	0,3160	0,3325	0,3338
15	0,4907	0,4963	0,4913	0,4940	0,4922
16	0,5520	0,5615	0,5412	0,5658	0,5488
17	0,5457	0,5557	0,5505	0,5523	0,5467
18	0,3598	0,3638	0,4082	0,3576	0,3636
19	0,5785	0,5826	0,6270	0,5763	0,5823
20	1,3482	1,3512	1,3770	1,3425	1,3511
21	2,1667	2,1656	2,1380	2,1423	2,1512
22	2,7983	2,8372	2,7331	2,7739	2,7759
23	3,5396	3,6340	3,4838	3,5461	3,5691
24	7,4957	7,6051	7,5286	7,5320	7,4706
25	2,5624	2,5660	2,6008	2,5107	2,4614
26	2,6021	2,6671	2,6036	2,5714	2,5733
27	2,1137	2,1701	2,1523	2,1373	2,1429
28	1,5276	1,5777	1,5051	1,5483	1,5340
29	1,1911	1,2079	1,0930	1,2139	1,2007
30	0,5141	0,5200	0,4705	0,5229	0,5113
31	3,1091	3,0959	2,8921	3,0674	3,0315
32	2,4734	2,4367	2,4902	2,5123	2,4842
33	2,0091	1,9693	1,9552	2,0641	2,0489
34	1,3593	1,3451	1,3294	1,3921	1,3947
35	0,6843	0,6819	0,7302	0,6826	0,6831
36	0,3344	0,3340	0,3188	0,3416	0,3302
37	1,6672	1,5486	1,7888	1,7626	1,8768
38	2,2965	2,1641	2,3009	2,3021	2,2777
39	1,5857	1,5355	1,6325	1,5440	1,5303
40	1,2050	1,1782	1,2562	1,1881	1,1869

(continua)

Trecho	Gabarito	Inicial	AG – Pop 30	AG – Pop 200	AG – Pop 1000
41	0,6533	0,6466	0,6540	0,6474	0,6482
42	0,2668	0,2630	0,2783	0,2563	0,2715
43	0,6183	0,6342	0,6745	0,5856	0,6119
44	1,0618	1,0700	1,0989	1,0412	1,0657
45	0,8930	0,8896	0,9158	0,8824	0,9000
46	0,5715	0,5673	0,5789	0,5627	0,5641
47	0,4259	0,4200	0,4049	0,4225	0,4204
48	0,1677	0,1645	0,1529	0,1667	0,1698
49	0,6359	0,6387	0,6306	0,6398	0,6366
50	1,1719	1,1739	1,1971	1,1760	1,1763
51	0,8752	0,8744	0,8951	0,8755	0,8774
52	0,5342	0,5321	0,5506	0,5306	0,5339
53	0,3353	0,3321	0,3671	0,3306	0,3348
54	0,1213	0,1201	0,1285	0,1194	0,1187
55	3,6279	3,6430	3,7167	3,6577	3,5734
56	3,1507	3,1043	3,2764	3,1595	3,0240
57	3,3490	3,3261	3,2408	3,2771	3,1338
58	2,2822	2,2731	2,2912	2,3001	2,2955
59	1,4012	1,3998	1,4293	1,4069	1,4042
60	0,4277	0,4271	0,4253	0,4332	0,4270
61	0,4132	0,4686	0,4225	0,4440	0,4650
62	0,4641	0,5281	0,4364	0,4405	0,4580
63	0,4908	0,5579	0,5339	0,4513	0,4558
64	0,7642	0,7489	0,7648	0,7719	0,7657
65	0,4955	0,4919	0,5104	0,4932	0,4938
66	0,3547	0,3539	0,3749	0,3562	0,3552
67	0,3034	0,3434	0,2670	0,3035	0,2965
68	0,4520	0,4984	0,4766	0,4550	0,4679
69	0,6644	0,6851	0,6649	0,6895	0,6846
70	0,6075	0,6049	0,6037	0,6078	0,5905
71	0,4915	0,4897	0,5030	0,4900	0,4889
72	0,3950	0,3945	0,4100	0,3974	0,3949
73	0,4904	0,4863	0,4328	0,4716	0,4720
74	0,3893	0,4185	0,4074	0,3685	0,3677
75	0,6268	0,6442	0,5690	0,6405	0,6418
76	0,7411	0,7384	0,7338	0,7438	0,7430
77	0,4492	0,4482	0,4703	0,4465	0,4492
78	0,2106	0,2107	0,2163	0,2090	0,2108
79	0,4415	0,4405	0,4219	0,4380	0,4406
80	0,6810	0,6909	0,6069	0,6915	0,6926
81	0,5934	0,6013	0,5809	0,5950	0,6079
82	0,5423	0,5474	0,5191	0,5485	0,5470
83	0,3630	0,3654	0,3336	0,3668	0,3602
84	0,1394	0,1399	0,1347	0,1405	0,1388
85	18,4851	18,4851	18,4851	18,4851	18,4851

Fonte: Elaborado pelo autor.

**APÊNDICE L – CONCENTRAÇÕES DE CLORO RESIDUAL OBTIDAS NAS
CALIBRAÇÕES DOS KWS DA REDE HELLER-PÁDUA PARA A HORA 70**

Nó	Concentrações obtidas pelas calibrações com uma observação (mg/L)			
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T
2	1,6261	1,9572	1,6250	1,5373
3	1,3259	1,9154	1,3241	1,1835
4	0,9667	1,7408	0,9651	0,8398
5	0,8717	1,7301	0,8701	0,7426
6	1,1081	1,8750	1,1061	0,9424
7	0,7095	1,6915	0,7078	0,5693
8	0,7946	1,8180	0,7922	0,6595
9	0,5614	1,6486	0,5595	0,4521
10	0,5706	1,7304	0,5684	0,4388
11	0,4094	1,5708	0,4078	0,3063
12	0,5224	1,6421	0,5206	0,4166

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nó	Concentrações obtidas pelas calibrações com três observações (mg/L)			
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T
2	1,6261	1,9572	1,6258	1,6052
3	1,3259	1,9154	1,3254	1,3084
4	0,9667	1,7408	0,9663	0,9273
5	0,8717	1,7301	0,8713	0,8133
6	1,1081	1,8750	1,1076	1,0617
7	0,7095	1,6915	0,7090	0,6356
8	0,7946	1,8180	0,7939	0,7249
9	0,5614	1,6486	0,5609	0,4975
10	0,5706	1,7304	0,5700	0,4892
11	0,4094	1,5708	0,4090	0,3410
12	0,5224	1,6421	0,5219	0,4559

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nó	Concentrações obtidas pelas calibrações com seis observações (mg/L)			
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T
2	1,6261	1,9572	1,6292	1,6429
3	1,3259	1,9154	1,3309	1,3597
4	0,9667	1,7408	0,9711	0,9576
5	0,8717	1,7301	0,8762	0,8533
6	1,1081	1,8750	1,1139	1,1088
7	0,7095	1,6915	0,7143	0,6606
8	0,7946	1,8180	0,8014	0,7721
9	0,5614	1,6486	0,5667	0,5267
10	0,5706	1,7304	0,5766	0,5249
11	0,4094	1,5708	0,4141	0,3680
12	0,5224	1,6421	0,5276	0,4811

Fonte: Elaborado pelo autor.

**APÊNDICE M – CONCENTRAÇÕES DE CLORO RESIDUAL OBTIDAS NAS
CALIBRAÇÕES DOS KWS DA REDE PORTO PARA A HORA 70**

Nó	Concentrações obtidas pelas calibrações com uma observação (mg/L)			
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T
1	1,8973	1,9626	1,9000	1,7035
2	1,3888	1,7585	1,3591	0,6039
3	1,1553	1,6679	1,1505	0,3578
4	1,2021	1,7104	1,2422	1,1514
5	1,5602	1,8337	1,5649	1,1637
6	1,7199	1,8952	1,7178	1,4116
7	0,6621	1,3127	0,6514	0,7350

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nó	Concentrações obtidas pelas calibrações com três observações (mg/L)			
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T
1	1,8973	1,9626	1,9006	1,7407
2	1,3888	1,7585	1,3625	1,4298
3	1,1553	1,6679	1,1547	0,7703
4	1,2021	1,7104	1,2461	1,4891
5	1,5602	1,8337	1,5674	1,5087
6	1,7199	1,8952	1,7195	1,5252
7	0,6621	1,3127	0,6554	0,9902

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nó	Concentrações obtidas pelas calibrações com sete observações (mg/L)			
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T
1	1,8973	1,9626	1,8953	1,8914
2	1,3888	1,7585	1,3327	1,5455
3	1,1553	1,6679	1,1183	1,5241
4	1,2021	1,7104	1,2120	1,5947
5	1,5602	1,8337	1,5462	1,6435
6	1,7199	1,8952	1,7049	1,6614
7	0,6621	1,3127	0,6219	0,7425

Fonte: Elaborado pelo autor.

**APÊNDICE N – KWS CALCULADOS PARA A REDE SOUSA, NAS CALIBRAÇÕES
QUE EMPREGARAM DADOS OBSERVADOS DA HORA 52**

(continua)

Trecho	Kws calculados pelas calibrações com quatro observações da hora 52 (m/dia)			
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T
1	-0,7888	-0,1000	-0,9761	-0,0789
2	-1,1582	-0,1000	-0,9761	-1,0347
3	-0,8267	-0,1000	-0,9761	-2,7699
4	-0,2336	-0,1000	-0,2130	-2,4882
5	-0,4899	-0,1000	-0,2130	-2,5765
6	-0,1791	-0,1000	-0,2130	-1,9841
7	-0,4001	-0,1000	-0,2130	-4,0561
8	-0,1064	-0,1000	-0,2130	-1,6188
9	-0,4381	-0,1000	-0,2130	-0,9383
10	-0,3794	-0,1000	-0,2130	-0,4854
11	-0,1952	-0,1000	-0,2130	-0,0499
12	-0,3890	-0,1000	-0,2130	-1,9836
13	-0,3235	-0,1000	-0,2130	-2,5202
14	-0,4447	-0,1000	-0,2130	-0,0020
15	-0,4564	-0,1000	-0,2130	-2,9340
16	-0,4756	-0,1000	-0,2130	-7,3496
17	-0,3194	-0,1000	-0,2130	-0,0020
18	-0,1017	-0,1000	-0,2130	-0,0020
19	-0,2056	-0,1000	-0,2130	-0,0020
20	-0,2656	-0,1000	-0,2130	-5,4397
21	-1,2665	-0,1000	-0,9761	-2,2499
22	-1,2218	-0,1000	-0,9761	-2,0540
23	-1,3379	-0,1000	-0,9761	-1,2011
24	-1,4085	-0,1000	-0,9761	-2,1870
25	-1,0476	-0,1000	-0,9761	-1,7296
26	-1,4400	-0,1000	-0,9761	-0,0020
27	-0,5254	-0,1000	-0,9761	-1,3173
28	-0,3769	-0,1000	-0,2130	-2,1929
29	-0,2476	-0,1000	-0,2130	-2,7837
30	-0,1813	-0,1000	-0,2130	-0,0020
31	-0,5733	-0,1000	-0,9761	-2,6261
32	-0,9426	-0,1000	-0,9761	-2,7818
33	-0,7878	-0,1000	-0,9761	-2,6367
34	-0,2659	-0,1000	-0,2130	-0,0020
35	-0,3205	-0,1000	-0,2130	-2,3333
36	-0,1013	-0,1000	-0,2130	-0,0020
37	-0,5464	-0,1000	-0,9761	-1,4378
38	-1,3203	-0,1000	-0,9761	-2,3248
39	-0,4433	-0,1000	-0,2130	-0,0020
40	-0,1435	-0,1000	-0,2130	-0,0020
41	-0,1361	-0,1000	-0,2130	-1,1913
42	-0,3467	-0,1000	-0,2130	-1,9715

Trecho	Gabarito	Inicial	RNA-G	(conclusão)
				RNA-T
43	-0,3706	-0,1000	-0,2130	-0,0020
44	-0,2737	-0,1000	-0,2130	-0,0020
45	-0,4184	-0,1000	-0,2130	-2,0338
46	-0,3198	-0,1000	-0,2130	-0,0020
47	-0,2008	-0,1000	-0,2130	-3,2924
48	-0,1512	-0,1000	-0,2130	-2,2248
49	-0,2944	-0,1000	-0,2130	-0,5572
50	-0,3729	-0,1000	-0,2130	-4,8649
51	-0,3571	-0,1000	-0,2130	-3,8188
52	-0,3405	-0,1000	-0,2130	-0,0020
53	-0,1150	-0,1000	-0,2130	-0,0020
54	-0,2502	-0,1000	-0,2130	-0,0020
55	-0,8290	-0,1000	-0,9761	-3,5671
56	-1,1539	-0,1000	-0,9761	-0,5890
57	-1,4088	-0,1000	-0,9761	-1,8392
58	-0,2973	-0,1000	-0,2130	-1,0111
59	-0,1676	-0,1000	-0,2130	-0,4363
60	-0,3785	-0,1000	-0,2130	-2,5889
61	-0,2502	-0,1000	-0,2130	-3,3085
62	-0,4190	-0,1000	-0,2130	-3,0399
63	-0,4384	-0,1000	-0,2130	-4,6818
64	-0,1709	-0,1000	-0,2130	-3,5552
65	-0,4377	-0,1000	-0,2130	-2,6051
66	-0,1942	-0,1000	-0,2130	-2,3631
67	-0,2670	-0,1000	-0,2130	-5,5198
68	-0,3742	-0,1000	-0,2130	-0,0020
69	-0,1066	-0,1000	-0,2130	-1,0037
70	-0,2457	-0,1000	-0,2130	-0,8245
71	-0,1828	-0,1000	-0,2130	-4,8924
72	-0,3143	-0,1000	-0,2130	-4,3639
73	-0,1306	-0,1000	-0,2130	-2,7442
74	-0,4851	-0,1000	-0,2130	-3,4730
75	-0,2963	-0,1000	-0,2130	-0,0020
76	-0,4236	-0,1000	-0,2130	-0,0020
77	-0,2941	-0,1000	-0,2130	-0,0020
78	-0,4642	-0,1000	-0,2130	-2,4352
79	-0,2971	-0,1000	-0,2130	-0,0020
80	-0,2220	-0,1000	-0,2130	-0,0020
81	-0,4038	-0,1000	-0,2130	-0,0020
82	-0,2340	-0,1000	-0,2130	-0,0020
83	-0,2280	-0,1000	-0,2130	-0,0020
84	-0,4968	-0,1000	-0,2130	-4,1630
85	-1,0365	-0,1000	-0,9761	-8,2062

Fonte: Elaborado pelo autor.

