

# XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

## MODELO ITERATIVO DE CALIBRAÇÃO DE REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA COM VISTAS À REABILITAÇÃO

*Moisés Menezes Salvino<sup>1</sup> & Heber Pimentel Gomes<sup>2</sup>; Nicolle de Belmont Sabino Rocha<sup>3</sup>; Terezinha Guedes Torres<sup>4</sup>; Wesley Imperiano Gomes de Melo<sup>5</sup>; Renato de Sousa<sup>6</sup>; Allan Santos de Sousa<sup>7</sup>; Gênisson Batista Carneiro<sup>8</sup>*

**Resumo** – O controle operacional é essencial para as redes de abastecimento de água de cidades de elevada densidade populacional, em virtude da complexidade dos seus sistemas. A minimização dos gastos com manutenções, assim como a maximização da eficiência dos seus sistemas são objetivos prioritários das empresas de abastecimento. Para que se possa intervir na rede, com equipamentos sofisticados de controle e automação, é necessário conhecer o comportamento real da rede e assim modelar da melhor forma possível, prevendo ações futuras. A modelagem de redes reais, bem como sua calibração não é uma tarefa fácil, em virtude da grande quantidade de incertezas e do grande número de variáveis envolvidas no processo. Este trabalho apresenta uma alternativa de calibração através de um processo iterativo utilizando, como variáveis calibráveis, a demanda e as rugosidades absolutas das tubulações, obtendo resultados com vistas à reabilitação. A validação do modelo foi verificada através da calibração da Rede Piloto de Distribuição de Água do LENHS, onde se obteve resultados satisfatórios.

**Abstract** – Operational control is essential for water supply systems in cities of high density population, because of the complexity of their systems. The minimization of maintenance expenses, thus maximizing the efficiency of their systems are priority objectives of the supply company. To be able to change the network, with sophisticated automation and control, it is necessary to know the actual behavior of the network model and so the best way possible, anticipating future actions. The modeling of real networks, as well as its calibration is not an easy task given the large amount of uncertainty and the large number of variables involved. This paper presents an alternative calibration by using an iterative process using variables such as the demand and the absolute roughness of pipe network, obtaining results with a view to rehabilitation. The validation of the model is verified through the calibration of the Pilot Network of Water Distribution of the LENHS.

**Palavras-Chave** – Calibração, Abastecimento, Reabilitação.

### INTRODUÇÃO

A água potável, por ser um recurso natural limitado, deve ser distribuída em quantidade suficiente para atender quantitativamente e qualitativamente às necessidades de consumo da população. Entretanto, nos dias de hoje, as companhias de abastecimento têm dificuldade de manter

<sup>1</sup> Doutorando em Engenharia Mecânica – UFPB - Campus I – CT – CEP 58059-900 – fone: 3216-7037 r.29 e-mail: [riei@hotmail.com](mailto:riei@hotmail.com)

<sup>2</sup> Professor do Dep. de Engenharia Civil e Ambiental – UFPB - Campus I – CT – CEP 58059-900 – fone: 3216-7037 r.27 e-mail: [heberp@uol.com.br](mailto:heberp@uol.com.br)

<sup>3</sup> Graduando em Engenharia Civil – UFPB - Campus I – CT – CEP 58059-900 – fone: 3216-7037 r.22 e-mail: [nicolle@lenhs.ct.ufpb.br](mailto:nicolle@lenhs.ct.ufpb.br)

<sup>4</sup> Graduando em Engenharia Civil – UFPB - Campus I – CT – CEP 58059-900 – fone: 3216-7037 r.22 e-mail: [terezinha@lenhs.ct.ufpb.br](mailto:terezinha@lenhs.ct.ufpb.br)

<sup>5</sup> Graduando em Engenharia Civil – UFPB - Campus I – CT – CEP 58059-900 – fone: 3216-7037 r.22 e-mail: [wesleyimperiano@hotmail.com](mailto:wesleyimperiano@hotmail.com)

<sup>6</sup> Graduando em Engenharia Mecânica – UFPB - Campus I – CT – CEP 58059-900 – fone: 3216-7037 r.22 e-mail: [robert-renato@hotmail.com](mailto:robert-renato@hotmail.com)

<sup>7</sup> Graduando em Engenharia Civil – UFPB - Campus I – CT – CEP 58059-900 – fone: 3216-7037 r.22 e-mail: [allan@lenhs.ct.ufpb.br](mailto:allan@lenhs.ct.ufpb.br)

a demanda devido o crescimento populacional, principalmente nos grandes centros urbanos, e também pelo envelhecimento e desgaste das estruturas, equipamentos e tubulações que compõem o sistema de abastecimento como um todo.

As perdas reais e aparentes são realidades nos sistemas de abastecimentos atuais e sua redução é um desafio a ser atingido. Uma das soluções referente às perdas reais, provocadas principalmente por vazamentos, é sua reabilitação, ou seja, substituição de tubulações antigas, válvulas, registros e outros equipamentos que fazem parte do sistema, assim como, melhoramento do sistema 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 custo elevado e encontrar uma melhor solução implica na melhor identificação dos pontos onde será realizada a reabilitação.

Como um dos primeiros trabalhos de calibração, Bhave (1988) aplicou um método iterativo de calibração que modificava as demandas nodais e o coeficiente de resistência das tubulações para ajustar os valores calculados em comparação com os observados. Em seu trabalho as tubulações são divididas em zonas, para que esse ajuste seja feito em grupos de tubos. A esqueletização de redes, é uma consideração prática, em que diâmetros inferiores a 150 mm são agrupados formando diâmetros equivalentes na modelagem, reduzindo assim sua modelagem sem comprometer significativamente os resultados, entretanto se muitos tubos forem esqueletizados, a modelagem resultante poderá ser comprometida.

Ormsbee e Lingireddy (1997) apresentaram uma metodologia para a calibração de redes de distribuição de água, dividido em sete etapas, onde a última consistia em uma calibração mais difícil, por ajustar a demanda e as rugosidades até que os campos referentes à pressão e a vazão, computados e observados, fossem os mais próximos.

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 inteligente buscando conhecer melhor a rede, nos diversos cenários e nas diversas condições, encontrando respostas mais rápidas e dando suporte para sua reabilitação.

Segundo Silva e Reis (2002) a análise das redes de distribuição de água para abastecimento, com base em modelos matemáticos de previsão do comportamento hidráulico via computador, vem se mostrando fundamental em possibilitar o uso racional de recursos como água e energia elétrica. Em seu trabalho apresentou um modelo de calibração de redes de distribuição de água que considera os vazamentos, cujas variáveis de decisão são as rugosidades nos trechos da rede. Eles utilizaram os Algoritmos Genéticos (AGs) para a determinação das variáveis do problema de

---

<sup>8</sup> Graduando em Engenharia Mecânica – UFPB - Campus I – CT – CEP 58059-900 – fone: 3216-7037 r.22 e-mail: [gennissonbatista@hotmail.com](mailto:gennissonbatista@hotmail.com)

otimização correspondente, cuja aplicação foi feita para uma rede hipotética, constituindo etapa preliminar de um estudo completo realizado para redes reais da Cidade de São Carlos – S.P. A análise dos resultados obtidos mostrou que eles podem ser considerados promissores.

