

XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA COM MÚLTIPLOS BOMBEAMENTOS

*Roberta Macêdo Marques Gouveia¹; Heber Pimentel Gomes²; Gênisson Batista Carneiro³;
Renato de Sousa³; Thiago Santos Almeida³; Wesley Imperiano Gomes de Melo⁴; Nicolle de
Belmont Sabino Rocha⁴; Terezinha Guedes Torres⁴; Pedro Henrique Cardoso⁴*

Resumo – O trabalho propõe um método de dimensionamento otimizado de redes de distribuição de água levando-se em conta a otimização energética dos múltiplos bombeamentos. O objetivo é proporcionar pressões mais adequadas e melhores distribuídas em todos os nós da rede, evitando-se cargas hidráulicas elevadas e perdas reais de água e de energia elétrica. A metodologia consiste em acrescentar o bombeamento secundário, representado pelo *booster*, visando determinar as alturas manométricas ótimas dos múltiplos bombeamentos com o menor custo de implantação e operação do sistema. O custo total do sistema é formado pelo custo de implantação das tubulações, acrescido do custo energético dos múltiplos bombeamentos. A fim de validar a metodologia, realizou-se um estudo de caso, comparando o dimensionamento de uma rede sem *booster* com o dimensionamento da mesma rede utilizando o *booster*. Para o estudo de caso utilizou-se o software LenhsNet Toolkit, que compreende um algoritmo iterativo e dinâmico para execução de dimensionamento otimizado. Através dos resultados obtidos pode-se constatar que o dimensionamento mais vantajoso se deu através da rede com *booster*. Outra conclusão obtida foi que à medida que aumenta o comprimento do trecho ou da cota do nó, mais favorável economicamente se torna a inserção do *booster* na rede.

Abstract – This paper offer a method of optimized sizing of water distribution networks taking into account the optimization of multiple pumping energy . The purpose is to provide more adequate and better distributed pressures in the network nodes, avoiding high hydraulic head and real losses of water and electricity. The methodology consists of adding the secondary pumping, represented by the *booster*, aiming to determine the optimal manometric height of multiple pumping with lowest cost of implementation and operation of the system. The total cost of the system is formed by deployment cost of the pipes, plus the cost of multiple pumping energy. In order to validate the proposed methodology, there was a case study, comparing the sizing of a network without *booster* with the sizing of the same network using the *booster*. For the case study used the software LenhsNet Toolkit, which includes an iterative and dynamic algorithm to execution of sizing optimized. Through the results obtained can be seen that the sizing was more advantageous by network with *booster*. Another conclusion obtained was that as increased of the length of the pipe or of hydraulic head, it becomes economically more favorable the insertion the *booster* on the network.

Palavras-Chave – Dimensionamento; Otimização; Eficiência Energética.

¹ Doutoranda em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal da Paraíba (PPGEM/UFPB). Centro de Tecnologia, Cidade Universitária, s/n - Castelo Branco, João Pessoa/PB, CEP: 58051-900, Telefone: +55 (83) 3216-7037. E-mail: robertammg@yahoo.com.br.

² Professor do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental (Centro de Tecnologia da UFPB). E-mail: heberp@uol.com.br.

³ Graduando em Engenharia Mecânica pela UFPB. E-mail: gennissonbatista@hotmail.com; robert-renato@hotmail.com; thiagosa88@hotmail.com.

⁴ Graduando(a) em Engenharia Civil pela UFPB. E-mail: wesleyimperiano@hotmail.com; nicolle@lenhs.ct.ufpb.br; terezinha@lenhs.ct.ufpb.br; pedro@lenhs.ct.ufpb.br.

INTRODUÇÃO

Os projetos e operações dos sistemas de distribuição de água envolvem altos custos para as companhias de abastecimento. Com a crescente demanda de água, em virtude do aumento da população nos grandes centros urbanos, vem se tornando cada vez mais necessária a otimização dos sistemas de abastecimento de água. Este trabalho reflete a importância de se estudar meios de minimizar os desperdícios de água e energia elétrica, visando à eficiência e qualidade do serviço prestado à população.

De acordo com o último relatório do SNIS (2010), o valor médio das perdas de faturamento no Brasil para todo o conjunto de prestadores de serviços foi de 37,4%. Apesar do valor ainda ser bastante elevado, já apresentou uma melhora, visto que foi o menor valor obtido de toda a série histórica de 14 anos do SNIS. As perdas de água, que podem ser físicas ou aparentes, são geradas por vazamentos, erros de medição, fraudes nos hidrômetros, ligações clandestinas, dimensionamento insatisfatório da rede, entre outros. As perdas de faturamento correspondem a todo volume de água captado dos mananciais, mas que se perde antes de chegar às casas e estabelecimentos a fim de abastecer a população brasileira.

