



## I-126 - 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**<sup>(1)</sup>

Engenheiro Civil, mestre em Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Ceará.

**Magno Gonçalves da Costa**<sup>(2)</sup>

Engenheiro Civil, mestre em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará.

**Marco Aurélio Holanda de Castro**<sup>(3)</sup>

Engenheiro Civil, PhD., Drexel University -USA. Professor Adjunto, Departamento de Enga. Hidráulica e Ambiental, Coordenador da Pós-Graduação em Eng. Civil - Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. – Universidade Federal do Ceará.

**Endereço**<sup>(1)</sup>: Av. Santos Dumont 6400 bl. C apto 1302. Bairro: Papicu. Fortaleza-CE. CEP: 60190-800 - Brasil - Tel: (85) 8744.9330 - e-mail: gomesdematos@hotmail.com

### 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, EPANET.

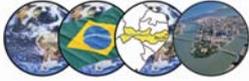
### INTRODUÇÃO

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.

As companhias de saneamento obtêm dados de demandas em nós da rede através da micromedição 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, favelas, etc.), erros de medição provocada por hidrômetros descalibrados ou velhos e, finalmente, por vazamentos ao longo da rede de distribuição.

As técnicas utilizadas para calibração de rugosidades de redes de distribuição têm sido desenvolvidas desde a década de 70 e podem ser divididas em três classes: (1) procedimentos de tentativa e erro através de equações



analíticas (WALSKI, 1983; BHAVE, 1988); (2) métodos explícitos ou simulação hidráulica (ORMSBEE e WOOD, 1986a e 1986b; BOULOS e WOOD, 1990) e (3) métodos implícitos ou otimização.

Nos métodos explícitos, os parâmetros componentes do cálculo do equilíbrio hidráulico da rede podem ser obtidos de forma explícita, através da resolução analítica do sistema de equações não lineares. Para isso o número de medidas de pressões e/ou vazões deve ser igual ao número de parâmetros desconhecidos.

Entende-se por métodos implícitos aqueles que consistem na minimização de uma função objetivo que, geralmente, é o módulo da diferença entre os valores de dados observados e calculados de pressão e/ou vazão do sistema.

Na contínua busca pela melhoria da precisão dos resultados da calibração de modelos de redes de distribuição de água, SAVICS & WALTERS (1997) utilizaram os algoritmos genéticos como métodos de busca no processo de otimização. Ao comparar os resultados com aqueles obtidos por métodos de tentativa e erro, percebeu-se uma forte dominância daqueles sobre estes. Utilizando o simulador hidráulico EPANET 1.1 e o modelo de otimização desenvolvido pelo autor, GAMBALE (2000) analisou o método dos algoritmos genéticos para calibração do coeficiente de Hazen-Williams de uma rede hipotética concluindo que a dimensão da população de soluções influencia significativamente na qualidade dos resultados obtidos.

A utilização dos algoritmos genéticos para calibração das rugosidades dos trechos dos sistemas de abastecimento apresenta vantagens como: simplicidade em sua utilização, pois as formulações matemáticas complexas são desnecessárias, bem como equações diferenciais ou inversões de matrizes; possibilidade de utilização para redes ramificadas com grande quantidade de parâmetros; introdução de parâmetros adicionais, como diâmetros e demandas nodais; não requer informações sobre o gradiente da superfície de resposta; eventuais descontinuidades da superfície de resposta não afetam a desempenho da otimização; a presença de mínimos locais não reduz a eficiência do algoritmo.

Neste trabalho utilizou-se de técnicas de calibração de parâmetros hidrodinâmicos na determinação das rugosidades das tubulações. O método MIGHA, desenvolvido por SCHUSTER (2000), é um método iterativo que determina seus parâmetros a partir dos gradientes hidráulicos dos trechos.

## **METODOLOGIA**

O método apresentado neste trabalho determina as rugosidades das tubulações de uma rede de distribuição de água que, com o balanceamento hidráulico, resultam em pressões calculadas bastante próximas das observadas. O método utiliza função objetivo que por meio de iterações com o simulador hidráulico EPANET (Rossman,2000), ajusta continuamente as rugosidades até que a função objetivo atinja um valor mínimo.

Dentre as linguagens de programação disponíveis, para efetuar a modelagem do método, escolheu-se a linguagem DELPHI em função de sua facilidade de uso e, principalmente por proporcionar recursos numéricos e gráficos, que oferece um tratamento adequado à modelagem numérica além do fornecimento de elementos importantes para a visualização e a interpretação dos resultados.

Embora seja um programa de uso livre, o EPANET (Rossman,2000) mostra-se bastante robusto e eficaz como auxílio ao projetista de redes de distribuição de água. A fusão das rotinas de otimização e do cálculo hidráulico é possível devido à capacidade que o EPANET possui de ser incorporado a outros programas e ser utilizado conforme as necessidades do usuário, pois as rotinas de cálculo estão dispostas em uma biblioteca (Epanet2.dll) possibilitando a implementação de programas específicos.

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 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 com a rede gabarito se em todos os nós forem medidas as pressões, nesse caso, as rugosidades 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.