Soares (2003) desenvolveu com o auxílio do Toolkit do Epanet uma rotina computacional considerando as perdas por vazamento e a dependência das demandas com a pressão. Como análise do seu algoritmo, utilizou dados de uma rede hipotética com vistas à calibração em termos das rugosidades absolutas, demandas, diâmetros, cotas topográficas e parâmetros do modelo de vazamentos, assim como a localização de componentes hidráulicos da rede. O autor utilizou modelos inversos resolvidos através dos Algoritmos Genéticos em conjunto com o Método Simplex (NELDER e MEAD, 1965). Devido à grande quantidade de variáveis no processo de calibração nem sempre resultou em convergência do modelo hidráulico.

Cheung (2004) apresentou contribuições às análises multiobjectivo via algoritmo genético, pesquisando também os operadores (recombinação e mutação) e diversos métodos de seleção, com vistas à reabilitação de redes de distribuição de água, onde foram considerados: custo, benefício, vazamentos e confiabilidade. Também introduziu as perdas por vazamentos como demanda variável com a pressão, resultando em uma análise mais realista do problema. Os primeiros estudos realizados neste trabalho objetivaram o acoplamento do simulador hidráulico convencional (Epanet 2.0) ao compilador Borland Builder C++ 5.0. Esse acoplamento foi realizado através do Toolkit, biblioteca de funções, e possibilitou que as rotinas do Epanet 2.0 pudessem ser requeridas dentro do compilador C++.

Segundo Wu e Sage (2006), identificar quanta água esta sendo perdida em redes de abastecimento de água e onde a perda ocorre é de grande importância. Em seu trabalho foi desenvolvido um processo de calibração que simultaneamente quantifica e localiza perdas. O modelo de calibração é formulado através de um problema de otimização não-linear que é solucionado usando um Algoritmo genético. Os resultados encontrados foram eficazes na detecção de perdas, entretanto a precisão depende da quantidade de dados observados em campo.

Neves (2007) desenvolveu um algoritmo de calibração utilizando o problema inverso associado a um simulador hidráulico de escoamento de água em regime permanente e algoritmos genéticos como técnica de otimização. O software foi testado para diversos valores dos parâmetros de entrada com a finalidade de avaliar a influência de cada um desses valores na eficiência do algoritmo. Os resultados obtidos apontaram que o algoritmo conduz a bons valores de vazão, entretanto não se conseguiu obter uma única solução para as rugosidades na calibração. Quando a calibração é realizada pelo controle simultâneo da pressão e vazão, os resultados foram mais eficientes que a calibração apenas pela pressão.

Marcuzzo (2008) elaborou por meio de algoritmo genético, um otimizador de redes de distribuição de água para irrigação localizada, podendo o mesmo ser aplicado para diferentes configurações de declividade de terreno, tarifação de energia elétrica e consumo de água, usando os diâmetros como variáveis de decisão. O código foi escrito em MatLab, considerando todas as perdas de energia distribuídas e localizadas, e os resultados mostraram que o custo da rede varia entre 1816,42 a 2312,13R\$.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup> e ainda observou-se que com o aumento da declividade do terreno e da tarifa de energia elétrica diminui o custo proporcional com equipamentos e aumenta o custo total anualizado da rede de irrigação e o custo proporcional com energia elétrica.

Gomes *et al.* (2009) Apresentou resultados de calibração do Sistema Piloto de Distribuição de Água do LENHS UFPB – Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da Universidade Federal da Paraíba. A solução de calibração foi obtida pela minimização da discrepância entre os dados de vazão e pressão do modelo desenvolvido e os dados observados em campo para seis cenários diferentes. A variável para ajuste da rede foi o coeficiente de perda de carga localizada (K), em virtude da grande quantidade de conexões e acessórios instalados na rede. A modelagem de tentativa e erro apresentou resultados satisfatórios.

A programação de algoritmos robustos e modelos de calibração, associada a simuladores hidráulicos, permitem configurar e identificar variáveis para melhor modelar a rede, obtendo valores calculados compatíveis com os observados nas redes reais. O EPANET é um simulador hidráulico, onde é possível utilizar sua biblioteca de funções para auxiliar algoritmos em diversas linguagens, possibilitando a modificação da rede e sua simulação a cada novo cenário proposto.

## METODOLOGIA

A calibração de sistemas de distribuição de água não é realizada de forma direta, uma vez que o processo dinâmico do comportamento da água no interior das tubulações depende de algumas variáveis tais como a temperatura, a qualidade da água, material das tubulações e demais fatores que influenciam na sua distribuição ao longo da rede. Portanto, em sistemas reais, um sistema de distribuição leva certo tempo para se estabilizar, ou seja, equilibrar as equações hidráulicas que diz respeito a continuidade nos nós (Equação. 1) e a conservação de energia nos anéis (Equação. 2).

$$\sum_{i=1}^{n_k} (Q_{entra})_i - \sum_{j=1}^{m_k} (Q_{sai})_j - d_k = 0 \quad (1)$$

onde:

$n_k$  = número de trechos com vazões chegando ao nó k;

$m_k$  = número de trechos com vazões saindo do nó k;

$(Q_{entra})_i$  = vazões dos trechos i que chegam ao nó k;

$(Q_{sai})_j$  = vazões dos trechos j que saem do nó k;

$d_k$  = demanda referente ao nó k.

$$\sum_{i=1}^{n_k} (h_f)_i - \sum_{j=1}^{m_k} (E)_j = 0 \quad (2)$$

onde:

$(h_f)_i$  = perda de carga referente ao trecho i;

$n_k$  = número de trechos do anel k;

$m_k$  = número de sistemas de impulsão (adição de energia) pertencente ao anel k;

$(E)_j$  = Energia adicionada no anel k.

Um sistema de distribuição de água é o conjunto de tubos, elementos hidráulicos (bombas e válvulas) e estruturas hidráulicas (reservatórios e estações de bombeamento), todos interconectados, com a finalidade de transportar água e distribuí-la, em quantidade e qualidade satisfatória. Os nós de uma rede são pontos bem definidos que conectam os elementos de uma rede.

A lei de conservação da energia aplicada ao movimento de um fluido perfeito (sem atrito) e ainda supondo o fluido incompressível, já que a consideração de compressível adicionaria a variação de energia interna, nos dá a equação de Bernoulli apresentada na Equação (3), onde C é constante.

$$\frac{1}{2} \rho v^2 + p + \rho g z = C \quad (3)$$

Entretanto, na prática, o fluxo do fluido no interior das tubulações resulta em perdas de energia, tanto pelo atrito nas paredes internas das tubulações, como também pela turbulência natural ou pelo desvio provocado por peças e instrumentos que modificam a seção na qual o fluido é conduzido. A primeira refere-se à perda de carga contínua ou perda de energia por atrito e são determinadas através de fórmulas empíricas, apesar do Epanet trabalhar com três tipos de fórmulas, vamos utilizar apenas duas: Darcy-Weisbach e Hazen-Williams. A fórmula de Darcy-Weisbach (Equação 4) é mais abrangente já que pode ser utilizada para qualquer líquido e tubulação, já a de Hazen-Williams (Equação 5) é aconselhada para diâmetros superiores a 50 mm, normalmente utilizadas em projetos de adutoras.

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (4)$$

$$h_f = 10,66683 \frac{L}{D^{4,871}} \left( \frac{Q}{C} \right)^{1,852} \quad (5)$$

onde:

$h_f$  = perda de carga contínua em metros;

L = comprimento da tubulação;

D = diâmetro interno da tubulação;

V = velocidade média da água;

$f$  = fator de atrito;

Q = vazão em m<sup>3</sup>/s;

C = coeficiente da fórmula de Hazen-Williams.

