

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL  
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL  
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: SANEAMENTO AMBIENTAL**

**CALIBRAÇÃO DE COEFICIENTES DE RUGOSIDADE DE REDES DE  
DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA USANDO O MÉTODO ITERATIVO DO  
GRADIENTE HIDRÁULICO ALTERNATIVO - MIGHA**

**VALDER ADRIANO GOMES DE MATOS ROCHA**

**FORTALEZA – CE**

**2008**

**VALDER ADRIANO GOMES DE MATOS ROCHA**

**CALIBRAÇÃO DE COEFICIENTES DE RUGOSIDADE DE  
REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA USANDO O  
MÉTODO ITERATIVO DO GRADIENTE HIDRÁULICO  
ALTERNATIVO - MIGHA**

**Dissertação apresentada ao Curso de  
Mestrado em Saneamento Ambiental  
da Universidade Federal do Ceará  
como requisito parcial para a obtenção  
de grau de Mestre.**

**Orientador: Prof. Marco Aurélio Holanda de Castro, PhD**

**FORTALEZA – CE**

**2008**

## VALDER ADRIANO GOMES DE MATOS ROCHA

Esta Dissertação foi submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, do departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia – Área de Concentração em Saneamento Ambiental..

A citação de qualquer trecho desta Dissertação é permitida, desde que seja feita de acordo com as normas da ética científica.

---

Valder Adriano Gomes de Matos Rocha

Examinadores:

---

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

---

Prof. Dr. John Kenedy de Araújo  
Universidade Federal do Ceará

---

Prof. Rogério Campos, PhD.  
Universidade de Fortaleza

Dedico esta dissertação ao meu avô Prof. Heleno Gomes de Matos (*in memoriam*) que tinha o sonho de ver um neto formado em engenharia.

## **Agradecimentos**

A Deus pelas constantes provas de amor que tem me dado e pela permissão para que este dia chegasse.

Ao amigo Magno pelos brilhantes e extraordinários ensinamentos sobre o conteúdo deste trabalho, pela grande participação, colaboração e presteza na elaboração e programação desta pesquisa, colocando-se sempre à disposição, em prejuízo, muitas vezes, de seu próprio trabalho.

À minha esposa, Janne, e meu filho Marcelo pelo amor, compreensão e paciência por minha constante ausência no período desta pesquisa.

Aos meus pais, Valder Rocha e Ana Altina, e meus irmãos, Heleno, Ana Karine, Alessandro, Christiano e Ana Aline, pelo amor incondicional, força e o incentivo em todos os momentos de minha vida.

Ao professor Marco Aurélio Holanda de Castro pela orientação sem a qual este trabalho não teria sido desenvolvido e, sobretudo, pela brilhante escolha do tema que me foi apresentado.

Ao professor Kenedy pela excelente colaboração nesta defesa.

Ao professor Rogério Campos pela bela participação nesta defesa.

Ao professor Suetônio Mota, grande inspiração motivadora para que eu decidisse ingressar no mestrado.

Aos professores do Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelos conhecimentos repassados durante o curso.

Aos colegas de trabalho do grupo de estudos em hidráulica computacional, Fernando Peroba, Luis Henrique, Mauro César, Germana Menescal, Cláudio, Márcio, Nilton, Rejane, Gustavo, Marcos Vinícius, Renato, Vinícius, Ari, Shirley e Alessandro, pelo aprendizado e companheirismo.

Aos amigos de curso Marcelo e Emerson pela forte amizade e torcida.

Ao Conselho Nacional do Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo suporte financeiro sem o qual não teria sido possível realizar esta pesquisa.

## Resumo

A simulação das condições de equilíbrio hidráulico de uma rede de distribuição de água é uma das fases mais importantes na gestão dos sistemas de abastecimento de água. Os simuladores hidráulicos precisam reproduzir os modelos com a maior fidelidade possível e, para isso, se faz necessário que se identifique com precisão, os parâmetros do sistema. A identificação desses parâmetros se torna difícil em muitos casos. O coeficiente de rugosidade de *Hazen-Williams* das tubulações é um parâmetro de difícil identificação devido à sua característica dinâmica. A calibração dos coeficientes de rugosidade das tubulações, bem como a de outros parâmetros dos modelos hidráulicos, é um procedimento necessário para a confiabilidade dos resultados da simulação hidráulica. Neste trabalho, uma rotina computacional é desenvolvida para calibração dos coeficientes de rugosidade de *Hazen-Williams* das tubulações de redes de distribuição utilizando o MIGHA – Método iterativo de gradiente hidráulico alternativo. O modelo de calibração proposto permite a escolha de parâmetros de cálculo do MIGHA, possibilitando uma análise comparativa que define a melhor configuração do MIGHA a ser aplicada na calibração. O estudo, realizado em uma rede hipotética, avalia também o desempenho do método em situações nas quais não se conhece a pressão em todos os nós da rede. Também foram realizadas análises comparativas com a técnica dos algoritmos genéticos, sendo relatadas as vantagens e desvantagens daquele em relação a este. Os estudos realizados visam a ampliação do conhecimento da técnica, contribuindo para futuros estudos.

**Palavras-chave:** calibração, coeficiente de rugosidade, redes de distribuição de água, MIGHA.

## ABSTRACT

Hydraulic equilibrium simulation of a network of water distribution pipes is one of the most important phases in the water management process. Hydraulic simulator models need to be as close as possible to reality and in order to achieve that good it is necessary to use hydraulic parameters as precise as possible. Identifying and using real parameters is the key issue in modeling real water distribution systems. The *Hazen-Williams* roughness coefficient is a parameter which is difficult to determine precisely for a real network of pipes. In order to determine it with a certain degree of accuracy, a calibration process must be performed using field measured data such as pressure and flow measurements on some points of the network. In this study we used a new calibration procedure called MIGHA – Iterative inverse gradient method. The study was performed on a theoretical pipe network and it evaluated the method performance in situations where we do not know pressure and flows in all network pipes and nodes (real cases). It is also presented a comparison between the proposed method (MIGHA) and the genetic algorithm technique.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> – Princípio da conservação da energia em conduto forçado...	07
<b>Figura 2.2</b> – Zoneamento da área com as respectivas condutividades hidráulicas (K).....	21
<b>Figura 2.3</b> – Zoneamento da área com as respectivas condutividades hidráulicas (K) obtidas pelo MIGHA depois do processo de calibração.....	22
<b>Figura 2.4</b> – Fluxograma do procedimento alternativo aplicado aos parâmetros hidrodinâmicos.....	24
<b>Figura 2.5</b> – Fluxograma do MIGHA na calibração de coeficientes de rugosidade.....	27
<b>Figura 3.1</b> – Janela contendo dados de saída do programa.....	32
<b>Figura 3.2</b> – Janela contendo dados de saída do programa utilizando os dados observados.....	33
<b>Figura 3.3</b> – Tela inicial do EPANET.....	35
<b>Figura 3.4</b> – Fluxograma da rotina executada pelo EPANET <i>Toolkit</i> .....	39
<b>Figura 3.5</b> – Rede exemplo utilizada.....	39
<b>Figura 3.6</b> – Exemplo de curva de distribuição normal das rugosidades calculadas pelo MIGHA.....	42
<b>Figura 4.1</b> – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando MIGHA-C, MIGHA-M e MIGHA-O para o cenário 1.....	54
<b>Figura 4.2</b> – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando MIGHA-C, MIGHA-M e MIGHA-O para o cenário 2.....	55
<b>Figura 4.3</b> – Rugosidades médias e desvios padrões usando MIGHA-C, MIGHA-M e MIGHA-O. ....	56
<b>Figura 4.4</b> – Probabilidade de coeficiente de <i>Hazen-Williams</i> com erro menor que 5% para MIGHA-C, MIGHA-M e MIGHA-O. ....	57
<b>Figura 4.5</b> – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando sete pontos de pressão medida para os cenários 1 e 2.....	61
<b>Figura 4.6</b> – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando seis pontos de pressão medida para os cenários 1 e 2.....	64
<b>Figura 4.7</b> – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-</i>	67

<i>Williams</i> calibrados, utilizando cinco pontos de pressão medida para os cenários 1 e 2.....	
<b>Figura 4.8</b> – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando quatro pontos de pressão medida para os cenários 1 e 2.....	70
<b>Figura 4.9</b> – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando três pontos de pressão medida para os cenários 1 e 2.....	73
<b>Figura 4.10</b> – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando dois pontos de pressão medida para os cenários 1 e 2.....	76
<b>Figura 4.11</b> – Rugosidades médias de acordo com o número de pressões medidas.....	77
<b>Figura 4.12</b> – Probabilidade de coeficiente de <i>Hazen-Williams</i> com erro menor que 5% para redes com sete, seis, cinco, quatro, três e dois pontos de pressão medida.....	78
<b>Figura 4.13</b> – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões reais e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados <i>com</i> e <i>sem</i> vazão, para o cenário 1.....	84
<b>Figura 4.14</b> – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões reais e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados <i>com</i> e <i>sem</i> vazão, para o cenário 2.....	85
<b>Figura 4.15</b> – Rugosidades médias e desvios padrões das calibrações <i>sem</i> e <i>com</i> vazão.....	86
<b>Figura 4.16</b> – Probabilidade de coeficiente de <i>Hazen-Williams</i> com erro menor que 5% para calibração <i>sem</i> e <i>com</i> vazão.....	87
<b>Figura 4.17</b> – Rede hipotética utilizada por Silva (2006).....	88
<b>Figura 4.18</b> – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões reais e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados com MIGHA e AG, para o cenário 1.....	91
<b>Figura 4.19</b> – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões reais e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados com MIGHA e AG, para o cenário 2.....	92
<b>Figura 4.20</b> – Rugosidades médias e desvios padrões utilizando MIGHA e AG.....	93
<b>Figura 4.21</b> – Probabilidade de coeficiente de <i>Hazen-Williams</i> com erro menor que 5% para MIGHA e AG.....	94

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1</b> – Valores de rugosidade absoluta equivalente.....	08
<b>Tabela 2.2</b> – Coeficientes de rugosidade de <i>Hazen-Williams</i> .....	11
<b>Tabela 2.3</b> – Técnicas de calibração de modelos de distribuição de água.....	14
<b>Tabela 3.1</b> – Cotas topográficas dos nós da rede.....	40
<b>Tabela 3.2</b> – Características físicas das tubulações da rede exemplo.....	40
<b>Tabela 3.3</b> – Caracterização dos testes realizados para estudo comparativo.....	43
<b>Tabela 4.1</b> – Cenários de demandas da rede.....	45
<b>Tabela 4.2</b> – Pressões reais para os dois cenários de demandas da rede.....	45
<b>Tabela 4.3</b> – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo programa utilizando o MIGHA-C para o cenário 1.....	48
<b>Tabela 4.4</b> – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo programa utilizando o MIGHA-C para o cenário 2.....	48
<b>Tabela 4.5</b> – Média dos coeficientes médios dos dois cenários calibrados pelo MIGHA-C.....	49
<b>Tabela 4.6</b> – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo programa utilizando o MIGHA-M para o cenário 1.....	50
<b>Tabela 4.7</b> – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo programa utilizando o MIGHA-M para o cenário 2.....	50
<b>Tabela 4.8</b> – Média dos coeficientes médios dos dois cenários calibrados pelo MIGHA-M.....	51
<b>Tabela 4.9</b> – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo programa utilizando o MIGHA-O para o cenário 1.....	52
<b>Tabela 4.10</b> – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo programa utilizando o MIGHA-O para o cenário 2.....	52
<b>Tabela 4.11</b> – Média dos coeficientes médios dos dois cenários calibrados pelo MIGHA-O.....	53
<b>Tabela 4.12</b> – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando o MIGHA-C, MIGHA-M e MIGHA-O para o cenário 1.....	54
<b>Tabela 4.13</b> – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados utilizando o MIGHA-C, MIGHA-M e MIGHA-O para o cenário 2.....	55
<b>Tabela 4.14</b> – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo programa utilizando sete pontos de pressão medida para o cenário 1.....	59

<b>Tabela 4.15</b> – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo programa utilizando sete pontos de pressão medida para o cenário 2.....	59
<b>Tabela 4.16</b> – Média dos coeficientes médios obtidos dos dois cenários com sete pontos de pressão medidos.....	60
<b>Tabela 4.17</b> – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando sete pontos de pressão medida para os cenários 1 e 2.....	61
<b>Tabela 4.18</b> – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo programa utilizando seis pontos de pressão medida para o cenário 1.....	62
<b>Tabela 4.19</b> – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo programa utilizando seis pontos de pressão medida para o cenário 2.....	62
<b>Tabela 4.20</b> – Média dos coeficientes médios obtidos dos dois cenários com seis pontos de pressão medidos.....	63
<b>Tabela 4.21</b> – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando seis pontos de pressão medida para os cenários 1 e 2.....	64
<b>Tabela 4.22</b> – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo programa utilizando cinco pontos de pressão medida para o cenário 1.....	65
<b>Tabela 4.23</b> – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo programa utilizando cinco pontos de pressão medida para o cenário 2.....	65
<b>Tabela 4.24</b> – Média dos coeficientes médios obtidos dos dois cenários com cinco pontos de pressão medidos.....	66
<b>Tabela 4.25</b> – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando cinco pontos de pressão medida para os cenários 1 e 2.....	67
<b>Tabela 4.26</b> – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo programa utilizando quatro pontos de pressão medida para o cenário 1.....	68
<b>Tabela 4.27</b> – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo programa utilizando quatro pontos de pressão medida para o cenário 2.....	68
<b>Tabela 4.28</b> – Média dos coeficientes médios obtidos dos dois cenários com quatro pontos de pressão medidos.....	69
<b>Tabela 4.29</b> – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando quatro pontos de pressão medida para os cenários 1 e 2.....	70
<b>Tabela 4.30</b> – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo programa utilizando três pontos de pressão medida para o cenário 1.....	71
<b>Tabela 4.31</b> – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo programa utilizando três pontos de pressão medida para o cenário 2.....	71
<b>Tabela 4.32</b> – Média dos coeficientes médios obtidos dos dois cenários com três pontos de pressão medidos.....	72
<b>Tabela 4.33</b> – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando três	73

pontos de pressão medida para os cenários 1 e 2.....	
<b>Tabela 4.34</b> – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo programa utilizando dois pontos de pressão medida para o cenário 1.....	74
<b>Tabela 4.35</b> – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo programa utilizando dois pontos de pressão medida para o cenário 2.....	74
<b>Tabela 4.36</b> – Média dos coeficientes médios obtidos dos dois cenários com dois pontos de pressão medidos.....	75
<b>Tabela 4.37</b> – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados, utilizando dois pontos de pressão medida para os cenários 1 e 2.....	76
<b>Tabela 4.38</b> – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo programa sem utilização de dados de vazão para o cenário 1.....	80
<b>Tabela 4.39</b> – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo programa sem utilização de dados de vazão para o cenário 2.....	80
<b>Tabela 4.40</b> – Média dos coeficientes médios obtidos dos dois cenários sem vazão.....	81
<b>Tabela 4.41</b> – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo programa com utilização de dados de vazão para o cenário 1.....	82
<b>Tabela 4.42</b> – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo programa com utilização de dados de vazão para o cenário 2.....	82
<b>Tabela 4.43</b> – Média dos coeficientes médios obtidos dos dois cenários com vazão.....	83
<b>Tabela 4.44</b> – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados <i>com e sem</i> vazão, para o cenário 1.....	84
<b>Tabela 4.45</b> – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados <i>com e sem</i> vazão, para o cenário 2.....	85
<b>Tabela 4.46</b> – Características físicas da rede hipotética utilizada por Silva (2006).....	88
<b>Tabela 4.47</b> – Demandas nodais para os cenários estudados.....	89
<b>Tabela 4.48</b> – Pressões reais para os dois cenários de demandas da rede.....	89
<b>Tabela 4.49</b> – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo MIGHA....	90
<b>Tabela 4.50</b> – Coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calculados pelo AG.....	90
<b>Tabela 4.51</b> – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados com MIGHA e AG, para o cenário 1.....	91
<b>Tabela 4.52</b> – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de <i>Hazen-Williams</i> calibrados com MIGHA e AG, para o cenário 2.....	92

## LISTA DE SÍMBOLOS

- [L] – Unidade de comprimento;
- [M] – Unidade de massa;
- [T] – Unidade de tempo;
- $\varphi$  – ângulo formado pelos vetores do gradiente hidráulico observado e calculado;
- $\nu$  – Viscosidade cinemática do fluido [ $L^2T^{-1}$ ];
- $\nabla h^{\text{calc}}$  – gradiente hidráulico calculado [adimensional];
- $\nabla h^{\text{obs}}$  – gradiente hidráulico observado [adimensional];
- $\partial F / \partial T$  – Derivada da função objetivo;
- $|\nabla h|$  - modulo do gradiente hidráulico;
- A – Matriz Jacobiana;
- $A_{ij}$  – Elementos da matriz Jacobiana;
- C – Coeficiente de rugosidade de *Hazen-Williams* [ $L^{0,3676}T^{-1}$ ];
- $C_i$  – demanda do nó i [ $L^3T^{-1}$ ];
- D – Diâmetro da tubulação [L];
- dh/dl – gradiente hidráulico;
- E – Erro;
- f – Fator de atrito [adimensional];
- F – Vetor de balanço de massa acrescido de um fator de correção de vazão;
- FO – Função objetivo;
- g – Aceleração da gravidade [ $LT^{-2}$ ];
- h – Carga hidráulica [L];
- H – Vetor de incógnitas em termos de cotas piezométricas;
- $h^{\text{calc}}$  – cargas hidráulica calculada [L];
- $h^{\text{obs}}$  – carga hidráulica observada [L];
- J – Perda de carga unitária [adimensional];
- $J_f$  – Conjunto de nós com carga hidráulica constante;
- $J_i$  – Conjunto de nós conectados ao nó  $i$ ;
- K – condutividade hidráulica [ $LT^{-1}$ ];
- L – Comprimento do trecho [L];
- m – Coeficiente de perda de carga localizada [L];

$n$  – expoente da formulação perda de carga x vazão;  
 $P$  – Pressão [ $ML^{-1}T^{-2}$ ];  
 $Q$  – Vazão [ $L^3T^{-1}$ ];  
 $Q_{ij}$  – Vazão de chegada no nó  $i$  pelo tubo  $j$  [ $L^3T^{-1}$ ];  
 $r$  – termo de perda de carga que depende da formulação utilizada;  
 $Re$  – Número de *Reynolds* [adimensional];  
 $t$  – tempo [ $T$ ];  
 $T$  – Transmissividade [ $L^2T^{-1}$ ];  
 $v$  – Velocidade média [ $LT^{-1}$ ];  
 $x_{ij}$  – Inverso da derivada da perda de carga total trecho entre os nós  $i$  e  $j$  [ $TL^{-2}$ ];  
 $y_{ij}$  – Fator de correção de vazão dado para tubulações [ $L^3T^{-1}$ ];  
 $Z$  – Energia potencial [ $L$ ], cota topográfica [ $L$ ];  
 $\partial$  – Derivada parcial;  
 $\Delta h$  – Perda de carga [ $L$ ];  
 $\varepsilon$  – Rugosidade Absoluta [ $L$ ];  
 $\gamma$  – Peso específico do líquido [ $ML^{-2}T^{-2}$ ];  
 $\lambda$  – Fator de comprimento de passo;  
 $\Sigma$  – Somatório;  
ID – Identificação das tubulações e dos nós;  
 $\text{sgn}$  – sinal;  
 $\cos$  – cosseno;  
 $\sigma$  – Desvio padrão;

### Subscritos

$i$  – Nó, índice de vetor e matriz;  
 $j$  – Nó, tubo;  
 $\text{mín}$  – Mínimo;  
 $\text{máx}$  - Máximo;

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

EPA – Environmental Protection Agency;

DLL – Direct Link-Library;

MIGH – Método iterativo de gradiente hidráulico;

MIGHA – Método iterativo de gradiente hidráulico alternativo;

UFC4 – Software hidráulico;

## Sumário

<b>RESUMO</b>	vi
<b>ABSTRACT</b>	vii
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	viii
<b>LISTA DE TABELAS</b>	x
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	xiii
<b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS</b>	xv
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1. <i>Histórico</i>	2
1.2. <i>Justificativa</i>	3
1.3. <i>Objetivos</i>	3
1.4. <i>Organização da dissertação</i>	4
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>5</b>
2.1. <i>Equações de perda de carga em tubulações</i>	6
2.2. <i>Modelos de simulação hidráulica de redes de distribuição de água</i>	11
2.3. <i>Calibração de sistemas de distribuição de água</i>	13
2.4. <i>Modelos de calibração</i>	14
2.4.1. <i>Procedimentos iterativos</i>	15
2.4.2. <i>Métodos explícitos</i>	15
2.4.3. <i>Métodos implícitos</i>	16
2.5. <i>MIGHA</i>	19
2.5.1. <i>MIGHA adaptado para a calibração de coeficientes de rugosidade de redes de distribuição de água</i>	25
<b>3. METODOLOGIA</b>	<b>28</b>
3.1. <i>Definição do problema</i>	29
3.2. <i>O método</i>	29
3.3. <i>Simulador hidráulico</i>	34
3.4. <i>Interface entre o simulador e o modelo de calibração</i>	37
3.5. <i>Rede exemplo</i>	39
3.6. <i>Análise e precisão da calibração</i>	41

3.7.	<i>Análise dos parâmetros do MIGHA</i>	41
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>44</b>
4.1.	<i>Influência das iterações na rede observada</i>	46
4.1.1.	Análise comparativa das iterações na rede calculada com as iterações nas redes observada e calculada	56
4.2.	<i>Influência do número de pontos de pressão medida</i>	57
4.2.1.	Todos os pontos medidos – sete pontos	59
4.2.2.	Seis pontos medidos	62
4.2.3.	Cinco pontos medidos	65
4.2.4.	Quatro pontos medidos	68
4.2.5.	Três pontos medidos	71
4.2.6.	Dois pontos medidos	74
4.2.7.	Análise comparativa da influência do número de pontos de pressão medida	77
4.3.	<i>Influência dos dados de medidas de vazão</i>	78
4.3.1.	Análise comparativa das redes calibradas com e sem medida de vazão	86
4.4.	<i>Comparação do método com os algoritmos genéticos</i>	87
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b>	<b>95</b>
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>99</b>
<b>7.</b>	<b>APÊNDICE A – ARQUIVOS DE ENTRADA NO MIGHA</b>	<b>105</b>

**Capítulo**

**1**

---

**INTRODUÇÃO**

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1.HISTÓRICO

Há muitos séculos atrás, um dramaturgo romano chamado Titus Mucius Plautus disse: *“O dia, a água, o sol, a lua, a noite – são coisas que eu não tenho que comprar com dinheiro.”* Certamente, Plautus tinha essa visão porque, naquela época, as comunidades se instalavam próximas a rios ou outras fontes de água e quando dela precisavam, bastava ir buscá-la, assim era o primitivo sistema de abastecimento de água durante vários séculos.

Desde então, as cidades tornaram-se muito grandes e os métodos de abastecimento de água primitivos não atendiam mais à crescente população. Para se desenvolver, as cidades precisavam desenvolver sistemas de abastecimento que conduzissem a água até suas casas.

Ao estudar a evolução das sociedades, desde a história antiga até os dias atuais, percebemos claramente a forte dependência da civilização com a água. Nas ruínas das velhas cidades encontraram-se provas inequívocas de uma teoria fundamental: a humanidade civilizada está inexoravelmente ligada ao controle da água.

Todas as civilizações antigas conhecidas por seus pensadores, matemáticos, físicos, astrônomos, literários, artistas, bem como, por suas bem-sucedidas conquistas territoriais, tinham sistemas de abastecimento de água bastante desenvolvidos.

Entre os séculos VIII e VI a.C, as cidades-estados gregas possuíam fontes que abasteciam reservatórios de água.

Na época em que Cristo viveu, os romanos desenvolveram grandes obras hidráulicas, dentre elas, o mais longo aqueduto da época, o Aqua Márcia, com 93 km de extensão. Roma antiga possuía um departamento em seu governo encarregado de administrar um sistema de adução e distribuição de água bastante complexo.

A revolução industrial acelerou mais ainda o crescimento populacional e, com ele veio a maior demanda por água nas cidades. Para acompanhar o aumento da demanda por água foi necessário aumentar e modernizar as redes de distribuição, acarretando uma melhor qualidade da água distribuída e uma

oferta permanente de água que geram uma melhor qualidade de vida da população abastecida.

## **1.2. JUSTIFICATIVA**

O projeto e a operação de uma rede de distribuição de água dependem do conhecimento de todos os parâmetros envolvidos nos cálculos hidráulicos. A simulação do comportamento hidráulico da rede, quando bem realizada, evita acidentes, rompimentos ou que a água não chegue a determinados pontos da rede.

Dentre todos os parâmetros, a rugosidade das tubulações é o de mais difícil determinação. Vários são os fatores que dificultam o cálculo da rugosidade nas redes, entre eles podemos enumerar a incerteza dos dados de demanda dos nós, a quantidade dos pontos de consumo que é muito grande e o grande número de peças e conexões que ocasionam perdas localizadas.

Existem várias técnicas de calibração que são divididas em três categorias: (1) procedimentos de tentativa e erro através de equações analíticas (WALSKI, 1983a; BHAVE, 1988); (2) métodos explícitos ou simulação hidráulica (ORMSBEE e WOOD, 1986a e 1986b; BOULOS e WOOD, 1990) e (3) métodos implícitos ou otimização.

Apesar do avanço já mostrado por outros pesquisadores, faz-se necessária a elaboração de um estudo que busque a aplicação de um método mais simples, como o MIGHA (Método Iterativo de Gradiente Hidráulico Alternativo), para a estimativa do coeficiente de rugosidade de *Hazen-Williams* das tubulações dos sistemas de abastecimento e que alcance melhores resultados, verificados a partir da minimização da função objetivo dada pela diferença dos gradientes hidráulicos observados e calculados no domínio do modelo.

## **1.3. OBJETIVOS**

O objetivo principal deste trabalho é validar a aplicação do método iterativo dos gradientes hidráulicos alternativo - MIGHA à calibração dos

coeficientes de rugosidade de *Hazen-Williams* das tubulações dos sistemas de distribuição.

O trabalho visa testar, através de análises comparativas, algumas formas diferentes de como o método pode ser usado com melhor desempenho.

Outro objetivo deste trabalho é a realização de uma análise comparativa com outro método de calibração de conhecida precisão e eficiência, os algoritmos genéticos.

O trabalho visa ainda implementar uma rotina computacional no programa UFC4 que realize a calibração automática dos coeficientes de rugosidade de *Hazen-Williams* de redes de distribuição em geral, utilizando o método iterativo dos gradientes hidráulicos alternativo - MIGHA.

A rotina computacional consiste em um simulador hidráulico acoplado a um módulo otimizador que permita, de forma flexível, a escolha de parâmetros de cálculo do MIGHA que possibilite a calibração de qualquer rede.

#### **1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

Este trabalho compõe-se de seis capítulos. No presente capítulo procura-se mostrar uma introdução ao tema desenvolvido, os objetivos e a justificativa e descreve a maneira como a dissertação foi desenvolvida.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre simulação hidráulica das redes de distribuição de água, equações de perda de carga, os vários modelos de simulação existentes, calibração de parâmetros de redes de distribuição de água, modelos de calibração existentes e, principalmente, sobre o método utilizado neste trabalho para a calibração dos coeficientes de rugosidade.

O Capítulo 3 traz a metodologia aplicada, definindo a rotina computacional construída, o simulador hidráulico utilizado, sua interface com a rotina. Este capítulo traz ainda a rede hipotética utilizada para avaliar a eficiência do método, as condições de precisão adotadas, bem como a descrição da maneira como serão analisados os parâmetros testados.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos com a simulação e a discussão desses resultados.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões desta pesquisa e faz sugestões de estudos posteriores.

As referências bibliográficas compõem o capítulo 6.

**Capítulo**

**2**

---

**REVISÃO DA LITERATURA**

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1. EQUAÇÕES DE PERDA DE CARGA EM TUBULAÇÕES

Os modelos hidráulicos se fundamentam nas leis da conservação de massa e de energia para a realização dos cálculos hidráulicos.

A equação da continuidade estabelece que é nula a soma algébrica das vazões em cada nó da rede, na condição de equilíbrio:

$$\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0 \quad (2.1)$$

A lei da conservação da energia para escoamento permanente entre dois pontos em um conduto forçado é dada por:

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta h \quad (2.2)$$

Onde:

$P/\gamma$  é a energia de pressão [L];

$V^2/2g$  é a energia cinética [L];

$\Delta h$  é a perda de carga [L].

$z$  é a energia potencial em relação ao plano de referência [L];

A figura 2.1 ilustra o princípio da conservação da energia em conduto forçado:

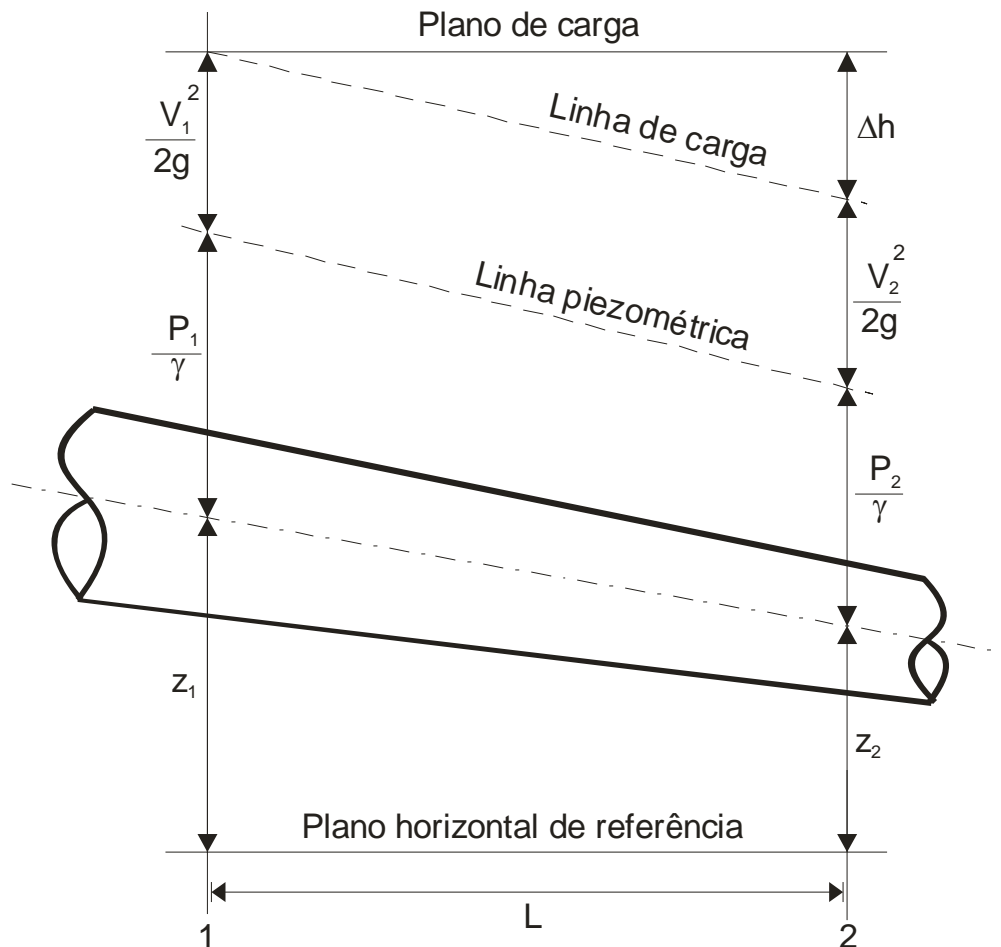


FIGURA 2.1 – Princípio da conservação da energia em conduto forçado

Para o cálculo das perdas de cargas em condutos forçados, destacam-se as fórmulas universal e de Hazen-Williams.

A fórmula de Darcy-Weisbach, conhecida também como fórmula universal, que determina a perda de carga para qualquer escoamento incompressível, é dada por:

$$\Delta h = f \frac{LV^2}{D2g} \quad (2.3)$$

Onde:

$\Delta h$  = perda de carga [L];

$f$  = coeficiente de atrito (adimensional);

$L$  = comprimento do trecho [L];

$V$  = velocidade média [ $LT^{-1}$ ];

$D$  = diâmetro da tubulação [L];

$g$  = aceleração da gravidade [ $LT^{-2}$ ]

O coeficiente de atrito depende do número de Reynolds ( $R_e$ ) e da rugosidade relativa, assim:

$$f = \phi \left( R_e; \frac{\varepsilon}{D} \right) \quad (2.4)$$

O número de Reynolds é dado por:

$$R_e = \frac{VD}{\nu} \quad (2.5)$$

Onde:

$R_e$  = número de Reynolds (adimensional);

$V$  = velocidade média [ $LT^{-1}$ ];

$D$  = diâmetro da tubulação (L);

$\nu$  = viscosidade cinemática do fluido.

Os coeficientes de rugosidade usados na fórmula universal estão na tabela 2.1.