De acordo com Marques *et al.* (2006), metade dos problemas no segmento do saneamento estão ligados às perdas reais, e a outra metade são decorrentes de falhas na medição, ou seja, perdas aparentes. Visando combater esta problemática, a principal motivação deste trabalho é propor medidas para otimizar as simulações de dimensionamento, proporcionando projetos mais adequadas que visem o menor custo de implantação e uma melhor operação das redes de distribuição de água.

As redes de distribuição devem ser projetadas para abastecer, de forma eficiente, os pontos de consumo mais desfavoráveis com uma pressão mínima suficiente, proporcionando economia de água e, como consequência, economia da energia elétrica, Tsutiya (2001). Quando a pressão mínima na rede está abaixo do valor satisfatório, os sistemas ficam comprometidos, pois não dispõe vazão suficiente para os usuários. Por outro lado, quando o sistema está sendo operado com pressão excessiva, vários problemas surgem na rede, dentre eles: aumento nos custos energéticos do bombeamento; tubulações mais caras; possibilidades de rupturas em virtude do aumento das pressões estáticas e dinâmicas; aumento das perdas físicas em virtude do aumento das vazões nas fissuras e juntas dos tubos; maior consumo de água, muitas vezes desnecessário, em virtude do aumento da vazão.

De acordo com Gomes (2009), os limites das pressões hidráulicas são fundamentais no projeto de abastecimento urbano de água, tendo um papel significativo no custo de implantação e operação do sistema, assim como na qualidade do serviço prestado. A fim de garantir que a água chegue aos pontos de consumo com uma carga suficiente para vencer as perdas das instalações

prediais e alcançar as torneiras com a vazão adequada, é necessário que as pressões da rede tenham um limite inferior e máximo, ou seja, um valor adequado para a pressão mínima e máxima, respectivamente.

No Brasil o valor sugerido para pressão mínima na rede segue a norma NBR12218 (1994), onde a mesma estabelece que a pressão dinâmica mínima em qualquer ponto nas tubulações distribuidoras deve ser de aproximadamente 10 mca. Já a pressão máxima nas tubulações distribuidoras deve ser de aproximadamente 50 mca.

As situações extremas de pressão (estática e dinâmica) em que a rede está submetida devem ser observadas, visando o bom funcionamento do sistema de distribuição de água, alerta Gomes (2009). Na operação das redes de abastecimento, as tubulações estão sujeitas a esforços hidráulicos internos, produzidos pelas pressões estáticas e dinâmicas, e por efeitos transitórios, que ocorrem por conta das perturbações na rede. A pressão estática corresponde à situação em que a rede está em repouso, ou seja, quando a vazão transportada é nula, sendo mais comum se apresentar nos períodos noturnos, quando o consumo de água é muito baixo. Outra situação extrema se refere à pressão dinâmica, que se apresenta quando a rede está em plena carga, durante os horários de pico do consumo. Portanto, é necessário conhecer a atuação dos esforços hidráulicos máximos nas tubulações, visando à correta seleção dos tubos e o melhor dimensionamento da rede.

O problema do dimensionamento consiste em solucionar duas equações, são elas: conservação de massa, também conhecida como equação da continuidade³ nos nós da rede e conservação de energia, também conhecida como equação da perda de carga⁴ nos anéis da rede. Como o problema possui mais incógnitas a serem determinadas (V , D , h_f) do que equações disponíveis, o dimensionamento torna-se um problema indeterminado, pois admite inúmeras soluções.

O trabalho consiste no dimensionamento de redes de distribuição de água através da programação iterativa e dinâmica, levando-se em conta a otimização energética e visando à minimização do custo total do sistema, formado pelas tubulações da rede e pela energia dos bombeamentos primário (altura manométrica na origem) e secundário (*booster*). Desta forma, o trabalho irá proporcionar projetos mais adequados, com pressões melhores distribuídas na rede e uma melhor operação das redes de distribuição, diminuindo as perdas de água e de energia. Os sistemas a serem dimensionados podem ser formados por redes malhadas, ramificadas ou expansões de redes existentes, abastecidas por múltiplas fontes.

O objetivo do trabalho consiste em obter a solução ótima do dimensionamento considerando os bombeamentos múltiplos, isto é, o bombeamento principal (estação elevatória) e os

³ O somatório das vazões que entram no nó deve ser igual ao somatório das vazões que saem do nó.

⁴ O somatório das perdas de carga nos anéis deve ser igual a zero.

bombeamentos secundários (*boosters*). Esta solução é a que minimiza os custos de implantação das tubulações e maximiza os benefícios com a diminuição das perdas de água e de energia. O custo total do sistema será composto pelo custo de implantação da rede de tubulações mais os custos energéticos dos múltiplos bombeamentos. Através da solução final do dimensionamento são obtidos os diâmetros otimizados de todos os trechos da rede e as alturas manométricas ótimas dos múltiplos bombeamentos.

