

Artigo Técnico

Calibração multivariada de redes de abastecimento de água via algoritmo genético multiobjetivo

Multivariate calibration of water supply networks using multiobjective genetic algorithm

Moisés Menezes Salvino¹, Paulo Sergio Oliveira de Carvalho², Heber Pimentel Gomes³

RESUMO

Este trabalho teve por objetivo propor um modelo computacional com vistas à calibração multivariada de modelos hidráulicos de sistemas de distribuição de água que possibilita a identificação de possíveis irregularidades, como: vazamentos, obstruções nas tubulações, válvulas inoperantes ou estranguladas e incompatibilidades na modelagem referente aos dados reais. Utiliza um algoritmo genético multiobjetivo no processo de calibração para ajustar as diferenças das variáveis de estado da rede, a fim de produzir informações compatíveis com suas respectivas redes reais. O modelo proposto permite utilizar até sete variáveis: a rugosidade, a demanda, a perda de carga singular, a cota topográfica, os vazamentos, os diâmetros e as válvulas, simultaneamente, ou qualquer combinação delas. A aplicação experimental foi realizada no Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da Universidade Federal da Paraíba (LENHS/UFPB) com os dados do seu Sistema Piloto de Distribuição de Água (SPDA). Os resultados mostraram uma boa convergência com relação ao tempo de processamento e à aproximação dos dados medidos e calculados, assim como possibilitaram a identificação de problemas mediante análise dos parâmetros resultantes da calibração, o que proporciona subsídios para uma reabilitação mais precisa.

Palavras-chave: redes de abastecimento de água; calibração; algoritmo genético; reabilitação.

ABSTRACT

This paper has aimed to propose a robust computational model with a view to multivariate calibration of hydraulic models of water distribution systems, enabling the identification of possible irregularities such as leaks, obstructions in the pipes, dead or strangled valves and incompatibilities in the modeling for the data real. Using a multiobjective genetic algorithm calibration process adjusts for differences of state variables of the network giving information consistent with their respective real networks. The proposed model allows use up to seven variables: the roughness, the demand, the headloss, the topographic, leaks, valves and diameters, simultaneously or any combination thereof. The experimental application was carried out at the Laboratory for Energy Efficiency and Water Sanitation Universidade Federal da Paraíba (UFPB) through its Pilot System for Water Distribution. The results showed a good convergence with respect to processing time and the approximation of the measured and calculated values, as well as enables the identification of problems by analyzing the parameters resulting from calibration, thus providing support for a more accurate rehabilitation.

Keywords: water supply networks; calibration; genetic algorithm; rehabilitation.

INTRODUÇÃO

A modelagem hidráulica consiste em um modelo numérico, com base nos conceitos físicos e matemáticos, desenvolvido para reproduzir, da melhor forma possível, o comportamento do fluxo da água no interior das tubulações e dos acessórios da rede de distribuição em estudo. Em todo processo de modelagem há considerações que simplificam e

resultam em um conjunto de equações que governam o modelo físico aplicado ao equilíbrio hidráulico; além disso, as propriedades da água, em diversas condições, e a imprecisão dos equipamentos de medição implicam em divergências, por menores que sejam, entre os valores de uma rede real e sua respectiva modelagem. A aproximação dos valores medidos com o modelo se dá com a calibração numérica.

¹Engenheiro Civil e Bacharel em Ciências da Computação pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Mestre e Doutor em Engenharia Mecânica pela UFPB - João Pessoa (PB), Brasil.

²Engenheiro Civil pela UFPB. Tecnólogo em Processamento de Dados pela Associação Paraíba de Ensino Renovado (ASPER). Mestre em Engenharia Urbana e Ambiental pela UFPB. Doutor em Engenharia Mecânica pela UFPB - João Pessoa (PB), Brasil.

³Engenheiro Civil pela UFPB. Mestre em Hidrologia pela UFPB. Doutor em Hidráulica pela Universidad Politécnica de Madrid. Professor da UFPB - João Pessoa (PB), Brasil.

Endereço para correspondência: Moisés Menezes Salvino - Rua Antônio Rabelo Junior, 70, apto. 403 - Res. Alisson Holanda Miramar - 58032-090 - João Pessoa (PB), Brasil - E-mail: riei@hotmail.com

Recebido em: 15/08/14 - **Aceito em:** 27/07/15 - **Reg. ABES:** 99484

O estudo na área de calibração de redes de distribuição de água tem se intensificado nos últimos anos, tanto pelo avanço dos modelos matemáticos e algoritmos quanto pelo desenvolvimento de novas tecnologias de supervisão e controle, possibilitando a modelagem e a programação de algoritmos inteligentes, buscando conhecer melhor a rede nos diversos cenários e nas diversas condições, encontrando respostas mais rápidas e dando suporte para sua reabilitação e operação.

As perdas de água reais e aparentes são realidades nos sistemas de abastecimento atuais, onde, no Brasil, em média, 46,87% da água tratada é perdida, segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2009), e sua redução torna-se um desafio para as empresas e companhias da área de abastecimento. As soluções referentes às perdas reais, provocadas principalmente por vazamentos, são a reabilitação das redes, ou seja, a substituição de tubulações antigas, válvulas, registros e outros equipamentos que fazem parte do sistema, assim como o melhoramento dos seus sistemas de impulsão para proporcionar a pressão necessária, reduzindo pressões elevadas na rede e, ainda, sistemas de medição e monitoramento para quantificar e acompanhar a produção de água em pontos específicos da rede. Muitos desses procedimentos têm custos elevados e encontrar uma melhor solução implica na melhor identificação dos pontos onde serão realizadas as reabilitações.

O *Epanet* é um *software* de modelagem hidráulica e qualidade da água, desenvolvido pela *Environmental Protection Agency* (EPA), que permite executar simulações estáticas e dinâmicas do comportamento hidráulico e de qualidade em redes pressurizadas de distribuição de água. As capacidades de modelagem hidráulica são inúmeras, segundo Rossman (2008). A simulação hidráulica do *Epanet* determina a vazão nos trechos e a carga hidráulica nos nós, com os níveis de reservatórios, em função da variação do consumo ao longo do tempo caracterizada mediante uma curva de demanda. Em cada intervalo de tempo os valores das variáveis são atualizados em função da variação temporal da demanda de água na rede. A solução para o valor da carga hidráulica e para a vazão em um ponto particular da rede, para um determinado instante, é encontrada na solução da equação da continuidade, para cada nó, e na solução da equação da conservação da energia, para cada trecho dos anéis da rede. Esse balanço hidráulico da rede requer a utilização de técnicas iterativas para resolver as equações não lineares envolvidas. O *Epanet* emprega o “Método do Gradiente”, também conhecido por Método Híbrido Nó-Malha (TODINI & PILATI, 1988), para atingir esse objetivo.

Segundo Silva *et al.* (2003), pode-se dizer que os procedimentos de calibração de redes de distribuição de água podem ser divididos basicamente em três categorias: iterativos, explícitos ou diretos e implícitos ou inversos.