Em redes reais, a rugosidade das tubulações é afetada diretamente por diversos fatores: qualidade da água conduzida e seu pH (potencial hidrogeniônico), velocidade do fluxo, material da tubulação e não uniformidade de fabricação. Portanto, por melhor que as equações referentes às perdas de carga e equilíbrio hidráulico possam encontrar valores compatíveis com o modelo real, sempre vão existir diferenças, tanto pelas considerações impostas no modelo como pela imprecisão nas diversas variáveis que compõe o sistema como um todo. A demanda nodal, que é fornecida no EPANET, é fixa e em uma rede real a demanda além de variar em função do tempo, também é influenciada pela pressão, assim como os possíveis vazamentos, caso eles existam.

Neste trabalho será utilizado o simulador hidráulico EPANET, em particular o Toolkit de programação, onde será possível incorporar as diversas funções disponibilizadas no algoritmo de calibração proposto. Outra justificativa para utilização do EPANET é sua aceitação e usabilidade, tanto no meio científico, através da elaboração de artigos, dissertações e teses, como também, no campo de trabalho ou meio operacional nas companhias de abastecimento e escritórios de consultoria da área.

## Rugosidade

A propriedade reflete as características e condições das paredes internas das tubulações. Seus valores poderão ser determinados através da análise da perda de carga contínua entre os nós da rede em estudo, portanto é possível determinar seu valor através da diferença de pressão entre os nós, de montante e jusante, do trecho em estudo. Durante a calibração de redes de abastecimento, rugosidade excessiva pode representar possíveis obstruções, ou ainda perda de carga localizada (válvulas, registros e outros componentes hidráulicos que possam proporcionar perdas no trecho em análise).

Para a fórmula de Hazen-Williams a variável a ser alterada é o “C”, já mencionado na equação (5). Para a fórmula de Darcy-Weisbach a variável atribuída à rugosidade absoluta será o “ $\epsilon$ ” obtido através da fórmula de Colebrook e White apresentada na equação (6) ou ainda utilizando a equação (7) da fórmula de Swamee e Jain dentro dos limites:  $10^3 \leq Re \leq 10^8$  e  $10^{-6} \leq \epsilon/D \leq 10^{-2}$ .

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left( \frac{\epsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (6)$$

$$f = \frac{0,25}{\left[ \log_{10} \left( \frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{\text{Re}^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (7)$$

### **Demanda**

O consumo de água para uma região ou de uma edificação específica é representado na rede de abastecimento por um nó que retira da rede uma determinada vazão que alimentará a região ou edificação. Toda a vazão na rede depende dos valores das demandas informadas, sendo assim, o ajuste das vazões poderá ser feito mediante alteração das demandas nodais. A alteração de um único valor da demanda poderá alterar todo o comportamento da rede, fazendo com que essa calibração torne-se complexa, no sentido de conseguir aproximar os valores das vazões reais e calculadas.

### **Modelo Iterativo de Calibração**

A proposta desse trabalho será o desenvolvimento de um algoritmo iterativo de calibração que altera as rugosidades das tubulações e as demandas do sistema, para que as diferenças dos resultados simulados, quando comparados com os medidos da rede real, sejam minimizados. O algoritmo terá como parâmetro a opção de calibrar exclusivamente pela rugosidade, exclusivamente pela demanda, ou com a manipulação simultânea das duas variáveis. Também será possível deixar o calibrador mais preciso, já que o incrementador de cada variável independente é um dado de entrada.

Para realizar a calibração são necessárias leituras reais de pressão e vazão da rede, portando a Rede Piloto de Distribuição de Água do LENHS UFPB (ver Figura 1) foi utilizada para validação do algoritmo proposto. Inicialmente, a rede deve ser modelada no EPANET e configurada de acordo com a rede real, em seguida deve ser fornecida, como dado de entrada, a medida de algumas vazões e/ou pressões da rede real. A função de minimização (F) será o somatório das diferenças entre os valores simulados ( $X_s$ ) e os valores reais ( $X_r$ ) das n leituras informadas como mostra a equação (8).

