

Estudo de Calibração de Rugosidades em Rede de Distribuição de Água do Bairro Jardim América – MG

Ana Carolina Nascimento Santos*, Fernando das Graças Braga da Silva*

ana_carolsanto@yahoo.com.br, ffbraga.silva@gmail.com

Recebido: 16/06/10 - revisado: 07/12/12 - aceito: 20/03/13

RESUMO

Os recursos hídricos vêm se tornando cada vez mais escassos em termos de qualidade e quantidade principalmente a proximidade de grandes centros urbanos. As redes de distribuição urbanas são grandes consumidores de água e normalmente apresentam deficiências em seu pleno funcionamento ocasionando muitas perdas de água. Uma das principais frentes a serem abordadas está na operação adequada do sistema. Entretanto a etapa que precede esta atividade está relacionada à calibração da rede. Neste estudo foi aplicado uma metodologia de calibração proposta por Silva (2003) a um sistema de distribuição da Cidade de Itajubá- M.G. em que se ajustam os valores de rugosidades a partir de principalmente valores de pressões medidos e simulados; destacando-se o pioneirismo deste estudo na região. Tais resultados mostraram-se coerentes em termos de parâmetros ajustados e de valores de pressões e análise de rugosidades.

Palavras-chaves: Redes de distribuição de água. Calibração. Algoritmos genéticos.

INTRODUÇÃO

Sabe-se que apesar dos investimentos de algumas companhias de água no sentido de prestarem melhores serviços, a grande maioria das redes de abastecimento de água ainda é gerenciada por profissionais sem formação adequada para tal, não havendo controle efetivo de perdas, e os dados cadastrais não são confiáveis, ficando evidente a necessidade de modernização do setor de abastecimento de água diante das exigências impostas pelas sociedades urbanas da atualidade, especialmente induzidas pelos processos de democratização e conscientização ecológica.

Graças ao desenvolvimento computacional das últimas décadas, modelos matemáticos cada vez mais complexos têm possibilitado o surgimento de técnicas avançadas nas questões relacionadas ao projeto e dimensionamento ótimo de redes de distribuição de água, incluindo o problema do controle operacional das perdas físicas.

Para a operação adequada de um sistema de abastecimento de água é necessário que sejam conhecidos os parâmetros dos componentes da rede como coeficiente de atrito, diâmetro, resistência ao escoamento, entre outros. Tais parâmetros se modi-

ficam com o tempo e são de difícil medição, para resolver este problema muitos pesquisadores têm desenvolvido ferramentas de calibração obtendo resultados animadores e apontando tais ferramentas como o diferencial no controle operacional de sistemas de distribuição de água.

A calibração é uma técnica que busca estimar valores para as variáveis desconhecidas de um sistema com o auxílio de outras ferramentas como simulador hidráulico e técnicas de otimização, entre as técnicas de otimização utilizadas destaca-se os algoritmos genéticos, que por sua robustez conseguem encontrar soluções ótimas ou próximas da ótima em um menor tempo computacional. Deste modo, avalia-se que a calibração é a uma etapa fundamental para se poder ter o domínio computacional de uma rede de distribuição de água para abastecimento, sendo o enfoque deste trabalho relacionado a aplicação da calibração a uma rede real.

Atualmente alguns trabalhos sobre o tema foram apresentados, muitos deles considerando a modelagem de vazamentos e os algoritmos genéticos como ferramenta de otimização, podendo citar: Brown (2007), Colombo (2007), Neves (2007), Silva (2003), Soares (2003, 2007), Wu (2008) e Wu e Sage (2006).

O objetivo principal do presente trabalho é realizar a calibração de uma rede de distribuição de água da cidade de Itajubá-MG utilizando o modelo proposto por Silva (2003). Este modelo utiliza o

*Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Instituto de Recursos Naturais – IRN

procedimento inverso, também conhecido como implícito, para calibrar o sistema, avaliar a eficiência hidráulica, e otimizar a operacionalização da rede. O procedimento inverso consiste na minimização da diferença dos valores de alguns parâmetros simulados e medidos do sistema de distribuição de água, no caso pressão.