Os métodos iterativos geralmente utilizam a metodologia de tentativa e erro, ou de incremento e decremento, partindo de uma solução extrema (por exemplo: diâmetros mínimos, demandas máximas, etc.), onde em cada iteração os valores medidos são comparados aos simulados. Neste tipo de método a convergência do algoritmo está vinculada ao número de iterações ou se o somatório das diferenças quadráticas, dos dados medidos e simulados, estiver dentro de um limite. Os principais trabalhos que utilizaram essa metodologia foram os de Bhawe (1988), Tucciarelli *et al.* (1999) e Wu *et al.* (2011).

Ormsbee e Wood (1986), Boulos e Altman (1991, 1993) e Alvisi e Franchini (2010) utilizaram, para solução da calibração de redes pressurizadas de distribuição de água, os métodos explícitos ou diretos. Tais métodos têm como base a solução, em regime permanente, de equações e análise matricial em condições de contorno bem definidas utilizando como base as equações clássicas da energia e da continuidade.

Nos métodos implícitos ou inversos as variáveis ou os parâmetros desconhecidos são estimados, ou seja, valores são atribuídos às demandas, às rugosidades e aos demais parâmetros hidráulicos mediante utilização de algum procedimento ou algoritmo a fim de aproximar sua resposta, em termos das variáveis de estado, de sua referência, o que significa minimizar as diferenças, principalmente, das pressões e vazões medidas e calculadas.

Cheung (2002) realizou a comparação de dois métodos de calibração, que foram aplicados e comparados em um modelo de rede hipotética. Os modelos são o método analítico e o método explícito. O principal objetivo foi avaliar a eficiência dessas técnicas de calibração e compará-las entre si. O método analítico apresentou os menores desvios, considerando o somatório das diferenças entre os valores observados e os valores reais para os setores. O método de calibração explícito possui sua formulação diferenciada do modelo anterior e apresentou os maiores desvios, porém sua formulação permite flexibilidade no sentido de incorporar outras variáveis de decisão de calibração, operação, projeto e componentes hidráulicos.

Wu e Walski (2011) apresentaram uma metodologia para a calibração dinâmica de um sistema de distribuição de água em um longo período de simulação, usando como referência o problema de calibração desenvolvido para o *Battle of Water Calibration Networks* (BWCN). A calibração é realizada de forma progressiva, ajustando os parâmetros do modelo de forma iterativa. Foram utilizadas 167 horas de dados monitorados do sistema SCADA, resultando em uma calibração satisfatória, quando comparada aos resultados encontrados do evento mundial em que foi lançado o desafio dessa calibração.

Nicolini *et al.* (2011) aplicaram duas metodologias para uma rede real de distribuição de água. A primeira envolve um modelo de calibração, enquanto a segunda é específica para resolver o problema da

estimativa ótima do coeficiente de vazamentos. O algoritmo utilizado foi o algoritmo genético, para proporcionar, como resposta, a rugosidade e o coeficiente de vazamentos. O controle do vazamento no modelo proposto é realizado por meio da introdução e manobra de uma válvula reguladora de pressão. O posicionamento e a regulação das válvulas tiveram como algoritmo de otimização os algoritmos genéticos multiobjetivos.

Os algoritmos genéticos são métodos de busca estocástica que procuram reproduzir de forma lógica e matemática os mecanismos da teoria da evolução natural das espécies, utilizando os processos da genética das populações. Os conceitos de seleção natural e sobrevivência do indivíduo mais apto advêm da Teoria da Evolução oriunda da genética e fundamentam o algoritmo genético. Foram introduzidos no meio científico por Holland (1975) e popularizados por um de seus alunos, Goldberg (1989). A inspiração para o desenvolvimento desse algoritmo vem da teoria de Charles Darwin, publicada em seu livro *A origem das espécies* (1859). Segundo Charles Darwin, “Quanto melhor um indivíduo se adaptar ao seu meio ambiente, maior será sua chance de sobreviver e gerar descendentes”.

MATERIAIS E MÉTODOS

Um dos motivos pelos quais o processo de calibração de redes de distribuição de água possui certo grau de complexidade se dá pelo fato da existência de grande quantidade de variáveis e equações envolvidas no processo. Para validação da metodologia de calibração será utilizada, como estudo de caso, uma rede real em pequena escala, totalmente instrumentalizada, que é a rede do Sistema Piloto de Distribuição de Água do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da Universidade Federal da Paraíba (SPDA/LENHS/UFPB), para a obtenção dos parâmetros hidráulicos mediante a calibração das variáveis em estudo.

O programa de calibração desenvolvido denominado de LenhsCalibra utiliza os algoritmos genéticos multiobjetivos no processo de calibração, que tem por objetivo, aplicável em redes modeladas no simulador hidráulico *Epanet*, ajustar o modelo de forma a produzir informações compatíveis com suas respectivas redes reais. O processo de calibração proposto permite calibrar até sete variáveis simultaneamente ou qualquer combinação delas. Dependendo das características da rede a ser modelada e calibrada é possível definir limites para as variáveis e escolher quais variáveis calibrar.

Cada variável que participará do processo de calibração deverá ser codificada em uma tabela. Caso o número de elementos dessa tabela seja diferente de (2^n) , onde “n” representa o número de *bits* que codificará cada item da tabela, então se faz necessário corrigir para não ocorrer de, durante a mutação, parte da informação contida no cromossomo não corresponder a nenhum item da tabela.

Como proposta de correção, caso ocorra isso, é escolhido um item aleatório da tabela em substituição ao gene defeituoso, eliminando, assim, o elemento desconhecido do cromossomo. A escolha da codificação em tabela teve como finalidade a diminuição da representação, em número de *bits*, da variável em questão dentro do cromossomo, possibilitando, assim, a incorporação de mais variáveis dentro do modelo.

A função objetivo adotada foi a minimização do somatório da diferença ao quadrado dos pontos de pressão e vazão (Equação 1).

$$F = \sum_{i=1}^n (P_s - P_{M_i})^2 + \sum_{j=1}^m (Q_s - Q_{M_j})^2 \quad (1)$$

Onde:

P_s = é a pressão simulada no nó i;

P_M = é a pressão medida ou real no nó i;

Q_s = é a vazão simulada no trecho j;

Q_M = é a vazão medida no trecho j;

F = é a função objetivo a ser minimizada.

Existe a opção de penalizar a função objetivo com outra função que incrementa a diferença absoluta da pressão mínima da rede com uma pressão de referência, caso a pressão mínima seja inferior à pressão de referência. A Equação 2 resume essa terceira função que compõe, opcionalmente, a função objetivo.

$$F_R = F + |P_{ref} - P_{min}| \text{ se } P_{min} < P_{ref} \\ F_R = F \text{ se } P_{min} \geq P_{ref} \quad (2)$$

Onde:

F_R = é a função objetivo resultante;

F = é a função objetivo calculada anteriormente com as diferenças das medidas;

P_{ref} = é uma pressão de referência para limitar pressões inferiores a esta;

P_{min} = é a pressão mínima calculada verificando todos os nós da rede.

O fluxograma ilustrado na Figura 1 condensa toda a metodologia do processo de calibração proposto por meio do algoritmo genético multiobjetivo.

Durante a calibração da rede experimental do SPDA foram arbitrados 1.024 valores no intervalo das variáveis propostas para calibração (número de linhas da tabela de codificação), resultando em um cromossomo com 280 *bits* para cada variável utilizada.

