

## I-065 - LENHSCALIBRA: MODELO DE CALIBRAÇÃO MULTIVARIADA DE REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

**Moisés Menezes Salvino<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Civil, Mestre e doutor em Engenharia Mecânica pela UFPB.

**Heber Pimentel Gomes<sup>(2)</sup>**

Engenheiro Civil pela UFCG, Mestre em Engenharia Civil e Ambiental. Doutor em Ingeniería Civil pela Universidad Politécnica de Madrid. Professor Associado da UFPB.

**Paulo Sergio Oliveira de Carvalho<sup>(3)</sup>**

Engenheiro Civil, Mestre em Eng. Urbana e Doutor em Eng. Mecânica pela UFPB. Pesquisador do Instituto UFPB para o Desenvolvimento da Paraíba IDEP. Prof. Titular do curso de Engenharia Civil da UNIPÊ.

**Alizi Cardoso Costa Filho<sup>(4)</sup>**

Especialista em Gestão Ambiental. Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Universidade Federal da Paraíba, Cidade Universitária - João Pessoa - PB - Brasil - CEP - 58059-900 - Fone/Fax: +55 (083) 3216-7037 R. 28 - e-mail: **riei@hotmail.com**

### RESUMO

Este trabalho tem por objetivo propor um modelo computacional robusto com vistas à calibração multivariada de modelos hidráulicos de sistemas de distribuição de água, possibilitando a identificação de possíveis irregularidades como: vazamentos, obstruções nas tubulações, válvulas inoperantes ou estranguladas e incompatibilidades na modelagem referente aos dados reais. Utilizando um Algoritmo Genético Multiobjetivo o modelo de calibração, denominado LenhsCalibra, ajusta as diferenças das variáveis de estado da rede produzindo 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, parâmetro de vazamentos, diâmetros e válvulas de controle, simultaneamente, ou qualquer combinação delas. A aplicação experimental foi realizada no Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da UFPB através do seu Sistema Piloto de Distribuição de Água. Os resultados mostraram uma boa convergência com relação ao tempo de processamento e a aproximação dos dados medidos e calculados, assim como possibilita a identificação de problemas mediante análise dos parâmetros resultantes da calibração, proporcionando assim subsídios para uma reabilitação mais precisa.

**PALAVRAS-CHAVE:** Redes de abastecimento de água, calibração, algoritmo genético, reabilitação.

### INTRODUÇÃO

O crescimento populacional nos grandes centros urbanos, a falta de investimentos para a manutenção dos sistemas de abastecimento e mão de obra qualificada insuficiente resulta em um sistema de abastecimento deficiente com muitos problemas físicos e operacionais. As perdas de água reais e aparentes são realidades nos sistemas de abastecimentos atuais, onde, no Brasil, em média, 46,87% da água tratada é perdida segundo informações do 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, é a reabilitação das redes, ou seja, a substituição de tubulações antigas, válvulas, registros e outros equipamentos que fazem parte do sistema de abastecimento, 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.

A modelagem hidráulica consiste em um modelo numérico, com base nos conceitos físicos, desenvolvido para reproduzir da melhor forma possível o comportamento do fluxo da água no interior das tubulações e acessórios da rede de distribuição modelada. 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

disto, 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.

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 robustos, assim como 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.

A simulação hidráulica do Epanet determina a vazão nos trechos e a carga hidráulica nos nós, juntamente 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. Este balanço hidráulico da rede requer a utilização de técnicas iterativas para resolver as equações não lineares envolvidas. O Epanet emprega o “Método do Gradiente” ou também conhecido por Método Híbrido Nó-Malha (TODINI e 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 3 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 (p. ex 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 a diferenças dos dados medidos e simulados estiverem dentro de um limite que vai depender da precisão que se deseja calibrar. 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), 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 parâmetros desconhecidos são estimados, ou seja, valores são atribuídos às demandas, rugosidades e 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 (2006) 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 destas 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 a 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 na qual 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 através da introdução e manobra de uma válvula reguladora de pressão. O posicionamento e regulação das válvulas teve 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 evolução natural das espécies, utilizando os processos da genética das populações. Os conceitos de seleção natural e sobrevivência do indivíduo mais apto advêm da evolução oriunda da genética, esses conceitos fundamentam o Algoritmo Genético (AG). Foram introduzidos no meio científico por Holland (1975) e popularizado por um de seus alunos, Goldberg (1989). A inspiração para o desenvolvimento desse algoritmo vem da teoria de Charles Darwin, publicado 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 pelo qual 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 foi utilizado, 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 do 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 Multiobjetivo no processo de calibração, que tem por objetivo, utilizando redes modeladas no simulador hidráulico Epanet, produzir informações compatíveis com suas respectivas redes reais. O processo de calibração proposto permite utilizar 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.