METODOLOGIA

Rede do estudo

A rede selecionada para o estudo faz parte do sistema que abastece o bairro Jardim América e parte do bairro Por do Sol localizados na cidade de Itajubá-MG.

A escolha foi feita principalmente por este setor ser isolado do sistema e dispor de relativa confiabilidade no cadastro, além de disso, foi possível contar com alguns dados iniciais como uma parte do traçado da rede, obtido nos trabalhos de Alves (2006) e Valadão (2006).

Após escolhida a rede foram levantadas informações relativas ao sistema na companhia de água e esgoto (COPASA) tais como: consumo residencial mensal, traçado da rede, definição de materiais da tubulações, diâmetros, dispositivos hidráulicos etc.

O esquema da figura 1 ilustra os números representam os nós da rede, o círculo representa o reservatório que abastece todo o setor estudado. Observa-se uma nova ligação feita a partir do nó 21. Foram nomeados os nós da rede em um total de 21.

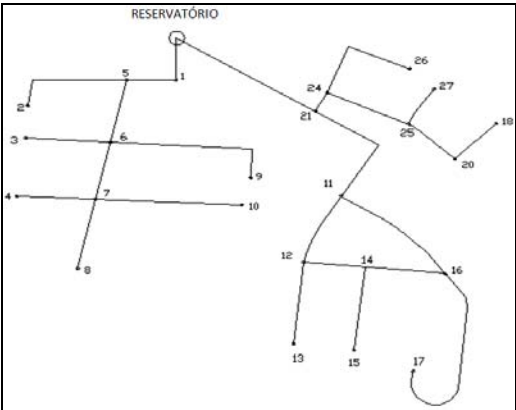


Figura 1 – Rede de distribuição estudada

O nível do reservatório é de 947, 0 metros, sendo a cota de 943,00 metros. Na sequência é apresentada a tabela 1 com os dados relativos aos trechos da rede de água.

Tabela 1 – Valores de comprimento de diâmetro dos trechos da rede em estudo

Nó inicial	Nó final	Comprimento (m)	diâmetro (mm)
1	5	51,97	50
1	19	83,92	50
2	5	129,72	50
3	6	87,50	50
4	7	86,57	50
5	6	66,19	50
6	7	64,89	50
6	9	166,84	50
7	8	135,93	50
7	10	75,00	50
11	12	84,52	50
11	16	139,18	50
11	21	99,62	75
12	13	96,25	50
12	14	60,96	50
14	15	95,00	50
14	16	84,30	50
16	17	212,91	50
18	20	78,13	50
19	23	2,00	50
20	25	89,50	40
21	23	218,3	75
21	24	33,21	50
22	23	2,00	75
22	28	1,00	100
24	25	119,18	50
24	26	164,00	50
25	27	63,00	50

A tabela 2 ilustra os valores de cotas e demanda dos nós relativos a rede em estudo.

Tabela 2 – Valores de cotas e demandas nos nós

Nó	COTA(m)	demanda (L/s)	Nó	COTA(m)	demanda (L/s)
1	935,1	0,00583	15	875	0,02653
2	906,7	0,00449	16	897	0,02776
3	903	0,01113	17	888	0,00928
4	885	0,01202	18	875	0,00917
5	929	0,01032	19	947	0
6	913,5	0,02772	20	893	0,00917
7	903,6	0,03373	21	909	0
8	892,4	0,01633	22	947	0
9	897	0,01659	23	947	0
10	887	0,01992	24	899	0,00831
11	897,9	0,03251	25	891	0,01748
12	880,8	0,02906	26	877	0,00831
13	864,2	0,01570	27	878	0,01748
14	893	0,03117	28	947	0,40000

A população atendida pela rede de distribuição em questão é de aproximadamente 332 habitantes, contando com 83 ligações de água e esgoto. O comprimento total da rede é de 2591,59 metros. O material da tubulação é PVC na região do bairro Jardim América e ferro fundido no bairro Por do Sol.