$$F = \min \sum_{i=1}^n (X_s - X_r)_i \quad (8)$$

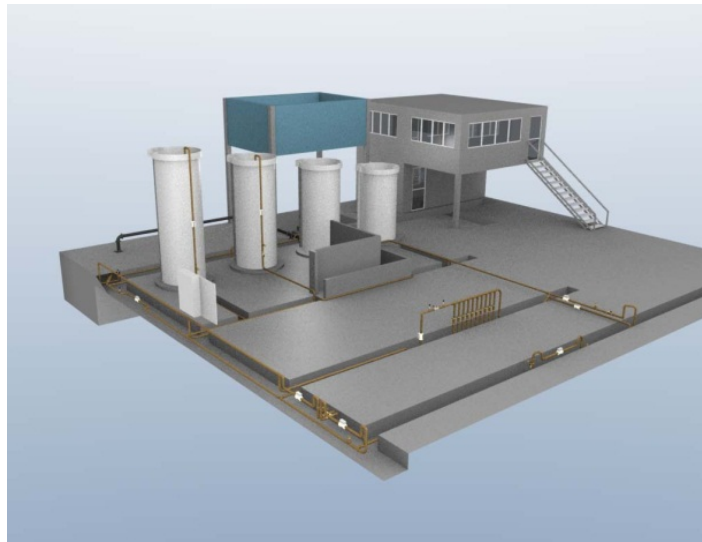


Figura 1 - Rede Piloto de Distribuição de Água do LENHS UFPB

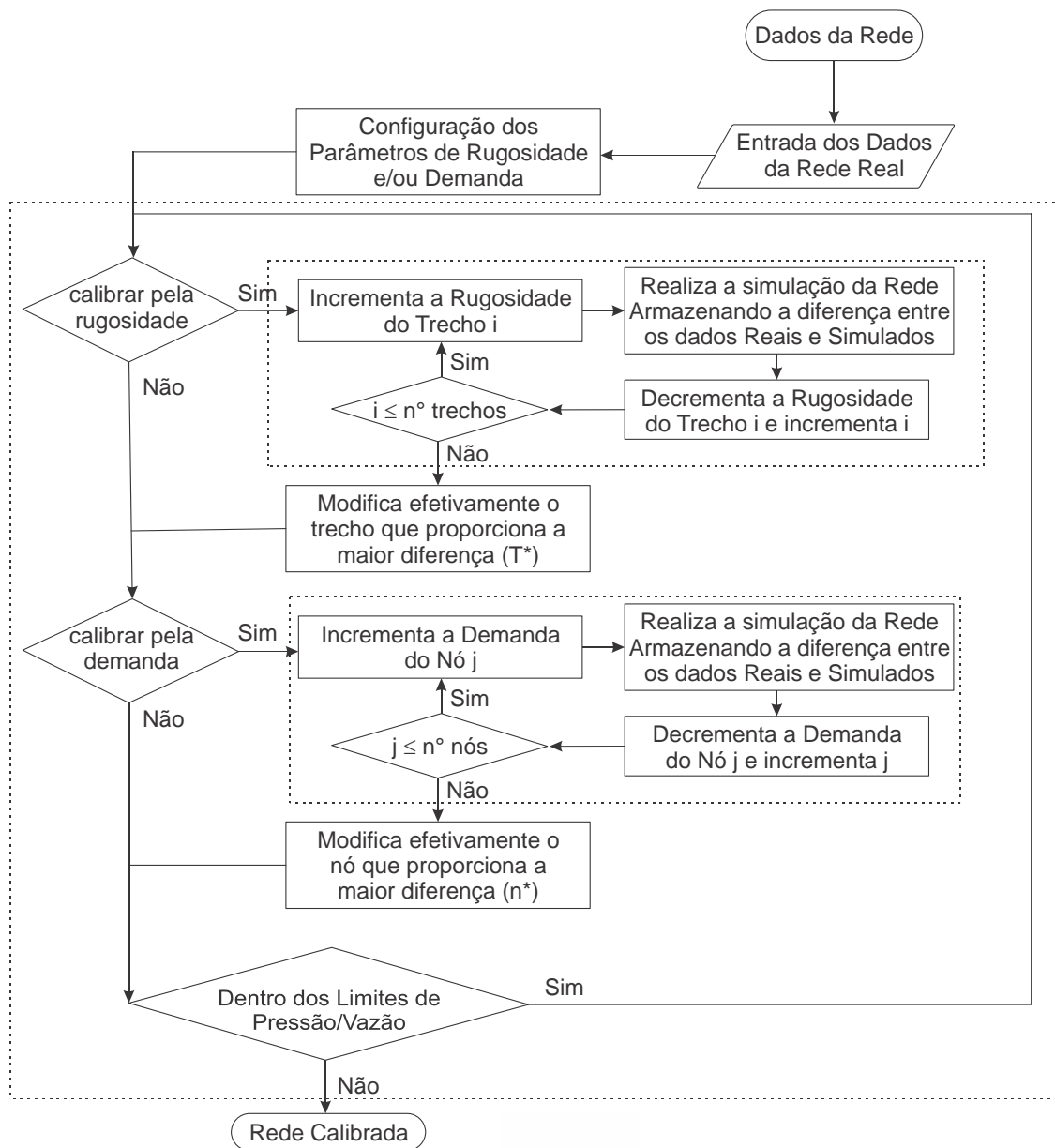


Figura 2 - Fluxograma do algoritmo iterativo de calibração



Uma vez com a configuração de convergência estabelecida o algoritmo inicia o processo de calibração admitindo uma rugosidade extremamente elevada para as tubulações, e seu incremento dependerá da escolha da utilização das equações de Hazen-Williams ou Darcy-Weisbach. Essa alteração será realizada em cada trecho da rede, verificando sempre a alteração que melhor proporcionar a minimização da função objetivo e o trecho escolhido para alteração é efetivamente modificado.

Em seguida, realiza-se um processo semelhante com relação à demanda nos nós, alterando-se, parcialmente, cada nó, até encontrar a modificação que proporciona a melhor diminuição na função entre os valores medidos e os valores simulados. O processo termina quando não há minimização da função objetivo na alteração de todos os trechos e nós da rede. O fluxograma da metodologia proposta pode ser observado na Figura 2. A interface gráfica resultante da programação utilizando o Toolkit de programação do EPANET é ilustrada na Figura 3.

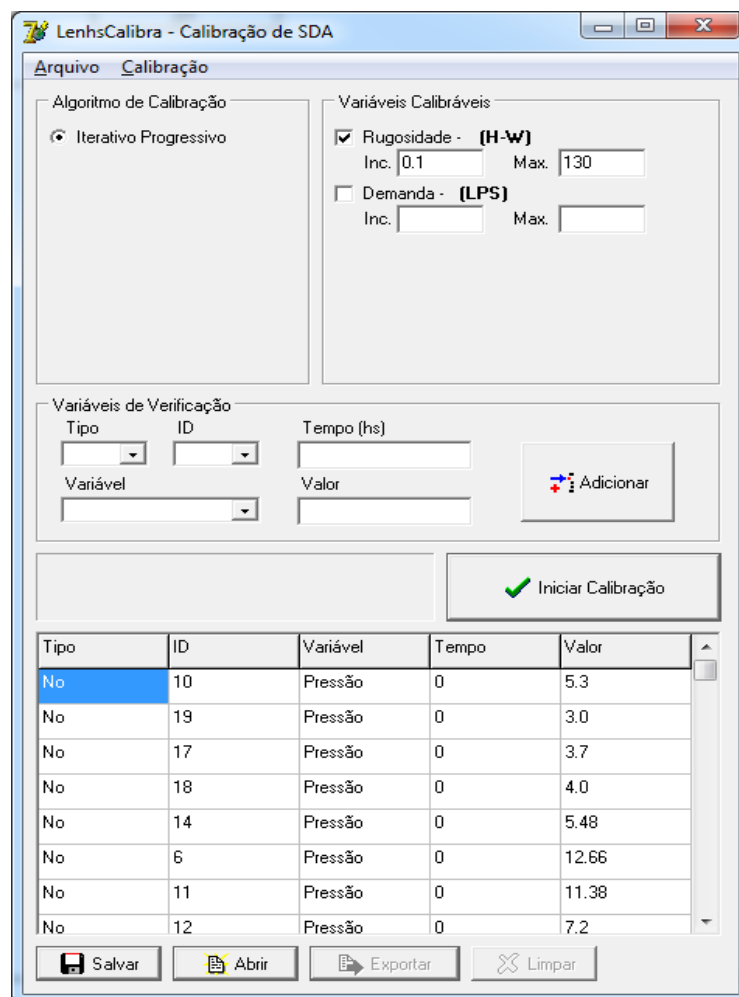


Figura 3 - Ilustração do Software desenvolvido (LenhsCalibra)

## RESULTADOS

O Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica da Universidade Federal da Paraíba (LENHS UFPB) possui um sistema supervisorio para controle e aquisição de dados, em tempo real, o que facilita a coleta de dados visando a sua modelagem e calibração. O LENHS possui diversos medidores de vazão e pressão (Figura 4) e válvulas que permitem modificar as condições de operação do sistema e sua topologia através de manobras, criando vários cenários e possibilitando uma grande quantidade de combinações.