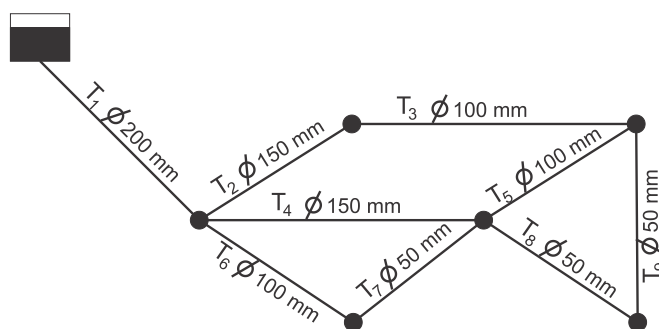
Cada variável que participará do processo de calibração deverá ser codificada em uma tabela. Caso o número de elementos dessa tabela seja diferente de  $(2^n)$ , onde “n” representa o número de bits que codificará cada item da tabela, então se faz necessário corrigir para não ocorrer, durante a mutação, parte da informação contida no cromossomo não corresponder a nenhum item da tabela. Como proposta de correção, caso ocorra isto, 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. Para exemplificar a codificação proposta utilizando apenas uma variável para simplificar, supõe-se que se tem a princípio, 04 possíveis valores para os diâmetros de uma pequena rede exemplo, que são: 50, 100, 150 e 200 mm. Como o número de elementos do exemplo faz parte do conjunto dos elementos formados por  $2^n$ , então a tabela resultante ficará como apresentada na Tabela 1. Para saber com quantos bits uma variável é codificada, basta igualar a quantidade de elementos da tabela com  $2^n$  e encontrar o valor de “n”. Para o exemplo da Figura 1, n é igual a dois.

**Tabela 1 - Codificação para o exemplo proposto**

DIÂMETRO (mm)	CODIFICAÇÃO (bits)
50	00
100	01
150	10
200	11

Utilizando a Tabela 1, a codificação da rede exemplo ilustrada na Figura 1 resulta no cromossomo (111001100101000000), codificado segundo sequência crescente dos trechos da rede. Portando, o tamanho do cromossomo referente a uma variável será de  $(NOR) \times (NB)$ , onde “NOR” significa o número de objetos da rede da qual a variável é aplicada (nesse caso, cada trecho) e “NB” o número de bits necessários para representar cada elemento da tabela de codificação da variável em análise (para o exemplo da Figura 1, 2 bits).



**Figura 1 - Ilustração da Codificação de uma Rede**

Nem todas as variáveis têm valores tabelados ou padronizados. Para solucionar isto, foi desenvolvida uma adaptação mediante limites máximos e mínimos para a variável em análise segundo a Equação (1), criando nesse intervalo, uma quantidade de “N” valores arbitrados pelo usuário, a depender da precisão que se deseja. Uma grande quantidade de valores implica em uma tabela maior e, conseqüentemente, uma representação binária maior para cada item.

$$Vp_i = V_{MIN} + \frac{(V_{MAX} - V_{MIN})}{N} \times i \quad \text{equação (1)}$$

Onde:

$Vp_i$  = é o valor procurado para o item na posição i;

$V_{MIN}$  = é o valor mínimo admissível para a variável;

$V_{MAX}$  = é o valor máximo admissível para a variável;

N = é a quantidade de valores no intervalo.

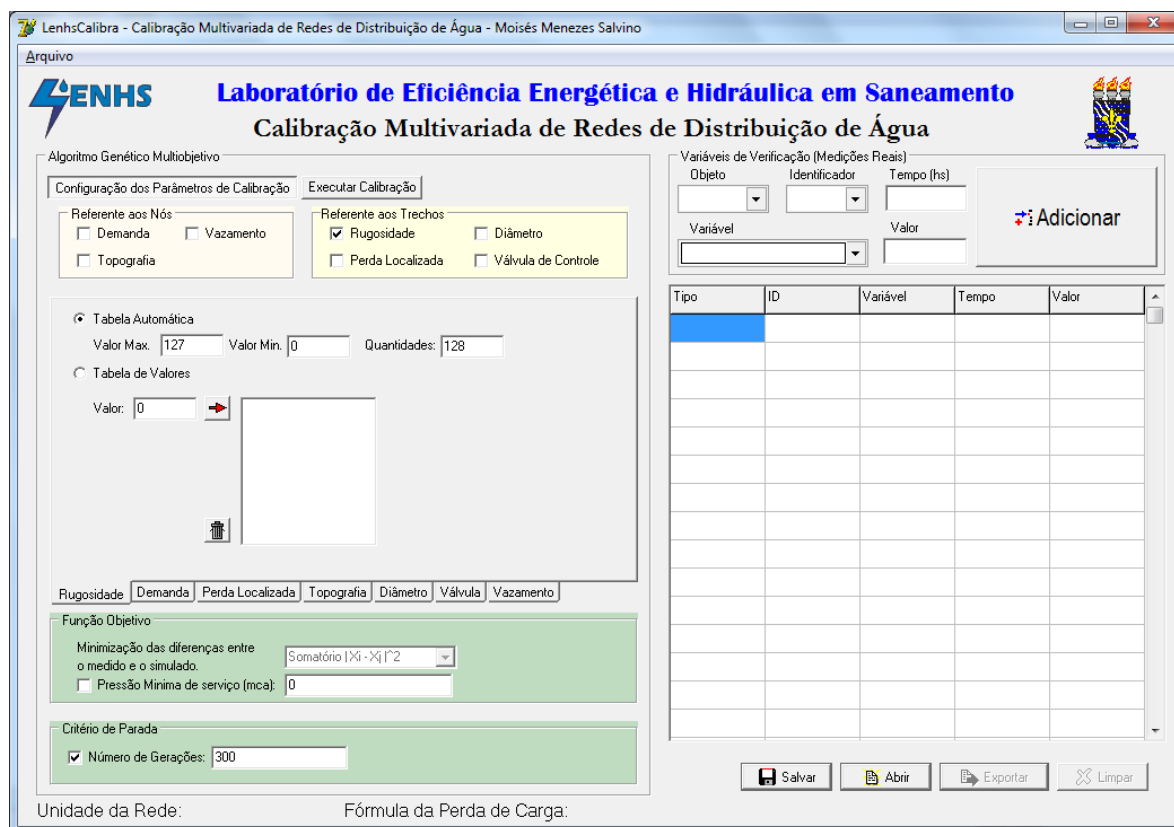
Durante o processo de calibração, o cromossomo deve ser decodificado, ou seja, o modelo hidráulico da rede deve assumir os valores informados no cromossomo. Para isto, a tabela que antes foi utilizada para codificar deve ficar armazenada, em memória, durante todo o processo. A decodificação utiliza o processo inverso, verificando a cadeia de bits do cromossomo e atribuindo valores às variáveis calibráveis que foram selecionadas para o modelo hidráulico, na ordem crescente dos nós ou trechos. Dependendo da quantidade de valores possíveis, organizados na tabela de codificação, para cada variável, verificam-se na tabela de codificação os bits necessários para decodificar, atribuindo a cada objeto da rede o valor correspondente à linha da tabela de codificação dos bits encontrados. Utilizando ainda o exemplo da Figura 1, percebe-se que a codificação da tabela correspondente à variável é representada por 2 bits em sua codificação e o objeto em análise é o trecho. Em seguida, o algoritmo lê os 2 primeiros bits do cromossomo (11) e a Tabela 1 é consultada obtendo-se como resposta o valor de 200 mm para a variável diâmetro correspondente ao primeiro trecho. Esse valor é atribuído e, sequencialmente, os demais trechos recebem seus valores de acordo com a disposição dos bits no cromossomo. Durante a calibração da rede experimental do Sistema Piloto de Distribuição de Água do LENHS foram arbitrados 1024 valores no intervalo das variáveis propostas para calibração, resultando em um cromossomo com 280 bits para cada variável utilizada.