Treinamentos realizados

Foram feitos treinamentos para a utilização dos equipamentos necessários para a aquisição dos dados de campo, os treinamentos foram realizados no Laboratório de Estruturas Hidráulicas, no laboratório de Etiquetagem de Bombas e no laboratório de Hídrica Computacional, todos na Universidade Federal de Itajubá, sob orientação de funcionários dos laboratórios.

Os equipamentos são:

- Geofone eletrônico;
- Medidores de pressão com armazenadores de dados;
- Equipamento DGPS;

Trabalhos de campo realizados

Deteção de vazamentos grosseiros na área de estudo

Para a verificação da existência de vazamentos “grosseiros”, que não são previstos no modelo hidráulico utilizado, foi feita a inspeção da área com

a utilização de geofone eletrônico. Silva (2003) classifica os vazamentos em dois tipos: “inerentes” e “grosseiros”. Vazamentos inerentes são pequenos vazamentos ao longo da rede causados por falhas nas junções das tubulações já os vazamentos “grosseiros” são provocados por fendas nas tubulações, os vazamentos grosseiros em geral são detectáveis seja pela utilização de equipamentos de detecção acústicos, chamados geofone, pela falha no abastecimento de determinados trechos ou mesmo pela inspeção visual da área em casos mais graves.

Sabe-se que a inspeção com equipamentos de detecção acústica deve preferencialmente, ser executada em período noturno, pois a incidência de ruídos causados principalmente pelo trânsito pode mascarar os resultados. Porém as características do bairro estudado, como pouca ou nenhuma movimentação de carros ou pedestres em determinado horário, permitiram que esse trabalho fosse realizado no período diurno.

Na figura 2 observa-se a inspeção da rede.



Figura 2 - Campanha de campo para a verificação da existência de vazamentos

Medidas de pressão

As medidas de pressão foram tomadas em torneiras residenciais abastecidas diretamente pela rede. As residências utilizadas para a aquisição de dados foram selecionadas de forma que pudessem representar a maior parte do sistema, com tomadas de pressão em pontos de máxima, mínima e média pressão. A figura 3 ilustra as imagens de dois aparelhos instalados, tais equipamentos realizam mensurações e registro das informações ao longo do tempo.



Figura 3- Medidores de pressão com armazenador de dados instalados em pontos diferentes de monitoramento

Na figura 4, a rede de distribuição em estudo ilustra os pontos escolhidos para o monitoramento da pressão, tais pontos são representados pelos triângulos e numerados. Tais pontos visam cobrir a maior parte da área espacial da rede além de variações de cota.

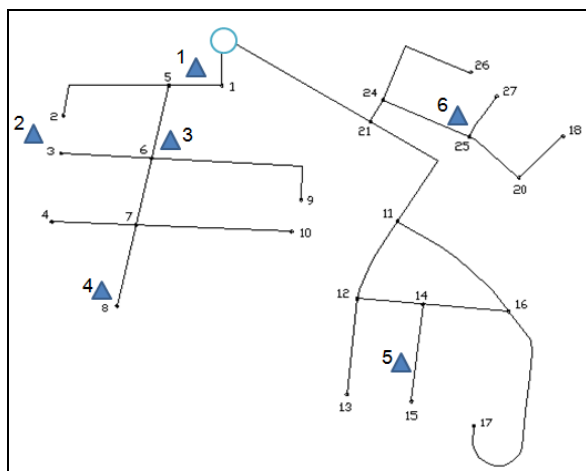


Figura 4 – Rede de distribuição estudada com o detalhe dos pontos de monitoramento

O procedimento inverso de calibração consiste na minimização da diferença dos valores de alguns parâmetros do sistema de distribuição.

A tabela 3 mostra os valores medidos e simulados de pressões simuladas e medidas médias das diversas simulações na rede em estudo.