O LENHS é o resultado do desenvolvimento de ações integrantes do Programa Nacional de Eficiência Energética no Saneamento Ambiental (PROCEL SANEAR), das Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (ELETROBRAS). Esse laboratório foi criado para desenvolver serviços especializados e atividades de ensino, pesquisa e extensão relacionadas ao uso eficiente de energia e água no saneamento.

O SPDA do LENHS/UFPB consiste de uma rede pressurizada de distribuição, alimentada por bombeamento, totalmente instrumentalizada, e automatizada mediante um controlador lógico programável (CLP), supervisionado por um programa supervisor de aquisição e transmissão de dados (SCADA). Por ser um sistema automatizado, ele admite o desenvolvimento de rotinas de simulação e monitoração, em tempo real, produzindo uma massa de dados, em forma de relatórios, possibilitando a sua interpretação e análise. O sistema foi concebido de forma a permitir a realização

de trabalhos acadêmicos (ensino, pesquisa e extensão) na área de Hidráulica, Elétrica e Mecânica. É um sistema automatizado que admite desenvolver tarefas de controle, monitoração e simulação de forma simultânea, além de gerar relatórios das grandezas monitoradas. As pesquisas e os treinamentos são direcionados, primordialmente, a trabalhos de redução de perdas de água e energia elétrica em sistemas pressurizados de abastecimento de água.

A rede de abastecimento possui 155 m de comprimento, sendo composta por tubulações de PVC (DN 50 – 140 m e DN 100 – 5 m) e ferro dúctil (DN 100 – 10 m). O sistema possui seis saídas de água. Todas as saídas são controladas por registros (manuais) e/ou válvulas solenoides. A rede é alimentada pelo reservatório inferior existente no laboratório (15 m³), por intermédio do sistema de bombeamento ou pelo reservatório superior (15 m³). A Figura 2 apresenta uma perspectiva do sistema.

O SPDA foi calibrado de forma dinâmica, por isso foi necessária a variação da demanda nos pontos de saída ao longo do tempo.

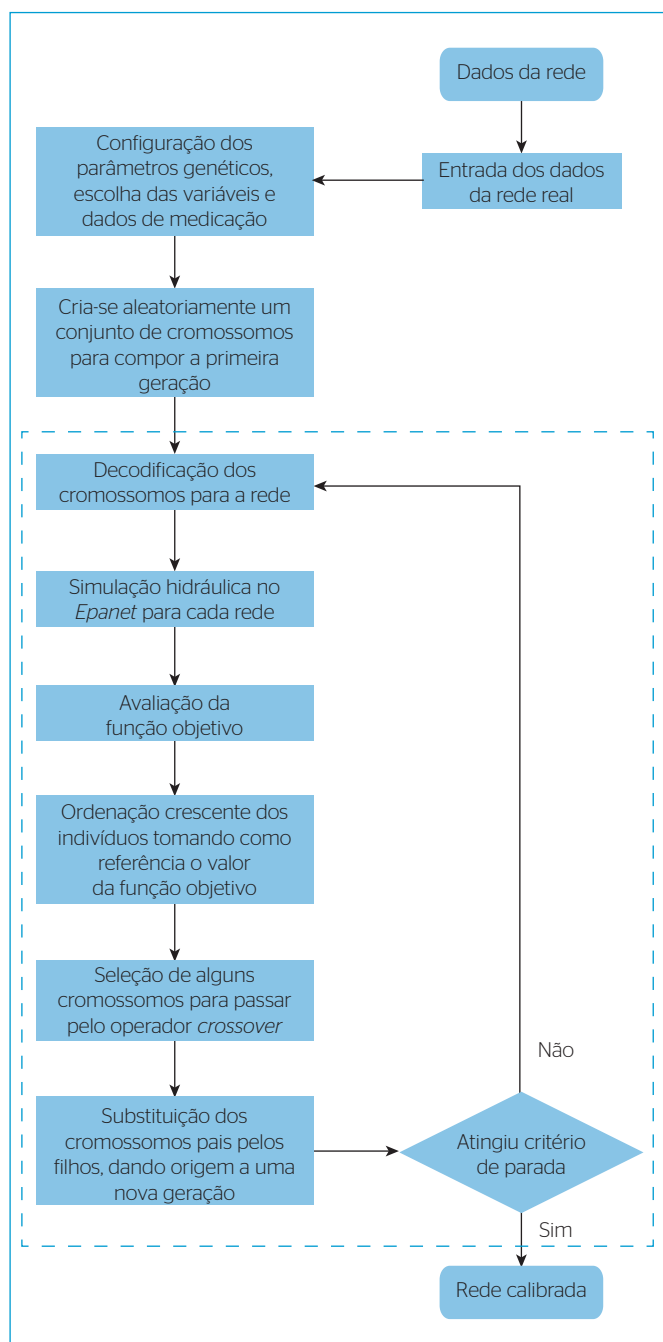


Figura 1 - Fluxograma do algoritmo genético multiobjetivo.

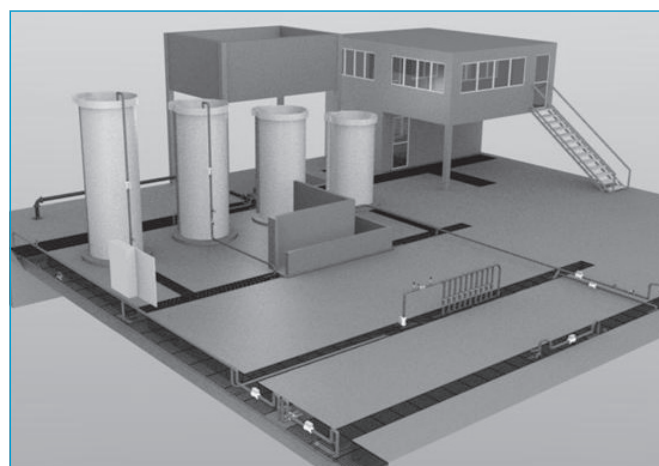


Figura 2 - Perspectiva do Sistema Piloto de Distribuição de Água modelado no blender®.

Tabela 1 - Coeficientes e vazões obtidos experimentalmente do Sistema Piloto de Distribuição de Água.

Configuração	Vazão de alimentação (m ³ /h)	Coefficiente da curva (fatores multiplicativos)	Intervalo (horas)
1	6,69	0,33	00h00 às 3h00
2	8,74	0,43	3h00 às 6h00
3	22,38	1,10	6h00 às 9h00
4	33,53	1,64	9h00 às 12h00
5	33,53	1,64	12h00 às 15h00
6	29,25	1,43	15h00 às 18h00
7	26,66	1,30	18h00 às 21h00
8	15,52	0,76	21h00 às 00h00

Utilizando o sistema supervisor, as demandas foram ajustadas manualmente por meio de registros de gaveta instalados nas saídas da rede, admitindo uma vazão máxima de 33,53 m³/h para todo o sistema de distribuição e uma vazão mínima de 6,69 m³/h. Com base no valor médio das vazões, medidas a jusante da bomba que alimenta toda a rede, de 20,40 m³/h, foi obtida experimentalmente uma curva de demanda, utilizando o SPDA do LENHS, conforme os dados da Tabela 1.