*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.

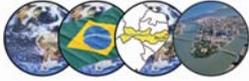
O processo de calibração pelo MIGHA ocorre de forma simples e direta quando se conhecem as pressões em todos os pontos. A rede observada corresponde ao próprio gabarito (rede gabarito) conhecendo-se todos os gradientes hidráulicos observados.

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). 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 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 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 abaixo:



$$C = \left[ \frac{10,65 \left( \frac{Q}{1000} \right)^{1,88} D^{-4,97}}{J} \right]^{1/1,88}$$

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.

Embora seja um programa de uso livre, o EPANET (Rossman,2000) mostra-se bastante robusto e eficaz como auxílio ao projetista de redes de distribuição de água. A fusão das rotinas de otimização e do cálculo hidráulico é possível devido à capacidade que o EPANET possui de ser incorporado a outros programas e ser utilizado conforme as necessidades do usuário, pois as rotinas de cálculo estão dispostas em uma biblioteca (Epanet2.dll) possibilitando a implementação de programas específicos.

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).

#### MIGHA

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

O MIGH (Método Iterativo de Gradiente Hidráulico, Guo e Zhang, 1994, Guo e Zhang, 2000) 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*).

O Método iterativo de gradiente hidráulico alternativo (MIGHA) desenvolvido por Schuster, 2002, abandona a calibração tradicional dos mínimos quadrados.

O método iterativo de gradiente hidráulico alternativo 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.

Aplicado neste trabalho à estimativa do parâmetro rugosidade das tubulações, o MIGHA corrige a cada iteração o coeficiente de rugosidade do trecho pela expressão:

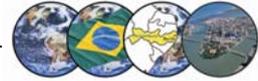
$$C_j^{i+1} = C_j^i \cdot \frac{|\nabla h_j^{calc}|}{|\nabla h_j^{obs}|} \quad (1)$$

Onde  $C_j^i$  é o coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams do trecho j na iteração i,  $C_j^{i+1}$  é o coeficiente de rugosidade do trecho j na iteração i+1,  $|\nabla h_j^{calc}|$  é o gradiente hidráulico calculado na iteração i do trecho j e  $|\nabla h_j^{obs}|$  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 do gradiente hidráulico observado e calculado no espaço unidimensional o qual é dado por:

$$\cos \varphi_j = \frac{|\nabla h_j^{obs}| \cdot |\nabla h_j^{calc}|}{|\nabla h_j^{obs}| \cdot |\nabla h_j^{calc}|} \quad (2)$$

Pela fórmula descrita acima, 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°, 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 ângulo for maior que 60° calcula-se  $C_j^{i+1}$  pela equação 1, senão repete-se o valor anterior, ou seja:

$$\begin{cases} \text{Se } \varphi < 60^\circ \Rightarrow C_j^{i+1} = C_j^i \cdot \frac{|\frac{v_{Bj}^{calc}}{v_{Bj}^{obs}}|}{|\frac{v_{Bj}^{calc}}{v_{Bj}^{obs}}|} \\ \text{Se } \varphi \geq 60^\circ \Rightarrow C_j^{i+1} = C_j^i \end{cases} \quad (3)$$

REDE EXEMPLO

A rede exemplo adotada por PORTO (1998) foi utilizada no modelo para verificar sua eficiência. A figura 1 representa a rede utilizada.

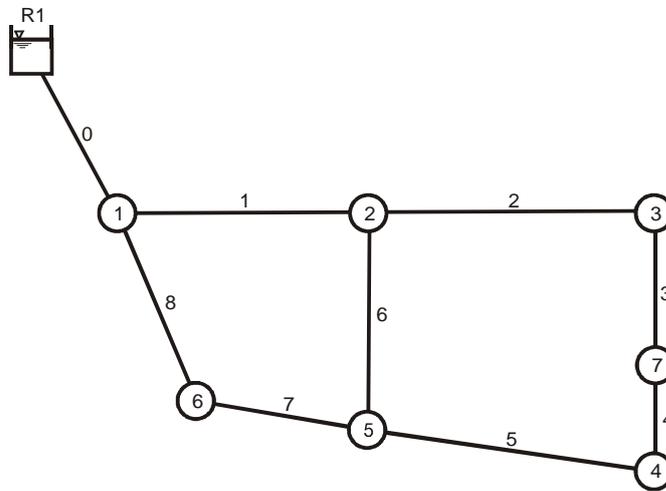


FIGURA 1 – Rede exemplo utilizada

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

A tabela 1 apresenta as cotas topográficas, em metros, dos nós da rede.

TABELA 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 2.



TABELA 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.

### ANÁLISE COMPARATIVA

A avaliação do desempenho do modelo de calibração será baseada nos critérios estabelecidos pelo WATER RESEARCH CENTRE (1989). Para os valores de pressão, o erro absoluto, que é a diferença entre o valor calibrado e o observado, deve estar dentro das seguintes faixas:

- $\pm 0.5$  m para 85% das medidas de pressão;
- $\pm 0.75$  m para 95% das medidas de pressão;
- $\pm 2.0$  m para 100% das medidas de pressão;

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.