Tabela 3 – Valores de pressões medidas e simuladas (condição máxima)

Nó	Pressão medida (mca)	Pressão simulada (mca)
1	9,95	11,34
3	43,25	41,15
6	30,04	30,95
8	53,82	54,28
15	72,30	69,95
25	50,00	52,45

Os valores coletados nas residências foram corrigidos com relação aos nós localizados na rede em estudo. O modelo computacional utilizado foi desenvolvido com algoritmos genéticos, onde forma minimizadas as diferenças entre pressões e vazões simuladas e medidas, tal modelo foi desenvolvido por Silva (2003).

Medidas de vazão

Foram realizadas medidas de vazão para o setor, embora para este trabalho foram considerados apenas os valores de pressão devido a pequena quantidade de ligações neste setor.

Dados de consumo de água

A partir dos dados de consumo mensais das residências do bairro, disponibilizados pela COPASA, foram determinados os consumos médios de cada quadra. Alves (2006) elaborou uma planilha onde os dados de consumo de cada residência eram dispostos por ruas de acordo com as ligações existentes para a rede de distribuição em questão. Este modelo de planilha foi utilizado no presente trabalho, inserindo-se as devidas alterações cadastrais, como novas ligações.

Verificação das cotas topográficas

Foi realizado o levantamento de dados topográficos nos nós e nos pontos de monitoramento com o auxílio de um GPS de inspeção com o objetivo de verificar as cotas existentes nos mapas. O equipamento utilizado no estudo é mostrado na figura 5.



Figura 5 - Equipamento DGPS utilizado na verificação das cotas

Estudo da rotina computacional

O procedimento inverso de calibração consiste na minimização da diferença dos valores de alguns parâmetros do sistema de distribuição de água simulados e medidos. A função que descreve o problema é chamada de função objetivo (F.O.). A função objetivo descrita por Silva (2003) e que será utilizada neste trabalho está indicada na equação 1. Para este específico trabalho foram utilizadas principalmente as análises dos valores de pressões devido aos baixos valores de vazões para o setor.

$$FO = \left\{ \sum_{k=1}^C \left\{ w_H^{(k)} \cdot \sum_{i=1}^N \left[\frac{P_{simi} - P_{obsi}}{\left[\sum_{i=1}^N P_{obsi} \right] / N} \right]^2 + w_Q^{(k)} \cdot \sum_{j=1}^M \left[\frac{Q_{simj} - Q_{obsj}}{\left[\sum_{j=1}^M Q_{obsj} \right] / M} \right]^2 \right\} \right\}^{-1} \quad (1)$$

Sendo: P – carga de pressão (m); Q – vazão (L/s); N – conjunto de pontos de observação de valores de pressão; M – conjunto de pontos de observação de valores de vazão; C – número de condições de demanda; w_H , w_Q – pesos atribuídos aos desvios de pressão e vazão; sim, obs – denotam valores simulados e observados, respectivamente. No estudo foi usada a equação de Darcy- Weisbach onde foram calibradas as rugosidades.

A figura 6 ilustra o fluxograma da rotina implementada e alterada para a aplicação dos algoritmos genéticos na calibração das rugosidades de trechos da rede de distribuição de água. Observa-se que basicamente o processo se inicia com a leitura de dados de pressão medidos em campo, na sequência se tem a geração da população inicial de soluções que posteriormente são avaliadas de acor-

do com uma função de aptidão. Após esta etapa são aplicados os operadores de recombinação e mutação. No processo é adotado o elitismo que significa garantir a cada geração IPOP soluções melhores dentre o conjunto de NPOP soluções totais. O processo geracional é realizado até que se complete o número de gerações previamente estabelecido.



Figura 6 – Algoritmo geracional elitista utilizado

Implementação da rotina computacional

No presente estudo utilizou-se do tipo geracional elitista, pela garantia de que as melhores soluções para o problema não seriam perdidas durante o processo de busca.

