

CALIBRAÇÃO DE RUGOSIDADE EM REDES DE ABASTECIMENTO A PARTIR DE GRADIENTES HIDRÁULICOS ATRAVÉS DE MÉTODO ITERATIVO

Valder Adriano Gomes de Matos Rocha¹; Marco Aurélio Holanda de Castro² & John Kenedy Araújo³

RESUMO

O projeto e a operação de uma rede de distribuição de água dependem do conhecimento de todos os parâmetros envolvidos nos cálculos hidráulicos.

Os parâmetros hidráulicos têm que ser precisamente identificados para que os simuladores reproduzam o modelo com fidelidade, porém, a identificação desses parâmetros, torna-se difícil, em muitos casos. A rugosidade das tubulações é o de mais difícil determinação. Dificultam o cálculo da rugosidade: a incerteza dos dados de demanda nodais, a grande quantidade dos pontos de consumo entre outros fatores.

Faz-se necessária a elaboração de um estudo que busque a aplicação de um método simples, como o MIGHA (Método Iterativo de Gradiente Hidráulico Alternativo), para a estimativa do coeficiente de rugosidade de *Hazen-Williams* das tubulações das redes e que alcance melhores resultados, verificados a partir da minimização da diferença dos gradientes hidráulicos observados e calculados.

Uma programa foi desenvolvido para calibração das rugosidades das tubulações de redes utilizando o MIGHA. O estudo, realizado em uma rede hipotética, avalia 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 Ag's, sendo relatadas as diferenças entre eles.

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 determinate precisely for a real network of pipes. In order to determinate it with a certain degree of accuracy, a calibration process must be performed using field measured data such as pressure an 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.

PALAVRAS-CHAVE: Calibração, rugosidade, MIGHA.

1) Engenheiro Civil, mestre em Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Ceará, Doutorando em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará. **Endereço:** Av. Santos Dumont 6400 bl. C apto 1302. Bairro: Papicu. Fortaleza, CE - Brasil. CEP: 60190-800 - Brasil - Tel: (85) 9651.7475 / (85) 8744.9330 - e-mail: gomesdematos@hotmail.com

2) 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:** Universidade Federal do Ceará, centro de tecnologia, Departamento de Hidráulica. Campus do Pici, bloco 713 - 1º andar. CEP 60455-670 – Fortaleza, CE – Brasil – Caixa Postal: 6018, Tel: (85) 3366.9623 Fax: (85) 3366.9627- e-mail: marco@ufc.br

3) Engenheiro Civil, Doutor pela Universidade de São Paulo, USP – São Carlos. Professor Adjunto, Departamento de Enga. Hidráulica e Ambiental – Universidade Federal do Ceará. **Endereço:** Universidade Federal do Ceará, centro de tecnologia, Departamento de Hidráulica. Campus do Pici, bloco 713 - 1º andar. CEP 60455-670 – Fortaleza, CE – Brasil – Caixa Postal: 6018, Tel: (85) 3366.9624 Fax: (85) 3366.9627- e-mail: kenedy@ufc.br

INTRODUÇÃO

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.

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.

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

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) e (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.

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

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. O método 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.

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 configurações 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. Quando 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.

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:

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

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 $i+1$, $|\nabla h_j^{i\ calc}|$ 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 φ formado entre vetores do gradiente hidráulico observado e calculado no espaço unidimensional o qual é dado por:

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

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

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:

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

Rede exemplo

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

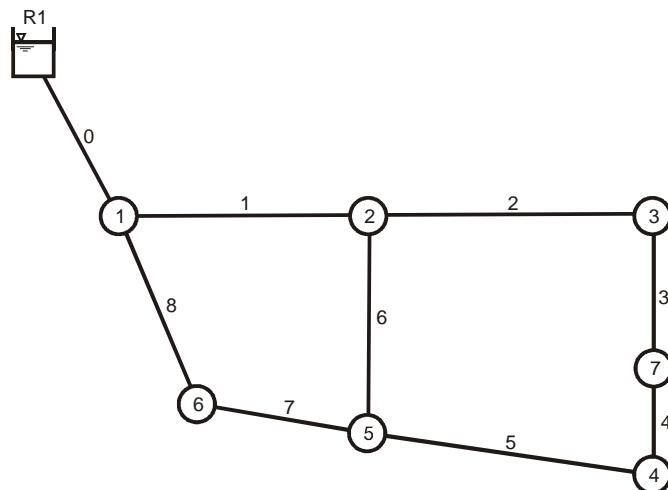


FIGURA 1 – Rede exemplo utilizada

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.