Figura 4 -Diversos Medidores e Equipamentos do LENHS UFPB

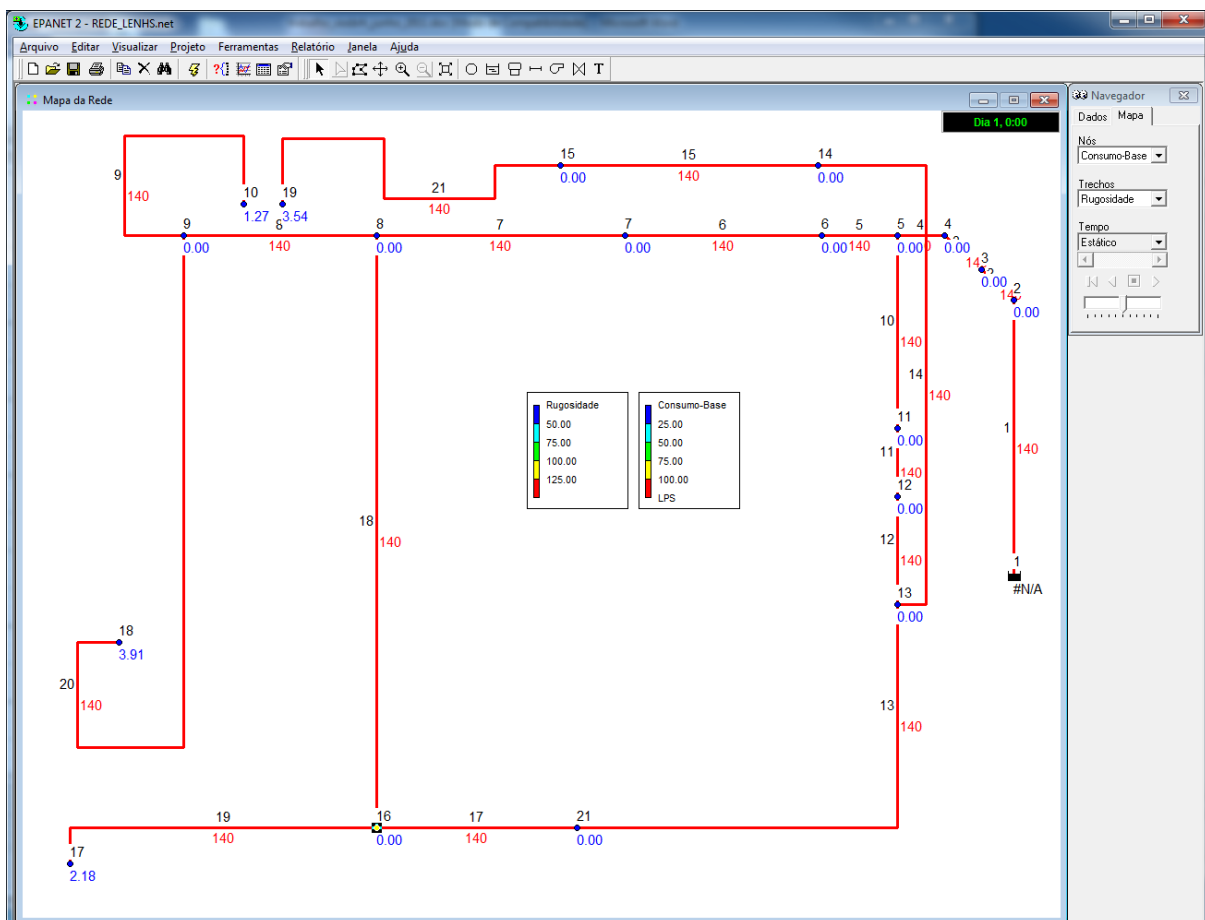


Figura 5 - Topologia da Rede Piloto de Distribuição de Água do LENHS UFPB

Através do Epanet, a Rede Piloto de Distribuição do LENHS foi modelada com a topologia da Figura 5, onde as tubulações foram configuradas com os dados da Tabela 1. A rugosidade das tubulações e as demandas nodais são parâmetros variáveis de acordo com o algoritmo iterativo. Todos os nós da rede estão na mesma cota topográfica. O reservatório de nível fixo terá altura do nível d'água igual à carga hidráulica fornecida pelo conjunto motor-bomba da rede em estudo. O nó 7 da referida rede terá uma contribuição não informada na tentativa de verificar se o algoritmo é capaz de identificar vazamentos ou demandas irregulares.

Tabela 1- Dados das Tubulações da Rede do LENHS

Trecho	Nó inicial	Nó final	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Rugosidade Estimada (H-W)
1	1	2	4.3700	100	140
2	2	3	1.2600	100	140
3	3	4	2.8500	100	140
4	4	5	0.5500	50	140
5	5	6	1.3400	50	140
6	6	7	3.9400	50	140
7	7	8	4.6800	50	140
8	8	9	3.2100	50	140
9	9	10	4.7500	50	140
10	5	11	5.0953	50	140
11	11	12	0.5647	50	140
12	12	13	2.4100	50	140
13	13	21	9.1200	50	140
14	13	14	12.5800	50	140
15	14	15	4.2000	50	140
17	21	16	4.4300	50	140
18	16	8	10.0100	50	140
19	16	17	4.1000	50	140
20	9	18	11.8600	50	140
21	15	19	8.2000	50	140

A simulação hidráulica foi realizada considerando todos os tubos novos e do tipo PVC, com rugosidade de 140 e as demandas das 4 saídas (nós 10, 17, 18 e 19) iguais as vazões obtidas através do supervisor. A rede foi simulada antes da calibração, obtendo-se os gráficos das diferenças de pressão e vazão, mostrados, respectivamente, nas Figuras 6 e 7. As aquisições obtidas através do supervisor são apresentadas na Figura 8.

As perdas de carga localizadas não foram incorporadas ao modelo, portanto, espera-se que essa perda seja refletida na rugosidade da tubulação após a calibração.