A programação de uma biblioteca para a utilização dos algoritmos genéticos multiobjetivos juntamente com o desenvolvimento de uma interface amigável para a alimentação dos dados necessários para a calibração resultou em uma ferramenta robusta que tem como principal função a calibração de modelos hidráulicos elaborados no Epanet e exportados no formato INP conforme ilustrado na Figura 2.

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. Este laboratório foi criado para desenvolver serviços especializados, atividades de ensino, pesquisa e extensão, relacionadas ao uso eficiente de energia e da água no saneamento.

O Sistema Piloto de Distribuição de Água (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 através de um programa supervisorio 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 treinamentos são direcionados, primordialmente, a trabalhos de redução de perdas de água e energia elétrica em sistemas pressurizados de abastecimento de água.



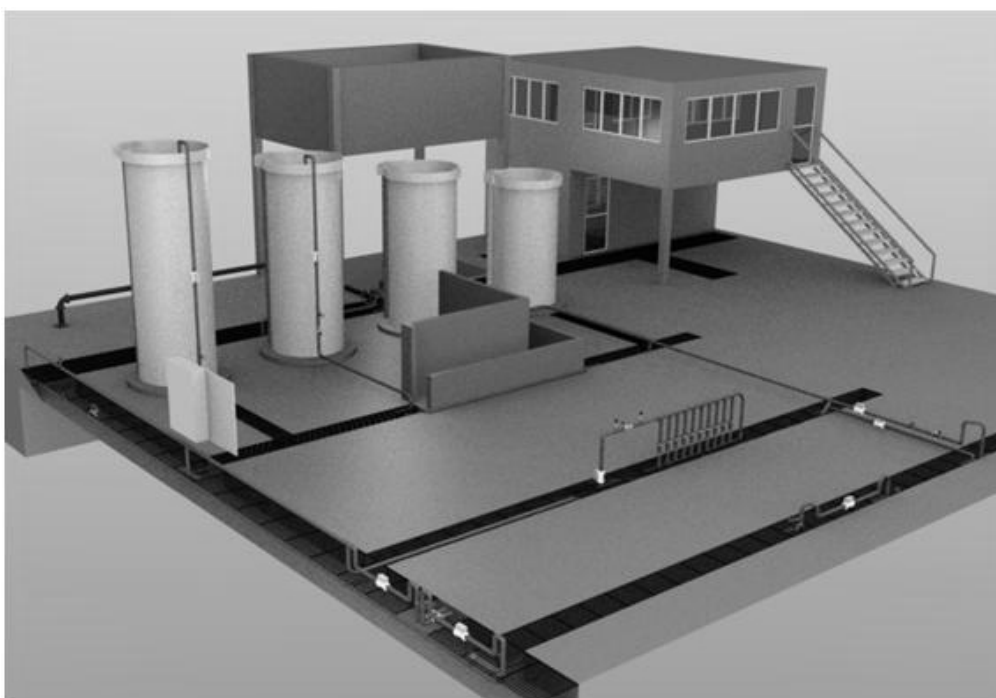
The screenshot shows the 'LenhsCalibra - Calibração Multivariada de Redes de Distribuição de Água' software window. The interface includes a menu bar, a title bar, and a main workspace. The workspace is divided into several sections: 'Configuração dos Parâmetros de Calibração' with checkboxes for 'Referente aos Nós' (Demanda, Vazamento, Topografia) and 'Referente aos Trechos' (Rugosidade, Diâmetro, Perda Localizada, Válvula de Controle); 'Tabela Automática' with input fields for 'Valor Max.', 'Valor Min.', and 'Quantidades'; 'Tabela de Valores' with a 'Valor' input field; 'Função Objetivo' with a dropdown for 'Minimização das diferenças entre o medido e o simulado' and a checkbox for 'Pressão Mínima de serviço (mca)'; and 'Critério de Parada' with a checkbox for 'Número de Gerações'. A table on the right lists 'Variáveis de Verificação (Medições Reais)' with columns for 'Tipo', 'ID', 'Variável', 'Tempo', and 'Valor'. At the bottom, there are buttons for 'Salvar', 'Abrir', 'Exportar', and 'Limpar'.