A tabela 3 apresenta os testes realizados para os estudos comparativos deste trabalho.



TABELA 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	

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram considerados para a rede exemplo dois cenários de demandas nodais indicados na tabela 4.

TABELA 4 – 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 5.

TABELA 5 – 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

### 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 para cada configuração (MIGHA-C, MIGHA-M e MIGHA-O), em seguida, foi calculada a média, para cada tubo, das rugosidades obtidas das 12 calibrações. Finalmente foi obtida a média dos dois cenários.

A figura 2 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.

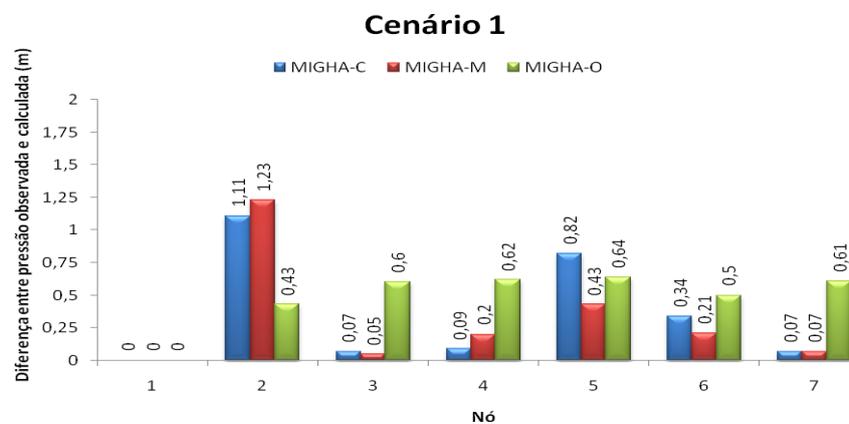


FIGURA 2 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando MIGHA-C, MIGHA-M e MIGHA-O para o cenário 1.

A figura 3 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.

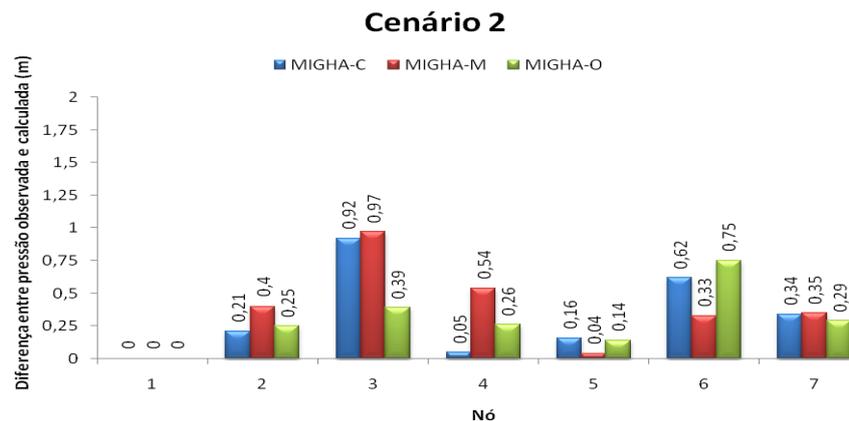


FIGURA 3 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados, utilizando MIGHA-C, MIGHA-M e MIGHA-O para o cenário 2.

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

Pela figura 4 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.