O SPDA do LENHS foi calibrado por meio das variáveis: rugosidade, demanda e perda de carga localizada, de forma dinâmica, simulando uma configuração de abastecimento de 24 horas com os dados obtidos experimentalmente. As demais variáveis, como topografia, vazamentos, válvulas e diâmetro, são bastante confiáveis quanto a suas informações.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Calibração do Sistema Piloto de Distribuição de Água do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da Universidade Federal da Paraíba

Como primeira experiência e tentativa de aplicação da metodologia proposta foi calibrada a Rede Piloto de Distribuição de Água do LENHS/UFPB.

Utilizando o *Epanet*, o SPDA do LENHS foi modelado com a topologia da Figura 3, em que as tubulações foram configuradas com os dados da Tabela 2. Todos os nós da rede estão na mesma cota topográfica, com exceção da alimentação, referente à descarga nos reservatórios, representada pelos nós D1 e D2, que possuem, respectivamente, as cotas 4,93 m e 4,26 m, e ainda os nós PT-10, PT-01 e PT-02, com cotas de 0,4 m. O nó 1, que é representado por um reservatório de nível fixo,

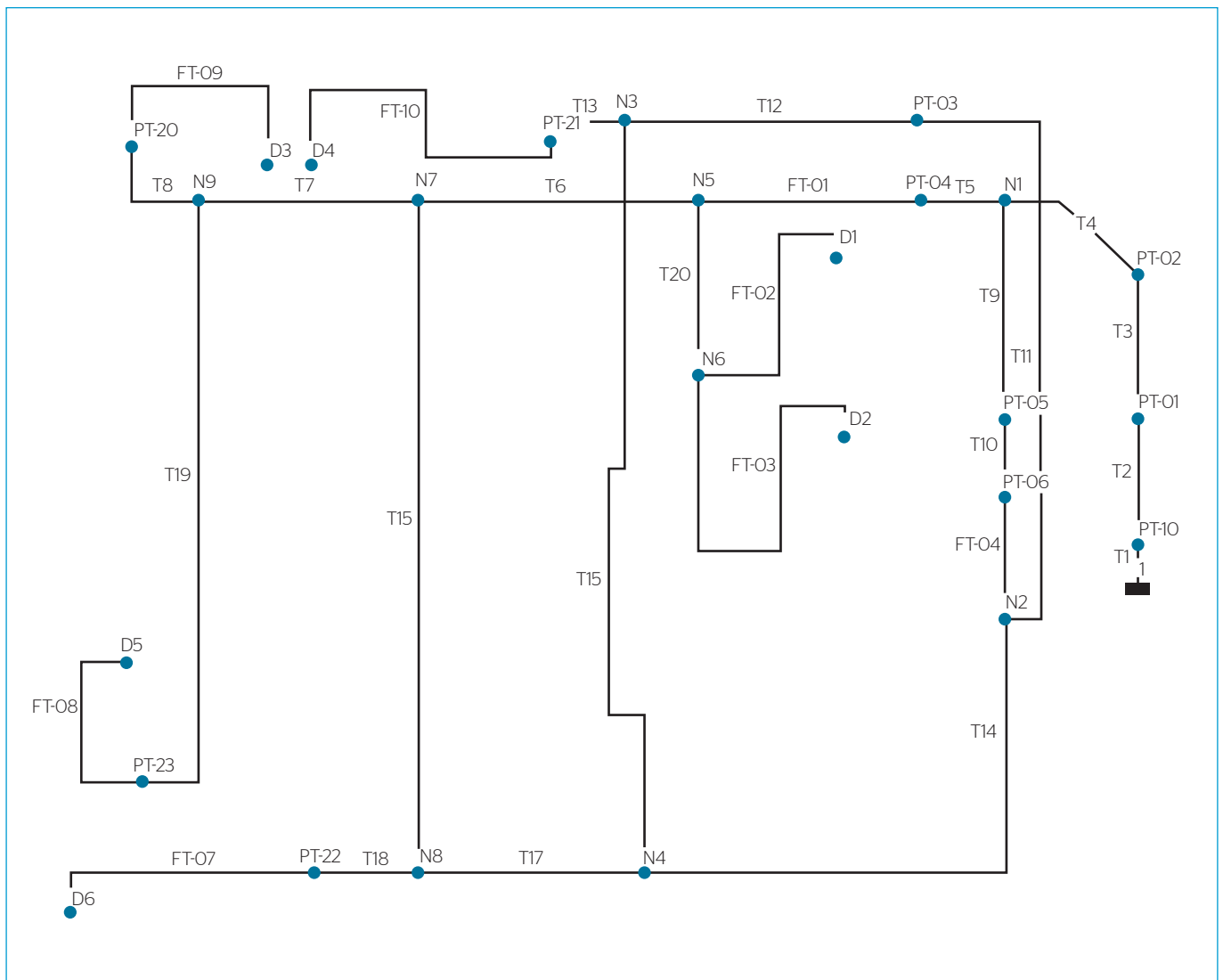


Figura 3 - Modelagem do Sistema Piloto de Distribuição de Água do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento no *Epanet*.

modela a carga hidráulica de 18,28 m, fornecida pelo bombeamento com rotação máxima e constante.

Para obter uma comparação entre os valores medidos e simulados, antes de utilizar o processo de calibração, os parâmetros do modelo hidráulico da rede foram atribuídos segundo dados tabelados da literatura e as demandas nodais referentes aos nós D1, D2, D3, D4, D5 e D6 foram obtidas experimentalmente por intermédio dos medidores de vazão instalados nos trechos que alimentam cada um dos nós de descarga e que correspondem, respectivamente, aos trechos FT-02, FT-03, FT-09, FT-10, FT-08 e FT-07, conforme indicado na Figura 3.

Utilizando o *Epanet*, o modelo da rede do SPDA do LENHS foi simulado obtendo como resposta as vazões nos trechos e nas pressões

Tabela 2 - Dados das Tubulações do Sistema Piloto de Distribuição de Água atribuídos no *Epanet*.

Trecho	Nó inicial	Nó final	Comprimento (m)	Diâmetro interno (mm)	Coefficiente de perda de carga singular
T5	N1	PT-04	1,34	54,6	0,6
FT-01	PT-04	N5	4,10	54,6	3,6
T6	N5	N7	4,68	54,6	0,0
T7	N7	N9	3,21	54,6	0,2
FT-09	PT-20	D3	3,80	54,6	17,35
T9	N1	PT-05	5,09	54,6	4,0
T10	PT-05	PT-06	0,56	54,6	0,0
FT-04	PT-06	N2	2,41	54,6	2,7
T14	N2	N4	9,12	54,6	3,9
T11	N2	PT-03	12,58	54,6	4,0
T12	PT-03	N3	4,20	54,6	0,0
T15	N4	N3	11,52	54,6	7,5
T17	N4	N8	4,43	54,6	1,3
T16	N8	N7	10,01	54,6	0,4
FT-07	PT-22	D6	4,13	54,6	14,35
T19	N9	PT-23	8,90	54,6	3,10
FT-10	PT-21	D4	3,72	54,6	17,35
T20	N5	N6	2,31	54,6	1,3
FT-02	N6	D1	8,00	54,6	11,3
T1	1	PT-10	0,10	100	0,0
T2	PT-10	PT-01	4,25	100	4,25
T3	PT-01	PT-02	2,40	100	0,0
T4	PT-02	N1	4,80	100	2,35
FT-03	N6	D2	9,80	54,6	20,65
T18	N8	PT-22	0,15	54,6	1,3
FT-08	PT-23	D5	3,00	54,6	17,35
T8	N9	PT-20	0,60	54,6	3,0
T13	N3	PT-21	0,35	54,6	1,5

nos nós, para que se possa comparar com as medições realizadas na rede real. A Figura 4 mostra a comparação entre as medidas de pressão calculadas do modelo e as medidas da rede real. Observa-se que as diferenças foram significativas e essas divergências podem ter várias causas, principalmente na atribuição do coeficiente estimado das perdas de carga singular por se tratar de uma rede pequena onde as perdas contínuas não são tão significativas, quando comparadas com as perdas localizadas.

