

**XII encontro nacional de águas urbanas
Calibração do fator de atrito em redes de abastecimento de água**

**XII national meeting of urban waters
Friction factor calibration in water supply networks**

DOI:10.34117/bjdv5n8-018

Recebimento dos originais: 14/07/2019

Aceitação para publicação: 15/08/2019

Alessandro de Araújo Bezerra

Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Ceará

Instituição: Universidade Federal do Piauí

Endereço: Centro de Tecnologia, *Campus* Universitário Ministro Petrônio Portela - Ininga,
Teresina – PI, Brasil

E-mail: alessandrobezerra@ufpi.edu.br

Marco Aurélio Holanda de Castro

PhD. pela Drexel University, USA

Instituição: Universidade Federal do Ceará

Endereço: Centro de Tecnologia - *Campus* do Pici, Fortaleza – CE, Brasil

E-mail: marco@ufc.br

Renata Shirley de Andrade Araújo

Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Ceará

Instituição: Universidade Federal do Piauí

Endereço: Centro de Tecnologia, *Campus* Universitário Ministro Petrônio Portela - Ininga,
Teresina – PI, Brasil

E-mail: renatashirley@ufpi.edu.br

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo a apresentação de uma aplicação da nova equação para calibração do fator de atrito de Darcy-Weisbach através do uso do Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo (MIGHA), em redes de distribuição de água. A equação é baseada na proporcionalidade entre o elemento calibrado, o fator de atrito, e o gradiente hidráulico. Após calibrado o fator de atrito de todos os trechos da rede, a rugosidade absoluta é calculada. O método foi aplicado através de um software desenvolvido com o auxílio da biblioteca Epanet2.dll como simulador hidráulico da rede. A rede considerada é uma rede fictícia que já apresenta resultados de calibração através da aplicação de outro método. Por fim, os resultados encontrados através da calibração com o MIGHA foram comparados com os resultados encontrados em um trabalho científico que utilizou o renomado método dos algoritmos genéticos. Através da comparação pôde-se perceber que o MIGHA não apresentou os melhores resultados, no entanto, os resultados podem ser considerados tão bons quanto os encontrados com uso dos algoritmos genéticos e com segundos como tempo de processamento.

Palavras-Chave: Fator de atrito; Calibração; MIGHA.

ABSTRACT

This paper aims to present an application of the new equation for Darcy-Weisbach friction factor calibration using the Alternative Hydraulic Gradient Iterative Method (MIGHA) in water distribution networks. The equation is based on the proportionality between the calibrated element, the friction factor, and the hydraulic gradient. After calibrating the friction factor of all sections of the net, the absolute roughness is calculated. The method was applied through software developed with the help of the Epanet2.dll library as a hydraulic network simulator. The considered network is a dummy network that already presents calibration results by applying another method. Finally, the results found by calibration with MIGHA were compared with the results found in a scientific work that used the renowned method of genetic algorithms. Through the comparison it could be seen that the MIGHA did not present the best results, however, the results can be considered as good as those found using the genetic algorithms and with seconds as processing time.

Keywords: Friction factor; Calibration; MIGHA

1 INTRODUÇÃO

A água é e sempre foi extremamente importante para a vida humana. Para Wolkmer e Pimmel (2013), a água é um patrimônio estratégico, sendo mais do que um recurso imprescindível ao desenvolvimento econômico e social, é um elemento vital para a conservação dos ecossistemas e da vida de todos os seres em nosso planeta. Dessa forma, as populações antigas buscavam viver o mais próximo possível desse tão importante recurso. Desprovidos de tecnologia avançada, este elemento precisava ser buscado em rios, córregos ou riachos para satisfazer as necessidades dos habitantes.