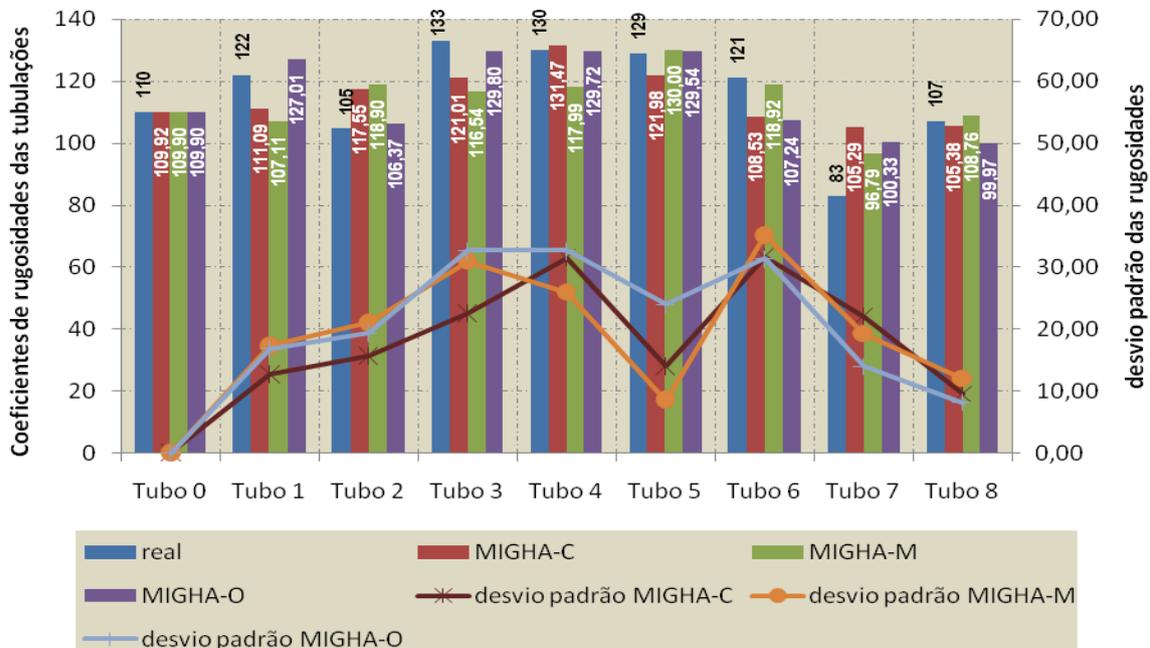


FIGURA 4 – Rugosidades médias e desvios padrões utilizando MIGHA-C, MIGHA-M e MIGHA-O.

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 5.

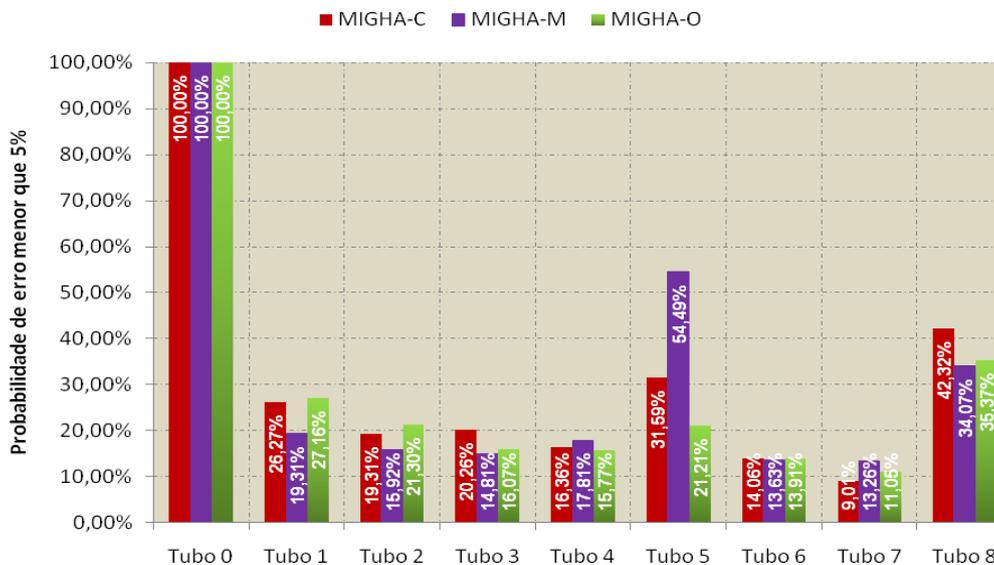


FIGURA 5 – Probabilidade de coeficiente de *Hazen-Williams* com erro menor que 5% para MIGHA-C, MIGHA-M e MIGHA-O.



### 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 pelo MIGHA-C;
- 4 calibrações realizando 100 iterações pelo MIGHA-O;
- 4 calibrações realizando 100 iterações pelo MIGHA-M.

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

$$\text{média } n \text{ pontos} = \frac{\text{média cenário 1} + \text{média cenário 2}}{2} \quad (4)$$

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.

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 6 apresenta os coeficientes de rugosidade médios dos trechos de acordo com o número de pressões medidas.

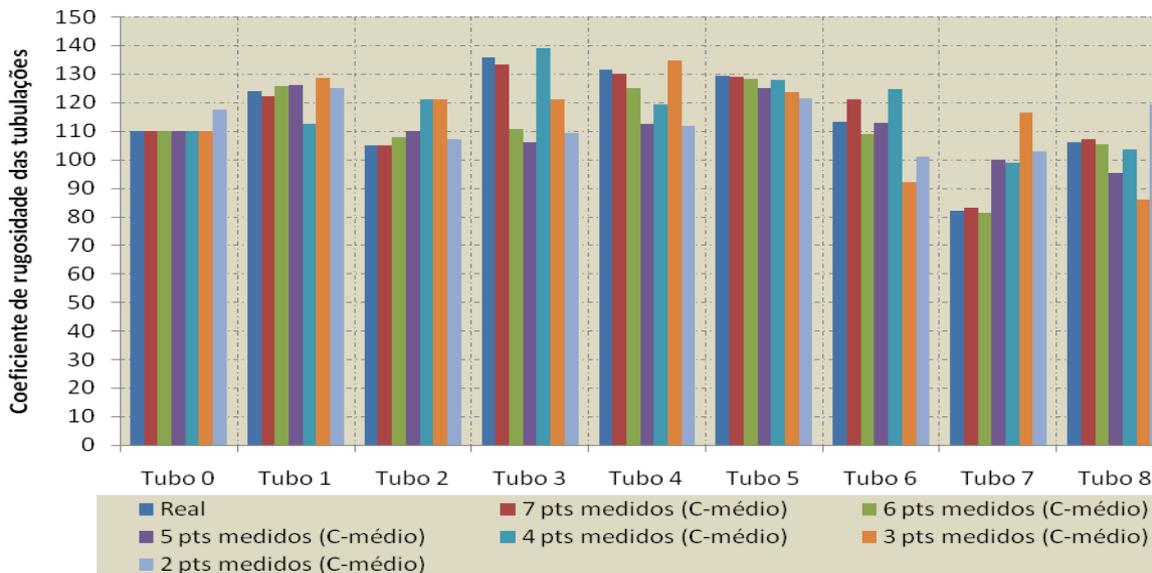
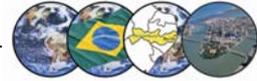


