



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

**RAFAEL BRITO AGUIAR DE ARAUJO**

**DETECÇÃO DE VAZAMENTOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA  
ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DO MÉTODO ITERATIVO DO GRADIENTE  
HIDRÁULICO ALTERNATIVO (MIGHA)**

**FORTALEZA**

**2020**

RAFAEL BRITO AGUIAR DE ARAUJO

DETECÇÃO DE VAZAMENTOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA ATRAVÉS  
DA APLICAÇÃO DO MÉTODO ITERATIVO DO GRADIENTE HIDRÁULICO  
ALTERNATIVO (MIGHA)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Professor Marco Aurelio Holanda de Castro, PhD.

FORTALEZA

2020

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

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

---

A691d Araujo, Rafael Brito Aguiar de.  
Detecção de vazamentos em redes de distribuição de água através da aplicação do Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo (MIGHA) / Rafael Brito Aguiar de Araujo. – 2020.  
88 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2020.  
Orientação: Prof. Dr. Marco Aurélio Holanda de Castro.

1. Calibração. 2. Redes de distribuição de água. 3. Vazamentos. I. Título.

CDD 388

---

RAFAEL BRITO AGUIAR DE ARAUJO

DETECÇÃO DE VAZAMENTOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA ATRAVÉS  
DA APLICAÇÃO DO MÉTODO ITERATIVO DO GRADIENTE HIDRÁULICO  
ALTERNATIVO (MIGHA)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Aprovada em: 07/02/2020.

BANCA EXAMINADORA

---

Professor Marco Aurelio Holanda de Castro, Ph.D. (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará - UFC

---

Professor D.Sc. José Capelo Neto (Membro Interno)  
Universidade Federal do Ceará - UFC

---

Professor D.Sc. Lindemberg Lima Fernandes (Membro Externo)  
Universidade Federal do Pará – UFPA

*A minha mãe, Marcia Maria de Brito Aguiar,  
Exemplo de mulher e mãe.*

## AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho aos meus pais, Marcia Maria de Brito Aguiar e Alberto Childe Aguiar de Araujo, que acreditaram e me apoiaram neste projeto e, apesar de todas as dificuldades, fizeram-me entender que o futuro é feito a partir da constante dedicação no presente.

Ao Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a janela que hoje vislumbro um horizonte superior, eivado pela acendrada confiança no mérito e ética aqui presentes.

Ao Prof. Marco Aurélio Holanda de Castro, por ter me acolhido como orientando, pela paciência e prontidão. Por ter me concedido a oportunidade de compartilhar o seu conhecimento a respeito da engenharia hidráulica, contribuindo de tal forma para minha formação como profissional. A minha mais sincera gratidão.

Aos professores Alessandro de Araújo Bezerra e Renata Shirley de Andrade Araújo, por terem me ajudado desde a graduação até o presente momento. Profissionais exemplares, muito obrigado por tudo!

A minha namorada, Janaína Santos de Araújo, por ter me acompanhado por todos os anos de graduação e pós-graduação, incentivando-me e dando forças para que eu nunca desviasse do meu caminho principal.

Ao grande amigo David Lopes de Sousa, colega de graduação e mestrado, que foi essencial para o meu desenvolvimento como pessoa e profissional, minha gratidão pelo apoio e amizade.

Aos meus novos colegas e amigos, Vicente de Castro Sanders Neto e Bruno Araújo Paiva, que sempre me apoiaram e ajudaram em todos os momentos que precisei durante esta jornada.

Ao corpo docente da Pós-Graduação em Engenharia Civil, na área de concentração: Recursos Hídricos, em especial aos Professores Assis Filho, Kenedy, Paulo Roberto e Ticiania, eu vos gratifico pelo incentivo à produção acadêmica, pelo apoio e dedicação ao aluno durante as aulas.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001

*“... The will to win, the desire to succeed,  
the urge to reach your full potential, these are  
the keys that will unlock the door to personal  
excellence...”*

*Confucius*

## RESUMO

O MIGHA se baseia nos princípios da minimização de uma função objetivo a partir das diferenças entre dos gradientes hidráulicos observados e calculados através de procedimentos iterativos, com os parâmetros iniciais arbitrários sendo ajustados a cada novo ciclo de iteração. Calibração pode ser definida como o processo de ajuste dos parâmetros de um modelo para que o comportamento apresentado por este seja semelhante aos resultados obtidos em campo. Este trabalho tem como objetivo detectar possíveis pontos de vazamentos em redes de distribuição de água através da calibração de vazões em trechos de redes mediante dados de pressão manométrica observados. Para realizar o processo de calibração aplicou-se o Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo (MIGHA) através de modelagem computacional. Para cada calibração foram realizadas várias iterações e os melhores resultados foram determinados aplicando diferentes funções objetivo. Depois de obtidos os resultados das calibrações aplicou-se uma rotina computacional para identificar todos os possíveis trechos e nós das redes com indícios de vazamentos. Utilizou-se ainda uma equação para estimar a localização do vazamento nos trechos identificados. Para todos os casos foi testada a influência da quantidade de dados de pressão observados. Os resultados mostraram que para detectar precisamente a localização dos vazamentos é necessário ter dados observados de pressão para todos os nós das redes analisadas. A rotina computacional aplicada para detecção de possíveis vazamentos na rede obteve resultados satisfatórios nos testes em que os pontos de vazamento estavam localizados em trechos isolados de qualquer outro com vazamento, ou seja, que não possuíam nós em comum. Para redes em geral, mesmo que a rotina não tenha conseguido, em algumas situações, estimar os pontos exatos onde se encontram os vazamentos, ela ainda conseguiu localizar os possíveis nós e trechos em que os vazamentos estão localizados.

**Palavras-chave:** Calibração. Redes de Distribuição de Água. Vazamentos.



## ABSTRACT

The MIGHA is based on the principles of minimizing a target function from the differences between hydraulic gradients observed and calculated through iterative procedures, with arbitrary initial parameters being adjusted with each new iteration cycle. Calibration can be defined as the process of adjusting the parameters of a model so that its behavior is similar to the results obtained in the field. This work aims to detect possible leakage points in water distribution networks by calibrating flow rates in network sections through observed gauge pressure data. To perform the calibration process, the Alternative Hydraulic Gradient Iterative Method (MIGHA) was applied through computational modeling. For each calibration several iterations were performed and the best results were determined by applying different objective functions. After obtaining the calibration results, a computational routine was applied to identify all possible sections and nodes of the networks with indications of leaks. An equation was also used to estimate the location of the leak in the identified sections. For all cases the influence of the amount of pressure data observed was tested. The results showed that to accurately detect the location of the leaks it is necessary to have observed pressure data for all nodes of the analyzed networks. The computational routine applied to detect possible leaks in the network obtained satisfactory results in the tests in which the leak points were located in sections isolated from any other with leaks, that is, that had no nodes in common. For networks in general, even if the routine cannot, in some situations, estimate the exact points where the leaks are located, it still managed to locate the possible nodes and sections where the leaks are located.

**Keywords:** Calibration. Water Distribution. Networks, Leaks.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Linha piezométrica e de energia durante o regime permanente.....	24
Figura 2	– Fluxograma do processo MIGHA para calibração de vazões e cálculo do consumo.....	34
Figura 3	– Fluxograma da rotina proposta para a calibração da vazão, cálculo do consumo nodal e detecção de possíveis pontos de vazamento na rede.....	37
Figura 4	– Representação da Rede UFC2 através do Sistema UFC.....	39
Figura 5	– Representação da Rede UFC2 modelada no Epanet2.....	40
Figura 6	– Representação da Rede Ilhéus-BA modelada no Epanet2.....	42
Figura 7	– Representação da Rede Walski (1983) – Gambale (2000) modelada no Epanet2.....	44
Figura 8	– Pressão manométrica observada inserida no nó.....	45
Figura 9	– Caixa de diálogo para inserção da pressão conhecida.....	46
Figura 10	– Pressão conhecida inserida no nó.....	46
Figura 11	– Seleção do elemento para edição.....	47
Figura 12	– Interface do UFC10 desenvolvida para o usuário – Java.....	48
Figura 13	– Janela com resultados da calibração.....	48
Figura 14	– Janela com informações referentes aos vazamentos detectados pela rotina....	49
Figura 15	– Resultados obtidos através da utilização da rotina para detecção de vazamentos na configuração 1 (Rede UFC2).....	54
Figura 16	– Resultados obtidos através da utilização da rotina para detecção de vazamentos na configuração 2 (Rede UFC2).....	55
Figura 17	– Resultados obtidos através da utilização da rotina para detecção de vazamentos na configuração 3 (Rede UFC2).....	57
Figura 18	– Resultados obtidos através da utilização da rotina para detecção de vazamentos na configuração 1 (Rede Ilhéus-BA).....	58

Figura 19	– Resultados obtidos através da utilização da rotina para detecção de vazamentos na configuração 2 (Rede Ilhéus-BA).....	59
Figura 20	– Resultados obtidos através da utilização da rotina para detecção de vazamentos na configuração 3 (Rede Ilhéus-BA).....	60
Figura 21	– Resultados obtidos através da utilização da rotina para detecção de vazamentos na configuração 1 (Rede Walski (1983) – Gambale (2000))....	61
Figura 22	– Resultados obtidos através da utilização da rotina para detecção de vazamentos na configuração 2 (Rede Walski (1983) – Gambale (2000))....	62
Figura 23	– Resultados obtidos através da utilização da rotina para detecção de vazamentos na configuração 3 (Rede Walski (1983) – Gambale (2000))....	63
Figura A1	– Erros relativos por função objetivo para as pressões (Rede UFC2).....	71
Figura A2	– Erros absolutos por função objetivo para as pressões (Rede UFC2).....	71
Figura A3	– Erros relativos por função objetivo para os consumos nodais (Rede UFC2).....	72
Figura A4	– Erros absolutos por função objetivo para os consumos nodais (Rede UFC2).	72
Figura A5	– Erros relativos por função objetivo para as vazões (Rede UFC2).....	73
Figura A6	– Erros absolutos por função objetivo para as vazões (Rede UFC2).....	73
Figura A7	– Erros relativos por função objetivo para as pressões (Rede Ilhéus-BA).....	74
Figura A8	– Erros absolutos por função objetivo para as pressões (Rede Ilhéus-BA)....	74
Figura A9	– Erros relativos por função objetivo para os consumos nodais (Rede Ilhéus BA).....	75
Figura A10	– Erros absolutos por função objetivo para os consumos nodais (Rede Ilhéus-BA).....	75
Figura A11	– Erros relativos por função objetivo para as vazões (Rede Ilhéus-BA).....	
Figura A12	– Erros absolutos por função objetivo para as vazões (Rede Ilhéus-BA).....	76
Figura B1	– Consumos nodais para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 1 (Rede UFC2).....	77

Figura B2	– Consumos nodais para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 2 (Rede UFC2).....	77
Figura B3	– Consumos nodais para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 3 (Rede UFC2).....	78
Figura B4	– Consumos nodais para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 4 (Rede UFC2).....	78
Figura B5	– Pressões manométricas para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 1 (Rede UFC2).....	79
Figura B6	– Pressões manométricas para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 2 (Rede UFC2).....	79
Figura B7	– Pressões manométricas para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 3 (Rede UFC2).....	80
Figura B8	– Pressões manométricas para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 4 (Rede UFC2).....	80
Figura B9	– Vazões para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 1 (Rede UFC2).....	81
Figura B10	– Vazões para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 2 (Rede UFC2).....	81
Figura B11	– Vazões para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 3 (Rede UFC2).....	82
Figura B12	– Vazões para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 4 (Rede UFC2).....	82
Figura B13	– Consumos nodais para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 1 (Rede Ilhéus-BA).....	83
Figura B14	– Consumos nodais para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 2 (Rede Ilhéus-BA).....	83
Figura B15	– Consumos nodais para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 3 (Rede Ilhéus-BA).....	84

Figura B16 – Consumos nodais para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 4 (Rede Ilhéus-BA).....	84
Figura B17 – Pressões manométricas para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 1 (Rede Ilhéus-BA).....	85
Figura B18 – Pressões manométricas para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 2 (Rede Ilhéus-BA).....	85
Figura B19 – Pressões manométricas para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 3 (Rede Ilhéus-BA).....	86
Figura B20 – Pressões manométricas para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 4 (Rede Ilhéus-BA).....	86
Figura B21 – Vazões para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 1 (Rede Ilhéus-BA).....	87
Figura B22 – Vazões para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 2 (Rede Ilhéus-BA).....	87
Figura B23 – Vazões para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 3 (Rede Ilhéus-BA).....	88
Figura B24 – Vazões para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 4 (Rede Ilhéus-BA).....	88

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Gabaritos referentes aos trechos da Rede UFC2.....	40
Tabela 2 – Gabaritos referentes aos nós da Rede UFC2.....	41
Tabela 3 – Gabaritos referentes aos trechos da Rede Ilhéus-BA.....	42
Tabela 4 – Gabaritos referentes aos nós da Rede Ilhéus-BA.....	43
Tabela 5 – Gabaritos referentes aos trechos da Rede Walski (1983) – Gambale (2000).	43
Tabela 6 – Gabaritos referentes aos nós da Rede Walski (1983) – Gambale (2000).....	44
Tabela 7 – Disposições dos nós com dados observados de pressão (Rede UFC2).....	49
Tabela 8 – Erros médios relativos e absolutos provenientes da calibração das vazões para diferentes funções objetivo (Rede UFC2).....	50
Tabela 9 – Disposições dos nós com dados observados de pressão (Rede Ilhéus-BA)...	51
Tabela 10 – Erros médios relativos e absolutos provenientes da calibração das vazões para diferentes funções objetivo (Rede Ilhéus-BA).....	51
Tabela 11 – Erros médios relativos (Rede Walski (1983) – Gambale (2000)).....	52
Tabela 12 – Erros médios absolutos (Rede Walski (1983) – Gambale (2000)).....	53

## LISTA DE VARIÁVEIS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>	<b>Dimensão</b>
C	Coefficiente de rugosidade de Hazen-Williams	$[L^{0,367}T^{-1}]$
D	Diâmetro do trecho	[L]
f	Fator de atrito	[-]
g	Aceleração da gravidade	$[LT^{-2}]$
i	Índice referente a iteração	[-]
j	Índice referente ao trecho	[-]
k <sub>1</sub>	Coefficiente do dia de maior consumo	[-]
k <sub>2</sub>	Coefficiente da hora de maior consumo	[-]
L	Comprimento do trecho	[L]
nN	Número de nós da rede	[-]
nT	Número de trechos da rede	[-]
p	Pressão relativa interna na tubulação	$[ML^{-1}T^{-2}]$
P <sub>c</sub>	Pressão no nó da Rede Calculada	[L]
P <sub>o</sub>	Pressão no nó da Rede Observada	[L]
Pop	População a ser abastecida	[-]
Q <sub>dis</sub>	Vazão de distribuição	$[L^3T^{-1}]$
q <sub>m</sub>	Taxa ou cota de consumo per capita média da população do projeto	$[L^3T^{-1}]$
Q <sub>c</sub>	Vazão no trecho da Rede Calculada	$[L^3T^{-1}]$
Q <sub>o</sub>	Vazão no trecho da Rede Observada	$[L^3T^{-1}]$
Re <sub>y</sub>	Número de Reynolds	[-]
T	Transmissividade	$[LT^{-1}]$
V	Velocidade no trecho	[L]
z	Energia ou carga de posição	[L]
$\nabla H$	Gradiente Hidráulico (perda de carga unitária)	[-]
$\varepsilon$	Rugosidade absoluta	[L]
$\mu$	Viscosidade dinâmica do fluido	$[ML^{-1}T^{-1}]$

$\nu$	Viscosidade cinemática do fluido	$[L^2T^{-1}]$
$\theta$	Ângulo formado entre os vetores dos gradientes hidráulicos observados e calculados	[-]
$\Delta H$	Perda de energia ou perda de carga	[L]
$\nabla H_o$	Gradiente Hidráulico no trecho da Rede Observada	[-]
$\nabla H_c$	Gradiente Hidráulico no trecho da Rede Calculada	[-]
$D_V$	Distância do vazamento	[L]
$Con_C$	Consumo calculado no nó	$[L^{-3}T^{-1}]$
$Con_G$	Consumo gabarito no nó	$[L^{-3}T^{-1}]$



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas
EPANET	Programa computacional de dimensionamento de sistemas hidráulicos
<i>fobj</i>	Função Objetivo
MIGHA	Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
SNIS	Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento
UFC2	Módulo do sistema UFC responsável por desenhar o traçado de redes de distribuição de água
UFC10	Módulo do sistema UFC responsável por calibrar de redes de distribuição de água

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>18</b>
1.1	Objetivo.....	19
1.2	Estrutura da dissertação.....	20
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>20</b>
2.1	Sistemas de abastecimento de água .....	20
2.2	Parâmetros iniciais para o cálculo de redes de distribuição de água.....	22
2.3	Hidráulica de redes de distribuição de água.....	23
2.3.1	<i>Classificação dos escoamentos.....</i>	23
2.3.2	<i>Determinação da linha de energia e linha piezométrica.....</i>	23
2.3.3	<i>Perda de carga em condutos forçados.....</i>	25
2.3.4	<i>Dimensionamento de redes de distribuição de água.....</i>	26
2.3.5	<i>Perdas de água nas redes de distribuição.....</i>	27
2.3.6	<i>Simulação de redes de distribuição de água através do software EPANET.....</i>	28
2.4	Calibração em redes de distribuição.....	29
2.5	O Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativa (MIGHA).....	30
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>34</b>
3.1	Caracterização do objeto de estudo da pesquisa.....	34
3.2	Rotina desenvolvida para detecção de vazamentos através da aplicação computacional do MIGHA.....	35
3.3	Funções objetivo utilizadas.....	38
3.4	Redes utilizadas para os testes.....	38
3.4.1	<i>Rede UFC2.....</i>	41
3.4.2	<i>Rede Ilhéus-BA.....</i>	43
3.4.3	<i>Rede Walski (1983) – Gambale (2000).....</i>	45
3.5	Implementação da rotina desenvolvida no software UFC 10.....	45
3.5.1	<i>Aplicativo UFC10 interno ao AutoCAD.....</i>	47
3.5.2	<i>Aplicativo UFC10 externo ao AutoCAD – Java.....</i>	49
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>49</b>
4.1	Calibrações.....	49
4.1.1	<i>Rede UFC2.....</i>	51

<b>4.1.2</b>	<b><i>Rede Ilhéus-BA</i></b> .....	51
<b>4.1.3</b>	<b><i>Rede Walski (1983) – Gambale (2000)</i></b> .....	52
<b>4.2</b>	<b>Detecção de vazamentos</b> .....	53
<b>4.2.1</b>	<b><i>Rede UFC2</i></b> .....	53
4.2.1.1	<i>Teste 1</i> .....	53
4.2.1.2	<i>Teste 2</i> .....	55
4.2.1.3	<i>Teste 3</i> .....	56
<b>4.2.2</b>	<b><i>Rede Ilhéus-BA</i></b> .....	57
4.2.2.1	<i>Teste 1</i> .....	57
4.2.2.2	<i>Teste 2</i> .....	58
4.2.2.3	<i>Teste 3</i> .....	60
<b>4.2.3</b>	<b><i>Rede Walski (1983) – Gambale (2000)</i></b> .....	61
4.2.3.1	<i>Teste 1</i> .....	61
4.2.3.2	<i>Teste 2</i> .....	62
4.2.3.3	<i>Teste 3</i> .....	63
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	65
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	67
	<b>APÊNDICE</b> .....	71
	<b>APÊNDICE A – GRÁFICOS COM OS ERROS POR FUNÇÃO OBJETIVO</b> .....	71
	<b>APÊNDICE B – GRÁFICOS COM OS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES</b> .....	77

## 1 INTRODUÇÃO

Estima-se que 2,5% da água líquida do planeta é doce, a maior parte (69%) é de difícil acesso, pois está concentrada nas geleiras, 30% são águas subterrâneas (armazenadas em aquíferos) e 1% encontra-se nos rios (ANA, 2018). Logo, o uso desse bem precisa ser pensado para que não prejudique nenhum dos diferentes usos que ela tem para a vida humana.

Os sistemas de distribuição de água são construídos para fornecer água a consumidores domésticos, industriais e comerciais. O design, a operação e o gerenciamento desses sistemas de distribuição geralmente são suportados pela aplicação de modelos hidráulicos, criados para replicar o comportamento de sistemas reais.

Atualmente, a utilização de métodos computacionais para projetar e simular o comportamento das redes de distribuição de água e demais projetos de engenharia é de suma importância. A calibração é um dos procedimentos experimentais bastante utilizado através de métodos computacionais. Calibrar consiste em estabelecer, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por medições e valores estabelecidos como padrão.

Para simular, computacionalmente, de forma adequada uma rede de distribuição, é necessário que haja a calibração dos coeficientes da rede de distribuição. A calibração da rede visa adequar um modelo computacional para que este possa simular a rede estudada com base em dados observados da rede real.

Os modelos convencionais orientados por demanda simulam fluxos e pressões de um sistema de distribuição de água, exigindo suposições de demandas conhecidas e status de válvula conhecidos. Devido ao comportamento estocástico das demandas de água e à complexidade da rede de tubulação, essas premissas geralmente levam a um entendimento inadequado de toda a gama de estados operacionais no sistema de água.

A instalação de dispositivos sensores em uma rede pode fornecer informações sobre alguns componentes no sistema. No entanto, a calibração das demandas de água e a identificação dos status das válvulas ainda não são viáveis ou muito difíceis, sendo atribuíveis ao número limitado habitual de dispositivos de medição disponíveis na maioria das redes de água reais.

Os métodos implícitos ou de otimização, que buscam a minimização de uma função objetivo, são muito utilizados nos processos de calibração. Entre estes métodos está o Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo (MIGHA) que foi desenvolvido para calibração da transmissividade no escoamento subterrâneo por Schuster e Araújo (2004) e,

posteriormente, adaptado para redes de distribuição de água, por Bezerra (2018), para a calibração das vazões nos trechos de redes de distribuição de água.

Segundo relatório do SNIS (2019) as perdas de água no abastecimento do país em 2017 foram de 38,3%, na região Nordeste chegaram a 46,3% e no Ceará a 45,7% em regiões abastecida pela CAGECE, a maior companhia distribuidora deste estado. Dentre os fatores que ocasionam esta perda estão os vazamentos nas tubulações e conexões, ligações ilegais e erros nos aparelhos de medição. Silva (2019) afirma que o desperdício de água acarreta em maior custo para a operadora da rede, que deve retirar e tratar um volume maior do que necessário, repassando este aumento ao consumidor final.

Soares et al. (2004) consideram que não existem sistemas estanques, ou seja, toda rede de distribuição de água já implantada apresenta alguma parcela de perda de água. As companhias de água e saneamento enfrentam sérios desafios no que diz respeito à detecção e reparo de vazamentos nas redes de abastecimento de água. De acordo com os dados do Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento (SNIS) de 2015, o Brasil perde cerca de 40% da água tratada com vazamentos e fraudes. A detecção de vazamentos hoje é realizada, em grande parte, através de equipes especializadas das companhias de água e saneamento, utilizando equipamentos que funcionam através da reflexão de ondas sonoras para detectar os pontos de vazamento.

Para Sousa (2019), um dos desafios para fazer a modelagem hidráulica da rede está na equação que melhor representa a vazão produzida por uma ruptura na tubulação. Uma das hipóteses geralmente encontradas nos trabalhos desta área é a modelagem simples do volume de vazamento em função da pressão a partir da equação geral de orifício. Essa simplificação pode induzir a erros na simulação hidráulica, uma vez que outros fatores importantes para essa relação são omitidos.

A principal desvantagem da modelagem hidráulica está na dificuldade em determinar quais são os valores reais dos parâmetros a serem utilizados. Para resolver esse problema, diferentes pesquisadores têm aplicado à engenharia reversa, ou seja, a partir de dados observados, determinar os parâmetros reais de uma rede de distribuição de água. Dados de pressão e de vazão bastante são utilizados para calibrar o sistema e conhecer quais são os parâmetros da rede.

Como forma de diminuir os gastos com manutenção e aumentar a eficiência dos processos normalmente utilizados para detectar pontos de vazamento em redes, planeja-se utilizar o Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo (MIGHA) para realizar a

calibração das vazões de uma rede através de uma rotina computacional, com o objetivo de detectar pontos de vazamento em redes de abastecimento de água.

### **1.1 Objetivo**

O objetivo deste trabalho é aplicar o Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo (MIGHA) para realizar a calibração das vazões dos trechos de redes de distribuição de água com o intuito de identificar pontos de vazamentos através de modelagem computacional. Os objetivos específicos são:

- Desenvolver um modelo computacional para calibrar as vazões dos trechos de três redes de distribuição de água através da aplicação do MIGHA;
- Analisar os resultados das calibrações com diferentes quantidades de dados observados de pressão manométrica;
- Aplicar a rotina computacional desenvolvida para detectar os pontos de vazamento;
- Analisar os resultados encontrados;

### **1.2 Estrutura da dissertação**

Este documento está dividido em 5 capítulos. No primeiro é apresentada a introdução ao tema, bem como a justificativa do trabalho e os objetivos. No segundo é descrito o processo adotado para realizar a calibração das vazões nos trechos das redes de distribuição de água estudadas. No Capítulo 3 é apresentada a rotina computacional desenvolvida para realizar a detecção de vazamentos em redes de distribuição de água. Os resultados destas análises e suas discussões são feitas no Capítulo 4. Por fim, o capítulo 5 mostra as conclusões do trabalho.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Sistemas de abastecimento de água**

A água é a substância simples mais abundante no planeta Terra e pode ser encontrada tanto no estado líquido, gasoso ou sólido, na atmosfera, sobre ou sob a superfície

terrestre, nos oceanos, mares, rios e lagos. Cientistas estimam que o nosso planeta tem três quartos de sua massa só de água (SPERLING, 1996), ou seja, 1 trilhão e 360 bilhões de quilômetros cúbicos.

O primeiro sistema público de abastecimento e água de que se tem notícia, o aqueduto de Jerwan, foi construído na Assíria, 691 a.C. Grandes aquedutos romanos foram construídos em várias partes do mundo, a partir de 312 a.C (AZEVEDO NETTO, 2018).

Para Heller (2015) o uso da água não é só uma necessidade, mas um direito humano. Para ele, garantir esse direito é fornecer água com disponibilidade, acessibilidade, qualidade e segurança, cumprindo os requisitos de aceitabilidade, dignidade e privacidade.

Com o aumento da densidade demográfica, a instalação de um sistema público de abastecimento de água torna-se a solução mais econômica e definitiva. O fornecimento de água para ser satisfatório deve ter como princípios a seguinte dualidade: quantidade e qualidade. Em quantidade de modo que atenda todas as necessidades de consumo e em qualidade adequada as finalidades que se destina.

Um sistema de abastecimento de água consiste no conjunto de obras, equipamentos e serviços com o objetivo de levar água potável para uso no consumo doméstico, indústria, serviço público, entre outros. Um sistema de abastecimento de água é formado por diversas unidades, sendo elas:

- Manancial: é a fonte de onde se retira a água para o abastecimento da região;
- Captação: consiste nos equipamentos e instalações que retiram a água do manancial e a redireciona para o sistema de abastecimento;
- Adução: é a tubulação responsável por ligar a captação ao tratamento e/ou o tratamento à rede de distribuição. Pode funcionar por gravidade ou recalque;
- Tratamento: consiste na etapa capaz de tornar a qualidade da água captada adequada ao consumo da população. Após passar pela estação de tratamento a água deixa de ser chamada de água bruta para ser chamada de água tratada;
- Reservatório: tem a finalidade de armazenar a água. Para Tsutiya (2006) seu objetivo é atender as demandas de emergência, manter uma pressão constante na rede e atender a variação de consumo.
- Rede de distribuição: é composta por tubulações, conexões e outras peças com a finalidade de distribuir água para os consumidores em quantidade, qualidade e pressão adequadas.
- Ramal domiciliar: tubulação que liga a rede de distribuição à residência.

Os sistemas de distribuição de água são construídos para fornecer água a consumidores domésticos, industriais e comerciais. O design, a operação e o gerenciamento desses sistemas de distribuição geralmente são suportados pela aplicação de modelos hidráulicos, criados para replicar o comportamento de sistemas reais. Os modelos convencionais orientados por demanda simulam fluxos e pressões de um sistema de distribuição de água, exigindo suposições de demandas conhecidas e status de válvula conhecidos.

Os sistemas complexos de distribuição de água das cidades de médio e grande porte cada vez mais precisam de um controle operacional rigoroso a fim de minimizar os gastos com energia elétrica e manutenção como, também, de maximizar a eficiência do sistema (RIGHETTO, 2001).

A grande maioria dos projetos e operações em redes de distribuição de água são realizados tendo como premissa que o sistema funciona em regime permanente, considerando fixos os consumos nodais e níveis de água nos reservatórios, como nos trabalhos Sarbu (2014) e Araújo e Bezerra (2016).

Para Garcez e Azevedo Netto (2018) a rede de distribuição de água é o elemento do sistema de abastecimento de maior importância econômica, atingindo de 60% a 90% do custo total do sistema. Tsutiya (2006) estima seu custo entre 50% e 75%. Já Heller e Pádua (2010) consideram que seu custo é responsável por mais de 50% do custo de implantação do sistema.

## **2.2 Parâmetros iniciais para o cálculo de redes de distribuição de água**

Bezerra (2018) explica que para realizar a análise hidráulica de uma rede de distribuição de água é necessário conhecer alguns parâmetros iniciais como: o horizonte de projeto, população, consumo *per capita* de água, o coeficiente do dia de maior consumo e o coeficiente da hora de maior consumo.

Em engenharia, o horizonte de projeto pode ser entendido como lapso de tempo durante o qual se estima que o projeto deva atender plenamente seus objetivos. Assim, no cronograma do projeto podem ser definidas várias etapas, possibilitando dosar o investimento inicial, e adaptar o tamanho das obras para a demanda efetiva para um determinado serviço em um determinado período de tempo.

O cálculo do consumo per capita, segundo o Relatório “Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto - 2013” (PAVIANI, 2015) é a média diária para atender não apenas o



consumo residencial, mas também o comercial, o público e o industrial, ficando de fora a agropecuária. Silva e Chichorro (2008) afirmaram que a média nacional de consumo bruto de água por habitante é de 150 L/hab.dia.

Porto (2006) explica que o coeficiente do dia de maior consumo corresponde à relação entre o maior consumo diário de um ano e o consumo diário médio daquele mesmo ano. Já o coeficiente da hora de maior consumo corresponde à relação entre o maior consumo horário ao longo do dia de maior consumo e o consumo horário médio do dia de maior consumo. De acordo com a NBR 12.218/2017 (ABNT, 2017), os valores recomendados para os coeficientes são de 1,2 e 1,5, respectivamente.