**Figura 2 – Ferramenta de calibração de modelos hidráulicos - LenhsCalibra**

A rede de abastecimento possui 155 metros 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 6 (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 m<sup>3</sup>), através do sistema de bombeamento ou pelo reservatório superior (15 m<sup>3</sup>). A Figura 3 apresenta uma perspectiva do sistema.

O Sistema Piloto de Distribuição de Água foi calibrado de forma dinâmica, por isso foi necessária à variação da demanda nos pontos de saída ao longo do tempo. Utilizando o sistema supervisorio, as demandas foram ajustadas, manualmente através de registros de gaveta instalados nas saídas da rede, admitindo uma vazão máxima de 33,53 m<sup>3</sup>/h para todo o sistema de distribuição e uma vazão mínima de 6,69 m<sup>3</sup>/h. Com base no valor médio das vazões, medidas a jusante da bomba que alimenta toda a rede, de 20,40 m<sup>3</sup>/h, foi obtida experimentalmente uma curva de demanda que resultaram nos fatores multiplicativos mostrados na Tabela 2.





**Figura 3 - Perspectiva do SPDA modelado no blender®**

**Tabela 2 - Coeficientes e Vazões obtidos experimentalmente do SPDA**

CONFIGURAÇÃO	VAZÃO DE ALIMENTAÇÃO (m³/h)	COEFICIENTE DA CURVA (fatores multiplicativos)	INTERVALO (horas)
1	6,69	0,33	0:00 às 3:00
2	8,74	0,43	3:00 às 6:00
3	22,38	1,10	6:00 às 9:00
4	33,53	1,64	9:00 às 12:00
5	33,53	1,64	12:00 às 15:00
6	29,25	1,43	15:00 às 18:00
7	26,66	1,30	18:00 às 21:00
8	15,52	0,76	21:00 às 0:00

A calibração foi realizada através 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.

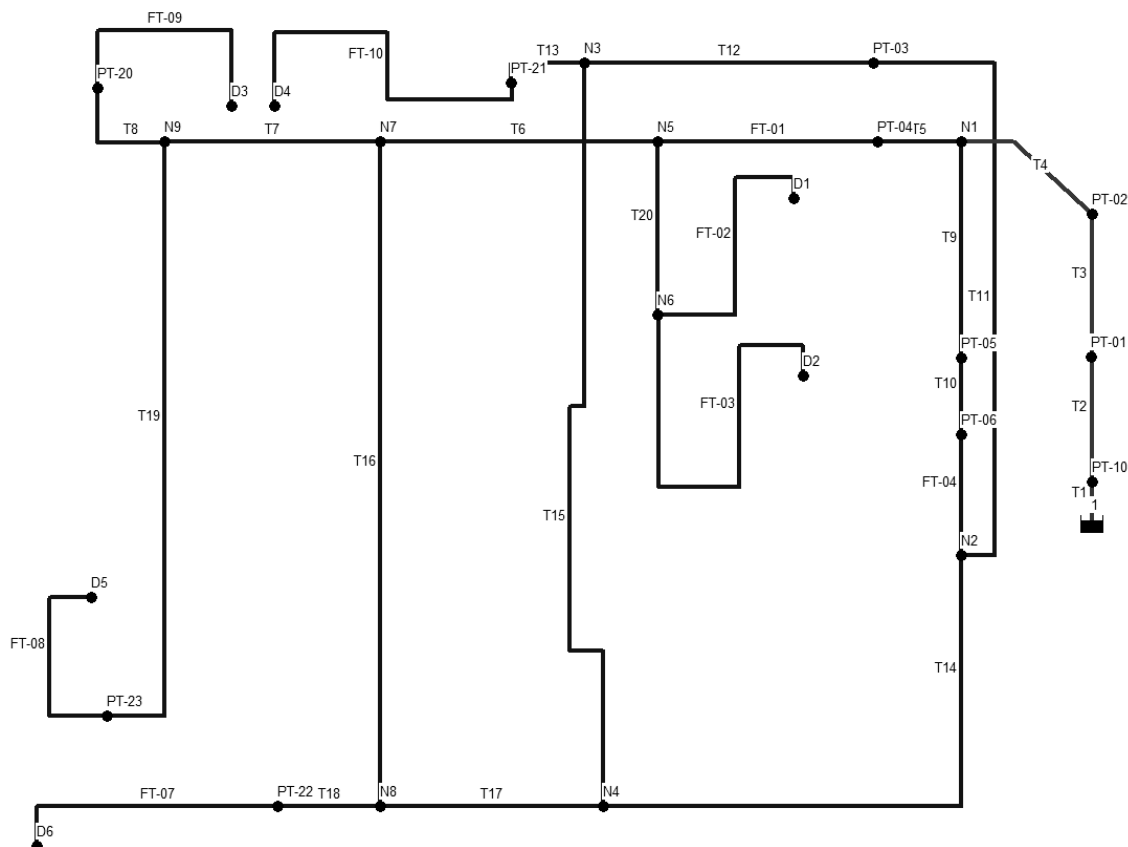
## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como primeira experiência e tentativa de aplicação da metodologia proposta, foi calibrada a Rede Piloto de Distribuição de Água do LENHS-UFPA. Utilizando o Epanet, o SPDA do LENHS foi modelado com a topologia da Figura 4, onde as tubulações foram configuradas com os dados da Tabela 3. Todos os nós da rede estão na mesma cota topográfica com exceção da alimentação, referente à descarga nos tubulões, 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, modela a carga hidráulica de 18,28 m que é fornecida através de bombeamento com rotação máxima e constante.