Já nos tempos atuais, dispõe-se de redes de distribuição de água. Estes elementos de um sistema de abastecimento tornam possível a distribuição de água em todas as residências onde vivem os consumidores deste recurso. As redes de distribuição de água são compostas de tubulações, conexões e outras peças acessórias com a finalidade de distribuir água ao consumidor final. Para Gomes e Formiga (2001), as redes de distribuição são os componentes responsáveis por levar a água ao usuário final, nos sistemas de abastecimento de água, de comunidades urbanas e rurais. Uma definição similar, porém mais antiga, foi proposta por Dacach (1967), para ele, uma rede de distribuição é um elemento que se constitui de tubulações que distribuem água, atendendo aos diversos pontos de consumo. Uma forma mais completa pode ser vista em Tsutiya (2006) e Heller e Pádua (2010), que definem rede de distribuição de água como a parte do sistema de abastecimento formada por tubulações e órgãos acessórios instalados em logradouros públicos com o objetivo de fornecer água potável em quantidade, qualidade, pressões adequadas e de forma contínua aos consumidores, sejam esses residenciais, comerciais, industriais ou de serviço.

Rao e Salomons (2007) explicam que cada rede de distribuição de água compreende uma configuração única de tubos interconectados, tanques de armazenamento, estações de bombeamento e câmaras de válvulas, que está sujeita a exigências muito variáveis que não podem ser previstas com grande grau de certeza. Ainda, as redes de distribuição são compostas por tubos e conexões que podem ser de vários materiais em que alguns destes materiais são muito lisos e apresentam rugosidades absolutas extremamente pequenas. Assim, na fabricação destes tubos, essas rugosidades não se apresentam de forma constante ao longo do tubo, além disso, cada tubo fabricado apresenta rugosidades diferentes, uma vez que a perfeita reprodução das rugosidades das tubulações é muito difícil. Isso explica o motivo de as pressões de funcionamento da rede não coincidir com as pressões previstas no simulador hidráulico.

Ao iniciar o funcionamento da rede, o atrito entre a água e as tubulações danifica os condutos, por este motivo existem limites máximos de velocidade. Com o limite máximo de velocidade atendido, o desgaste do conduto ocorre de forma lenta, no entanto, com o passar dos anos, esse desgaste se torna grande o suficiente para alterar de forma considerável a rugosidade das paredes das tubulações e, conseqüentemente, gerar variações nas pressões e vazões. Isso pode ocasionar o não atendimento adequado ao usuário do sistema pela rede de distribuição, atendimento este, previsto na simulação hidráulica da rede.

Assim, para que se possa simular, computacionalmente, de forma adequada uma rede de distribuição, seja esta uma rede recém implantada ou uma rede antiga, é necessário que haja a calibração dos coeficientes da rede de distribuição. Cheng e He (2011), afirmam que sem uma estimativa apropriada dos parâmetros, um modelo numérico não pode simular adequadamente a realidade, havendo, na prática, diferenças entre os comportamentos de modelos previstos e de sistemas reais em campo. A calibração de uma rede de distribuição visa à adequação de um modelo computacional para que este possa simular a rede estudada com base em dados observados da rede real.

Solomatine *et al.* (1999) consideram que o objetivo da calibração de qualquer modelo físico é encontrar parâmetros, em um modelo, os quais não são conhecidos a priori. Segundo Soares *et al.* (2004), a calibração visa ao ajuste dos parâmetros do sistema de tal forma que os desvios entre os dados simulados e observados em campo sejam minimizados. Cheng e He (2011) explicam que a calibração de modelos computacionais é definida como o processo de ajuste de dados descrevendo o modelo matemático do sistema até que os desempenhos observados, tipicamente pressões e taxas de fluxo, estejam razoavelmente de acordo com os desempenhos calculados por computador em uma ampla gama de condições operacionais.

Para Walski (1983), uma definição mais precisa para calibração de um modelo de distribuição de água consiste em um processo de dois passos, no qual, o primeiro, consiste na comparação de pressões e vazões calculadas com as observadas em condições de operação do sistema e, o segundo, no ajuste dos dados de entrada do modelo para que haja concordância entre o modelo calculado e o sistema observado.

Os métodos implícitos ou de otimização, que buscam a minimização de uma função objetivo, são muito utilizados nos processos de calibração. Entre estes métodos está o Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo (MIGHA) que foi desenvolvido para calibração da transmissividade no escoamento subterrâneo por Schuster e Araújo (2004) e, posteriormente, adaptado para redes de distribuição de água, primeiramente por Rocha *et al.* (2009), para a calibração do coeficiente C de Hazen-Williams.