O cálculo da vazão inicial de projeto pode ser realizado através da Equação 1.

$$Q_p = \frac{P \cdot q \cdot k_1 \cdot k_2}{86400} \quad (1)$$

Em que  $Q_p$  (L/s) é a vazão de projeto,  $P$  é a população,  $q$  (L/hab.dia) é o consumo *per capita*,  $k_1$  é o coeficiente do dia de maior consumo e  $k_2$  é o coeficiente da hora de maior consumo.

## 2.3 Hidráulica de redes de distribuição de água

O estudo da hidráulica e afins inicia-se na determinação de regras e equações para o escoamento permanente em condutos forçados com base nos princípios e leis da Dinâmica e da teoria da turbulência (PORTO, 2006).

### 2.3.1 Classificação dos escoamentos

Segundo Azevedo Netto (2018), escoamento permanente é aquele cujas características como força, velocidade e pressão são função exclusiva de ponto e independem do tempo. A vazão neste tipo de escoamento é considerada constante em um determinado ponto. As características do escoamento não permanente, além de mudarem de ponto para ponto, variam de instante em instante, isto é, em função do tempo. Para Porto (2006), no caso em que as propriedades e características hidráulicas, em cada ponto do espaço, forem invariantes no tempo, o escoamento é classificado como permanente; caso contrário, é dito ser não permanente ou variável.

Tucci (2015) explica que o escoamento permanente pode ser classificado ainda como uniforme se a velocidade média permanecer constante ao longo do fluxo. No caso contrário, o movimento permanente pode ser acelerado ou retardado.

### 2.3.2 Determinação da linha de energia e linha piezométrica

Para o caso particular do escoamento permanente (PORTO, 2006), aplica-se a equação de Bernoulli para a determinação dos principais parâmetros de Carga e Vazão do sistema (Equação 2).

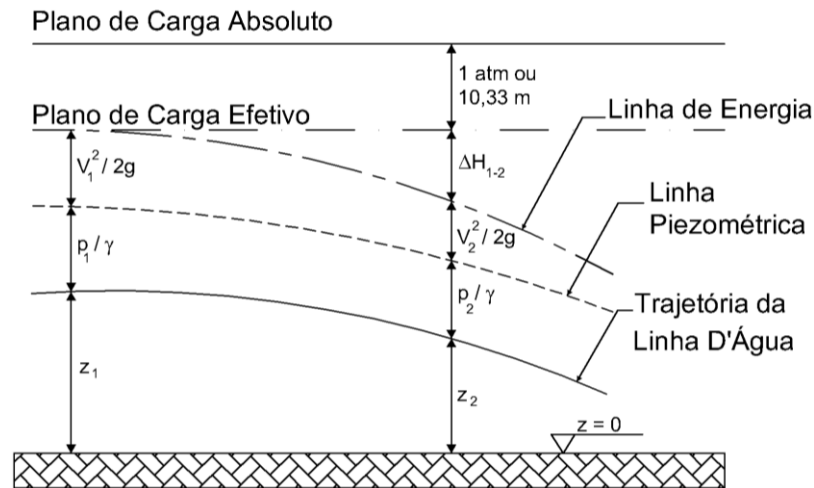
$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta H_{1-2} \quad (2)$$

Em que  $p/\gamma$  [L] é a energia ou carga de pressão,  $z$  [L] é a energia ou carga potencial,  $V^2/2g$  [L] é a energia ou carga cinética e  $\Delta H_{1-2}$  [L] é a perda de energia ou perda de carga.

Isto significa que a soma das três cargas (pressão, potencial e cinética) não se iguala à carga total, sendo a diferença denominada como perda de carga (Equação 3),  $\Delta H_{1-2}$  (NETTO, 2018). Isto se dá devido à viscosidade do fluido frente à rugosidade do material que causa a resistência que configura a perda de energia ou carga ao longo de todo o sistema. No caso de fluidos reais em escoamento permanente, a carga total diminui ao longo da trajetória, no sentido do movimento, como consequência da perda de carga proporcionada pelas forças resistentes, como indicado na Figura 1.

$$\Delta H_{1-2} = H_1 - H_2 \quad (3)$$

Figura 1 – Linha piezométrica e de energia durante o regime permanente



Fonte: Adaptado de Porto (2006).

### 2.3.3 Perda de carga em condutos forçados

Para Azevedo Netto (2018), o principal problema no projeto de uma tubulação normal é determinar a quantidade de energia necessária para deslocar uma determinada quantidade de água entre um ponto de outro de uma tubulação. Engenheiros e pesquisadores que se ocuparam da questão, buscaram sempre encontrar uma fórmula prática que permitisse a solução desse problema.

A forma de Darcy-Weisbach ou fórmula Universal (Equação 4) para o cálculo da perda de carga apresenta o inconveniente de precisar da aferição de um coeficiente  $f$  que nem sempre é transladável de uma situação pra outra, tornando sua utilização problemática.

Para o conceito de perda de carga localizada, utiliza-se a Equação (5) onde inclui-se o fator  $K$  referente à perda cinética causada por orifícios por cada elemento que não seja tubulação no sistema (conexões como curvas, joelhos, tê, registros, reduções, etc.). Para a perda de carga unitária,  $J$  (m/m), considera-se a relação  $J = \Delta H / L$  (Equação 6).

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

$$\Delta H = \left[ \sum \left( f \cdot \frac{L}{D} \right) + \sum K \right] \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (5)$$

$$J = \frac{f}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (6)$$

A fórmula empírica mais utilizada é a de Hazen-Williams (Equação 7), pois apresenta bons resultados e é bastante simplificada através da utilização de tabelas. É importante lembrar que tais fórmulas assumem que o escoamento é sempre turbulento, que é o que acontece na grande maioria das situações. Para a perda de carga unitária,  $J$  (m/m), considera-se a relação  $J = \Delta H / L$  (Equação 8).

$$\Delta H = \frac{10,643 \cdot Q^{1,85} \cdot L}{C^{1,85} \cdot D^{4,87}} \quad (7)$$

$$\frac{J}{Q^{1,85}} = \frac{10,643}{C^{1,85}} \cdot D^{-4,87} \quad (8)$$

Em que  $Q$  [ $L^3 \cdot T^{-1}$ ] é a vazão do sistema,  $D$  [L] é o diâmetro da seção transversal do tubo,  $L$  [L] é o comprimento do tubo e  $C$  [ $L^{0,37} \cdot T^{-1}$ ] é o coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams.

Porto (2006) introduz a equação de Swamee-Jain em função da rugosidade do material,  $\varepsilon$  [L], do diâmetro,  $D$  [L], e do número adimensional de Reynolds,  $Rey$  (Equações 4 e 5). A Equação 9, dentre outras equações já desenvolvidas, pode ser utilizada através de um processo iterativo, arbitrando-se um valor inicial de  $f$  para a determinação de um parâmetro desconhecido da equação universal de perda de carga ( $D$ ,  $V$  ou  $\Delta H$ ).

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

$$Rey = \frac{VD}{\nu} \quad (10)$$

Em que  $V$  (m/s) é a velocidade do fluido no conduto forçado,  $Rey$  é o número adimensional de Reynolds,  $\varepsilon$  (mm) é a rugosidade do material da tubulação e  $\nu$  é a viscosidade cinemática do fluido.

### 2.3.4 Dimensionamento de redes de distribuição de água

Porto (2006) refere-se ao sistema de distribuição de água como um conjunto de tubulações, acessórios, reservatórios, bombas e outros equipamentos que tem o propósito de atender, dentro de condições sanitárias de vazão e pressão ideais, cada um dos diversos pontos de consumo de uma cidade ou setor de abastecimento.

De modo geral, qualquer que seja a configuração da rede, esta é constituída por condutos que são classificados como condutos principais ou troncos e condutos secundários. Os principais são aqueles que possuem o maior diâmetro e têm por finalidade o abastecimento de condutos secundários. Estes, por sua vez, possuem diâmetros menores e tem a função direta de abastecer aos pontos de consumo do sistema, ou demanda (PORTO, 2006).

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

Para Sarbu (2014), entre os métodos iterativos mais populares de análise hídrica de redes estão os métodos de Hardy-Cross, de Newton-Raphson e da Teoria Linear. Spiliotis e Tsakiris (2011), além de Todini e Pilati (1987), também incluem nesse contexto os métodos de Gradiente Hidráulico.

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

Determinada a vazão que sairá do reservatório para a distribuição e sabendo-se as informações topográficas do projeto, inicia-se a análise do regime permanente na rede de distribuição de água (SANDERS NETO, 2018).

Para os casos de rede ramificada, faz-se a análise trecho a trecho verificando-se as cargas nos nós e nas extremidades com o auxílio da Equação (1), verificando-se os critérios de carga mínima e velocidade máxima para atendimento da demanda (PORTO, 2006).

Para os casos de redes malhadas, Porto (2006) e Azevedo Netto e Fernández (2018) recomendam o uso do método iterativo de Hardy-Cross, com a indicação inicial dos sentidos dos fluxos na tubulação, sendo corrigidos se necessário dentro do processo iterativo.

### 2.3.5 Perdas de água nas redes de distribuição

A presença de vazamentos em sistema de abastecimento de água é um problema presente em todo o mundo e vem sendo estudado há bastante tempo. Soares et al. (2004) consideram que não existem sistemas estanques, ou seja, toda rede de distribuição de água já implantada apresenta alguma parcela de perda de água. Babbitt et al. (1920) já discutiam sobre métodos de detecção em vazamento de água, indicando as soluções que eram utilizadas pelos administradores das companhias naquela época: detecções visuais, acústicas e de respostas hidráulicas. Apesar do longo período de estudos na área e de grandes avanços ainda não existe uma solução técnica definitiva para o problema.

Sousa (2019) explica que muitos lugares ainda não contam com um sistema efetivo de controle ativo de vazamentos, limitando o combate destes ao tradicional sistema de fazer apenas ações corretivas. Assim, a companhia espera que o problema seja visualmente presenciado por um consumidor ou por um funcionário, com a existência de água chegando a superfície, para que seja acionada a empresa e só então que ocorra o reparo.

A água leva certo tempo para chegar ao topo do perfil, logo, o tempo entre a ocorrência do vazamento e a sua correção gera um grande desperdício. O fluxo depende das condições hidráulicas da rede e do nível de profundidade da tubulação, bem como o tipo de material presente. Esta relação entre o vazamento e o solo vem sendo objeto de estudo de vários autores, como Niven e Khalili (1998), Cassa et al. (2010) e Zyl et al. (2013).

Segundo Gamboa-Medina (2013), o modelo hidráulico é a representação simplificada dos elementos constituintes de uma rede de distribuição de água: tubulações, conexões, válvulas, reservatórios, bombas, entre outros. A partir do conhecimento dos parâmetros da rede como: diâmetro dos tubos, cotas geométricas, material, rugosidades, comprimento dos trechos e as demandas da região é possível determinar os parâmetros hidráulicos do sistema.

Para Sousa (2019), um dos desafios para fazer a modelagem hidráulica da rede está na equação que melhor representa a vazão produzida por uma ruptura na tubulação. Uma das hipóteses geralmente encontradas nos trabalhos desta área é a modelagem simples do volume de vazamento em função da pressão a partir da equação geral de orifício. Essa simplificação pode induzir a erros na simulação hidráulica, uma vez que outros fatores importantes para essa relação são omitidos.

A principal desvantagem da modelagem hidráulica está na dificuldade em determinar quais são os valores reais dos parâmetros a serem utilizados. Deve-se levar em

consideração que com o passar do tempo, parâmetros da rede como a rugosidade, por exemplo, irão mudar de valor devido às incrustações de minerais nas paredes dos tubos, alterando o diâmetro efetivo e conseqüentemente o fator de atrito.

A principal desvantagem da modelagem hidráulica está na dificuldade em determinar quais são os valores reais dos parâmetros a serem utilizados. Para resolver esse problema, diferentes pesquisadores têm aplicado à engenharia reversa, ou seja, a partir de dados observados, determinar os parâmetros reais de uma rede de distribuição de água. Dados de pressão e de vazão bastante são utilizados para calibrar o sistema e conhecer quais são os parâmetros da rede.

### **2.3.6 Simulação de redes de distribuição de água através do software EPANET**

Segundo Rossman (2000), o EPANET é um programa de computador que permite executar simulações estáticas e dinâmicas do comportamento hidráulico e de qualidade da água em redes de distribuição pressurizada.

Uma rede completamente caracterizada e uma modelagem hidráulica confiável constituem pré-requisitos essenciais para a correta modelagem de qualidade da água. O EPANET contém um conjunto de ferramentas de cálculo para apoio à simulação hidráulica. (ROSSMAN, 2009).

O EPANET permite realizar a simulação completa de uma rede de distribuição de água, viabilizando o cálculo das vazões nos trechos, assim como a carga hidráulica e pressão nos nós. O cálculo da perda de carga é realizado utilizando as fórmulas de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach ou Chézy-Manning. O programa ainda permite realizar a modelagem de bombas, válvulas, reservatórios de nível variável, a relação entre pressão e vazão efluente de dispositivos emissores e qualidade da água.

## **2.4 Calibração em redes de distribuição**

Pereira (2009) define calibração como o processo de ajuste dos parâmetros de um modelo para que o comportamento apresentado por este seja semelhante aos resultados obtidos em campo. Para Bezerra (2018) o processo de calibração, ou método inverso, visa à atualização de dados computacionais calculados buscando se aproximar de dados físicos observados. Solomatine, Dibike e Kukuric (1999) consideram que o objetivo da calibração de

qualquer modelo físico é encontrar parâmetros, em um modelo, os quais não são conhecidos a priori.

Righetto (2001) explica que as modernas tecnologias disponíveis são bastante acessíveis e que a partir deste fato duas ações importantes e imprescindíveis se viabilizam: o monitoramento do sistema através da automação de medições em tempo real de pressões, vazões e níveis d'água em diversos locais da rede de distribuição de água e a implementação de modelagem matemática com simuladores numéricos que possibilitem a obtenção do funcionamento hidráulico e a desejada otimização operacional do sistema.

Vários esquemas numéricos para a calibração de modelos de rede hidráulica podem ser encontrados na literatura, como os de Ormsbee e Wood (1986). Sem exceção, utilizam formulações diferenciais que resultam em sistemas de equações lineares e/ou não lineares. Lingireddy et al. (1996) por exemplo, apresentaram a calibração de um modelo hidráulico de uma rede como um problema de otimização, em que se utiliza como função objetivo o somatório dos termos ponderados das diferenças quadráticas dos valores observados e simulados das variáveis consideradas.

Para Walski (1983), a comparação dos resultados previstos pelo modelo com observações feitas em campo é um passo muito importante no desenvolvimento de um modelo de rede de distribuição de água. Se a entrada para o modelo estiver correta, as pressões e fluxos previstos corresponderão aos valores observados.

É quase impossível medir com precisão o uso da água e a capacidade de transporte de tubos, esses parâmetros geralmente não são modificados para fazer com que os resultados do modelo estejam de acordo com as observações de campo.

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

Walski (1983) explica que o problema da calibração de redes consiste em se determinar o conjunto de valores das demandas nodais e dos coeficientes de rugosidade das tubulações que minimizam a função objetivo (Equação 11) definida pela soma dos desvios quadrados das cargas nodais e vazões em trechos simuladas e observadas.

$$f_{obj} = \sum_{n_p} (H_o - H_c)^2 \quad (11)$$



Em que  $n_p$  é o número total de nós,  $H_o$  [L] é a carga nodal observada e  $H_c$  [L] é a carga nodal calculada.

No trabalho de Rocha, Castro e Araújo (2009), a função objetivo depende do número total de trechos, uma vez que se baseia no trabalho de Guo e Zhang (2000), ou seja, no quadrado dos desvios dos gradientes hidráulicos, como é mostrado na Equação 12.

$$f_{obj} = \sum_{n_T} (\nabla H_o - \nabla H_c)^2 \quad (12)$$

Em que  $n_T$  é o número total de trechos,  $\nabla H_o$  [L] é o gradiente hidráulico observado e  $\nabla H_c$  [L] é o gradiente hidráulico calculado.

## 2.5 O Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativa (MIGHA)

Guo & Zhang (2000) elaboraram um técnica de otimização baseada nos princípios da minimização de uma função objetivo a respeito das diferenças entre dos gradientes hidráulicos observados e calculados através de procedimentos iterativos, com os parâmetros iniciais arbitrários sendo ajustados a cada novo ciclo de iteração. Este método foi nomeado pelos autores de Método Integrado do Gradiente Hidráulico (MIGH). A função objetivo está descrita na Equação 13.

$$f_{obj} = \int_R (\nabla H_c - \nabla H_o)^2 dx dy \quad (13)$$

Em que  $R$  [L<sup>2</sup>] é o domínio do fluxo,  $\nabla H_c$  é o gradiente hidráulico calculado e  $\nabla H_o$  é o gradiente hidráulico observado.

O Método Iterativo do Gradiente Hidráulico (MIGH), proposto por Guo e Zhang (1994), teve sua origem na calibração da transmissividade (condutividade) hidráulica de aquíferos subterrâneos (BEZERRA, 2018).

Schuster e Araújo (2004) propuseram uma versão alternativa do método através da aplicação da Equação 14.

$$T_j^{i+1} = T_j^i \frac{|\nabla H_{C_j}^i|}{|\nabla H_{O_j}^i|} \quad (14)$$

Em que  $T$  [ $L^2T^{-1}$ ] é a transmissividade,  $i$  é o número da iteração,  $j$  é o índice da célula,  $\nabla H_O$  é o gradiente hidráulico observado e  $\nabla H_C$  é o gradiente hidráulico calculado.

O ângulo  $\theta$  formado entre os vetores dos gradientes hidráulicos observados e calculado é determinado a cada iteração para cada célula  $j$ , conforme mostrado na Equação 15.

$$\cos \theta = \frac{\nabla H_{O_j} \nabla H_{C_j}}{|\nabla H_{O_j}| |\nabla H_{C_j}|} \quad (15)$$

Bezerra (2018) explica que a aplicação em redes de distribuição manteve o estabelecido por Schuster e Araújo (2004) quanto ao cálculo do ângulo  $\theta$  e da função objetivo (Equação 12), substituindo apenas a transmissividade pela vazão do trecho.

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

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

- Rede Calculada: é a rede a qual serão realizados os cálculos hidráulicos e obtidos os resultados calculados. Parâmetros iniciais estimados são usados e, a cada iteração, com base no valor dos gradientes hidráulicos calculados obtidos nessa rede, esses parâmetros são alterados, gerando novos resultados, cada vez mais próximos dos medidos em campo; A Rede Calculada é a que possui os consumos estimados, os quais se deseja calibrar.
- Rede Observada: rede que apresenta os mesmos parâmetros iniciais da rede calculada, no entanto, possui pressões fixadas de acordo com os dados reais conhecidos.

- Rede Gabarito: rede fictícia na qual todos os parâmetros de entrada e resultados hidráulicos são conhecidos. Pode ser utilizada como base para conferir os resultados encontrados após o uso do método.

Para Bezerra (2018), em função da proporcionalidade existente entre a vazão e o gradiente hidráulico calculado pela equação de Darcy-Weisbach, ou fórmula universal, utilizada para o cálculo da perda de carga, a vazão é calibrada através da Equação 16. Para a equação de Hazen-Williams a vazão é calibrada através da Equação 17.

$$Q_j^{i+1} = Q_j^i \left( \frac{|\nabla H_{C_j}^i|}{|\nabla H_{O_j}^i|} \right)^{-0.5} \quad (16)$$

$$Q_j^{i+1} = Q_j^i \left( \frac{|\nabla H_{C_j}^i|}{|\nabla H_{O_j}^i|} \right)^{-1/1,852} \quad (17)$$

Em que  $Q$  [ $L^3T^{-1}$ ] é a vazão do trecho,  $i$  é o número da iteração,  $j$  é o índice da célula,  $\nabla H_C$  é o gradiente hidráulico do trecho na rede calculada e  $\nabla H_O$  é o gradiente hidráulico do trecho da rede observada.

O consumo nodal é calculado através do valor absoluto entre a diferença da vazão de saída e a vazão de entrada nos trechos adjacentes ao nó em questão, como mostra a Equação 18.

$$Q_C = |Q_S - Q_E| \quad (18)$$

Em que  $Q_C$  (L/s) é a vazão consumida em um nó da rede,  $Q_S$  (L/s) é a vazão de saída em um nó da rede através dos trechos adjacentes a ele e  $Q_E$  (L/s) é a vazão de entrada do nó através dos trechos adjacentes a esse nó na rede de distribuição.

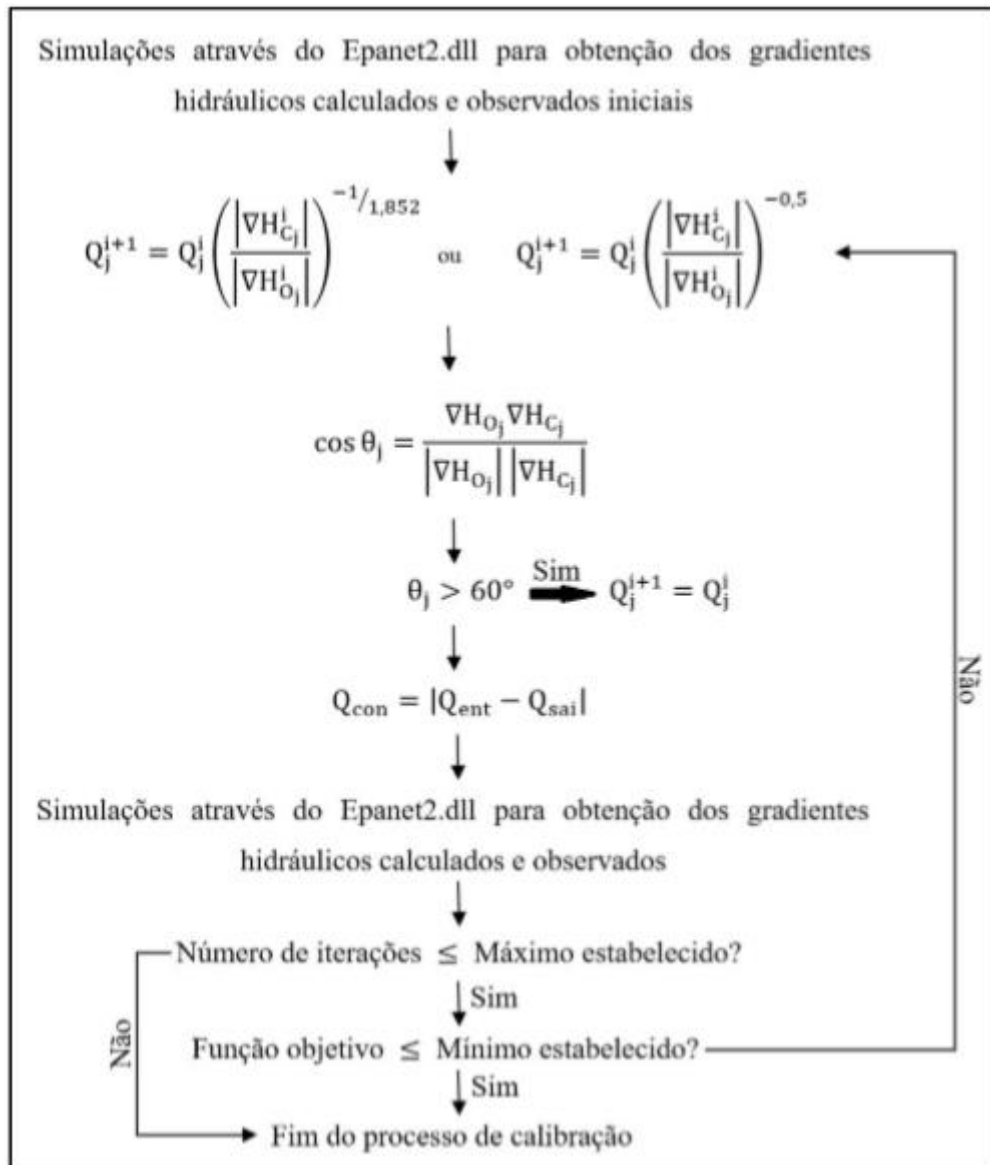
Rocha, Castro e Araújo (2009) apresentaram três formas de realizar a calibração dos coeficientes de rugosidade em redes de distribuição através do MIGHA, denominada de MIGHA-C, MIGHA-M e MIGHA-O.

Em seu trabalho, Bezerra (2018) conclui que, para a calibração de vazões, os resultados obtidos através da aplicação do MIGHA O foram significativamente melhores que os resultados encontrados utilizando os outros métodos citados.

O processo de calibração de vazões utilizando o MIGHA-O consiste, primeiramente, em calcular os gradientes hidráulicos para os trechos da rede calculada a partir de consumos nodais arbitrários. Com os gradientes determinados, aplica-se a Equação 16 ou 17 para calcular as novas vazões dos trechos da rede calculada. Após o cálculo das novas vazões, calculam-se os novos consumos nodais através da Equação 17. Repete-se o processo 100 vezes e adota-se a iteração que atingiu o menor valor da função objetivo (Equação 12). Se o sentido do fluxo da vazão de algum trecho estiver oposto ao fluxo da vazão do respectivo trecho da rede gabarito, ou seja, com um ângulo  $\theta = 180^\circ$ , adota-se o valor da iteração anterior da rede calculada. O valor de  $\theta$  é calculado através da Equação 15.

Bezerra (2018) desenvolveu um modelo computacional, utilizando o MIGHA, para realizar a calibração das vazões em redes de distribuição de água. Ele empregou a biblioteca do EPANET para realizar todas as simulações hidráulicas das redes do processo iterativo. A Figura 2 mostra o fluxograma do processo computacional desenvolvido por Bezerra (2018) para a aplicação do MIGHA na calibração de vazões de uma rede de distribuição de água.

Figura 2 – Fluxograma do processo MIGHA para calibração de vazões e cálculo do consumo nodal



Fonte: Bezerra (2018)

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Caracterização do objeto de estudo da pesquisa

Este trabalho tem como objetivo desenvolver uma rotina computacional para detecção de vazamento em redes de distribuição de água. A rotina utilizará o MIGHA para calibrar as vazões, baseada na metodologia desenvolvida por Bezerra (2018) para detecção de vazamentos.

Bezerra (2018) observou que ao inserir um vazamento na forma de consumo nodal em um trecho de uma rede, o consumo do vazamento se distribuía entre os nós de

contorno do mesmo trecho. Ele notou que a localização do vazamento seguia uma proporção linear com os consumos adicionais distribuídos entre os nós de montante e jusante do trecho em que o vazamento estava localizado.

Com isso, considerando que quanto mais próximo de um nó, seja este de montante ou de jusante, esteja o vazamento, maior será a contribuição da vazão perdida que resulta no consumo do nó calculado após a calibração. Bezerra (2018) desenvolveu a Equação 19 para encontrar, aproximadamente, a distância de um vazamento em relação a um nó da rede.

$$D_V = \left( 1 - \frac{(Con1_C - Con1_G)}{[(Con1_C - Con1_G) - (Con2_C - Con2_G)]} \right) \quad (19)$$

Em que  $D_V$  é a distância percentual do vazamento em relação ao nó 1 (pode ser tanto o nó de montante quanto o de jusante),  $Con1_C$  é o consumo do nó 1 de um trecho calculado após a calibração,  $Con1_G$  é o consumo gabarito do nó 1 de um trecho,  $Con2_C$  é o consumo do nó 2 de um trecho calculado após a calibração,  $Con2_G$  é o consumo gabarito do nó 2 de um trecho. É importante perceber que o numerador da citada equação representa a perda encontrada no nó 1 e o denominador a perda total encontrada no trecho.

### **3.2 Rotina desenvolvida para detecção de vazamentos através da aplicação computacional do MIGHA**

Foi elaborado um programa, utilizando a linguagem de programação Java, para realizar a calibração das vazões através da aplicação do MIGHA e posteriormente a detecção de vazamentos.

Baseado na metodologia de Bezerra (2018), a rotina computacional desenvolvida irá primeiramente realizar a calibração das vazões nos trechos da rede utilizando o MIGHA. As simulações hidráulicas realizadas pelo programa são possíveis a partir da utilização da biblioteca em linguagem Java do EPANET.

A rotina computacional, para calibrar as vazões, cria duas redes semelhantes, uma denominada de rede calculada e a outra de rede observada. A rede calculada é basicamente a rede gabarito com os consumos nodais arbitrários. A rede observada é criada pelo programa para inserir os valores observados de pressão manométrica nos nós desejados. As pressões observadas são inseridas através de reservatórios fictícios posicionados no EPANET nos nós analisado. A carga hidráulica destes reservatórios deve ser igual ao valor das pressões

observadas nos respectivos nós. Os trechos que ligam os reservatórios fictícios aos nós têm os diâmetros elevados e os comprimentos muito pequenos a fim de minimizar ao máximo a perda de carga nesses trechos. A partir da criação das redes calculada e observada, a rotina irá aplicar a Equação 16 ou 17, dependendo do modelo utilizado no cálculo da perda de carga, para determinar as novas vazões dos trechos. A Equação 18 é utilizada para calcular os novos consumos para as redes calculada e observada. Após o cálculo dos novos consumos nodais realiza-se uma nova simulação com estes consumos para obter-se os novos gradientes hidráulicos calculados e observados. O processo iterativo será realizado até atingir o número de iterações desejado ou o valor da função objetivo escolhida.

Para definir os pontos de vazamentos na rede o programa irá, após a finalização da calibração das vazões, verificar o erro absoluto entre os consumos gabarito e os consumos calculados. Utilizando dados observados de pressão manométrica para todos os pontos que possuem consumo da rede analisada, os nós em que o erro absoluto for maior que 0.1 L/s serão identificados como nós com vazamento ou condição de contorno para possíveis trechos com vazamento. Para determinar os trechos que possuem vazamento a rotina irá verificar se o trecho a montante de um dos nós identificados com indícios de vazamento coincide com o trecho a jusante de algum outro destes nós, logo, todos os trechos identificados serão identificados como trechos com possíveis vazamentos.