(continua)

Trecho	Kws calculados pelas calibrações com sete observações da hora 52 (m/dia)			
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T
1	-0,7888	-0,1000	-1,0090	-1,6163
2	-1,1582	-0,1000	-1,0090	-0,2299
3	-0,8267	-0,1000	-1,0090	-6,4778
4	-0,2336	-0,1000	-0,2240	-1,8735
5	-0,4899	-0,1000	-0,2240	-2,7768
6	-0,1791	-0,1000	-0,2240	-2,5692
7	-0,4001	-0,1000	-0,2240	-3,3895
8	-0,1064	-0,1000	-0,2240	-0,0020
9	-0,4381	-0,1000	-0,2240	-0,7112
10	-0,3794	-0,1000	-0,2240	-4,1626
11	-0,1952	-0,1000	-0,2240	-1,4853
12	-0,3890	-0,1000	-0,2240	-1,2593
13	-0,3235	-0,1000	-0,2240	-2,3856
14	-0,4447	-0,1000	-0,2240	-0,0020
15	-0,4564	-0,1000	-0,2240	-2,9694
16	-0,4756	-0,1000	-0,2240	-3,8501
17	-0,3194	-0,1000	-0,2240	-0,8990
18	-0,1017	-0,1000	-0,2240	-0,8491
19	-0,2056	-0,1000	-0,2240	-2,1890
20	-0,2656	-0,1000	-0,2240	-1,4368
21	-1,2665	-0,1000	-1,0090	-0,8425
22	-1,2218	-0,1000	-1,0090	-0,0020
23	-1,3379	-0,1000	-1,0090	-0,0020
24	-1,4085	-0,1000	-1,0090	-4,0413
25	-1,0476	-0,1000	-1,0090	-2,6224
26	-1,4400	-0,1000	-1,0090	-0,0020
27	-0,5254	-0,1000	-1,0090	-3,4895
28	-0,3769	-0,1000	-0,2240	-0,6190
29	-0,2476	-0,1000	-0,2240	-3,9017
30	-0,1813	-0,1000	-0,2240	-1,9503
31	-0,5733	-0,1000	-1,0090	-0,3108
32	-0,9426	-0,1000	-1,0090	-0,0020
33	-0,7878	-0,1000	-1,0090	-3,5136
34	-0,2659	-0,1000	-0,2240	-0,2023
35	-0,3205	-0,1000	-0,2240	-0,0020
36	-0,1013	-0,1000	-0,2240	-2,5227
37	-0,5464	-0,1000	-1,0090	-0,0020
38	-1,3203	-0,1000	-1,0090	-2,3342
39	-0,4433	-0,1000	-0,2240	-0,8890
40	-0,1435	-0,1000	-0,2240	-2,6483
41	-0,1361	-0,1000	-0,2240	-1,4490
42	-0,3467	-0,1000	-0,2240	-2,9009
43	-0,3706	-0,1000	-0,2240	-2,4048
44	-0,2737	-0,1000	-0,2240	-3,7367
45	-0,4184	-0,1000	-0,2240	-1,3949
46	-0,3198	-0,1000	-0,2240	-0,1295

Trecho	Gabarito	Inicial	RNA-G	(conclusão)
				RNA-T
47	-0,2008	-0,1000	-0,2240	-3,1854
48	-0,1512	-0,1000	-0,2240	-1,3945
49	-0,2944	-0,1000	-0,2240	-1,8147
50	-0,3729	-0,1000	-0,2240	-6,0369
51	-0,3571	-0,1000	-0,2240	-2,7753
52	-0,3405	-0,1000	-0,2240	-2,4323
53	-0,1150	-0,1000	-0,2240	-0,0020
54	-0,2502	-0,1000	-0,2240	-4,0032
55	-0,8290	-0,1000	-1,0090	-2,7331
56	-1,1539	-0,1000	-1,0090	-1,7963
57	-1,4088	-0,1000	-1,0090	-4,4961
58	-0,2973	-0,1000	-0,2240	-2,2493
59	-0,1676	-0,1000	-0,2240	-1,9674
60	-0,3785	-0,1000	-0,2240	-0,8329
61	-0,2502	-0,1000	-0,2240	-2,3282
62	-0,4190	-0,1000	-0,2240	-3,1090
63	-0,4384	-0,1000	-0,2240	-2,5610
64	-0,1709	-0,1000	-0,2240	-0,0020
65	-0,4377	-0,1000	-0,2240	-3,4628
66	-0,1942	-0,1000	-0,2240	-3,6905
67	-0,2670	-0,1000	-0,2240	-0,5833
68	-0,3742	-0,1000	-0,2240	-1,3602
69	-0,1066	-0,1000	-0,2240	-0,9277
70	-0,2457	-0,1000	-0,2240	-1,4213
71	-0,1828	-0,1000	-0,2240	-2,8434
72	-0,3143	-0,1000	-0,2240	-3,2346
73	-0,1306	-0,1000	-0,2240	-0,0731
74	-0,4851	-0,1000	-0,2240	-1,2418
75	-0,2963	-0,1000	-0,2240	-2,9764
76	-0,4236	-0,1000	-0,2240	-1,9901
77	-0,2941	-0,1000	-0,2240	-0,7891
78	-0,4642	-0,1000	-0,2240	-5,1579
79	-0,2971	-0,1000	-0,2240	-3,0415
80	-0,2220	-0,1000	-0,2240	-1,1597
81	-0,4038	-0,1000	-0,2240	-2,2725
82	-0,2340	-0,1000	-0,2240	-4,7952
83	-0,2280	-0,1000	-0,2240	-0,2545
84	-0,4968	-0,1000	-0,2240	-3,4137
85	-1,0365	-0,1000	-1,0090	-1,5580

Fonte: Elaborado pelo autor.

(continua)

Trecho	Kws calculados pelas calibrações com 13 observações da hora 52 (m/dia)			
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T
1	-0,7888	-0,1000	-0,9648	-1,7109
2	-1,1582	-0,1000	-0,9648	-2,1308
3	-0,8267	-0,1000	-0,9648	-0,4994
4	-0,2336	-0,1000	-0,0834	-0,1646
5	-0,4899	-0,1000	-0,0834	-0,0020
6	-0,1791	-0,1000	-0,0834	-2,1716
7	-0,4001	-0,1000	-0,0834	-2,0497
8	-0,1064	-0,1000	-0,0834	-1,0814
9	-0,4381	-0,1000	-0,0834	-1,1605
10	-0,3794	-0,1000	-0,0834	-1,0273
11	-0,1952	-0,1000	-0,0834	-1,3185
12	-0,3890	-0,1000	-0,0834	-5,5075
13	-0,3235	-0,1000	-0,0834	-2,7576
14	-0,4447	-0,1000	-0,0834	-1,6852
15	-0,4564	-0,1000	-0,0834	-4,5013
16	-0,4756	-0,1000	-0,0834	-0,3584
17	-0,3194	-0,1000	-0,0834	-2,0195
18	-0,1017	-0,1000	-0,0834	-2,6366
19	-0,2056	-0,1000	-0,0834	-2,4413
20	-0,2656	-0,1000	-0,0834	-2,9632
21	-1,2665	-0,1000	-0,9648	-1,9745
22	-1,2218	-0,1000	-0,9648	-1,8358
23	-1,3379	-0,1000	-0,9648	-0,0020
24	-1,4085	-0,1000	-0,9648	-3,4124
25	-1,0476	-0,1000	-0,9648	-3,3086
26	-1,4400	-0,1000	-0,9648	-4,0611
27	-0,5254	-0,1000	-0,9648	-0,7094
28	-0,3769	-0,1000	-0,0834	-0,0020
29	-0,2476	-0,1000	-0,0834	-0,7480
30	-0,1813	-0,1000	-0,0834	-0,0020
31	-0,5733	-0,1000	-0,9648	-2,8854
32	-0,9426	-0,1000	-0,9648	-4,6639
33	-0,7878	-0,1000	-0,9648	-2,1949
34	-0,2659	-0,1000	-0,0834	-0,5919
35	-0,3205	-0,1000	-0,0834	-0,2073
36	-0,1013	-0,1000	-0,0834	-2,4744
37	-0,5464	-0,1000	-0,9648	-0,0020
38	-1,3203	-0,1000	-0,9648	-0,3470
39	-0,4433	-0,1000	-0,0834	-2,7921
40	-0,1435	-0,1000	-0,0834	-4,6931
41	-0,1361	-0,1000	-0,0834	-3,6824
42	-0,3467	-0,1000	-0,0834	-4,1746
43	-0,3706	-0,1000	-0,0834	-1,7852
44	-0,2737	-0,1000	-0,0834	-4,9709
45	-0,4184	-0,1000	-0,0834	-3,1988
46	-0,3198	-0,1000	-0,0834	-2,7387

Trecho	Gabarito	Inicial	RNA-G	(conclusão)
				RNA-T
47	-0,2008	-0,1000	-0,0834	-3,7154
48	-0,1512	-0,1000	-0,0834	-4,9337
49	-0,2944	-0,1000	-0,0834	-2,0624
50	-0,3729	-0,1000	-0,0834	-1,4812
51	-0,3571	-0,1000	-0,0834	-3,9150
52	-0,3405	-0,1000	-0,0834	-2,6111
53	-0,1150	-0,1000	-0,0834	-2,1652
54	-0,2502	-0,1000	-0,0834	-2,4719
55	-0,8290	-0,1000	-0,9648	-3,4210
56	-1,1539	-0,1000	-0,9648	-0,9342
57	-1,4088	-0,1000	-0,9648	-1,0041
58	-0,2973	-0,1000	-0,0834	-1,3424
59	-0,1676	-0,1000	-0,0834	-0,3560
60	-0,3785	-0,1000	-0,0834	-1,4558
61	-0,2502	-0,1000	-0,0834	-2,9931
62	-0,4190	-0,1000	-0,0834	-2,9220
63	-0,4384	-0,1000	-0,0834	-0,4919
64	-0,1709	-0,1000	-0,0834	-0,9520
65	-0,4377	-0,1000	-0,0834	-3,1182
66	-0,1942	-0,1000	-0,0834	-0,0020
67	-0,2670	-0,1000	-0,0834	-3,4407
68	-0,3742	-0,1000	-0,0834	-0,8961
69	-0,1066	-0,1000	-0,0834	-5,3870
70	-0,2457	-0,1000	-0,0834	-1,7799
71	-0,1828	-0,1000	-0,0834	-2,6866
72	-0,3143	-0,1000	-0,0834	-1,8904
73	-0,1306	-0,1000	-0,0834	-2,0038
74	-0,4851	-0,1000	-0,0834	-2,1858
75	-0,2963	-0,1000	-0,0834	-5,1044
76	-0,4236	-0,1000	-0,0834	-0,9552
77	-0,2941	-0,1000	-0,0834	-2,3329
78	-0,4642	-0,1000	-0,0834	-3,0757
79	-0,2971	-0,1000	-0,0834	-0,5470
80	-0,2220	-0,1000	-0,0834	-5,4013
81	-0,4038	-0,1000	-0,0834	-2,1325
82	-0,2340	-0,1000	-0,0834	-2,3263
83	-0,2280	-0,1000	-0,0834	-3,7876
84	-0,4968	-0,1000	-0,0834	-1,6772
85	-1,0365	-0,1000	-0,9648	-4,0396

Fonte: Elaborado pelo autor.

(continua)

Trecho	Kws calculados pelas calibrações com 25 observações da hora 52 (m/dia)			
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T
1	-0,7888	-0,1000	-1,0744	-1,9898
2	-1,1582	-0,1000	-1,0744	-0,0020
3	-0,8267	-0,1000	-1,0744	-2,7825
4	-0,2336	-0,1000	-0,1920	-1,6567
5	-0,4899	-0,1000	-0,1920	-0,0020
6	-0,1791	-0,1000	-0,1920	-0,0020
7	-0,4001	-0,1000	-0,1920	-0,0020
8	-0,1064	-0,1000	-0,1920	-0,3375
9	-0,4381	-0,1000	-0,1920	-0,0020
10	-0,3794	-0,1000	-0,1920	-0,3418
11	-0,1952	-0,1000	-0,1920	-2,7335
12	-0,3890	-0,1000	-0,1920	-0,0020
13	-0,3235	-0,1000	-0,1920	-0,0020
14	-0,4447	-0,1000	-0,1920	-0,0020
15	-0,4564	-0,1000	-0,1920	-0,0020
16	-0,4756	-0,1000	-0,1920	-0,2256
17	-0,3194	-0,1000	-0,1920	-2,2647
18	-0,1017	-0,1000	-0,1920	-1,5707
19	-0,2056	-0,1000	-0,1920	-0,0020
20	-0,2656	-0,1000	-0,1920	-0,5713
21	-1,2665	-0,1000	-1,0744	-6,7710
22	-1,2218	-0,1000	-1,0744	-1,1744
23	-1,3379	-0,1000	-1,0744	-4,8175
24	-1,4085	-0,1000	-1,0744	-0,0020
25	-1,0476	-0,1000	-1,0744	-2,3398
26	-1,4400	-0,1000	-1,0744	-1,7553
27	-0,5254	-0,1000	-1,0744	-0,0020
28	-0,3769	-0,1000	-0,1920	-0,0020
29	-0,2476	-0,1000	-0,1920	-0,0020
30	-0,1813	-0,1000	-0,1920	-1,8789
31	-0,5733	-0,1000	-1,0744	-0,0020
32	-0,9426	-0,1000	-1,0744	-0,0020
33	-0,7878	-0,1000	-1,0744	-2,4072
34	-0,2659	-0,1000	-0,1920	-0,0020
35	-0,3205	-0,1000	-0,1920	-0,0020
36	-0,1013	-0,1000	-0,1920	-0,0020
37	-0,5464	-0,1000	-1,0744	-5,1513
38	-1,3203	-0,1000	-1,0744	-7,0159
39	-0,4433	-0,1000	-0,1920	-0,0020
40	-0,1435	-0,1000	-0,1920	-0,0020
41	-0,1361	-0,1000	-0,1920	-0,0020
42	-0,3467	-0,1000	-0,1920	-1,0370
43	-0,3706	-0,1000	-0,1920	-2,1876
44	-0,2737	-0,1000	-0,1920	-2,7717
45	-0,4184	-0,1000	-0,1920	-0,0020
46	-0,3198	-0,1000	-0,1920	-3,2804

Trecho	Gabarito	Inicial	RNA-G	(conclusão)
				RNA-T
47	-0,2008	-0,1000	-0,1920	-1,7957
48	-0,1512	-0,1000	-0,1920	-0,0020
49	-0,2944	-0,1000	-0,1920	-3,8125
50	-0,3729	-0,1000	-0,1920	-0,0020
51	-0,3571	-0,1000	-0,1920	-0,0020
52	-0,3405	-0,1000	-0,1920	-0,7041
53	-0,1150	-0,1000	-0,1920	-0,0020
54	-0,2502	-0,1000	-0,1920	-1,4812
55	-0,8290	-0,1000	-1,0744	-3,7960
56	-1,1539	-0,1000	-1,0744	-2,6161
57	-1,4088	-0,1000	-1,0744	-0,0020
58	-0,2973	-0,1000	-0,1920	-3,6304
59	-0,1676	-0,1000	-0,1920	-0,0020
60	-0,3785	-0,1000	-0,1920	-0,0020
61	-0,2502	-0,1000	-0,1920	-3,5049
62	-0,4190	-0,1000	-0,1920	-3,3850
63	-0,4384	-0,1000	-0,1920	-0,0020
64	-0,1709	-0,1000	-0,1920	-7,0052
65	-0,4377	-0,1000	-0,1920	-1,6470
66	-0,1942	-0,1000	-0,1920	-0,0020
67	-0,2670	-0,1000	-0,1920	-0,0020
68	-0,3742	-0,1000	-0,1920	-0,0020
69	-0,1066	-0,1000	-0,1920	-3,8350
70	-0,2457	-0,1000	-0,1920	-0,0020
71	-0,1828	-0,1000	-0,1920	-1,1014
72	-0,3143	-0,1000	-0,1920	-0,0020
73	-0,1306	-0,1000	-0,1920	-2,3606
74	-0,4851	-0,1000	-0,1920	-0,7563
75	-0,2963	-0,1000	-0,1920	-0,0020
76	-0,4236	-0,1000	-0,1920	-0,0020
77	-0,2941	-0,1000	-0,1920	-0,0020
78	-0,4642	-0,1000	-0,1920	-4,0674
79	-0,2971	-0,1000	-0,1920	-2,2071
80	-0,2220	-0,1000	-0,1920	-0,0020
81	-0,4038	-0,1000	-0,1920	-0,0020
82	-0,2340	-0,1000	-0,1920	-0,0020
83	-0,2280	-0,1000	-0,1920	-0,0020
84	-0,4968	-0,1000	-0,1920	-0,2176
85	-1,0365	-0,1000	-1,0744	-0,0020

Fonte: Elaborado pelo autor.