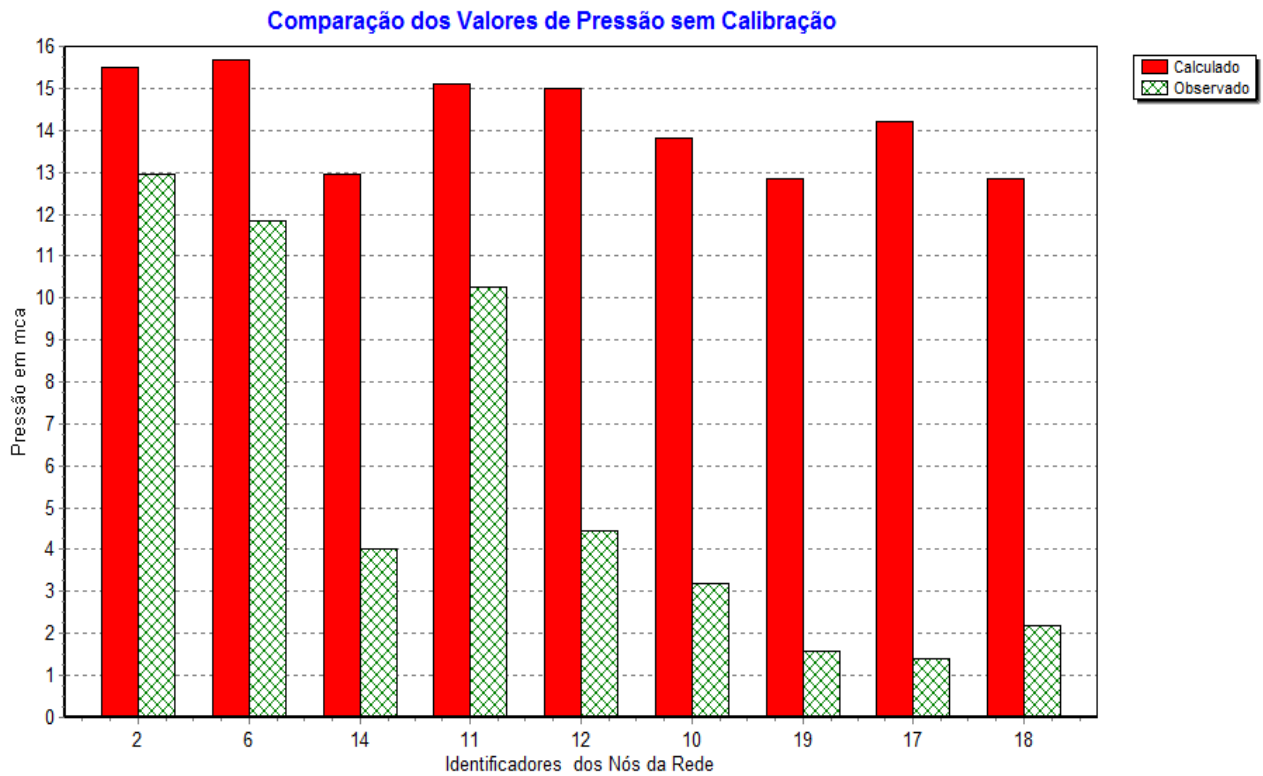


Figura 6 - Comparação das Pressões Calculadas e Observadas

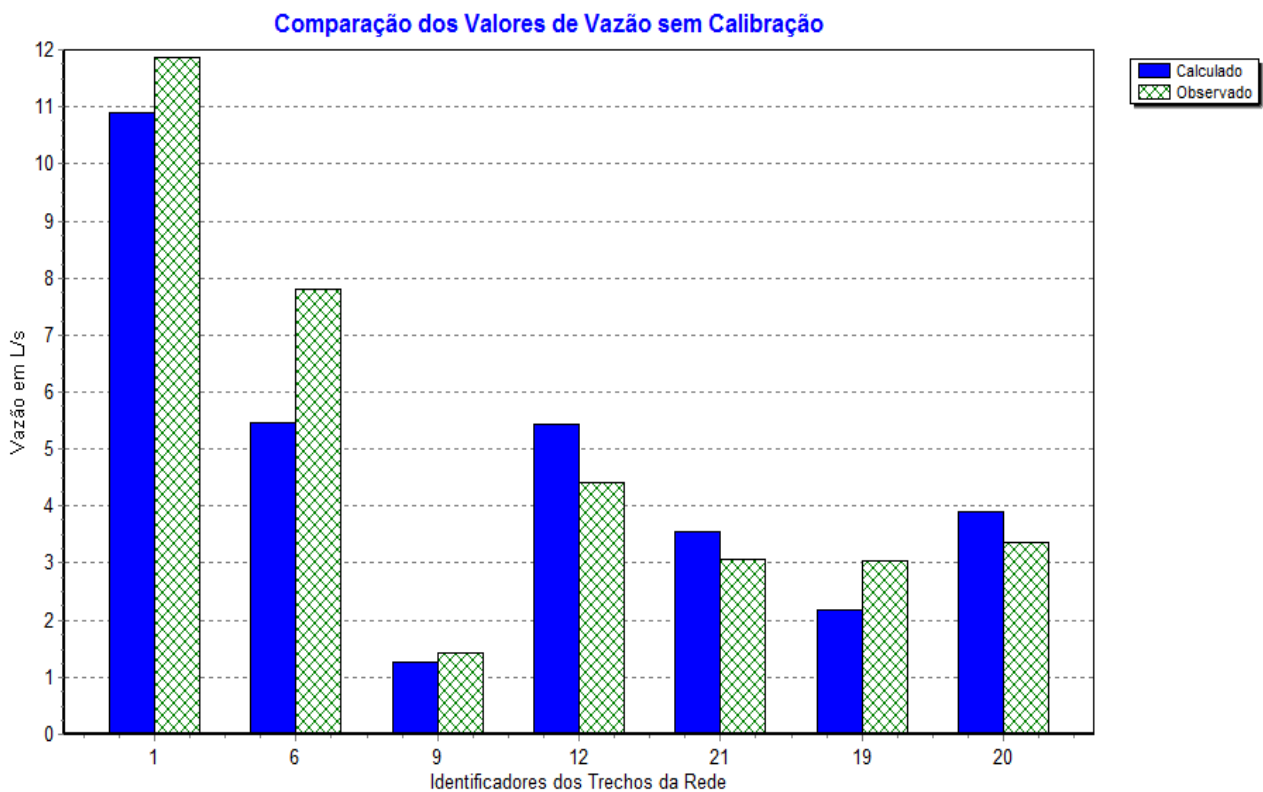


Figura 7 - Comparação das Vazões Calculadas e Observadas

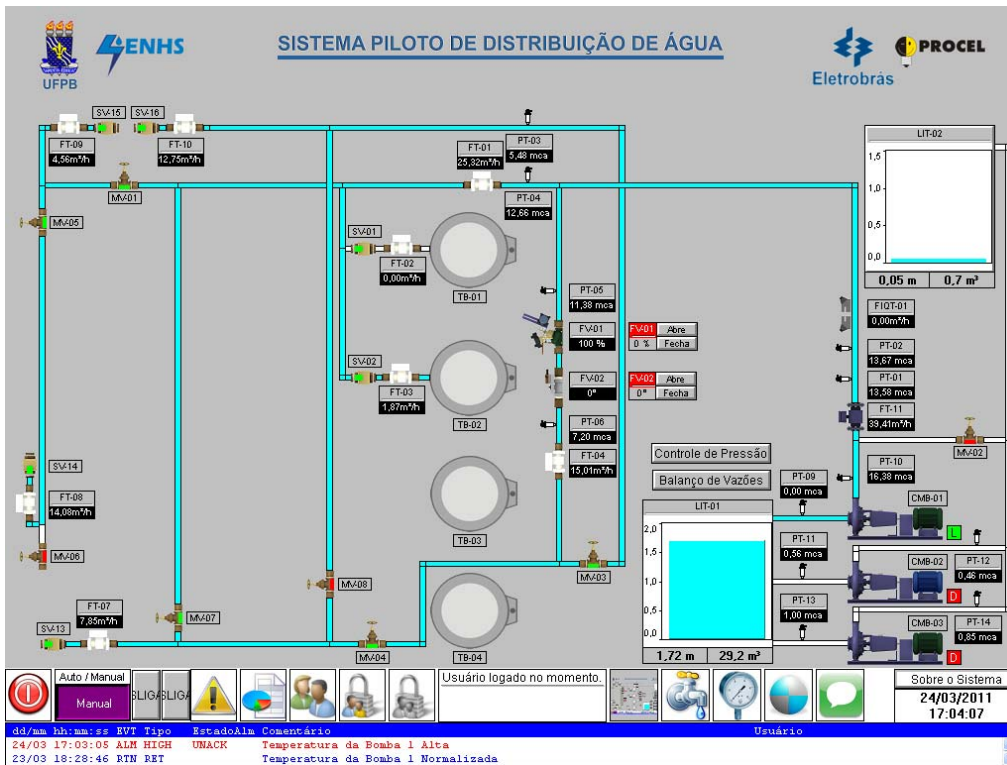


Figura 8 - Supervisório do Sistema Piloto de Distribuição de Água do LENHS

A rede do LENHS foi calibrada utilizando como parâmetro a rugosidade absoluta e a demanda nodal simultaneamente, encontrando como resposta a rede ilustrada na Figura 9.