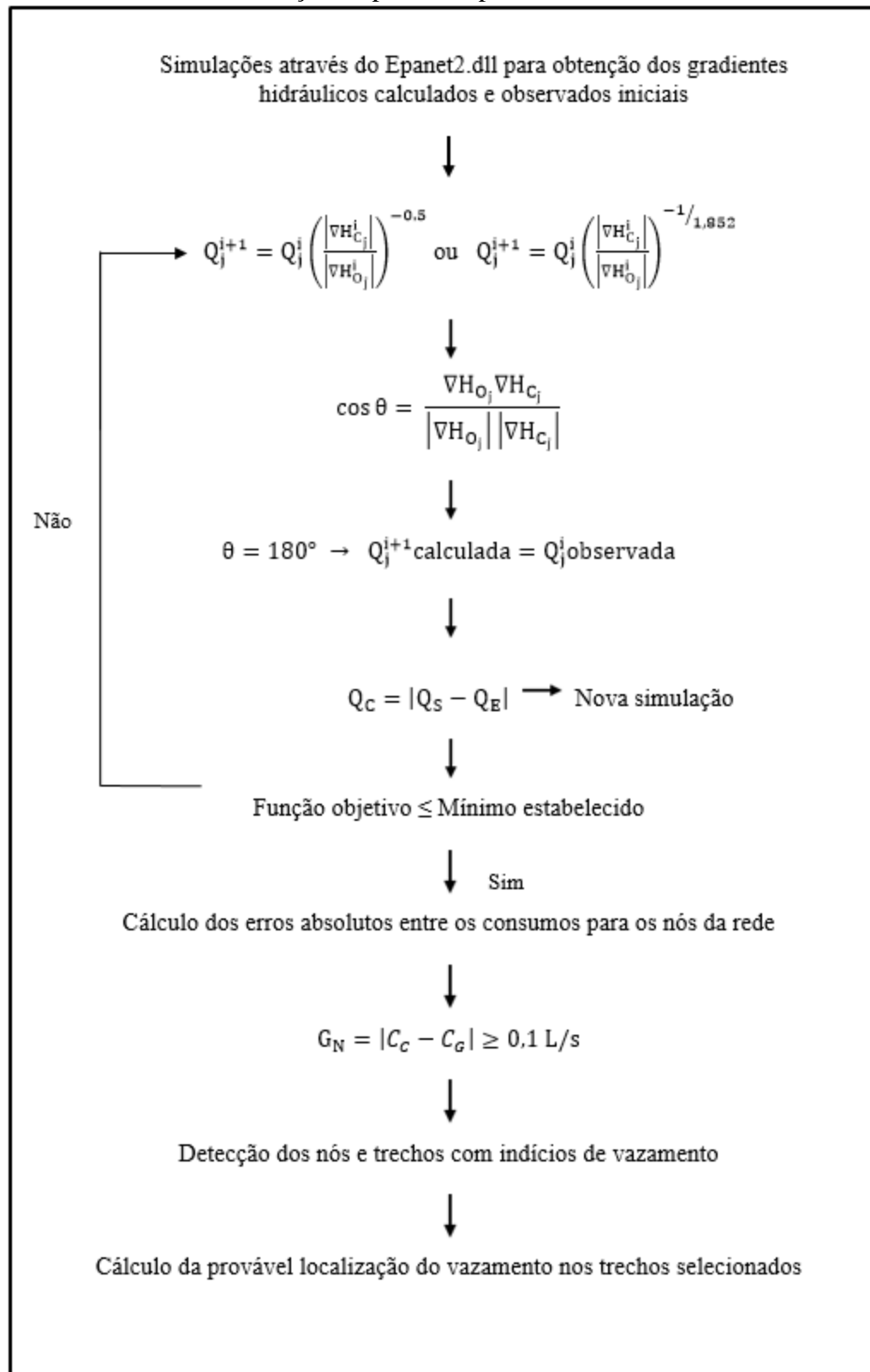
O programa desenvolvido permite ainda verificar a posição do vazamento nos trechos identificados aplicando a Equação 20, que é uma adaptação da Equação 19.

$$D_V = \left\{ 1 - \frac{(Con1_C - Con1_G)}{[(Con1_C - Con1_G) + (Con2_C - Con2_G)]} \right\} L_T \quad (20)$$

Em que  $D_V$  é a distância em metros do vazamento em relação ao nó 1 (nó de montante) e  $L_T$  é o comprimento do trecho em metros.

A Figura 3 representa o fluxograma da rotina computacional elaborada para calibração de vazões e detecção vazamentos em redes de abastecimento de água.

Figura 3 - Fluxograma da rotina proposta para a calibração da vazão, cálculo do consumo nodal e detecção de possíveis pontos de vazamento na rede





### 3.3 Funções objetivo utilizadas

Para realização do processo iterativo foram utilizadas quatro funções objetivo como critério de parada. As equações utilizadas estão descritas abaixo:

$$f_{obj_1} = \sum_{n_T} (\nabla H_o - \nabla H_c)^2 \quad (21)$$

$$f_{obj_2} = \sum_{n_P} \frac{(P_o - P_c)^2}{(P_o)^2} \quad (22)$$

$$f_{obj_3} = \sum_{n_T} \frac{(Q_o - Q_c)^2}{(Q_o)^2} \quad (23)$$

$$f_{obj_4} = \sum_{n_P} \frac{(P_o - P_c)^2}{(P_o)^2} + \sum_{n_Q} \frac{(Q_o - Q_c)^2}{(Q_o)^2} + \sum_{n_T} (\nabla H_o - \nabla H_c)^2 \quad (24)$$

Onde  $\nabla H_o$  e  $\nabla H_c$  são os gradientes hidráulicos nas redes observada e calculada e  $n_T$  é o número total de trechos;  $P_o$  e  $P_c$  são as pressões na rede observada e calculada e  $n_P$  é o número total de pressões;  $Q_o$  e  $Q_c$  são as vazões na rede observada e calculada.

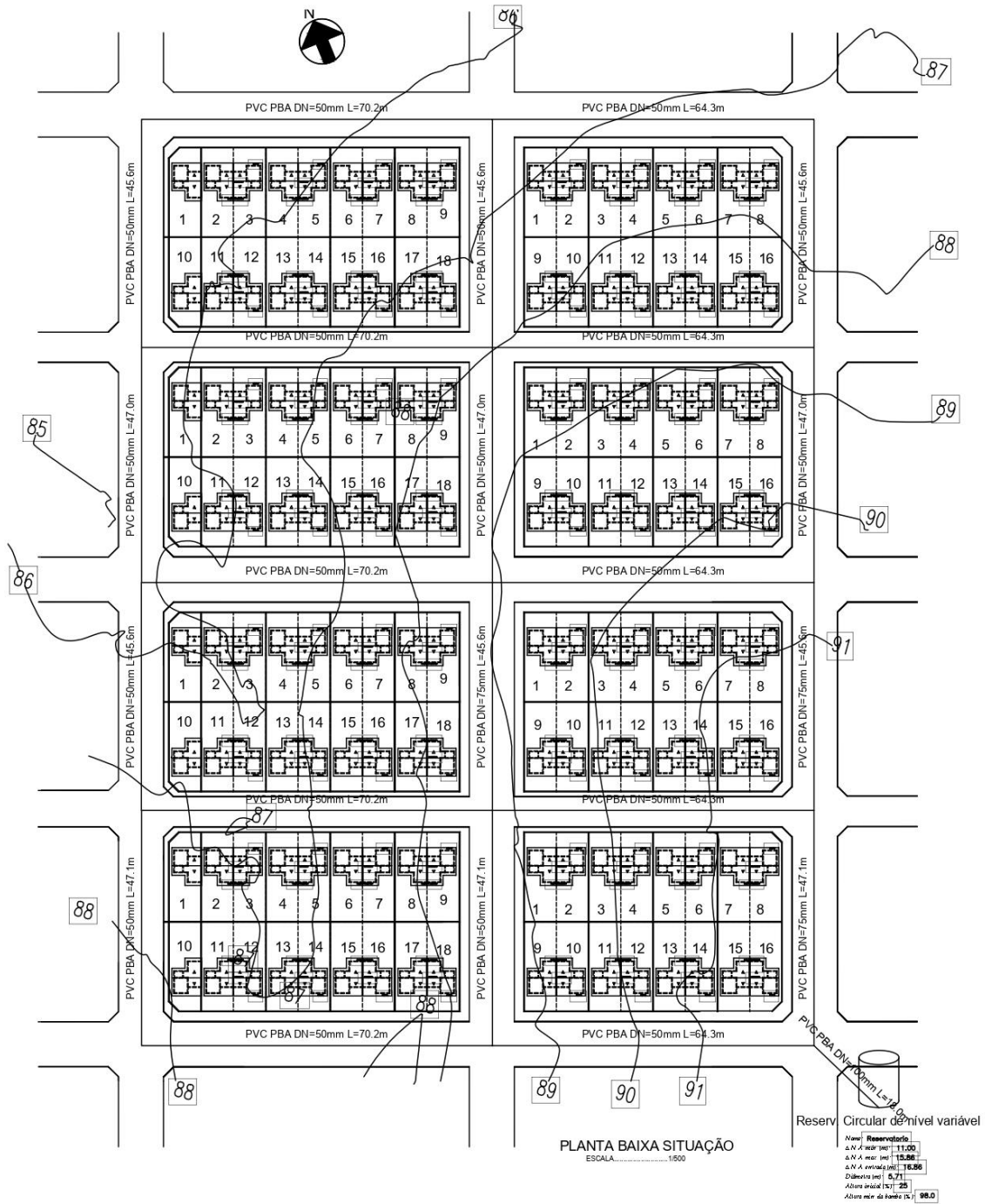
### 3.4 Redes utilizadas para os testes

#### 3.4.1 Rede UFC2

A primeira rede de distribuição de água analisada foi baseada no projeto de um condomínio residencial. A vazão de projeto foi calculada a partir do número médio de ligações, considerando que para cada trecho da rede tinham-se 20 ramais. O coeficiente  $k_1$  e  $k_2$  adotados foram de 1,2 e 1,5, respectivamente e o consumo *per capita* foi de 250 L/hab.dia. Dimensionou-se a rede utilizando o sistema UFC, especificamente o UFC2, que é um software desenvolvido pelo Laboratório de Hidráulica Computacional do Departamento de

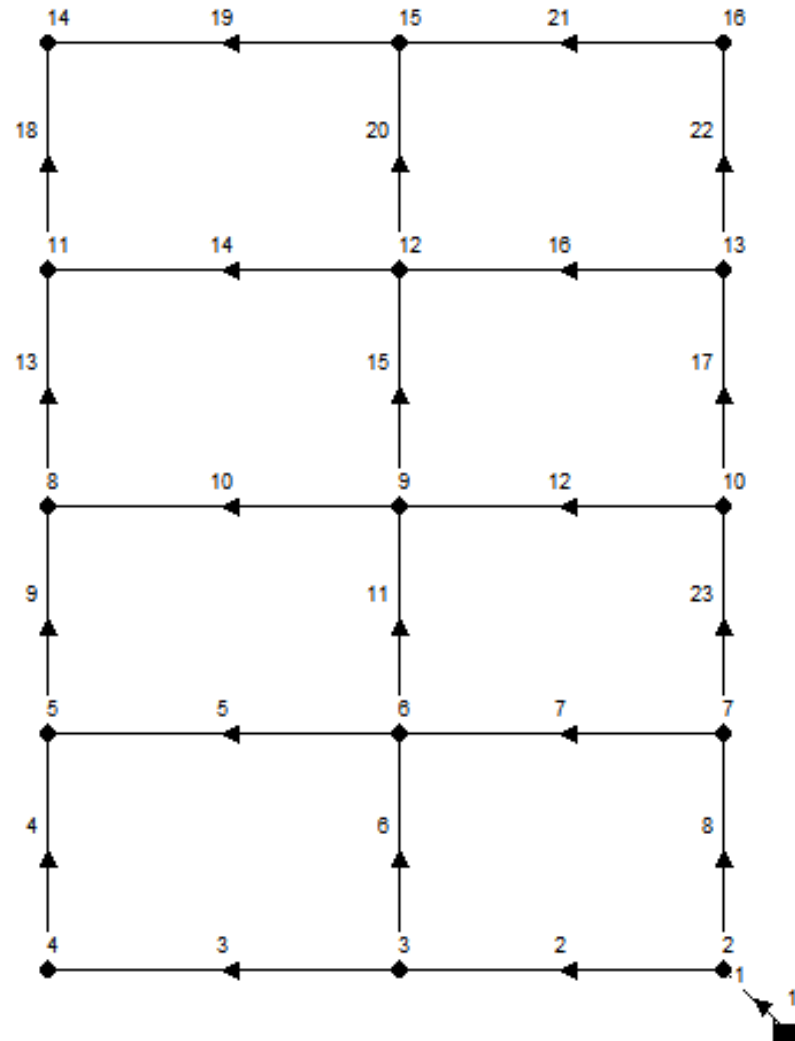
Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará (UFC). A primeira rede foi denominada de Rede UFC2 e está representada nas Figuras 4 e 5. Os gabaritos referentes aos trechos e nós desta rede estão contidos nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

Figura 4 – Representação da Rede UFC2 através do Sistema UFC



Fonte: Autor (2020)

Figura 5 – Representação da Rede UFC2 modelada no Epanet2



Fonte: Autor (2020)

Tabela 1 – Gabaritos referente aos trechos da Rede UFC2

Trecho	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Rugosidade $\epsilon$ (mm)	Vazão (L/s)	
				Rede Gabarito	Rede Calculada
1	17.96	100	0.0015	6.1299	6.1299
2	64.34	54.6	0.0015	1.7509	1.7212
3	70.22	54.6	0.0015	0.6635	0.6873
4	47.06	54.6	0.0015	0.3581	0.2787
5	70.22	54.6	0.0015	-0.4053	-0.4985
6	47.06	54.6	0.0015	-0.7369	-0.6252
7	64.34	54.6	0.0015	-1.2102	-1.1602
8	47.06	77.2	0.0015	-4.1179	-4.0000
9	45.61	54.6	0.0015	0.458	0.3685
10	70.22	54.6	0.0015	-0.4613	-0.5125
11	45.61	77.2	0.0015	-0.9501	-0.8782
12	64.34	54.6	0.0015	-0.8574	-0.8057

<b>13</b>	47.03	54.6	0.0015	0.4952	0.4724
<b>14</b>	70.22	54.6	0.0015	-0.1708	-0.2256
<b>15</b>	47.03	54.6	0.0015	-0.7546	-0.7627
<b>16</b>	64.34	54.6	0.0015	-0.341	-0.2762
<b>17</b>	47.03	54.6	0.0015	-1.2325	-1.2168
<b>18</b>	45.65	54.6	0.0015	0.2418	0.2893
<b>19</b>	70.22	54.6	0.0015	-0.0599	-0.1193
<b>20</b>	45.65	54.6	0.0015	-0.333	-0.4047
<b>21</b>	64.34	54.6	0.0015	-0.1963	-0.1233
<b>22</b>	45.65	54.6	0.0015	-0.4827	-0.5319
<b>23</b>	45.61	77.2	0.0015	2.4988	2.4312

Fonte: Autor (2020)

Tabela 2 – Gabaritos referentes aos nós da Rede UFC2

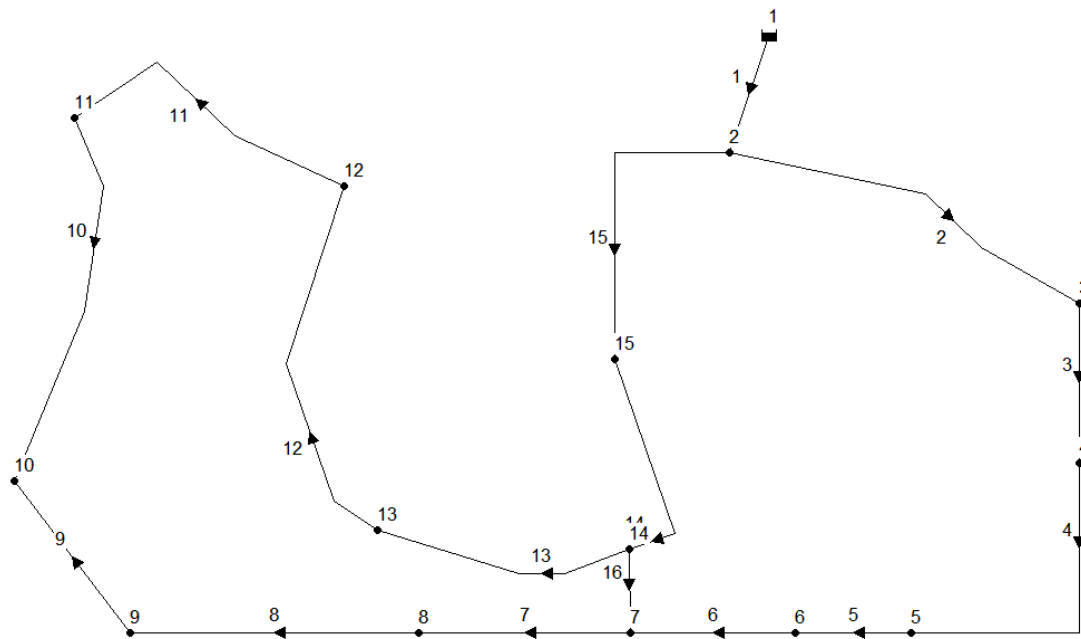
Nó	Cota (m)	Rede Gabarito		Rede Calculada	
		Consumo (L/s)	Pressão (m)	Consumo (L/s)	Pressão (m)
<b>RNF</b>	101.64	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
<b>2</b>	91.00	0.2611	10.5341	0.4087	10.5341
<b>3</b>	88.21	0.3504	12.5853	0.4087	12.6073
<b>4</b>	88.00	0.3054	12.6511	0.4087	12.6639
<b>5</b>	87.02	0.3054	13.5934	0.4087	13.6180
<b>6</b>	88.79	0.5918	11.8947	0.4087	11.9459
<b>7</b>	91.00	0.4089	10.0634	0.4087	10.0872
<b>8</b>	85.99	0.4241	14.5755	0.4087	14.6156
<b>9</b>	88.94	0.5917	11.7073	0.4087	11.7630
<b>10</b>	90.60	0.4088	10.2599	0.4087	10.2939
<b>11</b>	85.98	0.4242	14.5267	0.4087	14.5714
<b>12</b>	87.99	0.5918	12.5349	0.4087	12.5882
<b>13</b>	88.88	0.4089	11.6842	0.4087	11.7247
<b>14</b>	85.89	0.3017	14.5990	0.4087	14.6377
<b>15</b>	86.49	0.4693	14.0030	0.4087	14.0448
<b>16</b>	87.19	0.2864	13.3185	0.4087	13.3490

Fonte: Autor (2020)

### 3.4.2 Rede Ilhéus-BA

A segunda rede de distribuição de água analisada foi retirada do livro Manual de Hidráulica (AZEVEDO NETTO, 1998, p.502), projetada para a parte baixa da cidade de Ilhéus, Bahia e modelada no Epanet2. A segunda rede foi denominada de Rede Ilhéus-BA e está representada na Figura 6. Os gabaritos referentes aos trechos e nós desta rede estão contidos nas Tabelas 3 e 4, respectivamente.

Figura 6 – Representação da Rede Ilhéus-BA modelada no Epanet2



Fonte: Autor (2020)

Tabela 3 - Gabaritos referentes aos trechos da Rede Ilhéus-BA

Trecho	Comprimento (m)	D (mm)	C	Vazão (L/s)	
				Rede Gabarito	Rede Calculada
1	200	300	100	48.3000	48.3000
2	550	300	100	29.7418	21.4085
3	275	200	100	12.6418	17.9585
4	525	200	100	10.0418	14.5085
5	250	200	100	7.4418	11.0585
6	250	150	100	4.8418	7.6085
7	345	150	100	7.3545	8.0658
8	345	150	100	4.2545	4.6158
9	260	100	100	1.1545	1.1658
10	560	150	100	-1.9455	-2.2842
11	380	150	100	-4.9455	-5.7342
12	390	200	100	-8.0455	-9.1842
13	500	200	100	-11.0455	-12.6342
14	445	200	100	-15.9582	-19.9915
15	670	250	100	-18.5582	-23.4415
16	75	100	100	-2.5127	-3.9072

Fonte: Autor (2020)

Tabela 4 – Gabaritos referentes aos nós da Rede Ilhéus-BA

Nó	Cota (m)	Rede Gabarito		Rede Calculada	
		Consumo (L/s)	Pressão (m)	Consumo (L/s)	Pressão (m)
<b>RNF</b>	20	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
<b>2</b>	0.00	0.0000	19.4572	3.4500	19.9729
<b>3</b>	0.00	17.1000	18.849	3.4500	19.642
<b>4</b>	0.00	2.6000	18.3996	3.4500	18.7811
<b>5</b>	0.00	2.6000	17.8396	3.4500	17.674
<b>6</b>	0.00	2.6000	17.6865	3.4500	17.3552
<b>7</b>	0.00	0.0000	17.406	3.4500	16.7074
<b>8</b>	0.00	3.1000	16.5666	3.4500	15.7115
<b>9</b>	0.00	3.1000	16.262	3.4500	15.3573
<b>10</b>	0.00	3.1000	16.1143	3.4500	15.2069
<b>11</b>	0.00	3.0000	16.2304	3.4500	15.3631
<b>12</b>	0.00	3.1000	16.6737	3.4500	15.9463
<b>13</b>	0.00	3.0000	16.9497	3.4500	16.2989
<b>14</b>	0.00	2.4000	17.586	3.4500	17.115
<b>15</b>	0.00	2.6000	18.7054	3.4500	18.8142

Fonte: Autor (2020).

### 3.4.3 Rede Walski (1983) - Gambale (2000)

A terceira rede de distribuição de água analisada foi proposta por Walski (1983) e modificada por Gambale (2000) e foi denominada de Rede Walski (1983) – Gambale (2000), estando representada na Figura 7. Os gabaritos referentes aos trechos e nós desta rede estão contidos nas Tabelas 5 e 6, respectivamente.

Tabela 5 – Gabaritos referentes aos trechos da Rede Walski (1983) – Gambale (2000)

Trecho	Comprimento (m)	D (mm)	Rede Gabarito		Rede Calculada	
			$\epsilon$ (mm)	Vazão (L/s)	$\epsilon$ (mm)	Vazão (L/s)
<b>1</b>	700	500	0.0700	207.5000	0.0700	207.4996
<b>2</b>	1800	250	0.0150	27.8107	0.0150	36.9975
<b>3</b>	1520	400	0.0100	104.0722	0.0100	78.9518
<b>4</b>	1220	300	0.0120	75.6172	0.0120	61.9074
<b>5</b>	600	300	0.7000	37.5000	0.7000	29.6428
<b>6</b>	1220	200	0.1000	8.1172	0.1000	2.6218
<b>7</b>	920	250	0.0800	38.1139	0.0800	30.2507
<b>8</b>	300	150	0.0600	3.4583	0.0600	19.0584
<b>9</b>	600	200	0.9000	16.2690	0.9000	26.4131
<b>10</b>	1220	100	1.0000	1.2690	1.0000	-3.2297

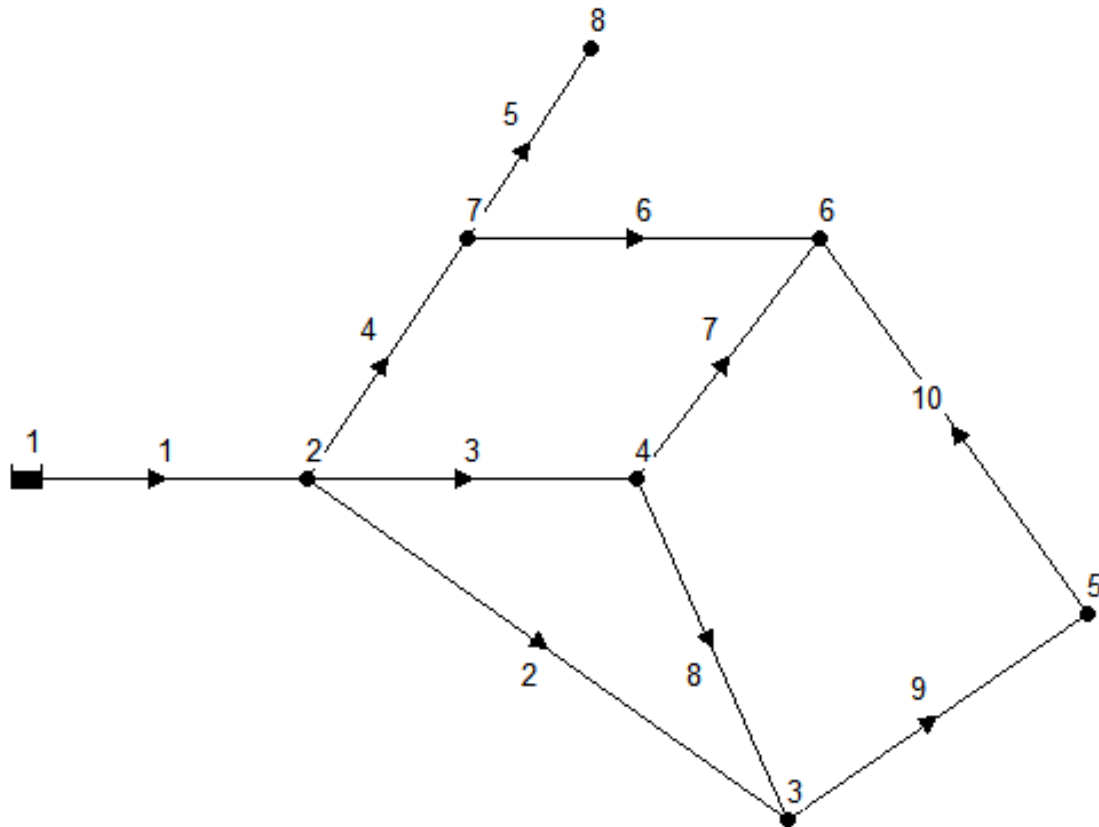
Fonte: Autor (2020).

Tabela 6 – Gabaritos referentes aos nós da Rede Walski (1983) – Gambale (2000)

Nó	Cota (m)	Rede Gabarito		Rede Calculada	
		Consumo (L/s)	Pressão (m)	Consumo (L/s)	Pressão (m)
2	0	0	58.9454	29.65	58.9454
3	0	15	56.9275	29.65	55.5513
4	0	62.5	57.0240	29.65	57.7852
5	0	15	55.6706	29.65	52.2847
6	0	47.5	54.9876	29.65	56.4664
7	0	30	55.4559	29.65	56.5276
8	0	37.5	54.7211	29.65	56.0636

Fonte: Autor (2020).

Figura 7 – Representação da Rede Walski (1983) – Gambale (2000) modelada no Epanet2



Fonte: Autor (2020).

### 3.5 Implementação da rotina desenvolvida no software UFC 10

Foi implementada a rotina desenvolvida neste trabalho ao software UFC10, utilizando a linguagem de programação Java, para realizar a calibração das vazões e detectar vazamentos em redes de distribuição de água. Vale ressaltar que o UFC10 também pode

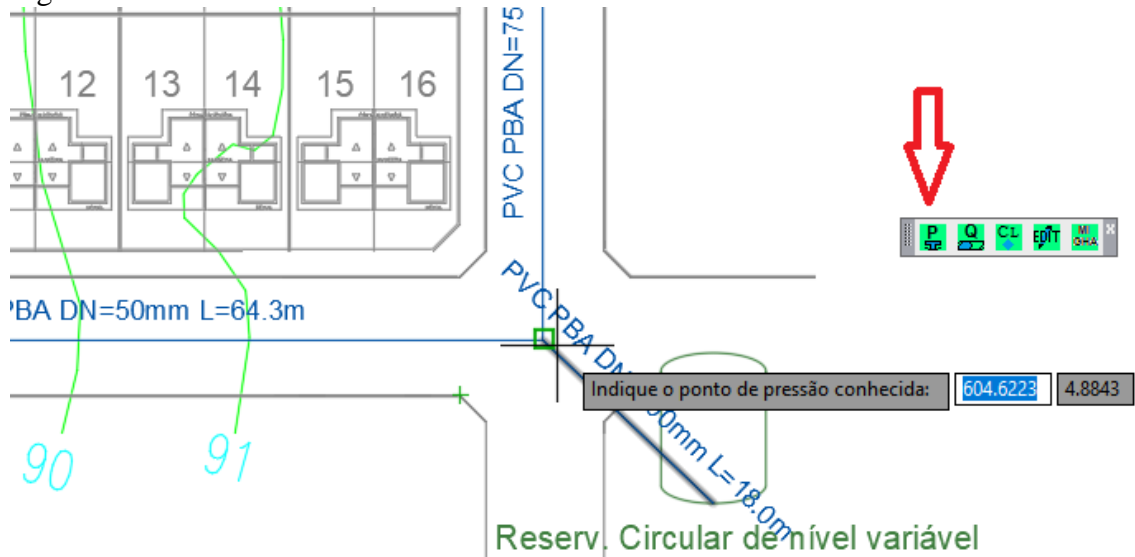
realizar a calibração das rugosidades em redes de distribuição de água utilizando o MIGHA, mas o foco deste trabalho é a rotina para calibração de vazões adicionada ao UFC10.

O programa é dividido em duas partes, sendo uma interna ao AutoCAD, em que são fornecidos pelo usuário valores de pressão nos nós da rede. Os dados inseridos funcionam como entrada para a segunda parte, externa ao AutoCAD e programada em Java, em que a calibração ocorre.

### 3.5.1 Aplicativo UFC10 interno ao AutoCAD

A parte interna ao AutoCAD do software UFC10 é utilizada para a inserção dos dados conhecidos nos nós da rede, deixando essas informações no desenho da rede traçada com o uso do UFC2. A indicação de valores de pressão medida é informada com o uso da função “Pressão Medida”. Ao clicar no botão correspondente, o nó contendo a pressão conhecida é solicitado ao usuário, como mostrado na Figura 8.

Figura 8 – Pressão manométrica observada inserida no nó



Fonte: Autor (2020).

Se o ponto clicado não for um nó, o software divide o trecho, transformando àquele ponto em um nó da rede. Após clicado, o valor da pressão é solicitado ao usuário através de uma caixa de diálogo, mostrada na Figura 9, que apresenta as coordenadas do nó indicado. Na Figura 10 pode ser visto a pressão indicada no nó inserida no desenho da rede de distribuição.