TABELA 2.1 – Valores de rugosidade absoluta equivalente

Tubos	Rugosidade absoluta ( $\varepsilon$ ) (mm)
Aço comercial novo	0.045
Aço laminado novo	0.04 a 0.10
Aço soldado novo	0.05 a 0.10
Aço soldado limpo, usado	0.15 a 0.20
Aço soldado moderadamente oxidado	0.4
Aço soldado revestido de cimento centrifugado	0.10
Aço laminado revestido de asfalto	0.05
Aço rebitado novo	1 a 3
Aço rebitado em uso	6
Aço galvanizado, com costura	0.15 a 0.20
Aço galvanizado, sem costura	0.06 a 0.15
Ferro forjado	0.05
Ferro fundido novo	0.25 a 0.50

Tubos	Rugosidade absoluta ( $\epsilon$ ) (mm)
Ferro fundido com leve oxidação	0.30
Ferro fundido velho	3 a 5
Ferro fundido centrifugado	0.05
Ferro fundido em uso com cimento centrifugado	0.10
Ferro fundido com revestimento asfáltico	0.12 a .20
Ferro fundido oxidado	1 a 1.5
Cimento amianto novo	0.025
Concreto centrifugado novo	0.16
Concreto armado liso, vários anos de uso	0.20 a 0.30
Concreto com acabamento normal	1 a 3
Concreto protendido Freyssinet	0.04
Cobre, latão, aço revestido de epóxi, PVC, plásticos em geral, tubos extrudados	0.0015 a 0.010

Fonte: PORTO (1998).

Para tubos lisos com escoamento laminar, com  $Re \leq 2300$ , o fator de atrito só depende do número de Reynolds, independentemente da rugosidade da tubulação, sendo dado por:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (2.6)$$

COLEBROOK e WHITE (1939) apresentaram uma formulação do fator de atrito para a região de transição entre os escoamentos hidraulicamente liso e rugoso em tubos comerciais de vários diâmetros. A fórmula de Colebrook-White é dada por:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (2.7)$$

A equação 2.8 apresenta dificuldades computacionais, uma vez que não se pode explicitar o valor de  $f$ . Para sanar esta dificuldade SWAMEE e JAIN (1976) adaptaram para a equação de Colebrook-white (BHAVE, 1991):

$$f = \frac{0,25}{\left[ \log \left( \frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{R_e^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (2.8)$$

SWAMEE apresentou uma equação geral, que foi utilizada para reproduzir o ábaco de MOODY, para o cálculo do fator de atrito, válida para os escoamentos, laminar, turbulento liso, de transição e turbulento rugoso, na forma:

$$f = \left\{ \left( \frac{64}{R_e} \right)^8 + 9,5 \left[ \ln \left( \frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{R_e^{0,9}} \right) - \left( \frac{2500}{R_e} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125} \quad (2.9)$$

O fator de atrito para qualquer número de Reynolds pode ser utilizado do ábaco de MOODY (1944), incluindo a zona de transição onde não se dimensionam dutos.

O método de *Hazen-Williams* para o cálculo da perda de carga é dado pela fórmula empírica:

$$J = 10,65 Q^{1,85} C^{-1,85} D^{-4,87} \quad (2.10)$$

Onde:

J = Perda de carga unitária [Adimensional];

Q = vazão [ $L^3 T^{-1}$ ];

D = diâmetro [L];

C = coeficiente de rugosidade de *Hazen-Williams*, [ $L^{0,3676} T^{-1}$ ].

Depende da natureza e do estado das paredes das tubulações. Os valores utilizados como coeficientes de *Hazen-Williams* estão na tabela 2.2.

TABELA 2.2 – Coeficientes de rugosidade de *Hazen-Williams*

TUBOS	NOVOS ( $m^{0,3676}/s$ )	10 ANOS ( $m^{0,3676}/s$ )	20 ANOS ( $m^{0,3676}/s$ )
Aço corrugado (chapa ondulada)	60	-	-
Aço galvanizado roscado	125	100	-
Aço rebitado	110	90	80
Aço soldado comum	125	110	90
Aço soldado com revestimento epóxico	140	130	115
Chumbo	130	120	120
Cimento-amianto	140	130	120
Cobre	140	135	130
Concreto, bom acabamento	130	-	-
Concreto acabamento comum	130	120	110
Ferro fundido, revestimento epóxico	140	130	120
Ferro fundido, revestimento de argamassa	130	120	105
Grés cerâmico, vidrado (manilhas)	110	110	110
Latão	130	130	130
Madeira, em aduelas	120	120	110
Tijolos, condutos bem executados	100	95	90
Vidro	140	-	-
Plástico (PVC)	140	135	130

Fonte: Azevedo Netto et al (1998)

O método de *Hazen-Williams* é empírico, por isso seu uso deve se restringir apenas ao escoamento em regime turbulento rugoso da água.

## 2.2. MODELOS DE SIMULAÇÃO HIDRÁULICA DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Para obter a solução no cálculo das redes, deve-se satisfazer às seguintes condições:

- 1) A soma algébrica das vazões deve ser nula em qualquer nó;

- 2) A soma algébrica das perdas de carga nos trechos de um anel qualquer deve ser nula;
- 3) Cada elemento da rede deve satisfazer a relação entre a perda de carga e a vazão.

O balanceamento das redes malhadas apresenta dificuldades em virtude da não linearidade das equações de perda de carga, daí surgirem vários métodos para a resolução do problema.

O método mais antigo é o de HARDY-CROSS (1936). O método é simples, possibilitando solução manual, facilmente adaptado aos computadores. O cálculo é iterativo, sendo corrigidas, a cada iteração, as vazões em cada trecho ou as perdas de carga em cada nó, para isso admite-se um conjunto inicial de valores de pressões, calculando-se as vazões ou admite-se as vazões, determinando-se as perdas de carga.

McILROY (1950), SURYAPRAKASAM, REID e GEYER (1950), HOAG e WEINBERG (1957) e McPHERSON e RADZIUL (1958) estudaram o método da analogia elétrica, onde uma rede era comparada com um circuito elétrico.

O método de *Newton-Raphson* foi utilizado por MARTIN & PETERS (1963) para o balanceamento de redes hidráulicas, o método era iterativo e possuía uma convergência mais eficiente que o método de *Hardy-Cross*.

LAM & WOLLA (1972) adaptaram o método de *Newton-Raphson* para as equações dos nós. O modelo exige menor tempo de processamento computacional em comparação ao método de *Newton-Raphson* padrão.

WOOD & CHARLES (1972) desenvolveram o método da teoria linear apresentando rápida convergência através da linearização da equação da perda de carga.

TODINI & PILATI (1987) resolveram as equações da continuidade e da conservação de energia e também a relação entre perda de carga e vazão através de um método híbrido nó-malha, denominado Método do Gradiente. Este é o método utilizado pelo EPANET (Rossman, 2000).

### 2.3. CALIBRAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

De acordo com WALSKI (1983), calibração é o ajuste dos parâmetros de um modelo para que se melhore a relação entre os dados observados e prognosticados por ele. Estes dados podem ser demandas nodais, coeficientes de rugosidade, diâmetros e outros.

Segundo SILVA (2006), calibração é o processo de identificação de parâmetros necessários para que a simulação hidráulica de redes de distribuição de água represente com fidelidade o comportamento do sistema.

O processo de calibração é importante porque as equações de condições de equilíbrio hidráulico dependem de vários fatores como características do fluido transportado, geografia local e aspectos físicos das peças do sistema, traduzindo-se, portanto, em uma grande quantidade de variáveis envolvidas e, o uso adequado e preciso tanto quanto possível dessas variáveis se traduzirá na confiabilidade dos modelos hidráulicos.

A aplicabilidade dos modelos de redes hidráulicas depende da precisão dos dados de entrada (ORMSBEE & LINGIREDDY, 1997).

CHEUNG & SOUZA (2001) destacam que as técnicas de calibração se dividem em duas categorias: as que calculam apenas as rugosidades dos tubos e as que calculam simultaneamente as rugosidades e as demandas nodais.

As companhias de saneamento obtêm dados de demandas em nós da rede através de micromedição e macromedição das unidades consumidoras. Tais medidas são imprecisas devido a vários fatores tais como falhas de cadastro por parte da companhia, fraudes, ligações clandestinas, consumos faturados estimados, consumos não-faturados não-medidos (incêndios, etc.), erros de medição provocada por hidrômetros descalibrados ou velhos e, finalmente, por vazamentos ao longo da rede de distribuição.

Do exposto, percebe-se a incerteza dos dados de demandas nodais, as perdas localizadas e, verifica-se que o parâmetro mais difícil de ser identificado em um sistema de distribuição de água é a rugosidade dos trechos componentes do sistema. Diante disso a calibração simultânea das

rugosidades dos tubos e dos consumos dos nós é mais eficiente em redes de distribuição.

## 2.4. MODELOS DE CALIBRAÇÃO

A tabela 2.3 apresenta um resumo feito por WALSKI (2003) das principais técnicas de calibração publicadas. Os modelos são divididos em iterativos, explícitos e implícitos.

TABELA 2.3 – Técnicas de calibração de modelos de distribuição de água

Referência do modelo	Tipo de modelo <sup>1</sup>	Modelo Hidráulico <sup>2</sup>	Variáveis de decisão <sup>3</sup>	Método de Otimização
Rahal, Sterling e Coulbeck (1980)	PI	EP	CR	-
Walski (1983), Walski (1986)	PI	EP	FF, DEM	-
Bhave (1988)	PI	EP	FF, DEM	-
Ormsbee e Wood (1996)	EX	EP	FF	-
Ormsbee e Lingireddy (1997)	IM	EP ou STE	FF, DEM	<i>Extended complex method of box</i>
Boulos e Wood (1990), Boulos e Wood (1991)	EX	EP	Qualquer parâmetro	-
Boulos e Ormsbee (1991)	EX	EP	Qualquer parâmetro	-
Lansley e Basnet (1991)	IM	EP ou STE	FF, DEM, CV	Baseado no método do gradiente reduzido generalizado
Datta e Sridharan (1994)	IM	EP	FF	Técnica de análise de sensibilidade
Ferreri, Napoli e Tumbiolo (1994)	EX	EP	FF	-
Savic e Walters (1995)	IM	EP	FF	Algoritmos Genéticos (AGs)
Reddy, Sridharan e Rao (1996)	IM	EP	CR, DEM	Gauss-Newton
Walters, Savic, Morley, de Schaetzen e Atkinson (1998)	IM	EP	CR	AGs
Greco e Del Giudice (1999) IM	IM	EP	FF	LINDO GINO

Todini (1999)	IM	EP	FF	Filtro de Kalman
Pudar e Liggett (1992)	IM	EP	VZ	Levenberg-Marquardt
Liggett e Chen (1994)	IM	EP	FF, VZ	Levenberg-Marquardt
Chen (1995)	IM	ET	FF, VZ, VA	Levenberg-Marquardt
Vitkovsky e Simpson (1997), Simpson e Vitkovsky (1997), Vitkovsky, Simpson e Lambert (2000)	IM	ET	FF, VZ	AG
Tang, Karney, Pendlebury e Zhang (1999)	IM	ET	FF, DEM	AG
Wu, Boulos, Orr e Ro (2000)	IM	EP	FF	AG
Wu <i>et al.</i> , (2002a), Wu <i>ET AL</i> (2002b)	IM, PI	EP	FF, DEM, VS, ST	AG-modificado

1) PI – Procedimento iterativo; IM – Procedimento implícito; EX – Procedimento explícito.

2) EP – Estado permanente; STE – Simulação de tempo estendido; ET – Estado transiente.

3) CR – Coeficiente de rugosidade; DEM – Demanda nodal; FF – Fator de fricção;

CV – Configuração das válvulas; VZ – Vazamentos; VA – Velocidade acústica;

ST – *Status* da tubulação.

Fonte: WALSKI (2003)

#### 2.4.1. Procedimentos Iterativos

Segundo COSTA (2008), os procedimentos iterativos são baseados no artifício de tentativa e erro. Foram os primeiros métodos de calibração a serem estudados e realizam a atualização dos parâmetros, em cada iteração, baseando-se nas cargas hidráulicas e vazões obtidas pela execução do modelo de simulação.

#### 2.4.2. Métodos Explícitos

O conjunto de  $n$  parâmetros desconhecidos é obtido diretamente a partir da resolução de um sistema de  $n$  equações não-lineares.

Também conhecidos como métodos analíticos ou diretos, estes métodos exigem que o número de medições seja igual ao número de parâmetros desconhecidos.

WALSKI (1983) desenvolveu uma técnica baseada no agrupamento de tubos equivalentes onde o coeficiente de rugosidade é calculado a partir de vazões e pressões observadas para duas condições de escoamento distintas. BHAVE (1988) aplicou nesta técnica um fator de ajuste global para a correção dos coeficientes de rugosidade dos tubos.

ORMSBEE & WOOD (1986) propuseram um processo de determinação dos coeficientes de rugosidade a partir de observações de vazões e pressões feitas em testes de incêndio sob determinadas condições de contorno.

BOULOS & WOOD (1990) apresentaram um algoritmo explícito que determina valores ótimos de parâmetros de projeto, operação e calibração de redes de distribuição de água. Tais ótimos podem ser calculados para encontrar as restrições específicas de vazão e pressão sob diversas condições de operação.

BOULOS & ORMSBEE (1991) verificaram que o método descrito por ORMSBEE & WOOD (1986) necessitava de que vários testes de incêndio fossem realizados simultaneamente. Assim, aperfeiçoaram o método para que diversos testes de incêndio fossem realizados em tempos diferentes sob diversas condições de contorno.

O método proposto por FERRERI, NAPOLI & TUMBIOLO (1994), utilizando o método de *Newton-Raphson* para a resolução das equações não-lineares no processo de calibração, avalia os coeficientes de rugosidades da rede utilizando pressões e vazões em determinados pontos de observação. Os autores concluem que o melhor período para obtenção dos dados é o noturno.

CHEUNG (2001) realizou um estudo comparativo entre os métodos apresentados por WALSKI (1983), BHAVE (1988) e BOULOS & WOOD (1990). O autor propõe a generalização do método de BOULOS & WOOD (1990), antes restrito a uma única rede da literatura e a inclusão de um simulador hidráulico proposto por SOUZA (1994).

### **2.4.3. Métodos Implícitos**

Os métodos implícitos partem de algumas informações de pressão e vazão da rede e recorrem ao uso de uma função objetivo para a aproximação do problema inverso, que consiste em minimizar essa função objetivo,

geralmente o módulo da diferença entre os valores de dados observados e calculados de pressão e/ou vazão do sistema.

Para WALSKI (1986) é aceitável uma diferença de 7% entre os valores calculados e observados para as pressões estáticas e dinâmicas. Para ORMSBEE & LINGIREDDY *apud* CHEUNG (2001), dependendo da aplicação do modelo, é considerado satisfatório um desvio máximo entre 5% e 10% para os valores de pressão, vazão e nível d'água nos reservatórios.

A WATER RESEARCH CENTRE (1989) estabelece para valores de pressão, que o critério deve se basear no erro absoluto, dado pela diferença entre o valor simulado e o observado, não devendo exceder uma das seguintes faixas:

- $\pm 0,5$  m para 85% das medidas de pressão;
- $\pm 0,75$  m para 95% das medidas de pressão;
- $\pm 2$  m para 100% das medidas de pressão.

ORMSBEE (1989) ajustou as rugosidades para diversas condições de carga em regime permanente, para período de operação estendido, utilizando um algoritmo de otimização não-linear.

De forma similar, LANSEY & BASNET (1991) incorporaram um modelo de simulação hidráulica ao algoritmo de programação não-linear para a calibração de coeficientes de rugosidade, aberturas de válvulas e demandas nodais. Com relação a função objetivo, o estudo apresentou duas opções: soma dos quadrados e valores absolutos das diferenças entre valores observados e estimados de vazões nas tubulações e energias nos nós. Os resultados apresentaram maior velocidade com a divergência quadrática.

DATTA & SRIDHARAN (1994) propuseram a minimização dos quadrados das diferenças dos valores observados e calculados incluindo pesos nos desvios dos valores na função objetivo. Os pesos são adotados a partir dos valores observados para as diferentes condições de demanda. O método apresenta a vantagem de poder ser utilizado em diferentes cenários de demandas com variado número de medidas de pressão e vazão para cada condição. As incertezas dos valores estimados foram analisadas com técnicas de sensibilidade.

REDDY, SRIDHARAN & RAO (1996) propuseram uma melhoria na determinação dos pesos baseada na variância dos valores de pressões e vazões observadas e simuladas com uma sistemática para a adoção dos pesos que variam até que a convergência seja alcançada.

A técnica estocástica dos algoritmos genéticos baseada na seleção natural de *Darwin* foi utilizada por SAVIC & WALTERS (1997) como método de busca no processo de otimização. A técnica visa melhorar a precisão dos resultados de redes de distribuição mais complexas. Diversos usos dos algoritmos genéticos foram descritos no trabalho. A técnica apresentou resultados melhores que os métodos de tentativa e erro na calibração de coeficientes de rugosidade.

Algoritmos genéticos são utilizados em vários outros trabalhos. WALTERS *et al.* (1998) na determinação das rugosidades absolutas, De SCHAETZEN *et al.* (2000) nas rugosidades absolutas, diâmetros e demandas nodais e, LINGIREDDY & ORMSBEE (2002) na avaliação de rugosidades absolutas e demandas.

RIGUETTO (2001) propõe um modelo baseado no método dos nós e na técnica dos elementos finitos utilizando algoritmos genéticos para a determinação de demandas nodais, rugosidades absolutas e diâmetros das tubulações.

Buscando a redução do tempo de processamento nas simulações, KAPELAN, SAVIC & WALTERS (2002) propõem um método híbrido para a determinação das rugosidades absolutas e detecção de vazamentos em redes de distribuição de água em regime transiente onde algoritmos genéticos foram utilizados como método de busca global em conjunto com um método de busca local (*Levenberg-Marquardt*) para refinamento da solução final.

GRECO & DEL GUIDICE (1999) utilizaram uma matriz de sensibilidade para a otimização não-linear, além de pacotes computacionais para calibração dos coeficientes de rugosidade de redes de distribuição de água.

LANSEY *et al.* (2001) elaboraram um estudo com o objetivo de analisar as incertezas provocadas pelos erros nos valores medidos em campo e estimados. O procedimento, que consta de três passos: estimativa dos parâmetros, avaliação da calibração e uma metodologia para coleta de dados,

considera as incertezas nos valores observados e simulados e proporciona o grau de incerteza da solução final.

Utilizando o método transiente inverso com um algoritmo genético, ARAÚJO (2003) propõe uma técnica para estudar a calibração de vários parâmetros a partir de dados de cargas hidráulicas transientes. Os parâmetros envolvidos no processo de calibração ou identificação são: fatores de atrito, rugosidades absolutas, diâmetros das tubulações, vazamentos e simultaneamente fatores de atrito e vazamentos. O método se mostrou eficiente mesmo com poucos dados observados.

SOARES (2003) desenvolveu uma rotina computacional acoplada ao simulador hidráulico EPANET (ROSSMAN, 2000) que considera as perdas por vazamento e a dependência das demandas com a pressão, visando a calibração de rugosidades absolutas, demandas, diâmetros, cotas topográficas e parâmetros do modelo de vazamentos e ainda a localização de componentes hidráulicos na rede, empregando algoritmos genéticos e procedimento híbrido (AGs e Método Simplex – NELDER & MEAD, 1965).

COSTA (2008) apresenta uma formulação baseada no uso de redes neurais artificiais para o processo de calibração de coeficientes de rugosidade de tubulações de redes de distribuição de água. Segundo o autor, o método apresenta a vantagem da possibilidade de avaliação da influência dos possíveis valores medidos no resultado de cada valor calibrado, sendo dado subsídios para a escolha dos melhores pontos para medição.

## 2.5. MIGHA

A estimativa de parâmetros (*parameter estimation*) também conhecida como problema inverso é uma importante etapa no processo de modelagem de redes de distribuição.

Em geral, se aborda a estimativa de parâmetros utilizando o critério clássico da técnica inversa dos mínimos quadrados onde se define uma função objetivo que minimiza a diferença entre as cargas hidráulicas observadas e calculadas ( $h_{obs}$  e  $h_{calc}$ ), portanto:

$$F_{OBJ} = \sum_{i=1}^N (h_i^{obs} - h_i^{calc})^2 \quad (2.11)$$

Onde  $F_{obj}$  é a função objetivo,  $i$  o número da iteração e  $N$  o número total de cargas hidráulicas observadas.

GUO & ZHANG (1994) e GUO & ZHANG (2000) publicaram um método de estimativa dos parâmetros hidrodinâmicos formulado como uma minimização de uma função objetivo das diferenças dos gradientes hidráulicos observados e calculados ( $\nabla h^{obs}$  e  $\nabla h^{calc}$ ) através de um processo iterativo com parâmetro inicial arbitrário ajustado a cada novo ciclo. A equação apresenta a função objetivo deste método.

$$F_{OBJ} = \int_R (\nabla h^{calc} - \nabla h^{obs})^2 dx dy \quad (2.12)$$

Onde  $\nabla h$  é o gradiente hidráulico e  $R$  o domínio de fluxo.

Denominado pelos autores de MIGH - Método Iterativo de Gradiente Hidráulico, o método minimiza a função objetivo das diferenças dos gradientes hidráulicos observados e calculados através de um processo iterativo onde se estabelece arbitrariamente um parâmetro inicial ajustado a cada iteração. Tal calibração é um método inverso indireto (*Indirect inverse method*) uma vez que utiliza o princípio da minimização. Os autores elaboraram o método para a estimativa dos parâmetros hidrodinâmicos, principalmente para a transmissividade ou condutividade hidráulica, na modelagem das águas subterrâneas de um aquífero.

O processo de otimização resulta também em uma minimização simultânea das diferenças das cargas hidráulicas observadas e calculadas no sistema aquífero, no qual se define a função objetivo convencional utilizada no método dos mínimos quadrados.

O procedimento numérico do MIGH é um processo iterativo que começa com uma estimativa inicial arbitrária da transmissividade e, após cada iteração o valor do parâmetro hidrodinâmico atribuído a cada célula da malha do domínio do modelo será ajustada pelo método de descida profunda (*Deepest descent method*) expresso na equação 2.21.

$$T_{j,i+1} = T_{j,i} - \lambda \left( \frac{\partial F_{obs}}{\partial T_j} \right)_i \quad (2.13)$$

Onde  $\lambda$  é o fator de comprimento de passo (*step length*),  $\partial F/\partial T$  é a derivada parcial da função objetivo com relação à transmissividade da célula  $j$  ( $j=1, 2, \dots, N$ ) e  $i$  o índice da iteração.

Em seu trabalho, SCHUSTER (2004) apresenta um caso de estudo hipotético demonstrando a eficiência do MIGHA aplicada em um aquífero aluvial não-confinado, isotrópico e heterogêneo constituído por 4 zonas de condutividade hidráulica diferentes ( $K_1 = 1.10^{-3}$  [m/s],  $K_2 = 5.10^{-3}$  [m/s],  $K_3 = 5.10^{-4}$  [m/s] e  $K_4 = 1.10^{-4}$  [m/s]). A sua porosidade efetiva é de 0,1. O domínio é discretizado em 42 células na direção x e 27 células na direção y com respectivas dimensões constantes de  $\Delta x = \Delta y = 100$  [m]. O número total de células na malha discretizada é 1134, onde apenas  $N = 761$  células são ativas. A figura 2.2 apresenta a área do exemplo utilizado por SCHUSTER (2004) com os contornos da condutividade hidráulica necessários para a calibração.

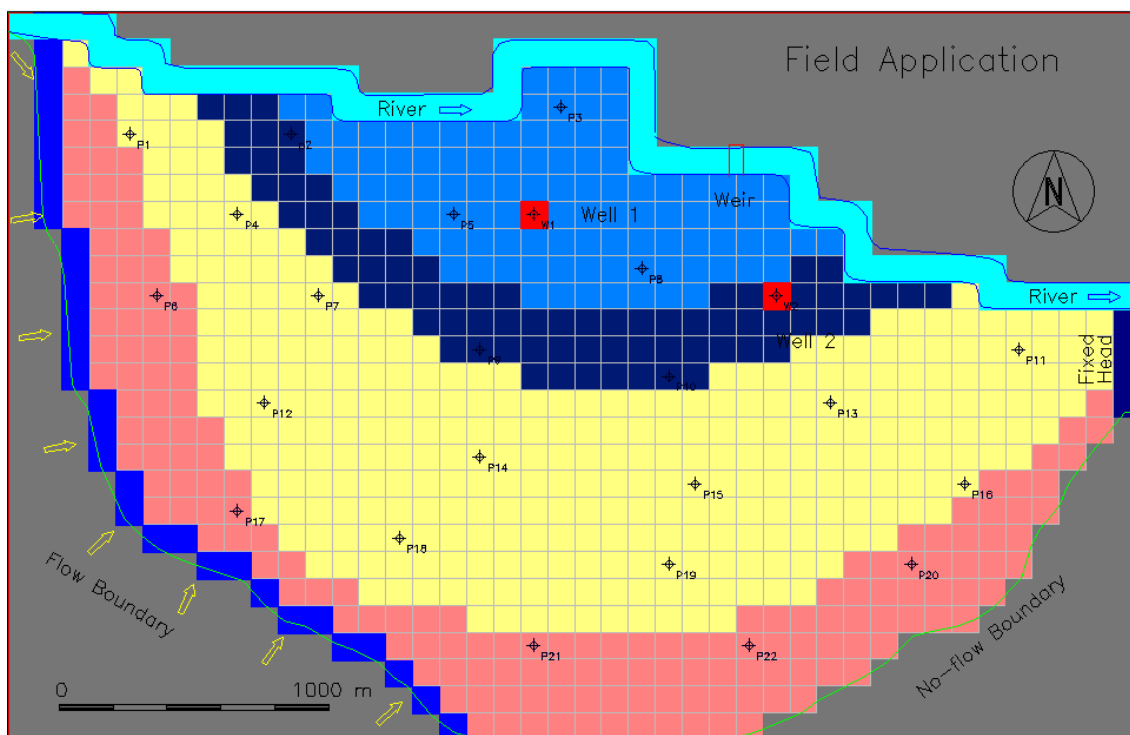


FIGURA 2.2 – Zoneamento da área com as respectivas condutividades hidráulicas (K).

A figura 2.3 apresenta o contorno da condutividade depois da calibração pelo MIGHA que retornou um zoneamento apenas com o conhecimento das cargas hidráulicas observadas.

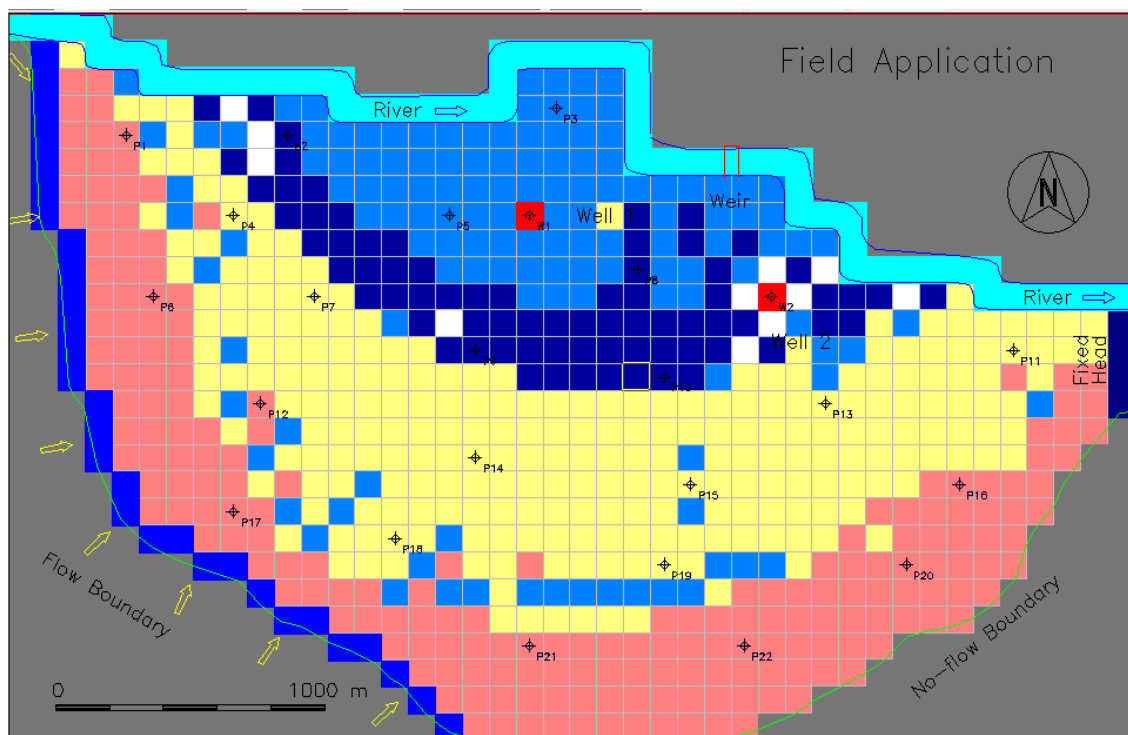


FIGURA 2.3 – Zoneamento da área com as respectivas condutividades hidráulicas (K) obtidas pelo MIGHA depois do processo de calibração.

O Método iterativo de gradiente hidráulico alternativo - MIGHA desenvolvido por SCHUSTER (2002) para um projeto de consultoria abandona a calibração tradicional dos mínimos quadrados.

O MIGHA é um método inverso indireto eficaz, rápido e prático porque minimiza os residuais dos gradientes hidráulicos dos trechos das redes de distribuição acarretando também uma minimização de suas respectivas cargas hidráulicas sendo, portanto, uma importante ferramenta na calibração de parâmetros hidráulicos.

O objetivo foi o abandono da calibração dos mínimos quadrados que fornecia resultados insatisfatórios quando o zoneamento do campo não era conhecido. O MIGHA se difere do MIGH apenas pela substituição da equação 2.13 pela equação 2.14 citada abaixo.

$$T_j^{i+1} = T_j^i \frac{|\nabla h_j^{i \text{ calc}}|}{|\nabla h_j^{i \text{ obs}}|} \quad (2.14)$$

Onde  $T_j^i$  é a transmissividade da célula  $j$  na iteração  $i$ ,  $T_j^{i+1}$  é a transmissividade da célula  $j$  na iteração  $i+1$ ,  $|\nabla h_j^{i \text{ calc}}|$  é o módulo do gradiente

hidráulico calculado na iteração  $i$  da célula  $j$  e  $|\nabla h_j^{i\text{obs}}|$  é o módulo do gradiente hidráulico observado na iteração  $i$  da célula  $j$ .

Como critério de convergência, calculamos em cada iteração o ângulo  $\varphi$  formado entre vetores dos gradientes hidráulicos observado e calculado no espaço bidimensional o qual é dado por:

$$\cos \varphi_j = \frac{\nabla h_j^{\text{obs}} \cdot \nabla h_j^{\text{calc}}}{|\nabla h_j^{\text{obs}}| |\nabla h_j^{\text{calc}}|} \quad (2.15)$$

O critério é a aceitação apenas dos ângulos menores que  $60^\circ$ , ou seja,  $\varphi < 60^\circ$ , os ângulos maiores que este valor não são considerados até que as transmissividades dos trechos vizinhos induzam a diminuição deste ângulo nas próximas iterações.

Calculado o ângulo em uma iteração  $i$ , se este for maior que  $60^\circ$ , calcula-se  $T_j^{i+1}$  pela equação 2.14, senão repete-se o valor anterior, ou seja:

$$\begin{cases} \text{Se } \varphi < 60^\circ \Rightarrow T_j^{i+1} = T_j^i \frac{|\nabla h_j^{i\text{calc}}|}{|\nabla h_j^{i\text{obs}}|} \\ \text{Se } \varphi \geq 60^\circ \Rightarrow T_j^{i+1} = T_j^i \end{cases} \quad (2.16)$$

O fluxograma da figura 2.4 apresenta todo o procedimento da elaboração do programa de SCHUSTER (2002) que foi escrito na linguagem MATLAB onde o processador PMWIN gera o mapa do gradiente hidráulico observado e dos gradientes hidráulicos calculados a cada iteração baseado no programa MODFLOW.