ANALISE 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:

- ± 0.5 m para 85% das medidas de pressão;
- ± 0.75 m para 95% das medidas de pressão;
- ± 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"> • Todos os pontos – sete pontos • Seis pontos medidos • Cinco pontos medidos • Quatro pontos medidos • Três pontos medidos • Dois pontos medidos
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 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, consequentemente, 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.

Os resultados apresentam-se nas tabelas e gráficos abaixo.

Todos os pontos medidos (sete pontos)

Os dados da tabela 6 e da figura 2 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 6 – 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

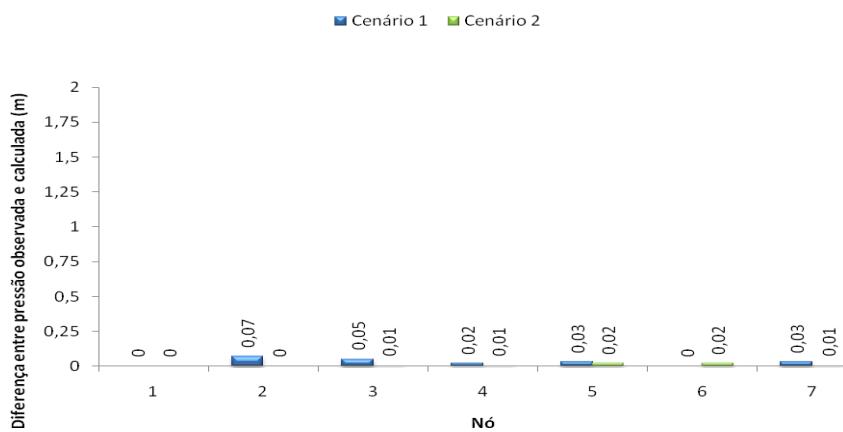


FIGURA 2 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de Hazen-Williams calibrados, utilizando sete pontos de pressão medida para os cenários 1 e 2.

Seis pontos medidos

TABELA 7 – 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)		diferença	Pressão (m)		diferença
	observada	calculada		observada	calculada	
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

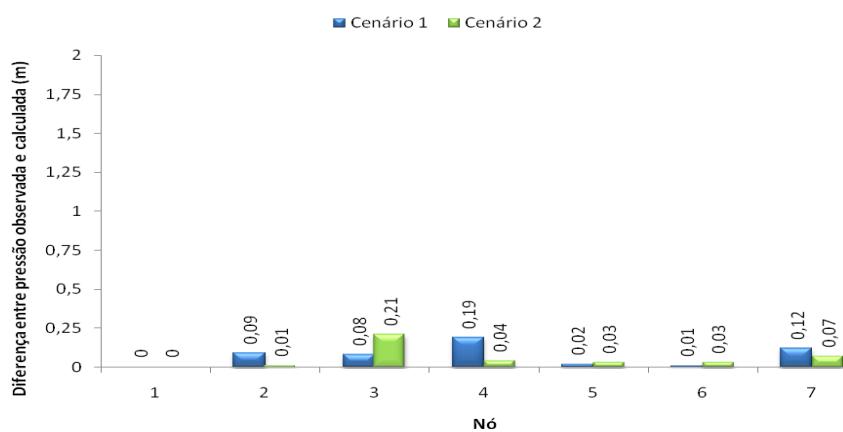


FIGURA 3 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de Hazen-Williams calibrados, utilizando seis pontos de pressão medida para os cenários 1 e 2.