**APÊNDICE O – CONCENTRAÇÕES DE CLORO RESIDUAL OBTIDAS NAS
CALIBRAÇÕES DOS KWS DA REDE SOUSA PARA A HORA 70, UTILIZANDO
DADOS OBSERVADOS DA HORA 52**

(continua)

Trecho	Concentrações obtidas pelas calibrações com quatro observações da hora 52 (mg/L)			
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T
1	1,8969	1,9798	1,9007	1,7620
2	1,7885	1,9554	1,7753	1,7435
3	1,6696	1,9315	1,6683	1,6348
4	1,5262	1,8992	1,5081	1,3579
5	1,4614	1,8590	1,4488	1,0630
6	1,3535	1,8184	1,3914	0,8760
7	1,2601	1,7391	1,2817	0,6363
8	1,0688	1,6548	1,1482	0,5595
9	1,0168	1,5910	1,0548	0,4380
10	0,8831	1,5397	0,9754	0,3352
11	0,7450	1,4652	0,8739	0,3215
12	0,6445	1,3662	0,7561	0,3148
13	0,4933	1,2180	0,6219	0,2147
14	0,6425	1,3810	0,7624	0,4030
15	0,7704	1,4796	0,8750	0,3559
16	0,8755	1,5541	0,9676	0,4992
17	1,0014	1,6138	1,0449	0,7691
18	1,0844	1,6760	1,1252	0,8030
19	1,1321	1,7531	1,2139	0,8564
20	1,2034	1,8126	1,2926	0,8603
21	1,2644	1,8543	1,3474	1,0952
22	1,4118	1,8914	1,4841	1,2595
23	1,5622	1,9231	1,6221	1,4358
24	1,7572	1,9557	1,7864	1,6030
25	1,6204	1,9229	1,6239	1,4194
26	1,4518	1,8845	1,4909	1,3516
27	1,3444	1,8399	1,3524	1,1538
28	1,2503	1,7970	1,2894	0,9160
29	1,1601	1,7477	1,2214	0,7738
30	1,5149	1,8953	1,5019	1,3667
31	1,3699	1,8540	1,3760	1,1430
32	1,2409	1,8054	1,2457	1,0151
33	1,1550	1,7533	1,1927	0,9193
34	1,0797	1,6987	1,1402	0,7248
35	1,3642	1,8590	1,3592	1,1909
36	1,2193	1,8160	1,2453	0,9810
37	1,1579	1,7701	1,1914	0,9347
38	1,1018	1,7164	1,1331	0,9251

Nó	Gabarito	Inicial	RNA-G	(conclusão)
				RNA-T
39	1,0183	1,6552	1,0711	0,7366
40	1,2961	1,8101	1,3130	1,0403
41	1,1956	1,7605	1,2181	0,8831
42	1,0841	1,7070	1,1369	0,7447
43	0,9931	1,6585	1,0681	0,8429
44	0,9340	1,5921	0,9933	0,6643
45	1,2455	1,7602	1,2691	0,9039
46	1,1279	1,7085	1,1878	0,6867
47	1,0271	1,6475	1,0959	0,5223
48	0,9140	1,5889	1,0057	0,6617
49	0,8453	1,5069	0,8995	0,6369

Fonte: Elaborado pelo autor.

Trecho	Concentrações obtidas pelas calibrações com sete observações da hora 52 (mg/L)			
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T
1	1,8969	1,9798	1,8986	1,8692
2	1,7885	1,9554	1,7706	1,7018
3	1,6696	1,9315	1,6618	1,6641
4	1,5262	1,8992	1,4988	1,2919
5	1,4614	1,8590	1,4373	1,0477
6	1,3535	1,8184	1,3781	0,8589
7	1,2601	1,7391	1,2652	0,6059
8	1,0688	1,6548	1,1298	0,5353
9	1,0168	1,5910	1,0349	0,4554
10	0,8831	1,5397	0,9543	0,3421
11	0,7450	1,4652	0,8516	0,2317
12	0,6445	1,3662	0,7329	0,1777
13	0,4933	1,2180	0,5996	0,1320
14	0,6425	1,3810	0,7396	0,2585
15	0,7704	1,4796	0,8532	0,2830
16	0,8755	1,5541	0,9472	0,4136
17	1,0014	1,6138	1,0258	0,6008
18	1,0844	1,6760	1,1078	0,7221
19	1,1321	1,7531	1,1990	0,9616
20	1,2034	1,8126	1,2802	1,2952
21	1,2644	1,8543	1,3367	1,5079
22	1,4118	1,8914	1,4748	1,6483
23	1,5622	1,9231	1,6149	1,6545
24	1,7572	1,9557	1,7822	1,6608
25	1,6204	1,9229	1,6168	1,4344
26	1,4518	1,8845	1,4815	1,3937
27	1,3444	1,8399	1,3412	1,2105
28	1,2503	1,7970	1,2763	1,1914
29	1,1601	1,7477	1,2065	0,9353
30	1,5149	1,8953	1,4928	1,4294

Nó	Gabarito	Inicial	RNA-G	(conclusão)
				RNA-T
31	1,3699	1,8540	1,3650	1,3453
32	1,2409	1,8054	1,2332	1,1004
33	1,1550	1,7533	1,1782	1,0232
34	1,0797	1,6987	1,1235	0,8881
35	1,3642	1,8590	1,3483	1,2128
36	1,2193	1,8160	1,2329	1,0369
37	1,1579	1,7701	1,1773	0,9243
38	1,1018	1,7164	1,1172	0,7466
39	1,0183	1,6552	1,0531	0,6232
40	1,2961	1,8101	1,2999	0,9334
41	1,1956	1,7605	1,2033	0,8600
42	1,0841	1,7070	1,1205	0,7209
43	0,9931	1,6585	1,0502	0,6147
44	0,9340	1,5921	0,9736	0,4220
45	1,2455	1,7602	1,2541	0,7528
46	1,1279	1,7085	1,1711	0,5885
47	1,0271	1,6475	1,0775	0,4826
48	0,9140	1,5889	0,9858	0,4196
49	0,8453	1,5069	0,8781	0,3924

Fonte: Elaborado pelo autor.

(continua)

Trecho	Concentrações obtidas pelas calibrações com 13 observações da hora 52 (mg/L)			
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T
1	1,8969	1,9798	1,9014	1,8020
2	1,7885	1,9554	1,7769	1,6355
3	1,6696	1,9315	1,6706	1,4890
4	1,5262	1,8992	1,5114	1,4004
5	1,4614	1,8590	1,4837	1,3559
6	1,3535	1,8184	1,4555	1,3504
7	1,2601	1,7391	1,4005	0,9706
8	1,0688	1,6548	1,3007	0,7218
9	1,0168	1,5910	1,2359	0,6626
10	0,8831	1,5397	1,1749	0,4368
11	0,7450	1,4652	1,0997	0,2953
12	0,6445	1,3662	1,0099	0,1849
13	0,4933	1,2180	0,8979	0,0973
14	0,6425	1,3810	1,0059	0,1611
15	0,7704	1,4796	1,0878	0,2505
16	0,8755	1,5541	1,1520	0,4089
17	1,0014	1,6138	1,2015	0,5139
18	1,0844	1,6760	1,2476	0,7341
19	1,1321	1,7531	1,2872	0,7398
20	1,2034	1,8126	1,3247	1,0102
21	1,2644	1,8543	1,3512	1,2400
22	1,4118	1,8914	1,4873	1,4169

Nó	Gabarito	Inicial	RNA-G	(conclusão)
				RNA-T
23	1,5622	1,9231	1,6246	1,6049
24	1,7572	1,9557	1,7879	1,6109
25	1,6204	1,9229	1,6264	1,3668
26	1,4518	1,8845	1,5033	1,1587
27	1,3444	1,8399	1,3730	1,0522
28	1,2503	1,7970	1,3382	1,0165
29	1,1601	1,7477	1,3003	0,8954
30	1,5149	1,8953	1,5051	1,2608
31	1,3699	1,8540	1,3905	1,0243
32	1,2409	1,8054	1,2708	0,8815
33	1,1550	1,7533	1,2555	0,7873
34	1,0797	1,6987	1,2455	0,6669
35	1,3642	1,8590	1,3630	1,2240
36	1,2193	1,8160	1,2610	1,1107
37	1,1579	1,7701	1,2383	0,8078
38	1,1018	1,7164	1,2151	0,5988
39	1,0183	1,6552	1,1970	0,4576
40	1,2961	1,8101	1,3570	1,0441
41	1,1956	1,7605	1,2848	0,8579
42	1,0841	1,7070	1,2301	0,6528
43	0,9931	1,6585	1,1885	0,4848
44	0,9340	1,5921	1,1526	0,3318
45	1,2455	1,7602	1,3523	1,0086
46	1,1279	1,7085	1,2985	0,7804
47	1,0271	1,6475	1,2345	0,5564
48	0,9140	1,5889	1,1716	0,3746
49	0,8453	1,5069	1,1006	0,2336

Fonte: Elaborado pelo autor.

(continua)

Trecho	Concentrações obtidas pelas calibrações com 25 observações da hora 52 (mg/L)			
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T
1	1,8969	1,9798	1,8946	1,9928
2	1,7885	1,9554	1,7616	1,7936
3	1,6696	1,9315	1,6493	1,7870
4	1,5262	1,8992	1,4808	1,4838
5	1,4614	1,8590	1,4273	1,2214
6	1,3535	1,8184	1,3752	1,2165
7	1,2601	1,7391	1,2751	1,2090
8	1,0688	1,6548	1,1458	1,0744
9	1,0168	1,5910	1,0566	0,9090
10	0,8831	1,5397	0,9794	0,8678
11	0,7450	1,4652	0,8809	0,6646
12	0,6445	1,3662	0,7660	0,5127
13	0,4933	1,2180	0,6354	0,5971
14	0,6425	1,3810	0,7712	0,7146

Nó	Gabarito	Inicial	RNA-G	(conclusão)
				RNA-T
15	0,7704	1,4796	0,8805	0,8176
16	0,8755	1,5541	0,9694	0,7957
17	1,0014	1,6138	1,0422	0,8205
18	1,0844	1,6760	1,1166	0,8335
19	1,1321	1,7531	1,1960	1,1097
20	1,2034	1,8126	1,2670	1,1148
21	1,2644	1,8543	1,3163	1,2166
22	1,4118	1,8914	1,4571	1,4601
23	1,5622	1,9231	1,6010	1,6121
24	1,7572	1,9557	1,7741	1,9855
25	1,6204	1,9229	1,6030	1,6093
26	1,4518	1,8845	1,4668	1,3823
27	1,3444	1,8399	1,3259	1,3864
28	1,2503	1,7970	1,2679	1,2621
29	1,1601	1,7477	1,2052	1,1354
30	1,5149	1,8953	1,4755	1,5809
31	1,3699	1,8540	1,3480	1,4663
32	1,2409	1,8054	1,2171	1,2874
33	1,1550	1,7533	1,1719	1,2222
34	1,0797	1,6987	1,1281	1,1738
35	1,3642	1,8590	1,3275	1,4649
36	1,2193	1,8160	1,2137	1,2686
37	1,1579	1,7701	1,1663	1,1475
38	1,1018	1,7164	1,1151	1,1686
39	1,0183	1,6552	1,0621	1,1661
40	1,2961	1,8101	1,2899	1,0696
41	1,1956	1,7605	1,1980	0,8308
42	1,0841	1,7070	1,1213	0,9538
43	0,9931	1,6585	1,0575	0,9505
44	0,9340	1,5921	0,9900	0,9591
45	1,2455	1,7602	1,2541	1,0228
46	1,1279	1,7085	1,1772	0,9027
47	1,0271	1,6475	1,0896	0,8468
48	0,9140	1,5889	1,0038	0,8205
49	0,8453	1,5069	0,9030	0,8850

Fonte: Elaborado pelo autor.

**APÊNDICE P – KWS CALCULADOS PARA A REDE SOUSA, NAS CALIBRAÇÕES
QUE EMPREGARAM DADOS OBSERVADOS DAS HORAS 52 E 60**

(continua)

Trecho	Kws calculados pelas calibrações com oito observações das horas 52 e 60 (m/dia)			
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T
1	-0,7888	-0,1000	-1,0290	-1,3236
2	-1,1582	-0,1000	-1,0290	-4,7948
3	-0,8267	-0,1000	-1,0290	-4,3332
4	-0,2336	-0,1000	-0,3115	-2,7020
5	-0,4899	-0,1000	-0,3115	-0,8771
6	-0,1791	-0,1000	-0,3115	-3,1336
7	-0,4001	-0,1000	-0,3115	-1,8231
8	-0,1064	-0,1000	-0,3115	-1,2841
9	-0,4381	-0,1000	-0,3115	-0,0020
10	-0,3794	-0,1000	-0,3115	-5,6298
11	-0,1952	-0,1000	-0,3115	-0,0020
12	-0,3890	-0,1000	-0,3115	-3,8066
13	-0,3235	-0,1000	-0,3115	-0,3666
14	-0,4447	-0,1000	-0,3115	-0,0020
15	-0,4564	-0,1000	-0,3115	-7,7176
16	-0,4756	-0,1000	-0,3115	-6,3892
17	-0,3194	-0,1000	-0,3115	-0,1782
18	-0,1017	-0,1000	-0,3115	-0,1189
19	-0,2056	-0,1000	-0,3115	-1,9627
20	-0,2656	-0,1000	-0,3115	-0,1503
21	-1,2665	-0,1000	-1,0290	-3,4158
22	-1,2218	-0,1000	-1,0290	-0,0020
23	-1,3379	-0,1000	-1,0290	-0,0020
24	-1,4085	-0,1000	-1,0290	-0,5244
25	-1,0476	-0,1000	-1,0290	-1,5018
26	-1,4400	-0,1000	-1,0290	-4,8109
27	-0,5254	-0,1000	-1,0290	-0,3970
28	-0,3769	-0,1000	-0,3115	-1,1599
29	-0,2476	-0,1000	-0,3115	-3,7906
30	-0,1813	-0,1000	-0,3115	-0,1047
31	-0,5733	-0,1000	-1,0290	-2,7763
32	-0,9426	-0,1000	-1,0290	-3,5976
33	-0,7878	-0,1000	-1,0290	-4,1126
34	-0,2659	-0,1000	-0,3115	-0,3518
35	-0,3205	-0,1000	-0,3115	-3,2707
36	-0,1013	-0,1000	-0,3115	-2,5917
37	-0,5464	-0,1000	-1,0290	-0,6419
38	-1,3203	-0,1000	-1,0290	-1,0350
39	-0,4433	-0,1000	-0,3115	-0,0020
40	-0,1435	-0,1000	-0,3115	-4,2455
41	-0,1361	-0,1000	-0,3115	-0,1200
42	-0,3467	-0,1000	-0,3115	-1,7000

Trecho	Gabarito	Inicial	RNA-G	(conclusão)
				RNA-T
43	-0,3706	-0,1000	-0,3115	-2,0328
44	-0,2737	-0,1000	-0,3115	-1,6841
45	-0,4184	-0,1000	-0,3115	-0,0020
46	-0,3198	-0,1000	-0,3115	-0,0020
47	-0,2008	-0,1000	-0,3115	-4,9210
48	-0,1512	-0,1000	-0,3115	-5,3509
49	-0,2944	-0,1000	-0,3115	-3,0543
50	-0,3729	-0,1000	-0,3115	-1,5897
51	-0,3571	-0,1000	-0,3115	-0,0020
52	-0,3405	-0,1000	-0,3115	-0,0020
53	-0,1150	-0,1000	-0,3115	-0,0020
54	-0,2502	-0,1000	-0,3115	-1,1515
55	-0,8290	-0,1000	-1,0290	-2,2981
56	-1,1539	-0,1000	-1,0290	-2,7175
57	-1,4088	-0,1000	-1,0290	-0,0020
58	-0,2973	-0,1000	-0,3115	-1,6057
59	-0,1676	-0,1000	-0,3115	-0,0020
60	-0,3785	-0,1000	-0,3115	-4,2109
61	-0,2502	-0,1000	-0,3115	-3,7084
62	-0,4190	-0,1000	-0,3115	-3,1424
63	-0,4384	-0,1000	-0,3115	-2,1392
64	-0,1709	-0,1000	-0,3115	-2,8713
65	-0,4377	-0,1000	-0,3115	-1,0385
66	-0,1942	-0,1000	-0,3115	-0,3504
67	-0,2670	-0,1000	-0,3115	-4,3162
68	-0,3742	-0,1000	-0,3115	-0,0020
69	-0,1066	-0,1000	-0,3115	-0,0020
70	-0,2457	-0,1000	-0,3115	-1,3566
71	-0,1828	-0,1000	-0,3115	-2,6559
72	-0,3143	-0,1000	-0,3115	-2,6965
73	-0,1306	-0,1000	-0,3115	-3,8493
74	-0,4851	-0,1000	-0,3115	-0,0020
75	-0,2963	-0,1000	-0,3115	-4,0483
76	-0,4236	-0,1000	-0,3115	-0,7185
77	-0,2941	-0,1000	-0,3115	-0,3069
78	-0,4642	-0,1000	-0,3115	-6,1451
79	-0,2971	-0,1000	-0,3115	-0,5248
80	-0,2220	-0,1000	-0,3115	-4,4824
81	-0,4038	-0,1000	-0,3115	-3,8287
82	-0,2340	-0,1000	-0,3115	-0,0020
83	-0,2280	-0,1000	-0,3115	-0,0020
84	-0,4968	-0,1000	-0,3115	-4,6414
85	-1,0365	-0,1000	-1,0290	-3,1537

Fonte: Elaborado pelo autor.

