

XI-001 - METODOLOGIA AVANÇADA PARA A REABILITAÇÃO DE REDES DE ABASTECIMENTO – ESTUDO DE CASO – COMPLEXO LAGUNAR DA CIDADE DE MACEIÓ/AL

Heber Pimentel Gomes⁽¹⁾

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⁽²⁾

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.

Moisés Menezes Salvino⁽³⁾

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

Jorge Briseno Torres⁽⁴⁾

Engenheiro Civil. Companhia de Abastecimento de Água de Alagoas.

Mauro Azevedo Borba Delgado⁽⁵⁾

Engenheiro Civil. Companhia de Abastecimento de Água de Alagoas.

Endereço⁽¹⁾: Universidade Federal da Paraíba, Cidade Universitária - João Pessoa - PB - Brasil - CEP - 58059-900 - Fone/Fax: +55 (083) 3216-7037 R. 22 - e-mail: heberp@uol.com.br.

RESUMO

Este trabalho trata da reabilitação hidráulica da rede de abastecimento urbano do Complexo Lagunar, que abastece alguns bairros da cidade de Maceió, Brasil. A rede é composta por tubos de ferro fundido e PVC, totalizando uma extensão de 158.187 metros. Pelo seu tempo de operação, a rede se encontra com sérios problemas de vazamentos e de incrustação nas tubulações, o que ocasiona um abastecimento deficitário, com pressões insuficientes em muitos pontos de consumo. Para alcançar o objetivo deste trabalho foi feita uma modelagem hidráulica da rede, com sua calibração, utilizando-se, respectivamente, o modelador Epanet e o calibrador LenhsCalibra. A modelagem e os estudos de reabilitação da rede de abastecimento definiram as possíveis intervenções físicas na rede, com substituições de tubulações de determinados trechos, adição e fechamento de válvulas, para a setorização dos distritos de monitoramento e controle (DMCs), e o posicionamento de válvulas reguladoras de pressão, para minimizar as perdas reais de água e dotar o sistema com capacidade de atender a todos os pontos de consumo.

PALAVRAS-CHAVE: Rede, abastecimento, reabilitação, modelagem.

INTRODUÇÃO

O abastecimento de água potável, desde os reservatórios de distribuição até os pontos de consumo da cidade, realiza-se por meio de uma ou várias redes de distribuição, cuja finalidade é conduzir a água até à população, garantindo que, em cada ponto consumidor, esta chegue com vazão e pressão suficiente, e que sua qualidade não seja deteriorada durante o percurso. Esta operação se constitui na principal ação de gestão das empresas de saneamento, influenciando diretamente na qualidade do sistema de abastecimento, em termos sanitários, ambientais, econômicos e sociais.

O projeto de um sistema de distribuição de água dependerá, essencialmente, do traçado das tubulações, da posição do(s) reservatório(s) elevado(s) e de possíveis estações de bombeamento, do(s) tipo(s) de material(is) utilizado(s) e da escolha adequada dos diâmetros dos trechos, peças e acessórios. Porém, como esses sistemas são um dos primeiros serviços a serem implantados na formação de conglomerados humanos, conclui-se que grande parte deles foi projetada e implantada há dezenas de anos. Dessa forma, mesmo que o projeto atendesse, satisfatoriamente, a todos os requisitos necessários estabelecidos inicialmente, para que o sistema acompanhe o desenvolvimento das cidades e o crescimento populacional, provavelmente, ocorrerão situações que não foram antes consideradas, tais como: ampliações na rede, aumento de demandas em áreas não previstas, mudança no uso do solo, interrupções no fluxo d'água nas tubulações e processos de deterioração dos componentes. Além

disso, as redes hidráulicas, em sua maioria, foram projetadas considerando que os consumidores morariam em residências, e não em edifícios. Essa “verticalização”, comum em algumas regiões do Brasil, causou, consequentemente, uma baixa na qualidade do fornecimento. Nesse aspecto, é de se esperar que surjam problemas de operação que poderão comprometer o desempenho do sistema ao longo de sua vida útil, no que diz respeito ao abastecimento, como perdas físicas de água, rompimentos de tubulações e deterioração da qualidade da água; e aos aspectos econômicos, que se reflete em custos elevados de energia elétrica, de reparação e de manutenção dos equipamentos, etc.

Devido aos fatores acima apresentados, a reabilitação das redes de distribuição de água torna-se de fundamental importância para se assegurar o desempenho do sistema e maximizar a eficiência econômica da operação. A reabilitação de redes é uma ação que vem ganhando cada vez mais atenção das empresas de saneamento e da comunidade científica.

O processo de reabilitação de sistemas de abastecimento de água pode ser dividido em duas fases, que são a do diagnóstico e a de implantação de medidas para a superação dos problemas. O diagnóstico do sistema de distribuição compreende o conhecimento do problema real, através da simulação do funcionamento hidráulico do abastecimento - diâmetro interno e rugosidade das tubulações da rede hidráulica, características do(s) bombeamento(s), estimativa de demandas, conexões etc - com a calibração de modelos que possam reproduzir o que efetivamente ocorre na prática. Após a obtenção do diagnóstico do problema deve-se estabelecer estratégias de reabilitação, levando-se em conta os aspectos técnicos e econômicos (minimização de custos), observando-se as questões sociais e ambientais que serão afetadas com as possíveis medidas de reabilitação a serem adotadas.

As ações de reabilitação podem compreender desde a substituição ou reparação de condutos até a total reconstrução do sistema, ou à alteração dos procedimentos e meios de apoio à operação. Em alguns casos, a reabilitação de uma rede de abastecimento é mais onerosa e de execução mais complexa que a implantação de um novo sistema, uma vez que as redes estão localizadas em áreas consolidadas e com pouco espaço disponível no subsolo, em virtude das demais infraestruturas de serviços existentes.