Cinco pontos medidos

TABELA 8 – 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

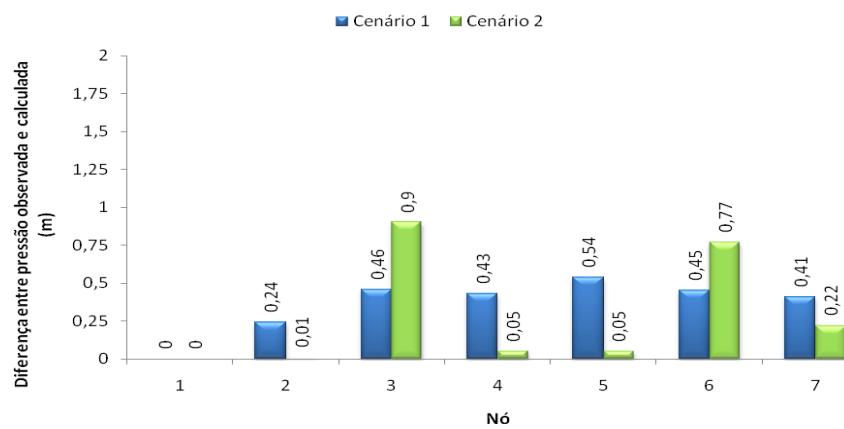


FIGURA 4– Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de Hazen-Williams calibrados, utilizando cinco pontos de pressão medida para os cenários 1 e 2.

Quatro pontos medidos

TABELA 9 – 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

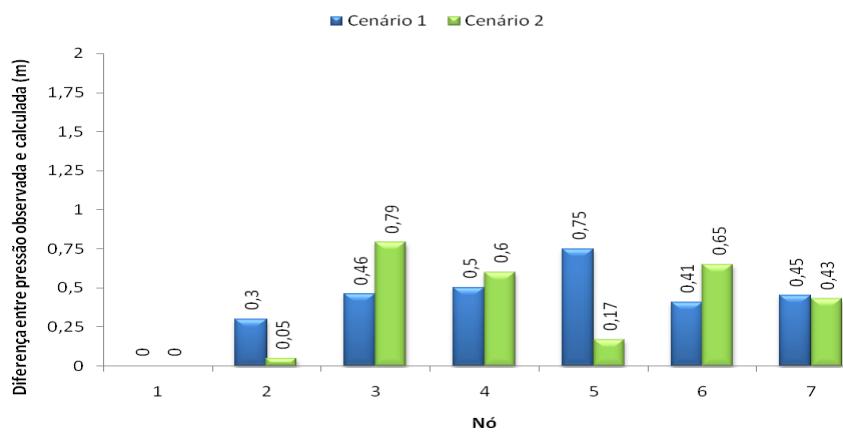


FIGURA 5 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de Hazen-Williams calibrados, utilizando quatro pontos de pressão medida para os cenários 1 e 2.

Três pontos medidos

TABELA 10 – 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

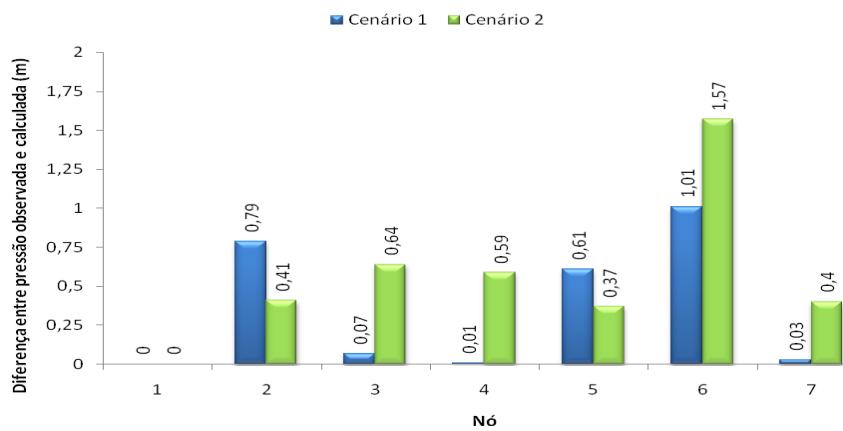


FIGURA 6 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de Hazen-Williams calibrados, utilizando três pontos de pressão medida para os cenários 1 e 2.