(continua)

Trecho	Kws calculados pelas calibrações com 14 observações das horas 52 e 60 (m/dia)			
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T
1	-0,7888	-0,1000	-1,0856	-0,0020
2	-1,1582	-0,1000	-1,0856	-0,0020
3	-0,8267	-0,1000	-1,0856	-0,6507
4	-0,2336	-0,1000	-0,3241	-0,0346
5	-0,4899	-0,1000	-0,3241	-0,3458
6	-0,1791	-0,1000	-0,3241	-0,0020
7	-0,4001	-0,1000	-0,3241	-0,4414
8	-0,1064	-0,1000	-0,3241	-0,0020
9	-0,4381	-0,1000	-0,3241	-2,8395
10	-0,3794	-0,1000	-0,3241	-1,8661
11	-0,1952	-0,1000	-0,3241	-5,8091
12	-0,3890	-0,1000	-0,3241	-0,5386
13	-0,3235	-0,1000	-0,3241	-3,9621
14	-0,4447	-0,1000	-0,3241	-0,0020
15	-0,4564	-0,1000	-0,3241	-1,6134
16	-0,4756	-0,1000	-0,3241	-3,8035
17	-0,3194	-0,1000	-0,3241	-3,9744
18	-0,1017	-0,1000	-0,3241	-6,2444
19	-0,2056	-0,1000	-0,3241	-0,0020
20	-0,2656	-0,1000	-0,3241	-5,8987
21	-1,2665	-0,1000	-1,0856	-0,0020
22	-1,2218	-0,1000	-1,0856	-0,0020
23	-1,3379	-0,1000	-1,0856	-0,0020
24	-1,4085	-0,1000	-1,0856	-5,7845
25	-1,0476	-0,1000	-1,0856	-6,1683
26	-1,4400	-0,1000	-1,0856	-5,4452
27	-0,5254	-0,1000	-1,0856	-0,8133
28	-0,3769	-0,1000	-0,3241	-0,6223
29	-0,2476	-0,1000	-0,3241	-0,0020
30	-0,1813	-0,1000	-0,3241	-0,8667
31	-0,5733	-0,1000	-1,0856	-2,4591
32	-0,9426	-0,1000	-1,0856	-0,0020
33	-0,7878	-0,1000	-1,0856	-1,1348
34	-0,2659	-0,1000	-0,3241	-0,0020
35	-0,3205	-0,1000	-0,3241	-0,6203
36	-0,1013	-0,1000	-0,3241	-0,7006
37	-0,5464	-0,1000	-1,0856	-0,0020
38	-1,3203	-0,1000	-1,0856	-0,0020
39	-0,4433	-0,1000	-0,3241	-0,0020
40	-0,1435	-0,1000	-0,3241	-4,8941
41	-0,1361	-0,1000	-0,3241	-1,3364
42	-0,3467	-0,1000	-0,3241	-1,1512
43	-0,3706	-0,1000	-0,3241	-2,2068
44	-0,2737	-0,1000	-0,3241	-1,0406
45	-0,4184	-0,1000	-0,3241	-3,7944
46	-0,3198	-0,1000	-0,3241	-0,0020

Trecho	Gabarito	Inicial	RNA-G	(conclusão)
				RNA-T
47	-0,2008	-0,1000	-0,3241	-0,0020
48	-0,1512	-0,1000	-0,3241	-1,1552
49	-0,2944	-0,1000	-0,3241	-0,0020
50	-0,3729	-0,1000	-0,3241	-0,0020
51	-0,3571	-0,1000	-0,3241	-0,0020
52	-0,3405	-0,1000	-0,3241	-0,0020
53	-0,1150	-0,1000	-0,3241	-0,0020
54	-0,2502	-0,1000	-0,3241	-0,0020
55	-0,8290	-0,1000	-1,0856	-3,2373
56	-1,1539	-0,1000	-1,0856	-0,0020
57	-1,4088	-0,1000	-1,0856	-0,8177
58	-0,2973	-0,1000	-0,3241	-0,0020
59	-0,1676	-0,1000	-0,3241	-0,0020
60	-0,3785	-0,1000	-0,3241	-0,0020
61	-0,2502	-0,1000	-0,3241	-5,9731
62	-0,4190	-0,1000	-0,3241	-3,9552
63	-0,4384	-0,1000	-0,3241	-2,7973
64	-0,1709	-0,1000	-0,3241	-0,6332
65	-0,4377	-0,1000	-0,3241	-0,0020
66	-0,1942	-0,1000	-0,3241	-0,0020
67	-0,2670	-0,1000	-0,3241	-1,0627
68	-0,3742	-0,1000	-0,3241	-0,0020
69	-0,1066	-0,1000	-0,3241	-2,7194
70	-0,2457	-0,1000	-0,3241	-0,0020
71	-0,1828	-0,1000	-0,3241	-1,7490
72	-0,3143	-0,1000	-0,3241	-5,9560
73	-0,1306	-0,1000	-0,3241	-0,4713
74	-0,4851	-0,1000	-0,3241	-0,4135
75	-0,2963	-0,1000	-0,3241	-0,7227
76	-0,4236	-0,1000	-0,3241	-0,3106
77	-0,2941	-0,1000	-0,3241	-0,0020
78	-0,4642	-0,1000	-0,3241	-4,5054
79	-0,2971	-0,1000	-0,3241	-0,5673
80	-0,2220	-0,1000	-0,3241	-0,0020
81	-0,4038	-0,1000	-0,3241	-0,0020
82	-0,2340	-0,1000	-0,3241	-0,3178
83	-0,2280	-0,1000	-0,3241	-0,0020
84	-0,4968	-0,1000	-0,3241	-4,6273
85	-1,0365	-0,1000	-1,0856	-1,3242

Fonte: Elaborado pelo autor.

(continua)

Trecho	Kws calculados pelas calibrações com 26 observações das horas 52 e 60 (m/dia)			
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T
1	-0,7888	-0,1000	-1,0874	-0,7668
2	-1,1582	-0,1000	-1,0874	-0,0020
3	-0,8267	-0,1000	-1,0874	-1,1678
4	-0,2336	-0,1000	-0,1887	-0,0020
5	-0,4899	-0,1000	-0,1887	-0,0020
6	-0,1791	-0,1000	-0,1887	-0,0020
7	-0,4001	-0,1000	-0,1887	-0,0020
8	-0,1064	-0,1000	-0,1887	-0,6925
9	-0,4381	-0,1000	-0,1887	-0,2584
10	-0,3794	-0,1000	-0,1887	-1,9639
11	-0,1952	-0,1000	-0,1887	-0,0020
12	-0,3890	-0,1000	-0,1887	-7,8361
13	-0,3235	-0,1000	-0,1887	-4,6328
14	-0,4447	-0,1000	-0,1887	-0,0020
15	-0,4564	-0,1000	-0,1887	-2,4002
16	-0,4756	-0,1000	-0,1887	-0,0020
17	-0,3194	-0,1000	-0,1887	-5,7591
18	-0,1017	-0,1000	-0,1887	-1,9008
19	-0,2056	-0,1000	-0,1887	-0,0020
20	-0,2656	-0,1000	-0,1887	-9,5395
21	-1,2665	-0,1000	-1,0874	-4,5051
22	-1,2218	-0,1000	-1,0874	-1,1667
23	-1,3379	-0,1000	-1,0874	-9,4038
24	-1,4085	-0,1000	-1,0874	-6,3766
25	-1,0476	-0,1000	-1,0874	-4,8381
26	-1,4400	-0,1000	-1,0874	-0,0020
27	-0,5254	-0,1000	-1,0874	-0,8107
28	-0,3769	-0,1000	-0,1887	-0,0020
29	-0,2476	-0,1000	-0,1887	-0,0020
30	-0,1813	-0,1000	-0,1887	-1,7548
31	-0,5733	-0,1000	-1,0874	-1,7032
32	-0,9426	-0,1000	-1,0874	-1,1056
33	-0,7878	-0,1000	-1,0874	-9,2910
34	-0,2659	-0,1000	-0,1887	-3,3351
35	-0,3205	-0,1000	-0,1887	-0,0020
36	-0,1013	-0,1000	-0,1887	-2,0331
37	-0,5464	-0,1000	-1,0874	-0,0020
38	-1,3203	-0,1000	-1,0874	-0,0020
39	-0,4433	-0,1000	-0,1887	-0,0020
40	-0,1435	-0,1000	-0,1887	-0,0020
41	-0,1361	-0,1000	-0,1887	-0,0020
42	-0,3467	-0,1000	-0,1887	-1,6107
43	-0,3706	-0,1000	-0,1887	-0,0020
44	-0,2737	-0,1000	-0,1887	-0,5332
45	-0,4184	-0,1000	-0,1887	-0,0020
46	-0,3198	-0,1000	-0,1887	-0,0020

Trecho	Gabarito	Inicial	RNA-G	(conclusão)
				RNA-T
47	-0,2008	-0,1000	-0,1887	-0,0020
48	-0,1512	-0,1000	-0,1887	-2,1365
49	-0,2944	-0,1000	-0,1887	-3,7392
50	-0,3729	-0,1000	-0,1887	-0,0020
51	-0,3571	-0,1000	-0,1887	-4,1123
52	-0,3405	-0,1000	-0,1887	-3,4869
53	-0,1150	-0,1000	-0,1887	-0,0020
54	-0,2502	-0,1000	-0,1887	-2,3446
55	-0,8290	-0,1000	-1,0874	-0,0020
56	-1,1539	-0,1000	-1,0874	-0,5383
57	-1,4088	-0,1000	-1,0874	-0,0020
58	-0,2973	-0,1000	-0,1887	-3,0894
59	-0,1676	-0,1000	-0,1887	-8,5988
60	-0,3785	-0,1000	-0,1887	-2,0780
61	-0,2502	-0,1000	-0,1887	-3,0230
62	-0,4190	-0,1000	-0,1887	-1,5444
63	-0,4384	-0,1000	-0,1887	-0,0020
64	-0,1709	-0,1000	-0,1887	-0,0020
65	-0,4377	-0,1000	-0,1887	-0,0020
66	-0,1942	-0,1000	-0,1887	-1,6571
67	-0,2670	-0,1000	-0,1887	-3,8296
68	-0,3742	-0,1000	-0,1887	-7,8435
69	-0,1066	-0,1000	-0,1887	-2,8809
70	-0,2457	-0,1000	-0,1887	-0,0020
71	-0,1828	-0,1000	-0,1887	-0,0020
72	-0,3143	-0,1000	-0,1887	-4,0982
73	-0,1306	-0,1000	-0,1887	-2,4596
74	-0,4851	-0,1000	-0,1887	-3,3601
75	-0,2963	-0,1000	-0,1887	-0,0020
76	-0,4236	-0,1000	-0,1887	-0,0020
77	-0,2941	-0,1000	-0,1887	-0,0020
78	-0,4642	-0,1000	-0,1887	-0,0020
79	-0,2971	-0,1000	-0,1887	-0,0020
80	-0,2220	-0,1000	-0,1887	-4,0655
81	-0,4038	-0,1000	-0,1887	-2,0306
82	-0,2340	-0,1000	-0,1887	-0,0020
83	-0,2280	-0,1000	-0,1887	-0,0020
84	-0,4968	-0,1000	-0,1887	-6,2654
85	-1,0365	-0,1000	-1,0874	-0,0020

Fonte: Elaborado pelo autor.

(continua)

Trecho	Kws calculados pelas calibrações com 50 observações das horas 52 e 60 (m/dia)			
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T
1	-0,7888	-0,1000	-0,9953	-1,5659
2	-1,1582	-0,1000	-0,9953	-0,0020
3	-0,8267	-0,1000	-0,9953	-0,0020
4	-0,2336	-0,1000	-0,1674	-0,0020
5	-0,4899	-0,1000	-0,1674	-0,0020
6	-0,1791	-0,1000	-0,1674	-0,1957
7	-0,4001	-0,1000	-0,1674	-4,6472
8	-0,1064	-0,1000	-0,1674	-0,6996
9	-0,4381	-0,1000	-0,1674	-1,8941
10	-0,3794	-0,1000	-0,1674	-4,7987
11	-0,1952	-0,1000	-0,1674	-3,5185
12	-0,3890	-0,1000	-0,1674	-4,4916
13	-0,3235	-0,1000	-0,1674	-2,8294
14	-0,4447	-0,1000	-0,1674	-3,5984
15	-0,4564	-0,1000	-0,1674	-0,0020
16	-0,4756	-0,1000	-0,1674	-4,7652
17	-0,3194	-0,1000	-0,1674	-0,0020
18	-0,1017	-0,1000	-0,1674	-1,0552
19	-0,2056	-0,1000	-0,1674	-1,5211
20	-0,2656	-0,1000	-0,1674	-2,0384
21	-1,2665	-0,1000	-0,9953	-0,0020
22	-1,2218	-0,1000	-0,9953	-0,0020
23	-1,3379	-0,1000	-0,9953	-0,0020
24	-1,4085	-0,1000	-0,9953	-9,1706
25	-1,0476	-0,1000	-0,9953	-5,6152
26	-1,4400	-0,1000	-0,9953	-0,0020
27	-0,5254	-0,1000	-0,9953	-3,6068
28	-0,3769	-0,1000	-0,1674	-0,0020
29	-0,2476	-0,1000	-0,1674	-4,0172
30	-0,1813	-0,1000	-0,1674	-3,3718
31	-0,5733	-0,1000	-0,9953	-1,6419
32	-0,9426	-0,1000	-0,9953	-2,1988
33	-0,7878	-0,1000	-0,9953	-2,5722
34	-0,2659	-0,1000	-0,1674	-0,0020
35	-0,3205	-0,1000	-0,1674	-1,8983
36	-0,1013	-0,1000	-0,1674	-0,0020
37	-0,5464	-0,1000	-0,9953	-7,1542
38	-1,3203	-0,1000	-0,9953	-2,5177
39	-0,4433	-0,1000	-0,1674	-4,5767
40	-0,1435	-0,1000	-0,1674	-4,2138
41	-0,1361	-0,1000	-0,1674	-0,4575
42	-0,3467	-0,1000	-0,1674	-0,0020
43	-0,3706	-0,1000	-0,1674	-5,9093
44	-0,2737	-0,1000	-0,1674	-5,8210
45	-0,4184	-0,1000	-0,1674	-0,0020
46	-0,3198	-0,1000	-0,1674	-2,7430

Trecho	Gabarito	Inicial	RNA-G	(conclusão)
				RNA-T
47	-0,2008	-0,1000	-0,1674	-6,9051
48	-0,1512	-0,1000	-0,1674	-3,3964
49	-0,2944	-0,1000	-0,1674	-2,6676
50	-0,3729	-0,1000	-0,1674	-1,7841
51	-0,3571	-0,1000	-0,1674	-0,0020
52	-0,3405	-0,1000	-0,1674	-9,2778
53	-0,1150	-0,1000	-0,1674	-7,2005
54	-0,2502	-0,1000	-0,1674	-6,3126
55	-0,8290	-0,1000	-0,9953	-5,8321
56	-1,1539	-0,1000	-0,9953	-0,0020
57	-1,4088	-0,1000	-0,9953	-0,0020
58	-0,2973	-0,1000	-0,1674	-0,3576
59	-0,1676	-0,1000	-0,1674	-0,0020
60	-0,3785	-0,1000	-0,1674	-0,0020
61	-0,2502	-0,1000	-0,1674	-0,7633
62	-0,4190	-0,1000	-0,1674	-2,9024
63	-0,4384	-0,1000	-0,1674	-1,7482
64	-0,1709	-0,1000	-0,1674	-2,7299
65	-0,4377	-0,1000	-0,1674	-0,0020
66	-0,1942	-0,1000	-0,1674	-0,0020
67	-0,2670	-0,1000	-0,1674	-5,6252
68	-0,3742	-0,1000	-0,1674	-3,7708
69	-0,1066	-0,1000	-0,1674	-2,0928
70	-0,2457	-0,1000	-0,1674	-3,0989
71	-0,1828	-0,1000	-0,1674	-7,8458
72	-0,3143	-0,1000	-0,1674	-1,2466
73	-0,1306	-0,1000	-0,1674	-0,0020
74	-0,4851	-0,1000	-0,1674	-3,6761
75	-0,2963	-0,1000	-0,1674	-0,1223
76	-0,4236	-0,1000	-0,1674	-0,0020
77	-0,2941	-0,1000	-0,1674	-0,0020
78	-0,4642	-0,1000	-0,1674	-6,3471
79	-0,2971	-0,1000	-0,1674	-1,6108
80	-0,2220	-0,1000	-0,1674	-0,0020
81	-0,4038	-0,1000	-0,1674	-1,5780
82	-0,2340	-0,1000	-0,1674	-3,2954
83	-0,2280	-0,1000	-0,1674	-0,0020
84	-0,4968	-0,1000	-0,1674	-9,2929
85	-1,0365	-0,1000	-0,9953	-0,0020

Fonte: Elaborado pelo autor.