Existem diversas técnicas que podem ser utilizadas para a reabilitação de redes hidráulicas, que são complexas, pois os objetivos são múltiplos e conflitantes e necessitam, portanto, de uma estratégia sistemática e de investimentos importantes.

Geralmente, as técnicas usadas na reabilitação da maioria das redes hidráulicas implantadas no mundo, se baseiam em métodos de tentativa e erro. Este tipo de metodologia faz tão somente o balanceamento hidráulico do sistema, sem levar em consideração a busca de uma solução que minimize os custos de implantação das novas tubulações da rede. Atualmente, na prática nota-se que é comum a utilização de modelos de simulação (Epanet, Lenhsnet, Watercad, etc.) para auxiliar na tomada de decisão.

Nos últimos trinta anos muitos trabalhos de reabilitação de redes foram desenvolvidos e apresentados na literatura. Swamee e Sharma (1990) apresentaram um processo chamado Reorganização de Sistemas de Distribuição de Água, onde foi abordada a necessidade de reorganizá-los em função do aumento da demanda. Se este aumento for pequeno, então a melhoria do bombeamento é geralmente suficiente. Entretanto, se o aumento é significativo, deverão ser introduzidas tubulações em paralelo, substituir tubulações, aumentar a capacidade de bombeamento e/ou instalar novas estações de recalque. Gomes et al. (2008) desenvolveram um método iterativo de reabilitação de redes pressurizadas com base no modelo da programação dinâmica, que foi testado na rede da cidade de Nova York (EUA). Os resultados foram comparados com os obtidos por outros modelos de reabilitação.

Dentre os métodos específicos para análise de reabilitação baseados em técnicas estatísticas, pode-se destacar os trabalhos desenvolvidos por Shamir e Howard (1979); Walski e Pelliccia (1982); Le Gat e Einsenbeis (2000), etc. Segundo Cheung (2004) diversas aplicações, utilizando métodos clássicos de otimização, vêm sendo propostas na literatura (LANSEY *et al.* 1992; LI e HAMES, 1992; KIM e MAYS, 1994; KLEINER *et al.* 1998) para auxiliar na escolha das melhores opções de reabilitação a serem adotadas. Pelos modelos baseados na metodologia de algoritmos genéticos pode-se citar: Murphy e Simpson (1992); Halhal *et al.* (1997); De Schanetzen *et al.* (1999); Walters *et al.* (1999); Dandy e Engelhardt (2001); Cheung (2004). Outros modelos para reabilitação de sistemas de distribuição de água, também foram propostos, dentre eles pode-se

destacar os trabalhos desenvolvidos por Wagner (1988); Mays (1989); Fujiwara e Li (1998); Engelhardt *et al.* (2000), etc.

Este artigo trata da reabilitação da rede de abastecimento de água do Complexo Lagunar da cidade de Maceió – Brasil. A área de abrangência do trabalho, conhecida como Complexo Lagunar, atende a uma população aproximada de 150 mil habitantes, correspondente aos bairros Prado, Trapiche, Pontal, Vergel, Ponta Grossa e o Centro da cidade de Maceió (ver Figura 1), capital do estado de Alagoas, Brasil. A rede de abastecimento, que é operada pela Companhia de Saneamento do Estado de Alagoas (CASAL) é alimentada, por gravidade por dois reservatórios (R-2A e R-2), mais a contribuição de 7 poços profundos; é composta, na sua grande maioria, por tubos de ferro fundido e PVC, totalizando uma extensão de 158.187 metros. Pelo seu tempo de operação, a rede se encontra com sérios problemas de vazamentos e de incrustação nas tubulações, o que ocasiona um abastecimento deficitário, com pressões insuficientes na grande maioria dos pontos de consumo.



Figura 1 – Vista panorâmica do Complexo Lagunar da cidade de Maceió - Brasil

MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia do trabalho consistiu em modelar a rede através do Epanet 2.0 (ROSSMAN, 2008), com a posterior calibração do modelo através do calibrador LenhsCalibra, e a definição das ações de reabilitação através da setorização da rede e da troca de parte das tubulações existentes.

O calibrador LenhsCalibra foi desenvolvido pelo Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da Universidade Federal da Paraíba (<http://www.lenhs.ct.ufpb.br/>) – Brasil. Para a execução do processo de calibração, o LenhsCalibra utiliza o modelo matemático Algoritmo Genético Multiobjetivo, fazendo com que as redes modeladas no Epanet possam reproduzir informações compatíveis com os valores das variáveis medidas no campo. O processo de calibração proposto permite utilizar até sete variáveis simultaneamente ou qualquer combinação delas – cota, coeficiente do emissor e demanda nos nós e rugosidade, diâmetro, posicionamento de VRPs e perdas localizadas nos trechos -. Dependendo das características da rede a ser modelada e calibrada é possível definir limites para as variáveis e escolher quais variáveis devem ser calibradas. A possibilidade de se trabalhar com mais de uma função objetivo caracteriza-o como Algoritmo Genético Multiobjetivo.

Cada variável que participará do processo de calibração deverá ser codificada em uma tabela. A escolha da codificação em tabela teve como finalidade a diminuição da representação da variável em questão dentro do cromossomo, possibilitando, assim, a incorporação de mais variáveis dentro do modelo. Para o LenhsCalibra iniciar um processo de calibração é necessário introduzir os parâmetros genéticos específicos para a rede e introduzir os dados das leituras medidas no campo.

O processo de calibração, utilizando o Algoritmo Genético Multiobjetivo, inicia-se criando, aleatoriamente, uma população. Através de um processo iterativo, são geradas novas populações com os melhores indivíduos das populações anteriores, aperfeiçoando os indivíduos ao longo das gerações através da função objetivo do modelo. A função Objetivo consiste em minimizar as diferenças quadráticas entre os valores das variáveis, simulados e medidos no campo. O processo continua até que seja atingido o número limite admitido de gerações, o tempo de processamento, ou alcançado um valor inferior ao informado para a convergência da função objetivo. Isto dependerá do critério de parada informado pelo usuário. Um ou mais critérios podem ser estabelecidos e o primeiro que ocorrer o algoritmo finaliza com o melhor resultado da ultima geração.