FIGURA 6 – Rugosidades médias de acordo com o número de pressões medidas.

A figura 6 evidencia os melhores resultados com no mínimo cinco pressões medidas, já que as probabilidades de acertos são maiores nesses casos.

### 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 1.

Neste item, propusemos, 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 5.

$$C = \left[ \frac{10,65 \left( \frac{Q}{1000} \right)^{1,95} D^{-4,87}}{J} \right]^{1/1,95} \quad (5)$$

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.

Os dados da figura 7 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.

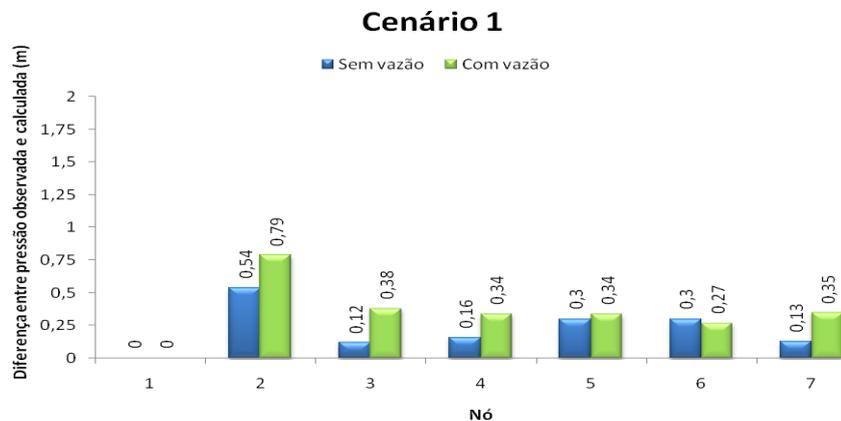


FIGURA 7 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões reais e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados *com* e *sem* vazão, para o cenário 1.

Os dados da figura 8 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.

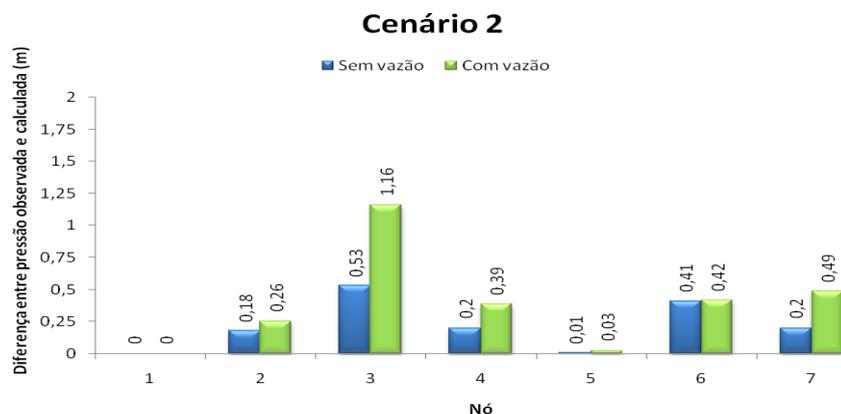


FIGURA 8 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões reais e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados *com* e *sem* vazão, para o cenário 2.