Dois pontos medidos

TABELA 11 – 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

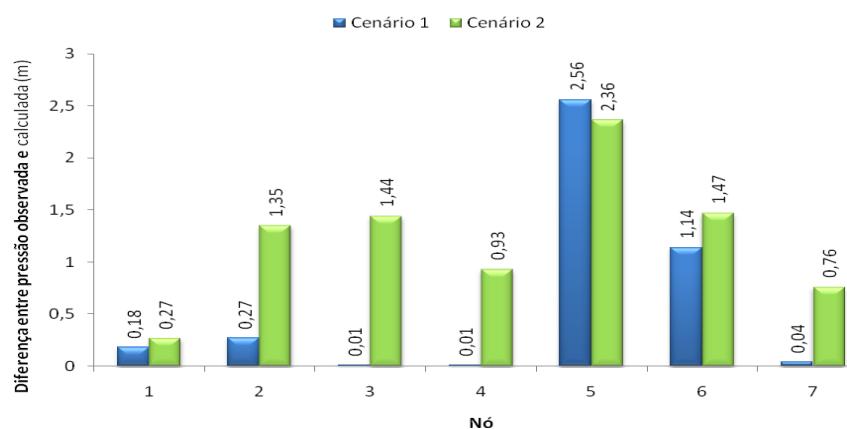


FIGURA 7 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões observadas e simuladas com as médias dos coeficientes de Hazen-Williams calibrados, utilizando dois pontos de pressão medida para os cenários 1 e 2.

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

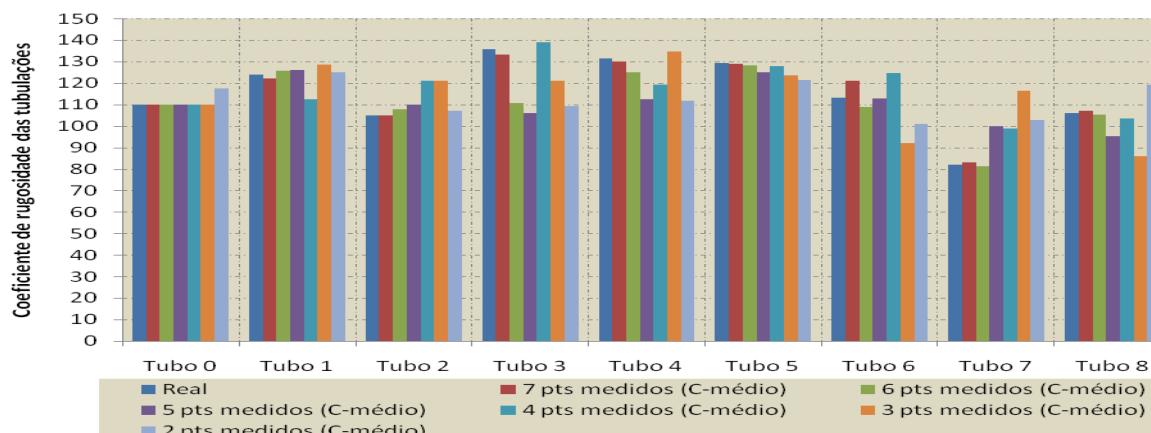


FIGURA 8 – Rugosidades médias de acordo com o número de pressões medidas.

O gráfico acima evidencia os melhores resultados com no mínimo cinco pressões medidas, já que as probabilidades de acertos são maiores nesses casos.

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 9.

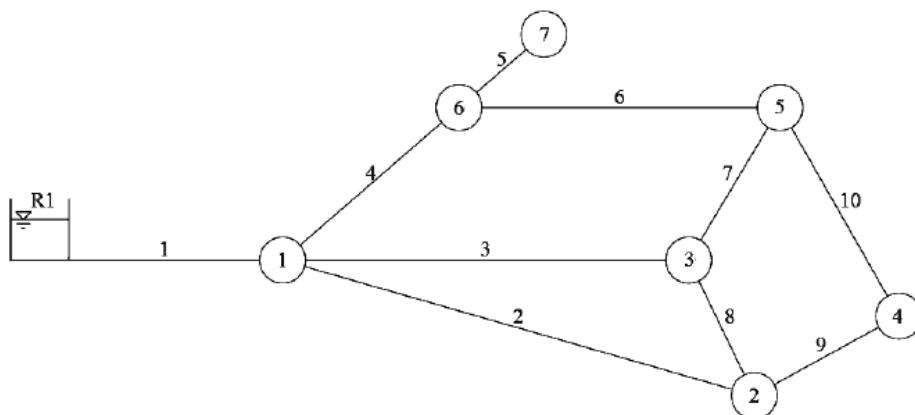


FIGURA 9 – Rede hipotética utilizada por SILVA (2006).