A setorização da rede original do Complexo Lagunar foi executada buscando preservar os setores comerciais já existentes na rede de abastecimento, conforme mostrado na Figura 8.

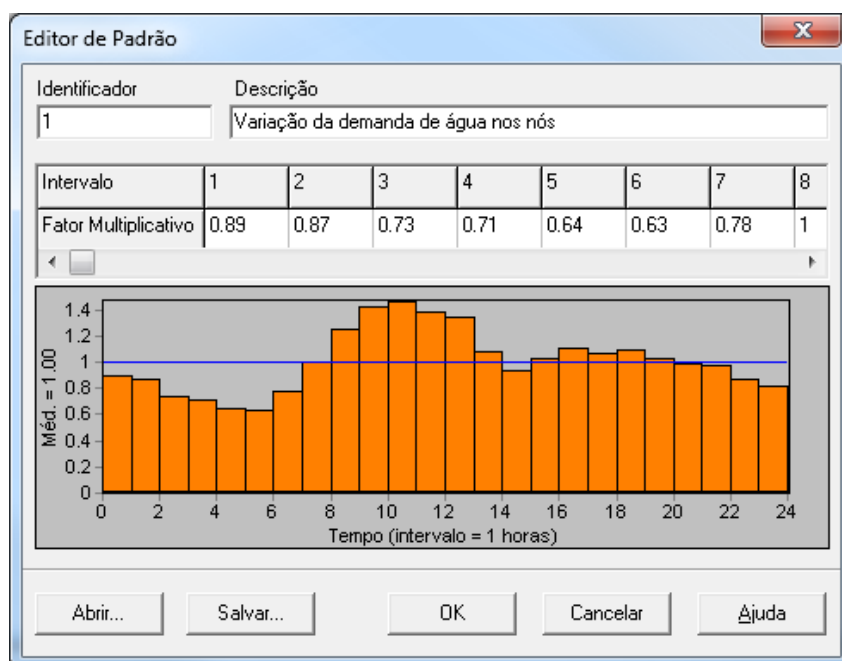


Figura 2 – Variação da demanda nos nós da rede

O modelo de otimização e reabilitação Lenhsnet (GOMES *et al*, 2009) foi empregado neste trabalho como suporte à decisão para a reabilitação do sistema de abastecimento de água do Complexo Lagunar. O Lenhsnet, através do critério de otimização econômica, indica quais os trechos da rede deverão ter seus diâmetros modificados para aumentar as pressões de serviços nos nós mais desfavoráveis da rede.

RESULTADOS

Para a modelagem da rede no programa Epanet estabeleceu-se, primeiramente, através das informações de macro e micromedicação disponibilizadas pela CASAL, o padrão de consumo da região abastecida, conforme ilustrado na Figura 2. Em paralelo, através do cadastro existente da rede em AutoCad, foi feita a importação deste para o Epanet, mediante a conversão do arquivo DXF para o INP e posteriores ajustes e inserção dos dados complementares dos nós (cota e consumo base) e dos trechos (diâmetro e rugosidade). A rede do Complexo Lagunar possui 1776 trechos e 1612 nós, conforme traçado apresentado na Figura 3. As demandas nodais foram estimadas com dados comerciais fornecidos pela companhia de abastecimento.

A Figura 3 mostra a simulação da rede original no Epanet (sem calibração), no horário de máxima demanda, onde aparecem as cores referentes aos dados de pressão nos nós e do coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams das tubulações dos trechos da rede. Como se pode observar nesta figura os valores de pressão nos nós são superiores a 20 mca, o que demonstra que esta simulação não retrata a realidade prática de operação do sistema, pois as pressões na rede, no horário de máxima demanda, em grande parte da rede são inferiores a 6

mca (valor mínimo admitido pela companhia de abastecimento). O gráfico da Figura 4 mostra as diferenças de pressão entre os valores registrados e simulados em 15 pontos da rede antes do modelo haver sido calibrado.