Rocha *et al.* (2009) consideram o uso de redes de distribuição as quais foram chamadas de Rede Calculada e Rede Observada. No caso do uso de uma rede fictícia, os autores definiram, ainda, uma rede denominada Rede Gabarito.

Rede Calculada é a rede a qual serão realizados os cálculos hidráulicos e obtidos os resultados calculados. Parâmetros iniciais estimados são usados e, a cada iteração, com base no valor dos gradientes hidráulicos calculados obtidos nessa rede, esses parâmetros são alterados, gerando novos resultados, cada vez mais próximos dos medidos em campo.

Rede Observada é a rede que apresenta os mesmos parâmetros iniciais da rede calculada, no entanto, possui pressões fixadas de acordo com os dados conhecidos. Além disso, são obtidos valores de gradientes hidráulicos observados para cada trecho e, esses valores, podem ser diferentes a cada iteração, dependendo da forma de calibração do MIGHA utilizada;

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

Assim, o principal objetivo deste trabalho é a apresentação de uma aplicação da nova equação para calibração do fator de atrito de Darcy-Weisbach através do uso do Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo (MIGHA), apresentada em Bezerra *et al.* (2017), na rede de distribuição fictícia conhecida como Walski (1983) – Gambale (2000) e a comparação dos resultados com os resultados obtidos através de algoritmos genéticos no trabalho de Silva (2006).

2 METODOLOGIA

2.1 EQUAÇÃO MIGHA UTILIZADA PARA A CALIBRAÇÃO DO FATOR DE ATRITO

Como o fator de atrito f da fórmula universal da perda de carga é diretamente proporcional ao gradiente hidráulico, a adaptação MIGHA para a calibração do fator de atrito da equação de Darcy-Weisbach em redes de distribuição de água ocorre de acordo com a Equação 1.

$$f_j^{i+1} = f_j^i \left(\frac{|\nabla H_C^i|}{|\nabla H_O^i|} \right)^{-1} \quad (1)$$

1)

Em que f é o fator de atrito, i é o número da iteração, j é a identificação do trecho, ∇H_C é o gradiente hidráulico calculado e ∇H_O é o gradiente hidráulico observado.

Para o cálculo da rugosidade absoluta, esta foi isolada na fórmula de Swamee-Jain e apresentada na Equação 2, uma vez que o simulador hidráulico utilizado, o Epanet, utiliza esta equação para o cálculo do fator de atrito.

$$\varepsilon = \frac{3,7D \times (\text{Rey}^{0,9} - 5,74 \times 10^{0,5/\sqrt{f}})}{\text{Rey}^{0,9} \times 10^{0,5/\sqrt{f}}} \quad (2)$$

2)

O software desenvolvido realiza a calibração através do fluxograma apresentado na Figura 1.