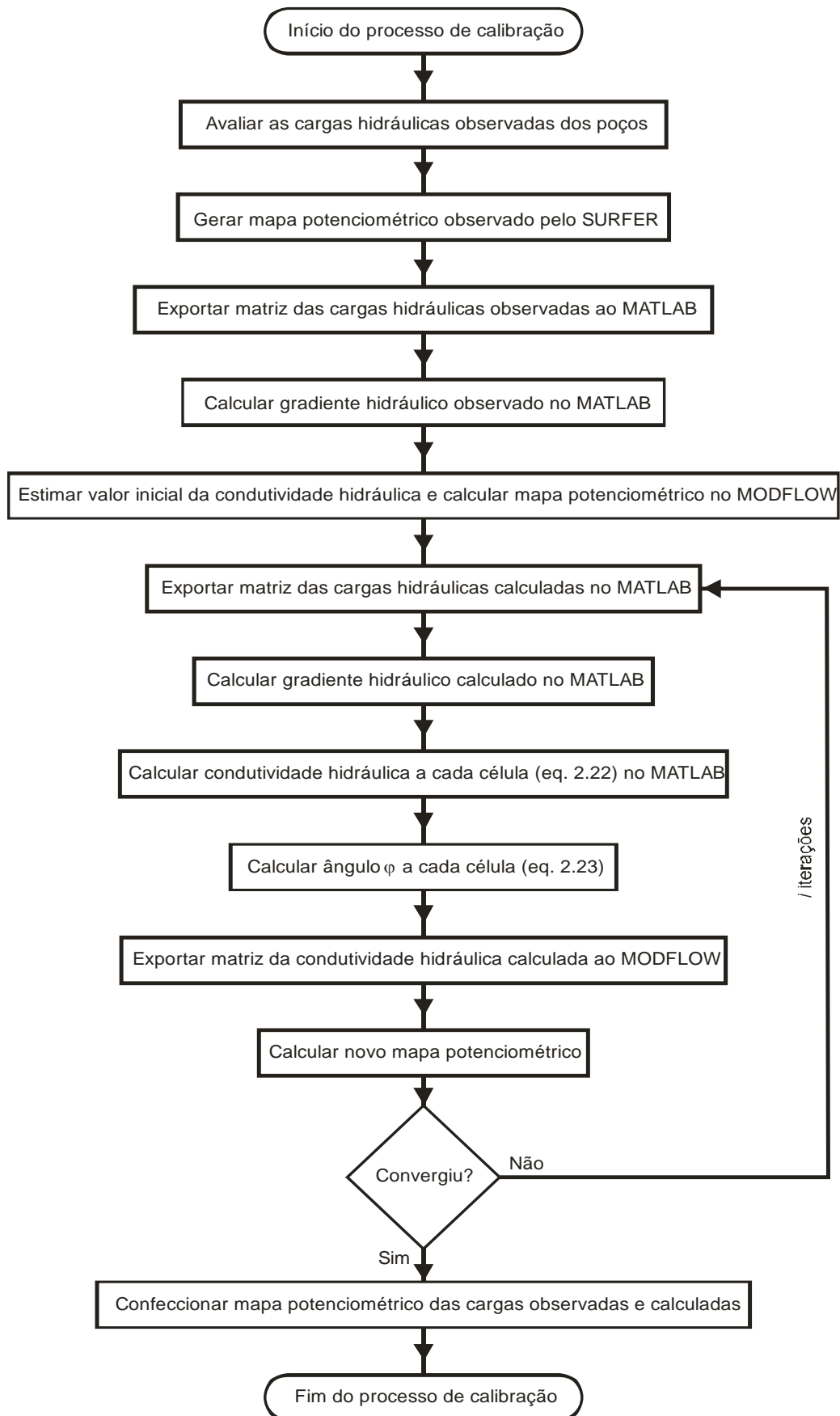


FIGURA 2.4– Fluxograma do procedimento alternativo aplicado aos parâmetros hidrodinâmicos. SCHUSTER (2004).

As iterações cessam quando o erro, dado na equação 2.17 alcança um valor predefinido que é 0,001m.

$$E = \sum (H_j^{obs} - H_j^{calc})^2 \quad (2.17)$$

Segundo o autor, o processo converge com um número de 10 a 15 iterações.

### 2.5.1. MIGHA ADAPTADO PARA A CALIBRAÇÃO DE COEFICIENTES DE RUGOSIDADE DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Aplicado, neste trabalho, à estimativa do parâmetro coeficiente de rugosidade de *Hazen-Williams* das tubulações, o MIGHA corrige a cada iteração o coeficiente de rugosidade (a ser calibrado) do trecho pela expressão:

$$C_j^{i+1} = C_j^i \frac{|\nabla h_j^{i\ calc}|}{|\nabla h_j^{i\ obs}|} \quad (2.18)$$

Onde  $C_j^i$  é o coeficiente de rugosidade de *Hazen-Williams* do trecho  $j$  na iteração  $i$ ,  $C_j^{i+1}$  o coeficiente de rugosidade do trecho  $j$  na iteração  $i+1$ ,  $|\nabla h_j^{i\ calc}|$  é o gradiente hidráulico calculado na iteração  $i$  do trecho  $j$  e  $|\nabla h_j^{i\ obs}|$  é o gradiente hidráulico observado na iteração  $i$  do trecho  $j$ .

Como critério de convergência, calculamos em cada iteração o ângulo  $\varphi$  formado entre vetores dos gradientes hidráulicos observado e calculado no espaço *unidimensional* o qual é dado por:

$$\cos \varphi_j = \frac{\nabla h_j^{obs} \cdot \nabla h_j^{calc}}{|\nabla h_j^{obs}| |\nabla h_j^{calc}|} \quad (2.19)$$

Pela fórmula, vemos que os resultados só podem ser  $\cos \varphi = -1$  ou  $\cos \varphi = 1$ , ou seja, o ângulo  $\varphi$  só pode resultar em  $0^\circ$  ou  $180^\circ$ .

O critério é a aceitação apenas dos ângulos menores que  $60^\circ$ , ou seja,  $\varphi < 60^\circ$ , os ângulos maiores que este valor não são considerados até que as rugosidades dos trechos vizinhos induzam a diminuição deste ângulo nas próximas iterações.

Calculado o ângulo em uma iteração  $i$ , se este for maior que  $60^\circ$ , calcula-se  $C_j^{i+1}$  pela equação 2.18, senão repete-se o valor anterior, ou seja:

$$\begin{cases} \text{Se } \varphi < 60^\circ \Rightarrow C_j^{i+1} = C_j^i \frac{|\nabla h_j^{i \text{ calc}}|}{|\nabla h_j^{i \text{ obs}}|} \\ \text{Se } \varphi \geq 60^\circ \Rightarrow C_j^{i+1} = C_j^i \end{cases} \quad (2.20)$$

As iterações cessam com os seguintes critérios de parada: número máximo de iterações igual a 100 e função objetivo menor que 0,001. Este número máximo de iterações foi adotado porque, segundo SCHUSTER (2002), o método converge com apenas 25 iterações. A função objetivo utilizada neste trabalho está expressa na equação 2.21.

$$F.O = \sum (\nabla h^{\text{calc}} - \nabla h^{\text{obs}})^2 \quad (2.21)$$

O EPANET foi utilizado como simulador hidráulico acoplado ao programa. O fluxograma da figura 2.5 apresenta todo o procedimento da utilização do MIGHA para calibração dos coeficientes de rugosidade deste trabalho.

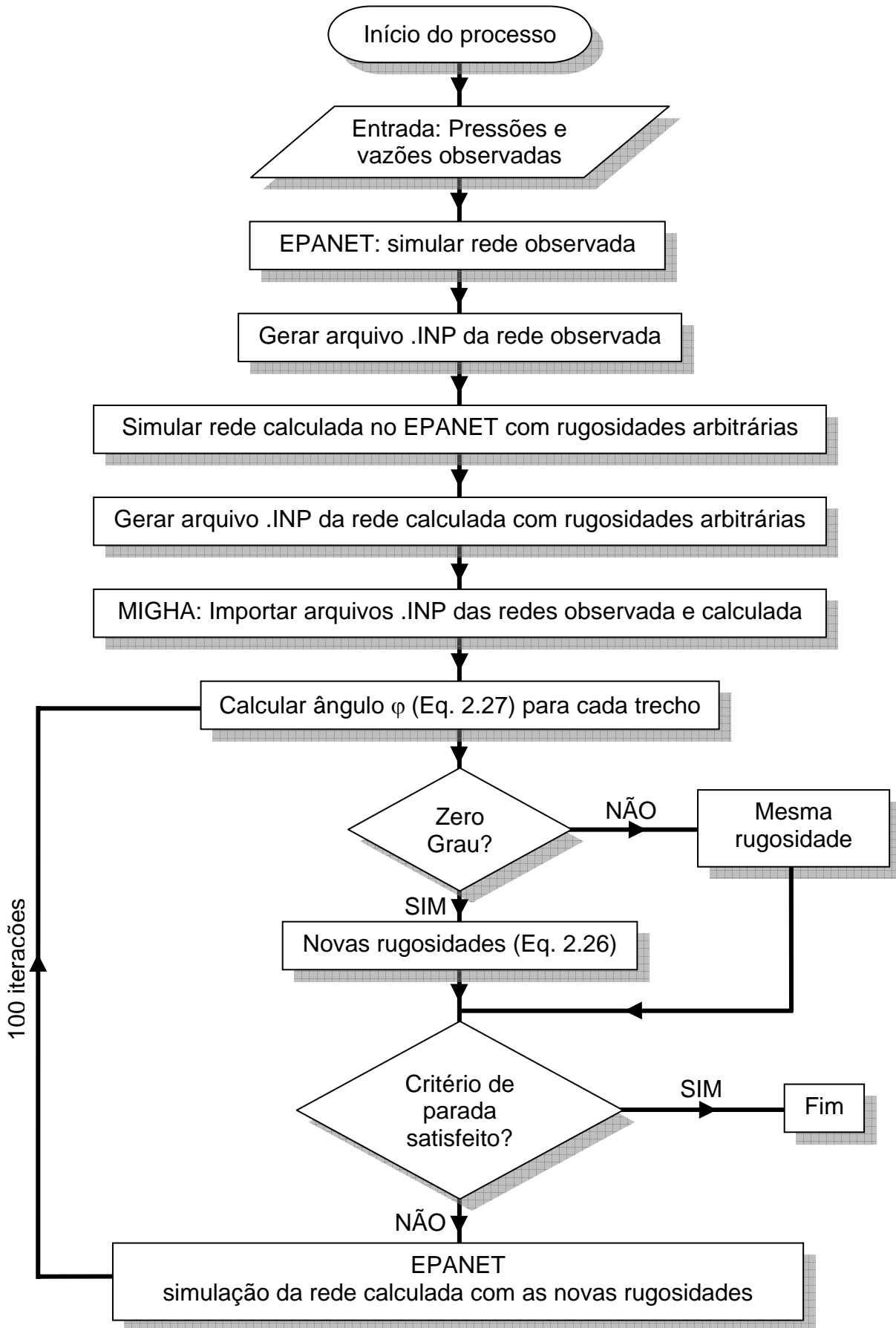


FIGURA 2.5 – Fluxograma do MIGHA na calibração de coeficientes de rugosidade

**Capítulo**

**3**

---

**METODOLOGIA**

### **3. Metodologia**

#### **3.1. Definição do problema**

Dependente de alguns fatores como cotas topográficas, características e propriedades das peças do sistema e propriedades dos fluidos transportados, o cálculo do equilíbrio hidráulico torna-se complexo e de difícil solução por causa da grande quantidade de variáveis envolvidas e, a melhor atribuição de valores para essas variáveis se refletirá na confiabilidade dos modelos hidráulicos, por isso, deve-se proceder à calibração da rede hidráulica para obtenção de resultados mais fiéis e condizentes com o comportamento da rede.

A rugosidade das tubulações é o parâmetro que apresenta maior grau de incerteza em sua determinação em virtude de sua característica dinâmica.

Do exposto, este trabalho propõe um modelo que visa identificar as rugosidades dos trechos da rede através de um processo de calibração automática.

A resolução do problema inicia-se com a coleta e preparação dos dados de entrada no modelo que são os valores observados de pressões, demandas nodais e níveis dos reservatórios, bem como os dados relativos à rede a ser calibrada, como: topografia do terreno, diâmetros, rugosidades e comprimentos das tubulações.

Após a definição dos dados de entrada, aplica-se o modelo da calibração associado a um módulo de simulação hidráulica, para calibração do sistema.

#### **3.2. O método**

O modelo realiza a otimização utilizando o Método Iterativo de Gradiente Hidráulico Alternativo (MIGHA).

Os testes foram realizados em um microcomputador Intel® Core™2 Quad Q6600 com 1 GB de memória RAM.

Nesse trabalho foi desenvolvido um programa computacional em linguagem DELPHI 5.0 para a resolução do problema proposto.

Os dados de entrada são:

- Pressões observadas;
- Demandas nodais;
- Níveis dos reservatórios;
- Cotas topográficas dos nós;
- Diâmetro das tubulações;
- Comprimento das tubulações;
- Rugosidades observadas das tubulações.

Para este trabalho, definem-se três tipos de redes hidráulicas que serão utilizadas:

- *Rede Gabarito*: É a rede onde se conhecem todos os valores de rugosidades e, a partir destes valores, obtêm-se, no simulador, as pressões e vazões as quais a rede está submetida. Esta rede equivale à rede instalada no campo.
- *Rede Observada*: Obtida a partir da rede gabarito, é a rede que apresenta apenas alguns nós medidos, nos quais se conhece a carga hidráulica. Nessa rede é atribuído aleatoriamente um conjunto de valores iniciais de rugosidades para que se possam obter valores de gradientes hidráulicos que serão considerados “gradientes hidráulicos observados”. A rede observada pode coincidir, em termos de cargas hidráulicas, com a rede gabarito se em todos os nós forem medidas as pressões, assim, se a rede observada passar por um processo de calibração de rugosidades, as rugosidades finais desta rede serão iguais às da rede gabarito. Quanto menor o número de nós medidos, mais essa rede se afasta da rede gabarito em termos de rugosidades após um processo de calibração.
- *Rede Calculada*: É a rede onde também é atribuído um conjunto de valores iniciais de rugosidades (o mesmo da rede observada), mas que não apresenta nenhum valor de pressão medido. O simulador calculará seus gradientes que serão considerados “gradientes hidráulicos calculados”.

O processo de calibração pelo MIGHA visa tornar os gradientes hidráulicos calculados o mais próximo possível dos gradientes hidráulicos observados.

O número de pontos medidos é de fundamental importância no processo. Na situação em que todos os pontos são medidos, a rede observada equivale à rede gabarito, que é a rede instalada no campo, quanto aos valores de carga hidráulica.

Na prática, geralmente há poucos pontos medidos em uma grande rede, significa dizer que os gradientes hidráulicos encontrados na rede observada poderão estar distantes dos gradientes hidráulicos reais da rede gabarito em alguns trechos.

Do exposto, percebe-se que para a calibração ser bem sucedida é necessário que se meça a pressão do maior número de nós possível porque, neste caso, a rede calibrada (calculada) ao se aproximar da rede observada, também estará se aproximando da rede gabarito.

O processo de calibração pelo MIGHA ocorre de forma simples e direta quando se conhecem as pressões em todos os pontos. A rede observada corresponde ao próprio gabarito (rede gabarito) conhecendo-se todos os gradientes hidráulicos observados.

Quando se elabora a rede observada, adota-se um conjunto inicial de valores de rugosidades, o simulador hidráulico então retorna valores de pressão, mas, quando há apenas algumas pressões medidas, precisa-se embuti-las no cálculo, ou seja, garantir que o EPANET retorne esses valores de pressão através do mesmo conjunto inicial de rugosidades.

Para resolver tal problema, este trabalho propõe uma solução: ligam-se reservatórios de nível fixo àqueles nós onde a pressão é conhecida (medida). No campo "Nível de água" do reservatório é atribuído o valor correspondente ao da pressão medida (observada) mais a cota altimétrica no ponto. O trecho que interliga o nó ao reservatório deve ser bem pequeno e de grande diâmetro para garantir: i) que não haja perda de carga entre os dois e a carga hidráulica do nó seja equivalente à do reservatório e, ii) que a vazão entre o nó e o reservatório seja bem próxima de zero, já que não deve haver vazão entre eles pois não se trata de um reservatório pertencente ao sistema, e sim, de uma adaptação usada apenas no simulador hidráulico.

Esses reservatórios serão considerados “fictícios” uma vez que não existem realmente, trata-se apenas de uma solução prática encontrada para a fixação das pressões medidas na rede observada.

Este trabalho propõe a análise da influência do número de pontos onde a pressão é conhecida na precisão dos resultados da calibração. Em uma rede que contém 7 nós, foram realizadas calibrações com 7, 6, 5, 4, 3 e 2 pressões medidas.

Com relação ao MIGHA (Método Iterativo de Gradiente Hidráulico Alternativo), este trabalho propõe três processos de calibração.

O primeiro consiste em realizar iterações apenas na rede calculada, modificando, a cada iteração, as rugosidades e os gradientes hidráulicos obtidos. Este processo foi denominado MIGHA-C.

A figura 3.1 apresenta a janela de saída de dados do programa contendo: o conjunto de rugosidades calibradas, seus erros percentuais em relação às rugosidades reais da rede gabarito, as pressões calculadas e seus erros percentuais em relação às pressões observadas, bem como as próprias rugosidades reais, as pressões observadas e o número de iterações realizadas.

The screenshot shows the 'FRM\_PRINCIPAL' window with several data tables and control elements:

Index	ID	No inicial	No final	Comp. (m)	C (H-W)	Gradiente
0	1	1	2	1850	122	
1	2	2	3	790	105	
2	3	3	7	700	133	
3	4	7	4	600	130	
4	5	4	5	980	129	
5	6	5	2	850	121	
6	7	5	6	650	83	
7	8	6	1	850	107	
8	0	1	8	520	110	

Index	ID	Hobs
0	1	483.7721862
1	2	472.5737915
2	3	466.9673156
3	4	467.2450561
4	5	475.7229309
5	6	479.3393680
6	7	466.9134521

Index	ID	No inicial	No final	Comp. (m)	C (H-W)	Gradiente	Erro(%)
0	1	1	2	1850	121.8	0.00582	-0.15
1	2	2	3	790	104.0	0.00710	-0.98
2	3	3	7	700	117.1	0.00007	-11.95
3	4	7	4	600	137.4	-0.00055	5.72
4	5	4	5	980	130.6	-0.00865	1.22
5	6	5	2	850	128.8	0.00371	6.46
6	7	5	6	650	84.4	-0.00555	1.67
7	8	6	1	850	114.5	-0.00471	7.03
8	0	1	8	520	99.0	-0.00474	-9.97

Index	ID	Hcalc	Erro(%)
0	1	483.3367614	-0.09
1	2	472.5699766	0.00
2	3	466.9599914	0.00
3	4	467.2399902	0.00
4	5	475.7202453	0.00
5	6	479.3299256	0.00
6	7	466.9100036	0.00

Buttons: Carrega Gabarito, Carrega Calc, Executar, 50 x, N° de Iterações: 10,  Atualizar observado, 1000

FIGURA 3.1 – Janela contendo dados de saída do programa

O segundo processo consiste em atualizar as redes observada e calculada simultaneamente uma vez a cada nove atualizações exclusivas da rede calculada, tratando-se, portanto, de um processo misto, daí porque foi denominado MIGHA-M.

O terceiro processo, denominado MIGHA-O, consiste em atualizar, tanto na rede calculada quanto na observada, as rugosidades e os gradientes hidráulicos obtidos. Este processo melhora o resultado final da calibração porque aproxima a rede observada da rede gabarito em termos de gradientes hidráulicos, determinando rugosidades calibradas mais próximas das reais, conseqüentemente, erros relativos menores e uma maior eficiência do método.

Este processo se justifica em virtude da incerteza e da imprecisão dos valores estimados pelo simulador hidráulico para as pressões não medidas da rede observada e, conseqüentemente, para o conjunto estimado de rugosidades pelo simulador que irá compor os dados observados.

A figura 3.2 apresenta a janela de saída de dados quando se utiliza este processo. Observe que, neste caso, há uma marcação no campo *Atualizar observado*.

The screenshot displays the 'FRM\_PRINCIPAL' window with four data tables and control elements:

Index	ID	No inicial	No final	Comp. (m)	C (H-W)	Gradiente
0	1	1	2	1850	122	
1	2	2	3	790	105	
2	3	3	7	700	133	
3	4	7	4	600	130	
4	5	4	5	980	129	
5	6	5	2	850	121	
6	7	5	6	650	83	
7	8	6	1	850	107	
8	0	1	8	520	110	

Index	ID	Hobs
0	1	483.7721862
1	2	472.5737915
2	3	466.9673156
3	4	467.2450561
4	5	475.7229308
5	6	479.3359680
6	7	466.9134521

Index	ID	No inicial	No final	Comp. (m)	C (H-W)	Gradiente	Erro(%)
0	1	1	2	1850	121.8	0.00582	-0.16
1	2	2	3	790	104.0	0.00710	-0.98
2	3	3	7	700	117.2	0.00007	-11.86
3	4	7	4	600	137.4	-0.00055	5.71
4	5	4	5	980	130.6	-0.00865	1.22
5	6	5	2	850	128.8	0.00371	6.48
6	7	5	6	650	84.4	-0.00555	1.67
7	8	6	1	850	114.5	-0.00472	7.00
8	0	1	8	520	99.1	-0.00473	-9.94

Index	ID	Hcalc	Erro(%)
0	1	483.3384704	-0.09
1	2	472.5699766	0.00
2	3	466.9599914	0.00
3	4	467.2400207	0.00
4	5	475.7200317	0.00
5	6	479.3299865	0.00
6	7	466.9100646	0.00

Buttons: Carrega Gabarito, Carrega Calc, Executar, 50 x, N° de Iterações: 1,  Atualizar observado

Page number: 250

FIGURA 3.2 – Janela contendo dados de saída do programa atualizando os dados observados.

Realizados os testes, foram comparados os resultados obtidos nos três processos.

Este trabalho propõe ainda a inserção, no método, do aproveitamento de medições de vazão em determinados trechos para que, nestes trechos, a calibração das rugosidades seja realizada aplicando-se a equação da perda de carga de *Hazen-Williams* em função da vazão medida, conforme a equação 3.1.

$$C = \left[ \frac{10,65 \left( \frac{Q}{1000} \right)^{1,85} D^{-4,87}}{J} \right]^{1/1,85} \quad (3.1)$$

Onde C é o coeficiente de rugosidade, em  $m^{0,3676}/s$ ; Q é a vazão, em L/s; D é o diâmetros, em m e, J é o gradiente hidráulico, em m/m.

Foi feita uma comparação dos resultados obtidos com e sem medições de vazão.

### 3.3. Simulador hidráulico

O simulador hidráulico utilizado neste trabalho é o EPANET 2.0 (ROSSMAN, 2000), escolhido por sua larga utilização na engenharia hidráulica. Destaca-se a facilidade de uso e o fácil acesso ao pacote EPANET.

O EPANET, desenvolvido pela *U.S. Environmental Protection Agency*, agência de proteção ambiental dos Estados Unidos, é um programa computacional de uso público que conta com ferramentas e aplicações em redes pressurizadas de distribuição de água (LNEC, 2002).

A figura 3.3 mostra a tela inicial do EPANET.

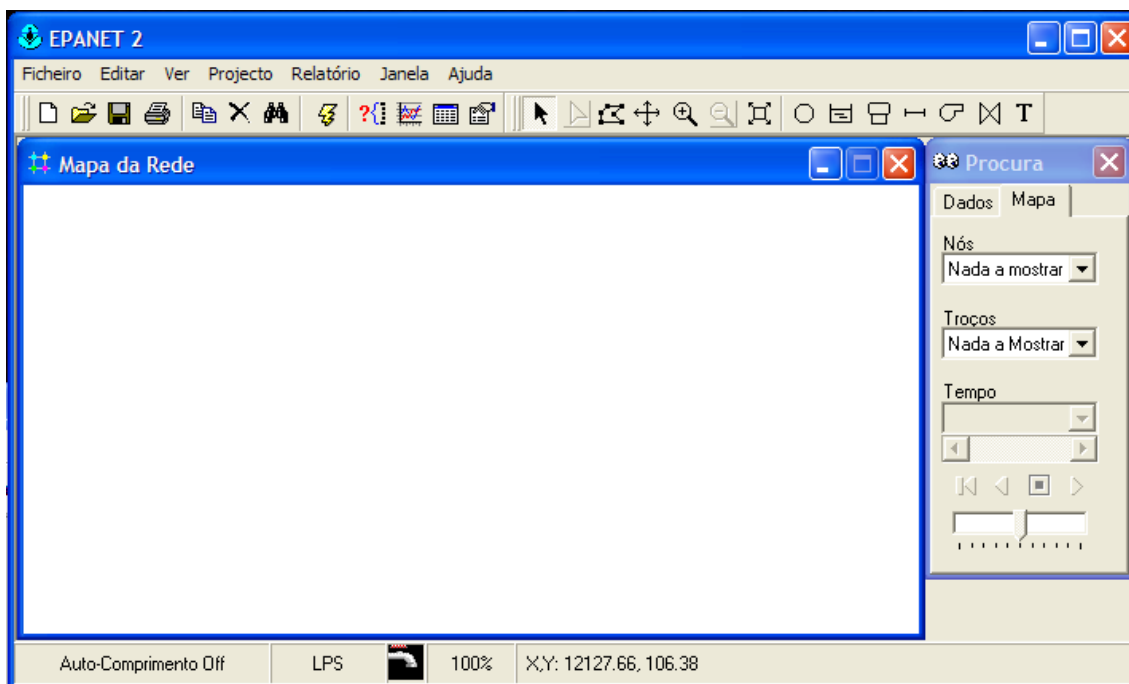


FIGURA 3.3 – Tela inicial do EPANET

O simulador EPANET resolve simulações hidráulicas estáticas e dinâmicas da rede bem como trata do comportamento da qualidade da água ao longo da rede de distribuição.

O módulo de cálculo hidráulico trabalha com as seguintes equações de perda de carga:

- *Hazen-Williams*;
- *Darcy-Weisbach*;
- *Chezy-Manning* (para canais).

Com seus respectivos coeficientes.

As condições de equilíbrio hidráulico da rede caracterizadas pelas equações da continuidade e da conservação da energia e pela relação entre a perda de carga e a vazão são resolvidas, no EPANET, através de um método híbrido Nó-Malha denominado por TODINI & PILATI (1987) como “Método Gradiente”. O método é utilizado no simulador EPANET para obtenção dos valores de pressão e vazão na rede.

Considerando uma rede com  $N$  nós e  $NF$  nós com carga hidráulica fixa, a relação perda de carga x vazão em uma tubulação entre os nós  $i$  e  $j$  pode ser representada pela seguinte expressão:

$$H_i - H_j = h_{ij} = rQ_{ij}^n + mQ_{ij}^2 \quad (3.2)$$

Onde  $H$  é a carga hidráulica no nó,  $h$  a perda de carga total,  $r$  o termo de perda de carga que depende da formulação utilizada,  $Q$  a vazão na tubulação,  $n$  o expoente da formulação perda de carga x vazão e  $m$  o coeficiente de perda de carga localizada.

Arbitrada uma solução inicial para as vazões nas tubulações, novas cargas hidráulicas nos nós são obtidas em cada iteração do método gradiente, resolvendo o seguinte sistema linear:

$$AH = F \quad (3.3)$$

Em que  $A$  é a matriz Jacobiana ( $N \times N$ ),  $H$  o vetor de incógnitas em termos de cotas piezométricas e  $F$  o vetor de balanço de massa acrescido de um fator de correção de vazão.

Os elementos da diagonal da matriz Jacobiana  $A$  são:

$$A_{ii} = \sum_{j \in J_i} x_{ij} \quad (3.4)$$

E os elementos não nulos fora da diagonal são:

$$A_{ij} = -x_{ij} \quad (3.5)$$

Sendo  $J_i$  o conjunto de nós conectados ao nó  $i$  e  $x_{ij}$  o inverso da derivada da perda de carga total no trecho entre os nós  $i$  e  $j$ , dado por:

$$x_{ij} = \frac{1}{nr|Q_{ij}|^{n-1} + 2m|Q_{ij}|} \quad (3.6)$$

A conservação de massa nos nós é dada pela expressão:

$$\sum_{j \in J_i} Q_{ij} - C_i = 0 \quad \text{para } i=1, \dots, N \quad (3.7)$$

em que  $C$  é o consumo no nó  $i$ . Assim, conhecendo a carga hidráulica nos NF nós, obtêm-se os valores de pressão e vazão na rede que satisfazem as equações 3.6 e 3.7.

O vetor  $F$  composto pela parcela do balanço de massa no nó acrescido de um fator de correção de vazão é dado por:

$$F_i = \left( \sum_{j \in J_i} Q_{ij} - C_i \right) + \sum_{j \in J_i} y_{ij} + \sum_{f \in J_f} x_{if} H_f \quad (3.8)$$

Sendo o último termo aplicável em qualquer trecho que ligue um nó  $i$  a um reservatório de nível fixo  $f$ ,  $J_f$  o conjunto de nós, com carga hidráulica constante, ligados ao nó  $i$  e  $y_{ij}$  o fator de correção de vazão dado para tubulações pela expressão:

$$y_{ij} = x_{ij} \left( r |Q_{ij}|^n + m |Q_{ij}|^2 \right) \text{sgn}(Q_{ij}) \quad (3.9)$$

em que  $\text{sgn}(Q_{ij}) = 1$  se  $Q_{ij} > 0$ , caso contrário  $\text{sgn}(Q_{ij}) = -1$ .

Após calculadas as cargas hidráulicas nos nós, os novos valores das vazões nos trechos são obtidos de acordo com a seguinte expressão:

$$Q_{ij} = Q_{if} - [y_{ij} - x_{ij}(H_i - H_j)] \quad (3.10)$$

Se a soma de todas as variações de vazão (em valor absoluto) relativas à vazão total em todos os trechos for superior à tolerância especificada, as equações 3.3 e 3.10 são resolvidas novamente.

### 3.4. Interface entre o simulador e o modelo de calibração

A EPA (*Environmental Protection Agency*) disponibiliza o EPANET em três versões:

- Código fonte em linguagem computacional C e em linguagem Delphi;
- Compilação em formato executável (extensão de arquivo “.exe”);
- Compilação em formato de biblioteca dinâmica – *Direct Link-Library* (DLL) – (extensão “.dll”).

Para a simulação hidráulica foi incorporada ao MIGHA uma biblioteca dinâmica de funções do EPANET (*EPANET Programmer's Toolkit*) permitindo personalizar a rotina computacional do EPANET 2.0. A biblioteca, armazenada

no arquivo EPANET2.DLL, contém funções de análise hidráulica e de qualidade da água nas linguagens C++, Delphi e Visual Basic.

O EPANET *Toolkit* possui módulos distintos para entrada de dados, simulação hidráulica, simulação da qualidade da água e geração de relatórios.

A simulação de uma rede de distribuição pelo EPANET *Toolkit* pode ser descrita da seguinte forma:

- A entrada de dados do modelo é feita a partir de um arquivo externo (.INP) contendo a descrição da rede a ser simulada. Este formato de arquivo também é utilizado para importação e exportação de dados.
- Os resultados obtidos da simulação para um período estendido são registrados em um arquivo de dados sem formatação (binário) com extensão (.HYD).
- Os resultados hidráulicos e de qualidade da água são registrados em um arquivo de saída sem formatação com extensão (.OUT).
- O módulo de geração de relatórios acessa os resultados da simulação armazenados no arquivo de saída (.OUT) e transcreve-os para um arquivo formatado com extensão (.RPT) que é um relatório de dados formatados. O arquivo (.RPT) contém ainda as possíveis mensagens de erro.

A figura 3.4 apresenta o fluxograma de simulação pelo EPANET *Toolkit*.

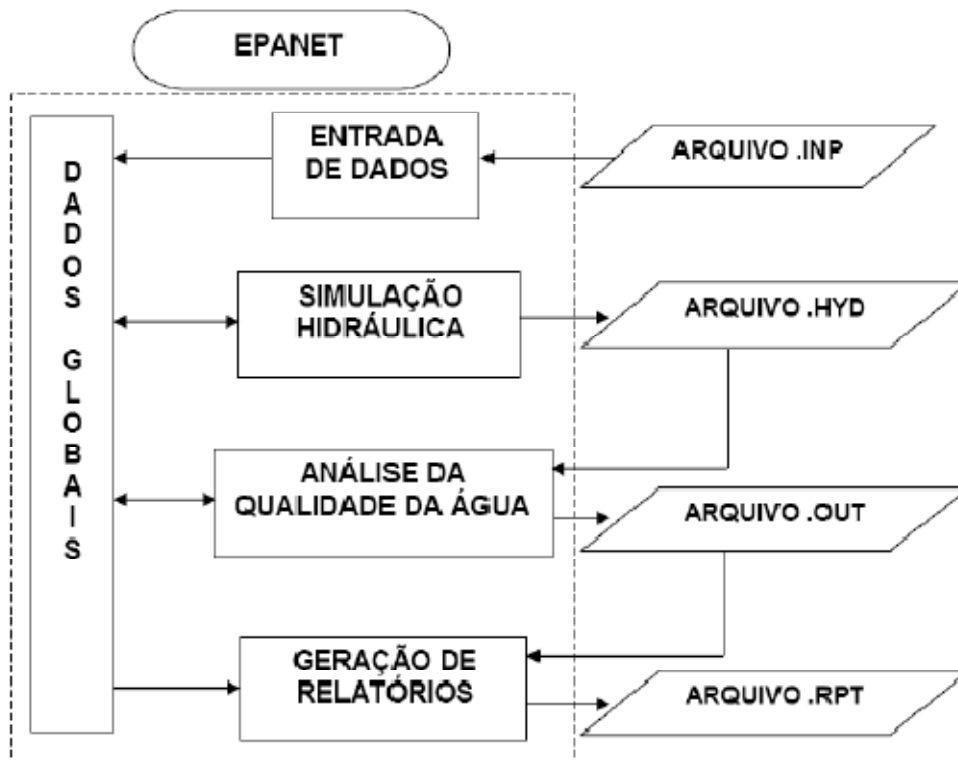


FIGURA 3.4 – Fluxograma da rotina executada pelo EPANET Toolkit.