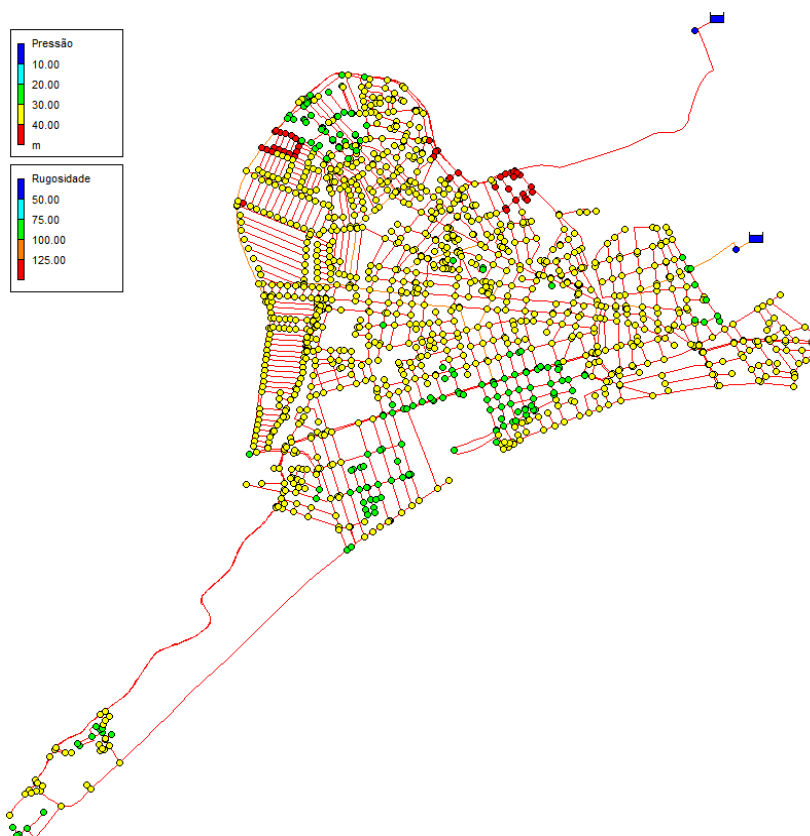


Figura 3 – Rede modelada sem calibração no horário de máxima demanda

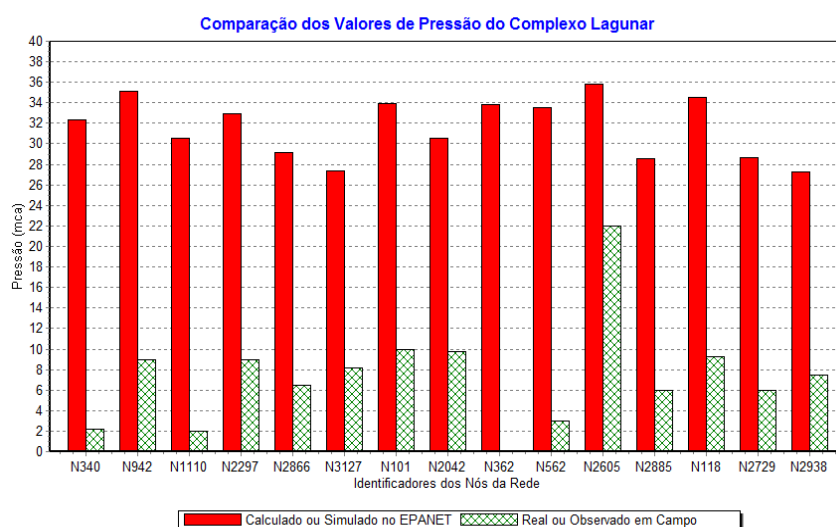


Figura 4 – Comparação entre os valores simulados e registrados sem calibração

Para a calibração do modelo hidráulico foram escolhidos, aleatoriamente, 15 nós na rede, cujas pressões foram medidas no horário de máxima demanda, permitindo compará-los com os valores simulados e calibrados. Com a utilização do calibrador e com os parâmetros genéticos de população inicial igual a 2000, uma população intermediária de 300, probabilidade de 70% para o operador de *crossover* e mutação de 10%, a rede do Complexo Lagunar foi calibrada e teve sua convergência próxima da 60ª geração (ver Figura 5). O tempo de processamento foi de 1 hora e 35 minutos em um processador *Intel® Quad-core* com 4 *Gbyte* de RAM.

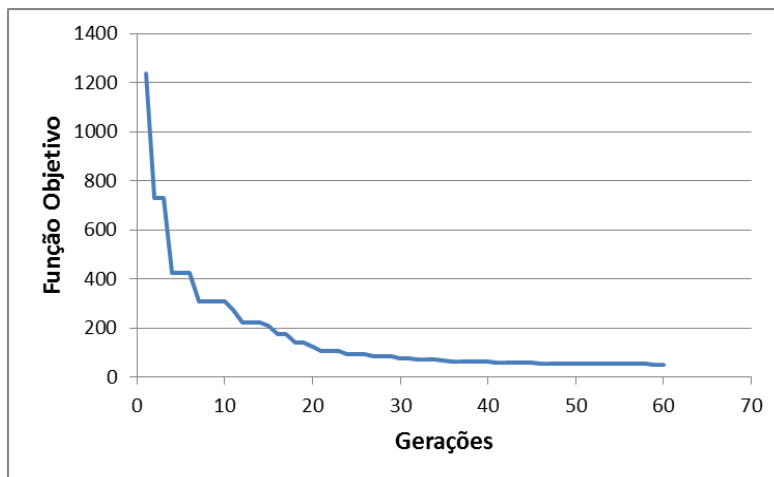


Figura 5 – Gráfico de convergência da calibração

A Figura 6 mostra o mapa da rede calibrada, onde se observam os pontos em azul representando valores de pressão inferiores a 6 mca, o que coincide efetivamente com a situação atual de operação da rede de abastecimento. A Figura 7 mostra a comparação entre os dados de pressão após a calibração.