### 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 9.

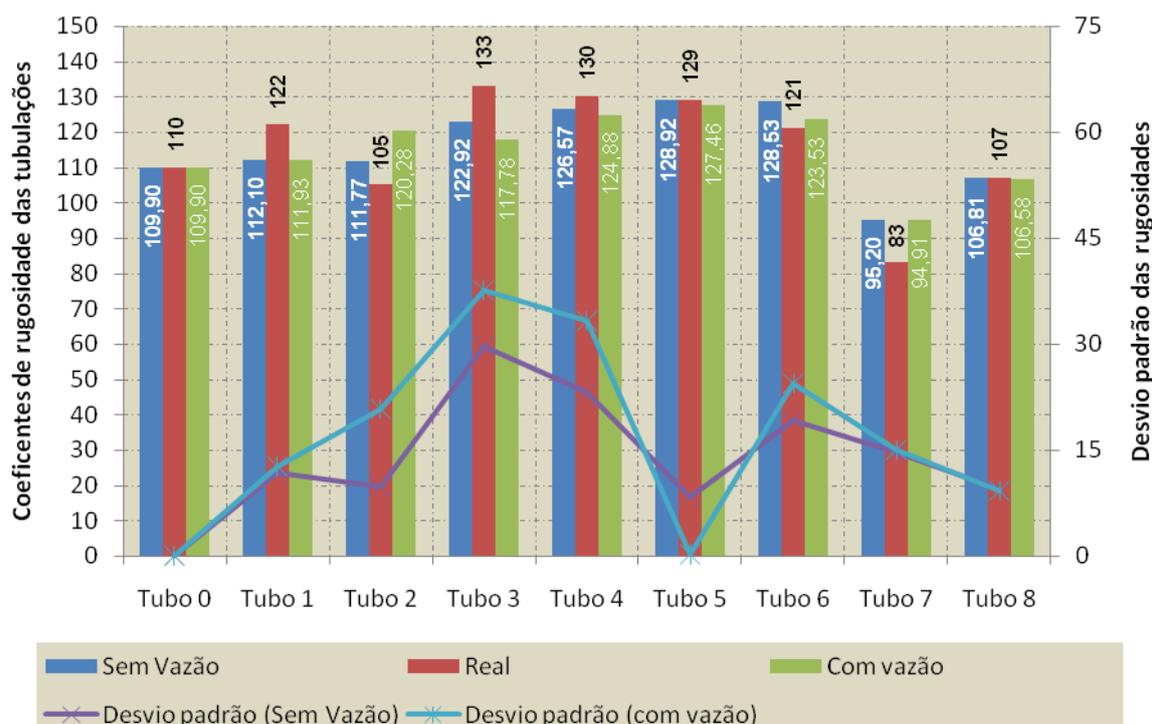


FIGURA 9 – Rugosidades médias e desvios padrões das calibrações *sem* e *com* vazão.

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 10 apresenta as probabilidades de erro nas calibrações *sem* e *com* vazão..

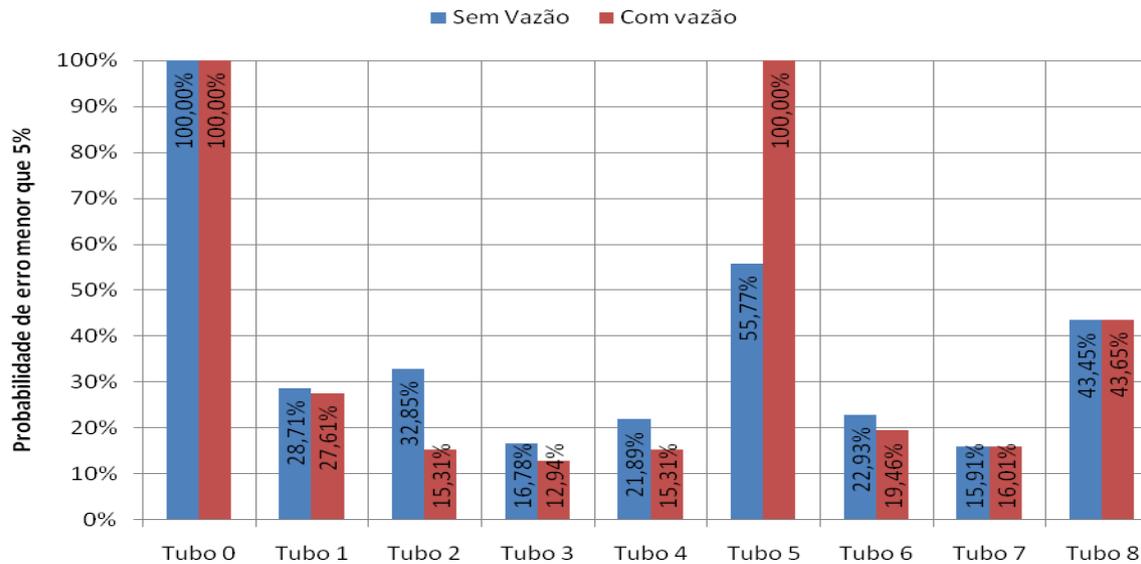


FIGURA 10 – Probabilidade de coeficiente de *Hazen-Williams* com erro menor que 5% para calibração *sem* e *com* vazão.

### Análise comparativa entre o MIGHA e o 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 11.

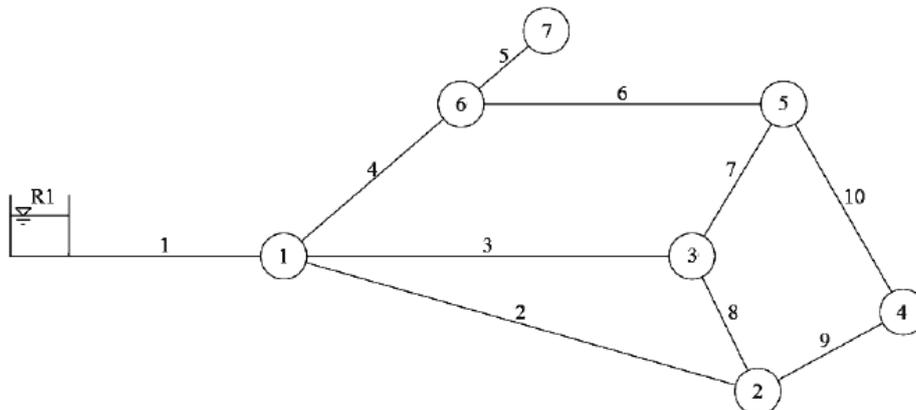


FIGURA 11 – Rede hipotética utilizada por SILVA (2006).