A Figura 5 mostra a diferença dos valores de vazão em alguns trechos do SPDA do LENHS. As diferenças entre o simulado e o medido foram realizadas para o modelo da rede antes da calibração. A vazão medida das saídas, por meio dos transdutores de vazão, foi atribuída aos seus nós de jusante como demandas dentro do modelo hidráulico, por isso se observa que nesses pontos a vazão coincidiu com o simulado pelo *Epanet*. Percebe-se que o reservatório, representado pelo nó D2 pelo trecho FT-03, não foi utilizado como um ponto de consumo do modelo. Ainda assim, o fechamento do registro, ou seja, a não utilização desse ponto de consumo, também entrará como informação no processo de calibração proposto. As outras diferenças quanto às vazões nos trechos FT-01 e FT-04, por se tratarem de uma resultante de uma divisão do fluxo partindo do nó N1, significam que o modelo hidráulico estimado pelo *Epanet* não fez uma boa estimativa quanto a essa divisão da vazão, sendo este um dos motivos para a aplicação de modelos de calibração em sistemas de distribuição modelados em simuladores hidráulicos.

A análise do desempenho da calibração foi feita sob os critérios estabelecidos pelo *Water Research Centre* (WRC, 1989), para comparação entre os valores reais (medidos) e aqueles obtidos via simulação. Para os valores de vazão, o erro relativo deve estar dentro da seguinte faixa:

- $\pm 5\%$ para as medidas de vazão quando as vazões medidas excedem 10% da vazão abastecida total;
- $\pm 10\%$ para as medidas de vazão quando as vazões medidas não excedem 10% da vazão abastecida total.

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

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

Diante dos resultados obtidos para o modelo da rede sem a calibração, em análise das diferenças de pressão, todas ficaram acima de 2 m. Portanto, não estão em conformidade com os critérios de desempenho adotados para este trabalho. Para a variável vazão, suas medições excedem 10% da vazão total abastecida e o erro relativo da maior diferença foi de 21,81%, portanto fora dos critérios estabelecidos.

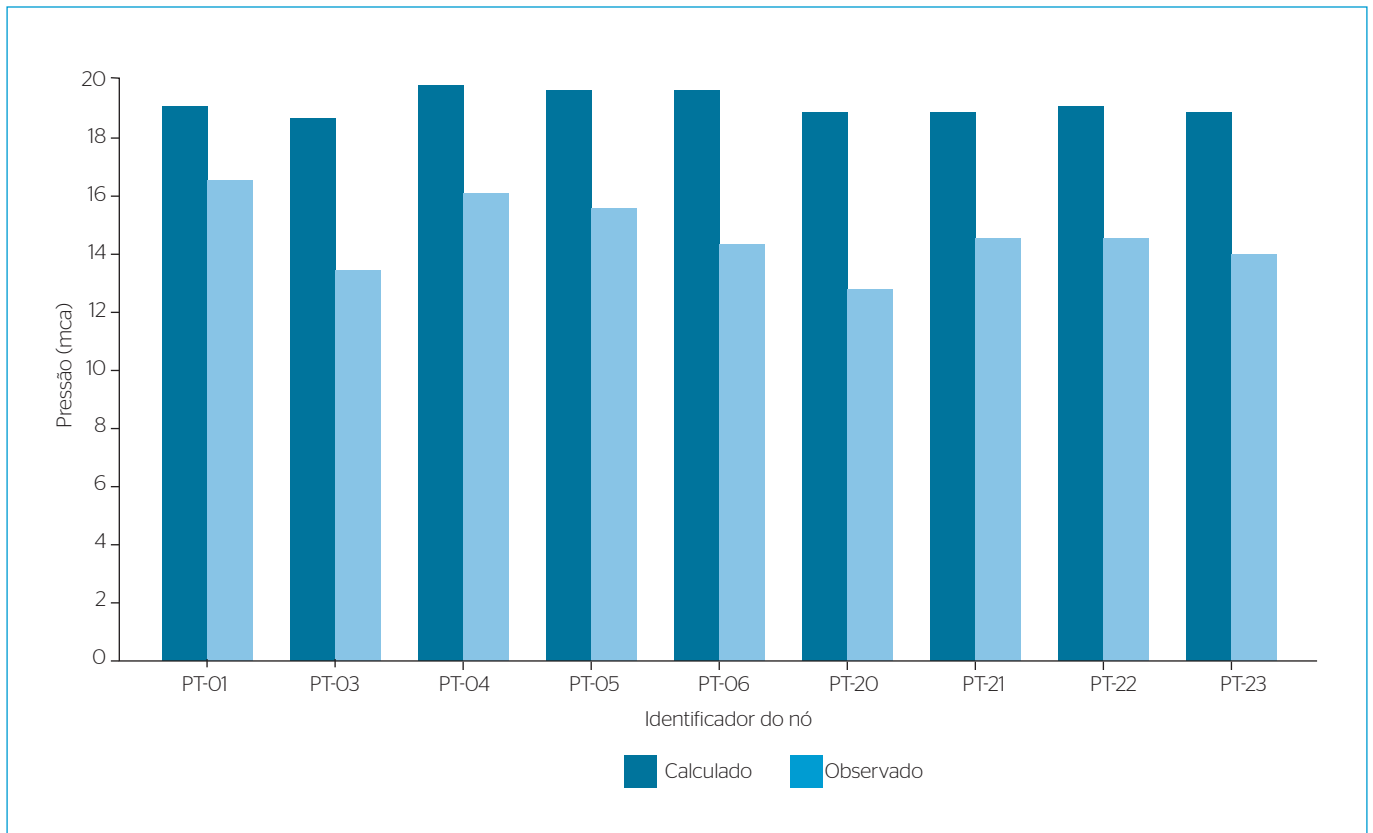


Figura 4 - Comparação entre os valores de pressão do Sistema Piloto de Distribuição de Água antes da calibração.