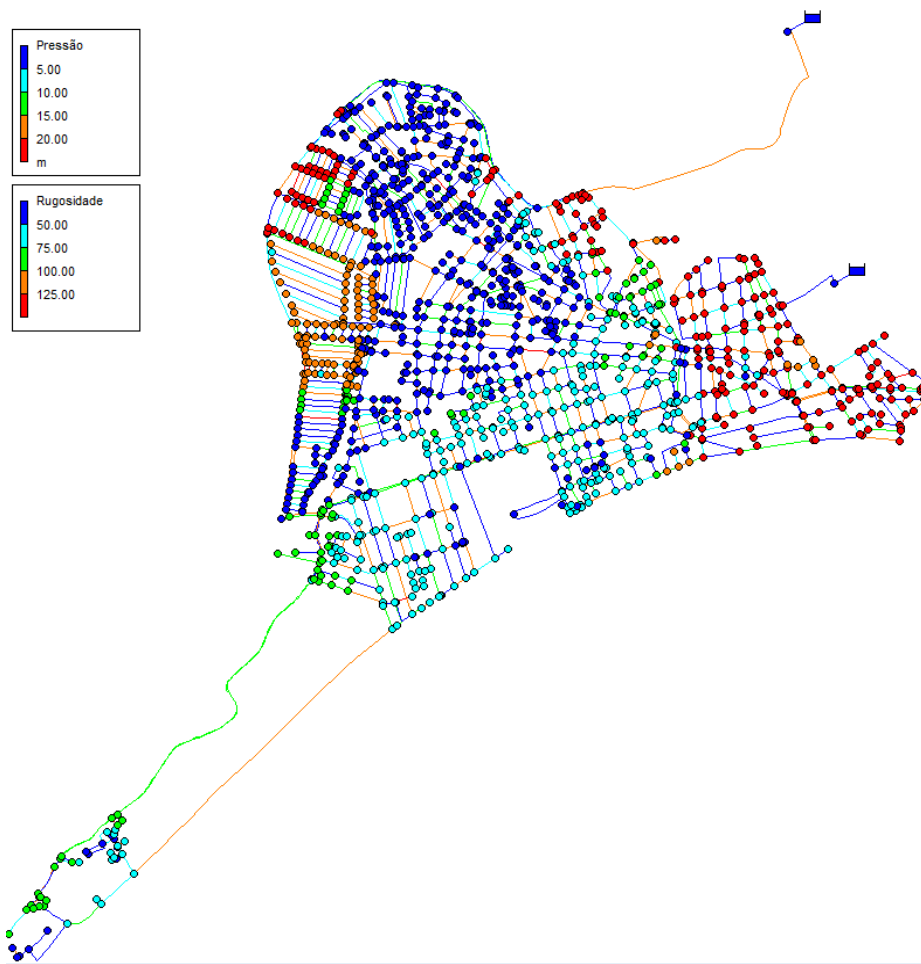


Figura 6 – Rede modelada com calibração

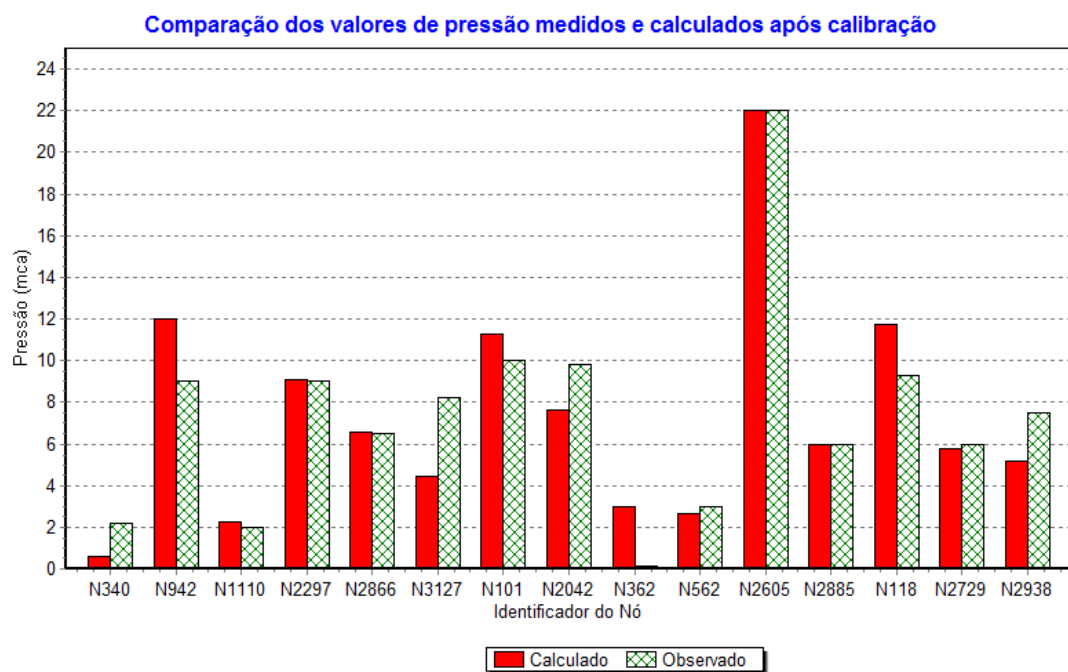


Figura 7 – Comparação entre os valores simulados e registrados após calibração

Após a rede calibrada, foi procedido a setorização da rede original atendendo aos limites mostrados na Figura 8, onde podem ser observados, também, os posicionamentos das válvulas redutoras de pressão (VRPs). O Quadro 1 apresenta a relação de setores com suas respectivas VRPs, seus diâmetros, e os valores de pressão a serem controlados dentro de cada setor.