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 6 a seguir.



TABELA 6 – 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 7 a seguir.

TABELA 7 – 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 8.

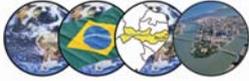
TABELA 8 – Pressões reais para os dois cenários de demandas da rede

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 9.

TABELA 9 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo MIGHA.

Calibração	Coeficiente de rugosidade calculado por tubo - C de Hazen-Williams ( $m^{0,3676}/s$ )									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
MED MIGHA	139,97	110,91	130,63	133,76	90,09	101,55	121,22	115,07	88,28	97,38
$\sigma$	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 10.

TABELA 10 – 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
□	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 a diferença entre a pressão real e a calculada em cada nó, para o cenário 1, apresenta-se na figura 12.

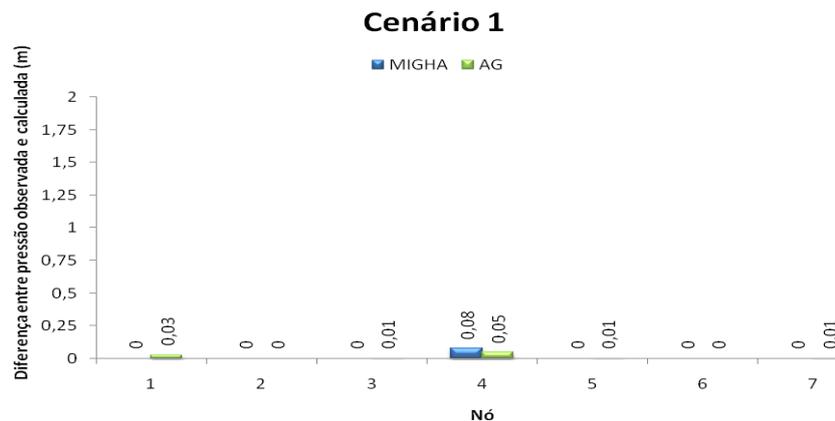


FIGURA 12 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões reais e simuladas com as médias dos coeficientes de *Hazen-Williams* calibrados com MIGHA e AG, para o cenário 1.

O resultado para a diferença entre a pressão real e a calculada em cada nó, para o cenário 2, apresenta-se na figura 13.

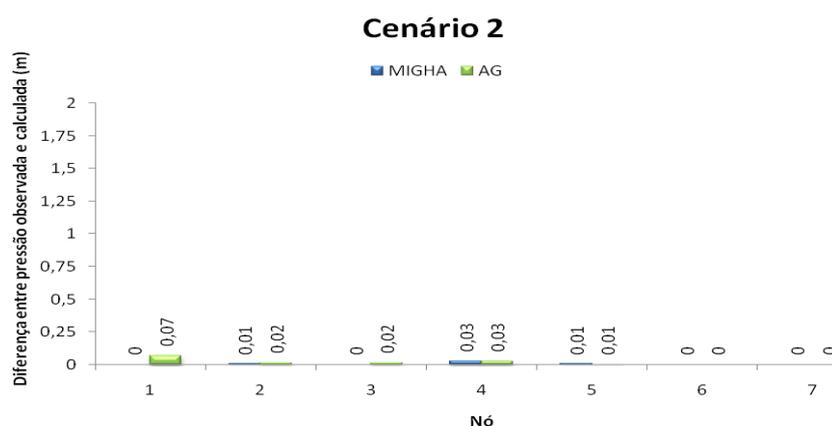


FIGURA 13 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões reais e simuladas com as médias dos coeficientes de Hazen-Williams calibrados com MIGHA e AG, para o cenário 2.

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 14 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.