(Fonte: SILVA, 2007 adaptado de ROSSMAN, 2000b)

### 3.5. Rede exemplo

A rede exemplo adotada por PORTO (1998) foi utilizada no modelo para verificar sua eficiência. A figura 3.5 representa a rede utilizada.

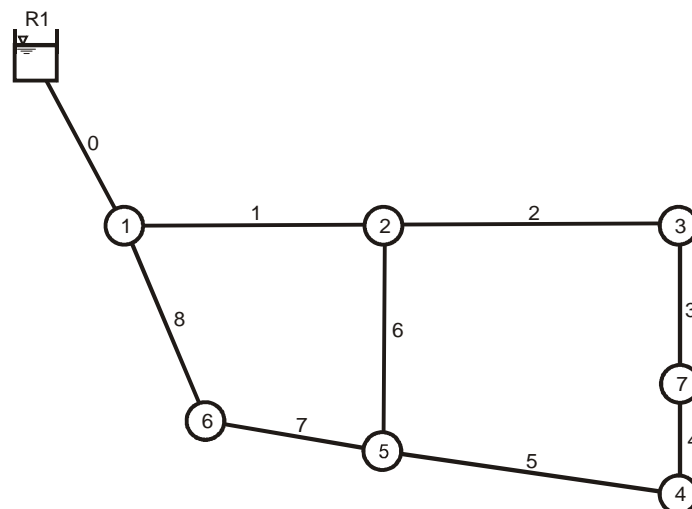


FIGURA 3.5 – Rede exemplo utilizada

As variáveis necessárias sendo cotas topográficas, demandas nodais, nível do reservatório, diâmetros, rugosidades e comprimentos das tubulações são conhecidas e corretas.

A tabela 3.1 apresenta as cotas topográficas, em metros, dos nós da rede.

TABELA 3.1 – Cotas topográficas dos nós da rede

R1 (m)	Nó 1 (m)	Nó 2 (m)	Nó 3 (m)	Nó 4 (m)	Nó 5 (m)	Nó 6 (m)	Nó 7 (m)
470,8	463,2	460,2	458,9	461,2	457,7	463,2	459,2

As características físicas das tubulações estão representadas na tabela 3.2.

TABELA 3.2 – Características físicas das tubulações da rede exemplo

Tubo	Nó inicial	Nó final	Diâmetro (mm)	Comprimento (m)	Rugosidade $c(m^{0,3676}/s)$
0	R1	1	250	520	110
1	1	2	150	1850	122
2	2	3	125	790	105
3	3	7	100	700	133
4	7	4	100	600	130
5	4	5	100	980	129
6	5	2	100	850	121
7	5	6	200	650	83
8	6	1	200	850	107

Os dados de entrada de pressão serão obtidos pela simulação através do EPANET 2.0 e tais valores serão considerados como pressão observada em campo, uma vez que o aplicativo será testado em um exemplo hipotético onde não há observações em campo.

### 3.6. Análise e precisão da calibração

Neste trabalho, a análise da performance da calibração para comparação entre os valores reais e os simulados será realizada com base nos critérios estabelecidos pelo WATER RESEARCH CENTRE (1989).

Para valores de pressão, o critério deve se basear no erro absoluto, dado pela diferença entre o valor simulado e o observado, não devendo exceder uma das seguintes faixas:

- $\pm 0,5$  m para 85% das medidas de pressão.
- $\pm 0,75$  m para 95% das medidas de pressão.
- $\pm 2$  m para 100% das medidas de pressão.

### 3.7. Análise dos parâmetros do MIGHA

A análise dos principais parâmetros envolvidos no MIGHA será feita através de estudos comparativos verificando a influência, no método, do número de pontos de pressão medida, da escolha destes pontos, da influência, no resultado, das iterações realizadas na rede observada, da influência das medidas de vazão e, finalmente, na comparação com outro método comprovadamente eficiente que são os algoritmos genéticos.

Em cada teste, o programa foi rodado, em cada cenário, doze vezes para calibração das rugosidades da rede hipotética com os seguintes critérios de parada: número máximo de iterações igual a 100 e função objetivo menor que 0,001 m. Foram, portanto, obtidos doze resultados para cada calibração, o conjunto dos resultados corresponde a um vetor, cuja dimensão é a quantidade de tubos e, cada posição do vetor corresponde à rugosidade de um tubo.

Para a conclusão do teste, foi calculada a rugosidade média dos dois cenários para as doze calibrações de cada tubo, obtendo o vetor rugosidade média, cuja dimensão é a quantidade de tubos e, cada posição do vetor corresponde à rugosidade média de um tubo. Este vetor foi, então, aplicado à rede hipotética para o cálculo das denominadas “pressões calculadas”.

Em uma tabela, foi calculada a diferença entre as pressões observadas e calculadas para cada nó da rede. Estas diferenças foram plotadas em gráficos para os dois cenários.

Em cada teste realizado foi elaborado um gráfico contendo as rugosidades médias e os desvios padrões. Com base na curva de distribuição normal, foram calculadas, para as situações analisadas, as probabilidades dos coeficientes de rugosidade serem estimados com um erro menor que 5% do real.

Para ilustrar a metodologia adotada, a figura 3.6 apresenta a curva de distribuição normal referente a uma amostra de rugosidades absolutas ( $\epsilon$ ) calibradas pelo MIGHA com média 1,02mm e desvio padrão de 0,04mm. Sabendo que a rugosidade absoluta real é 1,00mm, calcula-se a probabilidade do programa identificar a rugosidade com uma margem de erro de 5% pela área compreendida entre o eixo das abscissas e a curva de distribuição, no intervalo de 0,95mm até 1,05mm.

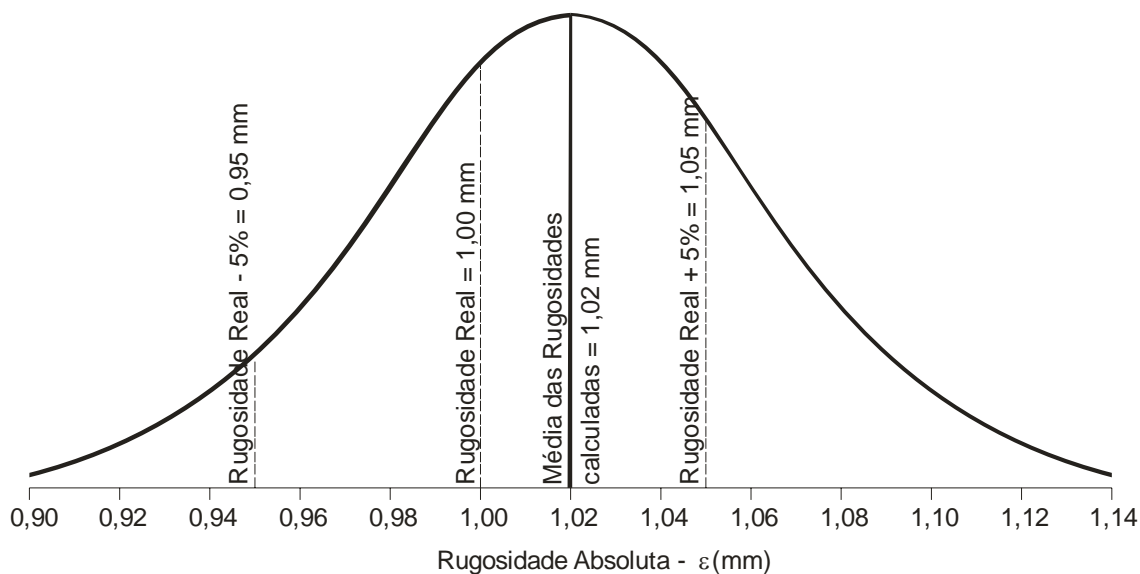


FIGURA 3.6 – Exemplo de curva de distribuição normal das rugosidades calculadas pelo MIGHA

A tabela 3.3 apresenta os testes realizados para os estudos comparativos deste trabalho.

TABELA 3.3 – Caracterização dos testes realizados para estudo comparativo

Parâmetro	Possibilidades analisadas
Influência do número de pontos de pressão medida	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Todos os pontos – sete pontos</li> <li>• Seis pontos medidos</li> <li>• Cinco pontos medidos</li> <li>• Quatro pontos medidos</li> <li>• Três pontos medidos</li> <li>• Dois pontos medidos</li> </ul>
Influência das iterações na rede observada	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Calibração usando o MIGHA-C</li> <li>• Calibração usando o MIGHA-M</li> <li>• Calibração usando o MIGHA-O</li> </ul>
Influência dos dados de medida de vazão	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Calibração sem utilização de medidas de vazão</li> <li>• Calibração utilizando medida de vazão</li> </ul>
Comparação do método com os algoritmos genéticos	

**Capítulo**

**4**

---

**RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### 4. Resultados e Discussão

Foram considerados para a rede exemplo dois cenários de demandas nodais indicados na tabela 4.1.

TABELA 4.1 – Cenários de demandas da rede

Nó	Demanda (L/s)	
	Cenário 1	Cenário 2
1	0	5
2	10	3
3	8	7
4	5	2
5	10	12
6	5	14
7	2	7

Os valores de pressão considerados reais da rede gabarito são calculados pelo EPANET 2.0 utilizando a fórmula de *Hazen-Williams*. Tais pressões estão apresentadas, para os dois cenários, na tabela 4.2.

TABELA 4.2 – Pressões reais para os dois cenários de demandas da rede

Nó	Pressões reais (m)	
	Cenário 1	Cenário 2
1	20,57	19,53
2	12,37	13,09
3	8,07	6,71
4	6,05	4,95
5	18,02	15,57
6	16,14	12,84
7	7,71	4,95

#### 4.1. Influência das iterações na rede observada

Como já foi dito anteriormente, o MIGHA busca aproximar em termos de gradiente hidráulico a rede calculada da rede observada. Como em situações reais não há como medir a pressão em todos os pontos do sistema, o simulador hidráulico EPANET 2.0 estima a pressão nos pontos em que esta não é conhecida, implicando, conseqüentemente em uma rede observada sensivelmente diferente da rede gabarito (real) em termos de gradientes hidráulicos. A conseqüência disto é uma calibração realizada na rede calculada que se aproxima da rede observada, mas que não se aproxima muito da rede gabarito.

Para mitigar o problema exposto no parágrafo anterior, este trabalho propõe alternativamente que o processo de calibração seja realizado de forma iterativa também com a rede observada, ou seja, a cada iteração, o novo conjunto de rugosidades seja aplicado tanto à rede calculada quanto à rede observada e, a partir destes novos valores seja realizada uma nova iteração.

Este trabalho pretende mostrar que a aplicação desta medida deverá aproximar a rede calculada da rede gabarito, já que aproxima a calculada da observada e esta, por sua vez, da rede gabarito, em termos de rugosidades.

O processo foi realizado da seguinte forma para cada um dos cenários: foram realizadas 12 calibrações usando o MIGHA-C, em seguida, foi calculada a média, para cada tubo, das rugosidades obtidas das 12 calibrações.

Com as médias das rugosidades dos dois cenários foi feita uma média de acordo com a expressão abaixo:

$$\text{média MIGHA-C} = \frac{\text{média cenário 1} + \text{média cenário 2}}{2} \quad (4.1)$$

As rugosidades médias foram aplicadas na rede em ambos os cenários, determinando-se as pressões calculadas e, conseqüentemente, a diferença, em cada trecho, entre as pressões reais e calculadas quando da utilização do MIGHA-C.

Em seguida foram realizadas 12 calibrações usando o MIGHA-M onde a cada 9 iterações na rede calculada era realizada uma iteração com as redes

calculada e observada simultaneamente. Foi calculada a média, para cada tubo, das rugosidades obtidas das 12 calibrações.

Com as médias das rugosidades dos dois cenários foi feita uma média de acordo com a expressão abaixo:

$$\text{média MIGHA-M} = \frac{\text{média cenário 1} + \text{média cenário 2}}{2} \quad (4.2)$$

As rugosidades médias foram aplicadas na rede em ambos os cenários, determinando-se as pressões calculadas e, conseqüentemente, a diferença, em cada trecho, entre as pressões reais e calculadas quando da utilização do MIGHA-M.

Finalmente, foram realizadas 12 calibrações usando o MIGHA-O. A média foi calculada, para cada tubo, das rugosidades obtidas das 12 calibrações.

Com as médias das rugosidades dos dois cenários foi feita uma média de acordo com a expressão abaixo:

$$\text{média MIGHA-O} = \frac{\text{média cenário 1} + \text{média cenário 2}}{2} \quad (4.3)$$

As rugosidades médias foram aplicadas na rede em ambos os cenários, determinando-se as pressões calculadas e, conseqüentemente, a diferença, em cada trecho, entre as pressões reais e calculadas quando da utilização do MIGHA-O.

Os resultados de rugosidades obtidas nas 12 calibrações realizadas pelo MIGHA-C estão apresentados na tabela 4.3 para o cenário 1 e na tabela 4.4 para o cenário 2.

TABELA 4.3 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo programa utilizando o MIGHA-C para o cenário 1.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo - C de Hazen-Williams ( $m^{0,3676}/s$ )								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	109,90	123,20	128,90	114,20	163,20	97,90	120,20	113,20	106,30
2	109,90	118,70	128,50	92,80	163,00	100,00	128,40	120,20	108,60
3	109,90	126,20	139,70	98,80	169,10	92,40	116,40	114,90	104,80
4	109,90	121,20	88,60	131,50	146,90	134,10	71,90	122,70	107,40
5	110,00	129,50	106,00	142,10	117,00	129,20	89,70	115,60	85,40
6	110,00	96,40	139,50	155,80	97,40	129,30	136,00	92,70	112,90
7	109,90	120,00	107,40	117,50	107,40	132,20	112,80	74,30	119,70
8	109,90	90,00	150,90	132,40	103,50	131,00	141,30	128,80	99,20
9	109,90	94,10	138,40	81,30	116,80	134,90	133,00	170,20	91,30
10	109,90	106,90	114,90	103,30	159,40	131,10	133,60	124,10	94,10
11	109,90	120,90	117,30	150,20	102,10	129,50	90,50	69,40	123,40
12	109,90	134,70	92,00	83,50	119,90	134,50	127,60	120,70	86,40
Média	109,92	115,15	121,01	116,95	130,48	123,01	116,78	113,90	103,29
$\sigma$	0,04	14,70	19,91	25,57	27,58	16,03	21,81	26,39	12,33
Real	110,00	122,00	105,00	133,00	130,00	129,00	121,00	83,00	107,00
Erro	0,08%	5,61%	15,25%	12,07%	0,37%	4,64%	3,48%	37,23%	3,47%
Erro médio por tubo									9,13%

TABELA 4.4 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo programa utilizando o MIGHA-C para o cenário 2.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo - C de Hazen-Williams ( $m^{0,3676}/s$ )								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	109,90	110,00	106,40	126,70	146,20	129,60	62,20	91,20	109,00
2	109,90	96,20	125,40	150,70	130,00	96,40	172,00	121,70	105,70
3	109,90	117,30	103,50	126,20	184,20	124,60	105,70	111,20	100,30
4	109,90	116,80	103,50	126,10	184,40	124,60	62,90	85,10	109,20
5	109,90	112,20	103,60	95,70	111,80	133,60	122,60	91,00	108,90
6	109,90	103,70	113,10	112,40	98,00	122,50	125,90	105,70	106,70
7	109,90	102,00	132,40	90,00	100,00	101,10	91,30	105,00	96,20
8	110,10	95,00	120,40	115,30	156,20	135,20	40,00	96,50	110,40
9	109,90	104,30	110,90	135,50	177,10	119,90	95,40	95,50	109,70
10	109,90	124,10	113,80	129,70	83,80	111,10	152,40	81,00	106,60
11	109,90	100,60	117,50	145,10	102,30	130,10	92,20	88,60	113,80
12	109,90	102,20	118,60	147,50	115,60	122,70	80,70	87,60	113,10
Média	109,92	107,03	114,09	125,08	132,47	120,95	100,28	96,68	107,47
$\sigma$	0,06	9,04	9,24	19,18	36,13	12,24	38,23	11,98	5,01
Real	110,00	122,00	105,00	133,00	130,00	129,00	121,00	83,00	107,00
Erro	0,08%	12,27%	8,66%	5,96%	1,90%	6,24%	17,13%	16,48%	0,44%
Erro médio por tubo									7,68%

A tabela 4.5 apresenta as médias das calibrações dos dois cenários. Estes coeficientes de rugosidades foram aplicados á rede em ambos os cenários para a determinação da diferença entre as pressões reais e calibradas.

TABELA 4.5 – Média dos coeficientes médios obtidos dos dois cenários calibrados pelo MIGHA-C

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo - C de Hazen-Williams ( $m^{0,3676}/s$ )									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
MÉDIA CENÁRIO 1	109,92	115,15	121,01	116,95	130,48	123,01	116,78	113,90	103,29	
MÉDIA CENÁRIO 2	109,92	107,03	114,09	125,08	132,47	120,95	100,28	96,68	107,47	
<b>MÉDIA</b>	<b>109,92</b>	<b>111,09</b>	<b>117,55</b>	<b>121,01</b>	<b>131,47</b>	<b>121,98</b>	<b>108,53</b>	<b>105,29</b>	<b>105,38</b>	
Erro	0,08%	8,94%	11,95%	9,01%	1,13%	5,44%	10,31%	26,85%	1,51%	
							Erro médio por tubo		8,36%	

Os resultados de rugosidades obtidas nas 12 calibrações pelo MIGHA-M estão apresentados na tabela 4.6 para o cenário 1 e na tabela 4.7 para o cenário 2.

TABELA 4.6 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo programa utilizando o MIGHA-M para o cenário 1.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo - C de Hazen-Williams ( $m^{0,3676}/s$ )								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	109,90	77,40	168,80	106,10	191,20	139,90	150,20	120,50	109,30
2	109,90	128,20	100,30	188,20	122,00	127,10	129,70	105,20	91,70
3	109,90	108,50	117,00	82,70	94,70	126,20	139,40	100,40	101,80
4	109,90	100,00	122,70	85,40	121,00	129,80	144,70	83,70	123,30
5	109,90	108,60	119,80	132,50	97,20	124,10	138,90	86,10	112,30
6	109,90	119,50	118,60	146,30	98,40	123,80	105,10	107,30	91,00
7	109,90	108,60	121,70	128,50	98,60	124,40	133,30	113,80	95,40
8	109,90	83,10	143,80	87,70	149,30	133,50	160,90	90,90	129,30
9	109,90	94,50	136,70	177,60	115,90	126,20	148,90	90,10	118,60
10	109,90	137,50	103,60	149,60	108,80	125,50	82,10	82,50	95,10
11	109,90	127,30	115,10	141,10	107,70	125,60	81,20	89,80	93,40
12	109,90	100,20	179,90	133,00	160,40	134,30	87,60	98,10	100,20
Média	109,90	107,78	129,00	129,89	122,10	128,37	125,17	97,37	105,12
$\sigma$	0,00	18,21	24,39	34,42	29,99	5,03	28,49	12,29	13,19
Real	110,00	122,00	105,00	133,00	130,00	129,00	121,00	83,00	107,00
Erro	0,09%	11,65%	22,86%	2,34%	6,08%	0,49%	3,44%	17,31%	1,76%
Erro médio por tubo									7,34%

TABELA 4.7 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo programa utilizando o MIGHA-M para o cenário 2.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo - C de Hazen-Williams ( $m^{0,3676}/s$ )								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	109,90	130,90	112,20	148,60	99,00	113,60	177,50	162,40	89,80
2	109,90	77,40	111,30	78,00	115,20	141,70	157,60	113,0	117,10
3	109,90	119,00	101,50	118,60	139,40	135,90	70,00	71,40	118,50
4	109,90	122,10	89,50	76,20	154,70	153,70	69,80	72,30	118,50
5	109,90	77,20	132,20	91,10	83,40	123,10	138,50	86,90	129,50
6	109,90	98,70	107,20	110,60	129,60	135,00	120,00	108,50	108,50
7	109,90	122,20	106,60	95,20	92,10	125,70	70,30	96,50	101,60
8	109,90	110,00	107,80	121,20	124,10	130,10	66,40	79,70	115,70
9	109,90	110,20	116,30	110,80	84,30	116,70	85,50	79,00	115,10
10	109,90	94,20	115,60	107,00	113,40	130,40	98,40	106,0	109,90
11	109,90	102,10	102,30	86,10	119,10	139,70	133,60	88,20	116,00
12	109,90	113,20	103,0	94,90	112,30	134,10	164,50	90,60	108,60
Média	109,90	106,43	108,79	103,19	113,88	131,64	112,68	96,21	112,40
$\sigma$	0,00	17,19	10,35	20,64	21,74	11,07	41,12	24,95	9,92
Real	110,00	122,00	105,00	133,00	130,00	129,00	121,00	83,00	107,00
Erro	0,09%	12,76%	3,61%	22,41%	12,40%	2,05%	6,88%	15,91%	5,05%
Erro médio por tubo									9,02%

A tabela 4.8 apresenta as médias das calibrações dos dois cenários. Estes coeficientes de rugosidades foram aplicados á rede em ambos os cenários para a determinação da diferença entre as pressões reais e calibradas.

TABELA 4.8 – Média dos coeficientes médios obtidos dos dois cenários calibrados pelo MIGHA-M

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo - C de Hazen-Williams ( $m^{0,3676}/s$ )								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
MÉDIA CENÁRIO 1	109,90	107,78	129,00	129,89	122,10	128,37	125,17	97,37	105,12
MÉDIA CENÁRIO 2	109,90	106,43	108,79	103,19	113,88	131,64	112,68	96,21	112,40
<b>MÉDIA</b>	<b>109,90</b>	<b>107,11</b>	<b>118,90</b>	<b>116,54</b>	<b>117,99</b>	<b>130,00</b>	<b>118,92</b>	<b>96,79</b>	<b>108,76</b>
Erro	0,09%	12,21%	13,23%	12,37%	9,24%	0,78%	1,72%	16,61%	1,64%
							Erro médio por tubo		7,54%

Os resultados de rugosidades obtidas nas 12 calibrações pelo MIGHA-O estão apresentados na tabela 4.9 para o cenário 1 e na tabela 4.10 para o cenário 2.

TABELA 4.9 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo programa utilizando o MIGHA-O para o cenário 1.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo - C de Hazen-Williams ( $m^{0,3676}/s$ )								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	109,90	132,90	94,20	109,00	81,70	126,80	60,10	93,40	101,40
2	109,90	119,50	143,50	112,90	146,00	89,20	148,60	109,90	108,20
3	109,90	135,30	165,80	129,80	96,90	75,60	118,60	99,90	100,20
4	109,90	111,40	126,20	99,40	120,60	100,60	150,20	124,60	112,40
5	109,90	136,80	99,60	150,30	145,30	127,50	92,60	90,90	91,90
6	109,90	148,60	93,20	164,80	143,70	126,30	95,40	88,60	89,60
7	109,90	147,60	90,60	139,30	141,20	128,50	114,40	89,80	91,00
8	109,90	147,00	94,40	188,20	106,70	125,60	104,80	101,20	85,50
9	109,90	140,30	93,50	71,30	178,30	133,30	83,50	88,30	92,50
10	109,90	129,50	99,60	146,90	106,60	129,40	122,00	93,80	95,70
11	109,90	118,10	111,70	136,00	127,50	129,30	110,90	104,60	93,80
12	109,90	128,00	106,10	163,70	144,60	126,40	101,30	91,30	95,20
Média	109,90	132,92	109,87	134,30	128,26	118,21	108,53	98,03	96,45
$\sigma$	0,00	12,19	23,66	32,26	26,84	18,82	25,46	10,83	7,82
Real	110,00	122,00	105,00	133,00	130,00	129,00	121,00	83,00	107,00
Erro	0,09%	8,95%	4,63%	0,98%	1,34%	8,37%	10,30%	18,10%	9,86%
Erro médio por tubo									6,96%

TABELA 4.10 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo programa utilizando o MIGHA-O para o cenário 2.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo - C de Hazen-Williams ( $m^{0,3676}/s$ )								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	109,90	111,10	89,50	70,00	146,50	173,40	142,70	94,00	108,70
2	109,90	127,30	113,20	166,40	188,20	102,20	98,70	113,10	95,40
3	109,90	98,20	124,70	143,80	191,10	114,10	63,50	99,90	108,10
4	109,90	136,40	107,60	157,90	75,10	140,70	77,40	100,10	95,20
5	109,90	104,10	117,60	161,60	88,60	122,90	141,30	91,10	111,80
6	109,90	124,10	109,20	150,00	99,40	127,30	136,30	92,00	101,90
7	109,90	112,60	104,00	123,50	133,30	135,20	64,50	111,90	102,00
8	109,90	112,90	96,20	96,40	153,20	149,30	159,20	85,10	111,80
9	109,90	162,30	72,30	70,30	128,60	186,20	53,00	75,00	111,10
10	109,90	100,90	102,50	109,80	139,30	143,60	113,90	113,50	106,70
11	109,90	118,30	107,10	140,60	80,40	157,60	140,40	133,00	96,70
12	109,90	145,10	90,50	113,20	150,50	137,90	80,50	122,90	92,40
Média	109,90	121,11	102,87	125,29	131,18	140,87	105,95	102,63	103,48
$\sigma$	0,00	19,13	14,12	33,80	38,80	23,80	37,47	16,66	7,15
Real	110,00	122,00	105,00	133,00	130,00	129,00	121,00	83,00	107,00
Erro	0,09%	0,73%	2,03%	5,80%	0,91%	9,20%	12,44%	23,65%	3,29%
Erro médio por tubo									6,46%

A tabela 4.11 apresenta as médias das calibrações dos dois cenários. Estes coeficientes de rugosidades foram aplicados á rede em ambos os cenários para a determinação da diferença entre as pressões reais e calibradas.

TABELA 4.11 – Média dos coeficientes médios obtidos dos dois cenários calibrados pelo MIGHA-O.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo - C de Hazen-Williams ( $m^{0.3676}/s$ )								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
MÉDIA CENÁRIO 1	109,90	132,92	109,87	134,30	128,26	118,21	108,53	98,03	96,45
MÉDIA CENÁRIO 2	109,90	121,11	102,87	125,29	131,18	140,87	105,95	102,63	103,48
<b>MÉDIA</b>	<b>109,90</b>	<b>127,01</b>	<b>106,37</b>	<b>129,80</b>	<b>129,72</b>	<b>129,54</b>	<b>107,24</b>	<b>100,33</b>	<b>99,97</b>
Erro	0,09%	4,11%	1,30%	2,41%	0,21%	0,42%	11,37%	20,88%	6,57%
							Erro médio por tubo		5,26%

A tabela 4.12 e a figura 4.1 apresentam, para o cenário 1, um comparativo das diferenças de pressões reais e simuladas entre os dois tipos de calibração: calibração na rede calculada e calibração nas redes observada e calculada.

TABELA 4.12 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando o MIGHA-C, MIGHA-M e MIGHA-O para o cenário 1.

Nó	MIGHA C			MIGHA M			MIGHA O		
	Pressão (m)			Pressão (m)			Pressão (m)		
	observada	calculada	diferença	observada	calculada	diferença	observada	calculada	diferença
1	20,57	20,57	0,00	20,57	20,57	0,00	20,57	20,57	0,00
2	12,37	11,26	1,11	12,37	11,14	1,23	12,37	12,80	0,43
3	8,07	8,00	0,07	8,07	8,12	0,05	8,07	8,67	0,60
4	6,05	5,96	0,09	6,05	6,25	0,20	6,05	6,67	0,62
5	18,02	18,84	0,82	18,02	18,45	0,43	18,02	18,66	0,64
6	16,14	15,80	0,34	16,14	15,93	0,21	16,14	15,64	0,50
7	7,71	7,64	0,07	7,71	7,78	0,07	7,71	8,32	0,61

## Cenário 1

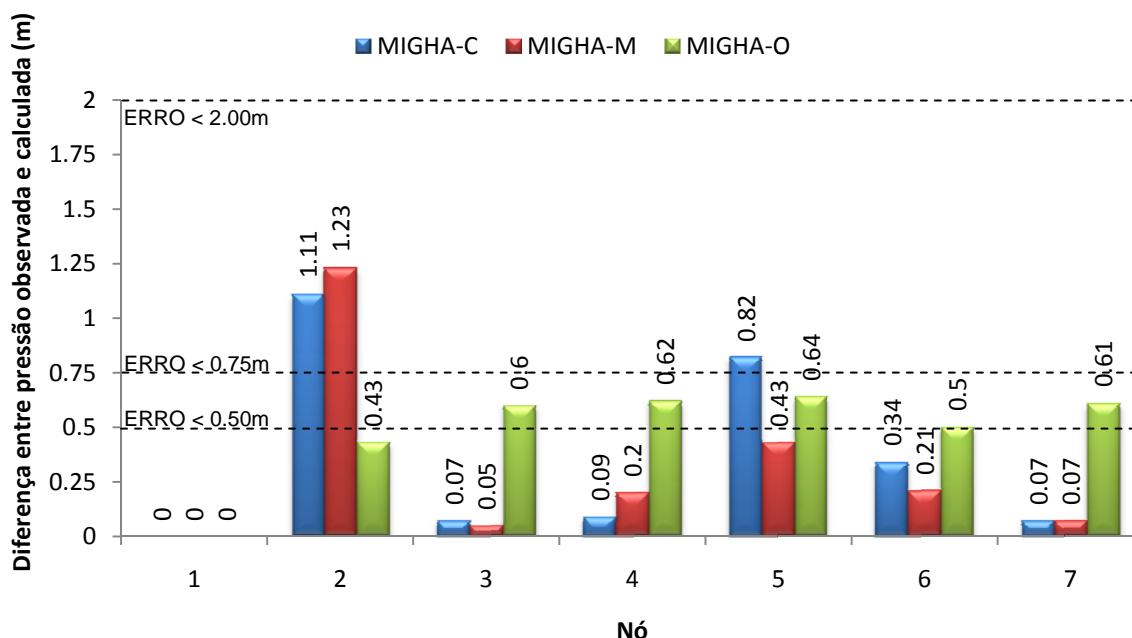


FIGURA 4.1 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando MIGHA-C, MIGHA-M e MIGHA-O para o cenário 1.

A tabela 4.13 e a figura 4.2 apresentam, para o cenário 2, um comparativo das diferenças de pressões reais e simuladas entre os dois tipos de calibração: calibração na rede calculada e calibração nas redes observada e calculada.

TABELA 4.13 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados utilizando o MIGHA-C, MIGHA-M e MIGHA-O para o cenário 2.

Nó	MIGHA C			MIGHA M			MIGHA O		
	Pressão (m)			Pressão (m)			Pressão (m)		
	observada	calculada	diferença	observada	calculada	diferença	observada	calculada	diferença
1	19,53	19,53	0,00	19,53	19,53	0,00	19,53	19,53	0,00
2	13,09	12,88	0,21	13,09	12,69	0,40	13,09	13,34	0,25
3	6,71	7,63	0,92	6,71	7,68	0,97	6,71	7,10	0,39
4	4,95	5,00	0,05	4,95	5,49	0,54	4,95	5,21	0,26
5	15,57	15,73	0,16	15,57	15,61	0,04	15,57	15,71	0,14
6	12,84	12,22	0,62	12,84	12,51	0,33	12,84	12,09	0,75
7	4,95	5,29	0,34	4,95	5,30	0,35	4,95	5,24	0,29

## Cenário 2

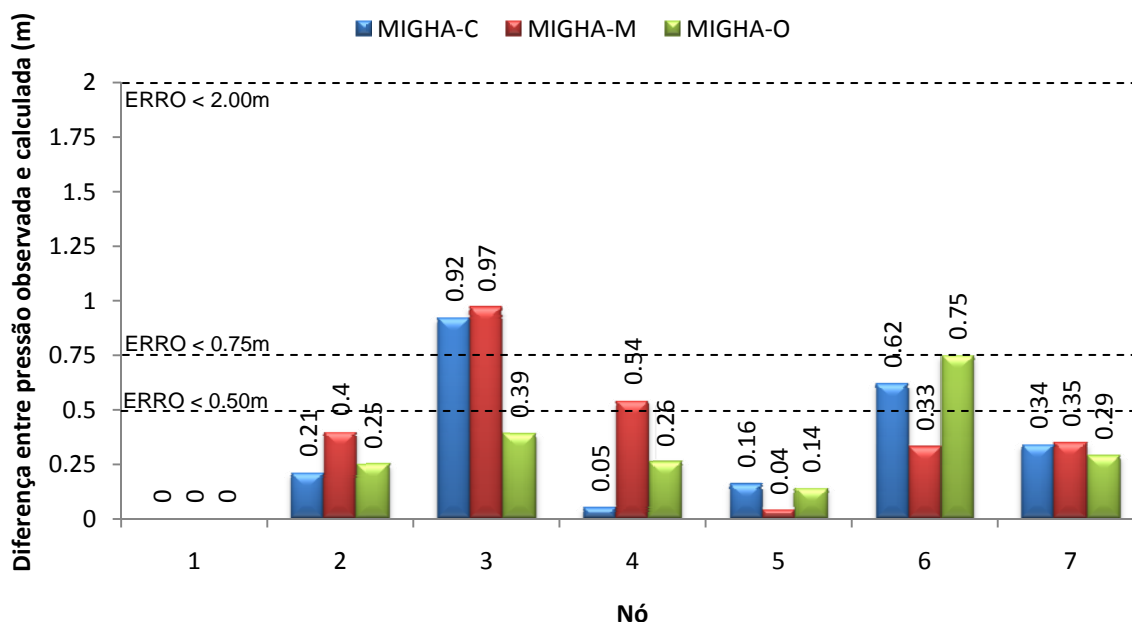


FIGURA 4.2 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando MIGHA-C, MIGHA-M e MIGHA-O para o cenário 2.