Os AGs também apresentam diversas possibilidades quanto ao tipo de operador utilizado e quanto às taxas aplicadas. Os parâmetros adotados neste estudo são apresentados na tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros dos AGs utilizados para a calibração da rede

População de soluções	30
Número de gerações	1000
Semente aleatória	5
Seleção	Roda da roleta
Probabilidade de cruzamento	95%
Tipo de cruzamento	2 pontos de corte
Probabilidade de mutação	1%
Tipo de Mutação	Gaussiana
Taxa de elitismo	0,166667

RESULTADOS

Resultados experimentais

Para que pudesse ser mais bem visualizada a discrepância entre as pressões nas diferentes zonas de pressão da rede foi feito um gráfico que apresenta a pressão para o mesmo horário em cada ponto onde foram coletados os dados, pode-se perceber a grande variação da pressão que ocorre devido à acentuada topografia do bairro, conforme ilustrado na figura 7. Observa-se uma variação de pressão entre as residências entre 8 e 72 mca.

**Figura 7 – Pressão para o mesmo horário medida nos diferentes pontos**

Resultados computacionais

As simulações foram realizadas para dois padrões diferentes de demanda: demanda máxima e média. Foram utilizados consumos mensais no dados de entrada. Estes valores foram usados para estabelecer valores de referência entre os nós e em função da vazão na entrada do setor para horários

de demanda máxima e média foi possível trabalhar com estes dois padrões.

O padrão 1 representa a demanda máxima e a demanda média, chamada de padrão 2. A demanda mínima não foi analisada, pois devido à baixa vazão apresentada pelo sistema o erro era aumentado significativamente quando inserido o padrão de demanda mínima.

A coleta de dados de pressão e vazão foi realizada em duas etapas. Na primeira etapa foi instalado o armazenador de dados (LogBox) no painel do medidor de vazão eletromagnético que existe na saída do reservatório para o monitoramento da vazão e os medidores de pressão e armazenadores de dados (dataloggers) nas casas 3 e 4. Na segunda etapa os dataloggers foram instalados nas casas 1, 2, 5 e 6 enquanto o dispositivo armazenador de dados permanecia instalado no reservatório.

Dados coletados simultaneamente foram agrupados em um mesmo conjunto, sendo chamado conjunto 1 os dados coletados na primeira etapa e conjunto 2 os dados coletados na segunda etapa da campanha de campo para aquisição dos dados de pressão e vazão.

Para a análise do desempenho da calibração serão utilizados os critérios estabelecidos pela Water Resource Centre (1989), na comparação entre os valores medidos e obtidos pela simulação.

A tabela 5 apresenta os critérios.

Tabela 5 – Critérios Mínimos para a Estabilização da Calibração (WATER RESOURCE CENTRE, 1999)

CRITÉRIOS PARA PRESSÃO	
1.	85% das medidas de campo devem estar dentro do intervalo de $\pm 0,5$ m ou $\pm 5\%$ da perda máxima obtida em todo o sistema, independente do tamanho deste
2.	95% das medidas de campo devem estar dentro do intervalo de $\pm 0,75$ m ou $\pm 7,5\%$ da perda máxima obtida em todo o sistema, independente do tamanho deste.
3.	100% das medidas de campo devem estar dentro do intervalo de ± 2 m ou $\pm 15\%$ da perda máxima obtida em todo o sistema, independente do tamanho deste

- Análise da evolução da função de aptidão

Foram realizadas cinco simulações para cada conjunto de dados, chamadas aqui de população aleatória, com o objetivo de comprovar a eficiência

da rotina. A figura 8 apresenta o gráfico que compara a evolução da função de aptidão (Fitness) e o número de iterações para diferentes sementes para os dados do conjunto 1 que apresentaram comportamento parecido ao relativo ao conjunto 2.

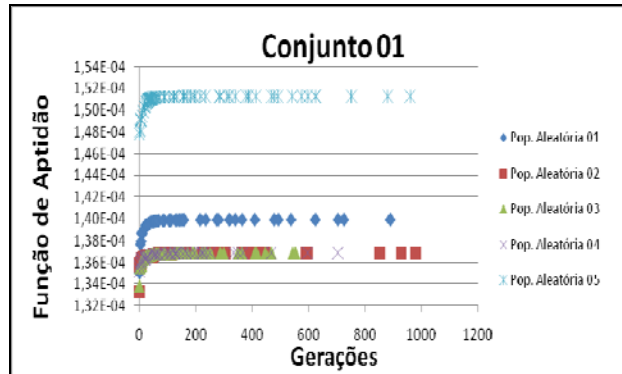


Figura 8 – Evolução da função de aptidão ao longo das gerações para o conjunto 01

Nota-se que as curvas relativas às diferentes populações aleatórias para o conjunto 1 apresentam o mesmo formato geral e que a tendência é que o valor da função de aptidão aumente com o número de iterações.