Figura 9 – Caixa de diálogo para inserção da pressão conhecida

UFC10 - Indicar pressão medida: ✕

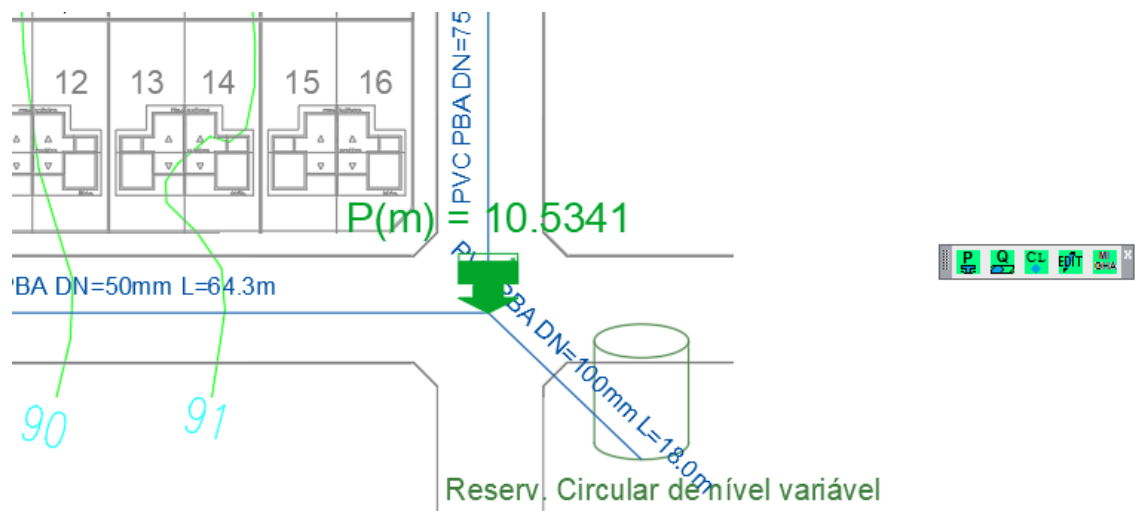
Coordenada x do nó (m):  Indicar

Coordenada y do nó (m):  Cancelar

Pressão medida (mca):

Fonte: Autor (2020).

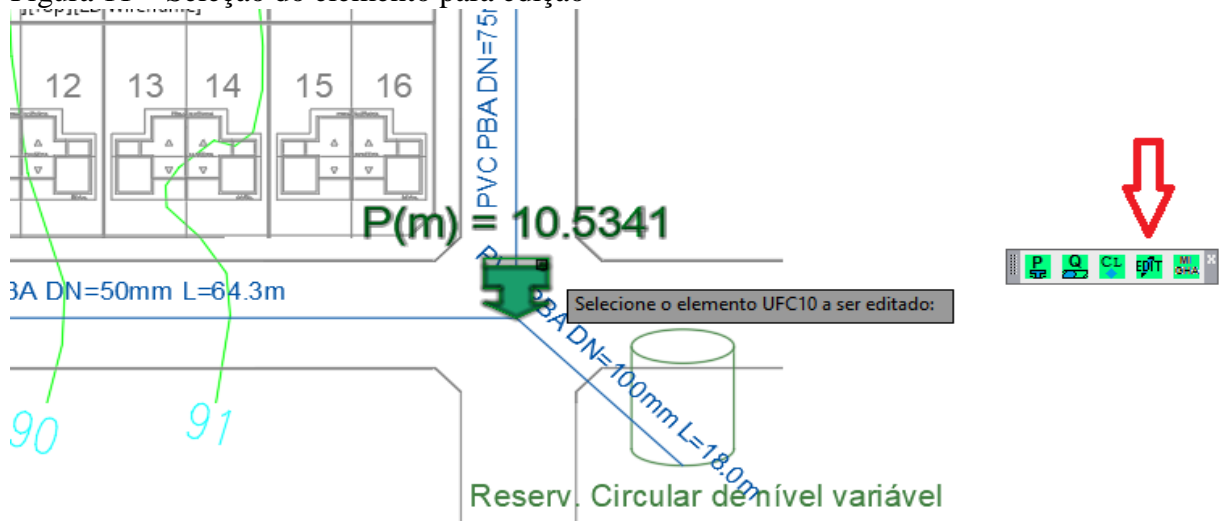
Figura 10 – Pressão conhecida inserida no nó



Fonte: Autor (2020).

Ao clicar no botão “Editar medições”, é solicitado ao usuário o elemento do programa UFC10 a ser editado, como mostrado na Figura 11.

Figura 11 – Seleção do elemento para edição



Fonte: Autor (2020).

### 3.5.2 Aplicativo UFC10 externo ao AutoCAD - Java

Após o botão “Calibrar pelo MIGHA” ser acionado no AutoCAD, automaticamente, a parte externa ao AutoCAD do UFC10 é iniciada, aparecendo para o usuário como mostrado na Figura 12. A parte externa ao AutoCAD do software UFC10 é utilizada para a realização dos cálculos de calibração da rede de distribuição. É nessa parte que é solicitado ao usuário a indicação se a calibração a ser realizada será de rugosidade/fator de atrito ou vazão. Ainda, deve ser informado pelo usuário o número de iterações desejadas e a função objetivo a ser atingida.

Após selecionar o botão “Calibrar”, será realizada a calibração da rede de distribuição de água utilizando o MIGHA. Uma janela é aberta com os resultados (Figura 13). O programa dá a opção para detectar os vazamentos através do botão “Detectar Vazamentos” localizado na parte superior esquerda da janela com os resultados da calibração. Ao selecionar-se a esta opção irá aparecer uma nova janela com as informações referentes aos vazamentos encontrados (Figura 14).

Figura 12 – Interface do UFC10 desenvolvida para o usuário – Java

UFC10 - MIGHA

Calibrar  Rugosidade  Vazão

Dados da Rede  Parâmetros medidos

**Dados dos Reservatórios**

ID	Carga Hidráulica (m)
1	101.64

**Dados dos Nós**

ID	Coordenada X	Coordenada y	Consumo (L/s)	Cota (m)	Pressão (m)	Carga Hidráulica (m)
2	604.62	4.88	0.2611	91.0	10.5341	101.5341
3	540.28	4.88	0.3504	88.212	12.5853	100.7973
4	470.06	4.88	0.3054	88.0	12.6511	100.6511
5	470.06	51.95	0.3054	87.024	13.5934	100.6174
6	540.28	51.95	0.5918	88.785	11.8947	100.6797

**Dados dos Trechos**

ID	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	$\epsilon$ (mm) - DW / C - HW	Vazão (L/s)	Velocidade (m/s)	Fator de Atrito	Perda de Carga (m/km)
23	45.6094	77.2	0.06	2.4988	0.5338	0.0243	4.5716
22	45.6463	54.6	0.0015	-0.4827	0.2061	0.0302	1.1981
21	64.3382	54.6	0.0015	-0.1963	0.0838	0.0392	0.2569
20	45.6463	54.6	0.0015	-0.333	0.1422	0.0335	0.6323
19	70.2216	54.6	0.0015	-0.0599	0.0256	0.0472	0.0289

Número Máximo de Iterações:

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

Fonte: Autor (2020).

Figura 13 – Janela com resultados da calibração

Calibracao - S.Q.D.G.H

**Rede Calibrada**

**Dados dos Nós**

ID	Coordenada X	Coordenada Y	Consumo (L/s)	Cota (m)	Pressão (m)	Carga Hidráulica (m)
2	604.62	4.88	0.2595	91.0	10.4992	101.4992
3	540.28	4.88	0.4896	88.212	12.289	100.501
4	470.06	4.88	0.4665	88.0	12.3046	100.3046
5	470.06	51.95	0.3057	87.024	13.2529	100.2769
6	540.28	51.95	0.592	88.785	11.5797	100.3647

**Dados dos Trechos**

ID	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	$\epsilon$ (mm) - DW / C...	Vazão (L/s)	Velocidade (m/s)	Fator Atrito	Perda de Carga ...
23	45.6094	77.2	0.06	3.0308	0.6475	0.0236	6.5272
22	45.6463	54.6	0.0015	-0.3768	0.1609	0.0324	0.7821
21	64.3382	54.6	0.0015	-0.0902	0.0385	0.0314	0.0435
20	45.6463	54.6	0.0015	-0.3612	0.1543	0.0328	0.7273
19	70.2216	54.6	0.0015	0.0197	0.0084	0.13	0.0085

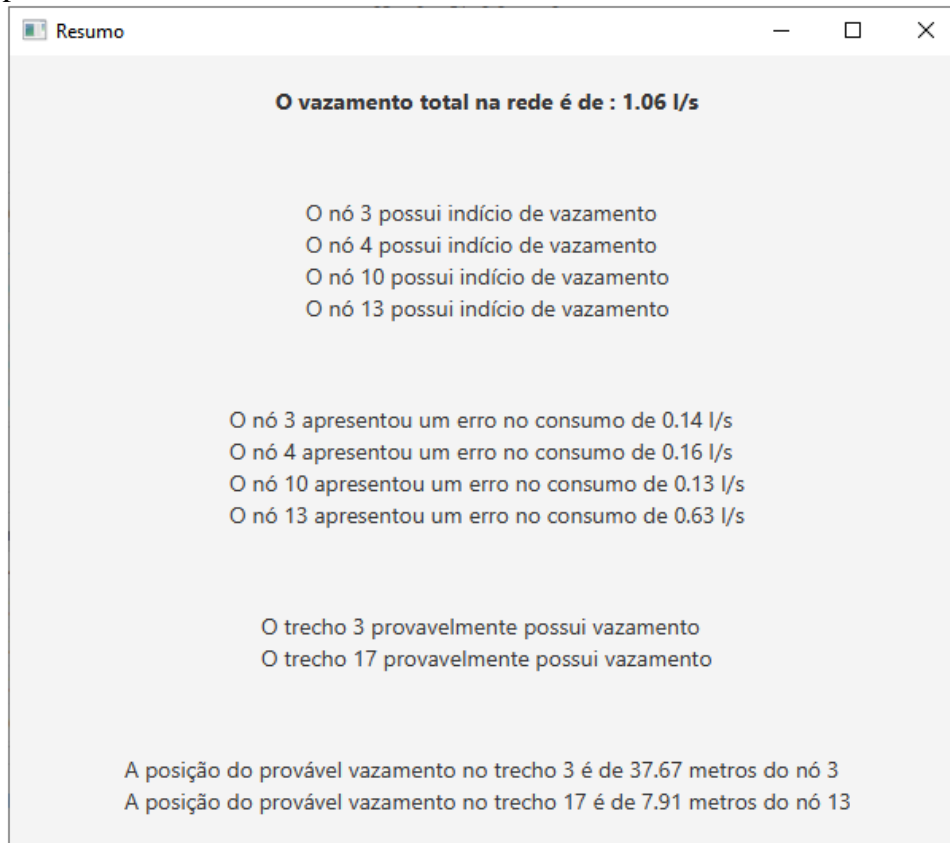
Número de Iterações: 10

Melhor Iteração: 10

Função Objetivo: 2.0284558492820386E-17

Fonte: Autor (2020).

Figura 14 – Janela com informações referentes aos vazamentos detectados pela rotina



Fonte: Autor (2020).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Calibrações

#### 4.1.1 Rede UFC2

As vazões dos trechos da Rede UFC2 foram calibradas para quatro disposições diferentes de nós com dados observados de pressão manométrica. A Tabela 7 mostra quais foram as disposições adotadas e os respectivos nós com dados observados de pressão.

Tabela 7 – Disposições dos nós com dados observados de pressão (Rede UFC2)

<b>Nós analisados</b>	<b>Quantidade de dados observados</b>
<b>3, 8, 10 e 15</b>	4
<b>3, 6, 8, 9, 10, 12 e 15</b>	7
<b>3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 e 15</b>	11
<b>2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 e 16</b>	15

Fonte: Autor (2020)

As calibrações foram realizadas para cada disposição dos dados observados de pressão manométrica e para todas as funções objetivo adotadas. A Tabela 8 mostra os erros médios relativos e absolutos provenientes das calibrações efetuadas através da rotina computacional utilizada para calibrar as vazões.

Tabela 8 – Erros médios relativos e absolutos provenientes da calibração das vazões para diferentes funções objetivo (Rede UFC2)

<b>Função objetivo</b>	<b>Quantidade de dados observados</b>	<b>Erro médio</b>					
		<b>Pressão</b>		<b>Consumo nodal</b>		<b>Vazão</b>	
		<b>Erro relativo (%)</b>	<b>Erro absoluto (m)</b>	<b>Erro relativo (%)</b>	<b>Erro absoluto (L/s)</b>	<b>Erro relativo (%)</b>	<b>Erro absoluto (L/s)</b>
<b>1</b>	<b>4</b>	0.0565%	0.0070	22.2585%	0.0858	13.8313%	0.0496
	<b>7</b>	0.0290%	0.0037	18.3966%	0.0635	10.1513%	0.0253
	<b>11</b>	0.0141%	0.0018	16.1117%	0.0529	9.4228%	0.0199
	<b>15</b>	0.0000%	0.0000	0.1689%	0.0007	0.0883%	0.0003
<b>2</b>	<b>4</b>	0.0565%	0.0070	22.2585%	0.0858	13.8313%	0.0496
	<b>7</b>	0.0290%	0.0037	18.3966%	0.0635	10.1513%	0.0253
	<b>11</b>	0.0140%	0.0018	16.0658%	0.0528	9.4297%	0.0199
	<b>15</b>	0.0000%	0.0000	0.1693%	0.0007	0.0889%	0.0003
<b>3</b>	<b>4</b>	0.0585%	0.0072	22.2259%	0.0862	14.6934%	0.0509
	<b>7</b>	0.0366%	0.0047	20.8125%	0.0716	10.1513%	0.0253
	<b>11</b>	0.0135%	0.0018	15.7464%	0.0520	9.6910%	0.0196
	<b>15</b>	0.0000%	0.0000	0.1694%	0.0007	0.0891%	0.0003
<b>4</b>	<b>4</b>	0.0583%	0.0072	21.9659%	0.0853	14.0826%	0.0505
	<b>7</b>	0.0290%	0.0037	18.3966%	0.0635	10.1513%	0.0253
	<b>11</b>	0.0138%	0.0018	15.9074%	0.0523	9.4740%	0.0197
	<b>15</b>	0.0000%	0.0000	0.1694%	0.0007	0.0891%	0.0003

Fonte: Autor (2020).

Observa-se através dos gráficos gerados para os erros (Apêndice A) que as simulações com diferentes funções objetivo não apresentam diferenças significativas nos resultados que justifique o destaque de algumas delas. Os gráficos com os resultados das simulações estão contidos no Apêndice B.

#### 4.1.2 Rede Ilhéus-BA

As vazões dos trechos da Rede Ilhéus-BA foram calibradas para quatro disposições diferentes de nós com dados observados de pressão manométrica. A Tabela 9 mostra quais foram as disposições adotadas e os respectivos nós com dados observados de pressão.

Tabela 9 – Disposições dos nós com dados observados de pressão (Rede Ilhéus-BA)

<b>Nós analisados</b>	<b>Quantidade de dados observados</b>
<b>3, 5, 7 e 13</b>	4
<b>2, 3, 7, 9, 11, 13 e 15</b>	7
<b>2, 4, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14 e 15</b>	11
<b>2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 e 15</b>	14

Fonte: Autor (2020).

As calibrações foram realizadas para cada disposição dos dados observados de pressão manométrica e para todas as funções objetivo adotadas. A Tabela 10 mostra os erros médios relativos e absolutos provenientes das calibrações efetuadas através da rotina computacional utilizada para calibrar as vazões.

Tabela 10 – Erros médios relativos e absolutos provenientes da calibração das vazões para diferentes funções objetivo (Rede Ilhéus-BA)

Função objetivo	Quantidade de dados observados	Erro médio					
		Pressão		Consumo nodal		Vazão	
		Erro relativo (%)	Erro absoluto (m)	Erro relativo (%)	Erro absoluto (L/s)	Erro relativo (%)	Erro absoluto (L/s)
1	4	2.2745%	0.3964	24.8616%	0.9756	15.0489%	1.4667
	7	2.2863%	0.4016	19.9758%	0.6688	13.0973%	1.1821
	11	0.1353%	0.0258	25.8772%	2.0872	6.0904%	0.9308
	14	0.0005%	0.0001	0.0183%	0.0036	0.0114%	0.0031
2	4	2.2745%	0.3964	24.8616%	0.9756	15.0489%	1.4667
	7	2.2863%	0.4016	19.9758%	0.6688	13.0973%	1.1821
	11	0.1358%	0.0259	25.9526%	2.0892	6.1450%	0.9317
	14	0.0005%	0.0001	0.0183%	0.0036	0.0114%	0.0031
3	4	2.2745%	0.3964	24.8616%	0.9756	15.0489%	1.4667
	7	2.2863%	0.4016	19.9758%	0.6688	13.0973%	1.1821
	11	0.1353%	0.0258	25.8772%	2.0872	6.0904%	0.9308
	14	0.0005%	0.0001	0.0183%	0.0036	0.0114%	0.0031
4	4	2.2745%	0.3964	24.8616%	0.9756	15.0489%	1.4667
	7	2.2863%	0.4016	19.9758%	0.6688	13.0973%	1.1821
	11	0.1358%	0.0259	25.9526%	2.0892	6.0904%	0.9308
	14	0.0005%	0.0001	0.0183%	0.0036	0.0114%	0.0031

Fonte: Autor (2020).

Observa-se através dos gráficos gerados para os erros (Apêndice A) que as simulações com diferentes funções objetivo não apresentam diferenças significativas nos resultados que justifique o destaque de algumas delas. Os gráficos com os resultados das simulações estão contidos no Apêndice B.

#### 4.1.3 Rede Walski (1983) – Gambale (2000)

As vazões dos trechos da Rede Walski (1983) – Gambale (2000) foram calibradas para sete disposições diferentes de nós com dados observados de pressão manométrica.

As calibrações foram realizadas para cada disposição dos dados observados de pressão manométrica para a função objetivo 1 (Equação 21), visto que os resultados obtidos através da utilização de diferentes funções objetivos não obtiveram diferenças significativas.

As Tabelas 11 e 12 mostram os erros médios relativos e absolutos, respectivamente, provenientes das calibrações efetuadas através da rotina computacional utilizada para calibrar as vazões.

Tabela 11 – Erros médios relativos (Rede Walski (1983) – Gambale (2000))

Nós com dados observados de pressão	Erro relativo médio		
	Pressões	Consumo nodal	Vazões
2	2.4157%	51.2577%	109.4344%
2 e 3	1.8502%	36.7201%	81.1112%
2, 3 e 4	1.3296%	41.5105%	45.9000%
2, 3, 4 e 5	0.8031%	15.8901%	28.0875%
2, 3, 4, 5 e 6	0.2632%	4.7448%	6.4213%
2, 3, 4, 5, 6 e 7	0.0709%	7.8605%	2.1003%
2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8	0.0002%	0.0036%	0.0052%

Fonte: Autor (2020).

Tabela 12 – Erros médios absolutos (Rede Walski (1983) – Gambale (2000))

Nós com dados observados de pressão	Erro absoluto médio		
	Pressões (m)	Consumo nodal (L/s)	Vazões (L/s)
2	1.3452	16.8361	11.1106
2 e 3	1.0262	17.2224	9.0952
2, 3 e 4	0.7352	10.5731	4.7182
2, 3, 4 e 5	0.4418	7.4403	3.6642
2, 3, 4, 5 e 6	0.1447	2.2445	1.5385
2, 3, 4, 5, 6 e 7	0.0388	2.2469	0.7872
2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8	0.0001	0.0020	0.0015

Fonte: Autor (2020).

#### 4.2 Detecção de Vazamentos

Foram inseridos vazamentos em formas de consumos nodais em diferentes trechos e nós da rede. Posteriormente utilizou-se a rotina desenvolvida para detecção de perdas de água com o objetivo de localizá-las nos trechos e nós da rede analisada.



## 4.2.1 Rede UFC2

Foram inseridos vazamentos nos trechos e nós da Rede UFC2 para realização de três testes. Os resultados das simulações com a rotina desenvolvida para detecção de vazamentos encontram-se abaixo.

### 4.2.1.1 Teste 1

Os vazamentos foram inseridos nos trechos 3, 10 e 17 e no nó 14, sendo que:

- O vazamento no trecho 3 tem consumo de 0,3 l/s e está localizado a 35,10 metros do nó 3;
- O vazamento no trecho 10 tem consumo de 1,0 l/s e está localizado 28,09 metros do nó 8;
- O vazamento no trecho 17 tem consumo de 0,76 l/s e está localizado a 9,40 metros do nó 13;
- O vazamento no nó 14 tem consumo de 0,27 l/s.

Os resultados encontrados utilizando a rotina de detecção de vazamentos implementada no UFC10 estão descritos na Figura 15.

Observa-se que a rotina identificou um trecho com vazamento adicional. Isso se deve a proximidade entre os trechos 10 e 17, fazendo com que a rotina, após constatar que os nós 9 e 10 possuem erros maiores que 0,1 l/s, identifique o trecho 12 como um possível trecho com vazamento.

Em relação ao cálculo da distância do vazamento nos trechos, a rotina retornou resultados satisfatórios para os trechos 3 e 17, com erros de 5,89% e 13,61%, respectivamente. Já para o trecho 10 a rotina apresentou um erro de 49,18%.

Figura 15 – Resultados obtidos através da utilização da rotina para detecção de vazamento na configuração 1 (Rede UFC2)



Fonte: Autor (2020).

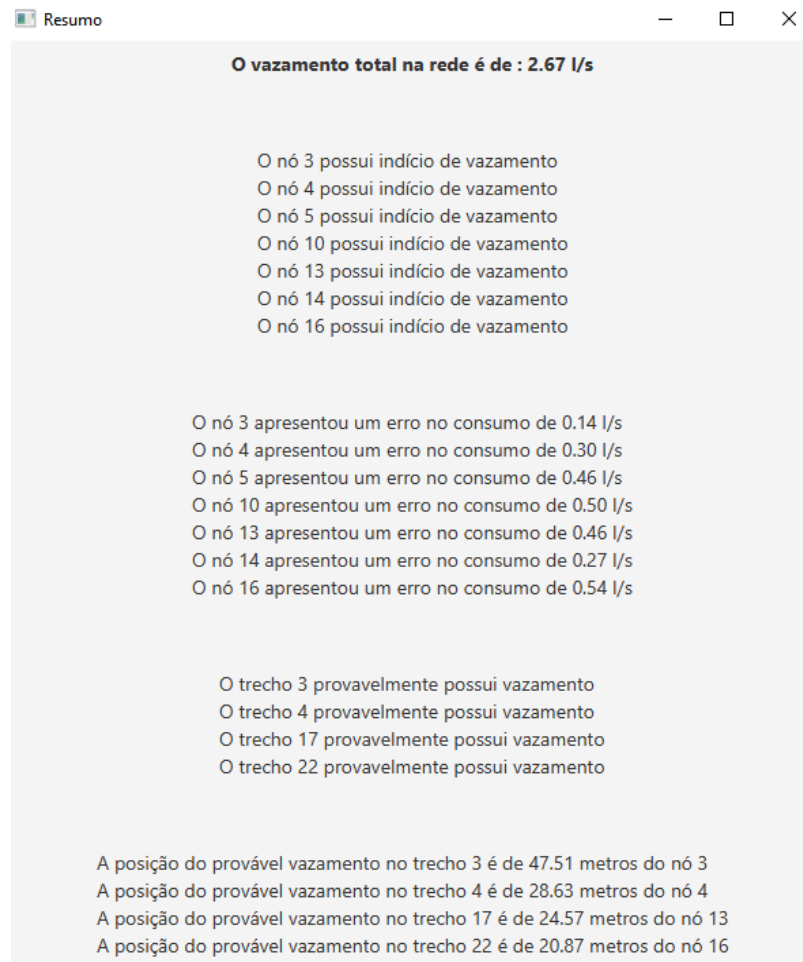
#### 4.2.1.2 Teste 2

Os vazamentos foram inseridos nos trechos 3, 4, 22 e no nó 10, sendo que:

- O vazamento no trecho 3 tem consumo 0,3 l/s e está localizado a 35,10 metros do nó 3;
- O vazamento no trecho 4 tem consumo 0,6 l/s e está localizado a 23,53 metros do nó 4;
- O vazamento no trecho 22 tem consumo de 1,0 l/s e está localizado a 27,39 metros do nó 16;
- O vazamento no nó 10 tem consumo de 0,5 l/s.

Os resultados encontrados utilizando a rotina de detecção de vazamentos implementada no UFC10 estão descritos na Figura 16.

Figura 16 – Resultados obtidos através da utilização da rotina para detecção de vazamentos na configuração 2 (Rede UFC2)



Fonte: Autor (2020).

Observa-se que a rotina identificou um trecho com vazamento adicional. Isso se deve ao fato de o nó 10 possuir um vazamento. Logo, após a rotina constatar que os nós 10 e 13 possuem erros maiores que 0,1 l/s e são contorno do trecho 17, este é identificado como um possível trecho com vazamento.

Em relação ao cálculo da distância do vazamento nos trechos, a rotina retornou os resultados para os trechos 3, 4 e 22, com erros de 35,35%, 21,67% e 23,80%, respectivamente.

Os resultados para essa configuração não foram satisfatórios devido aos vazamentos estarem localizados em trechos adjacentes. No caso dos trechos 3 e 4, os consumos dos vazamentos localizados em ambos foram divididos entre o nó 4, resultando nos altos erros encontrados.

### 4.2.1.3 Teste 3

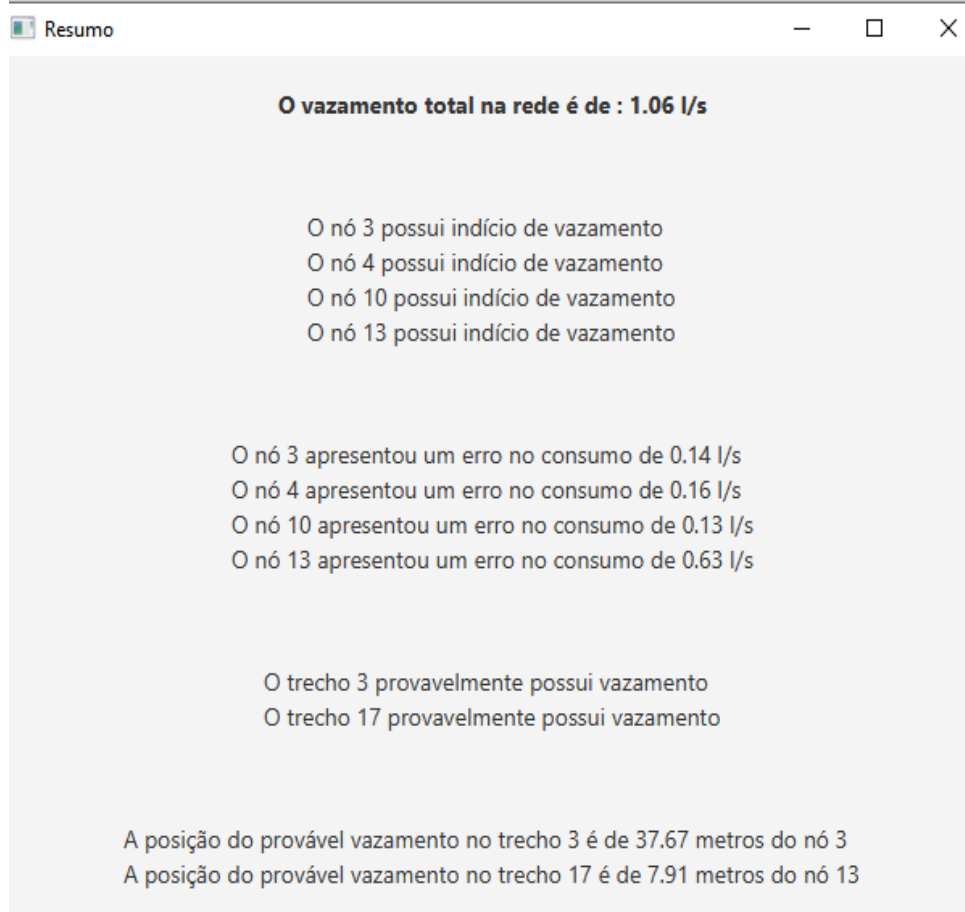
Os vazamentos foram inseridos nos trechos 3 e 17, sendo que:

- O vazamento no trecho 3 tem consumo 0,3 l/s e está localizado a 35,10 metros do nó 3;
- O vazamento no trecho 17 tem consumo de 0,76 l/s e está localizado a 9,40 metros do nó 13.

Os resultados encontrados utilizando a rotina de detecção de vazamentos implementada no UFC10 estão descritos na Figura 17.

Observa-se que para esta configuração a rotina identificou somente os trechos que realmente foram inseridos os vazamentos, sem erros. Já em relação ao cálculo das localizações dos vazamentos nos trechos 3 e 17 a rotina retornou erros de 7,32% e 15,85%, respectivamente.

Figura 17 – Resultados obtidos através da utilização da rotina para detecção de vazamentos na configuração 3 (Rede UFC2)



Fonte: Autor (2020).

## 4.2.2 Rede Ilhéus-BA

Foram inseridos vazamentos nos trechos e nós da Rede Ilhéus-BA para realização de três testes. Os resultados das simulações com a rotina desenvolvida para detecção de vazamentos encontram-se abaixo.

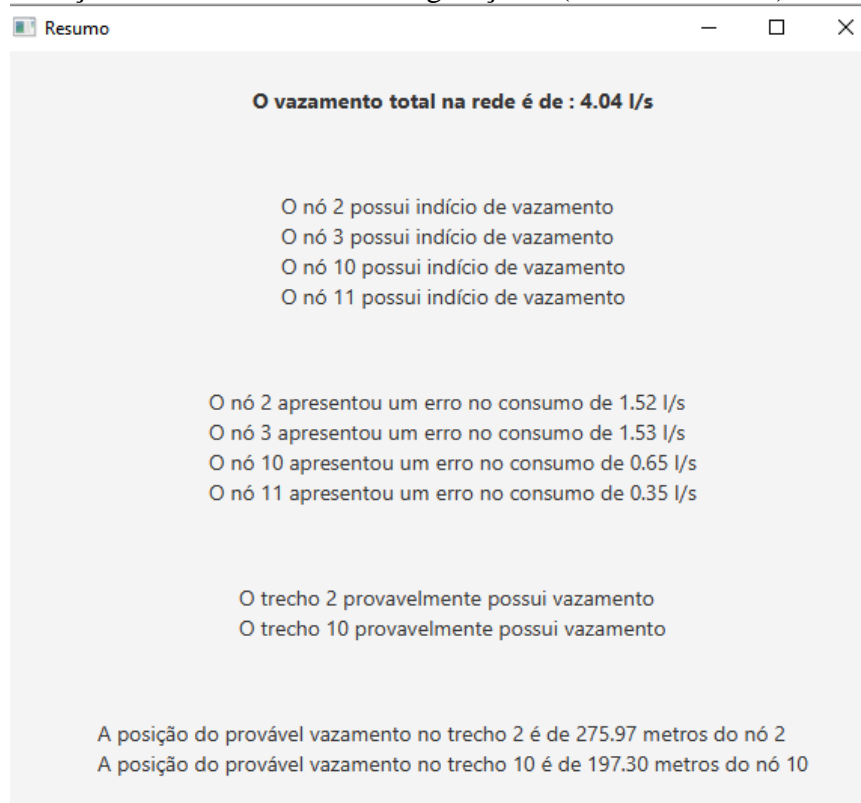
### 4.2.2.1 Teste 1

Os vazamentos foram inseridos nos trechos 2 e 10, sendo que:

- O vazamento no trecho 2 tem consumo de 3,0 l/s e está localizado a 275 metros do nó 2;
- O vazamento no trecho 10 tem consumo de 1,0 l/s e está localizado a 224 metros do nó 10.