#### 4.1.1. Análise comparativa das iterações na rede calculada com as iterações nas redes observada e calculada

Pela figura 4.3 nota-se que as rugosidades médias encontradas são mais próximas das observadas quando se utiliza o MIGHA-O para a maioria dos trechos mostrando que este processo é mais preciso quando se pretende aproximar as rugosidades simuladas das observadas.

Observa-se ainda que os desvios padrões foram altos em muitos pontos indicando que há infinitos conjuntos de rugosidades que minimizam a diferença entre as pressões observadas e calculadas e que o método não está livre de mínimos locais. As rugosidades estimadas para os tubos 3,4 e 6 apresentam um desvio padrão bastante elevado nos três métodos adotados, mostrando que esses tubos são pouco sensíveis ao processo de calibração, pois uma variação significativa em suas rugosidades provoca pequenas alterações nos valores de pressão.

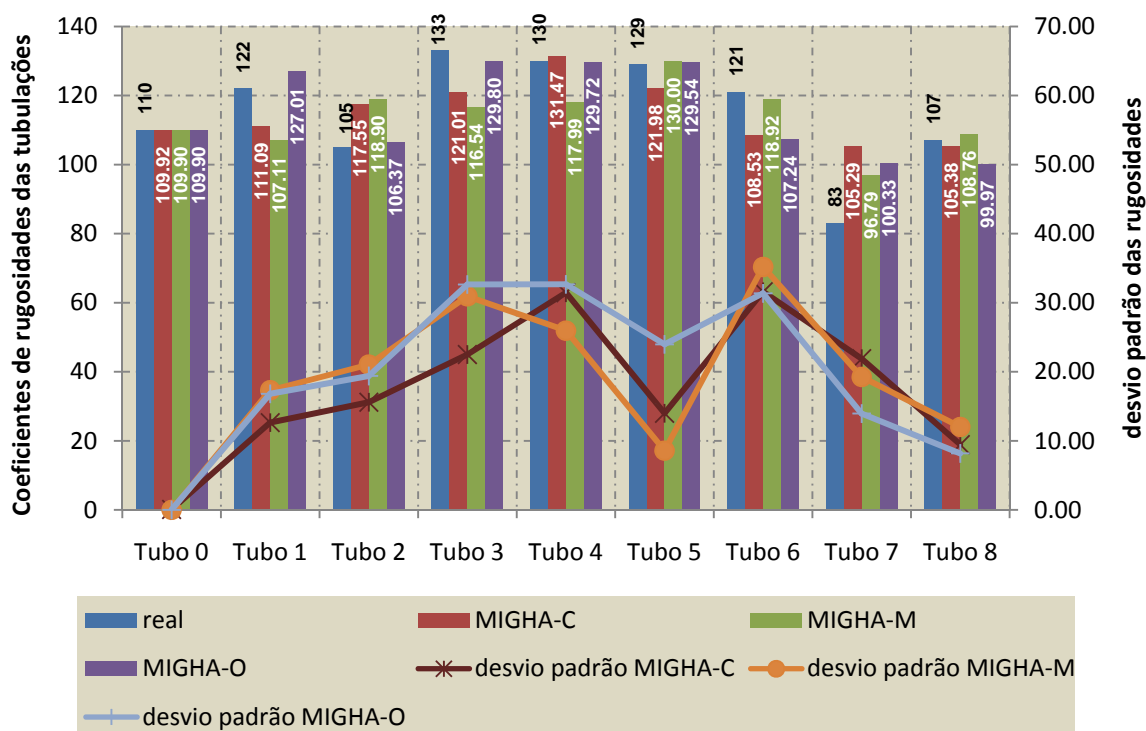


FIGURA 4.3 – Rugosidades médias e desvios padrões utilizando MIGHA-C, MIGHA-M e MIGHA-O.

Deve-se observar que as diferenças entre pressões observadas e simuladas em alguns nós é alta devido ao número de pontos de pressão medidos, uma vez que nem todos os nós têm pressão conhecida.

A avaliação do desempenho de cada processo de calibração é feita a partir da probabilidade das rugosidades apresentarem erro menor que 5%. As probabilidades estão ilustradas na figura 4.4.

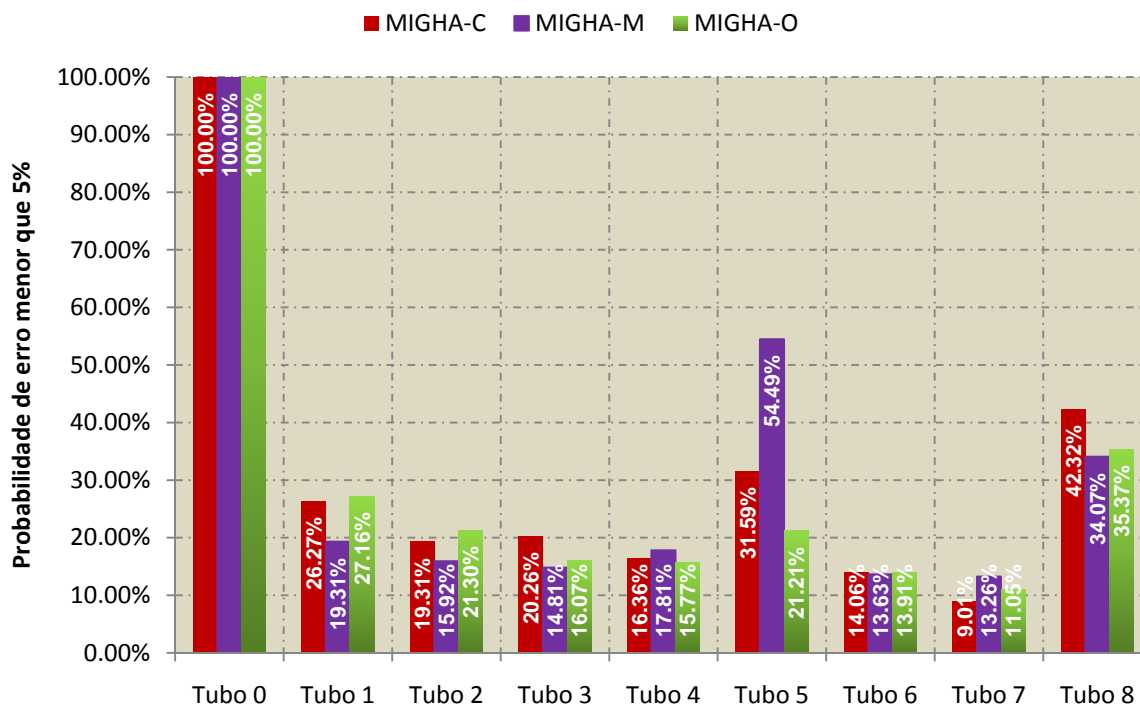


FIGURA 4.4 – Probabilidade de coeficiente de *Hazen-Williams* com erro menor que 5% para MIGHA-C, MIGHA-M e MIGHA-O.

## 4.2. Influência do número de pontos de pressão medida

O número de pontos dados de pressão, ou seja, o número de nós onde se conhece a pressão real (medida), influencia o resultado da calibração, uma vez que se obtêm valores de rugosidades mais próximos dos reais, bem como pressões calculadas à medida que cresce a quantidade de pontos com pressões medidas.

Para se determinar a influência do número de pontos de pressão conhecidas da rede que será calibrada, realizou-se 12 calibrações, em cada cenário, utilizando-se as pressões medidas em todos os sete nós, em seguida,

foi calculada em cada cenário a média de cada tubo, das rugosidades obtidas das 12 calibrações e calculado o erro médio percentual por tubo.

As 12 calibrações realizadas em cada item foram feitas da seguinte maneira:

- 4 calibrações realizando 100 iterações apenas na rede calculada. O processo de iterações na rede calculada foi denominado, neste trabalho, MIGHA-C;
- 4 calibrações realizando 100 iterações nas redes observada e calculada. O processo de iterações nas redes calculada e observada foi denominado, neste trabalho, MIGHA-O;
- 4 calibrações realizando 100 iterações de forma mista, isto é, a cada 9 iterações apenas na rede calculada era realizada uma iteração com as redes calculada e observada. O processo de iterações mistas foi denominado, neste trabalho, MIGHA-M.

Com as médias das rugosidades dos dois cenários foi feita uma média de acordo com a expressão abaixo:

$$\text{média } n \text{ pontos} = \frac{\text{média cenário 1} + \text{média cenário 2}}{2} \quad (4.4)$$

As rugosidades médias foram aplicadas na rede em ambos os cenários, determinando-se as pressões calculadas e, conseqüentemente, a diferença, em cada trecho, entre as pressões reais e calculadas.

Repetiram-se o processo descrito no parágrafo anterior para quantidades de seis, cinco, quatro, três e dois pontos de pressão medidas, escolhidos alternadamente.

Finalmente, foi mostrada em um gráfico a evolução do erro médio por tubo nos dois cenários à medida da diminuição do número de pontos medidos.

#### 4.2.1. Todos os pontos medidos – sete pontos

As tabelas 4.14 e 4.15 apresentam as amostras de rugosidades obtidas de 12 execuções para os dois cenários, colocando-se pressões medidas (reais) em todos os pontos medidos.

TABELA 4.14 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo programa utilizando sete pontos de pressão medida para o cenário 1.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo - C de Hazen-Williams ( $m^{0,3676}/s$ )									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
MIGHA-C	1	109,90	119,50	104,00	118,40	137,00	130,50	128,10	84,30	108,20
	2	109,90	121,90	105,10	141,40	129,30	128,80	121,60	83,10	107,00
	3	109,90	133,50	105,10	141,90	129,20	128,70	77,80	77,40	101,10
	4	109,90	121,50	104,70	133,10	132,10	129,40	122,00	83,30	107,20
MIGHA-O	5	109,90	106,90	102,00	75,20	151,40	133,70	170,50	90,40	114,60
	6	109,90	124,00	105,00	138,60	130,30	129,00	113,50	82,10	105,90
	7	109,90	118,20	105,10	141,10	129,50	128,80	135,50	84,90	108,90
	8	109,90	132,60	105,70	154,50	125,00	127,80	82,70	77,80	101,60
MIGHA-M	9	109,90	129,80	105,70	155,20	124,80	127,70	93,30	79,20	103,00
	10	109,90	118,20	102,20	79,50	149,90	133,40	128,20	84,90	108,90
	11	109,90	127,80	107,10	184,80	114,90	125,50	104,60	80,20	104,00
	12	109,90	133,20	106,10	163,40	122,10	127,10	81,70	77,60	101,30
Média	109,90	123,93	104,82	135,59	131,29	129,20	113,29	82,10	105,98	
$\sigma$	0,00	7,91	1,48	31,83	10,58	2,38	27,00	3,87	4,01	
Real	110,00	122,00	105,00	133,00	130,00	129,00	121,00	83,00	107,00	
Erro	0,09%	1,58%	0,17%	1,95%	0,99%	0,16%	6,37%	1,08%	0,96%	
Erro médio por tubo									1,48%	

TABELA 4.15 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo programa utilizando sete pontos de pressão medida para o cenário 2.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo - C de Hazen-Williams ( $m^{0,3676}/s$ )									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
MIGHA-C	1	109,90	119,50	103,50	126,70	134,90	132,30	78,20	84,30	107,90
	2	109,80	124,70	108,30	146,60	119,50	122,20	129,30	81,70	106,10
	3	110,00	111,10	93,80	86,90	165,80	152,60	84,10	88,70	111,00
	4	109,90	123,60	107,30	142,70	122,50	124,20	115,50	82,20	106,40
MIGHA-O	5	109,90	119,50	103,50	126,90	134,70	132,20	73,90	84,30	107,90
	6	109,90	132,60	118,30	188,20	87,20	101,00	79,60	77,60	103,10
	7	109,90	106,00	87,90	62,60	184,70	165,00	84,70	91,30	112,90
	8	109,90	132,20	116,10	179,00	94,30	105,70	160,60	77,80	103,20
MIGHA-M	9	109,90	114,80	97,10	100,40	155,30	145,70	121,40	86,80	109,70
	10	109,90	122,00	106,10	137,50	126,50	126,80	87,80	83,00	107,00
	11	109,90	125,90	108,60	148,00	118,40	121,50	178,20	81,00	105,60
	12	109,90	120,10	102,00	120,60	139,60	135,40	179,10	84,00	107,70
Média	109,90	121,00	104,38	130,51	131,95	130,38	114,37	83,56	107,38	
$\sigma$	0,04	7,82	8,63	35,66	27,68	18,16	39,70	4,03	2,88	
Real	110,00	122,00	105,00	133,00	130,00	129,00	121,00	83,00	107,00	
Erro	0,09%	0,82%	0,60%	1,87%	1,50%	1,07%	5,48%	0,67%	0,35%	
Erro médio por tubo									1,38%	

A tabela 4.16 apresenta a média dos coeficientes de rugosidade obtidos dos dois cenários.

TABELA 4.16 – Média dos coeficientes médios obtidos dos dois cenários com sete pontos de pressão medidos

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo - C de Hazen-Williams ( $m^{0,3676}/s$ )								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
MÉDIA CENÁRIO 1	109,90	123,93	104,82	135,59	131,29	129,20	113,29	82,10	105,98
MÉDIA CENÁRIO 2	109,90	121,00	104,38	130,51	131,95	130,38	114,37	83,56	107,38
<b>MÉDIA 7 PONTOS</b>	<b>109,90</b>	<b>122,46</b>	<b>104,60</b>	<b>133,05</b>	<b>131,62</b>	<b>129,79</b>	<b>113,83</b>	<b>82,83</b>	<b>106,68</b>
REAL	110,00	122,00	105,00	133,00	130,00	129,00	121,00	83,00	107,00
$\sigma$	0,03	7,83	6,06	33,16	20,49	12,68	33,21	3,94	3,49
Erro	0,09%	0,38%	0,38%	0,04%	1,25%	0,61%	5,93%	0,21%	0,30%
								Erro médio por tubo	1,02%

Os dados da tabela 4.17 e da figura 4.5 permitem que se considere o sistema calibrado, pois as diferenças entre as pressões observadas e pressões simuladas com a média das rugosidades calibradas estão dentro dos limites definidos no capítulo três.

TABELA 4.17 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando sete pontos de pressão medida para os cenários 1 e 2.

Nó	Cenário de demanda 1			Cenário de demanda 2		
	Pressão (m)			Pressão (m)		
	observada	calculada	diferença	observada	calculada	diferença
1	20,57	20,57	0,00	19,53	19,53	0,00
2	12,37	12,30	0,07	13,09	13,09	0,00
3	8,07	8,02	0,05	6,71	6,70	0,01
4	6,05	6,03	0,02	4,95	4,94	0,01
5	18,02	18,05	0,03	15,57	15,55	0,02
6	16,14	16,14	0,00	12,84	12,82	0,02
7	7,71	7,68	0,03	4,95	4,96	0,01

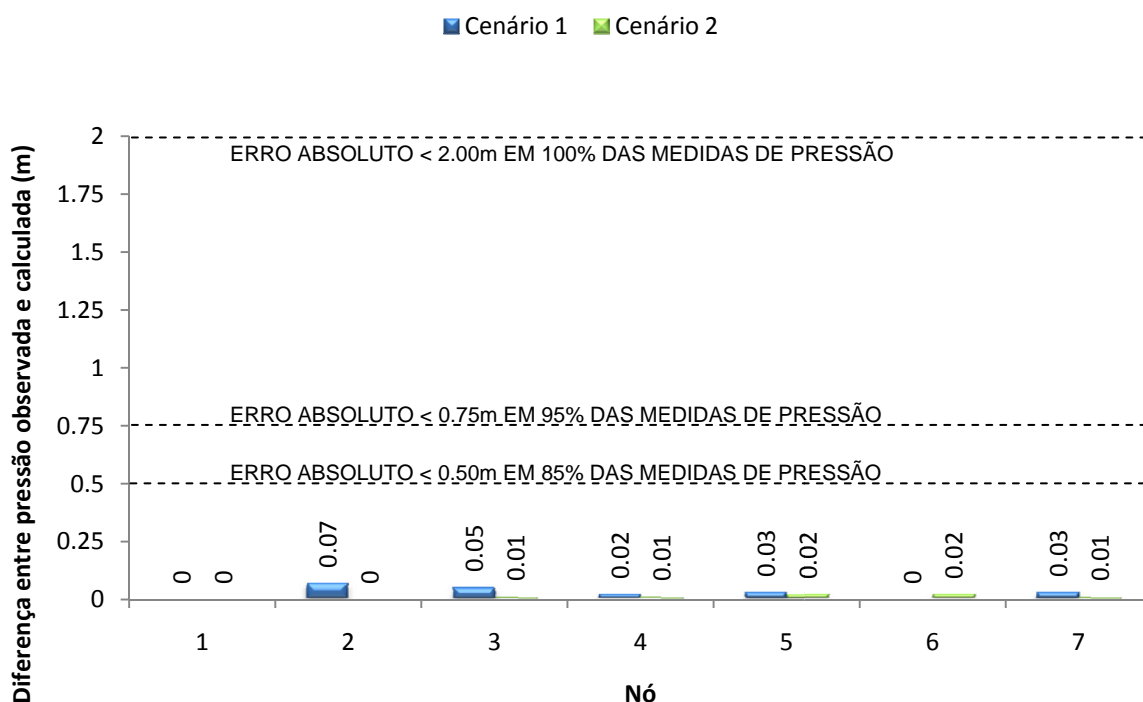


FIGURA 4.5 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando sete pontos de pressão medida para os cenários 1 e 2.

#### 4.2.2. Seis pontos medidos

As tabelas 4.18 e 4.19 apresentam as amostras de rugosidades obtidas de 12 execuções para os dois cenários, colocando-se pressões medidas (reais) em seis pontos medidos.

TABELA 4.18 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo programa utilizando seis pontos de pressão medida para o cenário 1.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo - C de Hazen-Williams ( $m^{0,3676}/s$ )									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
MIGHA-C	1	109,90	117,20	101,00	116,10	153,90	134,90	129,80	85,30	109,50
	2	110,00	120,80	98,90	133,00	168,00	138,20	110,90	83,50	107,70
	3	109,90	124,20	99,80	116,50	161,90	136,80	100,40	81,80	106,00
	4	109,90	127,80	106,20	84,90	126,00	128,60	99,70	80,00	104,10
MIGHA-O	5	109,90	130,00	110,90	199,90	89,00	120,00	105,00	79,00	103,00
	6	109,90	119,00	103,20	130,00	139,60	131,70	128,30	84,40	108,00
	7	109,90	133,80	102,10	107,70	147,00	133,40	69,50	77,10	101,00
	8	109,90	123,10	101,20	98,60	152,70	134,70	108,00	82,40	106,50
MIGHA-M	9	109,90	140,60	127,60	62,00	65,30	114,60	73,30	73,80	97,60
	10	109,90	134,60	121,40	68,50	150,20	119,10	89,10	76,70	100,70
	11	109,90	115,60	125,20	62,40	70,20	115,70	166,20	86,00	110,30
	12	109,90	128,50	110,60	107,20	99,90	122,60	106,70	79,70	103,80
Média	109,91	125,51	107,88	110,75	124,86	128,29	108,89	81,18	105,29	
$\sigma$	0,03	7,66	10,31	38,21	36,42	8,62	26,04	3,76	3,89	
Real	110,00	122,00	105,00	133,00	130,00	129,00	121,00	83,00	107,00	
Erro	0,08%	2,88%	2,74%	16,73%	3,95%	0,55%	10,01%	2,19%	1,60%	
									Erro médio por tubo	4,53%

TABELA 4.19 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo programa utilizando seis pontos de pressão medida para o cenário 2.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo - C de Hazen-Williams ( $m^{0,3676}/s$ )									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
MIGHA-C	1	110,00	122,50	104,80	132,00	121,80	132,50	178,90	82,80	106,80
	2	110,00	122,40	105,20	133,70	120,50	131,60	154,40	82,90	106,80
	3	109,90	119,80	102,10	121,00	150,90	132,50	156,10	84,20	107,80
	4	109,90	110,80	93,40	85,20	163,30	154,50	88,20	88,90	111,20
MIGHA-O	5	109,90	118,90	100,50	114,60	125,40	145,20	181,10	84,60	108,20
	6	109,90	109,50	91,80	78,50	138,50	170,20	88,50	89,50	111,70
	7	109,90	109,80	92,40	81,00	138,30	168,10	75,10	89,40	111,60
	8	109,90	117,70	101,30	117,80	151,50	134,50	79,60	85,30	108,60
MIGHA-M	9	109,90	123,10	107,50	143,50	148,40	118,40	76,20	82,50	106,60
	10	109,90	111,30	94,10	88,20	144,10	158,90	76,40	88,60	111,00
	11	109,90	122,00	106,00	137,30	129,60	126,10	90,90	83,00	107,00
	12	109,90	117,40	99,70	111,30	189,20	132,80	139,00	85,40	108,70
Média	109,92	117,10	99,90	112,01	143,46	142,11	115,37	85,59	108,83	
$\sigma$	0,04	5,33	5,66	23,34	19,53	16,97	42,76	2,77	2,01	
Real	110,00	122,00	105,00	133,00	130,00	129,00	121,00	83,00	107,00	
Erro	0,08%	4,02%	4,86%	15,78%	10,35%	10,16%	4,66%	3,12%	1,71%	
									Erro total	54,74%
									Erro médio por tubo	6,08%

A tabela 4.20 apresenta a média dos coeficientes de rugosidade obtidos dos dois cenários.

TABELA 4.15 – Média dos coeficientes médios obtidos dos dois cenários com seis pontos de pressão medidos

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo - C de Hazen-Williams ( $m^{0,3676}/s$ )								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
MÉDIA CENÁRIO 1	109,91	125,51	107,88	110,75	124,86	128,29	108,89	81,18	105,29
MÉDIA CENÁRIO 2	109,92	117,10	99,90	112,01	143,46	142,11	115,37	85,59	108,83
<b>MÉDIA 6 PONTOS</b>	<b>109,91</b>	<b>121,30</b>	<b>103,89</b>	<b>111,38</b>	<b>134,16</b>	<b>135,20</b>	<b>112,13</b>	<b>83,39</b>	<b>107,06</b>
REAL	110,00	122,00	105,00	133,00	130,00	129,00	121,00	83,00	107,00
$\sigma$	0,03	7,65	8,84	30,47	30,29	15,08	35,32	3,89	3,46
Erro	0,08%	0,57%	1,06%	16,25%	3,20%	4,81%	7,33%	0,47%	0,06%
Erro médio por tubo									3,76%

Os dados da tabela 4.21 e da figura 4.6 apresentam a diferença entre as pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando seis pontos de pressão medida para os cenários 1 e 2.

TABELA 4.21 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando seis pontos de pressão medida para os cenários 1 e 2.

Nó	Cenário de demanda 1			Cenário de demanda 2		
	Pressão (m)			Pressão (m)		
	observada	calculada	diferença	observada	calculada	diferença
1	20,57	20,57	0,00	19,53	19,53	0,00
2	12,37	12,28	0,09	13,09	13,10	0,01
3	8,07	8,15	0,08	6,71	6,92	0,21
4	6,05	6,24	0,19	4,95	4,99	0,04
5	18,02	18,04	0,02	15,57	15,54	0,03
6	16,14	16,13	0,01	12,84	12,81	0,03
7	7,71	7,83	0,12	4,95	4,88	0,07

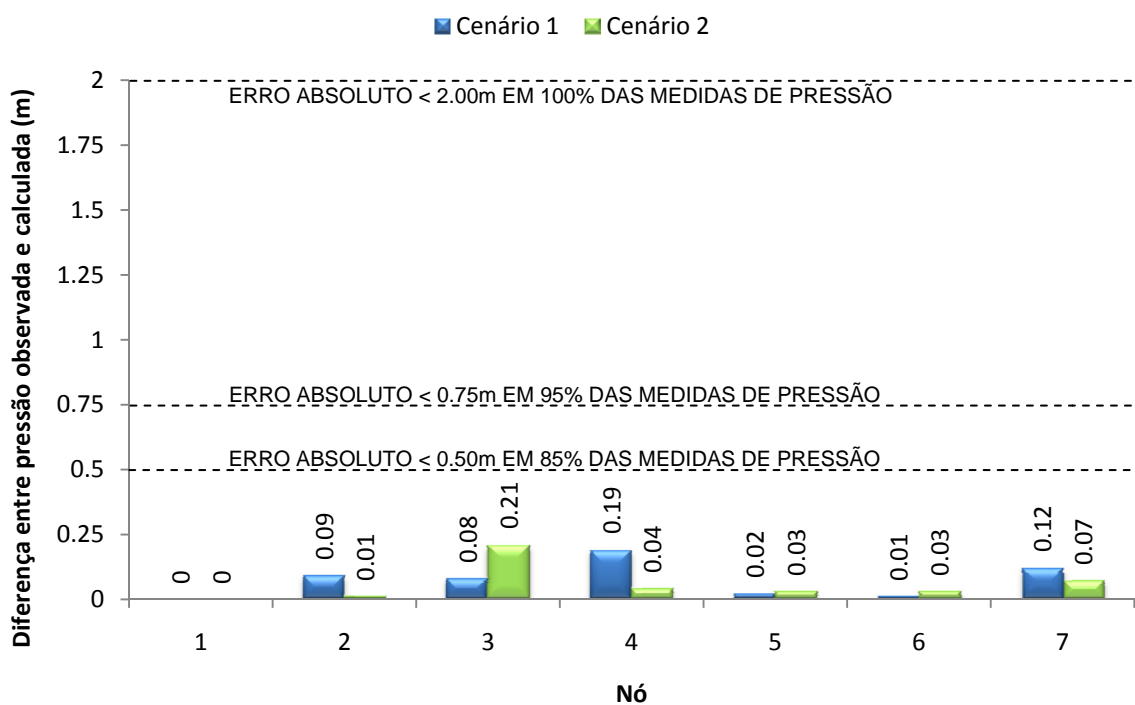


FIGURA 4.6 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando seis pontos de pressão medida para os cenários 1 e 2.

### 4.2.3. Cinco pontos medidos

As tabelas 4.22 e 4.23 apresentam as amostras de rugosidades obtidas de 12 execuções para os dois cenários, colocando-se pressões medidas (reais) em cinco pontos medidos.

TABELA 4.22 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo programa utilizando cinco pontos de pressão medida para o cenário 1.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo - C de Hazen-Williams ( $m^{0,3676}/s$ )									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
MIGHA-C	1	109,90	119,00	116,70	80,40	83,40	118,40	149,00	101,10	97,00
	2	109,90	126,50	119,70	73,60	77,20	117,00	123,10	87,90	98,60
	3	110,00	130,0	128,80	68,80	128,30	114,20	113,80	114,50	85,60
	4	50,00	139,70	116,90	81,30	82,40	118,20	71,30	107,70	81,60
MIGHA-O	5	109,90	123,00	99,30	130,50	167,40	137,30	104,00	100,00	94,60
	6	109,90	129,60	111,60	136,20	91,70	120,20	105,90	79,20	103,20
	7	109,90	114,70	100,10	142,00	161,80	136,10	137,20	141,90	89,30
	8	109,90	121,80	100,40	85,00	160,60	135,80	111,10	132,80	86,90
MIGHA-M	9	109,90	130,30	107,50	82,40	121,80	127,10	92,70	84,80	97,60
	10	109,90	140,30	114,50	143,20	74,30	116,30	71,80	79,50	92,80
	11	109,90	152,80	100,00	90,00	125,00	121,00	170,80	89,70	78,30
	12	109,90	127,70	119,40	80,10	74,00	116,30	119,40	90,30	96,10
Média	109,90	125,88	109,91	105,93	112,47	124,94	112,69	99,72	95,12	
$\sigma$	17,29	10,48	9,74	29,08	36,46	8,61	29,13	20,28	7,50	
Real	110,00	122,00	105,00	133,00	130,00	129,00	121,00	83,00	107,00	
Erro	0,09%	3,18%	4,68%	20,35%	13,49%	3,14%	6,87%	20,15%	11,10%	
									Erro médio por tubo	9,23%

TABELA 4.23 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo programa utilizando cinco pontos de pressão medida para o cenário 2.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo - C de Hazen-Williams ( $m^{0,3676}/s$ )									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
MIGHA-C	1	109,90	122,10	110,90	116,40	125,40	126,10	76,90	86,50	105,30
	2	109,90	117,00	104,80	96,20	144,20	138,40	78,00	79,00	113,00
	3	109,90	130,00	120,40	147,90	96,30	107,00	75,40	85,20	101,10
	4	109,90	119,00	118,80	80,70	136,80	133,60	77,90	86,80	107,00
MIGHA-O	5	109,90	114,20	95,40	119,00	153,50	144,50	65,20	92,30	107,50
	6	109,90	110,90	99,70	68,40	165,80	152,60	68,30	103,00	105,60
	7	109,90	119,70	115,70	88,60	134,20	131,90	77,60	109,50	99,60
	8	109,90	126,10	133,50	95,50	111,00	116,70	82,10	150,10	92,20
MIGHA-M	9	109,90	123,70	134,60	78,50	125,80	126,40	165,90	66,80	119,60
	10	105,00	115,10	124,60	60,10	151,00	142,90	76,40	89,80	108,00
	11	109,90	113,30	107,10	68,00	157,80	147,40	78,10	90,80	108,70
	12	109,90	126,70	123,60	113,10	108,80	115,20	79,20	83,50	103,80
Média	109,90	120,85	116,91	95,33	130,61	129,53	85,94	94,12	105,59	
$\sigma$	1,41	5,99	12,55	25,81	21,50	14,10	26,39	20,80	6,80	
Real	110,00	122,00	105,00	133,00	130,00	129,00	121,00	83,00	107,00	
Erro	0,09%	0,94%	11,34%	28,32%	0,47%	0,41%	28,98%	13,40%	1,32%	
									Erro médio por tubo	9,47%

A tabela 4.24 apresenta a média dos coeficientes de rugosidade obtidos dos dois cenários.

TABELA 4.24 – Média dos coeficientes médios obtidos dos dois cenários com cinco pontos de pressão medidos

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo - C de Hazen-Williams ( $m^{0,3676}/s$ )								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
MÉDIA CENÁRIO 1	109,90	125,88	109,91	105,93	112,47	124,94	112,69	99,72	95,12
MÉDIA CENÁRIO 2	109,90	120,85	116,91	95,33	130,61	129,53	85,94	94,12	105,59
<b>MÉDIA 5 PONTOS</b>	<b>109,90</b>	<b>123,36</b>	<b>113,41</b>	<b>100,63</b>	<b>121,54</b>	<b>127,24</b>	<b>99,31</b>	<b>96,92</b>	<b>100,36</b>
REAL	110,00	122,00	105,00	133,00	130,00	129,00	121,00	83,00	107,00
$\sigma$	0,00	7,04	10,59	27,53	32,64	12,08	28,75	22,42	8,22
Erro	0,09%	1,12%	8,01%	24,34%	6,51%	1,37%	17,92%	16,77%	6,21%
Erro médio por tubo									9,15%

Os dados da tabela 4.25 e da figura 4.7 apresentam a diferença entre as pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando cinco pontos de pressão medida para os cenários 1 e 2.

TABELA 4.25 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando cinco pontos de pressão medida para os cenários 1 e 2.

Nó	Cenário de demanda 1			Cenário de demanda 2		
	Pressão (m)			Pressão (m)		
	observada	calculada	diferença	observada	calculada	diferença
1	20,57	20,57	0,00	19,53	19,53	0,00
2	12,37	12,13	0,24	13,09	13,08	0,01
3	8,07	8,53	0,46	6,71	7,61	0,90
4	6,05	6,48	0,43	4,95	4,90	0,05
5	18,02	18,56	0,54	15,57	15,52	0,05
6	16,14	15,69	0,45	12,84	12,07	0,77
7	7,71	8,12	0,41	4,95	4,73	0,22

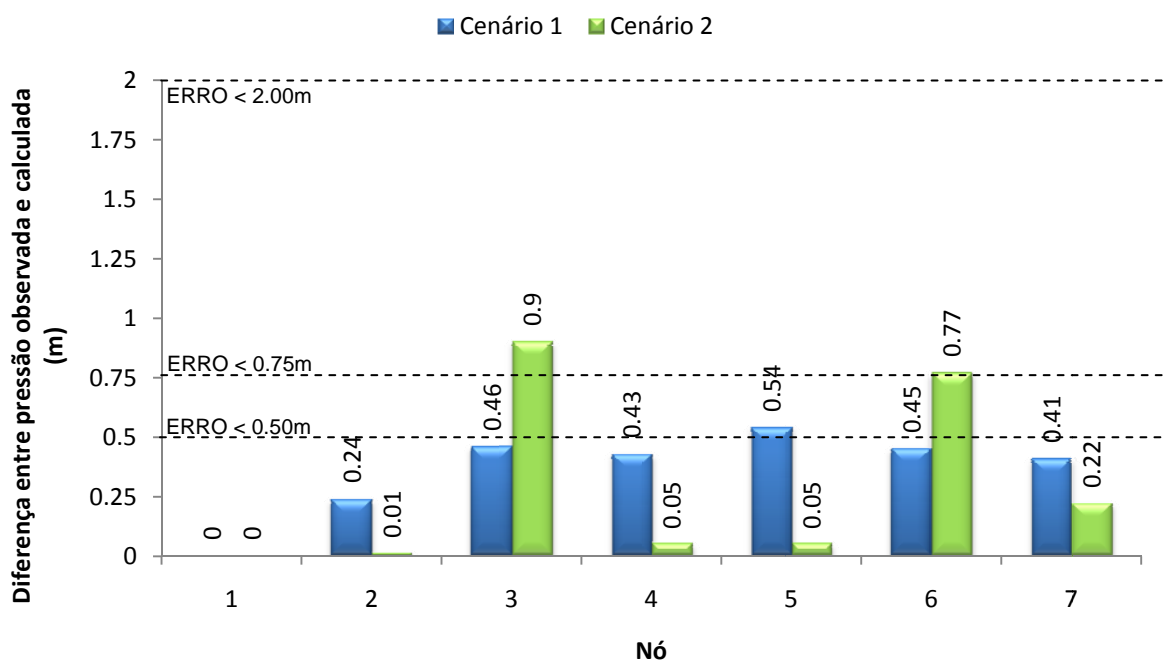


FIGURA 4.7– Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando cinco pontos de pressão medida para os cenários 1 e 2.