Também se pode perceber em análise da figura 8 que as populações aleatórias de 01 a 04 apresentam evolução muito semelhante, pois as funções de aptidão evoluem significativamente até aproximadamente a geração 50, a partir deste momento ocorre uma estabilização dos valores até a geração final. Percebe-se que a população aleatória 05 tem um pequeno deslocamento acima das demais no sentido vertical, entretanto evolução análoga às demais.

As figuras 9 e 10 ilustram os valores de pressões e medidos e simulados de forma conjunta respectivamente para padrão de demanda máxima e média. Nota-se de geral que as diferenças estão pequenas demonstrando viabilidade de aplicação do modelo.

Os resultados obtidos pela calibração permitem as seguintes conclusões:

- Alguns desvios entre os valores simulados e medidos de pressão apresentam valores um pouco acima da diferença estabelecida pelo Water Resource Centre (1998)
- Os valores de pressões simuladas apresentaram pouca variação para as diferentes sementes aleatórias.

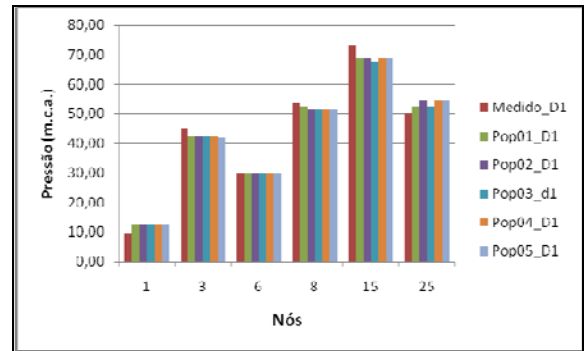


Figura 9 – pressões medidas e simuladas para o padrão de demanda máxima

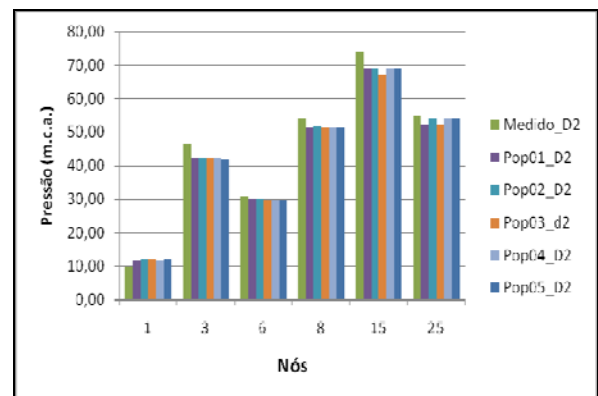


Figura 10 – pressões medidas e simuladas para o padrão de demanda média

A tabela 6 ilustra alguns valores de rugosidades para alguns trechos da rede e para todas as populações aleatórias, observa-se baixos valores de desvio padrão demonstrando-se a consistência nos resultados.

Tabela 6 – Valores de rugosidades em (mm) e desvio padrão

Trecho	Pop. 1	Pop. 2	Pop. 3	Pop. 4	Pop. 5	Desvio padrão
1	0.49	0.46	0.49	0.46	0.49	0.0164
2	0.50	0.50	0.49	0.50	0.50	0.0045
3	0.36	0.38	0.34	0.36	0.38	0.0035
4	0.1	0.34	0.1	0.34	0.34	0.1315
6	0.47	0.47	0.47	0.47	0.50	0.0134
7	0.46	0.48	0.44	0.44	0.48	0.0200
8	0.48	0.48	0.48	0.48	0.40	0.0358

Estes valores são as rugosidades em mm calibradas.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho de pesquisa trata do estudo de calibração de redes de distribuição de água com a utilização de uma rotina computacional construída especialmente para esse fim, desenvolvida por Silva (2003). Na rotina se utiliza o modelo inverso e como ferramenta de busca os algoritmos genéticos.