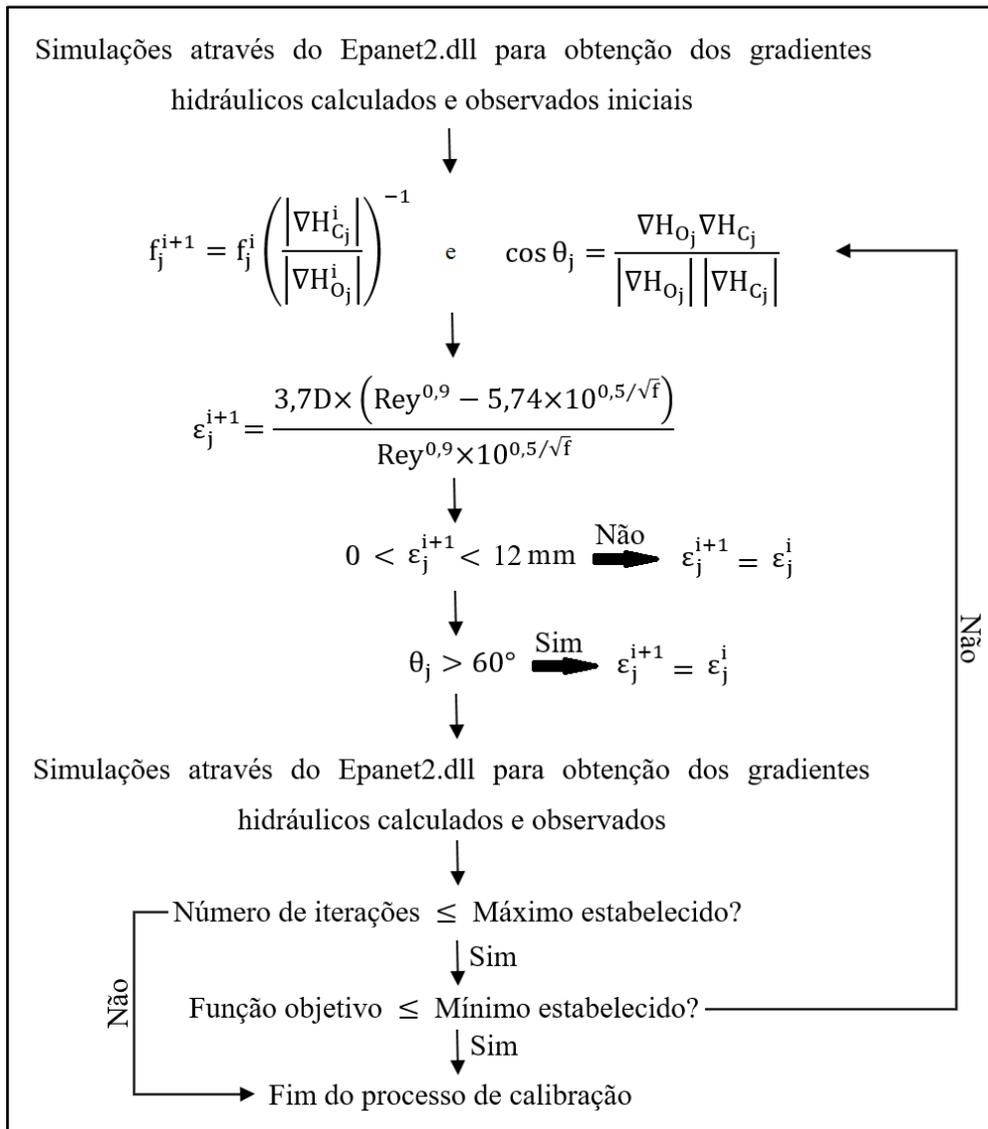


Figura 1 – Fluxograma do processo MIGHA para a calibração do fator de atrito e cálculo da rugosidade absoluta de Darcy-Weisbach

2.2 REDE DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZADA

A rede de distribuição utilizada, apresentada na Figura 2, é do tipo malhada e foi proposta por Walski (1983) e modificada por Gambale (2000). A rede apresenta 10 trechos e 7 nós. Os gabaritos referentes aos trechos e nós desta rede são apresentados nas Tabelas 1 e 2. As simulações realizadas para obtenção do gabarito tinham como cota do nível d'água do reservatório o valor 60,0 m.