#### 4.2.4. Quatro pontos medidos

As tabelas 4.26 e 4.27 apresentam as amostras de rugosidades obtidas de 12 execuções para os dois cenários, colocando-se pressões medidas (reais) em quatro pontos medidos.

TABELA 4.26 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo programa utilizando quatro pontos de pressão medida para o cenário 1.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo - C de Hazen-Williams ( $m^{0,3676}/s$ )									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
MIGHA-C	1	109,90	118,40	115,80	169,30	100,70	123,60	116,50	94,10	98,30
	2	109,90	110,60	144,20	130,10	107,10	125,80	90,90	88,70	101,30
	3	109,90	124,90	106,30	129,30	99,70	124,60	123,10	87,90	100,60
	4	110,00	113,00	125,00	145,50	114,90	126,70	105,90	147,00	85,70
MIGHA-O	5	109,90	124,40	109,00	142,10	83,10	121,20	128,40	71,60	122,60
	6	109,90	90,40	129,10	172,50	170,80	135,90	150,00	93,70	119,20
	7	109,90	116,40	106,80	124,60	124,50	128,80	135,30	100,00	98,80
	8	109,90	135,10	108,10	191,90	102,90	123,60	80,70	90,90	90,10
MIGHA-M	9	109,90	77,40	168,80	106,10	191,20	139,90	150,20	120,50	109,30
	10	109,90	128,20	100,30	188,20	122,00	127,10	129,70	105,20	91,70
	11	109,90	108,50	117,00	82,70	94,70	126,20	139,40	100,40	101,80
	12	109,90	100,00	122,70	85,40	121,00	129,80	144,70	83,70	123,30
Média	109,91	112,28	121,09	138,98	119,38	127,77	124,57	98,64	103,56	
$\sigma$	0,03	16,51	19,32	36,70	31,54	5,35	22,48	19,40	12,57	
Real	110,00	122,00	105,00	133,00	130,00	129,00	121,00	83,00	107,00	
Erro	0,08%	7,97%	15,33%	4,49%	8,17%	0,96%	2,95%	18,85%	3,22%	
Erro médio por tubo									6,89%	

TABELA 4.27 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo programa utilizando quatro pontos de pressão medida para o cenário 2.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo - C de Hazen-Williams ( $m^{0,3676}/s$ )									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
MIGHA-C	1	109,90	129,60	90,70	72,60	126,20	147,50	74,40	69,80	116,60
	2	109,90	151,30	104,50	120,10	90,00	116,70	125,70	138,70	86,30
	3	109,90	127,60	110,90	135,80	98,50	116,30	106,70	82,40	103,90
	4	109,90	102,50	163,30	156,60	67,40	84,70	105,00	110,00	90,60
MIGHA-O	5	109,90	117,60	116,60	130,50	83,60	110,80	83,20	143,50	95,10
	6	109,90	149,70	115,70	148,10	67,20	98,10	120,40	135,50	85,70
	7	109,90	125,70	114,80	151,60	90,90	109,30	68,50	97,60	99,20
	8	109,90	104,60	121,60	182,60	120,00	115,50	83,00	104,80	104,90
MIGHA-M	9	109,90	130,90	112,20	148,60	99,00	113,60	177,50	162,40	89,80
	10	109,90	77,40	111,30	78,00	115,20	141,70	157,60	113,00	117,10
	11	109,90	119,00	101,50	118,60	139,40	135,90	70,00	71,40	118,50
	12	109,90	122,10	89,50	76,20	154,70	153,70	69,80	72,30	118,50
Média	109,90	123,23	108,12	123,88	107,70	123,55	103,35	108,31	103,24	
$\sigma$	0,00	20,24	18,80	35,20	27,35	20,51	36,13	31,32	12,95	
Real	110,00	122,00	105,00	133,00	130,00	129,00	121,00	83,00	107,00	
Erro	0,09%	1,01%	2,97%	6,86%	17,15%	4,22%	14,59%	30,49%	3,52%	
Erro médio por tubo									8,99%	

A tabela 4.28 apresenta a média dos coeficientes de rugosidade obtidos dos dois cenários.

TABELA 4.28 – Média dos coeficientes médios obtidos dos dois cenários com quatro pontos de pressão medidos

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo - C de Hazen-Williams ( $m^{0,3676}/s$ )									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
MÉDIA CENÁRIO 1	109,91	112,28	121,09	138,98	119,38	127,77	124,57	98,64	103,56	
MÉDIA CENÁRIO 2	109,90	123,23	108,12	123,88	107,70	123,55	103,35	108,31	103,24	
<b>MÉDIA 4 PONTOS</b>	<b>109,90</b>	<b>117,75</b>	<b>114,60</b>	<b>131,43</b>	<b>113,54</b>	<b>125,66</b>	<b>113,96</b>	<b>103,48</b>	<b>103,40</b>	
REAL	110,00	122,00	105,00	133,00	130,00	129,00	121,00	83,00	107,00	
$\sigma$	0,02	18,83	16,75	36,17	28,97	12,89	31,98	26,51	12,50	
Erro	0,09%	3,48%	9,15%	1,18%	12,66%	2,59%	5,82%	24,67%	3,37%	
										Erro médio por tubo 7,00%

Os dados da tabela 4.29 e da figura 4.8 apresentam a diferença entre as pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando quatro pontos de pressão medida para os cenários 1 e 2.

TABELA 4.29 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando quatro pontos de pressão medida para os cenários 1 e 2.

Nó	Cenário de demanda 1			Cenário de demanda 2		
	Pressão (m)			Pressão (m)		
	observada	calculada	diferença	observada	calculada	diferença
1	20,57	20,57	0,00	19,53	19,53	0,00
2	12,37	12,07	0,30	13,09	13,14	0,05
3	8,07	8,53	0,46	6,71	7,50	0,79
4	6,05	6,55	0,50	4,95	5,55	0,60
5	18,02	18,77	0,75	15,57	15,74	0,17
6	16,14	15,73	0,41	12,84	12,19	0,65
7	7,71	8,16	0,45	4,95	5,38	0,43

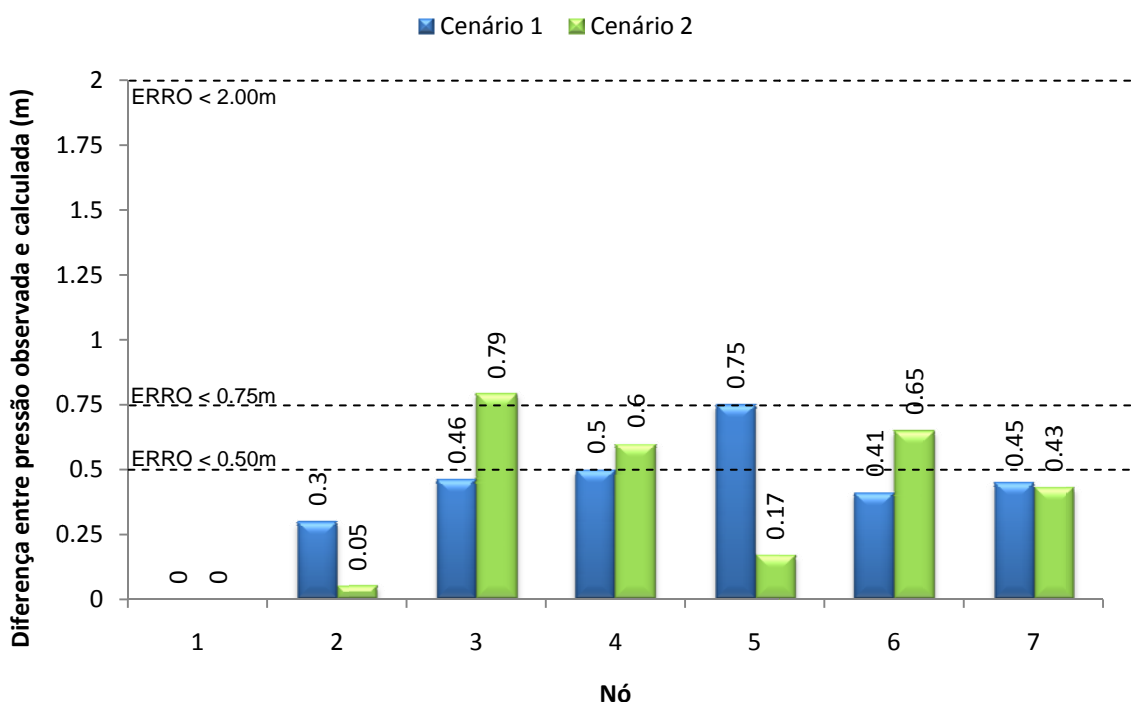


FIGURA 4.8 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando quatro pontos de pressão medida para os cenários 1 e 2.

#### 4.2.5. Três pontos medidos

As tabelas 4.30 e 4.31 apresentam as amostras de rugosidades obtidas de 12 execuções para os dois cenários, colocando-se pressões medidas (reais) em três pontos medidos.

TABELA 4.30 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo programa utilizando três pontos de pressão medida para o cenário 1.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo - C de Hazen-Williams ( $m^{0,3676}/s$ )									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
MIGHA-C	1	109,90	134,10	117,90	104,90	140,40	111,40	81,50	114,90	81,80
	2	109,90	127,70	127,10	117,80	137,10	108,60	89,80	117,30	83,20
	3	109,90	133,80	119,90	143,60	105,10	109,20	87,30	115,20	82,00
	4	109,90	134,30	105,60	164,80	116,40	135,90	55,00	114,90	81,90
MIGHA-O	5	109,90	153,90	97,40	152,60	180,70	113,90	106,50	91,00	86,00
	6	109,90	153,20	103,90	86,60	121,00	97,70	130,20	89,80	86,60
	7	109,90	144,30	118,80	171,30	103,80	105,40	64,70	87,00	84,60
	8	109,90	147,70	91,10	85,10	160,40	129,00	97,20	97,40	86,80
MIGHA-M	9	109,90	119,70	119,70	145,00	114,10	135,20	76,20	130,70	84,10
	10	109,90	72,20	179,20	86,90	167,20	175,50	129,10	164,10	101,30
	11	109,90	105,70	122,20	127,10	125,30	144,80	98,80	140,70	89,30
	12	109,90	114,20	147,40	66,40	143,80	116,00	85,80	131,40	84,50
Média	109,90	128,40	120,85	121,01	134,61	123,55	91,84	116,20	86,01	
$\sigma$	0,00	23,24	23,59	34,98	24,90	21,73	22,68	23,12	5,33	
Real	110,00	122,00	105,00	133,00	130,00	129,00	121,00	83,00	107,00	
Erro	0,09%	5,25%	15,10%	9,02%	3,54%	4,22%	24,10%	40,00%	19,62%	
Erro médio por tubo									13,44%	

TABELA 4.31 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo programa utilizando três pontos de pressão medida para o cenário 2.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo - C de Hazen-Williams ( $m^{0,3676}/s$ )									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
MIGHA-C	1	109,90	104,30	122,00	142,70	118,90	110,70	80,70	104,7	104,90
	2	109,90	130,60	100,40	62,60	137,90	104,50	93,90	143,30	92,20
	3	109,90	116,80	108,40	70,70	125,10	98,00	67,60	108,20	100,80
	4	109,90	147,00	80,80	85,30	171,10	158,80	87,50	136,20	92,40
MIGHA-O	5	109,90	128,40	106,90	73,20	126,50	98,40	130,20	138,0	92,40
	6	109,90	82,90	124,50	95,20	139,00	104,80	151,30	123,80	110,50
	7	109,90	82,00	111,00	65,30	130,50	133,40	116,40	109,10	115,30
	8	109,90	94,50	106,10	80,60	130,40	133,10	115,40	117,10	108,10
MIGHA-M	9	109,90	116,20	104,30	128,20	134,60	130,50	178,20	91,60	106,50
	10	109,90	99,50	103,70	70,10	118,20	132,60	102,40	99,10	111,40
	11	109,90	72,20	125,10	98,60	121,20	134,90	140,30	110,90	119,00
	12	109,90	77,00	131,50	97,10	78,10	136,40	137,10	87,00	129,50
Média	109,90	104,28	110,39	89,13	127,63	123,01	116,75	114,08	106,92	
$\sigma$	0,00	23,82	13,78	25,05	21,01	19,11	32,22	18,19	11,44	
Real	110,00	122,00	105,00	133,00	130,00	129,00	121,00	83,00	107,00	
Erro	0,09%	14,52%	5,13%	32,98%	1,83%	4,64%	3,51%	37,45%	0,08%	
Erro médio por tubo									11,14%	

A tabela 4.32 apresenta a média dos coeficientes de rugosidade obtidos dos dois cenários.

TABELA 4.32 – Média dos coeficientes médios obtidos dos dois cenários com três pontos de pressão medidos

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo - C de Hazen-Williams ( $m^{0,3676}/s$ )								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
MÉDIA CENÁRIO 1	109,90	128,40	120,85	121,01	134,61	123,55	91,84	116,20	86,01
MÉDIA CENÁRIO 2	109,90	104,28	110,39	89,13	127,63	123,01	116,75	114,08	106,92
<b>MÉDIA 3 PONTOS</b>	<b>109,90</b>	<b>116,34</b>	<b>115,62</b>	<b>105,07</b>	<b>131,12</b>	<b>123,28</b>	<b>104,30</b>	<b>115,14</b>	<b>96,46</b>
REAL	110,00	122,00	105,00	133,00	130,00	129,00	121,00	83,00	107,00
$\sigma$	0,00	26,10	19,63	33,91	22,81	20,01	30,07	20,37	13,79
Erro	0,09%	4,64%	10,12%	21,00%	0,86%	4,43%	13,81%	38,72%	9,85%
Erro médio por tubo									11,50%

Os dados da tabela 4.33 e da figura 4.9 apresentam a diferença entre as pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando três pontos de pressão medida para os cenários 1 e 2.

TABELA 4.33 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando três pontos de pressão medida para os cenários 1 e 2.

Nó	Cenário de demanda 1			Cenário de demanda 2		
	Pressão (m)			Pressão (m)		
	observada	calculada	diferença	observada	calculada	diferença
1	20,57	20,57	0,00	19,53	19,53	0,00
2	12,37	11,58	0,79	13,09	12,68	0,41
3	8,07	8,14	0,07	6,71	7,35	0,64
4	6,05	6,04	0,01	4,95	4,36	0,59
5	18,02	18,63	0,61	15,57	15,20	0,37
6	16,14	15,13	1,01	12,84	11,27	1,57
7	7,71	7,74	0,03	4,95	4,55	0,40

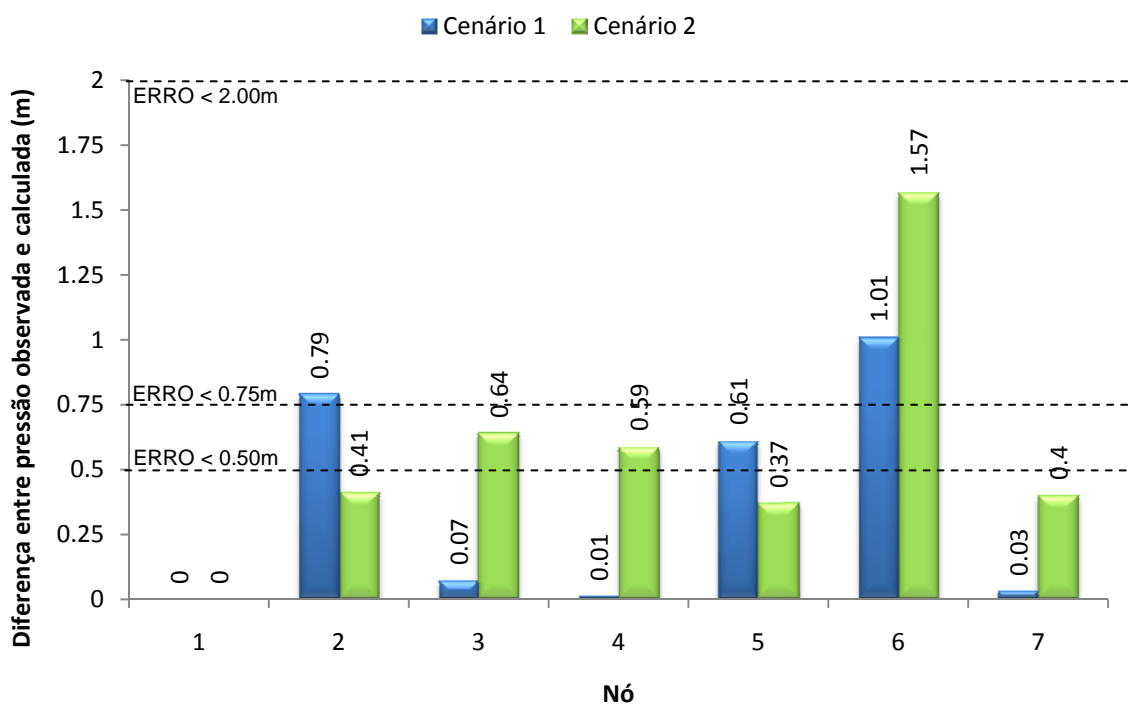


FIGURA 4.9 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando três pontos de pressão medida para os cenários 1 e 2.

#### 4.2.6. Dois pontos medidos

As tabelas 4.34 e 4.35 apresentam as amostras de rugosidades obtidas de 12 execuções para os dois cenários, colocando-se pressões medidas (reais) em dois pontos medidos.

TABELA 4.34 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo programa utilizando dois pontos de pressão medida para o cenário 1.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo - C de Hazen-Williams ( $m^{0,3676}/s$ )									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
MIGHA-C	1	102,10	119,90	106,70	78,50	158,00	109,80	93,80	106,20	153,90
	2	121,30	103,40	107,30	79,00	152,30	119,20	154,20	81,60	152,50
	3	69,80	152,60	113,70	152,30	99,60	127,80	127,20	86,50	116,90
	4	68,50	162,60	75,30	110,00	110,90	194,90	68,30	88,70	86,70
MIGHA-O	5	109,30	118,40	84,10	198,50	69,70	118,30	78,20	120,50	139,00
	6	164,10	107,60	99,90	111,00	117,70	113,70	102,90	105,90	125,10
	7	111,30	114,10	103,80	62,70	144,00	117,40	110,30	106,40	125,20
	8	141,30	112,50	124,90	106,30	114,30	97,60	125,20	100,30	120,30
MIGHA-M	9	150,90	144,80	179,80	89,20	88,50	95,20	93,30	72,20	73,80
	10	120,20	141,30	125,70	149,60	70,50	118,10	103,50	77,20	77,80
	11	118,80	121,10	94,90	110,00	118,80	115,90	68,20	127,80	126,20
	12	131,40	102,60	69,30	64,60	93,90	129,90	86,80	160,70	134,20
Média	117,42	125,08	107,12	109,31	111,52	121,48	100,99	102,83	119,30	
$\sigma$	28,75	20,15	28,88	40,32	29,22	25,29	25,54	24,93	26,78	
Real	110,00	122,00	105,00	133,00	130,00	129,00	121,00	83,00	107,00	
Erro	6,74%	2,52%	2,02%	17,81%	14,22%	5,83%	16,54%	23,90%	11,50%	
Erro médio por tubo									11,23%	

TABELA 4.35 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo programa utilizando dois pontos de pressão medida para o cenário 2.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo - C de Hazen-Williams ( $m^{0,3676}/s$ )									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
MIGHA-C	1	73,10	117,50	115,70	98,50	122,10	114,90	153,70	138,50	178,80
	2	113,40	89,50	113,60	119,00	130,70	112,30	160,80	138,70	119,30
	3	135,10	92,60	115,80	126,40	123,40	100,60	95,00	127,00	122,60
	4	111,60	98,00	94,80	167,20	96,80	106,30	80,50	140,00	130,00
MIGHA-O	5	135,20	103,00	128,80	136,40	114,30	92,80	84,20	90,70	124,10
	6	110,40	103,60	128,40	125,80	115,50	94,10	94,20	131,50	125,10
	7	113,10	107,80	125,60	158,70	84,00	89,80	130,10	112,90	113,80
	8	117,10	104,80	15,10	104,70	88,80	96,70	109,60	97,80	121,50
MIGHA-M	9	98,10	116,10	124,40	154,20	95,80	88,90	79,50	134,50	127,00
	10	140,10	92,00	124,30	121,80	98,00	89,50	99,30	133,10	126,10
	11	113,60	104,10	115,80	135,70	124,50	104,70	86,60	120,40	118,80
	12	104,30	103,40	135,20	137,00	188,20	90,90	90,30	91,50	171,00
Média	113,76	102,70	111,46	132,12	115,18	98,46	105,32	121,38	131,51	
$\sigma$	18,15	8,77	32,06	20,70	27,72	9,17	28,00	18,70	20,77	
Real	110,00	122,00	105,00	133,00	130,00	129,00	121,00	83,00	107,00	
Erro	3,42%	15,82%	6,15%	0,66%	11,40%	23,68%	12,96%	46,24%	22,90%	
Erro médio por tubo									15,92%	

A tabela 4.36 apresenta a média dos coeficientes de rugosidade obtidos dos dois cenários.

TABELA 4.36 – Média dos coeficientes médios obtidos dos dois cenários com dois pontos de pressão medidos

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo - C de Hazen-Williams ( $m^{0,3676}/s$ )								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
MÉDIA CENÁRIO 1	117,42	125,08	107,12	109,31	111,52	121,48	100,99	102,83	119,30
MÉDIA CENÁRIO 2	113,76	102,70	111,46	132,12	115,18	98,46	105,32	121,38	131,51
<b>MÉDIA 2 PONTOS</b>	<b>115,59</b>	<b>113,89</b>	<b>109,29</b>	<b>120,71</b>	<b>113,35</b>	<b>109,97</b>	<b>103,15</b>	<b>112,11</b>	<b>125,40</b>
REAL	110,00	122,00	105,00	133,00	130,00	129,00	121,00	83,00	107,00
$\sigma$	23,59	19,01	29,92	33,44	27,92	22,01	26,30	23,54	24,25
Erro	5,08%	6,65%	4,08%	9,24%	12,81%	14,75%	14,75%	35,07%	17,20%
								Erro médio por tubo	13,29%

Os dados da tabela 4.37 e da figura 4.10 apresentam a diferença entre as pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando dois pontos de pressão medida para os cenários 1 e 2.

TABELA 4.37 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando dois pontos de pressão medida para os cenários 1 e 2.

Nó	Cenário de demanda 1			Cenário de demanda 2		
	Pressão (m)			Pressão (m)		
	observada	calculada	diferença	observada	calculada	diferença
1	20,57	20,75	0,18	19,53	19,80	0,27
2	12,37	12,10	0,27	13,09	14,44	1,35
3	8,07	8,06	0,01	6,71	8,15	1,44
4	6,05	6,04	0,01	4,95	5,88	0,93
5	18,02	20,58	2,56	15,57	17,93	2,36
6	16,14	17,28	1,14	12,84	14,31	1,47
7	7,71	7,67	0,04	4,95	5,71	0,76

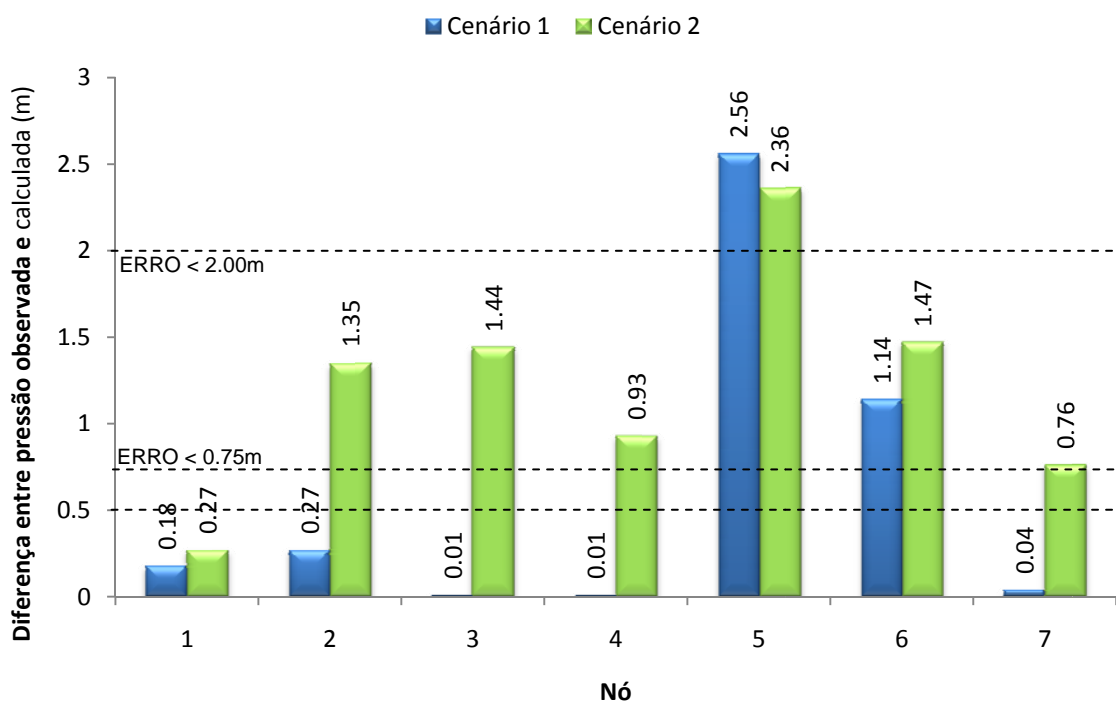


FIGURA 4.10 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando dois pontos de pressão medida para os cenários 1 e 2.

#### 4.2.7. Análise comparativa da influência do número de pontos de pressão medida

A precisão do processo de calibração depende da quantidade de dados conhecidos. O erro absoluto das diferenças entre as pressões observadas e simuladas aumenta à medida que diminuem as pressões conhecidas. Observa-se que os erros absolutos estão dentro dos limites de tolerância definidos pelo WATER RESEARCH CENTRE (1989) com sete, seis e cinco pressões medidas, indicando que, ao utilizar o MIGHA, se deve ter uma quantidade mínima de 71,4% de pressões conhecidas.

A figura 4.11 apresenta os coeficientes de rugosidade médios dos trechos de acordo com o número de pressões medidas.

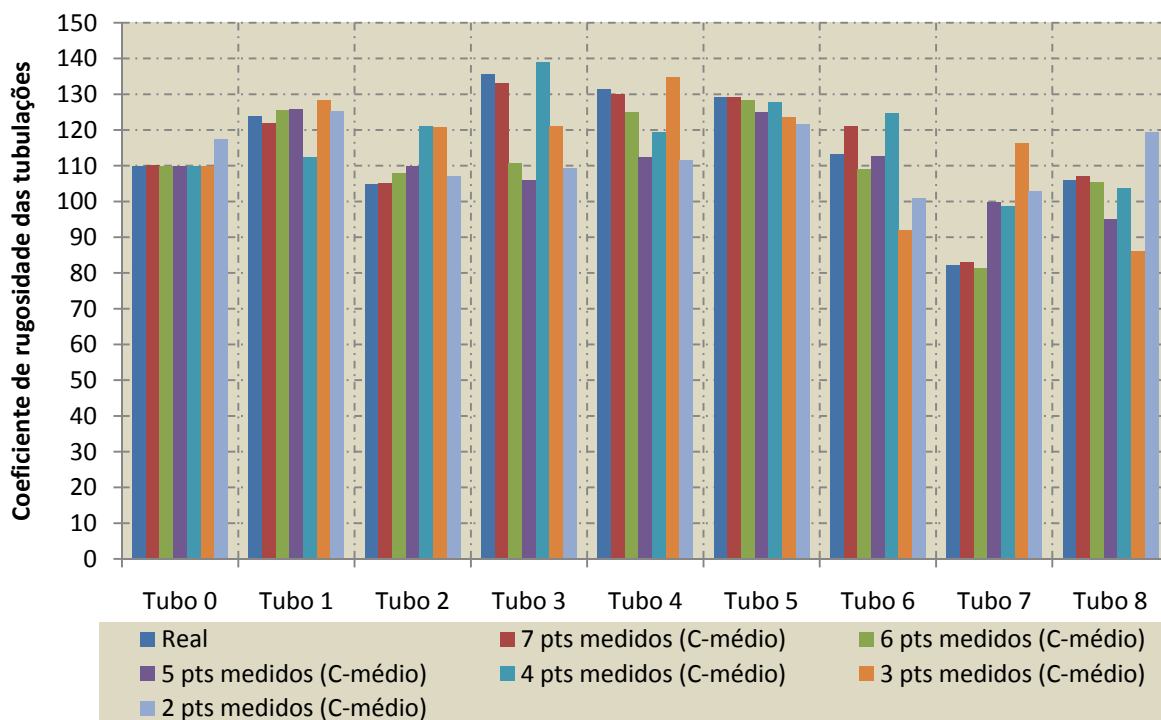


FIGURA 4.11 – Rugosidades médias de acordo com o número de pressões medidas.

A figura 4.12 evidencia os melhores resultados com no mínimo cinco pressões medidas, já que as probabilidades de acertos são maiores nesses casos.

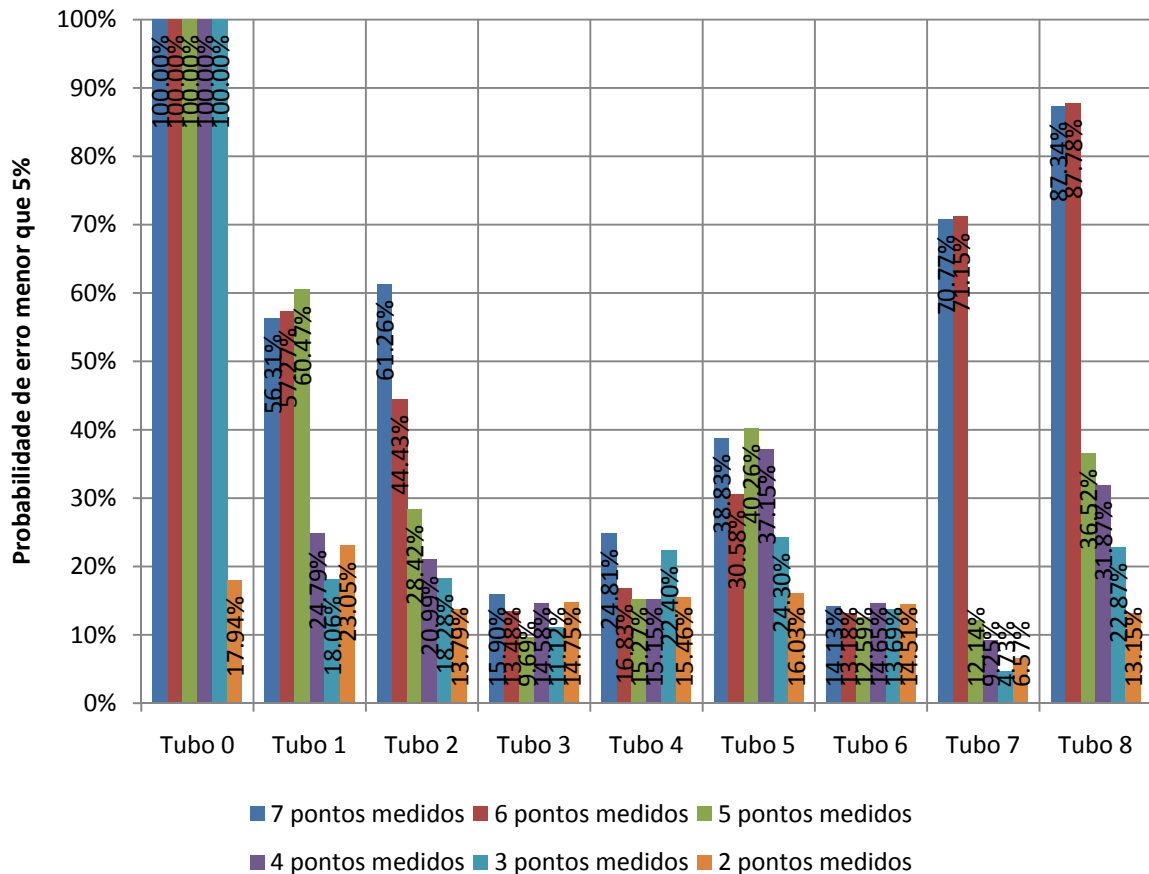


FIGURA 4.12 – Probabilidade de coeficiente de *Hazen-Williams* com erro menor que 5% para redes com sete, seis, cinco, quatro, três e dois pontos de pressão medida.