**APÊNDICE Q – CONCENTRAÇÕES DE CLORO RESIDUAL OBTIDAS NAS
CALIBRAÇÕES DOS KWS DA REDE SOUSA PARA A HORA 70, UTILIZANDO
DADOS OBSERVADOS DAS HORAS 52 E 60**

(continua)

Trecho	Concentrações obtidas pelas calibrações com oito observações das horas 52 e 60 (mg/L)			
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T
1	1,8969	1,9798	1,8973	1,8187
2	1,7885	1,9554	1,7678	1,6735
3	1,6696	1,9315	1,6579	1,4774
4	1,5262	1,8992	1,4932	1,1821
5	1,4614	1,8590	1,4127	0,9157
6	1,3535	1,8184	1,3378	0,8175
7	1,2601	1,7391	1,1982	0,5649
8	1,0688	1,6548	1,0508	0,5035
9	1,0168	1,5910	0,9443	0,4858
10	0,8831	1,5397	0,8569	0,4531
11	0,7450	1,4652	0,7463	0,3108
12	0,6445	1,3662	0,6228	0,2924
13	0,4933	1,2180	0,4925	0,1889
14	0,6425	1,3810	0,6318	0,2940
15	0,7704	1,4796	0,7515	0,2920
16	0,8755	1,5541	0,8542	0,4508
17	1,0014	1,6138	0,9435	0,7199
18	1,0844	1,6760	1,0406	0,9434
19	1,1321	1,7531	1,1546	1,0785
20	1,2034	1,8126	1,2580	1,4324
21	1,2644	1,8543	1,3304	1,4782
22	1,4118	1,8914	1,4693	1,7324
23	1,5622	1,9231	1,6105	1,7389
24	1,7572	1,9557	1,7797	1,7454
25	1,6204	1,9229	1,6125	1,4948
26	1,4518	1,8845	1,4711	1,2540
27	1,3444	1,8399	1,3262	1,1798
28	1,2503	1,7970	1,2455	1,0279
29	1,1601	1,7477	1,1603	0,9277
30	1,5149	1,8953	1,4874	1,2727
31	1,3699	1,8540	1,3529	1,0527
32	1,2409	1,8054	1,2152	0,9456
33	1,1550	1,7533	1,1404	0,9205
34	1,0797	1,6987	1,0635	0,6368
35	1,3642	1,8590	1,3418	1,2067
36	1,2193	1,8160	1,2196	1,0283
37	1,1579	1,7701	1,1468	0,9989
38	1,1018	1,7164	1,0689	0,7363

Nó	Gabarito	Inicial	RNA-G	(conclusão)
				RNA-T
39	1,0183	1,6552	0,9832	0,5817
40	1,2961	1,8101	1,2711	0,9392
41	1,1956	1,7605	1,1626	0,7579
42	1,0841	1,7070	1,0669	0,7687
43	0,9931	1,6585	0,9830	0,6893
44	0,9340	1,5921	0,8895	0,5250
45	1,2455	1,7602	1,2055	0,8400
46	1,1279	1,7085	1,1089	0,6786
47	1,0271	1,6475	1,0032	0,6287
48	0,9140	1,5889	0,8995	0,6216
49	0,8453	1,5069	0,7793	0,5554

Fonte: Elaborado pelo autor.

(continua)

Trecho	Concentrações obtidas pelas calibrações com 14 observações das horas 52 e 60 (mg/L)			
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T
	1	1,8969	1,9798	1,8939
2	1,7885	1,9554	1,7601	1,8737
3	1,6696	1,9315	1,6473	1,8668
4	1,5262	1,8992	1,4778	1,7315
5	1,4614	1,8590	1,3956	1,7146
6	1,3535	1,8184	1,3193	1,6162
7	1,2601	1,7391	1,1777	1,6063
8	1,0688	1,6548	1,0293	1,4223
9	1,0168	1,5910	0,9221	1,4114
10	0,8831	1,5397	0,8341	0,8547
11	0,7450	1,4652	0,7232	0,6329
12	0,6445	1,3662	0,6000	0,4493
13	0,4933	1,2180	0,4720	0,3198
14	0,6425	1,3810	0,6091	0,5589
15	0,7704	1,4796	0,7286	0,4475
16	0,8755	1,5541	0,8316	0,5386
17	1,0014	1,6138	0,9214	0,6940
18	1,0844	1,6760	1,0193	0,8732
19	1,1321	1,7531	1,1344	1,2707
20	1,2034	1,8126	1,2394	1,2765
21	1,2644	1,8543	1,3130	1,6317
22	1,4118	1,8914	1,4542	1,6392
23	1,5622	1,9231	1,5987	1,6453
24	1,7572	1,9557	1,7728	1,6515
25	1,6204	1,9229	1,6008	1,4582
26	1,4518	1,8845	1,4563	1,2063
27	1,3444	1,8399	1,3089	1,1248
28	1,2503	1,7970	1,2268	1,1224
29	1,1601	1,7477	1,1404	1,1079
30	1,5149	1,8953	1,4726	1,5310

Nó	Gabarito	Inicial	RNA-G	(conclusão)
				RNA-T
31	1,3699	1,8540	1,3356	1,4011
32	1,2409	1,8054	1,1962	1,2276
33	1,1550	1,7533	1,1203	1,1644
34	1,0797	1,6987	1,0422	1,0605
35	1,3642	1,8590	1,3241	1,5081
36	1,2193	1,8160	1,2002	1,3987
37	1,1579	1,7701	1,1265	1,2373
38	1,1018	1,7164	1,0478	0,9819
39	1,0183	1,6552	0,9611	0,9155
40	1,2961	1,8101	1,2521	1,4671
41	1,1956	1,7605	1,1422	1,2470
42	1,0841	1,7070	1,0455	1,0784
43	0,9931	1,6585	0,9608	0,9792
44	0,9340	1,5921	0,8667	0,8946
45	1,2455	1,7602	1,1855	1,5067
46	1,1279	1,7085	1,0878	1,4223
47	1,0271	1,6475	0,9813	1,1957
48	0,9140	1,5889	0,8767	1,0899
49	0,8453	1,5069	0,7562	0,9705

Fonte: Elaborado pelo autor.

(continua)

Trecho	Concentrações obtidas pelas calibrações com 26 observações das horas 52 e 60 (mg/L)			
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T
1	1,8969	1,9798	1,8938	1,9928
2	1,7885	1,9554	1,7598	1,8811
3	1,6696	1,9315	1,6469	1,8742
4	1,5262	1,8992	1,4773	1,6724
5	1,4614	1,8590	1,4248	1,6660
6	1,3535	1,8184	1,3735	1,6592
7	1,2601	1,7391	1,2748	1,6494
8	1,0688	1,6548	1,1461	1,0682
9	1,0168	1,5910	1,0577	0,8472
10	0,8831	1,5397	0,9807	0,7288
11	0,7450	1,4652	0,8828	0,6637
12	0,6445	1,3662	0,7684	0,6231
13	0,4933	1,2180	0,6382	0,3044
14	0,6425	1,3810	0,7734	0,4718
15	0,7704	1,4796	0,8821	0,4540
16	0,8755	1,5541	0,9705	0,5465
17	1,0014	1,6138	1,0426	0,5123
18	1,0844	1,6760	1,1160	0,7195
19	1,1321	1,7531	1,1941	0,7977
20	1,2034	1,8126	1,2639	0,8014

Nó	Gabarito	Inicial	RNA-G	(conclusão)
				RNA-T
21	1,2644	1,8543	1,3125	1,0454
22	1,4118	1,8914	1,4538	1,2385
23	1,5622	1,9231	1,5983	1,3669
24	1,7572	1,9557	1,7725	1,7452
25	1,6204	1,9229	1,6004	1,6787
26	1,4518	1,8845	1,4638	1,5656
27	1,3444	1,8399	1,3226	1,3509
28	1,2503	1,7970	1,2654	1,2058
29	1,1601	1,7477	1,2035	1,0923
30	1,5149	1,8953	1,4722	1,6162
31	1,3699	1,8540	1,3446	1,4203
32	1,2409	1,8054	1,2136	1,1112
33	1,1550	1,7533	1,1696	0,8807
34	1,0797	1,6987	1,1270	0,8108
35	1,3642	1,8590	1,3236	1,6257
36	1,2193	1,8160	1,2098	1,5771
37	1,1579	1,7701	1,1633	1,3319
38	1,1018	1,7164	1,1132	1,1670
39	1,0183	1,6552	1,0615	0,8958
40	1,2961	1,8101	1,2871	1,3344
41	1,1956	1,7605	1,1958	1,3580
42	1,0841	1,7070	1,1197	1,3400
43	0,9931	1,6585	1,0567	1,2365
44	0,9340	1,5921	0,9903	1,0381
45	1,2455	1,7602	1,2525	1,1027
46	1,1279	1,7085	1,1763	1,1727
47	1,0271	1,6475	1,0895	1,0625
48	0,9140	1,5889	1,0043	0,9645
49	0,8453	1,5069	0,9043	0,9919

Fonte: Elaborado pelo autor.

(continua)

Trecho	Concentrações obtidas pelas calibrações com 50 observações das horas 52 e 60 (mg/L)			
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T
1	1,8969	1,9798	1,8995	1,9928
2	1,7885	1,9554	1,7725	1,8175
3	1,6696	1,9315	1,6645	1,8108
4	1,5262	1,8992	1,5026	1,8040
5	1,4614	1,8590	1,4542	1,7971
6	1,3535	1,8184	1,4066	1,7898
7	1,2601	1,7391	1,3145	1,6575
8	1,0688	1,6548	1,1903	1,2707
9	1,0168	1,5910	1,1054	1,0582
10	0,8831	1,5397	1,0311	0,7148

Nó	Gabarito	Inicial	RNA-G	(conclusão)
				RNA-T
11	0,7450	1,4652	0,9365	0,4393
12	0,6445	1,3662	0,8250	0,2737
13	0,4933	1,2180	0,6939	0,1669
14	0,6425	1,3810	0,8288	0,3094
15	0,7704	1,4796	0,9343	0,5200
16	0,8755	1,5541	1,0193	0,6078
17	1,0014	1,6138	1,0884	0,8259
18	1,0844	1,6760	1,1580	0,7847
19	1,1321	1,7531	1,2310	1,1120
20	1,2034	1,8126	1,2960	1,4293
21	1,2644	1,8543	1,3411	1,7084
22	1,4118	1,8914	1,4786	1,7162
23	1,5622	1,9231	1,6178	1,7227
24	1,7572	1,9557	1,7839	1,7291
25	1,6204	1,9229	1,6197	1,4469
26	1,4518	1,8845	1,4888	1,4387
27	1,3444	1,8399	1,3520	1,2083
28	1,2503	1,7970	1,2985	1,3204
29	1,1601	1,7477	1,2403	1,0542
30	1,5149	1,8953	1,4966	1,5212
31	1,3699	1,8540	1,3736	1,2774
32	1,2409	1,8054	1,2461	1,0444
33	1,1550	1,7533	1,2059	1,0059
34	1,0797	1,6987	1,1676	0,9079
35	1,3642	1,8590	1,3528	1,5047
36	1,2193	1,8160	1,2423	1,2338
37	1,1579	1,7701	1,1991	0,9150
38	1,1018	1,7164	1,1525	0,8111
39	1,0183	1,6552	1,1050	0,7174
40	1,2961	1,8101	1,3204	1,4006
41	1,1956	1,7605	1,2327	0,9979
42	1,0841	1,7070	1,1600	0,8544
43	0,9931	1,6585	1,1001	0,7242
44	0,9340	1,5921	1,0375	0,4890
45	1,2455	1,7602	1,2896	1,3937
46	1,1279	1,7085	1,2170	1,1146
47	1,0271	1,6475	1,1336	0,9085
48	0,9140	1,5889	1,0519	0,6458
49	0,8453	1,5069	0,9557	0,4455

Fonte: Elaborado pelo autor.

**APÊNDICE R – RESULTADOS PARA CALIBRAÇÃO DOS KWS DA REDE
HELLER-PÁDUA COM O USO DE ALGORITMOS GENÉTICOS, NO CENÁRIO
COM MAIS DADOS OBSERVADOS**

Trecho	kws da Rede Heller-Pádua calculadas com AG (m/dia)				
	Gabarito	Inicial	AG - Pop 30	AG - Pop 200	AG - Pop 1000
1	-1,5000	-0,1000	-2,6040	-1,0033	-2,5856
2	-1,5000	-0,1000	-0,3153	-2,0578	-0,7892
3	-1,5000	-0,1000	-4,3242	-1,6465	-1,2414
4	-1,5000	-0,1000	-3,0792	-1,5783	-1,3459
5	-1,5000	-0,1000	-1,5691	-0,9548	-4,8913
6	-1,5000	-0,1000	-2,7137	-2,4680	-0,5108
7	-1,5000	-0,1000	-1,5035	-1,4659	-0,5445
8	-1,5000	-0,1000	-4,0894	-5,0000	-3,1575
9	-1,5000	-0,1000	-1,4733	-3,6140	-2,0486
10	-1,5000	-0,1000	-4,8017	-0,6728	-1,4005
11	-1,5000	-0,1000	-2,4344	-2,9213	-2,3525

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nó	Concentrações de cloro da Rede Heller-Pádua calculadas após calibrações com AG (mg/L)				
	Gabarito	Inicial	AG - Pop 30	AG - Pop 200	AG - Pop 1000
1	1,6261	1,9572	1,4834	1,7165	1,4853
2	1,3259	1,9154	1,4004	1,3329	1,3107
3	0,9667	1,7408	0,9779	0,9667	0,9667
4	0,8717	1,7301	0,8658	0,8717	0,8717
5	1,1081	1,8750	1,1645	1,1672	0,9541
6	0,7095	1,6915	0,7020	0,7095	0,7095
7	0,7946	1,8180	0,8345	0,8420	0,8284
8	0,5614	1,6486	0,5600	0,5614	0,5614
9	0,5706	1,7304	0,6009	0,5357	0,5680
10	0,4094	1,5708	0,4097	0,4094	0,4094
11	0,5224	1,6421	0,5249	0,5224	0,5224

Fonte: Elaborado pelo autor.