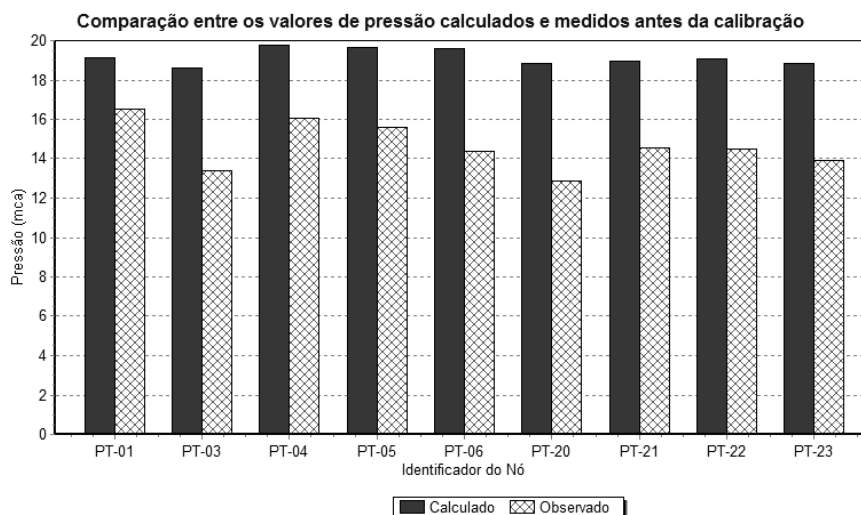
Para obter uma comparação entre os valores medidos e simulados, antes de utilizar o processo de calibração, os parâmetros do modelo hidráulico da rede foram atribuídos segundo dados tabelados da literatura e as demandas nodais referentes aos nós D1, D2, D3, D4, D5 e D6 foram obtidas experimentalmente através 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 4.

Utilizando o Epanet, o modelo da rede do SPDA do LENHS foi simulado obtendo como resposta as vazões nos trechos e pressões nos nós para que se possa comparar com as medições realizadas na rede real. A Figura 5 mostra a comparação entre as medidas de pressão calculadas do modelo e 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.

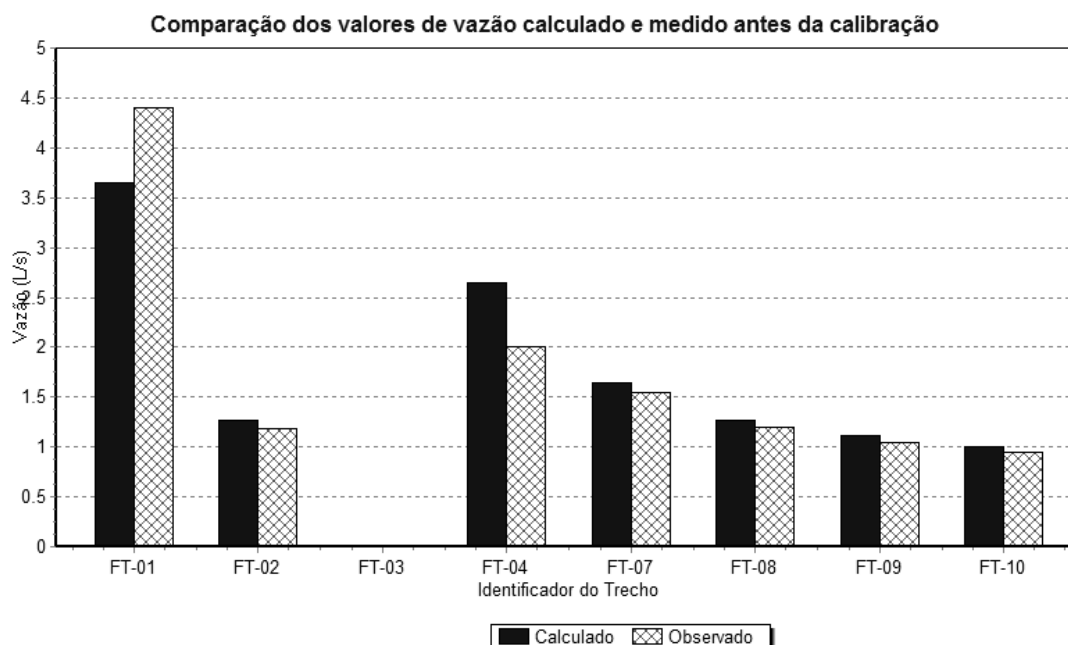


**Figura 4 - Modelagem do SPDA do LENHS no Epanet**



**Figura 5 - Comparação entre os valores de pressão do SPDA antes da calibração**

A Figura 6 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, através dos transdutores de vazão, foi atribuída aos seus nós de jusante como demandas dentro do modelo hidráulico; por isso, observa-se que nesses pontos a vazão coincidiu com o simulado pelo Epanet. Percebe-se que o tubulão, representado pelo nó D2 através do trecho FT-03, não foi utilizado como um ponto de consumo do modelo, por estar sendo utilizado em uma bancada experimental referente à outra tese de doutorado. Ainda assim, o fechamento do registro, ou seja, a não utilização deste 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 tratar 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.