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 12 a seguir.

TABELA 12 – 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 13 a seguir.

TABELA 13 – 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 14.

TABELA 14 – 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 15.

TABELA 15 – 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
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 16.

TABELA 16 – Coeficientes de *Hazen-Williams* calculados pelo AG.

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 AG	138,41	113,30	131,06	134,11	90,22	100,62	121,19	105,09	87,31	97,57
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 a diferença entre a pressão real e a calculada em cada nó, para o cenário 1, apresenta-se na figura 10.

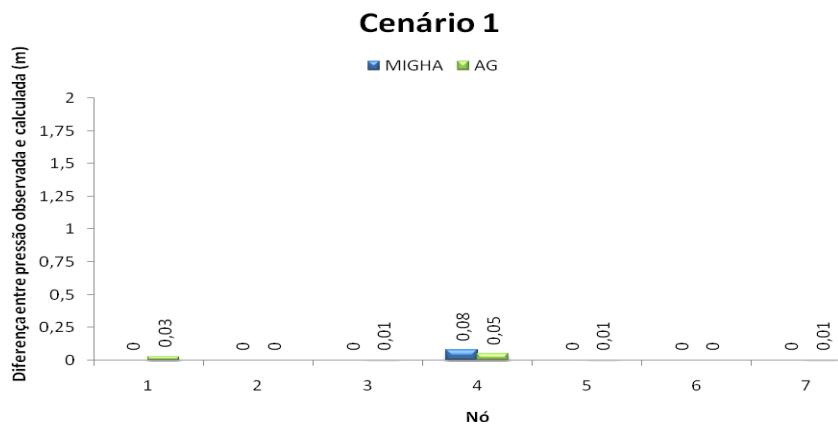


FIGURA 10 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões reais e simuladas com as médias dos coeficientes de Hazen-Williams calibrados com MIGHA e AG, para o cenário 1.

O resultado para a diferença entre a pressão real e a calculada em cada nó, para o cenário 2, apresenta-se na figura 11.

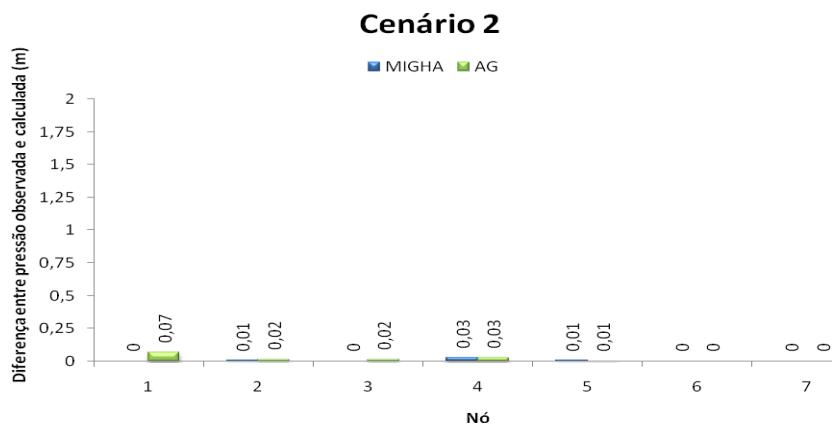


FIGURA 11 – Gráfico das diferenças absolutas entre pressões reais e simuladas com as médias dos coeficientes de Hazen-Williams calibrados com MIGHA e AG, para o cenário 2.

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

Pela figura 12 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.