**APÊNDICE S – RESULTADOS PARA CALIBRAÇÃO DOS KWS DA REDE PORTO
COM O USO DE ALGORITMOS GENÉTICOS, NO CENÁRIO COM MAIS DADOS
OBSERVADOS**

Trecho	kws da Rede Porto calculadas com AG (m/dia)				
	Gabarito	Inicial	AG - Pop 30	AG - Pop 200	AG - Pop 1000
0	-0,4400	-0,1000	-1,0647	-0,4412	-0,4401
1	-0,3800	-0,1000	-0,1327	-0,2090	-0,1541
2	-0,4800	-0,1000	-0,4932	-0,4800	-0,4800
3	-0,3200	-0,1000	-0,1531	-0,0366	-0,5240
4	-0,4100	-0,1000	-0,6191	-1,2548	-0,3192
5	-0,4900	-0,1000	-0,4847	-0,4900	-0,4900
6	-0,3900	-0,1000	-1,7384	-1,7505	-3,1014
7	-0,4500	-0,1000	-0,4858	-0,4506	-0,4500
8	-0,4100	-0,1000	-0,1567	-0,4091	-0,4099

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nó	Concentrações de cloro da Rede Porto calculadas após calibrações com AG (mg/L)				
	Gabarito	Inicial	AG - Pop 30	AG - Pop 200	AG - Pop 1000
1	1,8973	1,9626	1,8099	1,8971	1,8973
2	1,3888	1,7585	1,3924	1,3888	1,3888
3	1,1553	1,6679	1,1536	1,1553	1,1553
4	1,2021	1,7104	1,2024	1,2021	1,2021
5	1,5602	1,8337	1,5568	1,5601	1,5602
6	1,7199	1,8952	1,7261	1,7200	1,7199
7	0,6621	1,3127	0,6627	0,6621	0,6621

Fonte: Elaborado pelo autor.

**APÊNDICE T – RESULTADOS PARA CALIBRAÇÃO DOS KWS DA REDE SOUSA
COM O USO DE ALGORITMOS GENÉTICOS, NO CENÁRIO COM MAIS DADOS
OBSERVADOS**

(continua)

Trecho	kws da Rede Sousa calculadas com AG (m/dia)				
	Gabarito	Inicial	AG - Pop 30	AG - Pop 200	AG - Pop 1000
1	-0,7888	-0,1000	-3,1755	-0,0980	-0,5580
2	-1,1582	-0,1000	-0,8492	-3,0238	-1,4363
3	-0,8267	-0,1000	-1,4354	-0,6731	-0,9371
4	-0,2336	-0,1000	-0,6206	-0,1939	-0,2058
5	-0,4899	-0,1000	-1,2141	-0,0020	-0,3992
6	-0,1791	-0,1000	-3,2911	-0,7381	-0,2133
7	-0,4001	-0,1000	-0,0020	-1,2958	-3,4321
8	-0,1064	-0,1000	-1,5007	-2,3152	-0,2837
9	-0,4381	-0,1000	-0,0684	-0,4504	-0,3422
10	-0,3794	-0,1000	-0,0020	-3,2874	-0,2477
11	-0,1952	-0,1000	-3,1287	-3,0426	-1,2863
12	-0,3890	-0,1000	-3,1307	-3,3822	-1,8391
13	-0,3235	-0,1000	-0,8442	-0,6007	-1,6423
14	-0,4447	-0,1000	-0,5108	-0,2392	-0,8016
15	-0,4564	-0,1000	-0,4557	-0,0041	-0,2766
16	-0,4756	-0,1000	-0,0054	-1,4630	-0,1509
17	-0,3194	-0,1000	-1,8825	-1,4166	-0,0159
18	-0,1017	-0,1000	-0,6425	-0,4296	-2,2740
19	-0,2056	-0,1000	-0,5496	-0,2734	-0,1153
20	-0,2656	-0,1000	-0,9946	-0,8919	-0,4918
21	-1,2665	-0,1000	-3,7767	-1,4836	-2,1174
22	-1,2218	-0,1000	-1,0148	-0,2592	-0,6824
23	-1,3379	-0,1000	-0,7833	-1,5315	-0,7869
24	-1,4085	-0,1000	-0,2641	-0,7515	-2,8468
25	-1,0476	-0,1000	-3,3250	-2,9282	-0,6960
26	-1,4400	-0,1000	-1,3597	-0,1503	-0,3992
27	-0,5254	-0,1000	-0,0020	-1,3070	-0,6441
28	-0,3769	-0,1000	-0,6638	-0,0020	-0,2594
29	-0,2476	-0,1000	-2,8263	-2,6122	-0,1550
30	-0,1813	-0,1000	-0,5908	-0,2559	-0,0069
31	-0,5733	-0,1000	-0,7840	-0,9201	-1,1078
32	-0,9426	-0,1000	-4,0371	-0,9365	-0,6209
33	-0,7878	-0,1000	-3,9749	-0,0040	-0,5592
34	-0,2659	-0,1000	-2,9096	-0,3558	-0,4559
35	-0,3205	-0,1000	-1,8407	-0,0028	-0,0020
36	-0,1013	-0,1000	-2,0797	-2,9484	-0,5193
37	-0,5464	-0,1000	-1,3483	-1,3670	-1,6492
38	-1,3203	-0,1000	-2,9512	-0,9808	-0,5848
39	-0,4433	-0,1000	-0,0027	-0,0454	-0,1878
40	-0,1435	-0,1000	-0,6024	-2,6713	-0,2515

(conclusão)					
Trecho	Gabarito	Inicial	AG - Pop 30	AG - Pop 200	AG - Pop 1000
41	-0,1361	-0,1000	-2,1398	-1,0351	-0,1518
42	-0,3467	-0,1000	-4,7734	-3,7011	-0,7633
43	-0,3706	-0,1000	-0,0882	-0,4017	-0,6282
44	-0,2737	-0,1000	-0,0020	-2,6953	-0,1863
45	-0,4184	-0,1000	-2,0622	-0,4698	-0,2670
46	-0,3198	-0,1000	-1,6521	-0,0020	-0,2458
47	-0,2008	-0,1000	-1,2298	-2,4588	-0,0528
48	-0,1512	-0,1000	-4,5966	-1,0093	-1,0536
49	-0,2944	-0,1000	-2,3232	-0,2090	-0,9348
50	-0,3729	-0,1000	-0,0020	-1,1181	-0,1229
51	-0,3571	-0,1000	-0,3208	-0,0020	-0,5836
52	-0,3405	-0,1000	-3,9132	-0,0023	-0,0082
53	-0,1150	-0,1000	-1,0605	-0,1265	-0,1823
54	-0,2502	-0,1000	-0,1325	-3,6194	-0,0020
55	-0,8290	-0,1000	-0,0029	-0,5819	-0,7285
56	-1,1539	-0,1000	-0,3131	-1,1497	-0,4436
57	-1,4088	-0,1000	-0,1085	-0,2023	-0,9566
58	-0,2973	-0,1000	-3,7027	-0,0593	-0,0846
59	-0,1676	-0,1000	-3,1595	-0,1422	-0,1424
60	-0,3785	-0,1000	-0,2320	-2,1137	-0,3370
61	-0,2502	-0,1000	-1,0421	-0,1358	-2,6753
62	-0,4190	-0,1000	-4,4631	-1,4751	-1,9885
63	-0,4384	-0,1000	-4,6692	-0,7693	-2,1192
64	-0,1709	-0,1000	-0,0060	-0,0020	-0,4568
65	-0,4377	-0,1000	-1,4618	-4,9681	-0,2059
66	-0,1942	-0,1000	-0,0024	-0,0020	-0,1082
67	-0,2670	-0,1000	-3,1358	-0,9590	-1,0845
68	-0,3742	-0,1000	-0,6735	-1,4304	-0,2993
69	-0,1066	-0,1000	-0,4206	-0,6538	-0,5872
70	-0,2457	-0,1000	-0,3564	-0,4590	-0,4116
71	-0,1828	-0,1000	-0,0615	-1,0520	-0,2920
72	-0,3143	-0,1000	-1,6045	-0,0020	-1,1987
73	-0,1306	-0,1000	-1,2305	-1,3331	-0,1704
74	-0,4851	-0,1000	-0,0020	-0,6391	-0,3887
75	-0,2963	-0,1000	-0,5696	-0,8413	-0,1220
76	-0,4236	-0,1000	-0,0136	-0,0092	-0,4851
77	-0,2941	-0,1000	-2,2218	-3,2932	-0,0482
78	-0,4642	-0,1000	-0,5818	-1,5855	-0,4938
79	-0,2971	-0,1000	-4,6738	-0,0028	-0,6065
80	-0,2220	-0,1000	-0,4861	-0,0020	-0,1959
81	-0,4038	-0,1000	-0,1090	-0,2426	-0,6254
82	-0,2340	-0,1000	-0,6991	-1,7956	-0,0020
83	-0,2280	-0,1000	-1,6579	-0,6962	-0,8887
84	-0,4968	-0,1000	-2,1181	-0,1579	-0,0020
85	-1,0365	-0,1000	-0,0020	-0,6760	-0,9746

Fonte: Elaborado pelo autor.

(continua)

Nó	Concentrações de cloro da Rede Sousa calculadas após calibrações com AG (mg/L)				
	Gabarito	Inicial	AG - Pop 30	AG - Pop 200	AG - Pop 1000
1	1,8969	1,9798	1,9928	1,9221	1,9008
2	1,7885	1,9554	1,7468	1,8988	1,8159
3	1,6696	1,9315	1,6501	1,7045	1,6805
4	1,5262	1,8992	1,4490	1,5779	1,5235
5	1,4614	1,8590	1,3147	1,5205	1,4652
6	1,3535	1,8184	1,1462	1,5143	1,3717
7	1,2601	1,7391	0,7882	1,2418	1,2635
8	1,0688	1,6548	0,8209	0,9536	1,0068
9	1,0168	1,5910	0,7549	0,8785	1,0049
10	0,8831	1,5397	0,6766	0,8776	0,8199
11	0,7450	1,4652	0,5907	0,5875	0,7458
12	0,6445	1,3662	0,3513	0,4480	0,6255
13	0,4933	1,2180	0,2356	0,3135	0,4125
14	0,6425	1,3810	0,3883	0,4847	0,6478
15	0,7704	1,4796	0,4780	0,5782	0,7642
16	0,8755	1,5541	0,5772	0,6133	0,8779
17	1,0014	1,6138	0,6220	0,7849	0,9722
18	1,0844	1,6760	0,8606	1,0078	1,0056
19	1,1321	1,7531	1,0731	1,1347	1,1388
20	1,2034	1,8126	1,2253	1,2258	1,1824
21	1,2644	1,8543	1,3880	1,3777	1,2792
22	1,4118	1,8914	1,6333	1,5512	1,4667
23	1,5622	1,9231	1,7889	1,6060	1,5742
24	1,7572	1,9557	1,9439	1,8237	1,7111
25	1,6204	1,9229	1,7575	1,6800	1,6267
26	1,4518	1,8845	1,5592	1,6248	1,4861
27	1,3444	1,8399	1,4902	1,4176	1,3414
28	1,2503	1,7970	1,2938	1,3310	1,2632
29	1,1601	1,7477	0,9883	1,1213	1,1592
30	1,5149	1,8953	1,6058	1,5393	1,5324
31	1,3699	1,8540	1,3130	1,3822	1,3733
32	1,2409	1,8054	1,1388	1,3177	1,2642
33	1,1550	1,7533	1,0133	1,2071	1,1575
34	1,0797	1,6987	0,8284	1,1591	1,1258
35	1,3642	1,8590	1,4788	1,4583	1,3720
36	1,2193	1,8160	1,1922	1,2908	1,2246
37	1,1579	1,7701	1,1389	1,2353	1,1602
38	1,1018	1,7164	0,9820	1,0104	1,1059
39	1,0183	1,6552	0,7678	0,9540	1,0193
40	1,2961	1,8101	1,1416	1,4184	1,3272
41	1,1956	1,7605	1,1563	1,2030	1,1979
42	1,0841	1,7070	0,9775	1,0923	1,0879
43	0,9931	1,6585	0,8773	1,0403	0,9976
44	0,9340	1,5921	0,6613	0,7277	0,9949
45	1,2455	1,7602	0,9182	1,3851	1,2431
46	1,1279	1,7085	0,9059	1,0836	1,1793

						(conclusão)
Trecho	Gabarito	Inicial	AG - Pop 30	AG - Pop 200	AG - Pop 1000	
47	1,0271	1,6475	0,8770	1,0032	1,0259	
48	0,9140	1,5889	0,6167	0,8702	0,9973	
49	0,8453	1,5069	0,4699	0,6914	0,8360	

Fonte: Elaborado pelo autor.

**APÊNDICE U – RUGOSIDADES ABSOLUTAS CALCULADAS PARA A REDE
SOUSA NOS TESTES FINAIS, COM FAIXA DE VARIAÇÃO DO PARÂMETRO
INSERIDA DE MODO MANUAL NAS CALIBRAÇÕES**

(continua)

Trecho	Rugosidades calculadas para a Rede Sousa nos testes finais (mm)				
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	AG
1	0,3857	0,0100	0,3859	0,4280	0,4809
2	0,4841	0,0100	0,3859	0,3763	0,3260
3	0,3600	0,0100	0,3859	0,3572	0,3125
4	0,0075	0,0100	0,0040	0,0057	0,0100
5	0,0062	0,0100	0,0040	0,0060	0,0045
6	0,0049	0,0100	0,0040	0,0053	0,0020
7	0,0030	0,0100	0,0040	0,0056	0,0024
8	0,0068	0,0100	0,0040	0,0061	0,0036
9	0,0079	0,0100	0,0040	0,0058	0,0100
10	0,0026	0,0100	0,0040	0,0057	0,0015
11	0,0022	0,0100	0,0040	0,0058	0,0077
12	0,0077	0,0100	0,0040	0,0060	0,0100
13	0,0084	0,0100	0,0040	0,0058	0,0059
14	0,0073	0,0100	0,0040	0,0051	0,0015
15	0,0081	0,0100	0,0040	0,0057	0,0015
16	0,0037	0,0100	0,0040	0,0054	0,0086
17	0,0024	0,0100	0,0040	0,0062	0,0088
18	0,0094	0,0100	0,0040	0,0063	0,0064
19	0,0015	0,0100	0,0040	0,0053	0,0015
20	0,0035	0,0100	0,0040	0,0061	0,0100
21	0,4209	0,0100	0,3859	0,3512	0,3651
22	0,2727	0,0100	0,3859	0,3135	0,3214
23	0,4283	0,0100	0,3859	0,4329	0,4996
24	0,4171	0,0100	0,3859	0,4177	0,3214
25	0,4977	0,0100	0,3859	0,4067	0,4161
26	0,3826	0,0100	0,3859	0,3425	0,2729
27	0,3462	0,0100	0,3859	0,3503	0,4668
28	0,0018	0,0100	0,0040	0,0055	0,0052
29	0,0099	0,0100	0,0040	0,0060	0,0031
30	0,0047	0,0100	0,0040	0,0061	0,0021
31	0,3948	0,0100	0,3859	0,3617	0,3307
32	0,3117	0,0100	0,3859	0,3636	0,4962
33	0,3198	0,0100	0,3859	0,3691	0,2651
34	0,0058	0,0100	0,0040	0,0060	0,0068
35	0,0056	0,0100	0,0040	0,0057	0,0015
36	0,0045	0,0100	0,0040	0,0063	0,0085
37	0,4441	0,0100	0,3859	0,3816	0,3856
38	0,3248	0,0100	0,3859	0,3401	0,3275
39	0,0020	0,0100	0,0040	0,0057	0,0058
40	0,0032	0,0100	0,0040	0,0057	0,0015