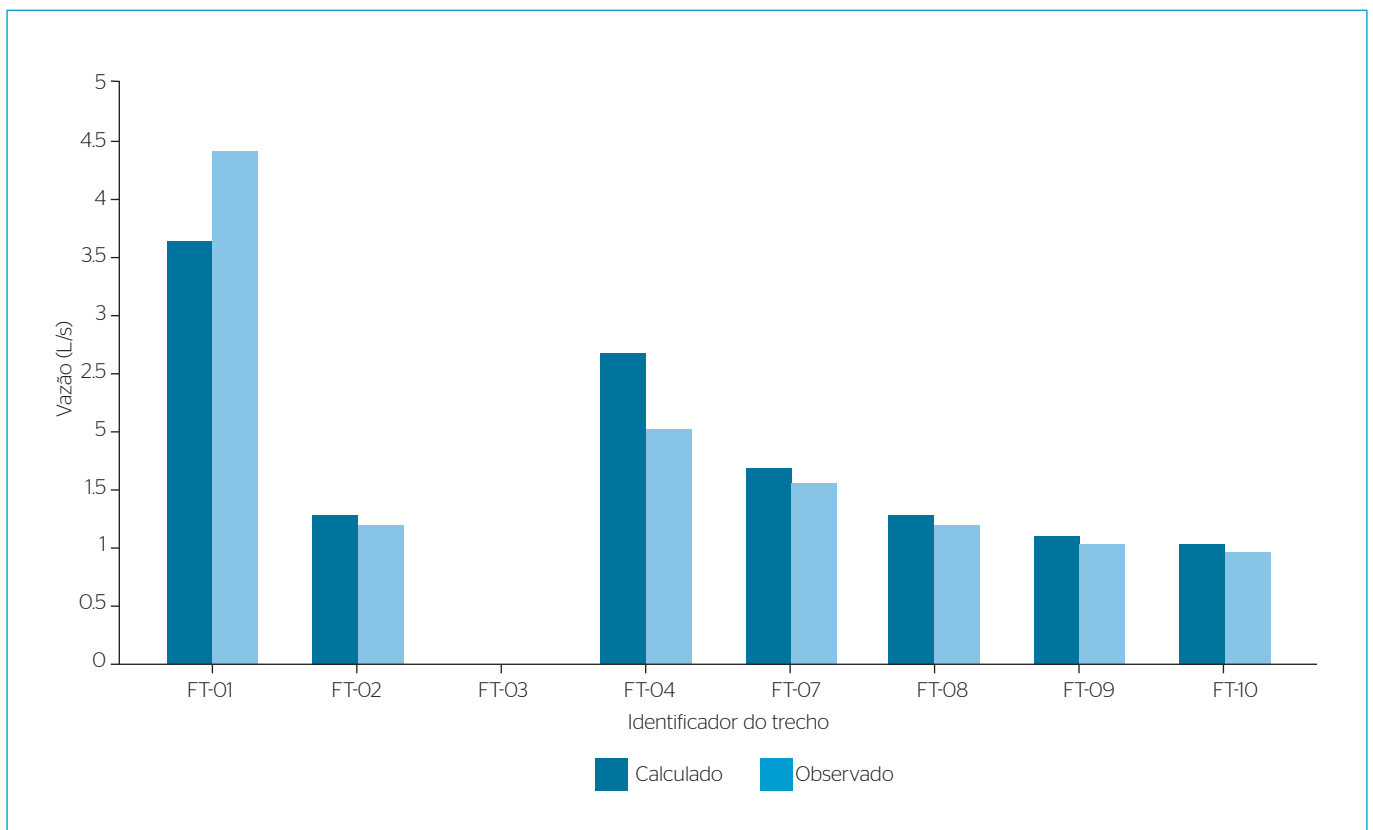


Figura 5 - Comparação dos valores de vazão do Sistema Piloto de Distribuição de Água antes da calibração.

O modelo da rede foi calibrado omitindo a vazão do trecho FT-02, na tentativa de o algoritmo identificar uma possível saída d'água. Foi obtida como resposta uma boa aproximação dos valores reais e simulados, quando comparados com as diferenças do modelo antes da calibração. As diferenças médias dos pontos de pressão e as vazões nos trechos medidos são mostradas, respectivamente, nas Figuras 6 e 7. Observa-se que, segundo os critérios

do WRC, para 100% das medidas todas as diferenças absolutas de pressão ficaram abaixo de 2 m, ficando, assim, dentro dos critérios estabelecidos.

A dinâmica de consumo resultante na saída representada pelo trecho FT-02 e a vazão principal do sistema que abastece a rede pelo trecho FT-01 são mostradas na Figura 8, em cada passo de tempo, formada pela sua curva de demanda. O modelo de calibração encontrou uma

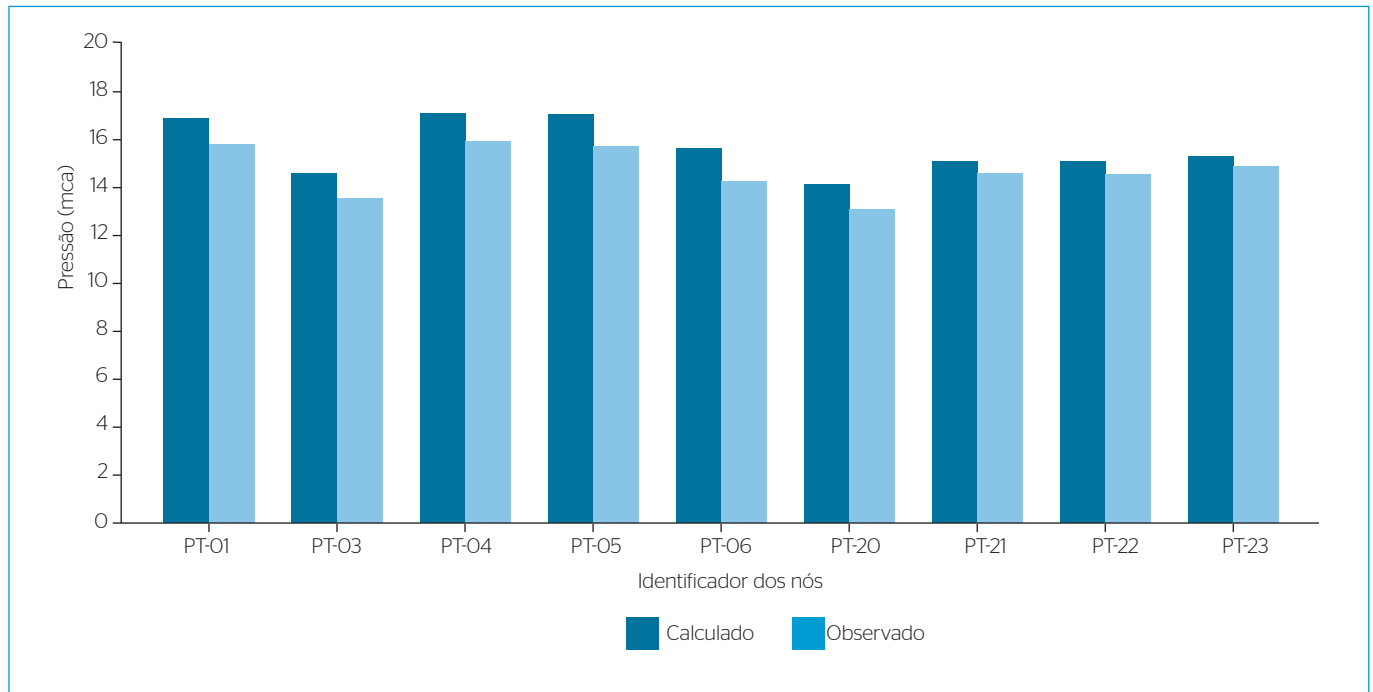


Figura 6 - Comparação da média ao longo do tempo dos valores de pressão.