Os resultados encontrados utilizando a rotina de detecção de vazamentos implementada no UFC10 estão descritos na Figura 18.

Figura 18 – Resultados obtidos através da utilização da rotina para detecção de vazamentos na configuração 1 (Rede Ilhéus-BA)



Fonte: Autor (2020).

Observa-se que, para esta configuração, a rotina identificou somente os trechos que realmente foram inseridos os vazamentos. Já em relação ao cálculo das localizações dos vazamentos nos trechos 2 e 10 a rotina retornou erros de 0,35% e 11,92%, respectivamente.

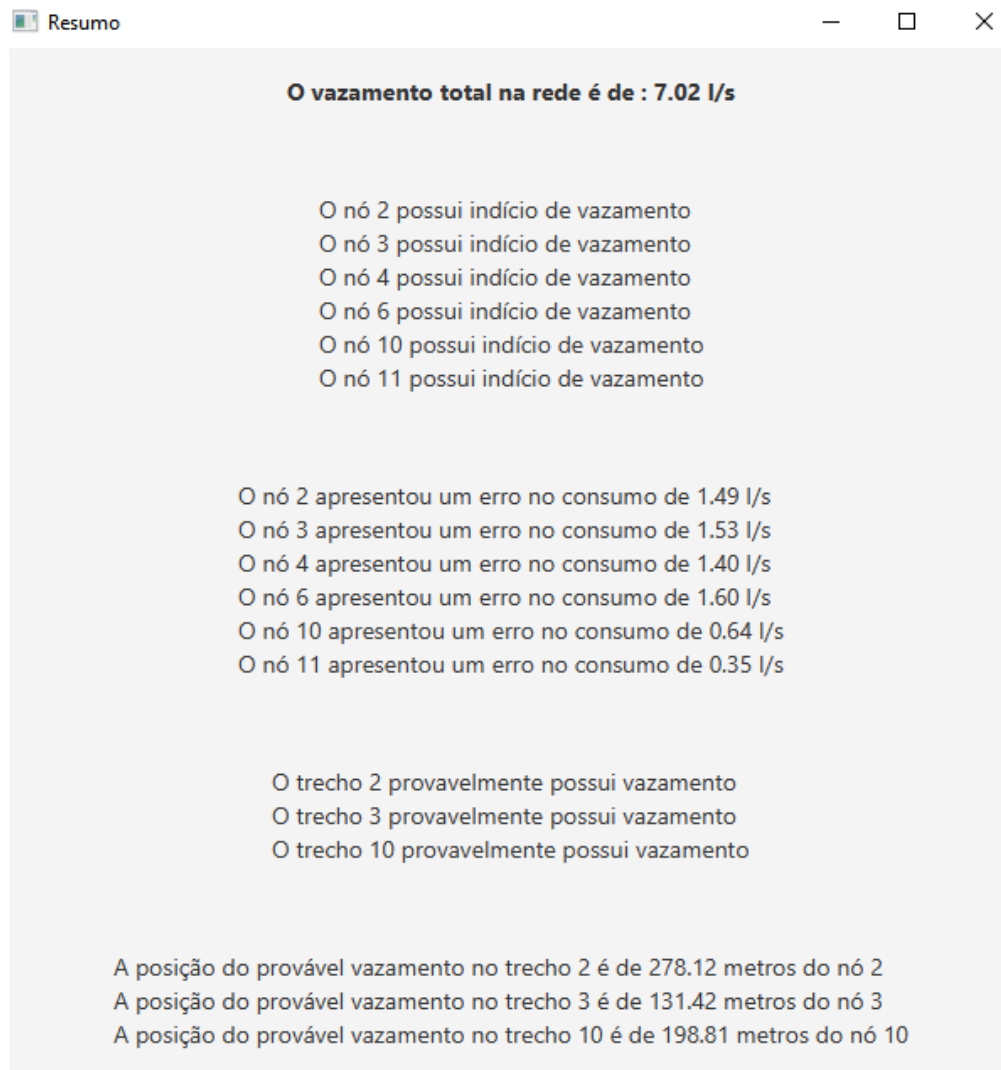
#### **4.2.2.2 Teste 2**

Os vazamentos foram inseridos nos trechos 2 e 10 e nos nós 4 e 6, sendo que:

- O vazamento no trecho 2 tem consumo de 3,0 l/s e está localizado a 275 metros do nó 2;
- O vazamento no trecho 10 tem consumo de 1,0 l/s e está localizado a 224 metros do nó 10.
- O vazamento no nó 4 tem consumo de 2,4 l/s;
- O vazamento no nó 6 tem consumo de 1.6 l/s.

Os resultados encontrados utilizando a rotina de detecção de vazamentos implementada no UFC10 estão descritos na Figura 19.

Figura 19 – Resultados obtidos através da utilização da rotina para detecção de vazamentos na configuração 2 (Rede Ilhéus-BA)



Fonte: Autor (2020)

Observa-se que a rotina identificou um trecho com vazamento adicional. Isso se deve ao fato de o nó 4 possuir um vazamento. Logo, após a rotina constatar que os nós 3 e 4 possuem erros maiores que 0,1 l/s e são contorno do trecho 3, este é identificado como um possível trecho com vazamento.

Em relação ao cálculo da distância do vazamento nos trechos, a rotina retornou os resultados para os trechos 2 e 10, com erros de 1,13% e 11,24%, respectivamente.

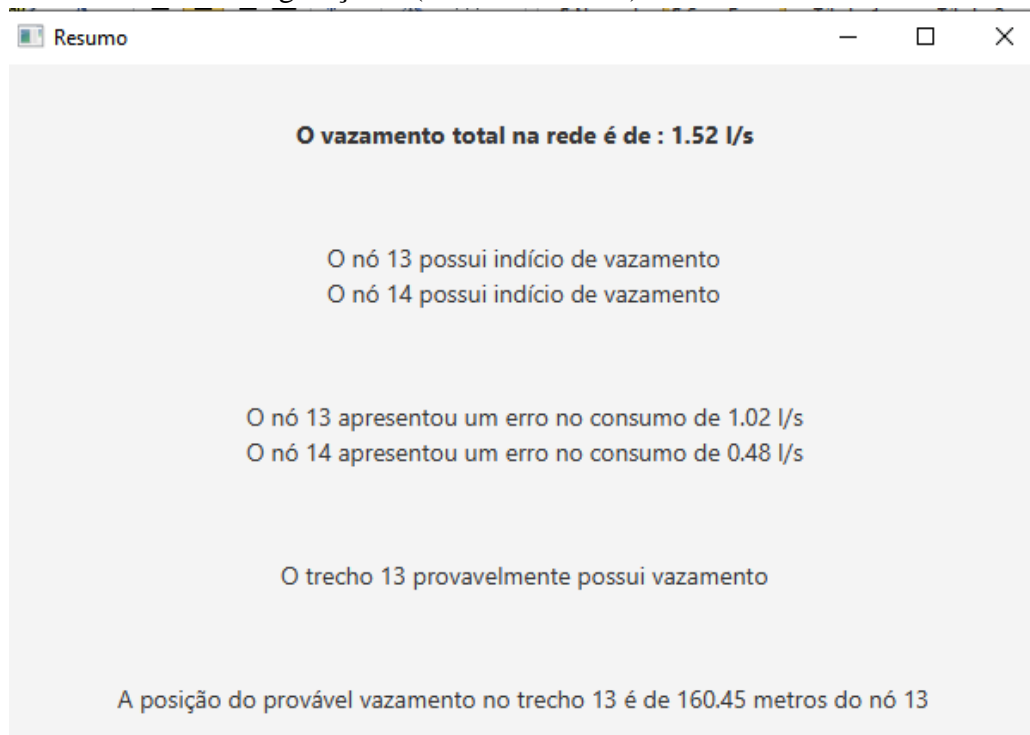
### 4.2.2.3 Teste 3

O vazamento foi inserido no trecho 13, sendo que:

- O vazamento no trecho 13 tem consumo de 1,5 l/s e está localizado a 166,67 metros do nó 13.

Os resultados encontrados utilizando a rotina de detecção de vazamentos implementada no UFC10 estão descritos na Figura 20.

Figura 20 – Resultados obtidos através da utilização da rotina para detecção de vazamentos na configuração 3 (Rede Ilhéus-BA)



Fonte: Autor (2020)

Observa-se que, para esta configuração, a rotina identificou corretamente o único trecho que possui vazamento.

Em relação ao cálculo da distância do vazamento no trecho, a rotina retornou o resultado para o trecho 13 com erro de 3,73%.



### 4.2.3 Rede Walski (1983) – Gambale (2000)

Foram inseridos vazamentos nos trechos e nós da Rede Walski (1983) – Gambale (2000) para realização de três testes. Os resultados das simulações com a rotina desenvolvida para detecção de vazamentos encontram-se abaixo.

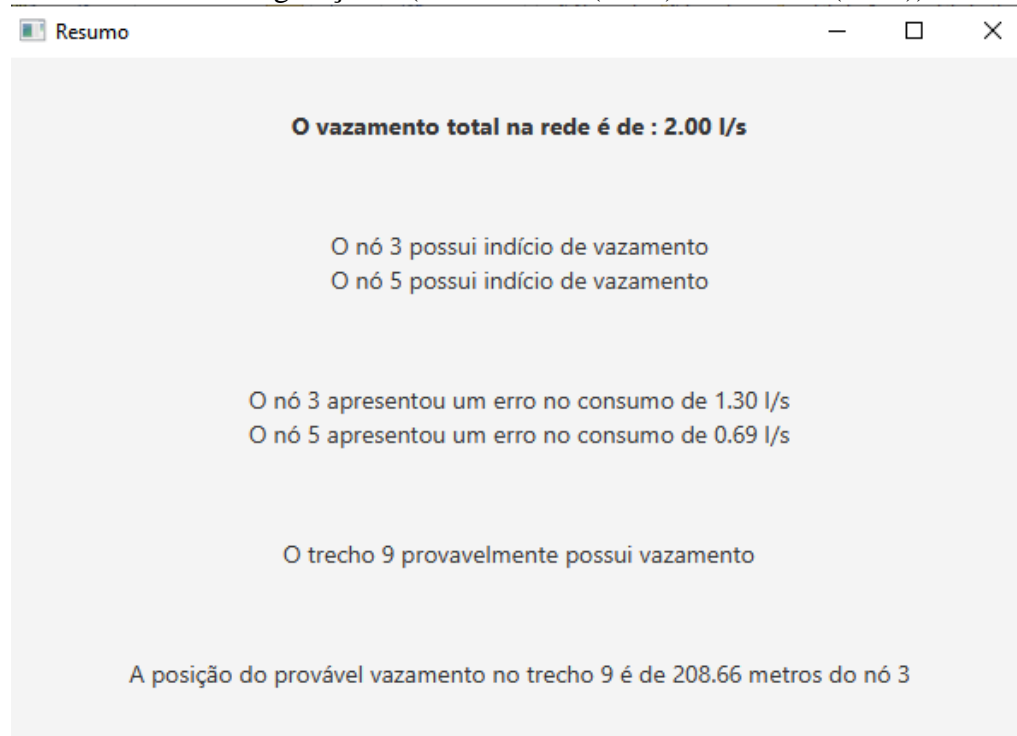
#### 4.2.3.1 Teste 1

O vazamento foi inserido no trecho 9, sendo que:

- O vazamento no trecho 9 tem consumo de 2,0 l/s e está localizado a 200 metros do nó 3.

Os resultados encontrados utilizando a rotina de detecção de vazamentos implementada no UFC10 estão descritos na Figura 21.

Figura 21 – Resultados obtidos através da utilização da rotina para detecção de vazamentos na configuração 1 (Rede Walski (1983) – Gambale (2000))



Fonte: Autor (2020)

Observa-se que, para esta configuração, a rotina identificou corretamente o único trecho que possui vazamento.

Em relação ao cálculo da distância do vazamento no trecho, a rotina retornou o resultado para o trecho 13 com erro de 4,33%.

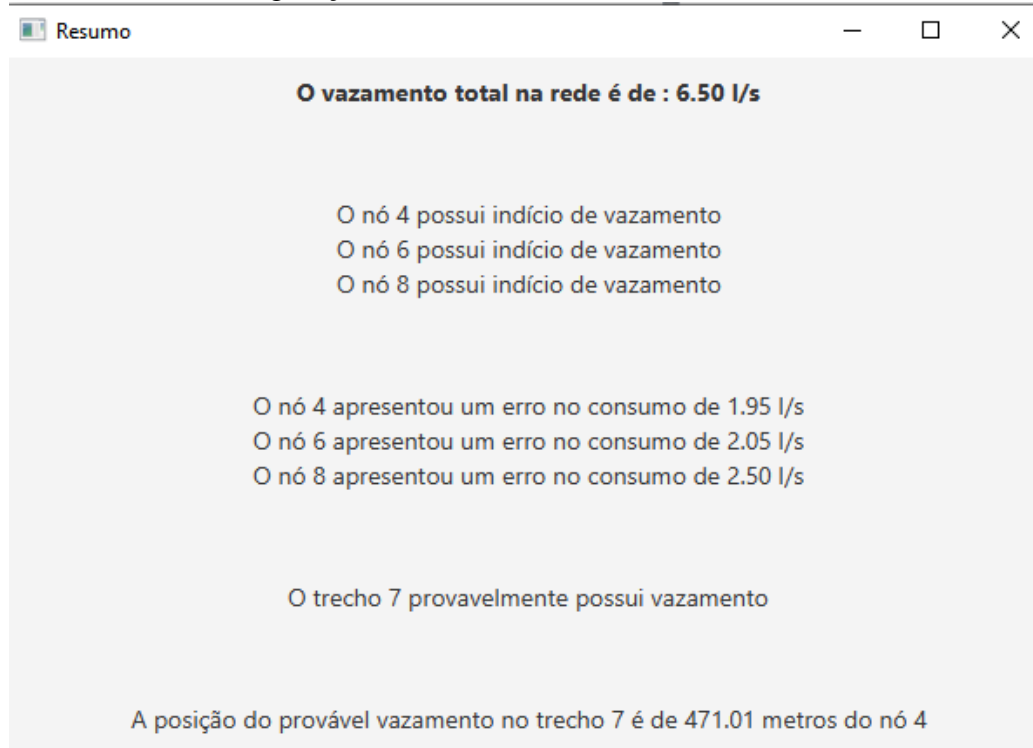
#### 4.2.3.2 Teste 2

O vazamento foi inserido no trecho 7 e no nó 8, sendo que:

- O vazamento no trecho 7 tem consumo 4,0 l/s e está localizado a 460 metros do nó 4;
- O vazamento no nó 8 tem consumo de 2,50 l/s.

Os resultados encontrados utilizando a rotina de detecção de vazamentos implementada no UFC10 estão descritos na Figura 22.

Figura 22 – Resultados obtidos através da utilização da rotina para detecção de vazamentos na configuração 2 (Rede Walski (1983) – Gambale (2000))



Fonte: Autor (2020)

Observa-se que, para esta configuração, a rotina identificou corretamente o único trecho que possui vazamento.

Em relação ao cálculo da distância do vazamento no trecho, a rotina retornou o resultado para o trecho 7 com erro de 2,39%.

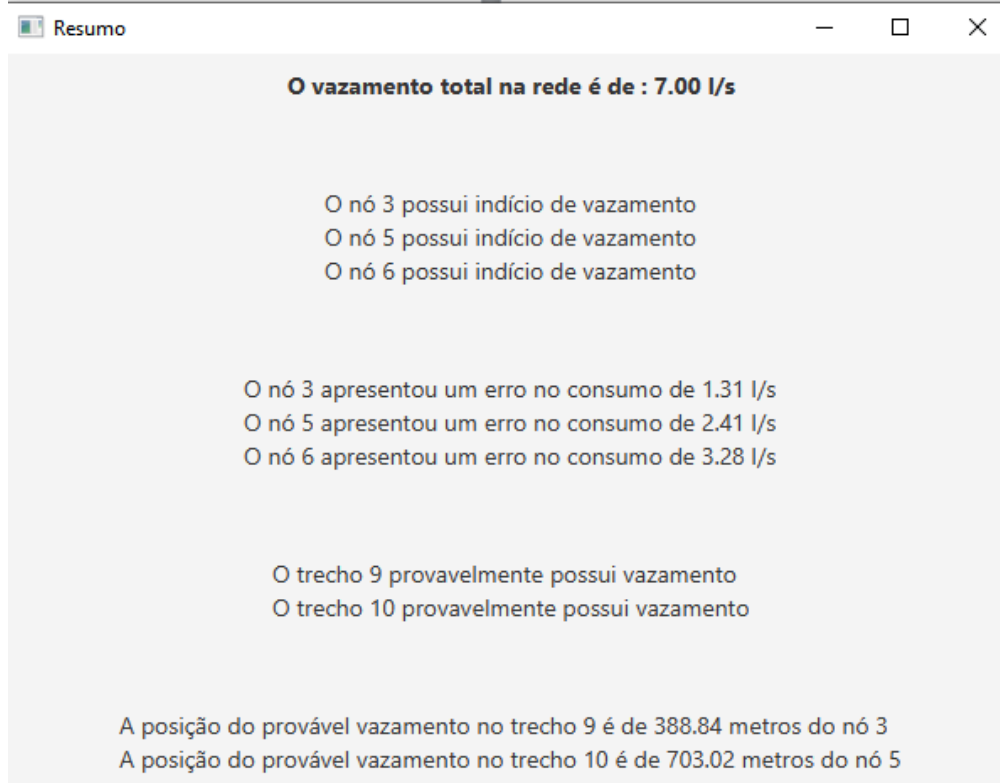
### 4.2.3.3 Teste 3

Os vazamentos foram inseridos nos trechos 9 e 10, sendo que:

- O vazamento no trecho 9 tem consumo de 2,0 l/s e está localizado a 200 metros do nó 3;
- O vazamento no trecho 10 tem consumo de 5,0 l/s e está localizado a 610 metros do nó 6.

Os resultados encontrados utilizando a rotina de detecção de vazamentos implementada no UFC10 estão descritos na Figura 23.

Figura 23 – Resultados obtidos através da utilização da rotina para detecção de vazamentos na configuração 3 (Rede Walski (1983) – Gambale (2000))



Fonte: Autor (2020)

Observa-se que para esta configuração a rotina identificou somente os trechos que realmente foram inseridos os vazamentos, sem erros.

O cálculo das localizações dos vazamentos nos trechos 9 e 10 a rotina retornou erros de 94,42% e 15,25%, respectivamente.

Os resultados para essa configuração não foram satisfatórios devido aos vazamentos estarem localizados em trechos adjacentes. No caso dos trechos 9 e 10, os

consumos dos vazamentos localizados em ambos foram divididos entre o nó 5, resultando nos altos erros encontrados.

## 5 CONCLUSÃO

Os erros nas redes UFC2 e Walski (1983) – Gambale (2000) aumentam à medida que a quantidade de nós com dados observados de pressão decaem. Para a rede Ilhéus-BA, os erros para 7 e 4 nós com dados observados de pressão são menores que para 11 nós com dados observados. Isso se deve ao fato de que as configurações com 7 e 4 nós com dados observados não englobaram o nó 3, que possui um consumo muito maior do que todos os outros. Logo, para resultados mais precisos no processo de calibração de vazões de uma rede de distribuição de água é necessário se ter dados observados de pressão para os pontos com maiores e menores consumo desta rede.

A rotina computacional implementada para detecção de vazamentos nas redes obteve os melhores resultados nos testes em que os vazamentos foram inseridos em trechos distantes entre si, ou seja, para o teste 3 na Rede UFC2, testes 1 e 3 na Rede Ilhéus-BA e testes 1 e 2 na Rede Walski (1983) – Gambale (2000). Nestas situações a Equação 20 conseguiu estimar aproximadamente o ponto em que o vazamento está localizado, detectando somente os trechos que realmente possuíam vazamentos.

Para os testes 1 e 2 da Rede UFC2 e teste 2 da Rede Ilhéus-BA, a rotina detectou trechos adicionais com vazamento. Isso se deu ao fato de trechos com vazamentos próximos entre si compartilharem nós com erros maiores que 0,1 L/s, fazendo que a rotina identificasse estes como nós de contorno de outros trechos e os definindo como possíveis trechos com perdas de água. Nestes casos os cálculos das distâncias dos vazamentos foram satisfatórios quando os trechos identificados não sofreram influência de vazamentos em nós próximos.

Os resultados para o teste 3 da Rede Walski (1983) – Gambale (2000) não foram satisfatórios devido aos vazamentos estarem localizados em trechos adjacentes. No caso dos trechos 9 e 10, os consumos dos vazamentos localizados em ambos foram divididos entre o nó 5, resultando nos altos erros encontrados. Logo, para trechos adjacentes, a rotina não consegue calcular a localização do vazamento corretamente, mas identifica os trechos com perdas de água.

Para obter-se resultados mais precisos é necessário ter dados de pressão para todos os nós da rede analisada, pois os erros, tanto os relativos como absolutos, após a calibração

das vazões com dados observados de pressão em todos os nós tiveram resultados muito melhores do que todas as outras simulações com menores quantidade de dados.

As calibrações realizadas neste trabalho não apontaram para uma função objetivo melhor. Em alguns casos, diferentes funções retornaram diferentes iterações como solução. No entanto, nestes casos, o método já havia se estabilizado e as diferenças entre uma iteração e outra eram mínimas, o que reforça a necessidade de estabelecer um valor limite para a função objetivo como critério de parada do modelo, de modo a evitar a realização de cálculos desnecessários.

A rotina não conseguiu determinar precisamente nós com vazamentos na rede. Ela retorna todos os nós com os erros maiores que 0,1 L/s como possíveis pontos com vazamento.

Para redes em geral, mesmo que a rotina não consiga, em algumas situações, estimar os pontos exatos onde se encontram os vazamentos, ela ainda permite localizar os possíveis nós e trechos em que os vazamentos estão localizados.

Por fim, recomenda-se para trabalhos futuros a aplicação do modelo desenvolvido em redes reais. Sugere-se também a aplicação do modelo utilizando dados de vazões medidas ou uma adaptação deste método de calibração que incorpore simulações dinâmicas, de modo a permitir o uso de dados contínuos de pressões medidas em determinados nós da rede. Pode-se ainda utilizar modelos matemáticos, como algoritmos genéticos, para realizar a calibração de vazões em redes de distribuição de água afim verificar o comportamento após a inserção de vazamentos.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.218 – Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público – Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ARAÚJO, R. S. A.; BEZERRA, A. A. Método para diâmetro e fator de atrito: rede de distribuição. **Revista DAE**. v. 64, n. 203, p. 48-63, 2016.
- AZEVEDO NETTO, J. M. **Manual de Hidráulica**. 9. ed., São Paulo: Blucher, 2018.
- BABITT, H. E.; AMSBARY, F. C.; GWINN, D. R. The detection of leaks in underground pipes. **Journal (American Water Works Association)**. Vol. 7. p. 589-595. 2020
- 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. 974 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.
- CASSA, A. M.; ZYL, J. E. V; LAUBSCHER, R. F.; A numerical investigation into the effect of pressure on holes and cracks in water supply pipes. **Urban Water Journal**. v. 7 (2). p. 109120. 2010.
- COSTA, M. G.; CASTRO, M. A. H. Uma interface de pré-processamento para o Epanet utilizando o AutoCAD: o programa UFC2. In: SEMINÁRIO IBEROAMERICANO SOBRE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO URBANO DE ÁGUA, 6., 2006, João Pessoa. **Anais do VI SEREA**, 2006.
- DIGITAL/ASCOM. Agência Nacional de Águas. **Água no mundo: Situação da Água no Mundo**. 2018. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/textos-das-paginas-do-portal/agua-no-mundo/agua-no-mundo>>. Acesso em: 09 mar. 2018.
- DINI, M.; TABESH, M. A New Method for Simultaneous Calibration of Demand Pattern and Hazen-Williams Coefficients in Water Distribution Systems. **Water Resources Management**. v. 28, p. 2021-2034, 2014.
- GAMBOA-MEDINA, M. M. **Deteção de vazamentos em redes sob pressão baseada na análise dos sinais de pressão e vazão com um sistema de reconhecimento de padrões**. 131 p. Dissertação (Mestrado). - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013.
- GARCEZ, L. N.; AZEVEDO NETTO, J. M. Métodos novos para o estudo das rêsdes hidráulicas. **Revista DAE**. v. 9, n. 19, p. 3-18, 1947.
- GUO, X.; ZHANG, C. M. Hydraulic Gradient Comparison Method to estimate aquifer hydraulic parameters under steady-state conditions. **Ground Water**. v. 38, n. 6, p. 815-826, 2000.

HELLER, L. The crisis in water supply: how different it can look through the lens of the human right to water. **Cadernos de Saúde Pública**. v. 31, n. 3, p. 447-449, 2015.

NIVEN, R. K.; KHALILI, N. In situ fluidisation by a single internal vertical jet. **Journal of Hydraulic Research**. v. 36. p. 199-228. 1998.

ORMSBEE, L. E.; LINGIREDDY, S. Calibrating Hydraulic Network Models. **Journal of the American Water Works Association**. V. 89, n. 2, p. 42-50, 1997.

ORMSBEE, L. E.; WOOD, D. J. Explicit Pipe Network Calibration. **Journal of Water Resources Planning and Management**. v. 112, n. 2, p. 116-182, 1986.

PAVIANI, Aldo. **Consumo de Água em Brasília: Crise e Oportunidade**. Brasília: Codeplan, 2015. 26 p.

PEREIRA, R.F. **Calibração do Coeficiente de Decaimento do Cloro (Kw) em Redes de Abastecimento de Água Utilizando o Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo (MIGHA)**. 2009. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

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

RIGHETTO, A. M. Calibração de modelo hidráulico de rede de distribuição de água. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 6, n. 3, p. 33-44, 2001.

ROSSMAN, L. A. **EPANET 2.0: Manual do Usuário**. João Pessoa: Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento, 2009. Tradução e adaptação para língua portuguesa (versão brasileira).

ROSSMAN, L. A. **EPANET 2: User's Manual**. National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development of U.S. Environmental Protection Agency. Cincinnati, OH, 2000.

SANDERS NETO, V. C. **Modelagem Computacional do Transitório Hidráulico de Redes de Distribuição de Água Utilizando o Método Lagrangeano das Ondas Características**. 2019. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

SARBU, I. Nodal Analysis of Urban Water Distribution Networks. **Water Resources Management**. v. 28, p. 3143-3159, 2014.

SCHUSTER, H. D. M.; ARAÚJO, H. D. B. Uma Formulação Alternativa do Método Iterativo de Gradiente Hidráulico no Procedimento de Calibração dos Parâmetros Hidrodinâmicos do Sistema Aqüífero. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 9, n 2, p. 31-37, 2004.

SILVA, W. T. P.; SILVA, L. M.; CHICHORRO, J. F. Gestão de recursos hídricos: perspectivas do consumo per capita de água em Cuiabá. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 13, n, 1, p. 8-14, 2008.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2015**. Brasília, 2017.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO: **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto - 2017**. Brasília, 2019.

SOARES, A. K.; CHEUNG, P. B.; REIS, L. F. R.; SANDIM, M. P. Avaliação das perdas físicas de um setor da rede de abastecimento de água de Campo Grande-MS via modelo inverso. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 9, n. 4, p. 312-321, 2004.

SOLOMATINE, D. P.; DIBIKE, Y. B.; KUKURIC, N. Automatic calibration of groundwater models using global optimization techniques. **Hydrological Sciences Journal**. v. 44, n. 6, p. 879-894, 1999.

SOUSA, J. R. **Análise do Padrão de Pressões e de Correlações Empíricas para Caracterização de Vazamentos na Rede de Distribuição de Água de Fortaleza/Ce**. 2019. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

SPILOTIS, M.; TSAKIRIS, G. Water Distribution System Analysis: Newton-Raphson Method Revisited. **Journal of hydraulic engineering**. v. 137, n. 8, p. 852-855, 2011.

SPERLING, M. von. **Princípios básicos do tratamento de esgotos**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; UFMG, 1996. 211 p. (Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, v. 2).

TODINI, E.; PILATI, S. A gradient method for the analysis of pipe networks. **International Conference on Computer Applications for Water Supply and Distribution**. 1987.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de Água**. 3. ed., São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

TUCCI, C. E. et al. **Hidrologia: Ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2015. 943 p.

WALSKI, T. M. Technique for Calibrating Network Models. **Journal of Water Resources Planning and Management**. v. 109, n. 4, p. 360-372, 1983.

ZYL, J. E. V .; CASSA, Amanda M. Modeling elastically deforming leaks in water distribution pipes. **Journal of Hydraulic Engineering**. v. 140. p. 182-189. 2014.

ZYL, J. E. V . et al. Soil fluidisation outside leaks in water distribution pipes – preliminary observations. **Water Management**. v. 166. p. 546-555. 2013.