(conclusão)					
Trecho	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	AG
41	0,0021	0,0100	0,0040	0,0054	0,0044
42	0,0081	0,0100	0,0040	0,0057	0,0100
43	0,0045	0,0100	0,0040	0,0056	0,0098
44	0,0079	0,0100	0,0040	0,0060	0,0068
45	0,0041	0,0100	0,0040	0,0059	0,0036
46	0,0055	0,0100	0,0040	0,0060	0,0087
47	0,0098	0,0100	0,0040	0,0055	0,0058
48	0,0084	0,0100	0,0040	0,0053	0,0100
49	0,0075	0,0100	0,0040	0,0063	0,0028
50	0,0020	0,0100	0,0040	0,0055	0,0043
51	0,0096	0,0100	0,0040	0,0057	0,0057
52	0,0037	0,0100	0,0040	0,0061	0,0018
53	0,0099	0,0100	0,0040	0,0062	0,0100
54	0,0084	0,0100	0,0040	0,0052	0,0100
55	0,3607	0,0100	0,3859	0,3845	0,3384
56	0,4016	0,0100	0,3859	0,3649	0,3095
57	0,2744	0,0100	0,3859	0,3474	0,4195
58	0,0098	0,0100	0,0040	0,0059	0,0090
59	0,0041	0,0100	0,0040	0,0060	0,0073
60	0,0051	0,0100	0,0040	0,0060	0,0100
61	0,0055	0,0100	0,0040	0,0053	0,0015
62	0,0092	0,0100	0,0040	0,0056	0,0100
63	0,0045	0,0100	0,0040	0,0056	0,0083
64	0,0047	0,0100	0,0040	0,0057	0,0029
65	0,0045	0,0100	0,0040	0,0059	0,0017
66	0,0062	0,0100	0,0040	0,0058	0,0036
67	0,0044	0,0100	0,0040	0,0051	0,0075
68	0,0039	0,0100	0,0040	0,0056	0,0061
69	0,0016	0,0100	0,0040	0,0054	0,0015
70	0,0034	0,0100	0,0040	0,0062	0,0099
71	0,0029	0,0100	0,0040	0,0060	0,0015
72	0,0018	0,0100	0,0040	0,0057	0,0039
73	0,0019	0,0100	0,0040	0,0055	0,0098
74	0,0036	0,0100	0,0040	0,0053	0,0086
75	0,0027	0,0100	0,0040	0,0052	0,0015
76	0,0088	0,0100	0,0040	0,0055	0,0073
77	0,0050	0,0100	0,0040	0,0056	0,0100
78	0,0016	0,0100	0,0040	0,0051	0,0054
79	0,0096	0,0100	0,0040	0,0060	0,0080
80	0,0090	0,0100	0,0040	0,0059	0,0074
81	0,0091	0,0100	0,0040	0,0062	0,0077
82	0,0066	0,0100	0,0040	0,0053	0,0100
83	0,0024	0,0100	0,0040	0,0058	0,0034
84	0,0047	0,0100	0,0040	0,0057	0,0100
85	0,3450	0,0100	0,3859	0,3628	0,3463

Fonte: Elaborado pelo autor.

**APÊNDICE V – CARGAS DE PRESSÃO E VAZÕES OBTIDAS PELAS
CALIBRAÇÕES DAS RUGOSIDADES ABSOLUTAS DA REDE SOUSA NOS
TESTES FINAIS, COM FAIXA DE VARIAÇÃO DO PARÂMETRO INSERIDA DE
MODO MANUAL**

(continua)

Nó	Cargas de pressão obtidas para a Rede Sousa nos testes finais (mca)				
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	AG
1	5,3190	5,3485	5,3165	5,3179	5,3189
2	5,4707	5,5953	5,4665	5,4607	5,4564
3	7,7124	7,8904	7,7167	7,7116	7,7122
4	12,1166	12,4154	12,1101	12,1126	12,1191
5	19,1932	19,4961	19,1900	19,1911	19,1935
6	23,3643	23,6668	23,3613	23,3620	23,3645
7	25,7673	26,0690	25,7644	25,7648	25,7675
8	28,2191	28,5207	28,2161	28,2165	28,2190
9	27,0820	27,3831	27,0789	27,0792	27,0822
10	27,1574	27,4576	27,1544	27,1546	27,1573
11	27,2729	27,5711	27,2700	27,2699	27,2730
12	28,5627	28,8596	28,5601	28,5597	28,5627
13	31,5509	31,8476	31,5483	31,5479	31,5509
14	27,1710	27,4674	27,1686	27,1682	27,1712
15	24,7651	25,0605	24,7627	24,7624	24,7652
16	21,9005	22,1926	21,8973	21,8972	21,8996
17	17,0626	17,3498	17,0596	17,0597	17,0625
18	12,7959	13,0784	12,7933	12,7939	12,7966
19	14,6153	14,8957	14,6118	14,6128	14,6149
20	12,5922	12,8728	12,5894	12,5908	12,5907
21	10,0104	10,2917	10,0078	10,0098	10,0097
22	7,6263	7,8748	7,6216	7,6215	7,6215
23	6,0001	6,2018	6,0086	5,9998	5,9995
24	5,6229	5,7058	5,6245	5,6226	5,6302
25	5,4002	5,5803	5,4030	5,3975	5,4000
26	5,5181	5,7531	5,5199	5,5182	5,5261
27	7,0689	7,3365	7,0670	7,0678	7,0687
28	8,7334	9,0101	8,7302	8,7312	8,7323
29	11,1739	11,4538	11,1712	11,1721	11,1736
30	7,1138	7,3612	7,1212	7,1187	7,1289
31	7,6454	7,9235	7,6455	7,6456	7,6453
32	8,5865	8,8829	8,5830	8,5842	8,5884
33	9,7848	10,0773	9,7814	9,7824	9,7851
34	13,2101	13,4981	13,2073	13,2076	13,2108
35	12,7783	13,0858	12,7722	12,7746	12,7782
36	11,9049	12,2287	11,8974	11,9013	11,9049
37	13,1898	13,4992	13,1837	13,1859	13,1898
38	15,1446	15,4479	15,1392	15,1407	15,1450
39	17,9050	18,1988	17,9016	17,9017	17,9050
40	18,4116	18,7161	18,4084	18,4096	18,4119

(conclusão)					
Nó	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	AG
41	17,3383	17,6440	17,3347	17,3359	17,3384
42	18,3250	18,6297	18,3212	18,3222	18,3249
43	19,0368	19,3367	19,0337	19,0340	19,0369
44	22,2167	22,5132	22,2144	22,2142	22,2168
45	23,9843	24,2871	23,9812	23,9820	23,9845
46	22,9459	23,2478	22,9425	22,9430	22,9458
47	22,8317	23,1335	22,8286	22,8291	22,8318
48	23,3944	23,6928	23,3915	23,3913	23,3945
49	25,4813	25,7781	25,4788	25,4784	25,4814

Fonte: Elaborado pelo autor.

(continua)

Trecho	Vazões obtidas para a Rede Sousa nos testes finais (L/s)				
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	AG
1	10,5519	10,6613	10,5802	10,5703	10,5103
2	7,6577	7,7707	7,6634	7,6701	7,6703
3	4,2336	4,3335	4,2513	4,2532	4,2885
4	2,3569	2,3381	2,3571	2,3563	2,3572
5	1,3945	1,3916	1,3958	1,3955	1,3968
6	0,4277	0,4275	0,4278	0,4279	0,4285
7	0,2089	0,2088	0,2091	0,2091	0,2098
8	0,3078	0,3083	0,3084	0,3083	0,3078
9	0,3336	0,3348	0,3340	0,3340	0,3337
10	0,3999	0,4017	0,3995	0,3996	0,3999
11	0,2824	0,2841	0,2816	0,2818	0,2819
12	0,0942	0,0954	0,0937	0,0938	0,0937
13	0,1246	0,1234	0,1250	0,1250	0,1250
14	0,3327	0,3302	0,3333	0,3333	0,3335
15	0,4963	0,4907	0,4966	0,4964	0,4973
16	0,5615	0,5520	0,5617	0,5613	0,5604
17	0,5557	0,5457	0,5554	0,5550	0,5538
18	0,3638	0,3598	0,3633	0,3634	0,3623
19	0,5826	0,5785	0,5821	0,5822	0,5811
20	1,3512	1,3482	1,3521	1,3525	1,3482
21	2,1656	2,1667	2,1667	2,1681	2,1605
22	2,8372	2,7983	2,8328	2,8323	2,8224
23	3,6340	3,5396	3,6404	3,6286	3,6069
24	7,6051	7,4957	7,5768	7,5867	7,6466
25	2,5660	2,5624	2,5886	2,5721	2,5119
26	2,6671	2,6021	2,6712	2,6772	2,6956
27	2,1701	2,1137	2,1805	2,1784	2,1753
28	1,5777	1,5276	1,5802	1,5774	1,5771
29	1,2079	1,1911	1,2103	1,2089	1,2091
30	0,5200	0,5141	0,5202	0,5198	0,5196
31	3,0959	3,1091	3,0839	3,0887	3,0536
32	2,4367	2,4734	2,4436	2,4386	2,4368
33	1,9693	2,0091	1,9702	1,9679	1,9822
34	1,3451	1,3593	1,3468	1,3455	1,3518
35	0,6819	0,6843	0,6823	0,6819	0,6842
36	0,3340	0,3344	0,3344	0,3344	0,3347
37	1,5486	1,6672	1,5660	1,5687	1,6031
38	2,1641	2,2965	2,1405	2,1533	2,1615
39	1,5355	1,5857	1,5265	1,5316	1,5300
40	1,1782	1,2050	1,1739	1,1765	1,1781
41	0,6466	0,6533	0,6430	0,6438	0,6456
42	0,2630	0,2668	0,2631	0,2633	0,2651
43	0,6342	0,6183	0,6331	0,6327	0,6323
44	1,0700	1,0618	1,0752	1,0737	1,0718
45	0,8896	0,8930	0,8910	0,8910	0,8912
46	0,5673	0,5715	0,5670	0,5671	0,5656

(conclusão)					
Trecho	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	AG
47	0,4200	0,4259	0,4205	0,4208	0,4211
48	0,1645	0,1677	0,1649	0,1651	0,1644
49	0,6387	0,6359	0,6398	0,6394	0,6401
50	1,1739	1,1719	1,1742	1,1739	1,1733
51	0,8744	0,8752	0,8748	0,8746	0,8750
52	0,5321	0,5342	0,5318	0,5317	0,5330
53	0,3321	0,3353	0,3324	0,3324	0,3320
54	0,1201	0,1213	0,1199	0,1199	0,1197
55	3,6430	3,6279	3,6082	3,6299	3,7116
56	3,1043	3,1507	3,0881	3,0873	3,0904
57	3,3261	3,3490	3,2909	3,2999	3,2697
58	2,2731	2,2822	2,2790	2,2778	2,2739
59	1,3998	1,4012	1,3994	1,3993	1,3969
60	0,4271	0,4277	0,4275	0,4273	0,4262
61	0,4686	0,4132	0,4795	0,4682	0,4563
62	0,5281	0,4641	0,5327	0,5294	0,5391
63	0,5579	0,4908	0,5687	0,5626	0,5562
64	0,7489	0,7642	0,7451	0,7468	0,7502
65	0,4919	0,4955	0,4918	0,4921	0,4932
66	0,3539	0,3547	0,3538	0,3538	0,3541
67	0,3434	0,3034	0,3380	0,3360	0,3337
68	0,4984	0,4520	0,5007	0,4995	0,4944
69	0,6851	0,6644	0,6866	0,6844	0,6873
70	0,6049	0,6075	0,6016	0,6020	0,6017
71	0,4897	0,4915	0,4882	0,4883	0,4899
72	0,3945	0,3950	0,3937	0,3938	0,3943
73	0,4863	0,4904	0,4864	0,4875	0,4841
74	0,4185	0,3893	0,4188	0,4184	0,4147
75	0,6442	0,6268	0,6459	0,6445	0,6448
76	0,7384	0,7411	0,7393	0,7396	0,7398
77	0,4482	0,4492	0,4484	0,4485	0,4467
78	0,2107	0,2106	0,2103	0,2103	0,2102
79	0,4405	0,4415	0,4419	0,4422	0,4390
80	0,6909	0,6810	0,6944	0,6938	0,6909
81	0,6013	0,5934	0,6048	0,6039	0,6028
82	0,5474	0,5423	0,5471	0,5470	0,5459
83	0,3654	0,3630	0,3652	0,3652	0,3651
84	0,1399	0,1394	0,1402	0,1402	0,1400
85	18,4851	18,4851	18,4851	18,4851	18,4851

Fonte: Elaborado pelo autor.

**APÊNDICE W – KWS CALCULADOS PARA A REDE SOUSA NOS TESTES FINAIS,
COM FAIXA DE VARIAÇÃO DO PARÂMETRO INSERIDA DE MODO MANUAL
NAS CALIBRAÇÕES**

(continua)

Trecho	Kws calculados para a Rede Sousa nos testes finais (m/dia)				
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	AG
1	-0,7888	-0,1000	-0,9688	-0,9174	-0,9000
2	-1,1582	-0,1000	-0,9688	-0,9835	-1,0250
3	-0,8267	-0,1000	-0,9688	-0,9605	-1,0239
4	-0,2336	-0,1000	-0,2742	-0,2842	-0,1447
5	-0,4899	-0,1000	-0,2742	-0,2922	-0,1903
6	-0,1791	-0,1000	-0,2742	-0,3043	-0,3359
7	-0,4001	-0,1000	-0,2742	-0,3229	-0,5000
8	-0,1064	-0,1000	-0,2742	-0,2852	-0,1438
9	-0,4381	-0,1000	-0,2742	-0,3382	-0,2883
10	-0,3794	-0,1000	-0,2742	-0,3087	-0,4714
11	-0,1952	-0,1000	-0,2742	-0,3783	-0,2728
12	-0,3890	-0,1000	-0,2742	-0,3058	-0,3599
13	-0,3235	-0,1000	-0,2742	-0,3414	-0,3026
14	-0,4447	-0,1000	-0,2742	-0,3404	-0,4503
15	-0,4564	-0,1000	-0,2742	-0,3303	-0,4624
16	-0,4756	-0,1000	-0,2742	-0,3372	-0,3270
17	-0,3194	-0,1000	-0,2742	-0,3043	-0,1559
18	-0,1017	-0,1000	-0,2742	-0,3050	-0,3836
19	-0,2056	-0,1000	-0,2742	-0,2960	-0,3069
20	-0,2656	-0,1000	-0,2742	-0,3188	-0,1212
21	-1,2665	-0,1000	-0,9688	-1,0433	-1,5000
22	-1,2218	-0,1000	-0,9688	-1,1104	-1,0375
23	-1,3379	-0,1000	-0,9688	-1,3030	-1,3765
24	-1,4085	-0,1000	-0,9688	-1,1997	-1,3549
25	-1,0476	-0,1000	-0,9688	-0,9946	-1,2401
26	-1,4400	-0,1000	-0,9688	-1,1067	-0,5354
27	-0,5254	-0,1000	-0,9688	-1,0911	-1,4496
28	-0,3769	-0,1000	-0,2742	-0,2392	-0,4023
29	-0,2476	-0,1000	-0,2742	-0,2333	-0,2098
30	-0,1813	-0,1000	-0,2742	-0,2830	-0,1246
31	-0,5733	-0,1000	-0,9688	-1,1448	-1,0690
32	-0,9426	-0,1000	-0,9688	-1,1807	-1,0520
33	-0,7878	-0,1000	-0,9688	-1,0046	-0,9920
34	-0,2659	-0,1000	-0,2742	-0,2569	-0,2732
35	-0,3205	-0,1000	-0,2742	-0,2803	-0,3754
36	-0,1013	-0,1000	-0,2742	-0,2868	-0,1143
37	-0,5464	-0,1000	-0,9688	-0,7969	-0,5322
38	-1,3203	-0,1000	-0,9688	-1,1076	-1,3180
39	-0,4433	-0,1000	-0,2742	-0,3318	-0,3823
40	-0,1435	-0,1000	-0,2742	-0,2722	-0,2094
41	-0,1361	-0,1000	-0,2742	-0,2950	-0,2911
42	-0,3467	-0,1000	-0,2742	-0,3208	-0,1732