**Figura 6 - Comparação dos valores de vazão do SPDA antes da calibração**

A análise do desempenho da calibração foi feita sob os critérios estabelecidos pelo WATER RESEARCH CENTRE (1989) – WRC, 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.

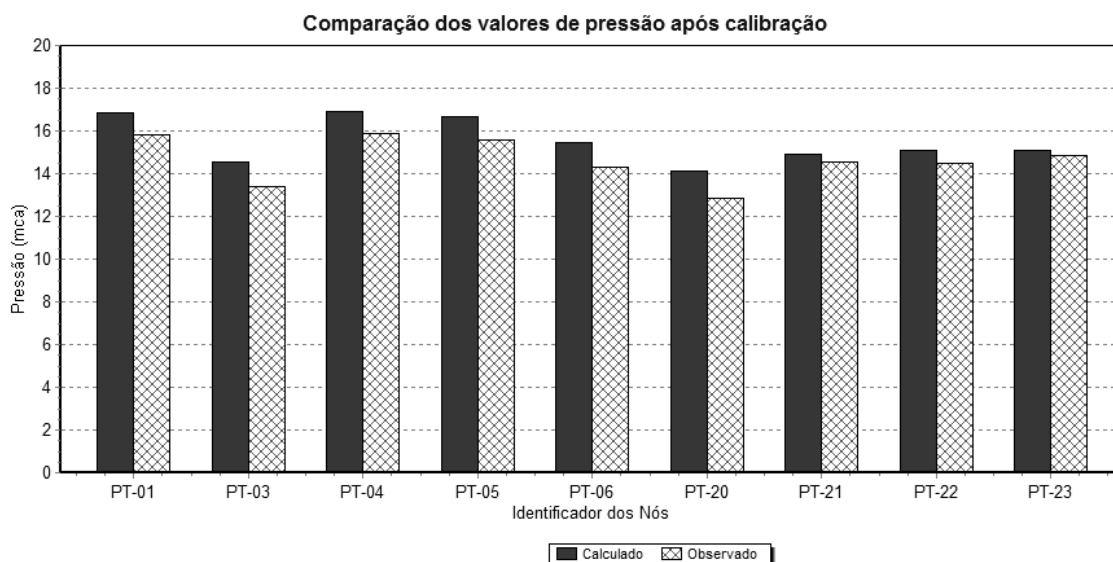
Para os valores de pressão, deve se basear no erro absoluto, dado pela diferença entre o valor simulado e o observado, e não deve exceder uma das seguintes faixas:

- $\pm 0,5$  m para 85% das medidas de pressão;
- $\pm 0,75$  m para 95% das medidas de pressão;
- $\pm 2$  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 adotado para este trabalho, assim a modelagem da rede torna-se uma ferramenta poderosa para prever a operação em diversas situações quando representar da melhor forma possível a rede real e para isto a calibração se torna imprescindível. 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.

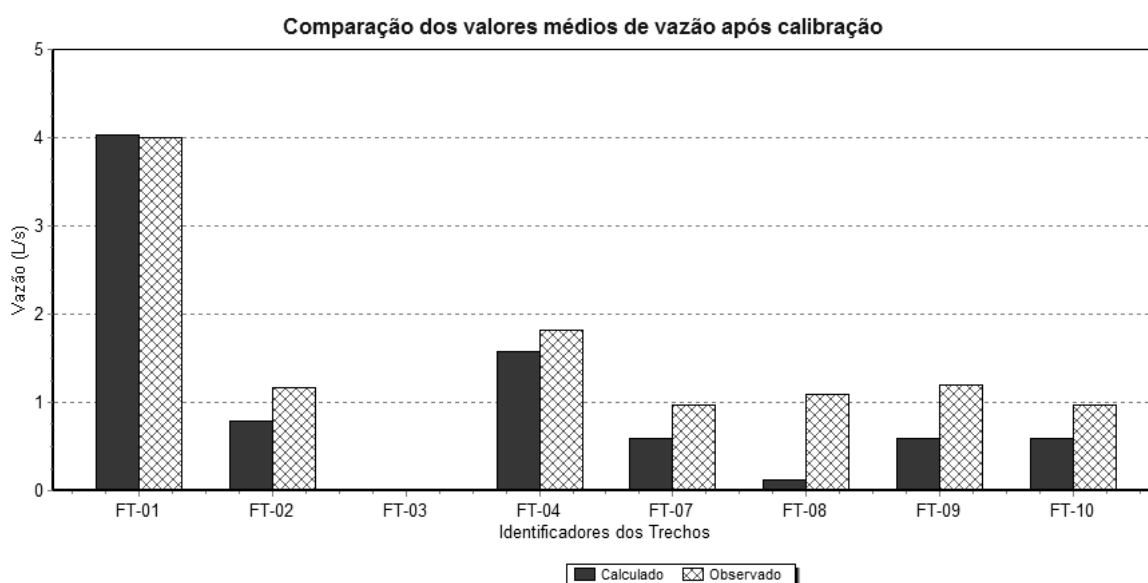


O modelo da rede foi calibrado omitindo a vazão do trecho FT-02 na tentativa de identificar uma possível saída d'água neste ponto. A calibração obteve como resposta uma boa aproximação dos valores reais e simulados. As diferenças médias dos pontos de pressão, assim como, as vazões nos trechos medidos são mostrados, respectivamente, na Figura 7 e na Figura 8. Observa-se que segundo os critérios da WRC para 100% das medidas todas as diferenças absolutas de pressão ficaram abaixo de 2 m, ficando assim dentro dos critérios estabelecidos.