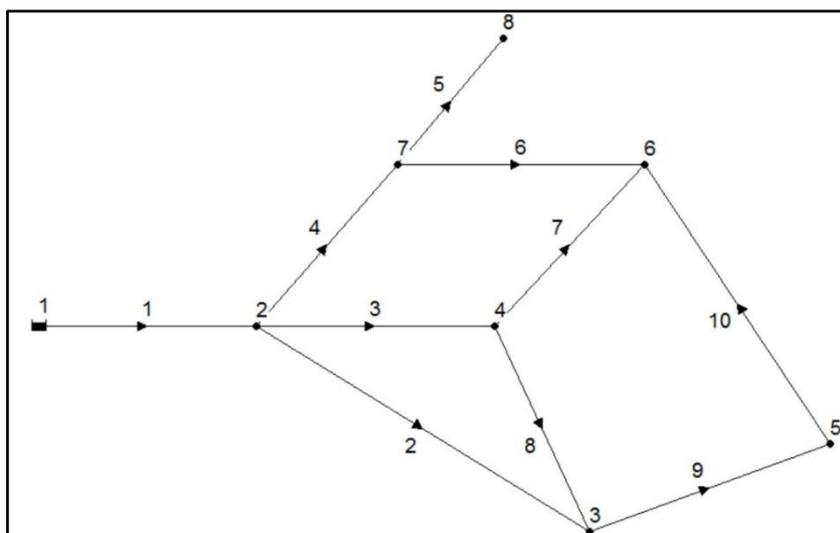


Figura 2 – Rede Walski (1983) – Gambale (2000)

Tabela 1 – Gabarito referente aos trechos: Rede Walski (1983) – Gambale (2000)

| Nome | 1° Nó | 2° Nó | Comp. (m) | Diâmetro (mm) | Rug. abs. (mm) | Vazão (L/s) | Velocidade (m/s) | Gradiente Hidráulico |
|------|----------|----------|--------------|------------------|----------------------|----------------|---------------------|-------------------------|
| 1 | 1 | 2 | 700 | 500 | 0,09 | 363,5 | 1,85 | 0,00511 |
| 2 | 2 | 3 | 1800 | 250 | 1,2 | 41,9 | 0,85 | 0,00455 |
| 3 | 2 | 4 | 1520 | 400 | 0,2 | 188,68 | 1,5 | 0,00507 |
| 4 | 2 | 7 | 1220 | 300 | 0,12 | 132,92 | 1,88 | 0,01022 |
| 5 | 7 | 8 | 600 | 300 | 4,8 | 37,5 | 0,53 | 0,00216 |
| 6 | 7 | 6 | 1220 | 200 | 1,2 | 15,42 | 0,49 | 0,00204 |
| 7 | 4 | 6 | 920 | 250 | 0,5 | 62,15 | 1,27 | 0,00789 |
| 8 | 4 | 3 | 300 | 150 | 1 | 6,53 | 0,37 | 0,00162 |
| 9 | 5 | 3 | 600 | 200 | 6,5 | -12,43 | 0,4 | 0,00238 |
| 10 | 6 | 5 | 1220 | 100 | 7,8 | -2,43 | 0,31 | 0,00438 |

Tabela 2 – Gabarito referente aos nós: Rede Walski (1983) – Gambale (2000)

| Nó | Consumo (L/s) | Carga Hidráulica (m) | Pressão (m) |
|----|---------------|----------------------|-------------|
| 2 | 0 | 56,44 | 56,42 |
| 3 | 36 | 48,37 | 48,24 |
| 4 | 120 | 48,72 | 48,72 |
| 5 | 10 | 47,03 | 46,81 |

| | | | |
|---|------|-------|-------|
| 6 | 80 | 41,8 | 41,46 |
| 7 | 80 | 44,12 | 43,95 |
| 8 | 37,5 | 42,88 | 42,66 |

2.3 COMPARAÇÃO ENTRE O MIGHA E ALGORITMOS GENÉTICOS

Utilizando o MIGHA, os fatores de atrito dos trechos da rede de distribuição foram calibrados e suas rugosidades absolutas foram calculadas através da fórmula de Swamee-Jain. A calibração através do MIGHA se deu com a utilização de uma rugosidade absoluta igual a 0,006 mm em todos os trechos da rede trabalhada. Foram considerados um número máximo de 100 iterações.

Já em Silva (2006), utilizando algoritmos genéticos, o autor calibrou a rugosidade absoluta de Darcy-Weisbach. Para este elemento da rede calibrado, os parâmetros utilizados pelo autor foram substituição de indivíduos do tipo steady-state, seleção tipo torneio, mutação gaussiana, recombinação aleatória dos operadores a cada geração e uma população de 2.000 indivíduos com 100 gerações.

Nos dois casos foram consideradas pressões conhecidas em todos os nós da rede.