Os objetivos específicos são: implementação do algoritmo iterativo e dinâmico de otimização de redes de distribuição de água, onde o mesmo apresenta em uma interface gráfica amigável, a solução ótima que consiste do custo mínimo do dimensionamento; utilização do EPANET Programmer's Toolkit para criação do programa; e validação do algoritmo em redes *benchmarks*, isto é, redes modelos que são utilizadas como testes e comparações para os diversos métodos de dimensionamentos presentes na literatura.

Os custos de implantação e de operação de um sistema de distribuição de água são antagonicos, ou seja, quando um aumenta o outro diminui e vice-versa. Um bom dimensionamento consiste em determinar a cota piezométrica de alimentação ótima.

Gomes (2009) verificou que quanto maior for a cota piezométrica de alimentação, menor será o custo de implantação da rede, pois neste caso pode-se utilizar tubos de diâmetros menores, já que existem cargas suficientes para superar as perdas provocadas por estes diâmetros. Em contrapartida, o custo de operação do sistema de bombeamento cresce com o aumento da cota piezométrica de alimentação, pois a energia necessária para pressurizar a rede é diretamente proporcional a altura de impulsão dos bombeamentos. Desta forma, para uma menor altura de impulsão dos bombeamentos, menor será o custo de operação da rede e maior será o custo de implantação da rede de distribuição, uma vez que esta será composta de tubos de maiores diâmetros que provocam menores perdas de carga no sistema.

A Figura 1 apresenta a linha piezométrica de uma rede de distribuição de água com bombeamento primário. Já a Figura 2 apresenta a linha piezométrica de uma rede de distribuição de água com múltiplos bombeamentos (estação elevatória e *booster*). A Figura 3 mostra a comparação entre as linhas piezométricas da rede de distribuição de água com *booster* (linha azul) e sem *booster* (linha verde). Como se pode observar, a rede com *booster* apresentou uma linha piezométrica menor se comparada a mesma rede sem o *booster*, o que proporcionou pressões mais adequadas, uniformes e melhores distribuídas na rede, evitando cargas hidráulicas elevadas e diminuindo as perdas reais de água e de energia. Portanto, o que se pretende com este trabalho é diagnosticar em quais situações se torna mais favorável a utilização de *boosters* visando menores alturas manométricas nos múltiplos bombeamentos.