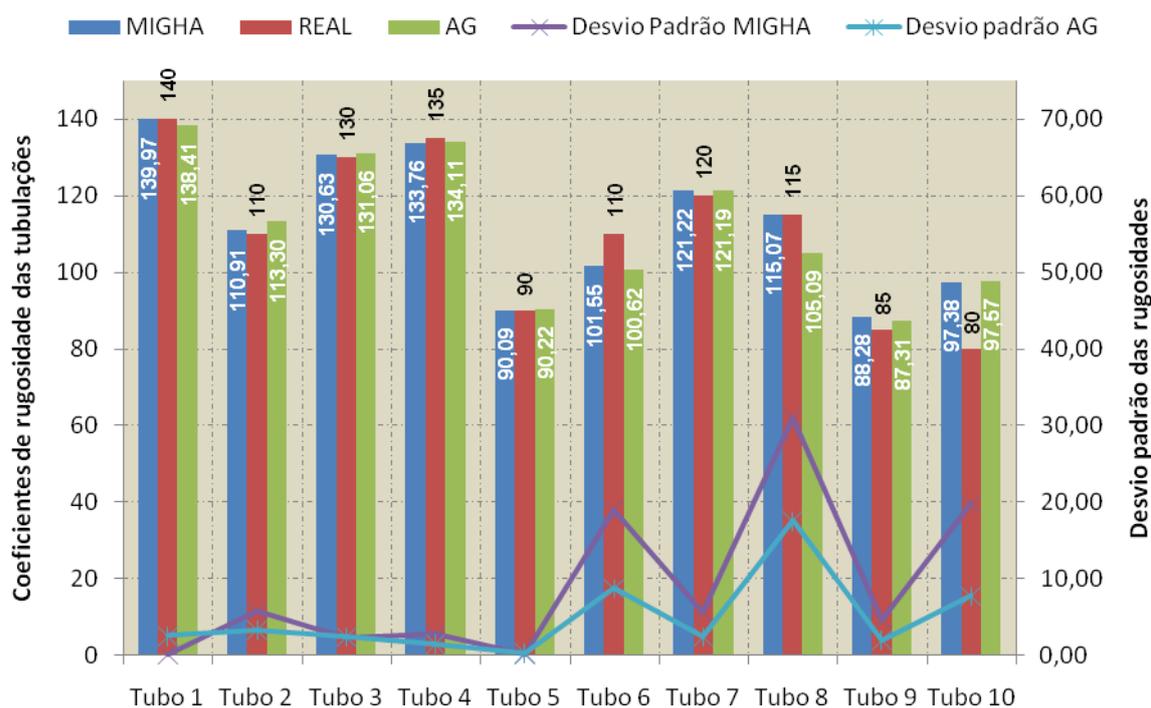


FIGURA 14 – Rugosidades médias e desvios padrões utilizando MIGHA e AG.

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 15 que o AG apresenta melhores resultados em relação à probabilidade de erro menor que 5% para as rugosidades calibradas.

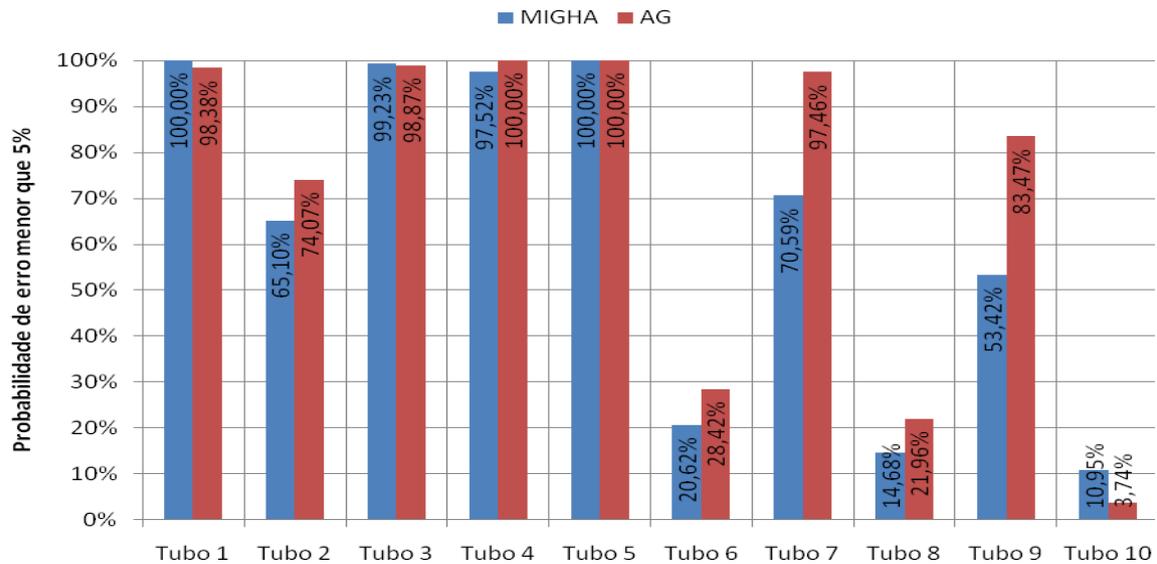


FIGURA 15 – Probabilidade de coeficiente de *Hazen-Williams* com erro menor que 5% para MIGHA e AG.

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.

## CONCLUSÕES

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.

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.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BHAVE, P. R. Calibrating water distribution network models. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 114, n. 1, p. 120-136, Feb, 1988.
2. 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.
3. 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.



4. 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.
5. 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.
6. PORTO, Rodrigo de Melo. **Hidráulica Básica**. 2 ed. São Paulo: EESC/USP, 1998, 540p.
7. ROSSMAN, L. A. **EPANET 2 Users manual**. U. S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, 2000.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. WALSKI, T. M. Technique for calibration network models. **Journal of water Resources Planning and Management**, v.109, n.4, p.360-372, oct, 1983a.
12. WATER RESEARCH CENTRE. **Network Analysis – A code for practice**. Published by WRC, Swindon, UK, 1989.