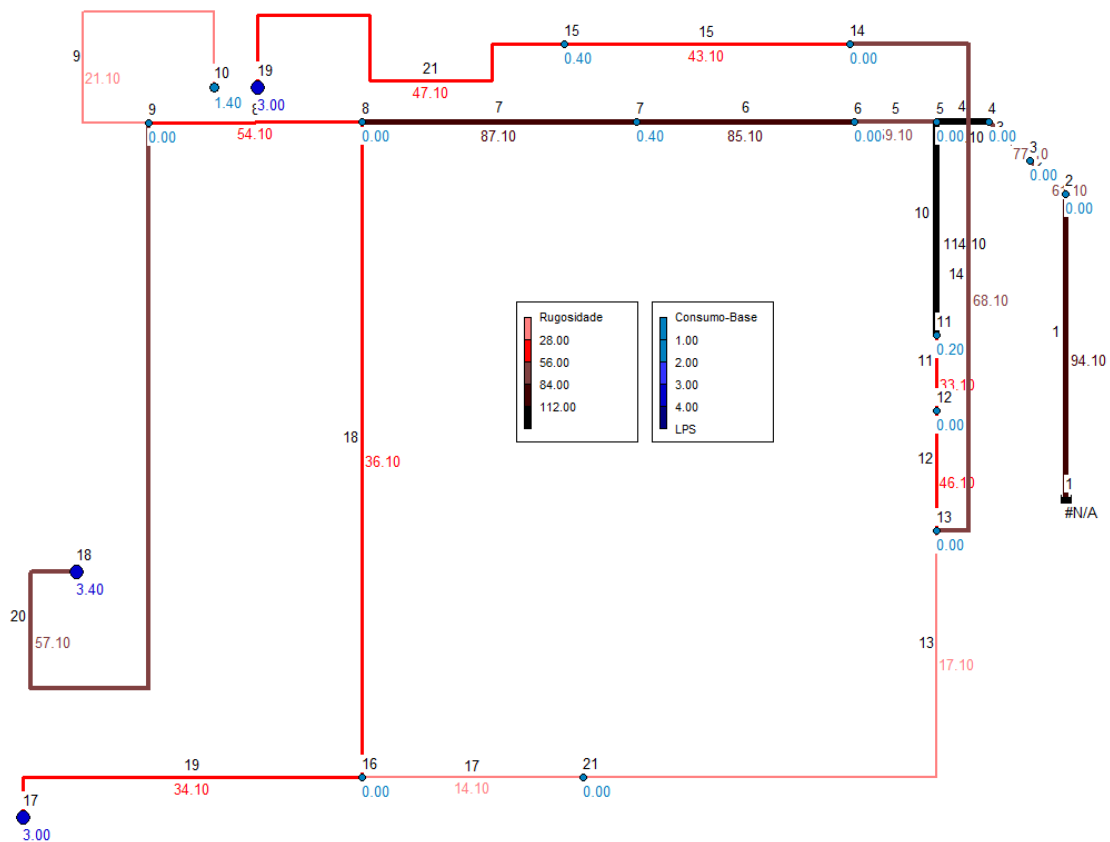


Figura 9 – Rede calibrada através da rugosidade e demanda simultaneamente

A calibração através da variável rugosidade, referente às tubulações, obteve resultados satisfatórios e encontrou uma resposta dentro de poucos segundos. Quando o algoritmo é aplicado a pequenas redes, como é o caso da rede do LENHS, onde as perdas de carga localizada são superiores as perdas de carga contínua, já que os comprimentos das tubulações são pequenos em relação ao número de conexões existentes, permite identificar indiretamente as perdas localizadas com as rugosidades encontradas pelo algoritmo. Os trechos 13 e 17 obtiveram rugosidades baixas devido a um registro parcialmente fechado, assim como o trecho 11, onde está instalada uma válvula multifuncional que proporciona uma perda localizada elevada. Os demais valores das perdas de carga ficaram abaixo do esperado, pois na representação desses trechos não foram consideradas as perdas de carga localizadas existentes. As comparações dos valores calculados e observados são mostradas na Figura 10 e Figura 11.

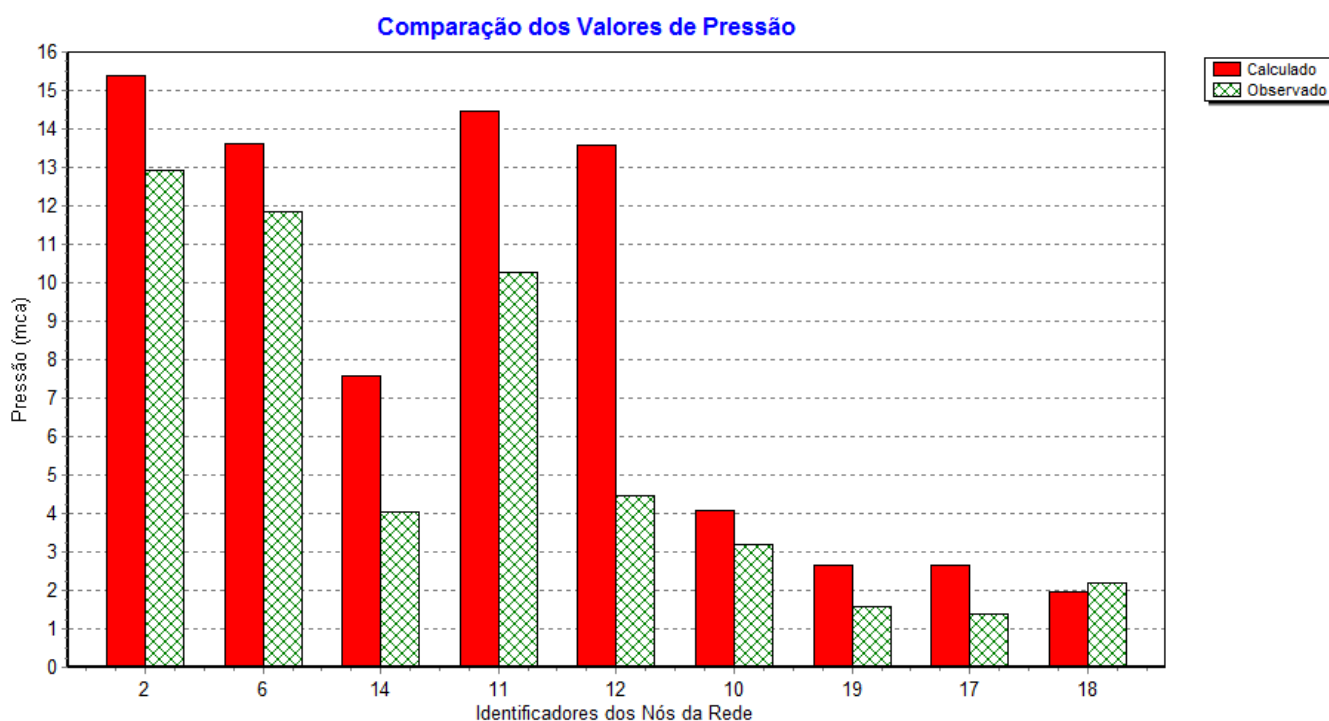


Figura 10 - Comparação dos Valores Calculados e Observados para a Pressão

O resultado referente à calibração das demandas proporcionou bons resultados quanto ao ajuste dos valores de vazão da rede. Durante o processo de calibração o algoritmo identificou uma demanda de 0.4 L/s concentrada no nó 7, localizando assim a demanda de 0.52 L/s atribuída inicialmente na modelagem como um possível vazamento da rede.

Os valores do modelo, antes da realização da calibração, teve uma aproximação média, em termos percentuais, de 92,93% do valor real para as vazões e 246,4% para as pressões. Após a calibração através da demanda e rugosidade absoluta, simultaneamente, os valores do modelo tiveram um melhor ajuste, com 97,75% do valor real para as vazões e 146,27% para as pressões, houve uma redução do erro absoluto médio das medidas em 84,8% para a vazão e 67,8% para a

pressão quando comparada com a rede sem a calibração. A correlação entre as medidas passou de 0.95 para 0.998 para a vazão e de 0.821 para 0.88 para a pressão.