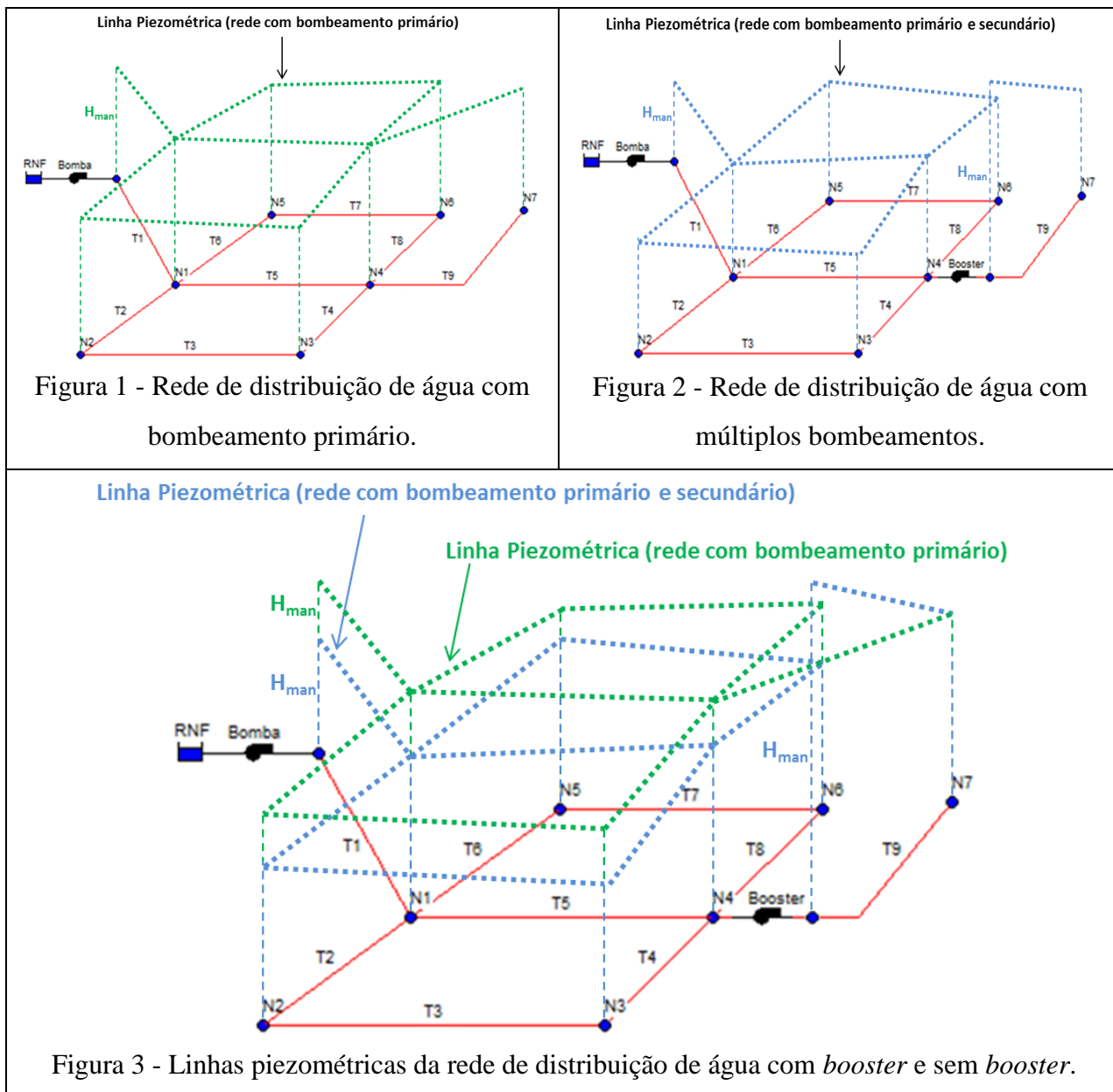


Figura 1 - Rede de distribuição de água com bombeamento primário.

Figura 2 - Rede de distribuição de água com múltiplos bombeamentos.

Figura 3 - Linhas piezométricas da rede de distribuição de água com *booster* e sem *booster*.

METODOLOGIA

Os métodos de dimensionamento de redes de distribuição de água existentes na literatura consideram apenas o bombeamento principal para o cálculo do custo energético, contudo, não existe um método de dimensionamento de redes que considerem também o bombeamento secundário (*booster*). Visando suprir esta carência, a proposta deste trabalho consiste em acrescentar os bombeamentos secundários no dimensionamento e assim apresentar o custo total do sistema de forma mais realista. Para isso, um software de dimensionamento, nomeado LenhsNet Toolkit, foi implementado neste trabalho.

A fim de alcançar o objetivo proposto, a metodologia empregada neste trabalho compreende um algoritmo iterativo e dinâmico de otimização, onde o mesmo inicia-se pela condição de contorno, que é a solução inicial, atribuindo a todos os trechos da rede o diâmetro mínimo

comercial. As iterações subseqüentes visam à solução ótima e esta dependerá do gradiente de pressão e dos custos unitários da energia do bombeamento principal e do *booster*. Espera-se, com a solução final do dimensionamento, obter os diâmetros adequados de todos os trechos da rede e as alturas ótimas de bombeamento do sistema principal de impulsão e do *booster*.

O gradiente de pressão (G_p) de um determinado trecho da rede corresponde à relação custo/benefício, onde o custo significa o aumento no preço de implantação de um trecho em virtude do aumento do diâmetro da tubulação neste trecho; o benefício corresponde à conseqüente diminuição de perda de carga no sistema de abastecimento em virtude da utilização de um diâmetro maior. O algoritmo de otimização buscará o custo mínimo do sistema, formado pelos custos dos trechos da rede de tubulações, mais a energia do bombeamento principal e as energias de bombeamentos secundários.

O dimensionamento otimizado é um problema combinatório, por isso o algoritmo está sendo implementado através da programação dinâmica (PD). A PD utiliza funções recursivas para o armazenamento de resultados anteriores, evitando contas repetidas, o que deixa o algoritmo mais eficiente. Em cada iteração do algoritmo LenhsNet Toolkit um trecho é modificado para seu diâmetro subseqüente, e o trecho selecionado para mudança de diâmetro é o que obteve o menor gradiente de pressão, ou seja, o menor custo/benefício.

Para calcular o gradiente de pressão, em cada trecho e em cada iteração, é necessário conhecer inicialmente o nó mais desfavorável, isto é, o nó com a menor pressão disponível da rede. Em seguida é atribuído o diâmetro subseqüente a cada trecho e encontrado a nova pressão no nó inicialmente mais desfavorável. O gradiente de pressão (G_p) é dado em $\$/mca$ e corresponde ao custo da tubulação do trecho com o seu diâmetro imediatamente superior ao atual (C_2), subtraído do custo da tubulação do trecho com o seu diâmetro atual (C_1), dividido pelo ganho de pressão (ΔP) no nó mais desfavorável, proporcionado pela diminuição da perda de carga, em razão da troca do diâmetro do trecho pelo seu superior. Portanto, $G_p = (C_2 - C_1)/\Delta P$. O ganho de pressão em cada iteração corresponde à diferença entre a pressão no nó mais desfavorável e a pressão neste mesmo nó, quando a rede se encontra com o diâmetro superior ocupando o trecho em questão.