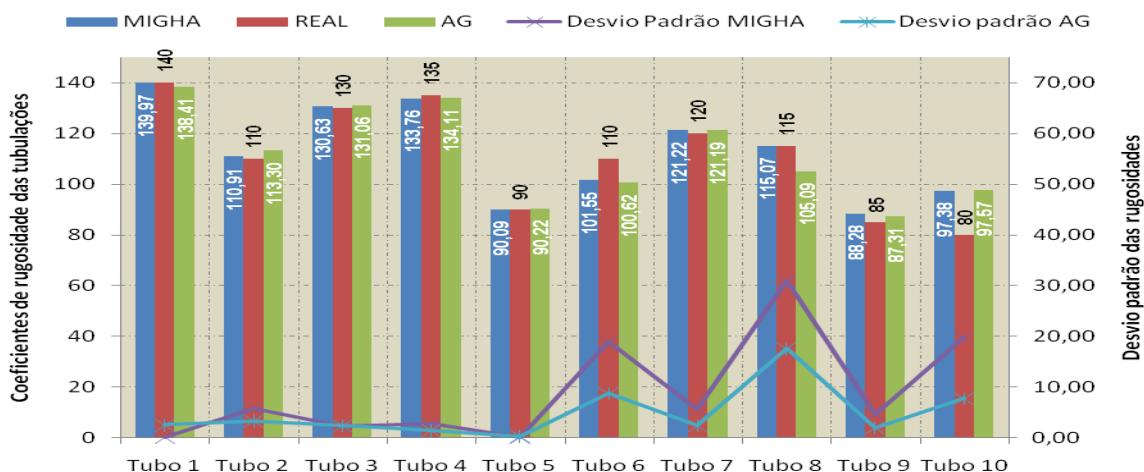


FIGURA 12 – Rugosidades médias e desvios padrões utilizando MIGHA e AG.

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

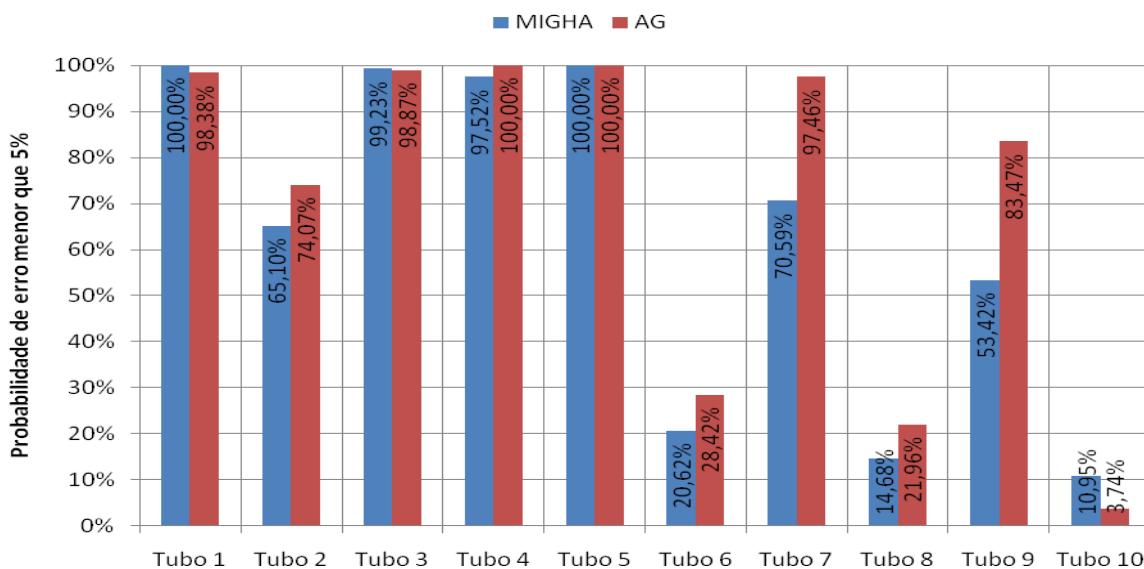


FIGURA 13 – Probabilidade de coeficiente de *Hazen-Williams* com erro menor que 5% para MIGHA e AG.

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.

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

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 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.

BIBLIOGRAFIA

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. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. PORTO, Rodrigo de Melo. *Hidráulica Básica*. 2 ed. São Paulo: EESC/USP, 1998, 540p.
8. ROSSMAN, L. A. *EPANET 2 Users manual*. U. S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, 2000.
9. 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.
10. 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 – ANA/GEF/PNUMA/OEA*, Salvador-BA, 59 p.
11. 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.
12. WALSKI, T. M. *Technique for calibration network models*. *Journal of water Resources Planning and Management*, v.109, n.4, p.360-372, oct, 1983a.
13. WATER RESEARCH CENTRE. *Network Analysis – A code for practice*. Published by WRC, Swindon, UK, 1989.