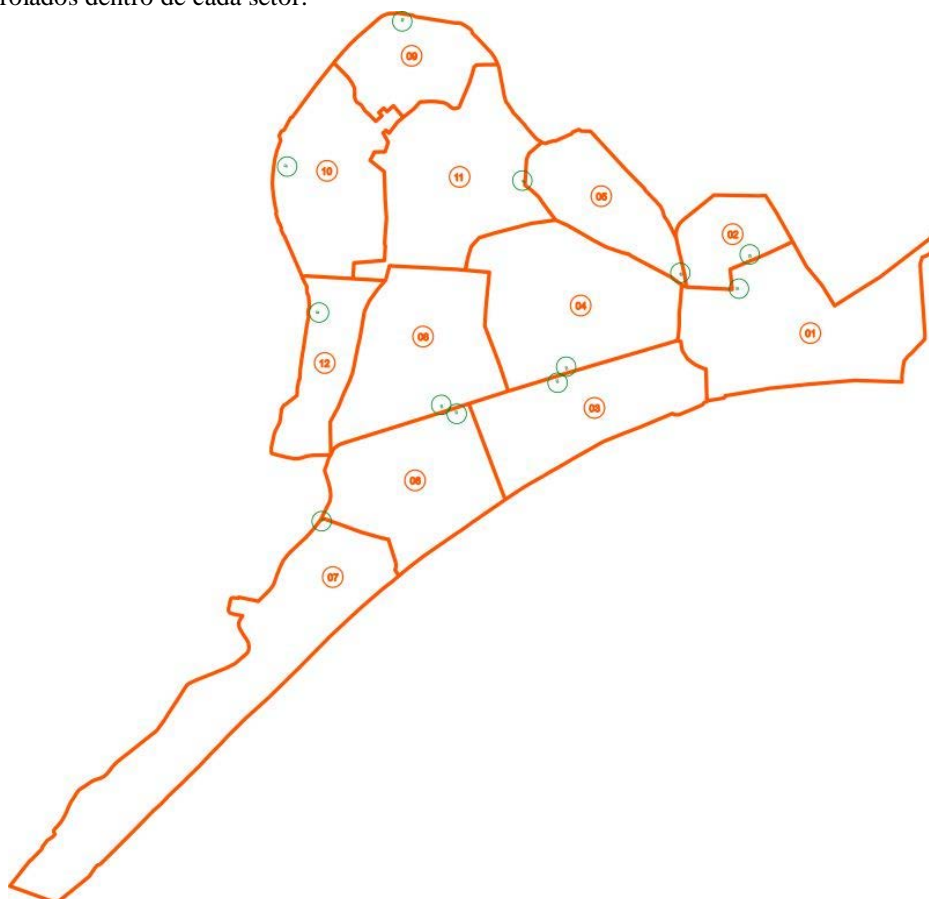


Figura 8 – Limites dos setores da rede do Complexo Lagunar, com o posicionamento das VRPs

Quadro 1 – Setores da rede do Complexo Lagunar

SETOR	VÁLVULA	DIÂMETRO (mm)	PRES. DE CONTROLE (mca)
01	VRP_01	200	20
02	VRP_02	100	12
03	VRP_03	150	12
04	VRP_04	200	12
05	VRP_05	350	12
06	VRP_06	350	12
07	VRP_07	350	22
08	VRP_08	150	15
09	VRP_09	075	20
10	VRP_10	150	25
11	VRP_11	250	12
12	VRP_12	100	10

O critério utilizado para a definição dos limites dos setores da rede (distritos de monitoramento e controles) baseou-se nas zonas comerciais já existentes no sistema de abastecimento, buscando separar os setores em regiões com valores médios de pressão mais ou menos uniformes.

A Figura 9 mostra valores simulados de pressão nos setores 9, 10 e 11 no horário de máxima demanda, onde se pode ver, também, a representação dos diâmetros dos trechos segundo a espessura do traçado das linhas. Nesta

figura, pode-se observar, ainda, que os valores das pressões nos nós estão superiores a 10 mca, o que não acontecia antes da setorização da rede.

Para completar o processo de reabilitação da rede, além da setorização com a implantação de VRPs, foram feitas algumas intervenções, com a incorporação de alguns trechos de tubulação interligando alguns nós e a substituição de alguns trechos para tubulações com diâmetros superiores aos já existentes. O Quadro 2 mostra as intervenções realizadas na rede de distribuição com a implantação de novos trechos e a substituição de alguns diâmetros em algumas tubulações de determinados trechos.

Quadro 2 – Intervenções na rede de distribuição do Complexo Lagunar

SETO R	INTERVENÇÃO NA REDE
08	Substituição de 645 metros da tubulação de DN 75 por uma de DN 150, entre os nós de indicadores 2029 e 1952.
09	Implantação de um trecho (T 350) entre os nós 659 e 626, de 37 metros de comprimento e diâmetro DN 100.
10	Substituição de 608 metros de tubulação DN 50 para DN 150, entre os nós 778 e 482 e 416 e 415. Implantação de um trecho entre os nós 482 e 416, de uma tubulação de 53 metros de comprimento e diâmetro DN 100. Implantação de um trecho entre os nós 415 e 406, de uma tubulação de 28 metros de comprimento e diâmetro DN 100.

A Figura 10 mostra a simulação no horário de máxima demanda, após a reabilitação completa do sistema de abastecimento de água da rede do Complexo Lagunar. A representação da rede, com as cores correspondentes aos valores das pressões nos nós, mostra que em todos os nós as pressões são superiores a 6 mca, demonstrando que a rede poderá ser efetivamente reabilitada após a implantação das intervenções sugeridas neste trabalho.