Trecho	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	AG
43	-0,3706	-0,1000	-0,2742	-0,3261	-0,1279
44	-0,2737	-0,1000	-0,2742	-0,3041	-0,4062
45	-0,4184	-0,1000	-0,2742	-0,2660	-0,3687
46	-0,3198	-0,1000	-0,2742	-0,2847	-0,3284
47	-0,2008	-0,1000	-0,2742	-0,3102	-0,2023
48	-0,1512	-0,1000	-0,2742	-0,2833	-0,4688
49	-0,2944	-0,1000	-0,2742	-0,3085	-0,3123
50	-0,3729	-0,1000	-0,2742	-0,2910	-0,3763
51	-0,3571	-0,1000	-0,2742	-0,3165	-0,2752
52	-0,3405	-0,1000	-0,2742	-0,3279	-0,3273
53	-0,1150	-0,1000	-0,2742	-0,2960	-0,1160
54	-0,2502	-0,1000	-0,2742	-0,3397	-0,3035
55	-0,8290	-0,1000	-0,9688	-1,0502	-0,7096
56	-1,1539	-0,1000	-0,9688	-1,0674	-0,8444
57	-1,4088	-0,1000	-0,9688	-1,0318	-1,1448
58	-0,2973	-0,1000	-0,2742	-0,2776	-0,1698
59	-0,1676	-0,1000	-0,2742	-0,3323	-0,4550
60	-0,3785	-0,1000	-0,2742	-0,2448	-0,1000
61	-0,2502	-0,1000	-0,2742	-0,3549	-0,1652
62	-0,4190	-0,1000	-0,2742	-0,2972	-0,3392
63	-0,4384	-0,1000	-0,2742	-0,3035	-0,1112
64	-0,1709	-0,1000	-0,2742	-0,2867	-0,2705
65	-0,4377	-0,1000	-0,2742	-0,3253	-0,4014
66	-0,1942	-0,1000	-0,2742	-0,2798	-0,3124
67	-0,2670	-0,1000	-0,2742	-0,3098	-0,2284
68	-0,3742	-0,1000	-0,2742	-0,2762	-0,3418
69	-0,1066	-0,1000	-0,2742	-0,3145	-0,2938
70	-0,2457	-0,1000	-0,2742	-0,3035	-0,4631
71	-0,1828	-0,1000	-0,2742	-0,3503	-0,2303
72	-0,3143	-0,1000	-0,2742	-0,3224	-0,3266
73	-0,1306	-0,1000	-0,2742	-0,2457	-0,1349
74	-0,4851	-0,1000	-0,2742	-0,2836	-0,3232
75	-0,2963	-0,1000	-0,2742	-0,2437	-0,1629
76	-0,4236	-0,1000	-0,2742	-0,3172	-0,3784
77	-0,2941	-0,1000	-0,2742	-0,2811	-0,3282
78	-0,4642	-0,1000	-0,2742	-0,2822	-0,4069
79	-0,2971	-0,1000	-0,2742	-0,3366	-0,4592
80	-0,2220	-0,1000	-0,2742	-0,3024	-0,4335
81	-0,4038	-0,1000	-0,2742	-0,2996	-0,1177
82	-0,2340	-0,1000	-0,2742	-0,2832	-0,2758
83	-0,2280	-0,1000	-0,2742	-0,3008	-0,2025
84	-0,4968	-0,1000	-0,2742	-0,2730	-0,4652
85	-1,0365	-0,1000	-0,9688	-0,9605	-1,0303

Fonte: Elaborado pelo autor.

**APÊNDICE X – CONCENTRAÇÕES DE CLORO RESIDUAL OBTIDAS PELAS
CALIBRAÇÕES DOS KWS DA REDE SOUSA NOS TESTES FINAIS, COM FAIXA
DE VARIAÇÃO DO PARÂMETRO INSERIDA DE MODO MANUAL**

(continua)

Nó	Concentrações obtidas para a Rede Sousa nos testes finais (mg/L)				
	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	AG
1	1,8969	1,9798	1,9012	1,9017	1,8973
2	1,7885	1,9554	1,7764	1,7813	1,7787
3	1,6696	1,9315	1,6698	1,6735	1,6684
4	1,5262	1,8992	1,5103	1,5145	1,5031
5	1,4614	1,8590	1,4370	1,4388	1,4601
6	1,3535	1,8184	1,3678	1,3661	1,4072
7	1,2601	1,7391	1,2376	1,2259	1,2524
8	1,0688	1,6548	1,0944	1,0816	1,1235
9	1,0168	1,5910	0,9919	0,9740	1,0140
10	0,8831	1,5397	0,9069	0,8699	0,8987
11	0,7450	1,4652	0,7988	0,7614	0,7464
12	0,6445	1,3662	0,6761	0,6295	0,6344
13	0,4933	1,2180	0,5423	0,4899	0,4912
14	0,6425	1,3810	0,6845	0,6291	0,6357
15	0,7704	1,4796	0,8028	0,7539	0,7660
16	0,8755	1,5541	0,9029	0,8546	0,9092
17	1,0014	1,6138	0,9889	0,9463	0,9956
18	1,0844	1,6760	1,0810	1,0356	1,0538
19	1,1321	1,7531	1,1876	1,1294	1,1312
20	1,2034	1,8126	1,2832	1,2263	1,2312
21	1,2644	1,8543	1,3499	1,2982	1,2643
22	1,4118	1,8914	1,4862	1,4348	1,4243
23	1,5622	1,9231	1,6237	1,5793	1,5619
24	1,7572	1,9557	1,7874	1,7731	1,7603
25	1,6204	1,9229	1,6256	1,6140	1,6210
26	1,4518	1,8845	1,4891	1,4611	1,5193
27	1,3444	1,8399	1,3480	1,3108	1,3418
28	1,2503	1,7970	1,2732	1,2418	1,2450
29	1,1601	1,7477	1,1935	1,1587	1,1572
30	1,5149	1,8953	1,5040	1,4889	1,5026
31	1,3699	1,8540	1,3739	1,3452	1,3693
32	1,2409	1,8054	1,2397	1,2101	1,2299
33	1,1550	1,7533	1,1715	1,1448	1,1549
34	1,0797	1,6987	1,1019	1,0693	1,0489
35	1,3642	1,8590	1,3617	1,3544	1,3629
36	1,2193	1,8160	1,2431	1,2239	1,2385
37	1,1579	1,7701	1,1762	1,1458	1,1574
38	1,1018	1,7164	1,1040	1,0795	1,1044
39	1,0183	1,6552	1,0253	0,9939	1,0181
40	1,2961	1,8101	1,2986	1,2899	1,3324

(conclusão)					
Nó	Gabarito	Inicial	RNA-G	RNA-T	AG
41	1,1956	1,7605	1,1948	1,1779	1,1973
42	1,0841	1,7070	1,1036	1,0811	1,0706
43	0,9931	1,6585	1,0244	0,9961	0,9934
44	0,9340	1,5921	0,9361	0,9036	0,9284
45	1,2455	1,7602	1,2393	1,2236	1,2494
46	1,1279	1,7085	1,1477	1,1265	1,1329
47	1,0271	1,6475	1,0462	1,0144	1,0305
48	0,9140	1,5889	0,9466	0,9119	0,9137
49	0,8453	1,5069	0,8302	0,7945	0,8460

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE Y – DADOS DOS NÓS OBTIDOS PELA SIMULAÇÃO DA REDE CT-CCHL, APÓS CALIBRAÇÃO

(continua)

Nó	Cota (m)	C (L/s)	Cota Piezométrica (m)	P (mca)
RNF - 1	92,8190	-5,0207	92,8190	0,0000
2	71,3130	0,1481	92,1035	20,7905
3	70,9538	0,1481	91,8619	20,9081
4	70,3513	0,1481	91,3754	21,0241
5	70,0172	0,1481	91,1758	21,1586
6	68,9056	0,1481	90,8504	21,9448
7	68,6190	0,3755	90,7752	22,1562
8	67,7503	0,0751	90,5799	22,8296
9	67,6464	0,0751	90,5655	22,9191
10	67,1571	0,0751	90,5331	23,3760
11	66,9575	0,0213	90,5173	23,5598
12	66,3935	0,0213	90,5076	24,1141
13	66,2872	0,0213	90,5045	24,2173
14	65,0480	0,0213	90,4870	25,4390
15	65,1741	0,0213	90,4798	25,3057
16	73,1596	0,1671	91,7467	18,5871
17	73,5063	0,1671	91,7385	18,2322
18	73,8105	0,1671	91,7191	17,9086
19	70,2295	0,1481	91,3748	21,1453
20	71,0588	0,3755	91,1566	20,0978
21	70,9461	0,0493	90,8475	19,9014
22	70,8354	0,0493	90,8474	20,0120
23	71,6923	0,0493	90,8467	19,1544
24	68,6548	0,3755	90,7711	22,1163
25	67,9807	0,1251	90,5667	22,5860
26	67,6924	0,0751	90,5653	22,8729
27	67,2526	0,0751	90,5330	23,2804
28	67,1117	0,0528	90,4897	23,3780
29	67,0489	0,0528	90,4858	23,4369
30	67,0434	0,0528	90,4839	23,4405
31	66,7423	0,0213	90,5072	23,7649
32	66,8095	0,0213	90,5072	23,6977
33	66,8760	0,0213	90,5071	23,6311
34	65,3841	0,0213	90,4798	25,0957
35	65,2019	0,0213	90,4608	25,2589
36	65,2768	0,0213	90,4448	25,1680
37	64,7860	0,0213	90,4305	25,6445
38	65,0190	0,0528	90,4131	25,3941
39	64,0606	0,0528	90,3961	26,3355
40	63,9690	0,0528	90,3848	26,4158
41	63,8026	0,0528	90,3753	26,5727
42	64,4077	0,0528	90,3677	25,9600
43	64,0673	0,0528	90,3604	26,2931

(conclusão)

Nó	Cota (m)	C (L/s)	Cota Piezométrica (m)	P (mca)
44	63,9499	0,0528	90,3575	26,4076
45	63,3889	0,0528	90,3555	26,9666
46	74,4482	0,1671	91,6827	17,2345
47	68,6128	0,1251	90,5639	21,9511
48	68,8160	0,1251	90,5619	21,7459
49	66,0872	0,0528	90,4876	24,4004
50	65,9116	0,0528	90,4839	24,5723
51	65,6107	0,0528	90,4820	24,8713
52	66,6881	0,0528	90,4820	23,7939
53	65,3010	0,0528	90,4800	25,1790
54	65,4386	0,0213	90,4606	25,0220
55	65,6870	0,0528	90,3828	24,6958
56	65,2959	0,0528	90,3588	25,0629
57	65,1254	0,0528	90,3558	25,2304
58	63,3276	0,0528	90,3547	27,0271
59	62,9736	0,0528	90,3482	27,3746
60	63,1710	0,0528	90,3474	27,1764

Fonte: Elaborado pelo autor.

**APÊNDICE Z – DADOS DOS TRECHOS OBTIDOS PELA SIMULAÇÃO DA REDE
CT-CCHL, APÓS CALIBRAÇÃO**

(continua)

Trecho	L (m)	D (mm)	ε (mm)	Q (L/s)	V (m/s)	∇H (m/km)
1	62,8882	100	2,5850	5,0207	0,6393	11,3769
2	22,5371	100	2,5850	4,8726	0,6204	10,7199
3	65,3110	100	2,5850	4,0561	0,5164	7,4496
4	31,1483	100	2,5850	3,7599	0,4787	6,4095
5	68,3253	100	2,5850	3,2363	0,4121	4,7624
6	19,0909	100	2,5850	2,9403	0,3744	3,9393
7	88,7746	100	2,5850	2,1893	0,2787	2,2001
8	21,1204	100	0,0817	1,7389	0,2214	0,6813
9	55,7970	100	0,0817	1,5887	0,2023	0,5793
10	32,7030	100	0,0817	1,4385	0,1832	0,4844
11	38,5673	100	0,0817	0,9948	0,1267	0,2516
12	14,5270	100	0,0817	0,9096	0,1158	0,2145
13	85,0614	100	0,0817	0,8883	0,1131	0,2058
14	36,3783	100	0,0817	0,8670	0,1104	0,1974
15	134,6862	77,2	2,5850	0,6684	0,1428	0,8554
16	16,9321	77,2	2,5850	0,5013	0,1071	0,4889
17	86,1530	77,2	2,5850	0,3342	0,0714	0,2241
18	26,5750	77,2	2,5850	0,1481	0,0316	0,0210
19	68,2240	77,2	2,5850	0,3755	0,0802	0,2803
20	150,3912	77,2	0,0817	0,1479	0,0316	0,0192
21	7,9406	77,2	0,0817	0,0986	0,0211	0,0117
22	114,9074	77,2	0,0817	0,0493	0,0105	0,0059
23	14,6281	77,2	2,5850	0,3755	0,0802	0,2798
24	71,6484	77,2	0,4689	0,3753	0,0802	0,1829
25	21,4609	77,2	0,0817	0,0751	0,0160	0,0091
26	21,4164	77,2	0,0817	0,0751	0,0160	0,0087
27	142,3339	77,2	0,0817	0,4224	0,0902	0,1936
28	33,3337	77,2	0,0817	0,3168	0,0677	0,1178
29	37,5624	77,2	0,0817	0,2112	0,0451	0,0518
30	52,6711	77,2	0,0817	0,0639	0,0137	0,0076
31	3,3041	77,2	0,0817	0,0426	0,0091	0,0056
32	29,6459	77,2	0,0817	0,0213	0,0046	0,0025
33	14,1666	77,2	0,0817	0,0213	0,0046	0,0020
34	30,3078	77,2	0,0817	0,8244	0,1761	0,6282
35	27,9673	77,2	0,0817	0,7818	0,1670	0,5721
36	26,2714	77,2	0,0817	0,7605	0,1625	0,5442
37	33,4928	77,2	0,0817	0,7392	0,1579	0,5177
38	37,4009	77,2	0,0817	0,6864	0,1466	0,4539
39	28,7191	77,2	0,0817	0,6336	0,1354	0,3942
40	33,3236	77,2	0,0817	0,5280	0,1128	0,2858
41	32,0834	77,2	0,0817	0,4752	0,1015	0,2377
42	37,5729	77,2	0,0817	0,4224	0,0902	0,1936
43	24,7431	77,2	0,0817	0,3168	0,0677	0,1177

(conclusão)

Trecho	L (m)	D (mm)	ε (mm)	Q (L/s)	V (m/s)	∇H (m/km)
44	38,8240	77,2	0,0817	0,2112	0,0451	0,0520
45	100,0646	54,6	2,5850	0,1671	0,0714	0,3640
46	30,4196	54,6	0,4689	0,1251	0,0534	0,0927
47	52,0156	54,6	0,4689	0,1251	0,0534	0,0928
48	86,3705	54,6	0,0817	0,0528	0,0226	0,0252
49	74,1890	54,6	0,0817	0,0528	0,0226	0,0252
50	75,0975	54,6	0,0817	0,0528	0,0226	0,0253
51	33,4679	54,6	0,0817	0,1056	0,0451	0,0553
52	78,1603	54,6	0,0817	0,0528	0,0226	0,0252
53	14,1666	54,6	0,0817	0,0213	0,0091	0,0105
54	79,0951	54,6	0,0817	0,0528	0,0226	0,0252
55	63,6342	54,6	0,0817	0,0528	0,0226	0,0251
56	68,0692	54,6	0,0817	0,0528	0,0226	0,0251
57	4,4099	54,6	0,0817	0,1584	0,0677	0,1751
58	117,5479	54,6	0,0817	0,1056	0,0451	0,0553
59	29,9297	54,6	0,0817	0,0528	0,0226	0,0255

Fonte: Elaborado pelo autor.