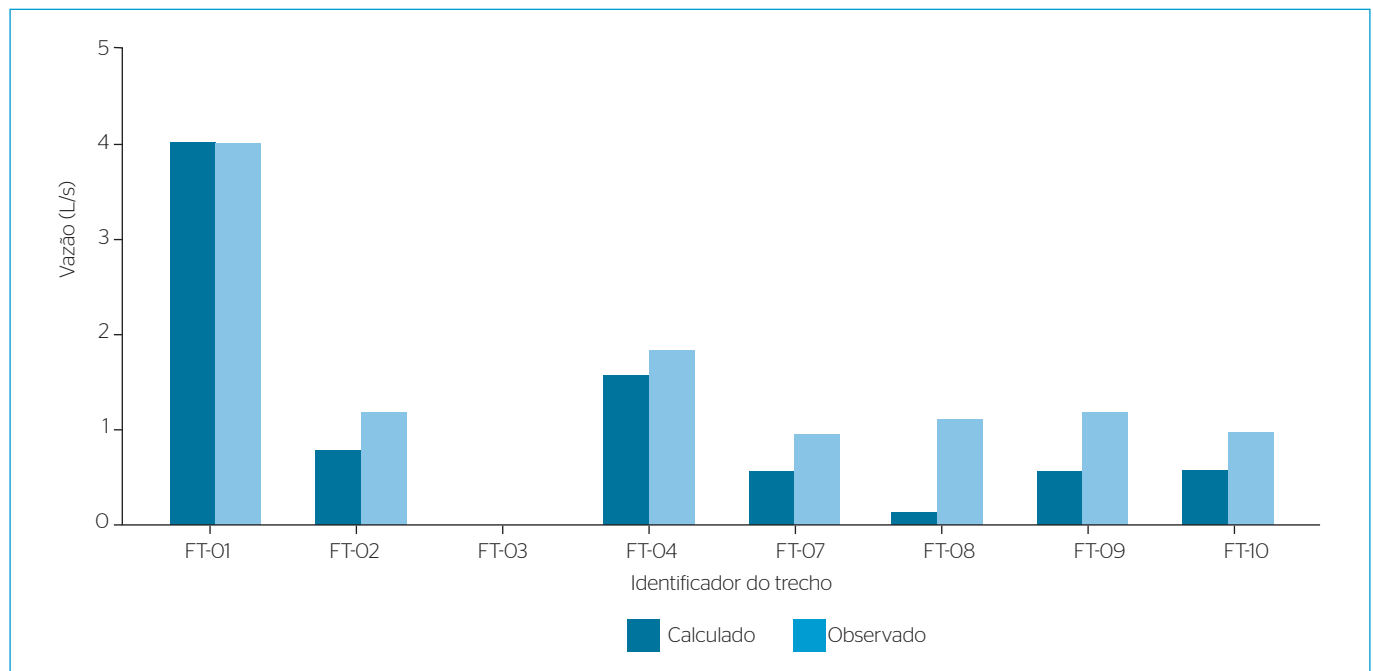


Figura 7 - Comparação média ao longo do tempo dos valores de vazão.

solução com a alteração simultânea de três parâmetros da rede e dentro de um processo dinâmico de simulação. O conhecimento sobre a rede é de fundamental importância na análise do resultado final das variáveis do modelo de calibração, já que nem sempre o modelo pode

apresentar resultados coerentes, como é o caso do trecho FT-08 ilustrado na Figura 7.

Observam-se como resultado da calibração os parâmetros finais do modelo hidráulico da rede mostrados na Figura 9. Em análise dos valores

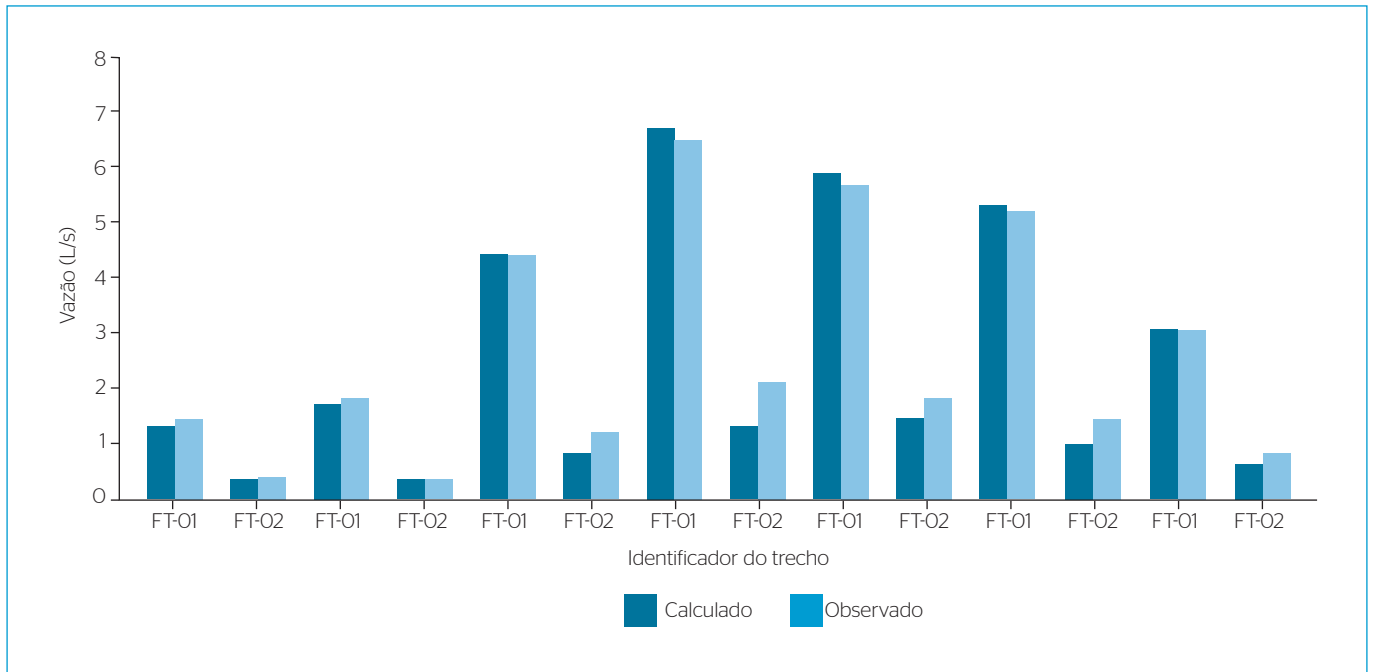


Figura 8 - Vazões nos trechos da rede.