O estudo de calibração foi feito para a rede que abastece os bairros jardim América e parte do bairro Por-do-sol em termos das rugosidades dos trechos da rede.

O cadastro adquirido para a rede em questão apresenta algumas incertezas quanto aos comprimentos das tubulações principalmente para o setor que abastece o bairro jardim do sol. A concessionária de água não realiza atualizações diárias no cadastro da rede e então eventuais manutenções na rede, consertos de vazamentos, troca do tipo de tubulação de trechos não são alteradas no cadastro, portanto não se pode afirmar que o cadastro represente fidedignamente o sistema.

Outro fato que pode causar erros é a não existência de cadastro que indique a profundidade que a tubulação está enterrada, o loteamento foi feito por uma construtora e a concessionária de água não possui esses dados.

Recomenda-se para um próximo trabalho na área a investigação mais detalhada dos dados cadastrais, considerando também a profundidade da tubulação para a obtenção de resultados mais precisos.

Os valores de rugosidades obtidos representam um conjunto de combinações de informações que conduzem a uma boa calibração.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPEMIG pelo apoio dado pelo projeto Pesquisador Mineiro PPM 00633-11

REFERÊNCIAS

ALVES, L. H. de F. *Avaliação Hidráulica em Setores da Rede de Distribuição de Água de Itajubá considerando vazamentos*. 2006. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2006.

BROWN, K. *Modeling leakage in water distribution systems*. 2007. 73 p. Dissertação (Master) - College of Engineering, Florida State University, Florida, 2007.

COLOMBO, F. *Calibração de Modelos hidráulicos de redes de abastecimento de água de sistemas reais admitindo vazamentos*. 2007. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

NEVES, C. L. *Calibração de parâmetros de modelos hidráulicos de redes de distribuição de água para estudos de operação de rede*. 2007. 143p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

SILVA, F. G. B. *Estudos de calibração de redes de distribuição de água através de Algoritmos Genéticos*. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

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

SOARES, A. K. *Calibração e detecção de vazamentos em modelos de sistemas hidráulicos no escoamento transitório*. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

VALADÃO, M. N. *Simulação Hidráulica de redes de abastecimento de água: aplicação em setores de Itajubá - MG*. 2006. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2006

WATER RESEARCH CENTRE. *Network analysis: a code of practice*. Swindon, England: WRc, 1989.

WU, Z. Y. Data usage protocol for leakage detection and Eps model calibration. In: ANNUAL WATER DISTRIBUTION SYSTEMS ANALYSIS CONFERENCE WDSA, 10., 2008, Kruger National Park, South Africa. *Proceedings...* [S.l.]: American Society of Civil Engineers, 2008.

WU, Z. Y.; SAGE, P. Water loss detection via genetic algorithm optimization-based model calibration. In: ANNUAL INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON WATER DISTRIBUTION SYSTEM ANALYSIS, 8., 2006, Cincinnati, Ohio. *Proceedings...* Cincinnati, Ohio: [s.n.], 2006. 11 p.

Calibration Study Of Roughness In The Water Distribution System Of Jardim América Neighborhood- State of Minas Gerais

ABSTRACT

Water resources are becoming increasingly scarce in quality and quantity, especially near large urban centers. Water distribution systems are large consumers of water and typically their full operation is deficient and causes many leaks. One of the major fronts to be addressed is the proper operation of the system. However the step before that activity involves network calibration. In this study we applied a calibration methodology proposed by Silva (2003) to a distribution system in the City of Itajubá-MG that fit the roughness values, mainly from pressure values measured and simulated, highlighting the pioneering study in the region. These results were consistent in terms of adjusted parameters and values of pressure and roughness analysis.

Keywords: Water distribution systems, calibration, Genetic Algorithms.