Em cada iteração são calculados “n” gradientes de pressão, correspondentes às mudanças de diâmetros dos “n” trechos da rede. Por exemplo, em uma rede contendo 8 trechos, serão calculados, em cada iteração, 8 gradientes de pressão. O número de iterações só é conhecido no final do processo, pois as iterações só param quando a pressão no nó mais desfavorável for maior que a pressão desejada. O gradiente de pressão ótimo será o menor entre esses 8 gradientes calculados. O trecho correspondente ao gradiente de pressão ótimo é chamado de trecho ótimo, ou seja, é o trecho que, de fato, será substituído pelo seu diâmetro subseqüente.

Definido o gradiente de pressão ótimo, a rede assumirá uma nova configuração, onde o trecho ótimo passará a ser ocupado pelo diâmetro imediatamente superior. Esta última configuração será a configuração de partida para a iteração seguinte. O processo iterativo de otimização segue a metodologia mencionada acima até atingir a solução final, que será a solução definitiva, de custo ótimo, para o sistema pressurizado de distribuição de água.

O algoritmo necessita de uma condição de parada do processo iterativo de otimização para que a solução de custo ótimo seja apresentada. Em Gomes (2009), foram desenvolvidas duas alternativas para que a condição de parada seja satisfeita.

A primeira alternativa consiste em uma rede abastecida por um reservatório elevado e, portanto, sua cota piezométrica na origem é fixa e conhecida. Neste primeiro caso, o custo⁵ total do sistema corresponde apenas ao custo de implantação da rede de tubulações. No relatório do dimensionamento otimizado é apresentado às pressões mínimas e máximas; velocidades mínimas e máximas; e o custo total de implantação das tubulações.

A segunda alternativa consiste em impulsionar a água para a rede de distribuição através de bombeamento e, neste caso, o custo total do sistema será composto pelo custo da rede de tubulações mais o custo energético da estação elevatória. Neste segundo caso a cota na origem será uma variável de decisão a mais no processo de otimização.

O custo energético da estação elevatória é obtido através da fórmula do Gradiente Energético (Ge). O Ge depende da potência requerida por metro de elevação (P) pelo conjunto motor-bomba; da tarifa de energia elétrica (T); do número de horas de bombeamento (Nb) e do fator de atualização (Fa). A potência requerida depende da vazão requerida (Q) e do rendimento global do conjunto elevatório (η). A fórmula do Ge é dado por: $Ge (\$/m) = P (\text{kW}/m) * T (\$/\text{kWh}) * Nb (\text{anual}) * Fa$. A tarifa de energia elétrica (T) e o número de horas de bombeamento (Nb) são dados do projeto. Já a potência requerida por metro de elevação e fator de atualização é dado pela equação (1) e equação (2), respectivamente.

$$P(\text{kW} / \text{m}) = \frac{9,81 \times Q(\text{m}^3 / \text{s})}{\eta(\text{decimais})} \quad (1)$$

$$Fa = \left[\frac{(1+c)^n - (1+i)^n}{(1+c) - (1+i)} \right] \times \left[\frac{1}{(1+i)^n} \right] \quad (2)$$

⁵ O custo total é dado pelo somatório do comprimento multiplicado pelo custo unitário de cada trecho.

O relatório do dimensionamento otimizado para cota piezométrica na origem variável apresenta às pressões e velocidades mínimas e máximas; altura manométrica⁶ do bombeamento principal; altura piezométrica⁷ do bombeamento principal; custo de implantação das tubulações; custo energético atualizado (Potência x H_{man} x Tarifa de Energia x Horas de Bombeamento x 365 x Fa); e custo total (custo energético + custo de implantação das tubulações).

O processo de dimensionamento inicia-se da mesma forma que na cota piezométrica fixa, ou seja, é atribuído a todos os trechos o diâmetro mínimo da tabela de tubos e executada a primeira iteração para identificar o nó mais desfavorável. A cada iteração compara-se o gradiente de pressão ótimo (GPótimo) com o Gradiente Energético (Ge) calculado, e não mais com a pressão mínima da rede como é feito na cota piezométrica fixa.

Enquanto o GPótimo é menor que Ge, o custo de investimento para aumentar o diâmetro do trecho (e conseqüentemente aumentar a pressão no nó) compensa mais do que aumentar o custo energético com aumento da carga na rede (que também aumentaria a pressão no nó, mas seria menos vantajoso). O processo de otimização prossegue aumentando os diâmetros dos trechos ótimos até que o valor do GPótimo iguale ou supere o valor do Ge. Quando isto ocorrer, o processo iterativo alcança sua solução de parada e a rede se encontra dimensionada de forma otimizada. Neste ponto do algoritmo, todos os trechos da rede possuem os seus diâmetros ótimos.