### 4.3. Influência dos dados de medidas de vazão

Visando um melhor conhecimento da calibração pelo MIGHA, este item pretende investigar a influência que dados de medidas de vazão de alguns trechos podem ter nos resultados finais do processo.

O MIGHA propõe que todas as rugosidades sejam modificadas, a cada iteração através da equação 2.26.

Neste item, propomos, em substituição à equação anterior, que algumas rugosidades sejam implementadas, a cada iteração, através da fórmula da perda de carga de *Hazen-Williams* aplicada de forma a isolar o coeficiente de rugosidade em função dos demais termos que são: vazão medida, diâmetro e perda de carga unitária.

A fórmula da perda de carga de *Hazen-Williams* utilizada para a implementação do coeficiente de rugosidade, dada a vazão medida está expressa na equação 4.1.

$$C = \left[ \frac{10,65 \left( \frac{Q}{1000} \right)^{1,85} D^{-4,87}}{J} \right]^{1/1,85} \quad (4.5)$$

Onde  $C$  é o coeficiente de rugosidade, em  $m^{0,3676}/s$ ;  $Q$  é a vazão medida do trecho, em l/s;  $D$  é o diâmetro da tubulação, em m; e  $J$  é a perda de carga unitária, em m/m.

Para se determinar a influência da vazão, realizaram-se, em cada cenário, 12 calibrações *com* e *sem* utilização dos dados de vazão medida, de acordo com os seguintes parâmetros:

- 4 calibrações realizando 100 iterações pelo MIGHA-C;
- 4 calibrações realizando 100 iterações pelo MIGHA-O;
- 4 calibrações realizando 100 iterações pelo MIGHA-M;
- Para cada calibração *com* e *sem* vazão foi utilizado o mesmo conjunto inicial de rugosidades.

Calibrações sem medida de vazão:

- Número de nós com pressão medida: 4;

Calibrações com medida de vazão:

- Número de nós com pressão medida: 3;
- Número de nós com vazão medida: 1;

Após as calibrações, foi calculado o erro médio percentual por tubo para cada teste (*com* ou *sem* vazão).

As rugosidades médias foram aplicadas na rede, determinando-se as pressões calculadas e, conseqüentemente, a diferença, em cada trecho, entre as pressões reais e as calculadas.

Finalmente, foi feita uma análise comparativa entre os testes.

As tabelas 4.38 e 4.39 apresentam as amostras de rugosidades obtidas de 12 execuções para os dois cenários. As execuções foram realizadas sem a utilização da equação 4.1 para implementação das rugosidades.

TABELA 4.38 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo programa sem utilização de dados de vazão para o cenário 1.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo - C de Hazen-Williams ( $m^{0,3676}/s$ )									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
MIGHA-C	1	109,90	121,90	109,50	160,90	119,80	127,20	111,30	92,30	98,00
	2	109,90	108,20	123,60	149,70	115,50	126,70	124,20	84,20	112,90
	3	109,90	114,20	112,30	112,10	88,90	123,50	143,30	76,00	124,60
	4	109,90	105,60	113,50	80,70	105,60	128,00	153,70	95,30	108,20
MIGHA-O	5	109,90	110,50	100,70	163,80	178,10	137,30	147,70	89,60	111,40
	6	109,90	115,60	104,60	150,60	174,50	136,60	116,00	103,10	96,90
	7	109,90	100,30	124,60	125,30	143,30	131,70	135,20	90,80	113,20
	8	109,90	116,70	112,80	163,20	123,00	127,70	117,70	105,60	94,30
MIGHA-M	9	109,90	107,20	116,00	86,20	145,80	133,10	125,60	101,80	101,00
	10	109,90	97,70	123,50	71,40	153,50	134,50	138,50	94,40	112,30
	11	109,90	95,60	140,60	82,10	120,60	129,90	132,70	102,30	106,10
	12	109,90	112,90	109,00	93,80	140,10	132,00	128,10	132,90	90,10
Média	109,90	108,87	115,89	119,98	134,06	130,68	131,17	97,36	105,75	
$\sigma$	0,00	8,04	10,78	36,35	26,82	4,25	13,13	14,08	9,91	
Real	110,00	122,00	105,00	133,00	130,00	129,00	121,00	83,00	107,00	
Erro	0,09%	10,77%	10,37%	9,79%	3,12%	1,30%	8,40%	17,30%	1,17%	
Erro médio por tubo									6,92%	

TABELA 4.39 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo programa sem utilização de dados de vazão para o cenário 2.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo - C de Hazen-Williams ( $m^{0,3676}/s$ )									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
MIGHA-C	1	109,90	124,10	113,80	129,70	83,80	111,10	152,40	81,00	106,60
	2	109,90	110,80	107,70	136,30	125,10	126,60	132,90	95,20	107,50
	3	109,90	110,80	103,80	109,00	122,70	133,10	160,10	81,70	115,20
	4	109,90	133,10	99,90	106,70	124,60	134,50	142,00	131,50	92,00
MIGHA-O	5	109,90	119,20	98,10	89,30	132,00	142,70	116,50	84,10	108,60
	6	109,90	101,70	98,60	87,50	149,10	148,30	82,30	84,60	118,50
	7	109,90	95,60	111,30	128,10	128,40	129,80	136,60	109,10	109,50
	8	109,90	116,10	110,40	143,20	113,70	120,80	92,80	74,20	116,80
MIGHA-M	9	109,90	137,60	107,10	140,10	106,50	118,60	112,30	97,90	94,90
	10	109,90	131,60	105,40	146,00	127,50	125,20	135,40	100,70	96,40
	11	109,90	98,90	118,70	143,00	102,60	116,40	143,40	89,60	115,20
	12	109,90	104,50	116,90	151,40	112,90	118,70	103,90	86,90	113,20
Média	109,90	115,33	107,64	125,86	119,08	127,15	125,88	93,04	107,87	
$\sigma$	0,00	14,05	6,87	22,25	16,64	11,07	24,21	15,53	8,97	
Real	110,00	122,00	105,00	133,00	130,00	129,00	121,00	83,00	107,00	
Erro	0,09%	5,46%	2,52%	5,37%	8,40%	1,43%	4,04%	12,10%	0,81%	
Erro médio por tubo									4,47%	

A tabela 4.40 apresenta as médias das calibrações dos dois cenários. Estes coeficientes de rugosidades foram aplicados á rede em ambos os cenários para a determinação da diferença entre as pressões reais e calibradas.

TABELA 4.40 – Média dos coeficientes médios obtidos dos dois cenários sem vazão

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo - C de Hazen-Williams (m <sup>0,3676</sup> /s)								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
MÉDIA CENÁRIO 1	109,90	108,87	115,89	119,98	134,06	130,68	131,17	97,36	105,75
MÉDIA CENÁRIO 2	109,90	115,33	107,64	125,86	119,08	127,15	125,88	93,04	107,87
<b>MÉDIA SEM VAZÃO</b>	<b>109,90</b>	<b>112,10</b>	<b>111,77</b>	<b>122,92</b>	<b>126,57</b>	<b>128,92</b>	<b>128,53</b>	<b>95,20</b>	<b>106,81</b>
REAL	110,00	122,00	105,00	133,00	130,00	129,00	121,00	83,00	107,00
$\sigma$	0,00	11,68	9,79	29,63	23,13	8,39	19,23	14,66	9,31
Erro	0,09%	8,11%	6,44%	7,58%	2,64%	0,06%	6,22%	14,70%	0,18%
								Erro médio por tubo	5,11%

As tabelas 4.41 e 4.42 apresentam as amostras de rugosidades obtidas de 12 execuções para os dois cenários que foram realizadas com a utilização da equação 4.1 para implementação das rugosidades.

TABELA 4.41 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo programa com utilização de dados de vazão para o cenário 1.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo - C de Hazen-Williams (m <sup>0,3676</sup> /s)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
MIGHA-C	1	109,90	123,20	106,30	119,50	130,00	127,70	119,40	92,70	98,30
	2	109,90	109,10	125,40	72,00	167,10	127,70	124,90	84,20	112,80
	3	109,90	112,60	105,50	175,60	69,20	127,70	133,00	76,10	124,80
	4	109,90	103,40	116,70	110,00	88,60	127,70	145,40	95,30	108,30
MIGHA-O	5	109,90	105,70	129,80	62,60	183,20	127,70	131,00	88,80	110,60
	6	109,90	112,80	128,40	60,00	148,10	127,70	108,30	102,00	96,00
	7	109,90	95,90	172,30	62,00	175,90	127,60	121,50	90,40	112,80
	8	109,90	117,00	104,80	196,80	68,60	127,70	118,90	105,70	94,30
MIGHA-M	9	109,90	108,40	121,20	94,10	142,50	127,70	131,10	101,30	100,70
	10	109,90	96,20	138,70	130,80	98,50	127,60	134,10	93,80	111,70
	11	109,90	92,70	159,30	123,60	83,20	127,60	123,20	102,00	105,90
	12	109,90	113,40	112,00	173,70	119,00	127,70	131,10	132,30	89,80
Média	109,90	107,53	126,70	115,06	122,83	127,68	126,83	97,05	105,50	
$\sigma$	0,00	9,20	21,30	47,71	41,19	0,05	9,52	13,93	9,95	
Real	110,00	122,00	105,00	133,00	130,00	129,00	121,00	83,00	107,00	
Erro	0,09%	11,86%	20,67%	13,49%	5,52%	1,03%	4,81%	16,93%	1,40%	
Erro médio por tubo									8,42%	

TABELA 4.42 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo programa com utilização de dados de vazão para o cenário 2.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo - C de Hazen-Williams (m <sup>0,3676</sup> /s)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
MIGHA-C	1	109,90	123,70	114,20	94,50	115,80	127,20	79,30	81,60	107,00
	2	109,90	121,90	120,80	104,70	163,00	127,20	80,80	89,80	104,00
	3	109,90	105,00	99,90	146,30	102,90	127,30	186,10	83,90	117,00
	4	109,90	128,70	98,70	139,00	105,30	127,30	107,20	134,00	93,00
MIGHA-O	5	109,90	122,60	167,10	68,80	155,50	127,20	125,20	81,60	107,40
	6	109,90	100,90	112,70	130,20	126,40	127,20	117,50	84,10	118,00
	7	109,90	93,90	105,70	157,80	106,50	127,30	126,70	109,70	109,60
	8	109,90	120,20	93,00	146,70	88,30	127,30	178,50	72,60	115,80
MIGHA-M	9	109,90	137,60	110,00	102,90	136,90	127,30	85,80	99,70	95,90
	10	109,90	133,70	108,30	125,40	144,40	127,30	118,40	100,20	96,10
	11	109,90	97,90	113,20	123,80	119,20	127,20	124,40	90,30	115,70
	12	109,90	109,80	122,80	106,00	159,00	127,20	112,90	85,70	112,40
Média	109,90	116,33	113,87	120,51	126,93	127,25	120,23	92,77	107,66	
$\sigma$	0,00	14,46	18,92	25,82	24,66	0,05	33,67	16,42	8,80	
Real	110,00	122,00	105,00	133,00	130,00	129,00	121,00	83,00	107,00	
Erro	0,09%	4,65%	8,44%	9,39%	2,36%	1,36%	0,63%	11,77%	0,62%	
Erro médio por tubo									4,37%	

A tabela 4.43 apresenta as médias das calibrações dos dois cenários. Estes coeficientes de rugosidades foram aplicados á rede em ambos os cenários para a determinação da diferença entre as pressões reais e calibradas.

TABELA 4.43 – Média dos coeficientes médios obtidos dos dois cenários com vazão

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo - C de Hazen-Williams (m <sup>0,3676</sup> /s)								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
MÉDIA CENÁRIO 1	109,90	107,53	126,70	115,06	122,83	127,68	126,83	97,05	105,50
MÉDIA CENÁRIO 2	109,90	116,33	113,87	120,51	126,93	127,25	120,23	92,77	107,66
<b>MÉDIA COM VAZÃO</b>	<b>109,90</b>	<b>111,93</b>	<b>120,28</b>	<b>117,78</b>	<b>124,88</b>	<b>127,46</b>	<b>123,53</b>	<b>94,91</b>	<b>106,58</b>
REAL	110,00	122,00	105,00	133,00	130,00	129,00	121,00	83,00	107,00
$\sigma$	0,00	12,67	20,76	37,62	33,27	0,22	24,43	15,05	9,25
Erro	0,09%	8,25%	14,56%	11,44%	3,94%	1,19%	2,09%	14,35%	0,39%
								Erro médio por tubo	6,26%

Os dados da tabela 4.44 e da figura 4.13 apresentam a diferença entre as pressões reais e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados *com* e *sem* vazão, para o cenário 1.

TABELA 4.44 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados *com* e *sem* vazão, para o cenário 1.

Nó	Sem vazão			com vazão		
	Pressão (m)			Pressão (m)		
	observada	calculada	diferença	observada	calculada	diferença
1	20,57	20,57	0,00	20,57	20,57	0,00
2	12,37	11,83	0,54	12,37	11,58	0,79
3	8,07	8,19	0,12	8,07	8,45	0,38
4	6,05	6,21	0,16	6,05	6,39	0,34
5	18,02	18,32	0,30	18,02	18,36	0,34
6	16,14	15,84	0,30	16,14	15,87	0,27
7	7,71	7,84	0,13	7,71	8,06	0,35

### Cenário 1

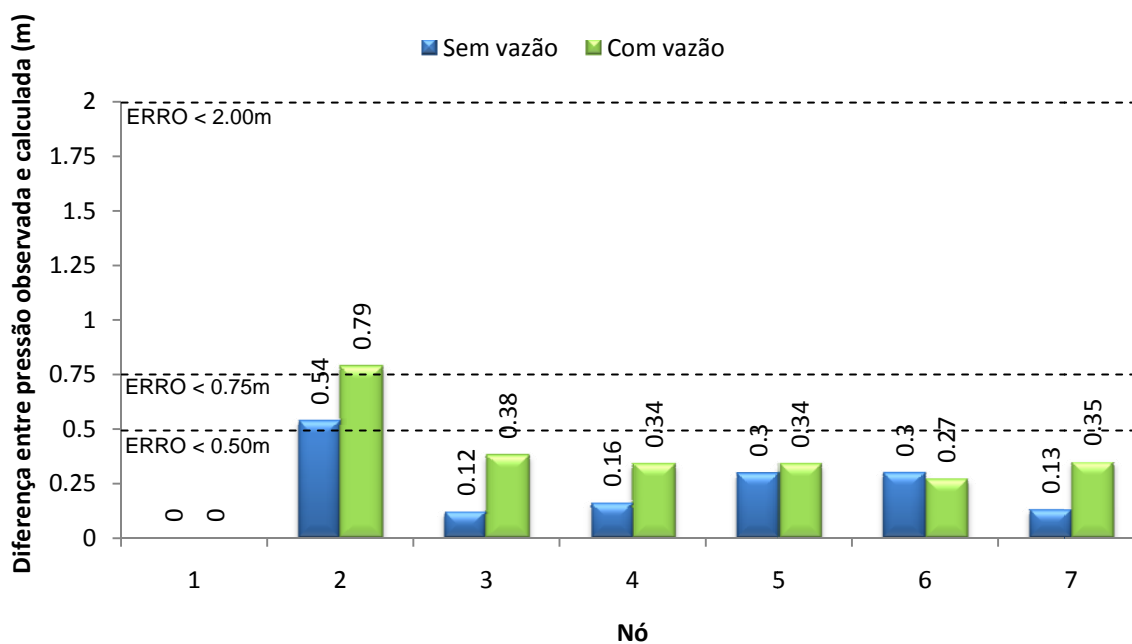


FIGURA 4.13 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões reais e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados *com* e *sem* vazão, para o cenário 1.

Os dados da tabela 4.45 e da figura 4.14 apresentam a diferença entre as pressões reais e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados *com* e *sem* vazão, para o cenário 2.

TABELA 4.45 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados *com* e *sem* vazão, para o cenário 2.

Nó	Sem vazão			com vazão		
	Pressão (m)			Pressão (m)		
	observada	calculada	diferença	observada	calculada	diferença
1	19,53	19,53	0,00	19,53	19,53	0,00
2	13,09	12,91	0,18	13,09	12,83	0,26
3	6,71	7,24	0,53	6,71	7,87	1,16
4	4,95	5,15	0,20	4,95	5,34	0,39
5	15,57	15,56	0,01	15,57	15,54	0,03
6	12,84	12,43	0,41	12,84	12,42	0,42
7	4,95	5,15	0,20	4,95	5,44	0,49

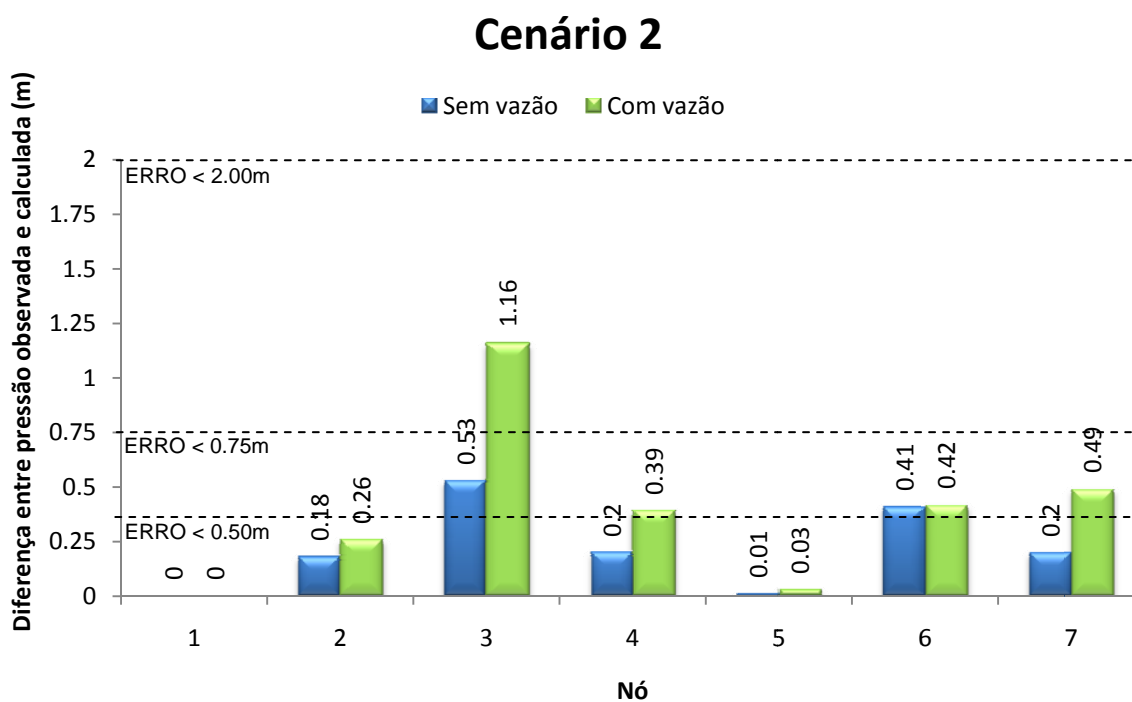


FIGURA 4.14 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões reais e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados *com* e *sem* vazão, para o cenário 2.

#### 4.3.1. Análise comparativa das redes calibradas *com* e *sem* medida de vazão

O erro absoluto da diferença entre as pressões observadas e simuladas apresentou-se dentro dos limites de tolerância definidos pelo WATER RESEARCH CENTRE (1989), porém, este erro foi maior em praticamente todos os trechos nos dois cenários com a medida de vazão.

As rugosidades médias calculadas *sem* e *com* vazão estão representadas na figura 4.15.

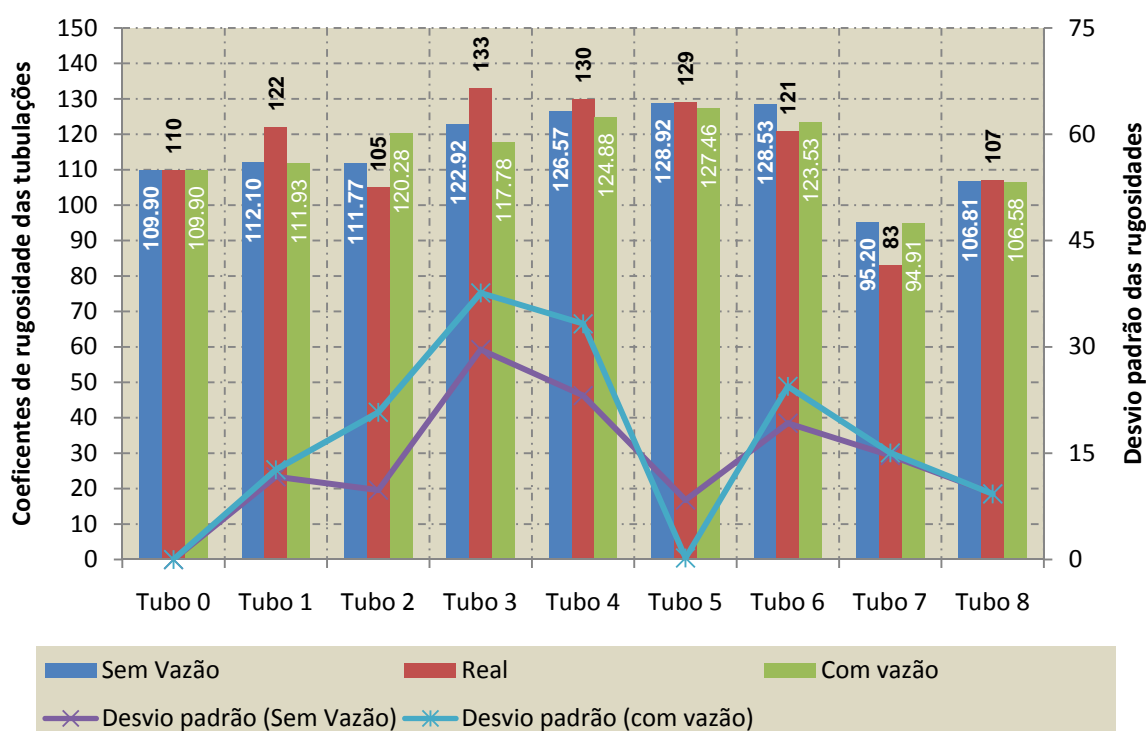


FIGURA 4.15 – Rugosidades médias e desvios padrões das calibrações *sem* e *com* vazão.

Verifica-se que as rugosidades médias encontradas são mais próximas das reais pelo processo comum (sem utilização de vazão) praticamente em todos os tubos.

Os desvios padrões foram mais elevados na calibração com vazão, com isso, percebe-se que as rugosidades obtidas sem vazão se aproximam mais da real e a probabilidade de erro menor que 5% é maior nesse processo.

A figura 4.16 apresenta as probabilidades de erro nas calibrações *sem* e *com* vazão..

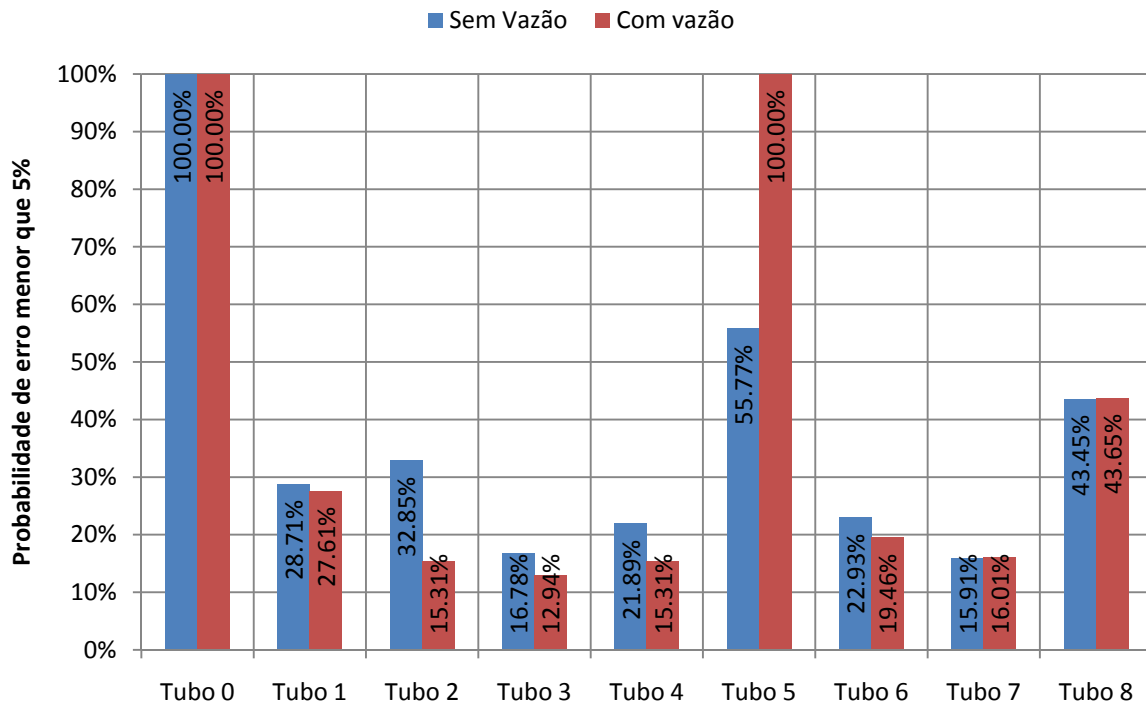


FIGURA 4.16 – Probabilidade de coeficiente de *Hazen-Williams* com erro menor que 5% para calibração *sem* e *com* vazão.

#### 4.4. Comparação do método com AG

Para a comparação do MIGHA com os algoritmos genéticos usou-se o MIGHA-C com pressões conhecidas em todos os pontos.

Os resultados foram comparados com aqueles obtidos por algoritmos genéticos (AG) em SILVA (2006).

Para esta comparação foi utilizada a rede hipotética adotada em seu trabalho que foi criada por WALSKI (1983b) e adaptada por GAMBALE (2000) e está ilustrada na figura 4.17.

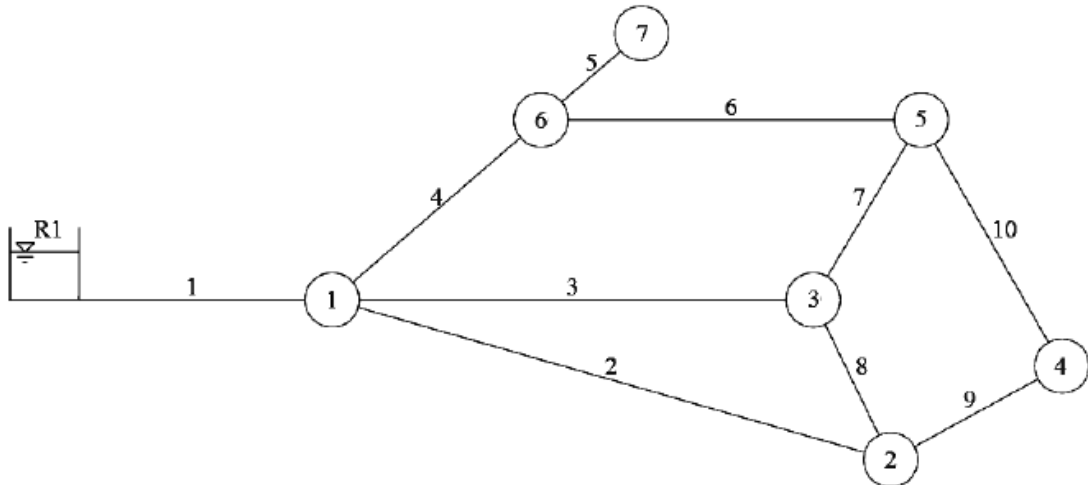


FIGURA 4.17 – Rede hipotética utilizada por SILVA (2006).

Os nós estarão na mesma cota topográfica (zero) e o nível de água do reservatório de nível fixo estará na cota 60 metros. As características físicas das tubulações estão apresentadas na tabela 4.46 a seguir.

TABELA 4.46 – Características físicas da rede hipotética utilizada por SILVA (2006).

TUBO	DIÂMETRO (mm)	COMPRIMENTO (m)	RUGOSIDADE
			$C (m^{0.3676}/s)$
1	500	700	140
2	250	1800	110
3	400	1520	130
4	300	1220	135
5	300	600	90
6	200	1220	110
7	250	920	120
8	150	300	115
9	200	600	85
10	100	1220	80

Foram considerados dois cenários de demandas não proporcionais indicados na tabela 4.47 a seguir.

TABELA 4.47 –Demandas nodais para os cenários estudados.

Nó	Demanda (L/s)	
	Cenário 1	Cenário 2
1	0,00	0,00
2	15,00	36,00
3	62,50	120,00
4	15,00	10,00
5	47,50	80,00
6	30,00	80,00
7	37,50	37,50

Utilizando o EPANET 2.0 para realizar a simulação hidráulica da rede hipotética pela fórmula de *Hazen-Williams* são calculadas as pressões consideradas “reais” que estão apresentadas na tabela 4.48.

TABELA 4.48 – Pressões reais para os dois cenários de demandas da rede

Nó	Pressões reais (m)	
	Cenário 1	Cenário 2
1	58,74	56,44
2	55,75	48,37
3	56,08	48,72
4	53,77	47,03
5	53,35	41,80
6	54,27	44,12
7	53,03	42,88

Foram realizadas doze calibrações pelo MIGHA, sendo seis no cenário 1 e seis no cenário 2. Os resultados das calibrações da rede pelo MIGHA, incluindo as médias das rugosidades, o desvio padrão e o erro relativo estão apresentados na tabela 4.49.

TABELA 4.49 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo MIGHA.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo - C de Hazen-Williams (m <sup>0,3676</sup> /s)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
MIGHA-M	1	139,90	117,90	131,50	129,80	89,90	74,40	129,60	75,20	84,70	73,70
	2	139,90	106,70	134,00	130,70	90,00	80,60	127,40	132,10	85,60	92,40
	3	139,90	114,00	130,30	133,00	90,00	96,50	122,80	100,00	86,30	107,20
	4	139,90	106,60	128,30	138,90	90,00	136,80	112,50	132,10	85,60	91,80
	5	139,90	108,10	129,90	136,10	90,10	117,80	117,40	126,70	85,90	98,60
	6	139,90	101,00	134,30	132,40	90,20	93,20	124,70	155,40	84,70	71,90
	7	139,90	116,90	127,20	136,50	90,00	120,30	115,30	79,00	91,60	107,70
	8	139,80	118,90	130,10	131,40	90,50	84,60	123,70	76,00	95,70	125,90
	9	140,20	109,60	129,50	135,70	90,00	115,00	115,40	151,30	96,30	128,10
	10	139,90	104,10	134,10	131,40	90,10	84,10	127,70	150,80	82,00	65,80
	11	140,20	111,60	129,30	135,10	90,10	111,30	117,80	119,30	91,40	106,80
	12	140,20	115,50	129,00	134,10	90,20	104,00	120,30	82,90	89,50	98,60
MÉDIA MIGHA	139,97	110,91	130,63	133,76	90,09	101,55	121,22	115,07	88,28	97,38	
σ	0,14	5,80	2,36	2,76	0,16	19,08	5,59	31,08	4,58	19,81	
Real	140,00	110,00	130,00	135,00	90,00	110,00	120,00	115,00	85,00	80,00	
Erro	0,02%	0,83%	0,48%	0,92%	0,10%	7,68%	1,01%	0,06%	3,85%	21,72%	
Erro médio por tubo										4,07%	

Os resultados da calibração com AG, utilizados na comparação, são valores de coeficiente de rugosidade de *Hazen-Williams* médios de doze execuções do algoritmo em 1000 iterações realizadas com os seguintes operadores:

- Substituição de indivíduos: *Steady-state*
- Seleção: *Torneio*
- Recombinação: *Escolhidos aleatoriamente*
- Mutação: *Gaussiana*

Os coeficientes de rugosidade estimados pelo AG estão apresentados na tabela 4.50.

TABELA 4.50 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo AG.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo - C de Hazen-Williams (m <sup>0,3676</sup> /s)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
MÉDIA AG	<b>138,41</b>	<b>113,30</b>	<b>131,06</b>	<b>134,11</b>	<b>90,22</b>	<b>100,62</b>	<b>121,19</b>	<b>105,09</b>	<b>87,31</b>	<b>97,57</b>
REAL	140,00	110,00	130,00	135,00	90,00	110,00	120,00	115,00	85,00	80,00
σ	2,52	3,34	2,36	1,46	0,26	8,75	2,43	17,62	1,99	7,76
Erro	1,14%	3,00%	0,82%	0,66%	0,24%	8,53%	0,99%	8,62%	2,72%	21,96%
Erro médio por tubo										5,28%

O resultado para as pressões calculadas a partir dos coeficientes de rugosidades estimados com MIGHA e AG, para o cenário1, encontra-se na tabela 4.51 e a diferença entre a pressão real e a calculada em cada nó apresenta-se na figura 4.18.