3 RESULTADOS

Para a calibração da rugosidade absoluta através de Algoritmos Genéticos e calibração do fator de atrito com uso do MIGHA, tanto as pressões quanto as rugosidades absolutas encontradas com uso da equação MIGHA utilizada neste trabalho foram piores que as encontradas em Silva (2006), com uso de Algoritmos Genéticos. Na Tabela 3 pode ser vista a comparação entre as pressões encontradas com calibrações realizadas com uso de Algoritmos Genéticos e obtidas através do MIGHA, além de seus erros relativos.

Tabela 3 – Comparação entre as pressões encontradas com calibrações realizadas com uso de Algoritmos Genéticos e obtidas através do MIGHA

| Pressões (m) | | | | | |
|---------------------|-----------------|-----------|--------------|--------------------|-----------------------|
| Nó | Gabarito | AG | MIGHA | Erro (%) AG | Erro (%) MIGHA |
| 2 | 56,42 | 56,42 | 56,43 | 0,00 | 0.02 |
| 3 | 48,24 | 48,21 | 48,37 | 0,06 | 0.27 |
| 4 | 48,72 | 48,73 | 48,72 | 0,02 | 0.00 |
| 5 | 46,81 | 46,77 | 47,03 | 0,09 | 0.47 |

| | | | | | |
|------------------------|-------|-------|-------|-------------|-------------|
| 6 | 41,46 | 41,42 | 41,8 | 0,10 | 0.82 |
| 7 | 43,95 | 43,95 | 44,12 | 0,00 | 0.39 |
| 8 | 42,66 | 42,66 | 42,88 | 0,00 | 0.52 |
| Erro (%) médio: | | | | 0,04 | 0,35 |

A comparação entre as rugosidades absolutas encontradas, além de seus erros relativos, entre as duas metodologias pode ser vista na Tabela 4.

Tabela 4 – Comparação entre as rugosidades absolutas encontradas com calibrações realizadas com uso de Algoritmos Genéticos e obtidas através do MIGHA

| Trecho | Gabarito | AG | MIGHA | Erro (%) AG | Erro (%) MIGHA |
|------------------------|-----------------|-----------|--------------|--------------------|-----------------------|
| 1 | 0,09 | 0,091 | 0,088 | 1,11 | 2,51 |
| 2 | 1,2 | 1,092 | 0,483 | 9,00 | 59,74 |
| 3 | 0,2 | 0,19 | 0,221 | 5,00 | 10,62 |
| 4 | 0,12 | 0,135 | 0,150 | 12,50 | 24,93 |
| 5 | 4,8 | 4,759 | 4,253 | 0,85 | 11,39 |
| 6 | 1,2 | 2,307 | 4,372 | 92,25 | 264,35 |
| 7 | 0,5 | 0,455 | 0,346 | 9,00 | 30,83 |
| 8 | 1 | 1,424 | 7,659 | 42,40 | 665,91 |
| 9 | 6,5 | 5,614 | 2,228 | 13,63 | 65,72 |
| 10 | 7,8 | 3,717 | 0,105 | 52,35 | 98,65 |
| Erro (%) médio: | | | | 23,81 | 123,47 |

Percebe-se que, apesar de as pressões encontradas com a calibração realizada através do MIGHA possuírem valores mais distantes do gabarito que as encontradas através de Algoritmos Genéticos, exceto para o nó 4, os erros relativos calculados são menores que 1% em todos os nós, ou seja, apesar de o pior entre os testados, os resultados ainda são bons. Já no caso das rugosidades absolutas encontradas, os resultados calculados através do MIGHA não foram melhores em nenhum trecho da rede e, de forma geral, não foram bons com o uso de nenhum dos dois métodos, sendo, pior, quando calculados através do MIGHA.

Assim, percebe-se que, apesar de gerar excelentes resultados para as pressões, o método proposto não obteve as melhores rugosidades. No entanto, é válido considerar que o método MIGHA foi comparado com os melhores resultados obtidos por Silva (2006). Além disso, já

é sabido que há uma necessidade de um elevado tempo de processamento do uso do Método de Algoritmos Genéticos e, para a calibração da rede Walski (1983) – Gambale (2000) com uso do MIGHA, o tempo de processamento foi inferior a 3 segundos, sendo necessário 4 iterações para chegar ao valor de função objetivo igual a 0,0000000001.