Neste trabalho, é proposta a terceira alternativa para que a condição de parada seja satisfeita. Esta terceira alternativa consiste em impulsionar a água para a rede através de múltiplos bombeamentos, e para este novo caso, o custo total do sistema será composto pelo custo da rede de tubulações mais o custo energético da estação elevatória, acrescido do custo energético do *booster*. O relatório do dimensionamento otimizado para cota piezométrica variável nos múltiplos bombeamentos é similar ao da “cota piezométrica na origem variável”, contudo acrescenta-se a(s) H_{man} do(s) bombeamento(s) secundário(s).

O software de dimensionamento implementado neste trabalho e utilizado no estudo de caso, nomeado LenhsNet Toolkit, é uma extensão e aprimoramento do LenhsNet, trazendo algumas vantagens e novos recursos. O estudo de caso será apresentado na seção “Resultados”.

A metodologia do LenhsNet original realiza o dimensionamento considerando apenas a cota piezométrica na origem, e para isso disponibiliza duas opções de configurações de projeto, são elas: “Cota de Cabeceira Fixa” e “Cota de Cabeceira Variável”, Gomes *et al.* (2009). Contudo, além da cota piezométrica na origem, o programa LenhsNet Toolkit considera também a cota piezométrica no bombeamento secundário.

⁶ H_{man} corresponde a pressão desejada menos a pressão mínima da rede.

⁷ A altura piezométrica é dada pela cota do nível de água na origem acrescido da H_{man} .

O código do LenhsNet Toolkit foi implementado utilizando o Toolkit de programação do Epanet, que consiste de um conjunto de funções previamente definidas e integradas em uma Dynamic Link Library (DLL). O toolkit do Epanet possui mais de 50 funções, disponíveis no arquivo “epanet2.dll”, para serem utilizadas por programadores no desenvolvimento de novas aplicações envolvendo dimensionamento, automação, calibração e otimização de sistemas de abastecimento de água.

Um aspecto bastante positivo do LenhsNet Toolkit consiste no fato dele ser desacoplado do simulador hidráulico Epanet 2.0, Rossman (2009), permitindo sua utilização mesmo que o Epanet não esteja em execução ou mesmo instalado no computador. A rápida velocidade de processamento e resposta ao dimensionamento foram aspectos importantes do novo programa, haja vista que as redes testadas foram dimensionadas em poucos segundos e apresentaram relatórios contendo menores custos de implantação e operação.

O estudo de caso deste trabalho consiste em determinar as situações mais favoráveis para inserção de *boosters*, ainda na fase de projeto e dimensionamento de redes de distribuição de água. As variáveis analisadas foram “comprimento do trecho” e “cota do nó”. Será realizada uma análise de sensibilidade para saber o quanto é mais vantajoso e econômico a utilização de *boosters* na rede analisando tais variáveis.

A modelagem de sistemas de distribuição de água utilizando *boosters* se faz necessário quando se pretende garantir a vazão desejada em determinado ponto de consumo. O funcionamento do *booster* consiste em receber água a montante com uma determinada pressão e injetá-la a jusante com uma pressão mais elevada. Dentre as finalidades do *booster*, tem-se: bombear água para um ponto de consumo com cota, significativamente, superior; expandir a rede pressurizada, a partir do nó existente; suprir a demanda de uma área que se encontra distante do ponto de impulsão; elevar a pressão a jusante do *booster*; e reabilitação de redes.

A Figura 4 exemplifica uma rede principal, sua sub-rede complementar e um *booster* entre elas.

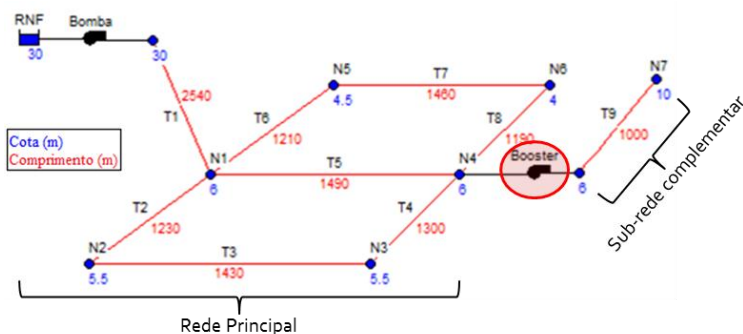


Figura 4 – Exemplo de utilização de *booster* entre uma rede de distribuição de água.

O nó 7 se encontra distante 1.000 m do nó 4 e está com cota de 10 m. Já o nó 4 está em uma cota de 6 m, o que justifica a inserção do *booster*.

Em geral, a pressão disponível da água no nó existente não será suficiente para suprir a demanda do novo ponto de consumo, principalmente nas horas do dia de maiores demandas de água. Por isso é necessário inserir um *booster* entre os dois nós com o intuito de elevar a pressão, a jusante do *booster*, de um determinado setor do sistema, a fim de bombear a água para pontos mais elevados e garantir a vazão desejada nas linhas adutoras.