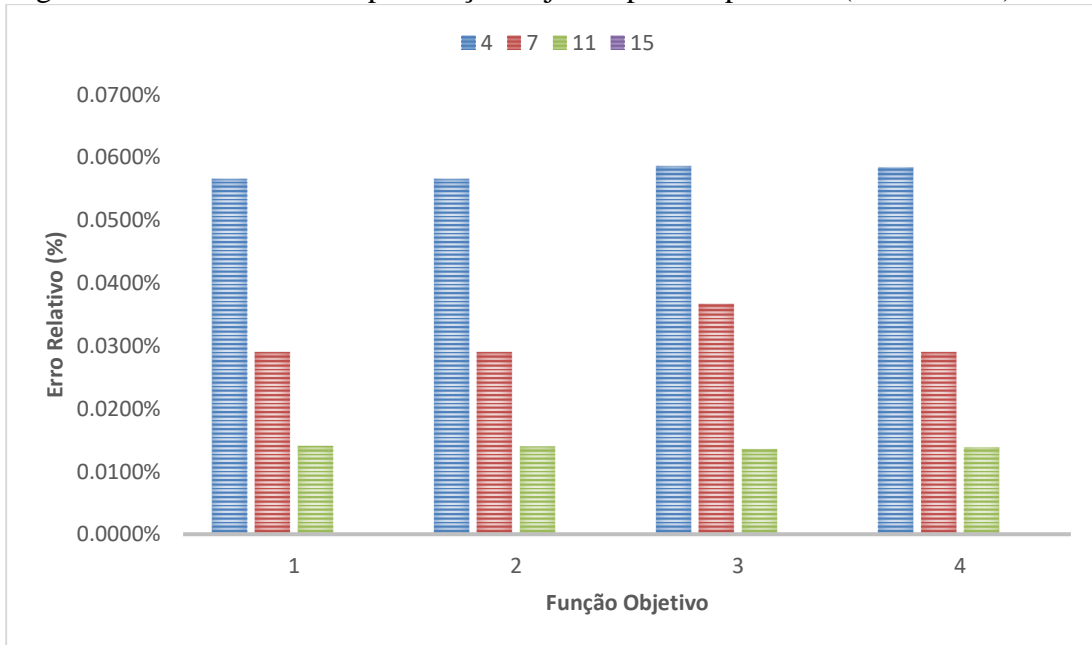
ZYL, J. E.; LAMBERT, A. O.; COLLINS, R. Realistic modeling of leakage and intrusion flows through leak openings in pipes. **Journal of Hydraulic Engineering**. v. 143. 2017.



## APÊNDICES

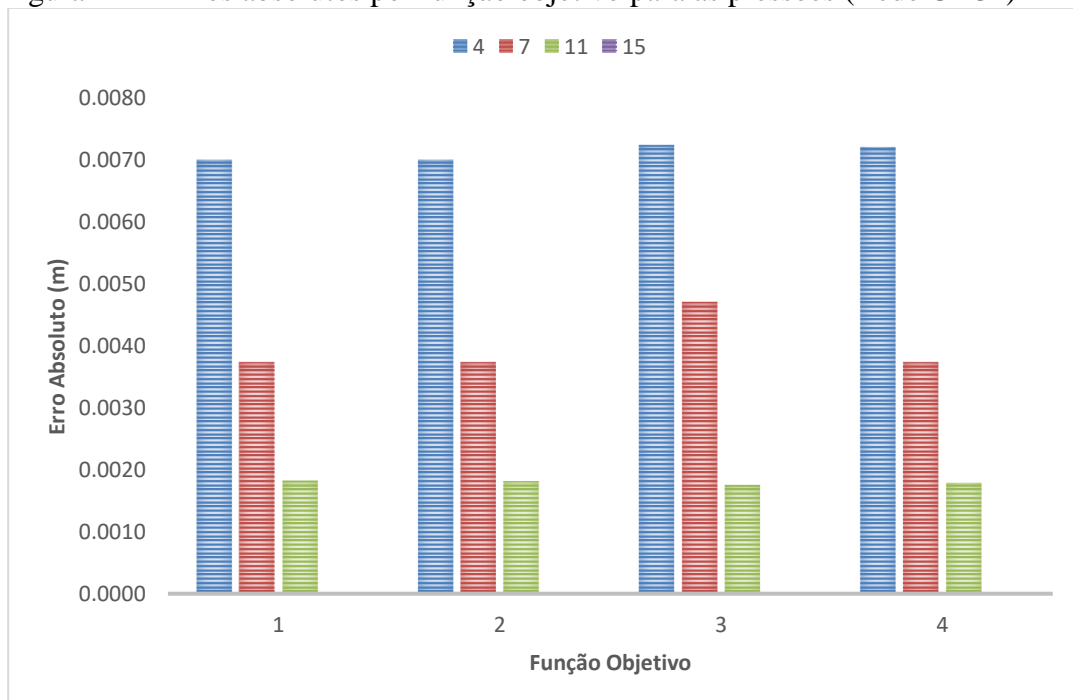
### APÊNDICE A – GRÁFICOS COM OS ERROS POR FUNÇÃO OBJETIVO

Figura A1 – Erros relativos por função objetivo para as pressões (Rede UFC2)



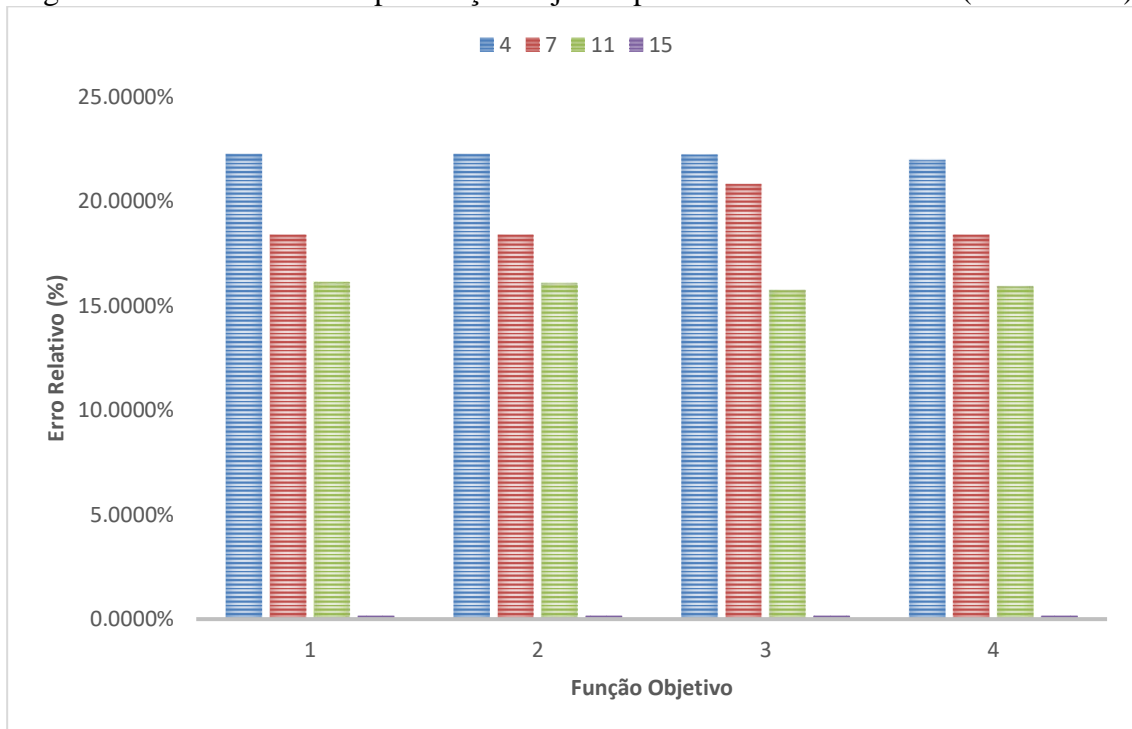
Fonte: Autor (2020).

Figura A2 – Erros absolutos por função objetivo para as pressões (Rede UFC2)



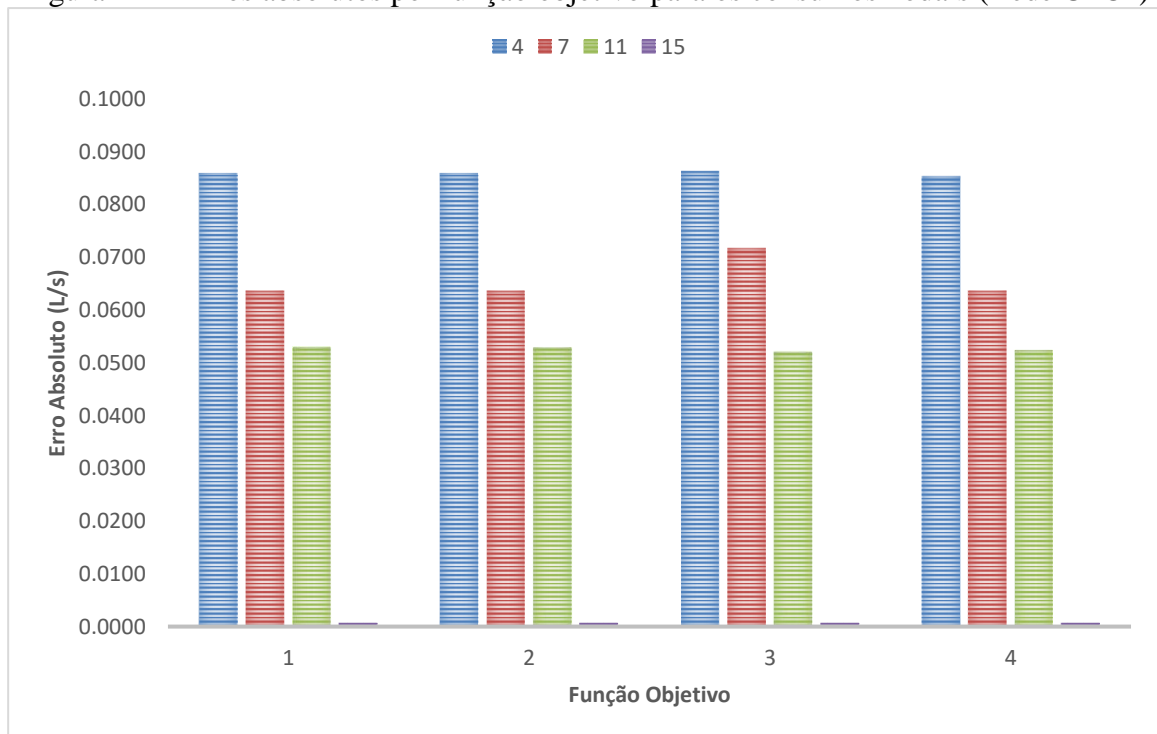
Fonte: Autor (2020).

Figura A3 – Erros relativos por função objetivo para os consumos nodais (Rede UFC2)



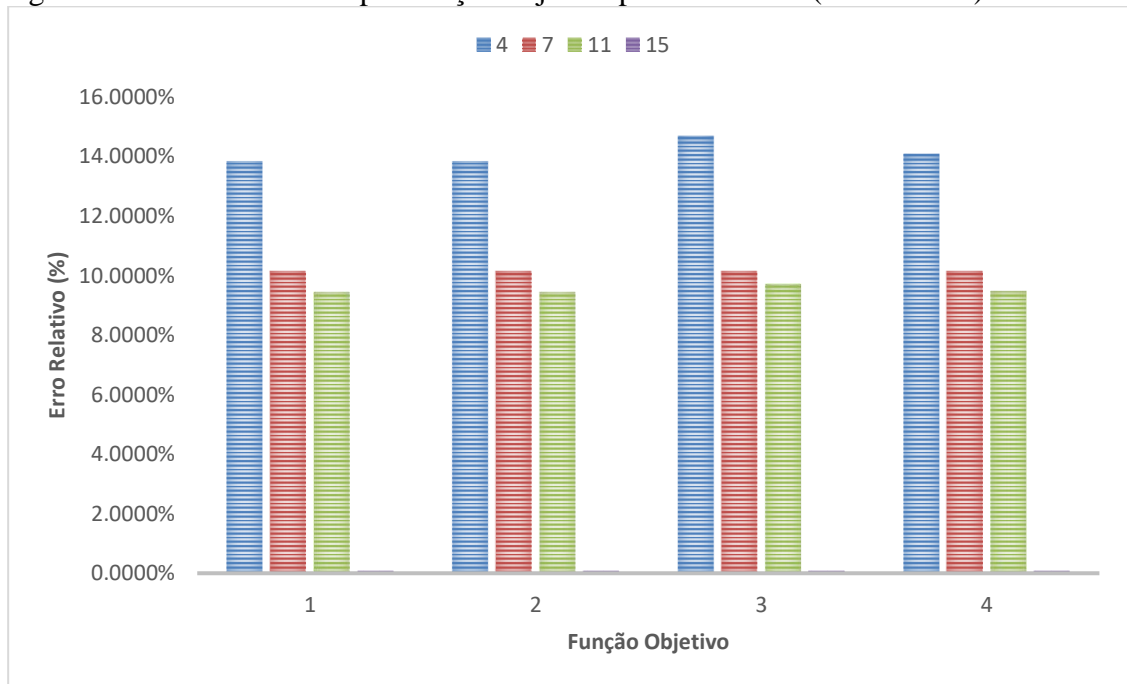
Fonte: Autor (2020).

Figura A4 – Erros absolutos por função objetivo para os consumos nodais (Rede UFC2)



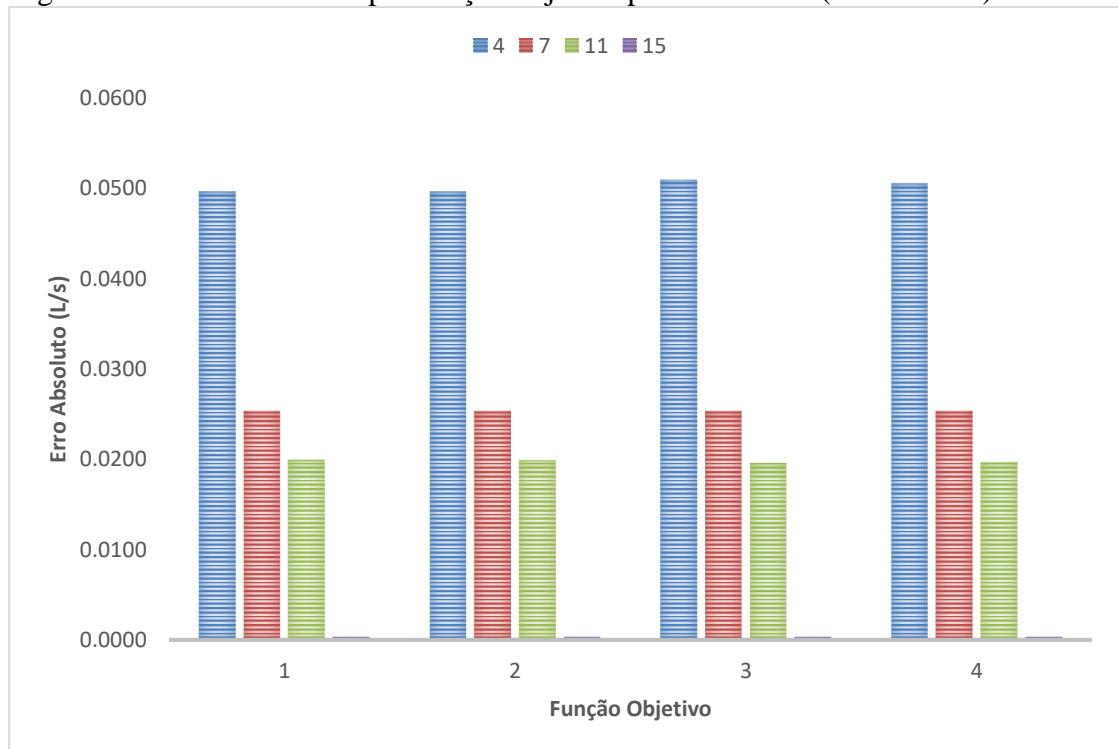
Fonte: Autor (2020).

Figura A5 – Erros relativos por função objetivo para as vazões (Rede UFC2)



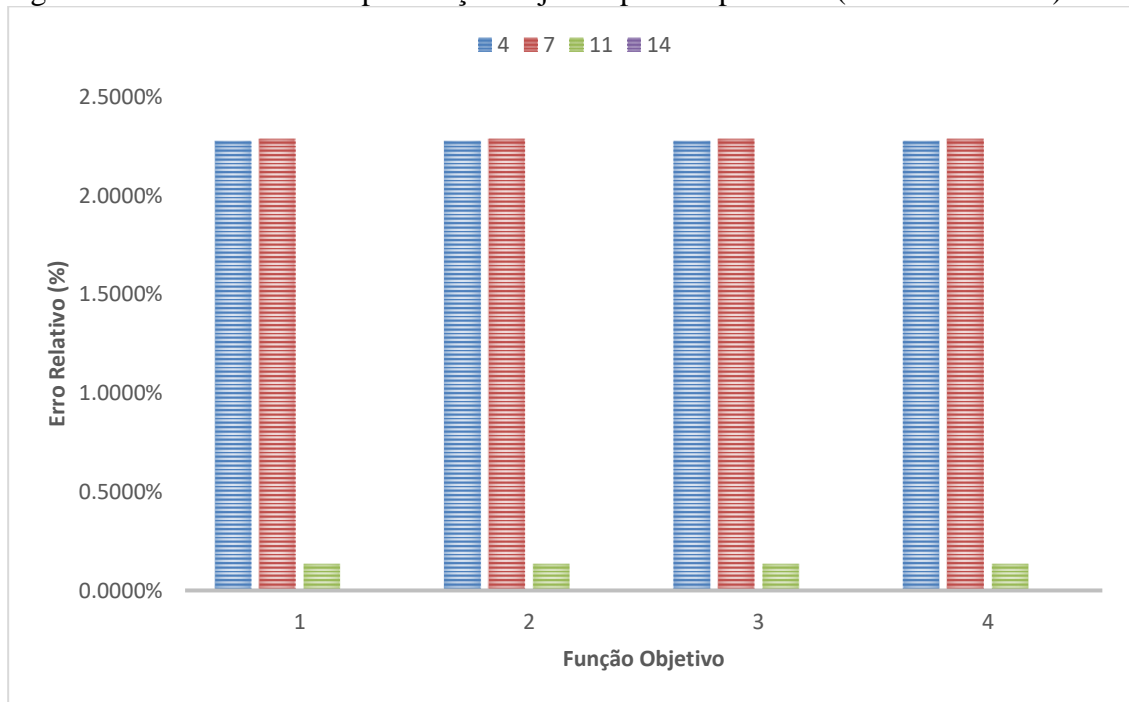
Fonte: Autor (2020).

Figura A6 – Erros relativos por função objetivo para as vazões (Rede UFC2)



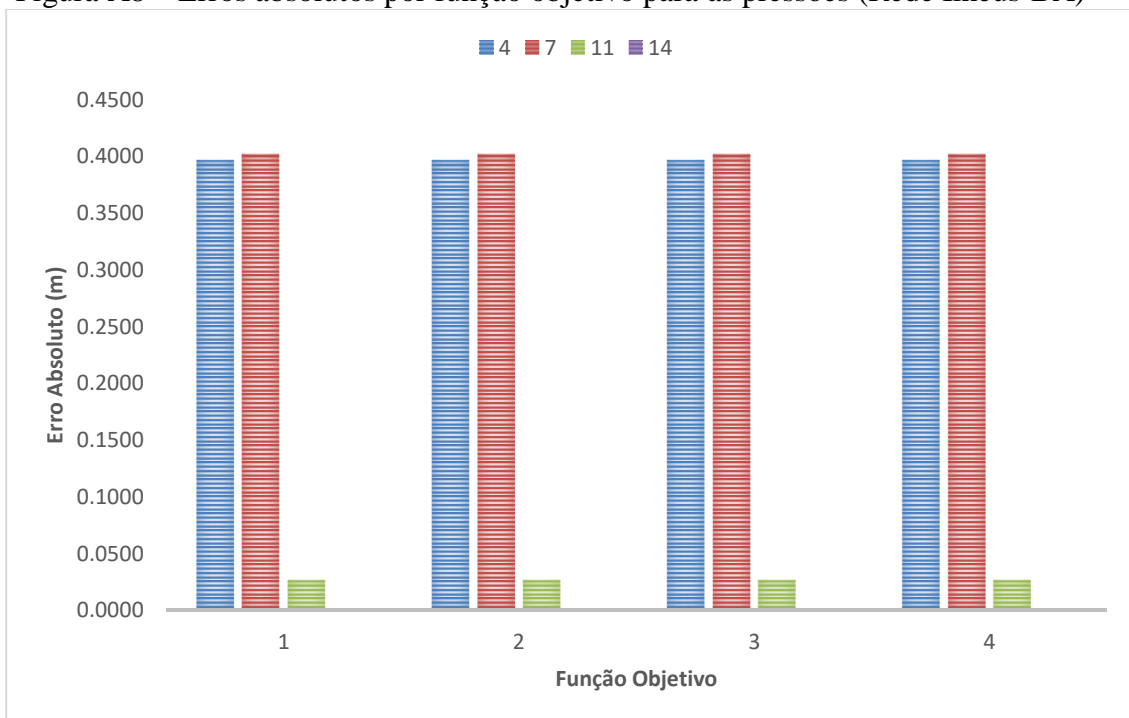
Fonte: Autor (2020).

Figura A7 – Erros relativos por função objetivo para as pressões (Rede Ilhéus-BA)



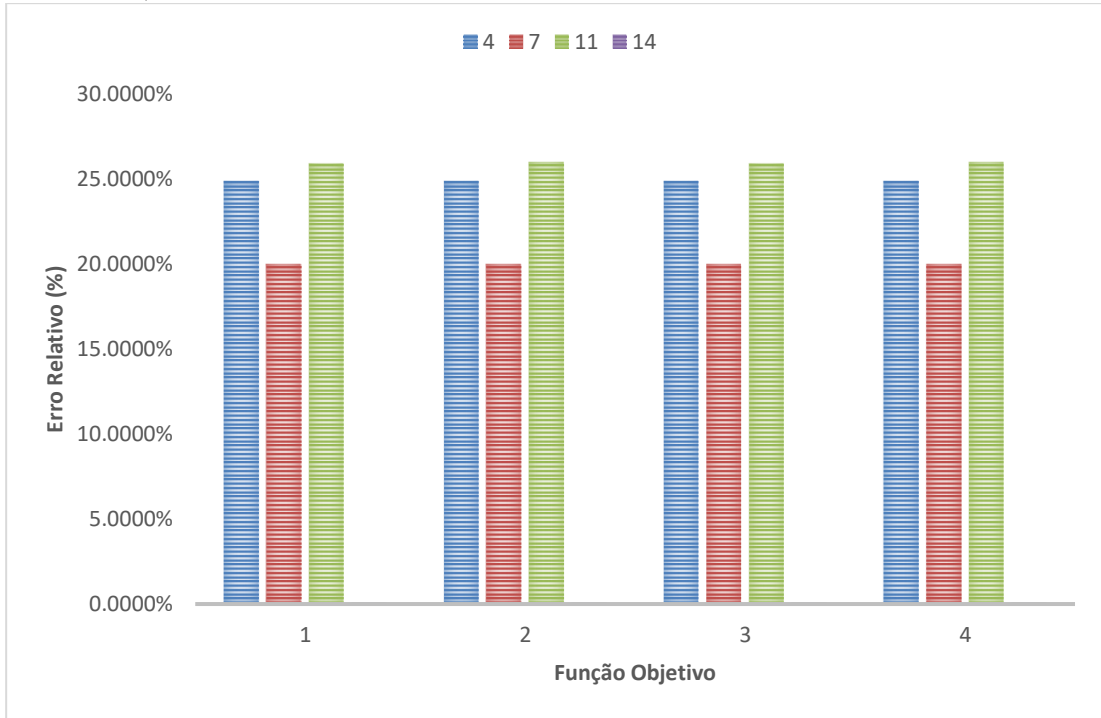
Fonte: Autor (2020).

Figura A8 – Erros absolutos por função objetivo para as pressões (Rede Ilhéus-BA)



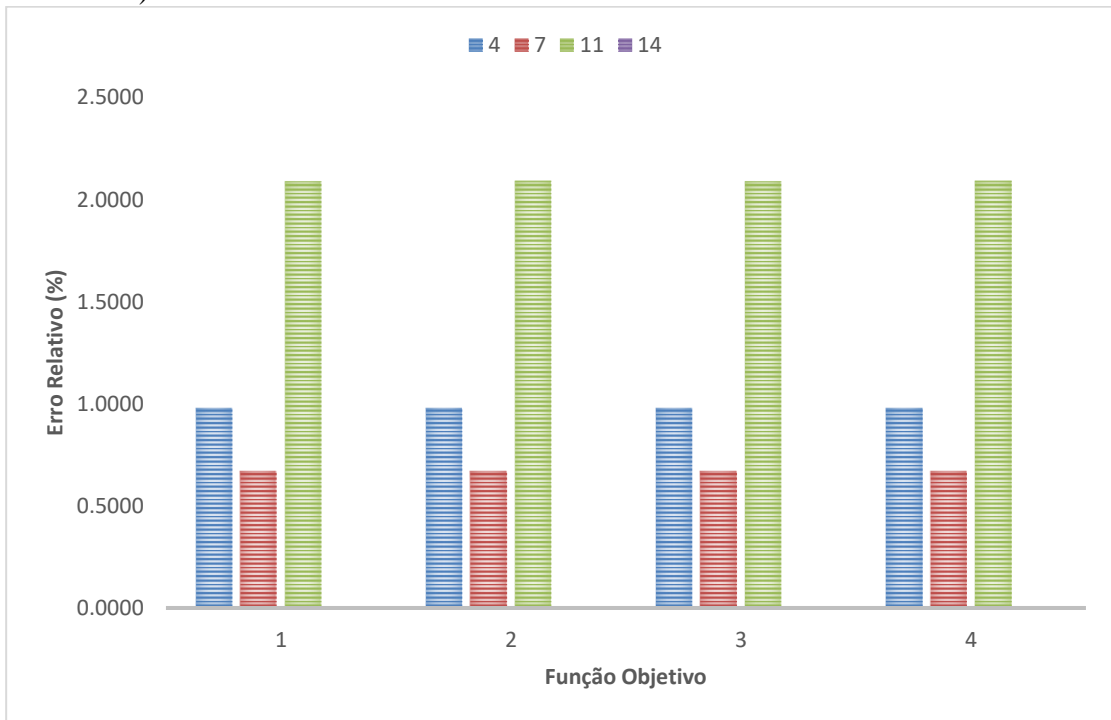
Fonte: Autor (2020).

Figura A9 – Erros relativos por função objetivo para os consumos nodais (Rede Ilhéus-BA)



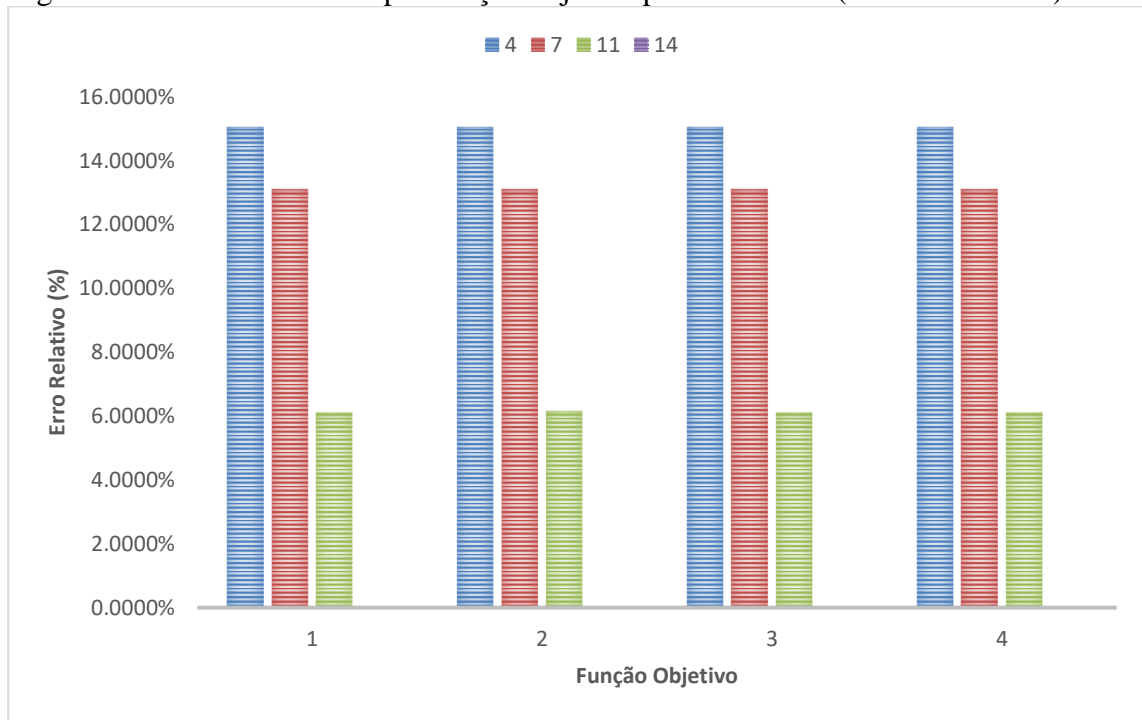
Fonte: Autor (2020).

Figura A10 – Erros absolutos por função objetivo para os consumos nodais (Rede Ilhéus-BA)



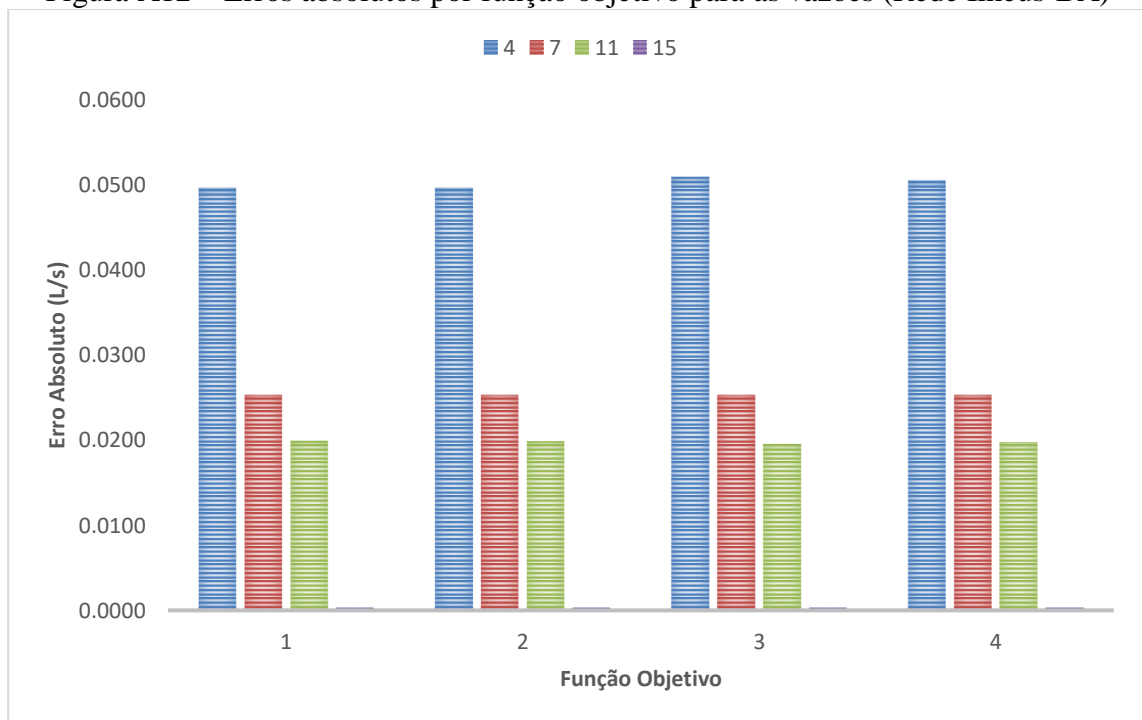
Função: Autor (2020)

Figura A11 – Erros relativos por função objetivo para as vazões (Rede Ilhéus-BA)



Fonte: Autor (2020).