**Figura 7 – Comparação da média ao longo do tempo dos valores de pressão**

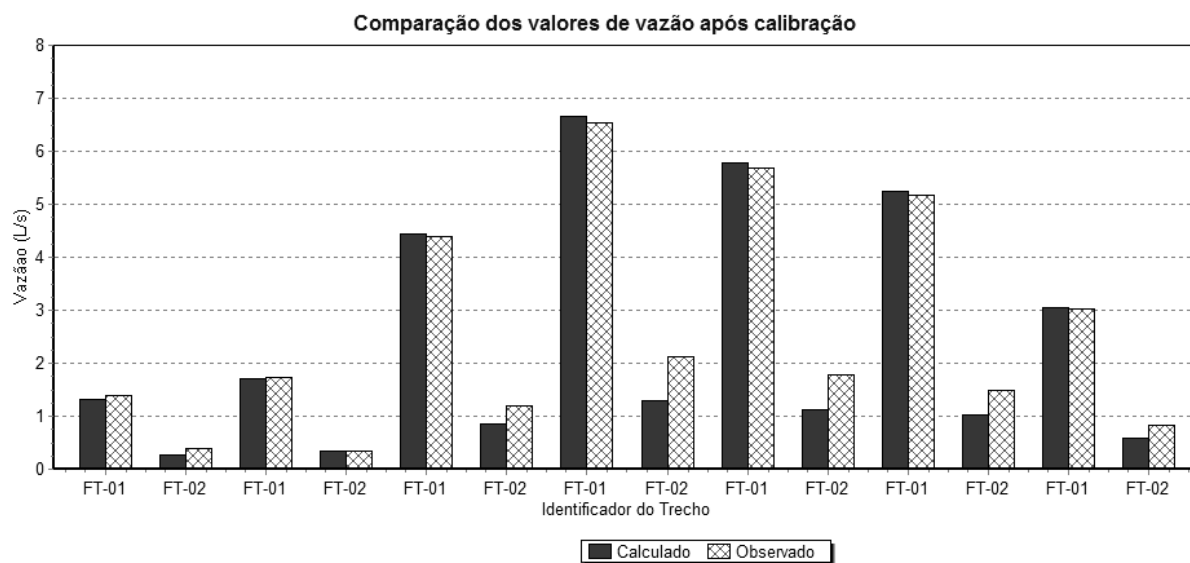
A dinâmica de consumo resultante na saída representada pelo trecho FT-02 e a vazão principal do sistema que abastece a rede pelo trecho FT-01 são mostradas na Figura 9 ao longo dos modos de operação formada pela sua curva de demanda. O modelo de calibração encontrou uma solução com a alteração simultânea de três parâmetros da rede e dentro de um processo dinâmico de simulação.



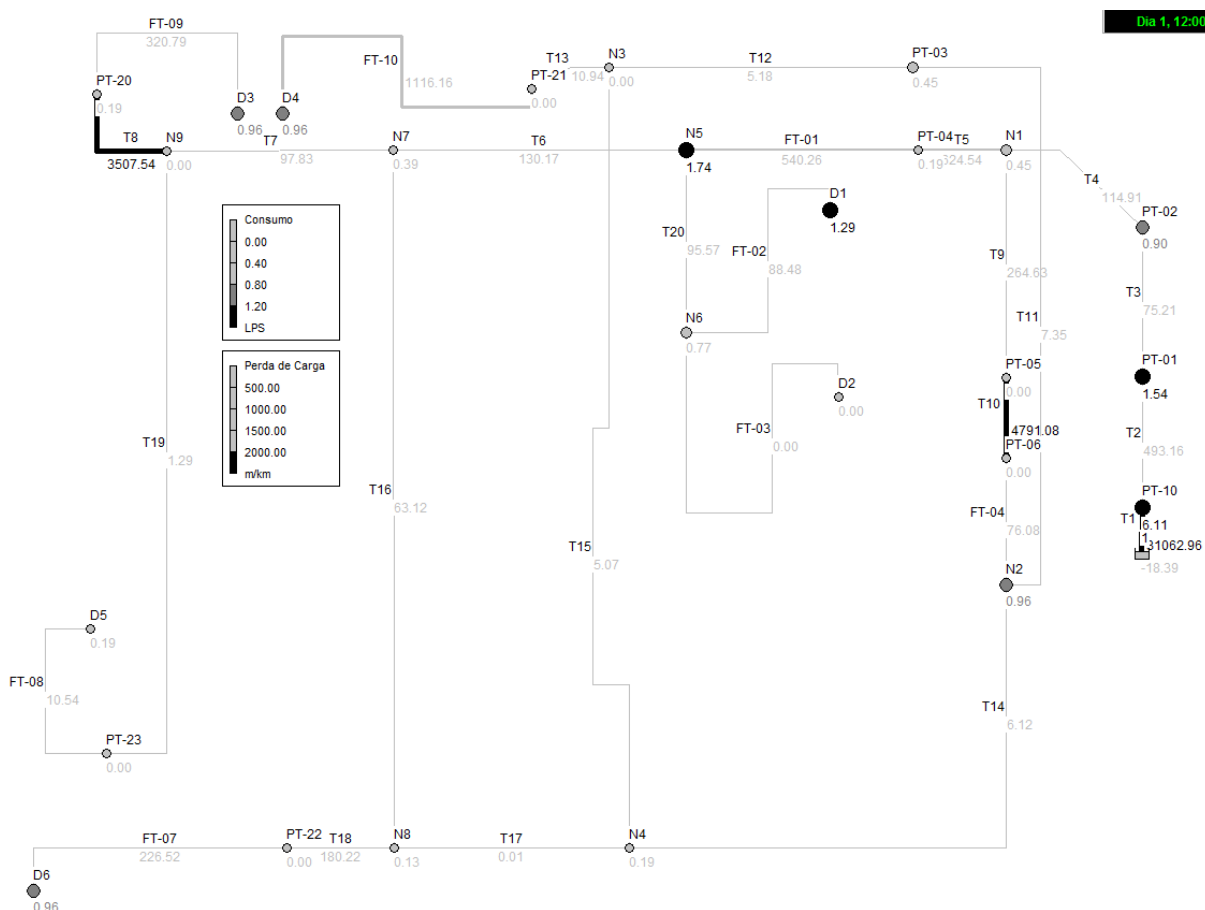
**Figura 8 - Comparação média ao longo do tempo dos valores de vazão**