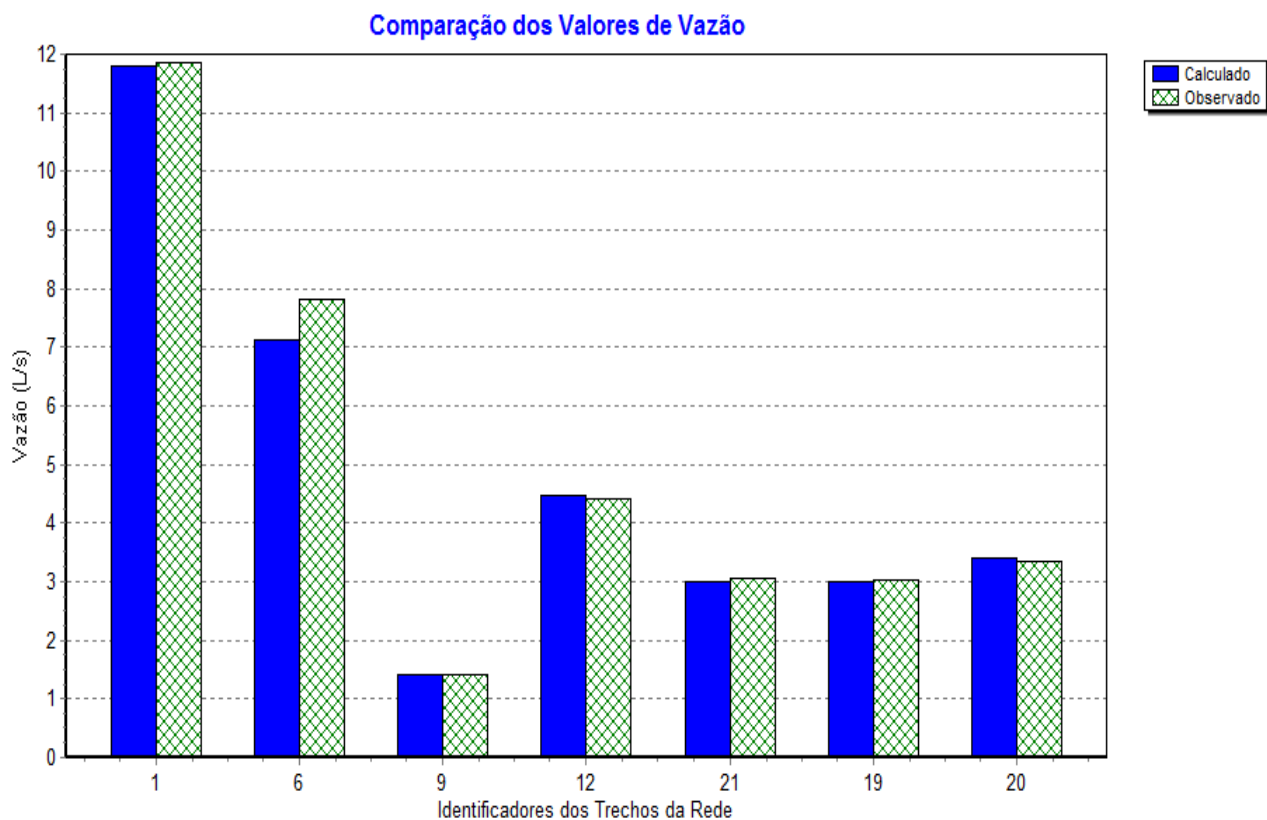


Figura 11 - Comparação dos Valores Calculados e Observados para a Vazão

## CONCLUSÕES

A complexidade das redes malhadas é perceptível, quanto à manipulação das variáveis calibráveis. Em uma rede malhada, a alteração da rugosidade não só proporciona perdas de carga, como também redistribui todas as vazões da rede.

O algoritmo iterativo de calibração com alteração progressiva do trecho ou nó que melhor proporcionou ganhos na função objetivo, mostrou bons resultados práticos, tanto pela identificação das obstruções ou perdas acentuadas da rede e possíveis vazamentos como também pelo baixo tempo de processamento, podendo ser aplicável às grandes redes de abastecimento de água.

Estatisticamente, os valores do modelo, antes da realização da calibração, teve uma aproximação média, em termos percentuais, de 92,93% do valor real para as vazões e 246,4% para as pressões. Após a calibração através da demanda e rugosidade absoluta, simultaneamente, os valores do modelo tiveram um melhor ajuste, com 97,75% do valor real para as vazões e 146,27% para as pressões, houve uma redução do erro absoluto médio das medidas em 84,8% para a vazão e 67,8% para a pressão quando comparada com a rede sem a calibração. A correlação entre as medidas passou de 0.95 para 0.998 para a vazão e de 0.821 para 0.88 para a pressão.

A inclusão da perda de carga localizada para análise de pequenas redes e a calibração de redes maiores já calibradas na literatura são recomendações para trabalhos futuros.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, CAPES e ELETROBRAS pelo apoio à pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BHAVE, P. R.(1988) “*Calibrating water distribution network models.*” J. Envir. Engrg., ASCE, 114(1), 120–136.

CHEUNG, P. B.(2004) *Análise de reabilitação de redes de distribuição dedistribuição de água para abastecimento via algoritmos genéticos multiobjetivo.* São Carlos, 2004. 268p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

CHEUNG, P. B.(2006) *Comparação de métodos de calibração de redes hidráulicas.* In: SEREA – Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água, João Pessoa - Brasil.

GOMES, H. P. e SALVINO, M. M. (2007) *Epanet 2.0 Brasil: Manual do Usuário.* Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil, 2007.

GOMES, H. P. BEZERRA, S. T. M. CARVALHO, P. S. O. GUERRA, H. H. G. SALVINO, M. M. (2009) *Calibração do Sistema Automatizado de Distribuição de Água do LENHS UFPB.* In: SEREA – Seminário Iberoamericano sobre Planificación, Proyecto y Operación de Sistemas de Abastecimiento de Agua, Valência(Espanha).

GRECO, M. GIUDICE, G. (1999) Member, ASCE “*Calibrating water distribution network models.*” J. Hydraulic Engineering.Vol. 125, Nº 8, 849–854.

MARCUZZO, F. F. N. (2008) *Sistema de otimização hidráulica e econômica de rede de irrigação localizada usando algoritmos genéticos.* 361 p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

MORAES, F. A. (2008) *Calibração de Modelo de Decaimento de Cloro Aplicado a Setor de Rede de Distribuição de Água Real.* São Carlos. 225p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

NEVES, C. L. (2007) *Calibração de Parâmetros de Modelos Hidráulicos de Redes de Distribuição de Água para Estudos de Operação de Rede.* Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM-108/2007, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília – DF. 143p.

ORMSBEE, L. E., and LINGIREDDY, S. (1997)“*Calibrating hydraulic network models.*” J. Am. Water Works Assn., 89(2), 42–50.

RIGHETTO, A. M. (2001) *Calibração de Modelo Hidráulico de Rede de Distribuição de Água.* Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH), v. 6, n. 3, p. 33-44.



ROSSMAN, L. A.(2008) *EPANET2: User's manual*. U. S. Environment Protection Agency, Cincinnati, Ohio, USA.

SANTOS, A.C.N. (2010) *Estudo de Calibração de uma rede de Distribuição de água de Itajubá-MG utilizando os Algoritmos Genéticos*. Itajubá, 2010. 57p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

SILVA, F. G. B. e REIS, L. F. R. (2002) *Calibração de redes de distribuição de água com algoritmos genéticos aplicada a uma rede hipotética*. In: VI Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Vitoria - ES, Brasil, Setembro.

SILVA, F. G. B. (2003) *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.

SOARES, A. K. (2003). *Calibração de Modelos de Redes de Distribuição de Água para Abastecimento Considerando Vazamentos e Demanda Dirigida pela Pressão*. São Carlos. 153p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil.

WU, Z. Y. e SAGE, P. (2006) “*Water loss detection via genetic algorithm optimization-based model calibration*”. In: ASCE 8th Annual International Symposium on Water Distribution System Analysis, Cincinnati - Ohio.