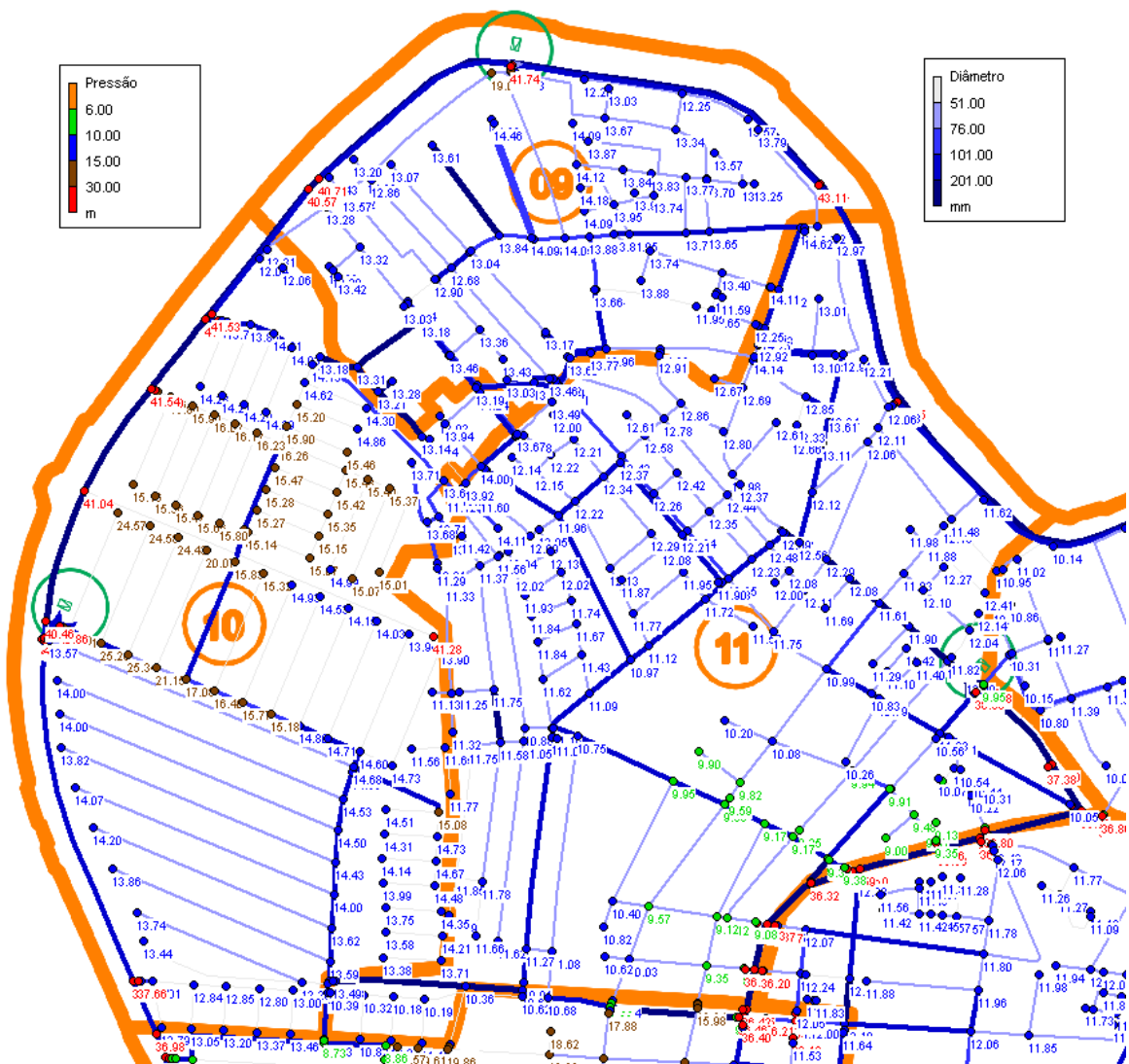


Figura 9 – Valores simulados de pressão nos setores 9, 10 e 11 no horário de máxima demanda

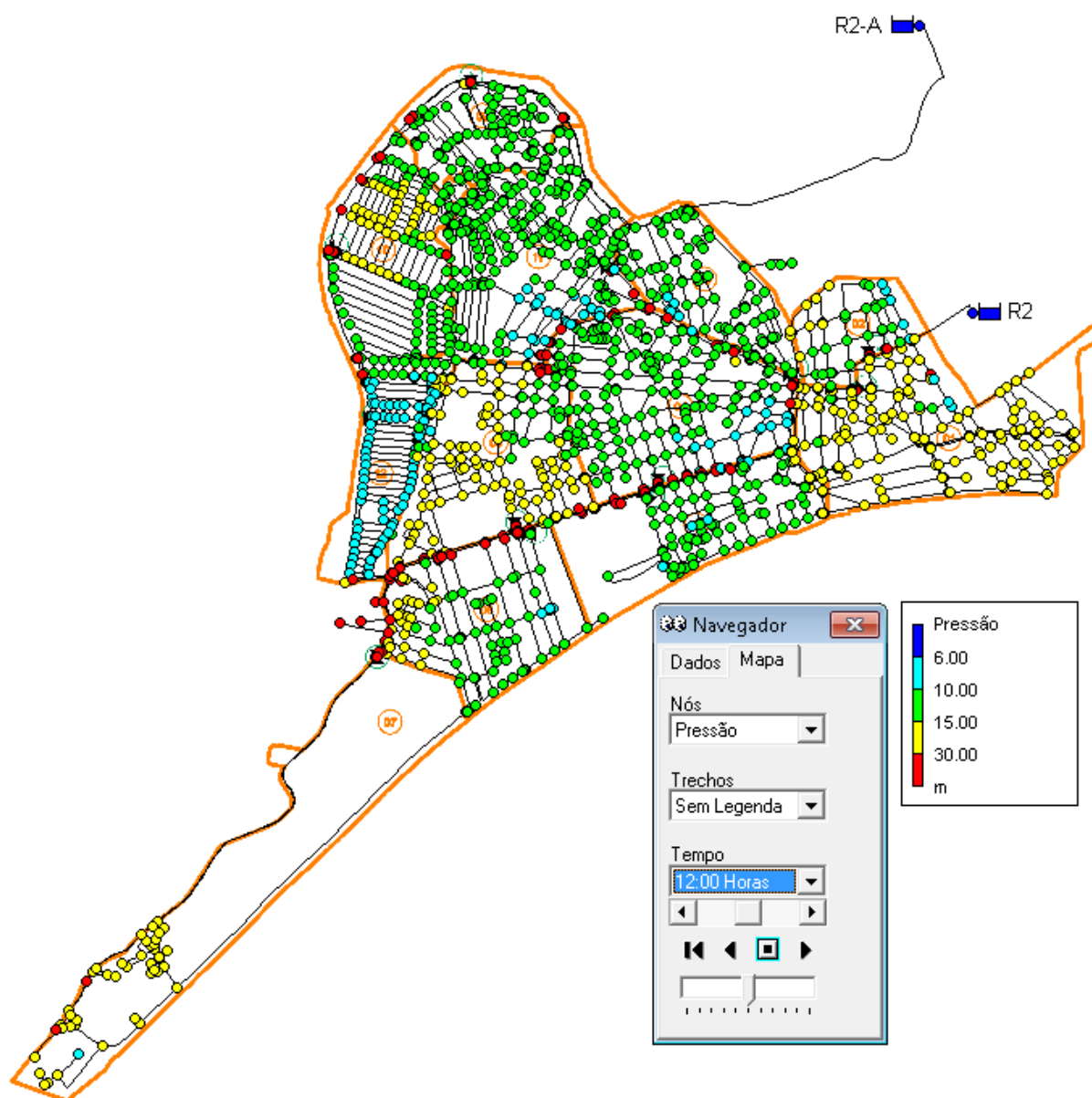


Figura 10 – Valores simulados de pressão, no horário de máxima demanda, após a reabilitação do sistema de abastecimento de água da rede do Complexo Lagunar