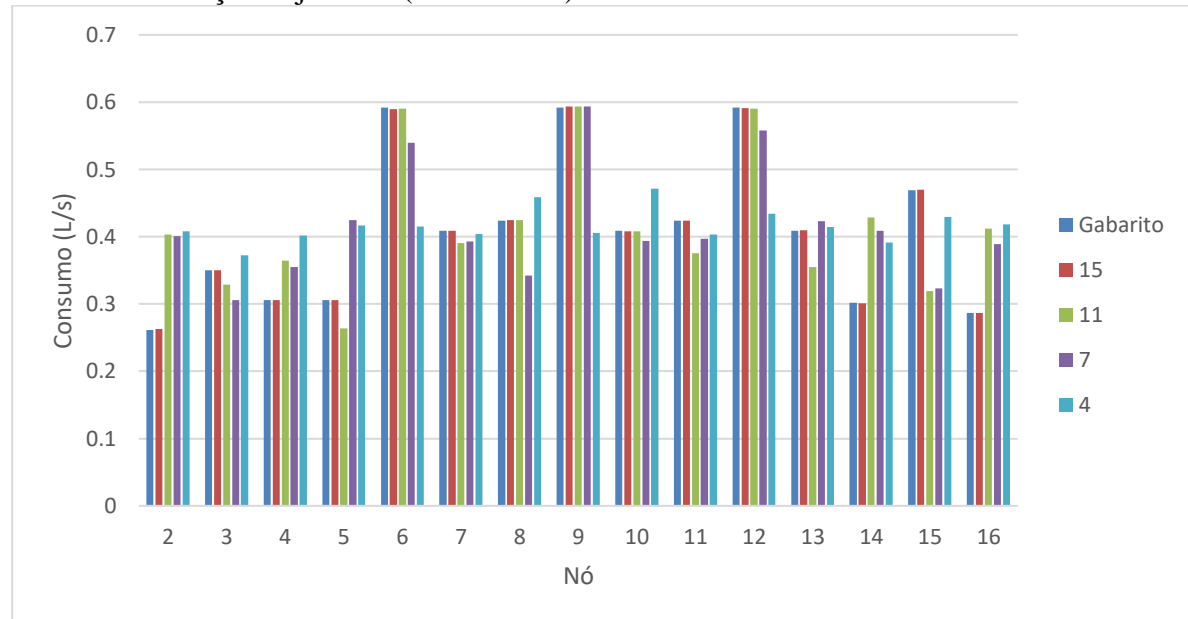
Figura A12 – Erros absolutos por função objetivo para as vazões (Rede Ilhéus-BA)



Fonte: Autor (2020).

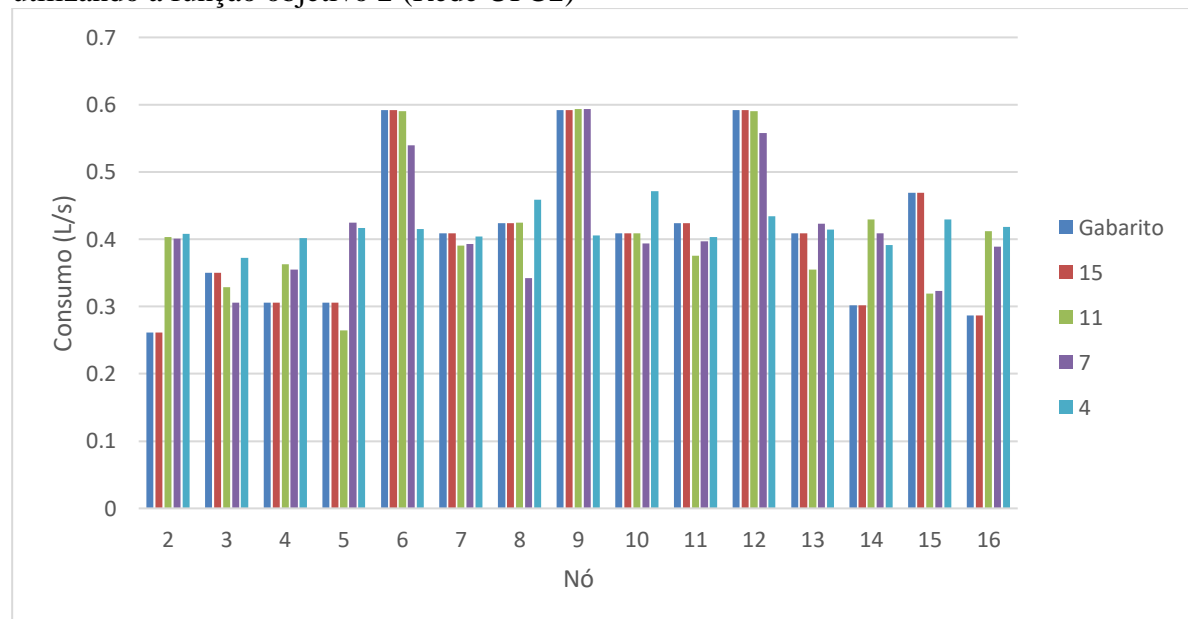
## APÊNDICE B – GRÁFICOS COM OS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Figura B1 - Consumos nodais para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 1 (Rede UFC2)



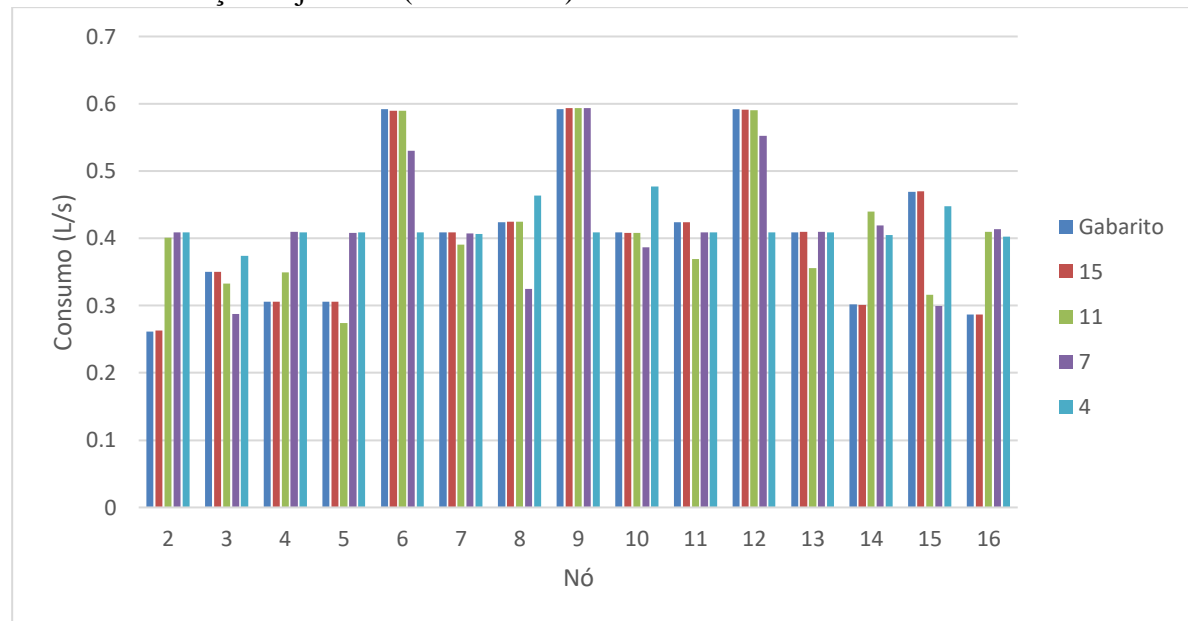
Fonte: Autor (2020).

Figura B2 - Consumos nodais para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 2 (Rede UFC2)



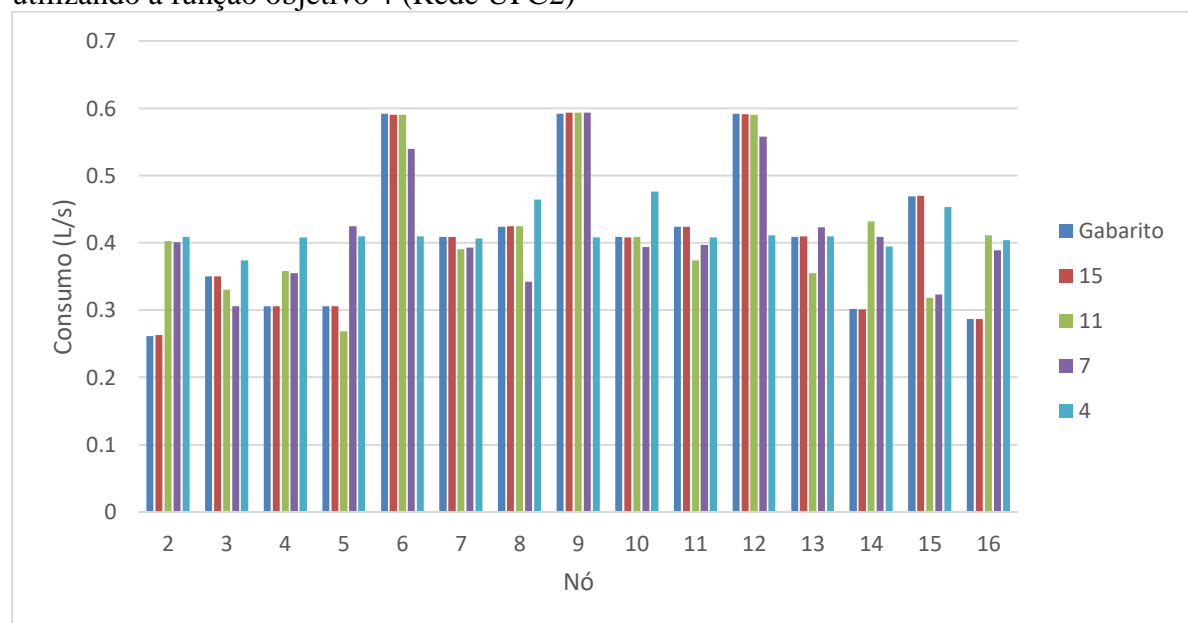
Fonte: Autor (2020).

Figura B3 - Consumos nodais para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 3 (Rede UFC2)



Fonte: Autor (2020).

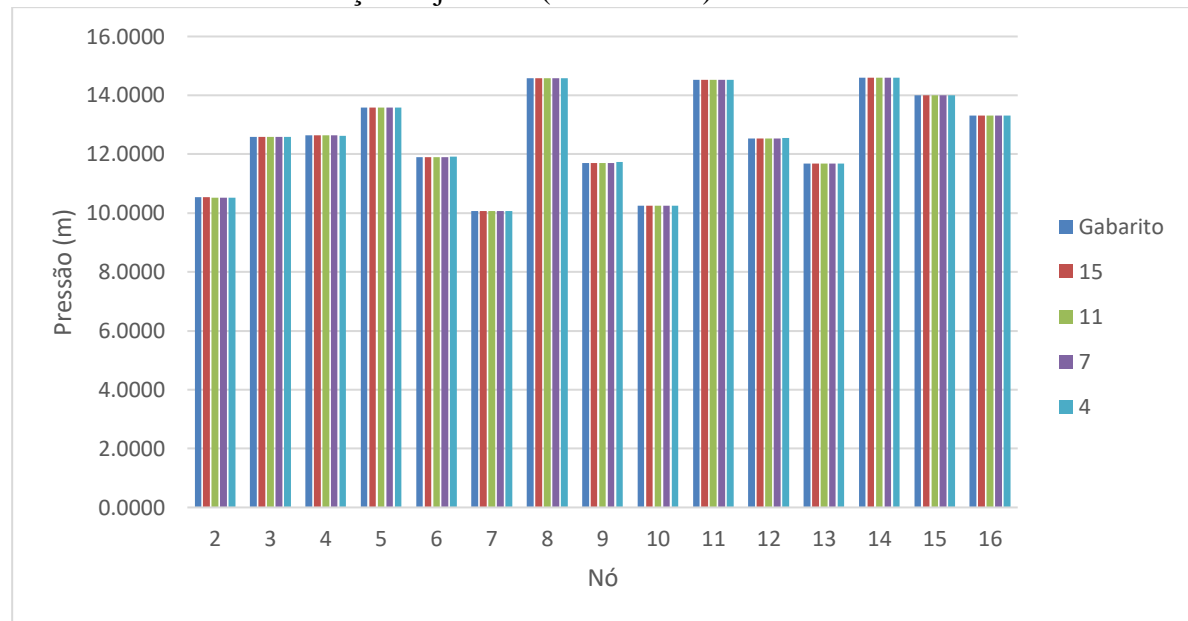
Figura B4 - Consumos nodais para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 4 (Rede UFC2)



Fonte: Autor (2020).

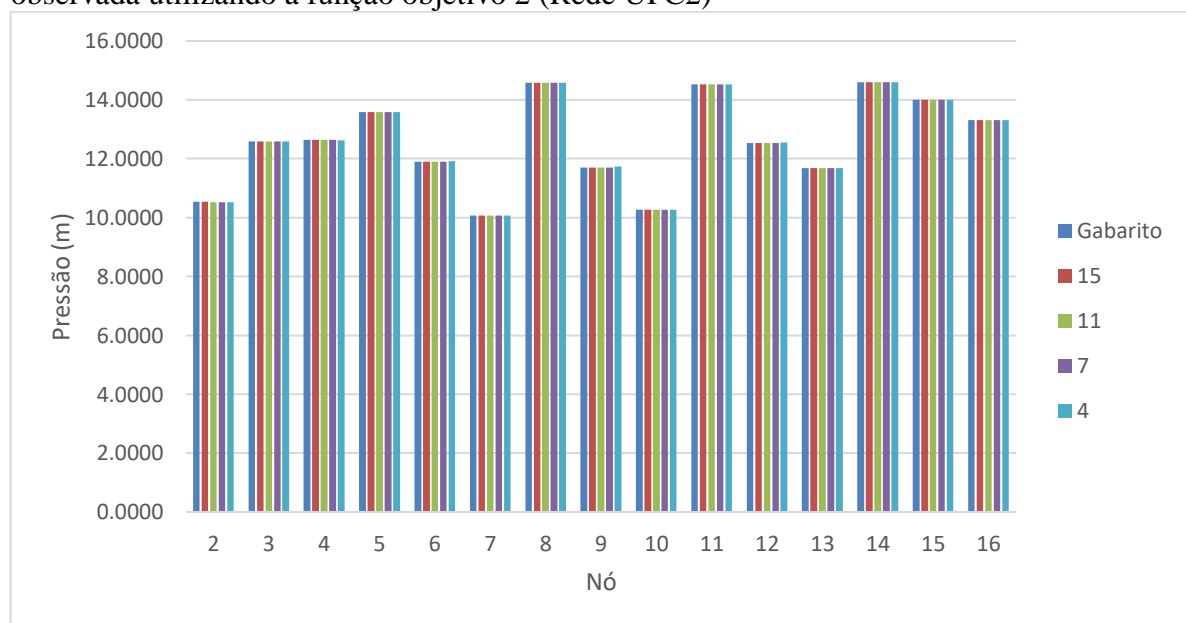


Figura B5 - Pressões manométricas para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 1 (Rede UFC2)



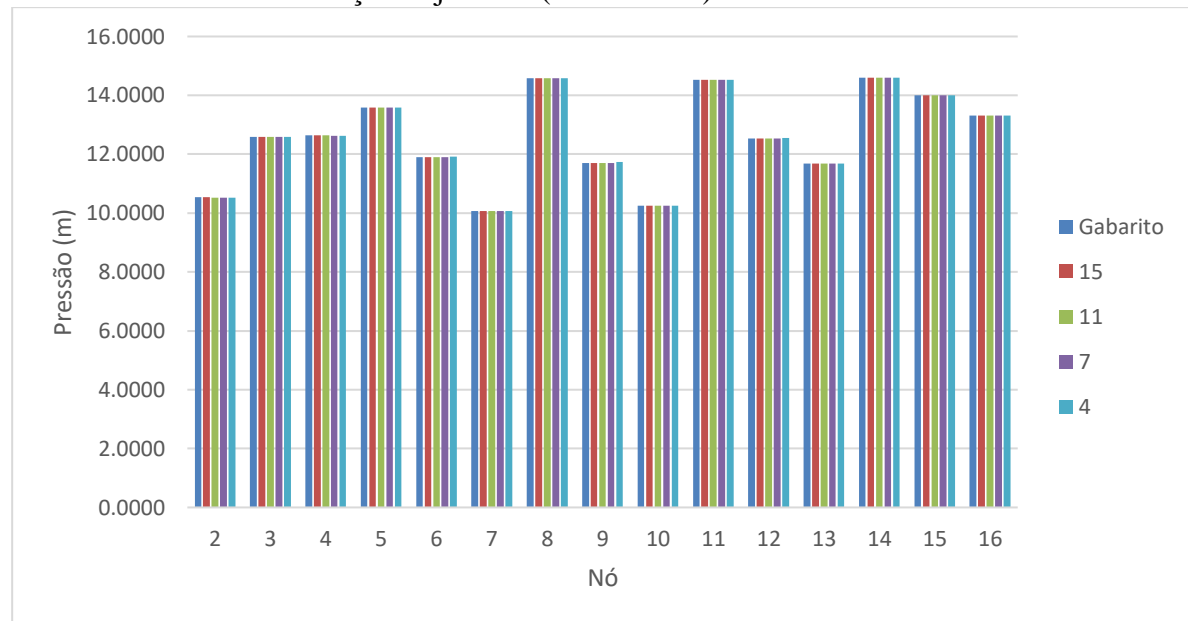
Fonte: Autor (2020).

Figura B6 - Pressões manométricas para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 2 (Rede UFC2)



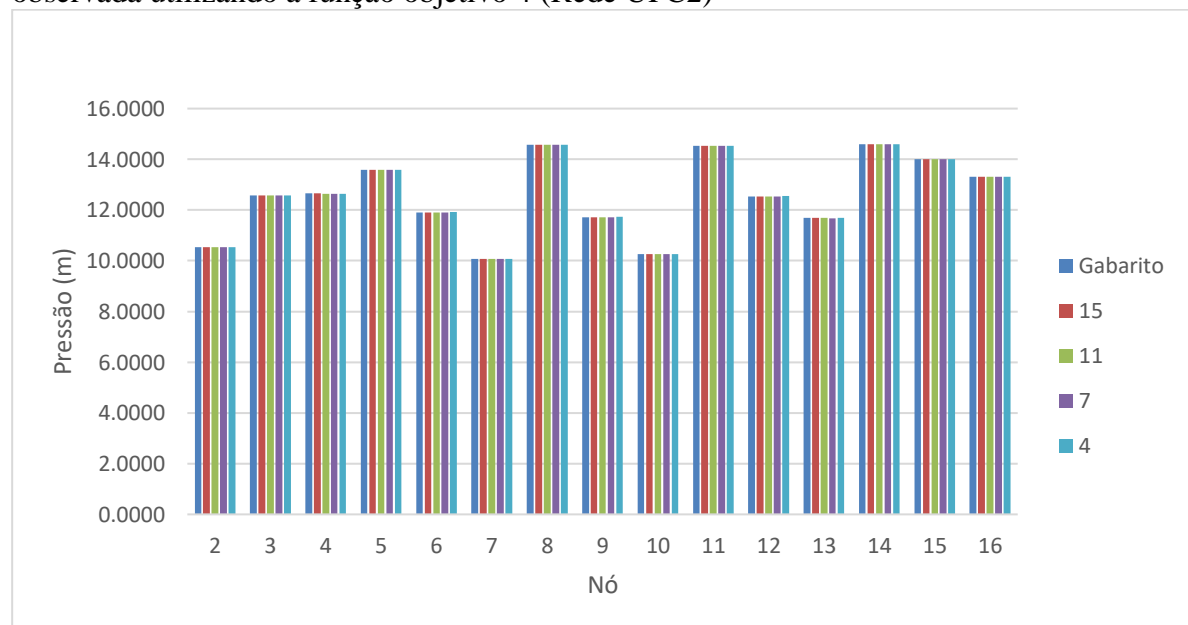
Fonte: Autor (2020).

Figura B7 - Pressões manométricas para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 3 (Rede UFC2)



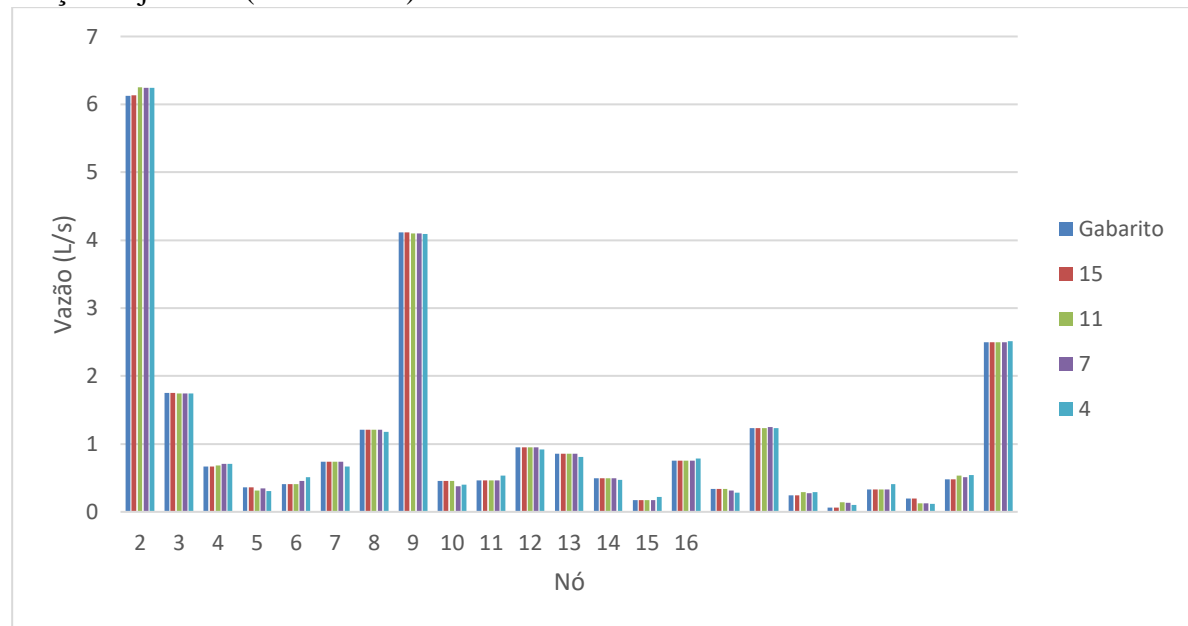
Fonte: Autor (2020).

Figura B8 - Pressões manométricas para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 4 (Rede UFC2)



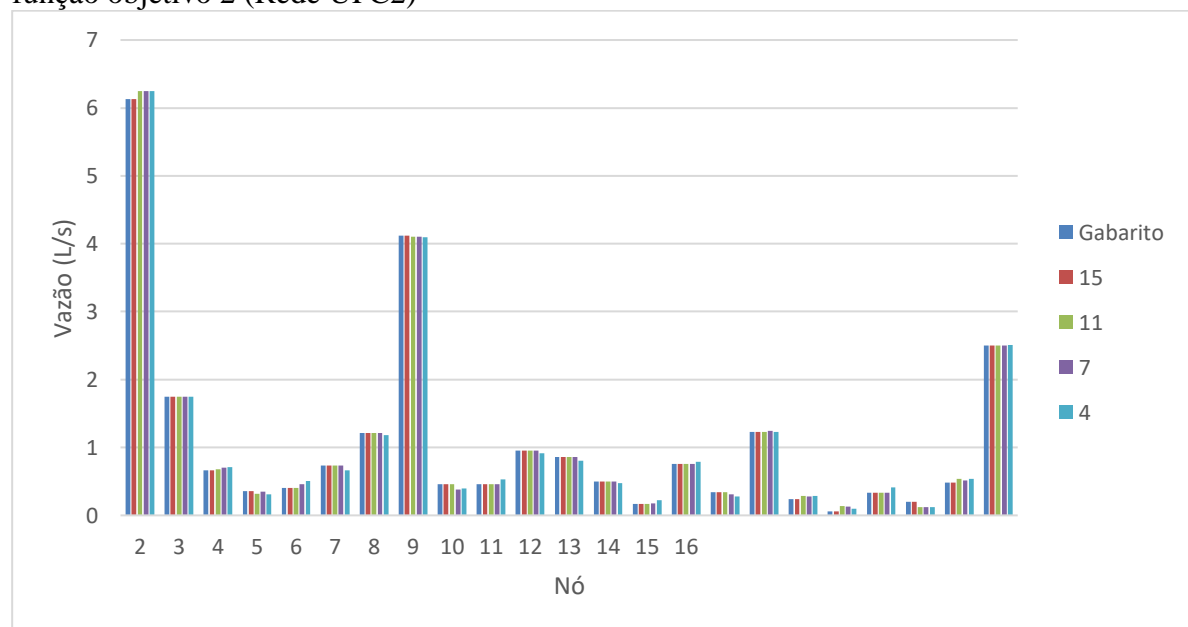
Fonte: Autor (2020).

Figura B9 - Vazões para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 1 (Rede UFC2)



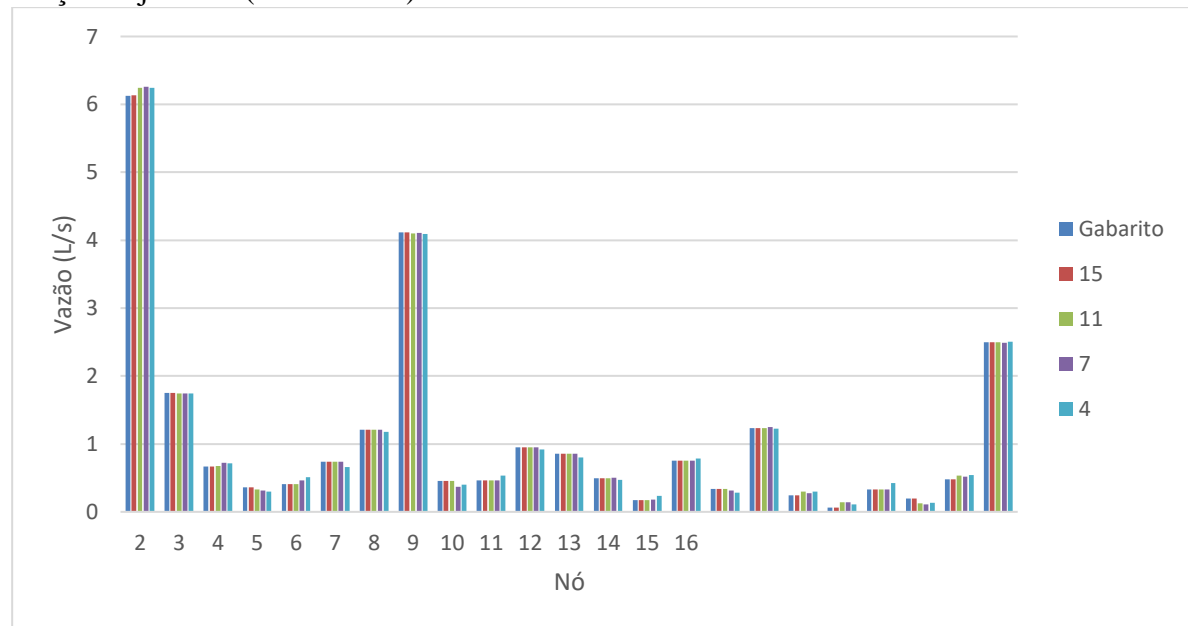
Fonte: Autor (2020).

Figura B10 - Vazões para diferentes quantidades de dados de pressão medidas utilizando a função objetivo 2 (Rede UFC2)



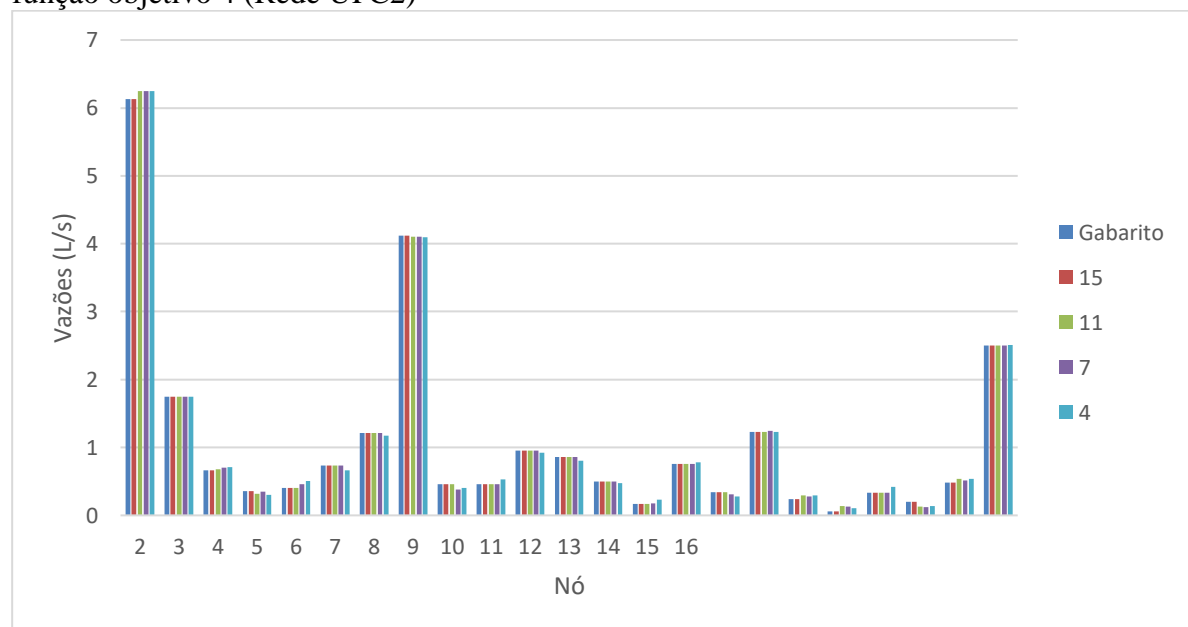
Fonte: Autor (2020).