A análise de sensibilidade sugerida no estudo de caso deste trabalho seguiu os três passos representados na Figura 5.

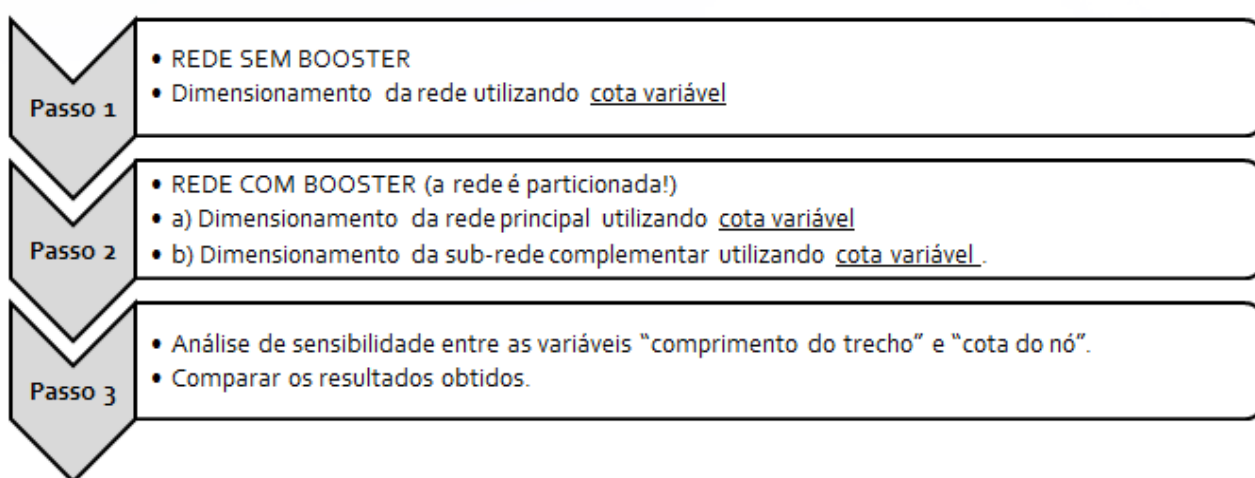


Figura 5 - Análise de sensibilidade do estudo de caso

Todos os dimensionamentos do estudo de caso foram executados através da configuração de projeto "cota piezométrica variável no bombeamento secundário" do software LenhsNet Toolkit.

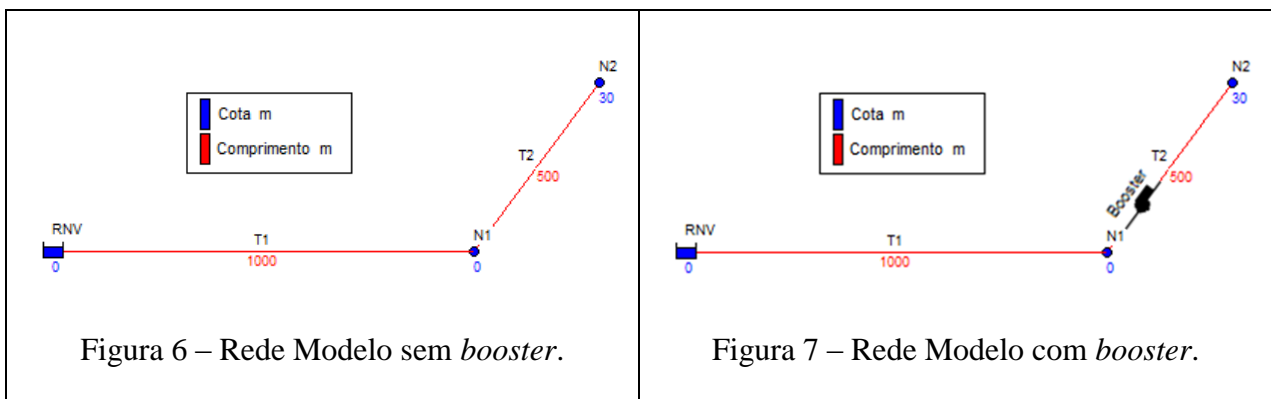
O primeiro passo consiste em executar o dimensionamento de uma rede sem *booster* (rede principal acoplada a sub-rede complementar) utilizando a opção cota variável. Já o segundo passo consiste em executar dois dimensionamentos utilizando a opção cota variável separadamente para a rede principal (trecho antes do *booster*) e para sub-rede complementar (trecho após o *booster*).

Para finalizar o estudo de caso, foram realizadas as análises de sensibilidade entre as variáveis "comprimento do trecho" e "cota do nó" e os resultados obtidos foram comparados entre eles, visando determinar a situação em que o programa obteve a melhor solução, ou seja, a solução que proporcionasse as pressões mais adequadas na rede e as menores alturas manométricas nos múltiplos bombeamentos.