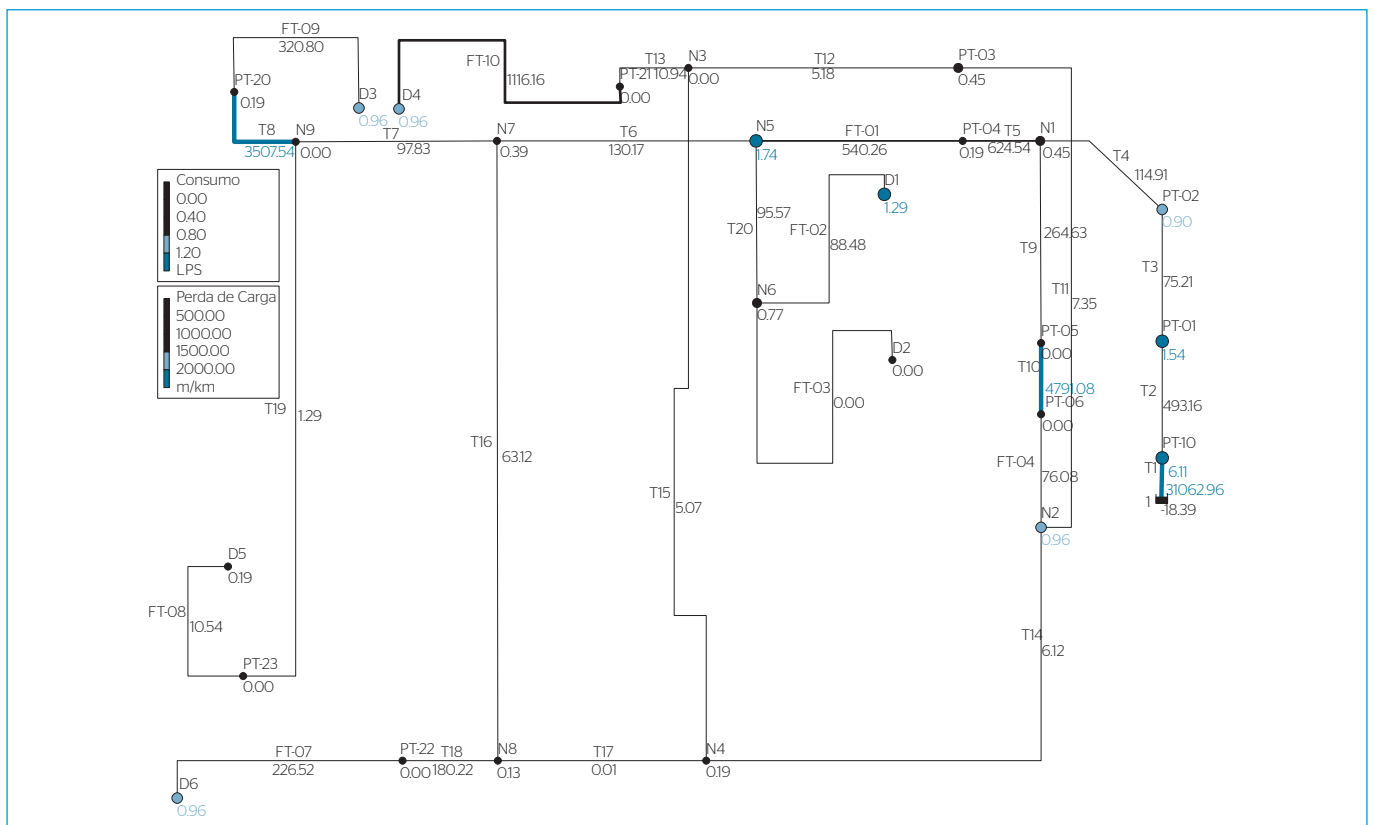


Figura 9 - Vazões nos trechos da rede no período de máxima demanda.

da rugosidade e da perda de carga localizada foi possível identificar uma perda acentuada no trecho T10, onde na rede real encontram-se, em série, duas válvulas, uma proporcional e outra multifuncional, ambas proporcionam uma perda de carga acentuada que não foi informada no modelo, mas como resultado da calibração ficou evidenciada.

Outro fator importante foi referente às demandas atribuídas aos nós N5, N6 e D1, em que na rede real existiu uma contribuição que não foi informada pelo trecho FT-02 e o modelo de calibração identificou essa saída d'água ao longo do trecho.

CONCLUSÃO

Durante o processo de calibração o algoritmo convergiu obtendo uma boa aproximação dos valores de pressão, dentro dos limites do

WRC, nos nós da rede ao longo dos modos de operação para cada passo de tempo.

O algoritmo genético multiobjetivo mostrou ser uma ferramenta capaz de otimizar processos em que o número de variáveis é bastante significativo. Em todas as tentativas houve convergência do processo de calibração e o tempo de processamento, para a rede em estudo, foi inferior a 5 minutos em uma máquina com *Intel® Quad Core* e 8 GB de RAM.

Pela evidência demonstrada no estudo de caso pode-se concluir que o *LenhsCalibra* conseguiu convergência dos seus valores reais e simulados. Portanto, será possível calibrar modelos de redes estáticas ou dinâmicas, obtendo como resposta um modelo com características hidráulicas que indicam e evidenciam vazamentos, obstruções e outras irregularidades.

REFERÊNCIAS

- ALVISI, S. & FRANCHINI, M. (2010) *Calibration and sensitivity analysis of the C-town pipe network*. Tucson, AZ: Model Water Distribution System Analysis.
- BHAVE, P.R. (1988) Calibrating water distribution network models. *Journal of Environmental Engineering*, v. 114, n. 1, p. 120-136.
- BOULOS, P. & ALTMAN, T. (1991) A graph-theoretic approach to exhibit nonlinear pipe network optimization. *Appl Math Modeling*, v. 15, p. 459-466.
- BOULOS, P.; ALTMAN, T.; LIOU, J.C.P. (1993) On the solvability of water distribution networks with unknown pipe characteristics. *Appl Math Modeling*, v. 17, p. 380-387.
- CHEUNG, P.B. (2002) Comparação de métodos de calibração de redes hidráulicas. In: Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água, 1 *Anais...* João Pessoa. Seção de Simulação e Operação de Redes, Item 4, p. 65-73.
- GOLDBERG, D.E. (1989) Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Mass: Addison-Wesley Publishing Co.
- HOLLAND, J.H. (1975) Adaptation in natural and artificial systems. Michigan: University of Michigan Press. Ann Arbor, Mich.
- NICOLINI, M.; GIACOMELLO, C.; DEB, K. (2011) Calibration and optimal leakage management for a real water distribution network. *Journal of Water Resources Planning Management*, v. 137, n. 1, p. 134-142.
- ORMSBEE, L.E. & WOOD, D.J. (1986) Explicit pipe network calibration. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 112, n. 2, p. 166-182.
- SILVA, F.G.B. (2003) Estudos de calibração de redes de distribuição de água através de Algoritmos Genéticos (Tese de Doutorado). Universidade de São Paulo, *Campus* de São Carlos, São Carlos.
- TODINI, E. & PILATI, S. (1988) A Gradient Algorithm for the Analysis of Pipe Networks. In: Computer applications in water supply - System analysis and simulation. v. 1, p. 1-20. Research Studies Press Ltd. Taunton, UK. ISBN:0-471-91783-4
- TUCCIARELLI, T.; CRIMINISI, A.; TERMINI, D. (1999) Leak analysis in pipeline systems by means of optimal valve regulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 125, n. 3, p. 277-285.
- WRC - WATER RESEARCH CENTRE. (1989) Network analysis - a code for practice. Swindon: WRC.
- WU, Z.Y. & WALSKI, T.M. (2012) Effective approach for solving battle of water calibration network problem. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 138, n. 5, p. 533-542.