4 CONCLUSÕES

O MIGHA foi comparado com a metodologia de Algoritmos Genéticos e, pôde-se perceber que as melhores pressões foram encontradas através de Algoritmos Genéticos, no entanto, as diferenças entre as pressões calculadas através do MIGHA e as pressões observadas/gabarito foram menores que 1%, o que mostra que, apesar de não ser o melhor resultado, este também foi muito bom. Quanto as rugosidades encontradas, os resultados foram inferiores aos de Algoritmos Genéticos, entretanto, com um tempo de processamento bem melhor. Assim, o uso do MIGHA não gera os melhores resultados, mas bons resultados em pouco tempo.

REFERÊNCIAS

- BEZERRA, A. A.; CASTRO, M. A. H.; ARAÚJO, R. S. A. (2017). “*Absolute roughness calculation by the friction factor calibration using the Alternative Hydraulic Gradient Iterative Method on water distribution networks*”. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. v. 22, e24.
- CHENG, W.; HE, Z. (2011). “*Calibration of Nodal Demand in Water Distribution Systems*.” Journal of Water Resources Planning and Management. v. 137, n. 1, pp. 31-40.
- DACACH, N. G. (1967). “*Modalidades de r edes p ublicas de  gua*.” Revista DAE. v. 27, n. 66, pp. 10-16.
- GAMBALE, S. R. (2000). *Aplic a o de algoritmo genético na calibra o de rede de  gua*. Disserta o (Mestrado em Recursos Hídricos) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 266 p.
- GOMES, H. P.; FORMIGA, K. T. M. (2001). “*PNL2000 – Método Prático de Dimensionamento Econ mico de Redes Malhadas de Abastecimento de  gua*.” Revista DAE. v. 6, n. 4, pp. 91-108.
- HELLER, L.; PÁDUA, V. L. (2010). *Abastecimento de água para consumo humano*. v. 2, 2. ed., Belo Horizonte: Editora UFMG.

- RAO, Z.; SALOMONS, E. (2007). "Development of a real-time, near-optimal control process for water-distribution networks." *Journal of Hydroinformatics*. v. 9, n. 1, pp. 25-37.
- ROCHA, V. A. G. M.; CASTRO, M. A. H.; ARAÚJO, J. K. (2009). "Calibração de Rugosidade em Redes de Abastecimento a Partir de Gradientes Hidráulicos Através de Método Iterativo" in *Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. 2009.
- SCHUSTER, H. D. M.; ARAÚJO, H. D. B. (2004). "Uma Formulação Alternativa do Método Iterativo de Gradiente Hidráulico no Procedimento de Calibração dos Parâmetros Hidrodinâmicos do Sistema Aquífero." *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. v. 9, n 2, pp. 31-37.
- SILVA, A. C. A. (2006). *Calibração automática de rugosidades de tubulações em sistemas de distribuição de água com aplicação de algoritmos genéticos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: área de concentração em Recursos Hídricos) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 176 p.
- SOARES, A. K.; CHEUNG, P. B.; REIS, L. F. R.; SANDIM, M. P. (2004). "Avaliação das perdas físicas de um setor da rede de abastecimento de água de Campo Grande-MS via modelo inverso." *Engenharia Sanitária e Ambiental*. v. 9, n. 4, pp. 312-321.
- SOLOMATINE, D. P.; DIBIKE, Y. B.; KUKURIC, N. (1999). "Automatic calibration of groundwater models using global optimization techniques." *Hydrological Sciences Journal*. v. 44, n. 6, pp. 879-894.
- TSUTIYA, M. T. (2006). *Abastecimento de Água*. 3. ed., São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- WALSKI, T. M. (1983). "Technique for Calibrating Network Models." *Journal of Water Resources Planning and Management*. v. 109, n. 4, pp. 360-372.
- WOLKMER, M. F. S.; PIMMEL, N. F. (2013). "Política Nacional de Recursos Hídricos: governança da água e cidadania ambiental." *Sequência: Estudos Jurídicos e Políticos*. v. 34, n. 67, pp. 165-198.