TABELA 4.51 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados com MIGHA e AG, para o cenário 1.

Nó	MIGHA			AG		
	Pressão (m)			Pressão (m)		
	observada	calculada	diferença	observada	calculada	diferença
1	58.74	58.74	0.00	58.74	58.71	0.03
2	55.75	55.75	0.00	55.75	55.75	0.00
3	56.08	56.08	0.00	56.08	56.09	0.01
4	53.77	53.85	0.08	53.77	53.82	0.05
5	53.35	53.35	0.00	53.35	53.34	0.01
6	54.27	54.27	0.00	54.27	54.27	0.00
7	53.03	53.03	0.00	53.03	53.04	0.01

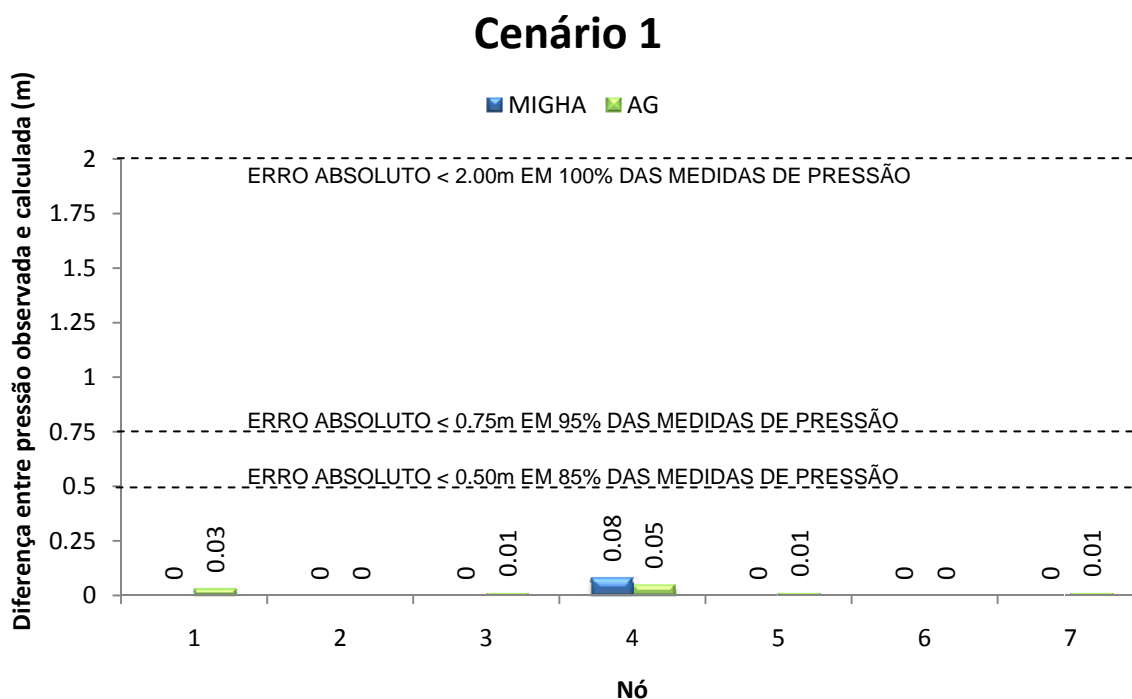


FIGURA 4.18 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões reais e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados com MIGHA e AG, para o cenário 1.

O resultado para as pressões calculadas a partir dos coeficientes de rugosidades estimados com MIGHA e AG, para o cenário 2, encontra-se na tabela 4.52 e a diferença entre a pressão real e a calculada em cada nó apresenta-se na figura 4.19.

TABELA 4.52 – Comparativo entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados com MIGHA e AG, para o cenário 2.

Nó	MIGHA			AG		
	Pressão (m)			Pressão (m)		
	observada	calculada	diferença	observada	calculada	diferença
1	56.44	56.44	0.00	56.44	56.37	0.07
2	48.37	48.36	0.01	48.37	48.39	0.02
3	48.72	48.72	0.00	48.72	48.74	0.02
4	47.03	47.00	0.03	47.03	47.00	0.03
5	41.80	41.81	0.01	41.80	41.81	0.01
6	44.12	44.12	0.00	44.12	44.12	0.00
7	42.88	42.88	0.00	42.88	42.88	0.00

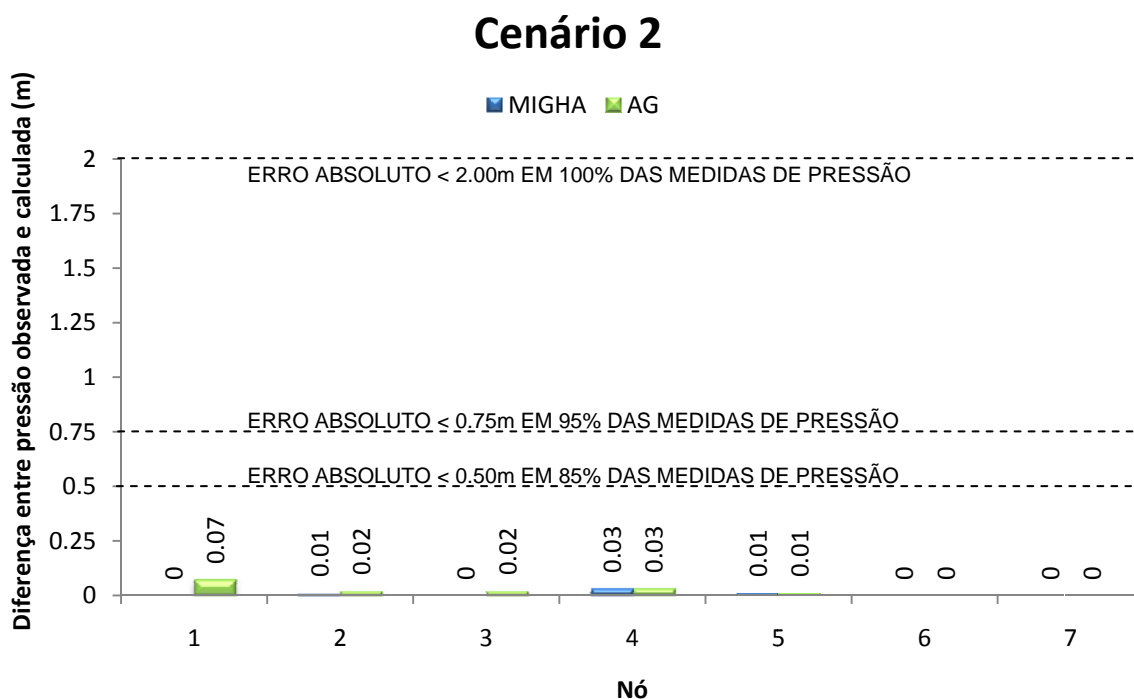


FIGURA 4.19 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões reais e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados com MIGHA e AG, para o cenário 2.

As diferenças entre pressões observadas e calculadas foram bem próximas a zero nos dois cenários para os dois métodos onde as diferenças foram menores que 0,1m em todos os nós, porém o MIGHA apresentou diferenças menores ainda que o AG.

Pela figura 4.20 nota-se que as rugosidades médias encontradas são mais próximas das reais com o MIGHA na maioria dos tubos mostrando um processo bastante preciso em relação as rugosidades.

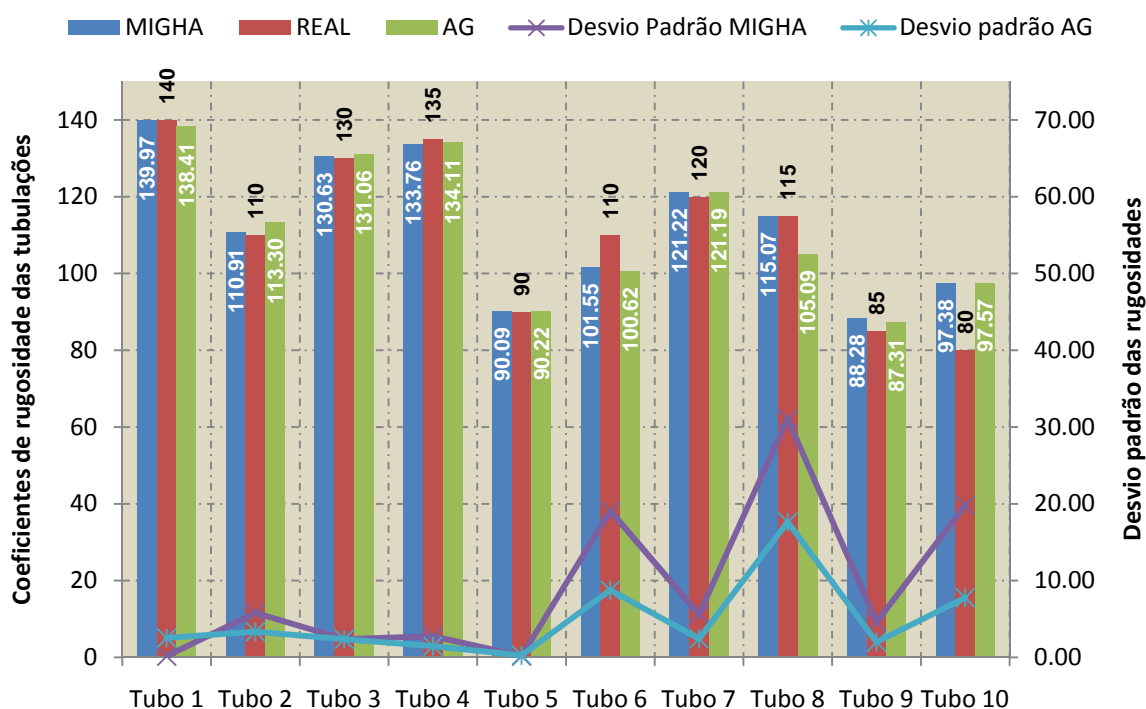


FIGURA 4.20 – Rugosidades médias e desvios padrões utilizando MIGHA e AG.

Verifica-se que os desvios padrões foram altos para os dois métodos nos tubos 6, 8 e 10 mostrando uma baixa sensibilidade desses tubos ao processo de calibração, pois significativas variações em suas rugosidades acarretam pequenas alterações nos valores de pressão. Nesses tubos, o MIGHA apresenta desvios padrões maiores que o AG.

Na avaliação do desempenho de cada método, verifica-se na figura 4.21 que o AG apresenta melhores resultados em relação à probabilidade de erro menor que 5% para as rugosidades calibradas.

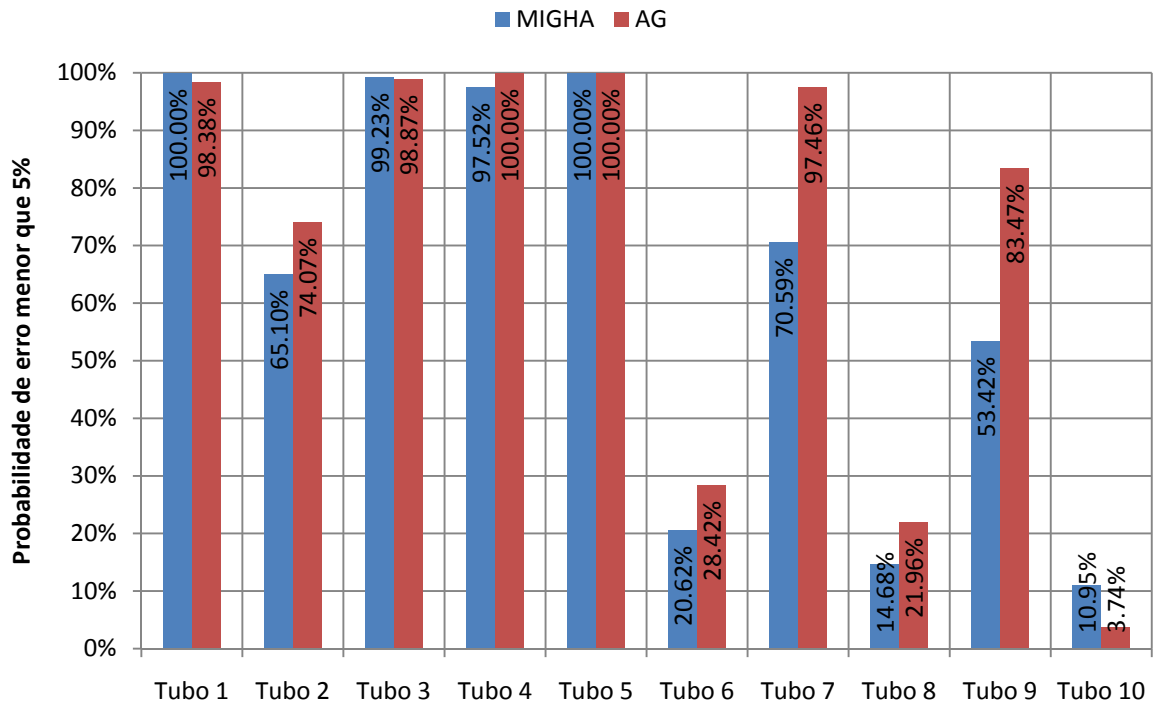


FIGURA 4.21 – Probabilidade de coeficiente de *Hazen-Williams* com erro menor que 5% para MIGHA e AG.

Com relação ao tempo de processamento, o MIGHA-C apresentou um tempo de 3,80 segundos para processar 100 iterações enquanto o algoritmo genético apresentou um tempo de 1 minuto e 55 segundos para processar 100 gerações com uma população inicial de 200 indivíduos mostrando que o MIGHA apresenta menor tempo de processamento em relação ao algoritmo genético traduzindo-se em uma vantagem.

**Capítulo**

**5**

---

**CONCLUSÕES E  
RECOMENDAÇÕES**

## 5. Conclusões e Recomendações

Neste trabalho foi apresentado um programa para calibração de coeficientes de rugosidade de *Hazen-Williams* de redes de distribuição de água que utiliza a técnica de otimização do MIGHA, tal aplicativo foi concebido para subsidiar estudos comparativos visando o aprimoramento do MIGHA – método iterativo do gradiente hidráulico alternativo.

O modelo proposto pode ser utilizado como ferramenta de calibração já que as pressões calculadas apresentaram erros absolutos dentro dos limites de tolerância definidos pelo WATER RESEARCH CENTRE (1989).

Todos os testes realizados neste trabalho têm por base uma rede hipotética da literatura, embora, na prática, esse tipo de investigação deve ser realizada em redes reais.

Avaliou-se o desempenho de diversas configurações para o MIGHA na calibração do coeficiente de rugosidade “C” de *Hazen-Williams*.

Este trabalho buscou avaliar o desempenho do processo de calibração em situações em que não são conhecidas todas as pressões. Na rede utilizada, que contém sete nós, foram realizados testes que vão de sete a duas pressões conhecidas. Com sete, seis e até cinco pressões conhecidas, os resultados estão totalmente dentro dos limites de tolerância. Com quatro pressões conhecidas houve erro absoluto menor que 0,50m em 71% das medidas de pressão, sendo exigidas, no mínimo, 85% das medidas de pressão com erro menor que 0,50m. No cenário 1, todos os erros absolutos estiveram dentro da tolerância, com quatro pressões conhecidas. Os outros limites (erro absoluto menor que 0,75m em 95% das medidas e erro absoluto menor que 2,00m em 100% das medidas de pressão) não foram ultrapassados. Os resultados mostram, portanto, que para uma calibração com resultados confiáveis é necessário que se conheça o maior número possível de medidas de pressão. Os resultados se apresentaram totalmente dentro dos limites de tolerância com uma quantidade mínima de 71,4% das pressões conhecidas.

A realização de iterações na rede observada simultaneamente à rede calculada para a obtenção das novas rugosidades, verificada no processo MIGHA-M apresenta resultados mais satisfatórios que os processos MICHA-C e MIGHA-O, pois apresenta erros absolutos dentro dos limites de tolerância

para os dois cenários, enquanto o MIGHA-C extrapola os limites em ambos os cenários e o MIGHA-O extrapola no cenário 1. Para o MIGHA-M, a probabilidade de erro menor que 5% foi maior que nos outros processos. As rugosidades médias encontradas são mais próximas das observadas quando se utiliza o MIGHA-O para a maioria dos trechos mostrando que este processo é mais preciso quando se pretende aproximar as rugosidades simuladas das observadas.

Outro parâmetro importante diz respeito ao tempo de processamento. Enquanto o MIGHA-C gastou 3,80 segundos para processar 100 calibrações, o MIGHA-O gastou 3 minutos e 16 segundos e o MIGHA-M gastou 23 segundos mostrando que o MIGHA-C embora mais rápido, não apresenta bons resultados, o MIGHA-O com resultados razoáveis gasta um tempo muito superior aos outros processos e o MIGHA-M apresenta um tempo de processamento relativamente baixo e resultados superiores.

O MIGHA, em qualquer uma de suas formas utilizadas apresenta uma grande vantagem em relação a outros métodos, seu tempo de processamento, que é bastante inferior, por exemplo, ao algoritmo genético.

É importante observar que o MIGHA-C é o processo ideal a ser utilizado quando todas as pressões são conhecidas, pois, nesse caso, a rede observada equivale a rede gabarito (real) em termos de gradientes hidráulicos, não havendo necessidade de refinar os gradientes hidráulicos observados, além de proporcionar a solução do problema em menor tempo de processamento. Somente nas situações que as pressões não forem todas conhecidas, deve-se utilizar MIGHA-M ou MIGHA-O para refinar os gradientes hidráulicos observados, aproximando-os dos gradientes hidráulicos da rede gabarito.

Nos testes realizados para verificar o comportamento do processo de calibração substituindo uma pressão medida por uma vazão, conclui-se por não realizar essa substituição já que os erros absolutos, embora dentro dos limites de tolerância, foram maiores com a vazão e, em alguns trechos a diferença chegou a ser bem grande. Os desvios padrões também foram maiores no segundo caso acarretando maior probabilidade de erro. Por fim, os coeficientes médios de rugosidade se aproximaram mais do real no primeiro caso.

Na análise comparativa com os algoritmos genéticos, verifica-se que o MIGHA obtém resultados similares ao AG com relação ao erro absoluto, onde a

maior diferença entre as pressões observadas e simuladas é de 0,08m. Embora tenha apresentado resultados médios de coeficientes de rugosidade mais próximos dos reais que o AG, percebe-se que o MIGHA apresenta desvios padrões maiores implicando em menores possibilidades de erro menor que 5%.

Os testes mostram que o método proposto neste trabalho apresenta mínimos locais nos resultados das calibrações, pois um conjunto qualquer de coeficientes de rugosidade obtido na simulação minimiza o erro absoluto das pressões reais e simuladas.

O modelo de calibração proposto possibilitou um estudo aprofundado das principais variações do MIGHA. Assim, essa dissertação atingiu seus objetivos contribuindo para o aprimoramento da técnica, abrindo a possibilidade para novas pesquisas na área, utilizando o MIGHA.

Recomenda-se como trabalhos futuros: a análise do desempenho do MIGHA na determinação de rugosidades absolutas; a análise do desempenho do MIGHA na determinação de rugosidades absolutas e coeficientes de *Hazen-Williams* de macro-sistemas de distribuição reais; estudos de análise de localização dos melhores pontos para medidas de vazão.

Sugerem-se a aplicação do MIGHA em problemas que envolvem perdas por vazamentos e demandas dirigidas por pressão.

Por fim, recomenda-se a aplicação de um modelo híbrido visando poupar esforço computacional e refinar os coeficientes de rugosidade obtidos na solução.

**Capítulo**

**6**

---

**REFERÊNCIAS  
BIBLIOGRÁFICAS**

## 6. Referências Bibliográficas

ARAÚJO, J. K. **Calibração de redes de distribuição de água pelo método inverso aplicado à escoamento transiente**. São Carlos. 166 p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.

BHAVE, P. R. **Analysis of flow in water distribution networks**. Technomic Publishing. Lancaster, Pennsylvania, United States of America, 1991.

BHAVE, P. R. Calibrating water distribution network models. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 114, n. 1, p. 120-136, Feb, 1988.

BOULOS, P. F.; ORMSBEE, L. E. (1991). Explicit Network Calibration for Multiple Loading Conditions. **Civil Engineering Systems**, v.8, p.153-160.

BOULOS, P. F.; WOOD, D. J. Explicit calculation of pipe-network parameters. **Journal of Hydraulic Engineering**, v.116, n.11, p.1329-1344, Nov, 1990.

CHEUNG, P. B. (2001). **Investigação dos métodos clássicos de calibração de redes hidráulicas**. Campo Grande. 132 . Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Brasil.

CHEUNG, P. B.; SOUZA, R. S. Influência do zoneamento de uma rede hidráulica na acurácia de um modelo de calibração. 15 p. In: **21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. João Pessoa – PB, 2001.

COLEBROOK, C. F., **Turbulent flow in pipes, with particular reference to the transition region between the smooth and rough pipe laws**. Journal of the institution of civil engineers, London, 11, 1939, pp. 133-156.

COSTA, M. G. **Calibração do coeficiente de rugosidade de tubulações em redes de distribuição de água com redes neurais**. Fortaleza. 103 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Ceará, 2008.

CROSS, HARDY. (1936) – **Analysis of flow in networks of conduits or conductors**. Engineering experimental station, University of Illinois, Urbana, Bulletin, n. 286. Nov.

DATTA, R. S. N.; SRIDHARAN, K. (1994). Parameter estimation in water distribution systems by least squares. **Journal of water Resources Planning and Management**, v.120, n.4, p.405-422, July/Aug.

De SCHAETZEN, W.; SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A.; ROUSSEAU, M. (2000). Analysis of the sensitivity of the calibration optimization problem. In: SAVIC, D. A. (ed); WALTERS, G. A. (ed): **Water Network Modelling for Optimal Design and Management**, p. 43-54, Sept.

FERRERI, G. B.; NAPOLI, E.; TUMBIOLO, A. (1994). Calibration of

roughness in water distribution networks. In: MILLER, D. S. (ed): **2<sup>nd</sup> International Conference on Water Pipeline Systems**, BHR Group Conference Series, p. 379-396, Edinburgh, Scotland.

GOMES, Heber Pimentel. **Sistemas de abastecimento de água: dimensionamento econômico**. 2 ed. João Pessoa: Editora Universitária / UFPB, 2004, 242p.

GRECO, M.; DEL GUIDICE, G. (1999). New approach to water distribution network calibration. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 125, n. 8, p. 849-854, Aug.

GUO, X.; C-M. ZHANG. (1994). **Use of the physical feature of groundwater system to reduce the mathematic complexity in parameter identification – a practical and efficient automated procedure**. In: Proceedings of the 1994 Groundwater Modeling Conference, Fort Collins, Colorado, 111-118.

GUO, X.; C-M. ZHANG. (2000). **Hydraulic gradient comparison method to estimate aquifer hydraulic parameters under steady-state conditions**. *Ground Water* 38, n. 6: 815-826.

HOAG, L. N., WEINBERG, G. (1957) – Pipeline network analysis by electronic digital computer. **Journal American Water Works Association**, p.517-524.

KAPELAN, Z. S.; SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. (2002) Hybrid GA for calibration of water distribution hydraulic models. **Proceedings of the 2002 Conference on Water Resources Planning and Management**, Roanoke, Virginia.

LAM, C. F., WOLLA, M. L. (1972) – Computer analysis of water distribution systems: part II – numerical solution. **Journal of Hydraulics Division**, ASCE, v. 98, n. HY3, p. 447-460.

LANSEY, K. E.; BASNET, C. (1991) Parameter estimation for water distribution networks. **Journal of water Resources Planning and Management**, v.117, n.1, p.126-144, Jan/Feb.

LANSEY, K. E.; EL-SHORBAGY, W.; AHMED, I.; ARAUJO, J.; HAAN, C. T. (2001) Calibration assesment and data collection for water distribution networks. **Journal of Hydraulic Engineering**, v.127, n.4, p.270-279, Apr.

LINGIREDDY, S.; ORMSBEE, L. E. (2002) Hydraulic network calibration using genetic optimization. **Civil Engineering and Environmental Systems**, v.19, n.1, p.13-39.

LNEC – LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, **EPANET 2.0 em Português – Manual do utilizador**, LNEC, Lisboa 2002.

MARTIN, D. W., PETERS, G. (1963) - The application of Newton's method to network analysis by digital computer. **Journal of institute of water engineers**, v. 17, n. 2, p.115-129.

McILROY, M. S. – Direct-reading electric analyzer for pipeline networks. **Journal American Water Works Association**, p.347-365, 1950.

McPHERSON, M. B., RADZIUL, J. V. (1958) – Water distribution design and the mcllroy network analyser. **Journal of Hydraulics Division**, ASCE, v. 84, n. HY2, Proc. Paper 1588, p. 1-9

MOODY, L. F.; Friction factor for pipe flow. **ASME Transactions**, v. 66, p.671, 1944.

NELDER, J. A.; MEAD, R. (1965) A simplex method for function minimization. **The Computer Journal**, v.7, n.4, p.308-313.

ORMSBEE, L. E. (1989) Implicit network calibration. **Journal of water Resources Planning and Management**, v.115, n.2, p.243-257, Mar.

ORMSBEE, L.E.; LINGIREDDY, S. (1997). Calibrating hydraulic network models. **Journal of the American Water Works Association**, v.89, n.2, p.42-50.

ORMSBEE, L.E.; WOOD, D. J. Explicit pipe network calibration. **Journal of water Resources Planning and Management**, v.112, n.2, p.166-182, apr, 1986.

PORTO, Rodrigo de Melo. **Hidráulica Básica**. 2 ed. São Paulo: EESC/USP, 1998, 540p.

REDDY, P. V. N.; SRIDHARAN, K.; RAO, P. V. (1996) WLS method for parameter estimation in water distribution networks. **Journal of water Resources Planning and Management**, v.122, n.3, p.157-164, May/June.

RIGUETTO, A. M. (2001). Calibração de modelo hidráulico de rede de distribuição de água. **Revista ABRH**, v. 6, n. 3 p.33-44, Set.

ROSSMAN, L. A. **EPANET 2 Users manual**. U. S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, 2000.

ROSSMAN, L. A. **The Epanet programmers toolkit**. In: PROCEEDINGS OF WATER RESOURCES PLANNING AND MANAGEMENT DIVISION ANNUAL SPECIALTY CONFERENCE, 2000b, Tempe, Arizona.

SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. (1997) Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks. **Journal of water Resources Planning and Management**, v.123, n.2, p.67-77, Mar/Apr.

SCHUSTER, H. D. M. (2002). **Modelagem matemática do uso conjunto**

**das águas superficiais e subterrâneas da sub-bacia do rio das Fêmeas-Bahia.** Projeto de gerenciamento integrado das atividades na bacia do São Francisco – A-NA/GEF/PNUMA/OEA, Salvador-BA, 59 p.

SCHUSTER, H. D. M. (2004). Uma formulação alternativa do método iterativo de gradiente hidráulico alternativo no procedimento de calibração dos parâmetros hidrodinâmicos do sistema aquífero. **Revista brasileira de recursos hídricos**, v. 9, n. 2, p. 31-37, Abr/Jun.

SILVA, A. C. A. **Calibração automática de rugosidades de tubulações em sistemas de distribuição de água com aplicação de algoritmos genéticos.** 175 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Ceará, 2006.

SOARES, A. K. **Calibração de modelos de redes de distribuição de água para abastecimento considerando vazamentos e demandas dirigidas pela pressão.** São Carlos. 153 p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.

SOUZA, R. S. (1994). **Aspectos computacionais da análise de redes de distribuição com componentes hidráulicos em regime permanente.** São Carlos. 236 p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil.

SURYAPRAKASAM, M. V., REID, G. W., GEYER, J. C. (1950) – Use of alternating current network calculator in distribution systems design. **Journal American Water Works Association**, p.1164-1164.

SWAMEE, P. K., JAIN, A. K. Explicit equation for pipe flow problems. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 102, n. 5, p. 657-664, May, 1976.

TODINI, E.; PILATI, S. (1987). A Gradient Algorithm for the Analysis of Pipe Networks. *In:* COULBECK, B. (ed.); ORR, C. H. (ed.). **Computer Applications in Water Supply – System Analysis and Simulation**, vol. 1, p. 1-20.

TSUTIYA, Milton T. **Abastecimento de água.** 1 ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004. XIII, 643p.

WALSKI, T. M. Case study: pipe network model calibration issues. **Journal of water Resources Planning and Management**, v.112, n.2, p.238-249, 1986.

WALSKI, T. M. Technique for calibration network models. **Journal of water Resources Planning and Management**, v.109, n.4, p.360-372, oct, 1983a.

WALSKI, T. M.; CHASE, D. V.; SAVIC, D.A.; GRAYMAN, W.; BECKWITH, S.; KOELLE, E. **Advanced water distribution modeling and management.** 1 ed. Water bury: Haestad Methods, 751p, 2003.

WALTERS, G. A.; SAVIC, D. A.; MORLEY, M.; De SCHAETZEN, W.; ATKINSON, R. (1998). Calibration of water distribution network models using genetic algorithms. In: BLAIN, W. R. (ed): **Hydraulic Engineering Software VII**, p. 131-140.

WATER RESEARCH CENTRE. **Network Analysis – A code for practice**. Published by WRC, Swindon, UK, 1989.

WOOD, D. J.; CHARLES, C. O. A. (1972) – Hydraulic network analysis using linear theory. **Journal of Hydraulics Division**, v. 98, n. HY7, p. 1157-1170, July.

**Apêndice**

**A**

---

**Arquivos de entrada no MIGHA**

## A.1 Modelo de arquivo de texto no formato de importação para o EPANET

[TITLE]

[JUNCTIONS]

;ID	Elev	Demand	Pattern	
1	463.2	0		;
2	460.2	10		;
3	458.9	8		;
4	461.2	5		;
5	457.7	10		;
6	463.2	5		;
7	459.2	2		;

[RESERVOIRS]

;ID	Head	Pattern	
0	485.8		;

[TANKS]

;ID	Elevation	InitLevel	MinLevel	MaxLevel	Diameter
	MinVol	VolCurve			

[PIPES]

;ID	Node1	Node2	Length	Diameter	Roughness	MinorLoss	Status
1	1	2	1850	150	122	0	Open ;
2	2	3	790	125	105	0	Open ;
3	3	7	700	100	133	0	Open ;
4	7	4	600	100	130	0	Open ;
5	4	5	980	100	129	0	Open ;
6	5	2	850	100	121	0	Open ;
7	5	6	650	200	83	0	Open ;
8	6	1	850	200	107	0	Open ;
0	1	0	520	250	110	0	Open ;

[PUMPS]

;ID	Node1	Node2	Parameters
-----	-------	-------	------------

[VALVES]

;ID	Node1	Node2	Diameter	Type	Setting	MinorLoss
-----	-------	-------	----------	------	---------	-----------

[TAGS]

[DEMANDS]

;Junction	Demand	Pattern	Category
-----------	--------	---------	----------

[STATUS]

;ID	Status/Setting
-----	----------------

[PATTERNS]

;ID	Multipliers
-----	-------------

[CURVES]

;ID	X-Value	Y-Value
-----	---------	---------

[CONTROLS]

[RULES]

[ENERGY]

Global Efficiency	75
-------------------	----

Global Price           0  
Demand Charge        0

[EMITTERS]  
;Junction       Coefficient

[QUALITY]  
;Node           InitQual

[SOURCES]  
;Node           Type           Quality        Pattern

[REACTIONS]  
;Type           Pipe/Tank      Coefficient

[REACTIONS]  
Order Bulk            1  
Order Wall            1  
Global Bulk            0  
Global Wall            0  
Limiting Potential    0  
Roughness Correlation 0

[MIXING]  
;Tank            Model

[TIMES]  
Duration            0:00  
Hydraulic Timestep  1:00  
Quality Timestep    0:05  
Pattern Timestep    1:00  
Pattern Start        0:00  
Report Timestep     1:00  
Report Start         0:00  
Start ClockTime     12 am  
Statistic            NONE

[REPORT]  
Status            No  
Summary            No  
Page              0

[OPTIONS]  
Units            LPS  
Headloss         H-W  
Specific Gravity   1  
Viscosity        1  
Trials            40  
Accuracy         0.001  
Unbalanced       Continue 10  
Pattern          1  
Demand Multiplier 1.0  
Emitter Exponent  0.5  
Quality          None mg/L  
Diffusivity      1  
Tolerance        0.01

[COORDINATES]  
;Node            X-Coord        Y-Coord

1	1917.48	6326.86
2	4700.65	6326.86
3	7872.17	6326.86
4	7872.17	3430.42
5	4700.65	3899.68
6	2807.44	4223.30
7	7872.17	4611.65
0	1059.87	7944.98

[VERTICES]

;Link X-Coord Y-Coord

[LABELS]

;X-Coord Y-Coord Label & Anchor Node

[BACKDROP]

DIMENSIONS 0.00 0.00 10000.00 10000.00

UNITS None

FILE

OFFSET 0.00 0.00

[END]