CONCLUSÃO

Este trabalho demonstra que a rede de abastecimento do Complexo Lagunar, com as intervenções e modificações sugeridas dentro de uma nova topologia de distribuição setorizada, atende às condições mínimas de pressões exigidas pela companhia de abastecimento de água CASAL, além de garantir a perfeita limitação e estanqueidade dos setores.

Ficou demonstrado, também, que o modelo de calibração LenhsCalibra conseguiu calibrar adequadamente a modelagem da rede através do Epanet. O modelo de otimização e reabilitação Lenhsnet apresentou a solução de mínimo custo para reabilitar o sistema de abastecimento, com as intervenções apresentadas nos Quadros 1 e 2.

Apesar de todo esforço demandado para a construção do novo modelo, quando da sua efetiva implantação, deverão ocorrer diferenças no comportamento hidráulico da rede (pressões e vazões) dentro dos setores. Estas diferenças estão relacionadas a deterioração das tubulações ao longo das suas vidas úteis, tais como: obstruções

ou rompimentos. Também poderão ser detectadas divergências entre o que realmente está implantado na prática, com as informações de projeto fornecidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CHEUNG, P. B. Análise de reabilitação de redes de distribuição de água para abastecimento via algoritmos genéticos multiobjectivo. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade Federal de São Paulo, São Carlos (Brasil), 2004. 268 p.
2. DANDY, G. C.; ENGELHARDT, M. O. Optimal scheduling of water pipe replacement using genetic algorithms. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 127, n. 4, 2001, pp. 214-223.
3. DE SCHANETZEN, W.; RANDALL-SMITH, M. J.; SAVIC, D.; WALTERS, G. A. A genetic algorithm approach for rehabilitation in water supply systems. *International Conference Rehabilitation Technology for the water Industry*. March (23/25), Lille, France, 1999 (apud Cheung 2004).
4. ENGELHARDT, M. O.; SKINWORDTH, P. J.; SAVIC, D. A.; SAUL, A. J.; WALTERS, G. A. – Reliability strategies for water distribution networks: a literature review with a UK perspective. *Urban Water*, n. 2, 2000, pp. 153-170.
5. FUJIWARA, O.; LI, J. Reliability analysis of water distribution networks in consideration of equity, redistribution, and pressure-dependent demand. *Water Resources Research*, v. 34, n. 7, 1998, op. 1846-1850.
6. GOMES, H. P., BEZERRA, Saulo de Tarso Marques, SRINIVASAN, V. S. An iterative optimization procedure for the rehabilitation of water supply pipe networks. *Water SA*, 2008, v.34, pp.12 - 18.
7. GOMES, H. P., BEZERRA, Saulo de Tarso Marques, CARVALHO, Paulo Sérgio Oliveira de, SALVINO, M. M. Optimal dimensioning model of water distribution systems. *Water SA*, v.35, 2009 pp. 421 - 432.
8. HALHAL, D.; WALTERS, G. A.; OUAZAR, D.; SAVIC, D. A. Water networks rehabilitation with structured messy genetic algorithm. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 123, n. 3, 1997, pp. 137-146.
9. KIM, J. H.; MAYS, L. W. Optimal rehabilitation model for water distribution systems. *Journal of Water Resource Planning and Management*, v. 120, n. 5, 1994, pp. 674-692.
10. KLEINER, Y.; ADAMS, B. J.; ROGERS, J. S. Long-term planning methodology for water distribution system rehabilitation. *Water Resources Research*, n. 3, 1998, pp. 131-150.
11. LANSEY, K. E.; BASNET, C.; MAYS, L. W.; WOODBURN, J. Optimal maintenance scheduling for water distribution system handbook. New York: McGraw Hill, 2000.
12. LE GAT, Y.; EISENBEIS, P. Using maintenance records to forecast failures in water networks. *Urban Water*, 2000 v. 2, pp. 173-191.
13. LI, D.; HAILES, Y. – “Optimal maintenance-related decision making deteriorating water distribution systems. *Water Resources Research*”, v. 28, n. 4, 1992 pp. 1053-1061.
14. MAYS, L. W. Reliability analysis of water distribution systems. In: MAYS, L. W. (ed.). *American Society of Civil Engineers*, New York, 1989.
15. MURPHY, L. J.; SIMPSON, A. R. Pipe optimization using genetic algorithms. Res. Res. N.R93, Department of Civil Engineering, University of Adelaide, Austrália, 1992.
16. SHAMIR U. and HOWARD C.D. An analytical approach to scheduling pipe replacement. *J. Amer. Water Works Association*”. 71 (5), 1979, pp 248-258.
17. WAGNER, J. M.; SHAMIR, U.; MARKS, D. H. Water distribution reliability: simulation methods. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 114, n. 3, 1998, pp. 276-294.
18. WALSKI, T. M.; PELLICCIA, A. Economic analysis of water main breaks. *Journal of the American Water Works Association*. 1982, pp. 140-147.
19. WALTERS, G. A.; HALHAL, D.; SAVIC, D. A.; OUZAR, D. Improved design of anytown distribution networks using structured messy genetic algorithms. *Urban Water*, 1999, pp. 23-38.