Figura B11 - Vazões para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 3 (Rede UFC2)



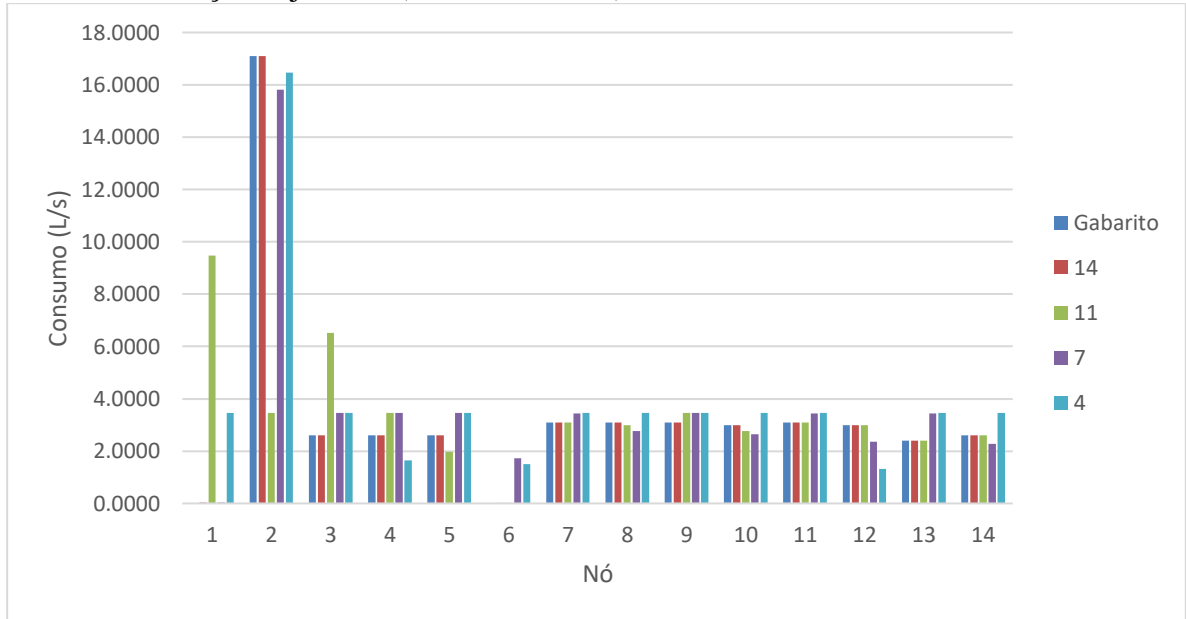
Fonte: Autor (2020).

Figura B12 - Vazões para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 4 (Rede UFC2)



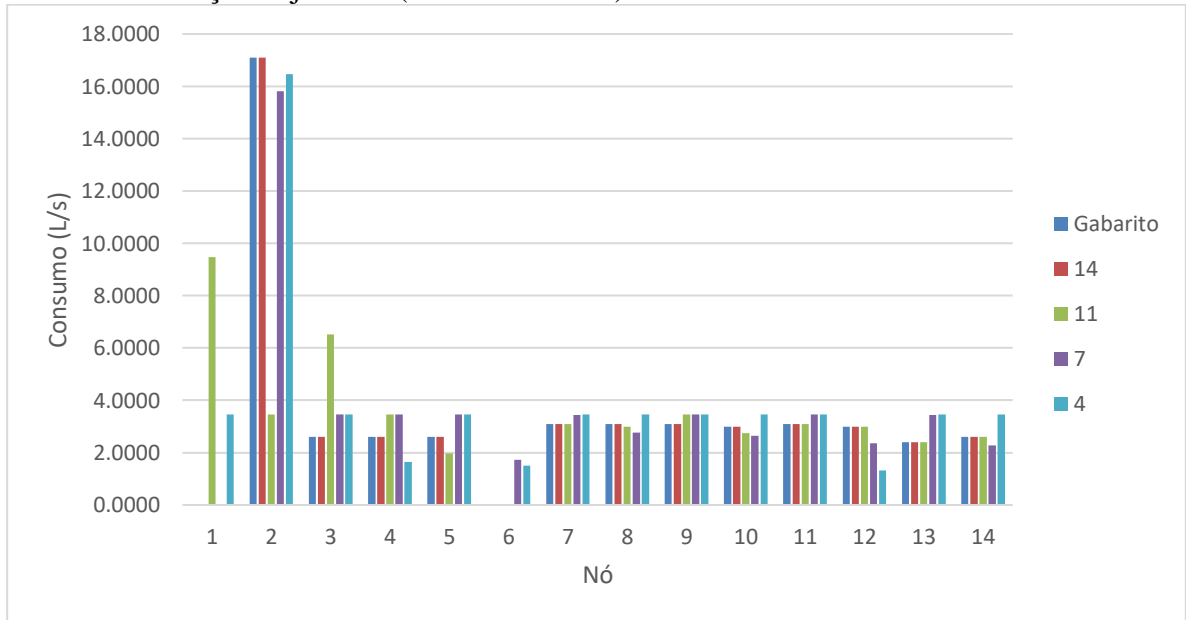
Fonte: Autor (2020).

Figura B13 - Consumos nodais para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 1 (Rede Ilhéus-BA)



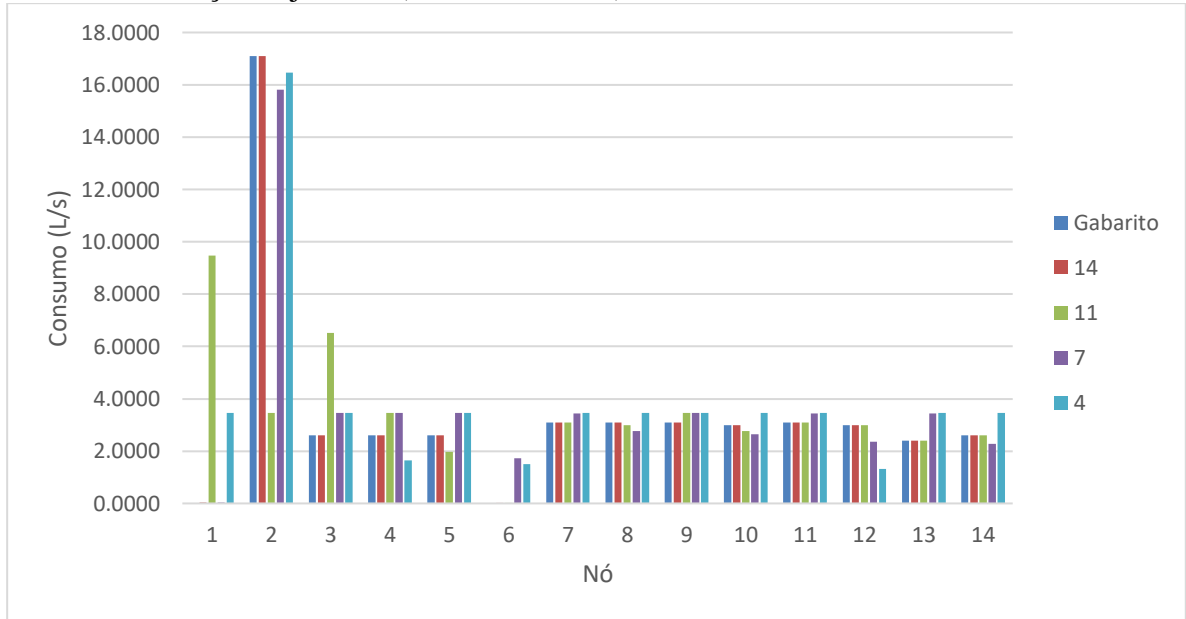
Fonte: Autor (2020).

Figura B14 - Consumos nodais para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 2 (Rede Ilhéus-BA)



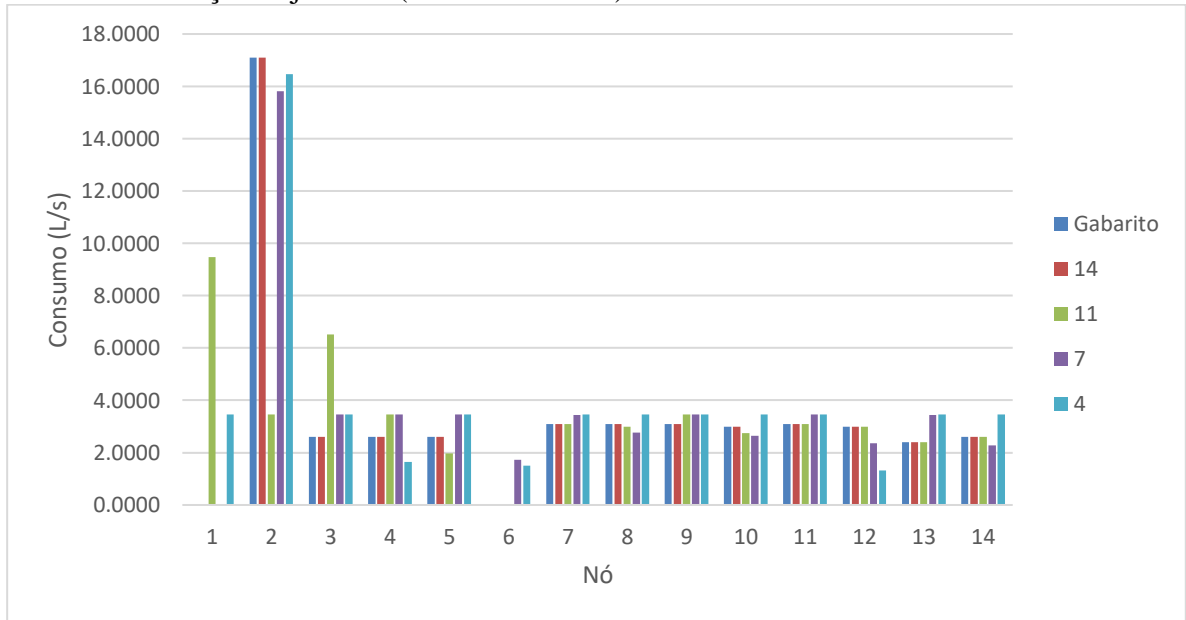
Fonte: Autor (2020).

Figura B15 - Consumos nodais para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 3 (Rede Ilhéus-BA)



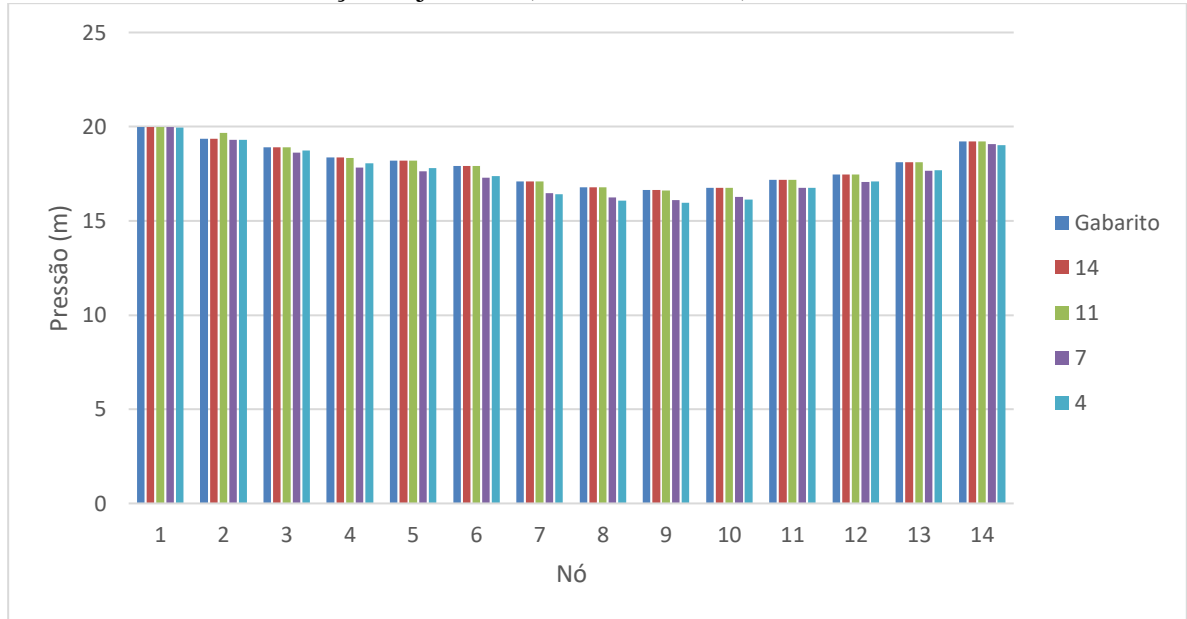
Fonte: Autor (2020).

Figura B16 - Consumos nodais para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 4 (Rede Ilhéus-BA)



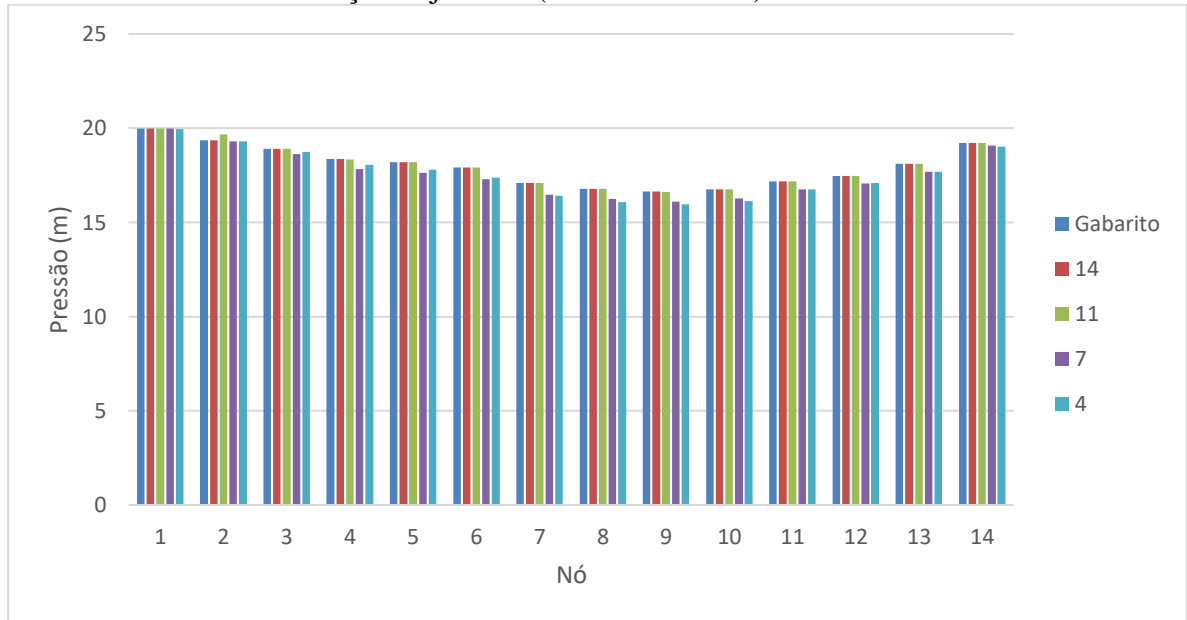
Fonte: Autor (2020).

Figura B17 - Pressões manométricas para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 1 (Rede Ilhéus-BA)



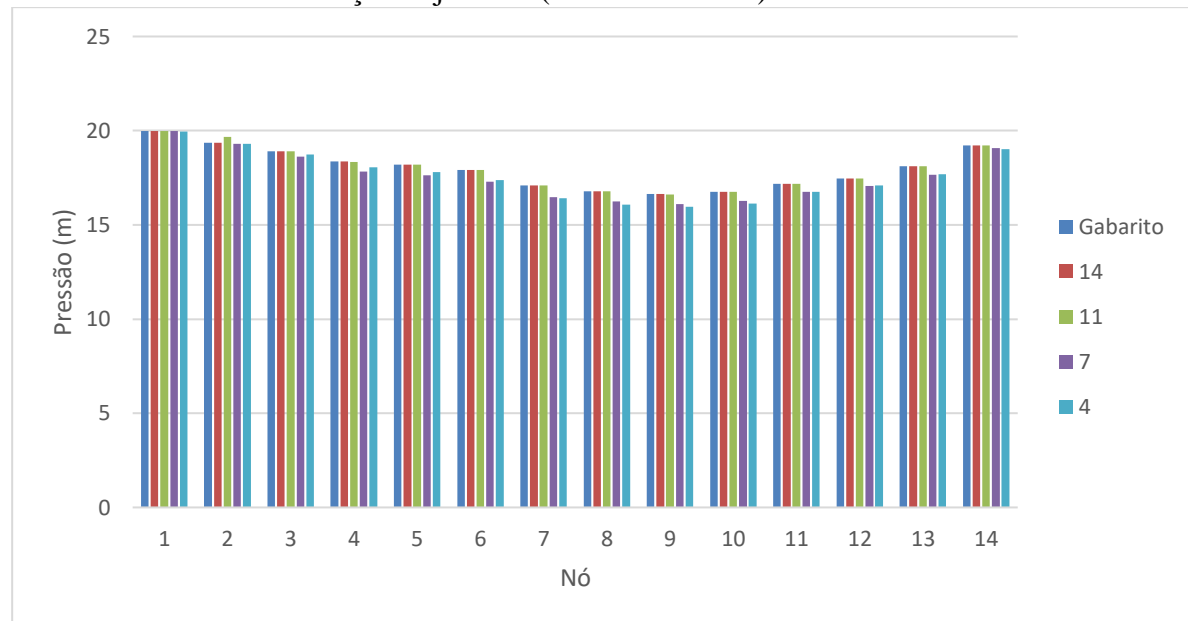
Fonte: Autor (2020)

Figura B18 - Pressões manométricas para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 2 (Rede Ilhéus-BA)



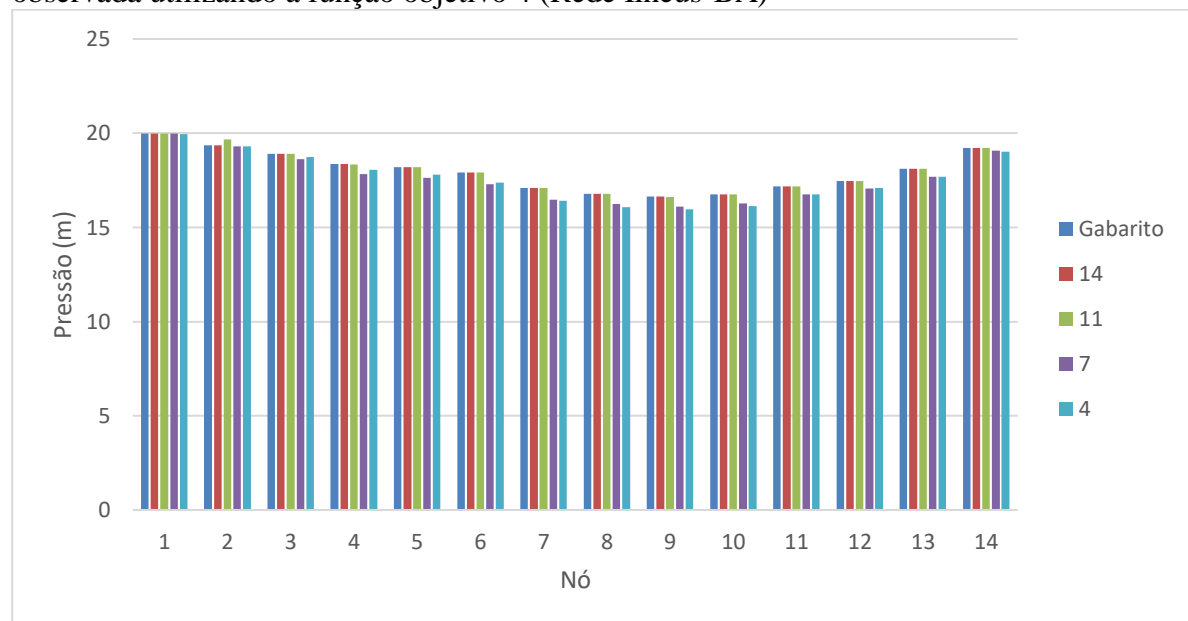
Fonte: Autor (2020).

Figura B19 - Pressões manométricas para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 3 (Rede Ilhéus-BA)



Fonte: Autor (2020)

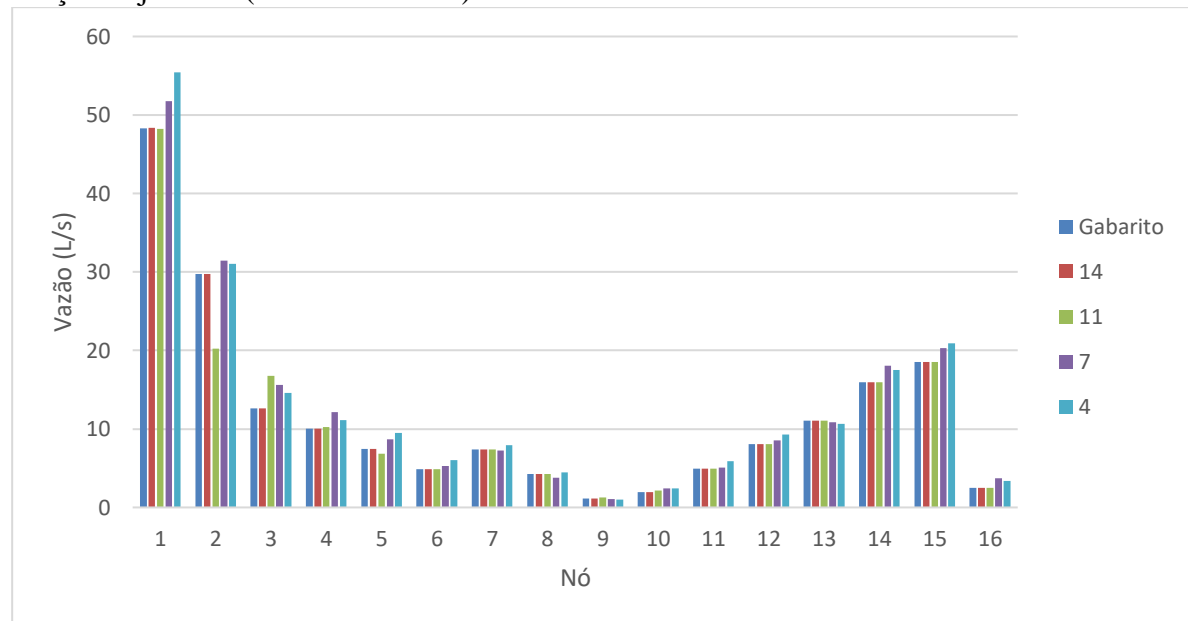
Figura B20 - Pressões manométricas para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 4 (Rede Ilhéus-BA)



Fonte: Autor (2020)

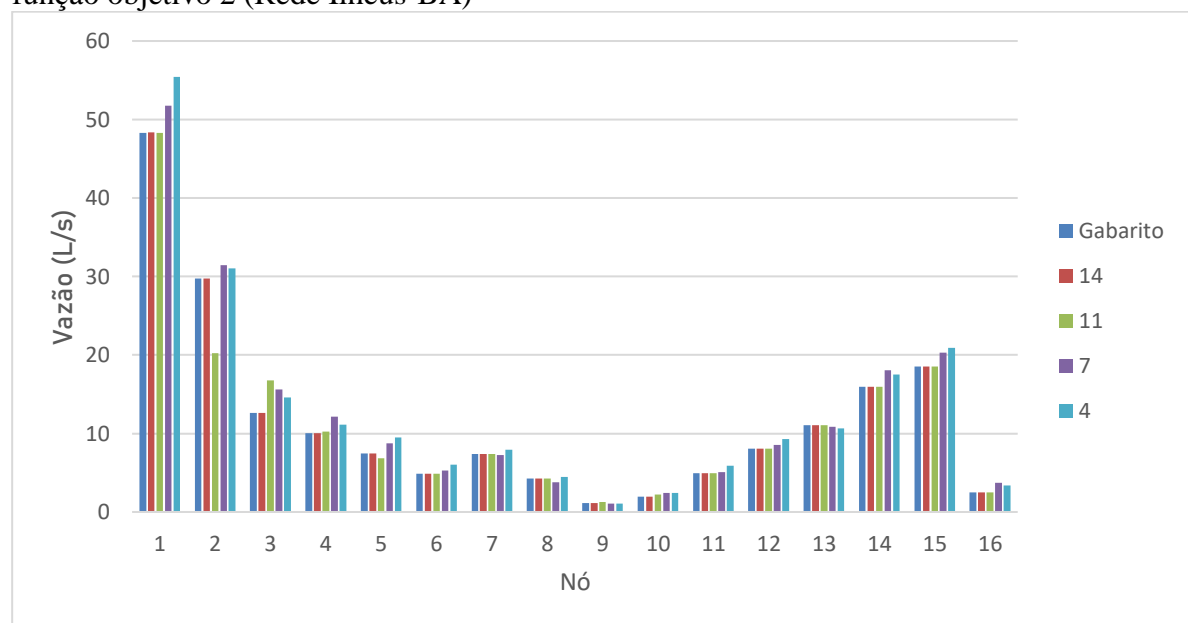


Figura B21 - Vazões para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 1 (Rede Ilhéus-BA)



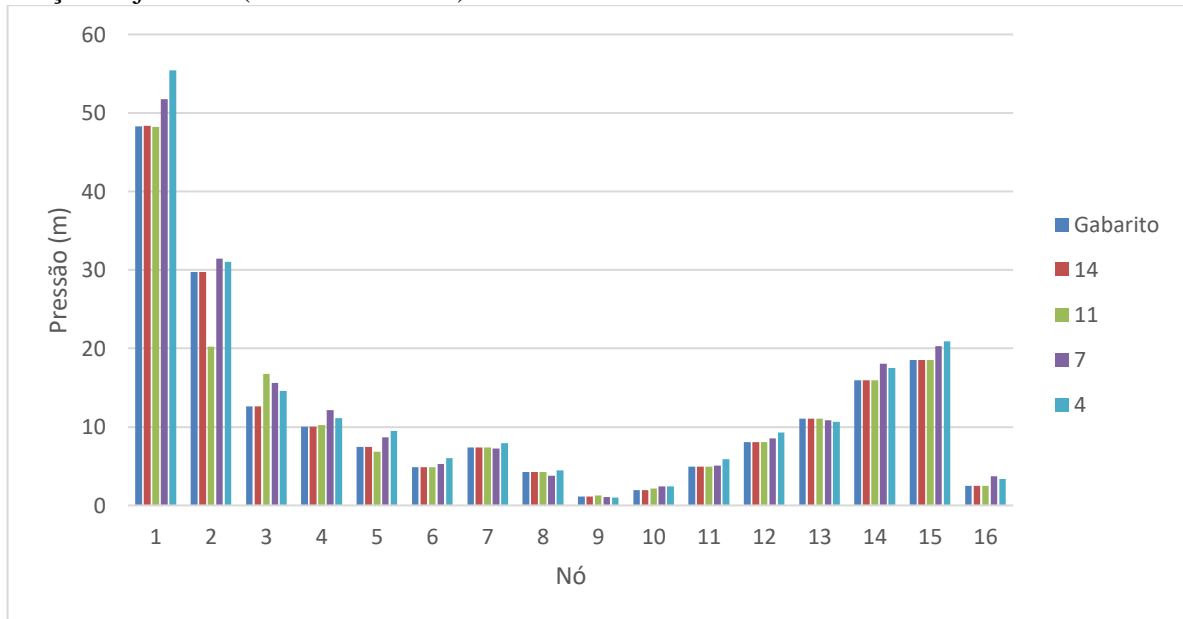
Fonte: Autor (2020)

Figura B22 - Vazões para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 2 (Rede Ilhéus-BA)



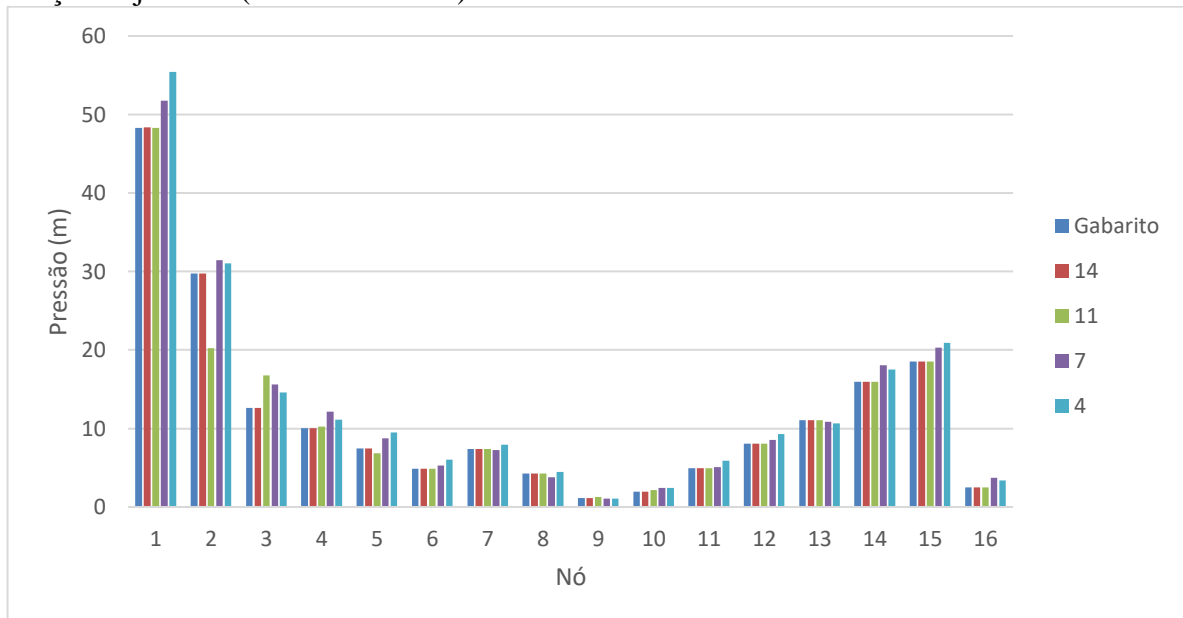
Fonte: Autor (2020)

Figura B23 - Vazões para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 3 (Rede Ilhéus-BA)



Fonte: Autor (2020)

Figura B24 - Vazões para diferentes quantidades de dados de pressão observada utilizando a função objetivo 4 (Rede Ilhéus-BA)



Fonte: Autor (2020)