Observam-se como resultado da calibração os parâmetros finais do modelo hidráulico da rede mostrados na Figura 10. A rugosidade e a perda de carga localizada identificou 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 em análise dos parâmetros resultantes da calibração ficaram evidenciadas.



**Figura 9 - Vazões nos trechos da rede**



**Figura 10 - Vazões nos trechos da rede no período de máxima demanda**

Outro fator importante foi de que as demandas atribuídas aos nós N5, N6 e D1, onde na rede real existiu uma contribuição que não foi informada através do trecho FT-02, foram diferentes de zero e apresentaram valores coerentes com a admitida para a análise experimental, portanto o modelo identificou essa saída d'água ao longo do trecho.

Durante o processo de calibração o tempo de processamento foi sempre, em média, inferior a 5 min quando executado em um computador com processador Intel i7® e 8 GB RAM.

## CONCLUSÃO

Durante o processo de calibração o algoritmo convergiu obtendo uma boa aproximação dos valores de pressão, dentro dos limites da WRC, nos nós da rede ao longo dos modos de operação para cada passo de tempo.

O Algoritmo genético multiobjectivo, utilizando o LenhsCalibra, mostrou ser uma ferramenta robusta para a solução da calibração de redes de abastecimento de água.

Pela evidência demonstrada no estudo de caso pode-se concluir que o modelo é considerado eficaz e possibilita calibrar modelos de redes estáticas ou dinâmicas utilizando uma ou mais variáveis (multivariável) dentro do processo de calibração, obtendo como resposta um modelo com características hidráulicas que simulam seu comportamento real e evidenciam vazamentos, obstruções e outras irregularidades através dos parâmetros hidráulicos encontrados.

O modelo hidráulico calibrado de uma rede real mostrou ser uma ferramenta indispensável para prever diversos modos de operação e ainda fornece subsídios para uma futura reabilitação e possível ampliação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALVISI S. AND FRANCHINI M. Calibration and Sensitivity Analysis Of The C-Town Pipe Network. In Model Water Distribution System Analysis 2010, 12-15, Tucson, AZ, USA. 2010
2. BHAVE, P. R. "Calibrating water distribution network models." J. Envir. Engrg., ASCE, v.114(1), pp.120–136. 1988.
3. BOULOS P and ALTMAN T. A graph-theoretic approach to exhibit nonlinear pipe network optimization. Appl Math Modeling; V.15.pp.459–66. 1991
4. BOULOS P, ALTMAN T. and LIOU, J. C. P. On the solvability of water distribution networks with unknown pipe characteristics. Appl Math Modeling; V.17.pp.380–387. 1993
5. CHEUNG, P. B. Comparação de métodos de calibração de redes hidráulicas. In: SEREA – Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água, João Pessoa - Brasil, 2006.
6. GOLDBERG, D. E. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Addison-Wesley Publishing Co., Reading, Mass. 1989
7. HOLLAND, J.H. (1975). Adaptation in Natural and Artificial Systems. Ann Arbor, MIT Press.
8. NICOLINI M., GIACOMELLO C., DEB K. Calibration and Optimal Leakage Management for a Real Water Distribution Network. Journal of Water Resources Planning Management, 137(1): pp. 134-142. 2011
9. ORMSBEE, L. E., and WOOD, D. J. "Explicit pipe network calibration." J. Hydr. Engrg., ASCE, 112(2), 166–182. 1986
10. SILVA, F. G. B. Estudos de calibração de redes de Distribuição de água através de Algoritmos Genéticos – Tese de Doutorado apresentada a Universidade de São Paulo, Campus de São Carlos. São Carlos/SP, 2003.
11. TODINI, E.; PILATI, S. A Gradient Algorithm for the Analysis of Pipe Networks. In: Computer Applications In Water Supply – System Analysis And Simulation. COULBECK, B.; ORR, C. H. (eds.), vol. 1, p. 1-20, 1988.
12. TUCCIARELLI, T.; CRIMINISI, A.; TERMINI, D. Leak Analysis in Pipeline Systems by Means of Optimal Valve Regulation. Journal of Hydraulic Engineering, v. 125, n. 3, p. 277-285, Mar 1999.
13. WATER RESEARCH CENTRE. Network Analysis – A Code for Practice. Published by WRc, Swindon, UK. 1989.
14. WU, Z. Y. and WALSKI, T. M. An Effective Approach for Solving Battle of Water Calibration Network Problem. Journal of Water Resources Planning and Management 2011