RESULTADOS

A análise de sensibilidade apresentada nesta seção visa determinar as condições favoráveis e vantajosas para a utilização do *booster* no dimensionamento otimizado. Para isso, utilizou-se uma pequena rede modelo, a fim de simular e comparar os resultados dos dimensionamentos e a partir deles obter as conclusões necessárias.

Na Figura 6 é apresentada a rede modelo sem *booster* e na Figura 7 é apresentada a rede modelo com *booster*. A rede modelo possui dois trechos (T1 e T2) e dois nós (N1 e N2). As variáveis analisadas foram o aumento do comprimento dos trechos T1 e T2 e o aumento da cota do nó N2. Os comprimentos dos trechos T1 e T2 são 1.000 m e 500 m, respectivamente. A vazão no nó N1 é 300 l/s e no nó N2 é 200 l/s.



Passo 1

Inicialmente foi realizado o dimensionamento da rede Modelo sem *Booster* (Figura 6) através do LenhsNet Toolkit, utilizando a opção Cota Variável.

Os dados do projeto para execução do dimensionamento são: pressão mínima requerida de 15 mca; vazão total do sistema ($500 \text{ m}^3/\text{s}$), rendimento esperado do conjunto motor-bomba (75%); 20 anos de vida útil do projeto, taxa de juros anual (12 %), taxa de aumento anual da energia do bombeamento (6 %), custo unitário médio da tarifa de energia elétrica (0,2 \$/kWh), 20 horas diárias de bombeamento e cota do nível de água na origem (0 m).

A Figura 8 ilustra o relatório final, após o dimensionamento otimizado, da rede Modelo sem *booster* entre o nó N1 e N2. O custo total da rede foi de \$ 6.169.796 e a altura ótima do bombeamento foi de 49,04 mca. A carga hidráulica no nó 1 foi de 45,34 mca e a carga hidráulica no nó 2 foi de 15 mca.

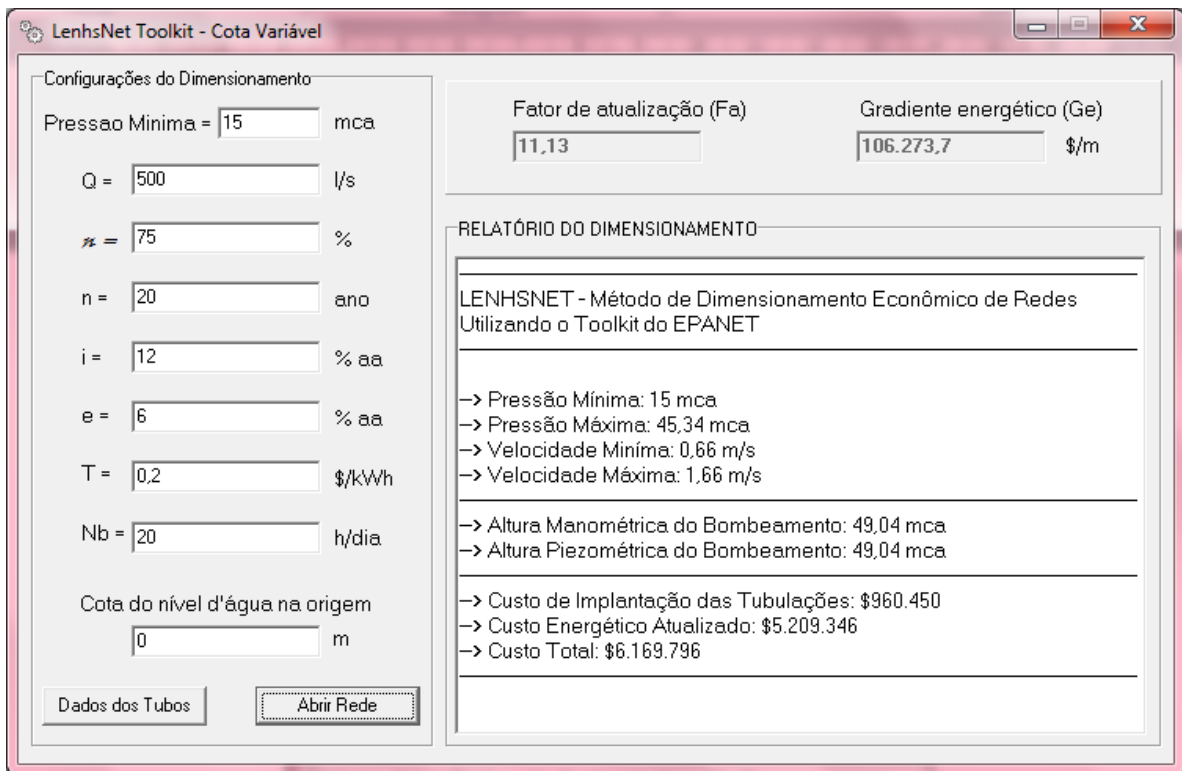
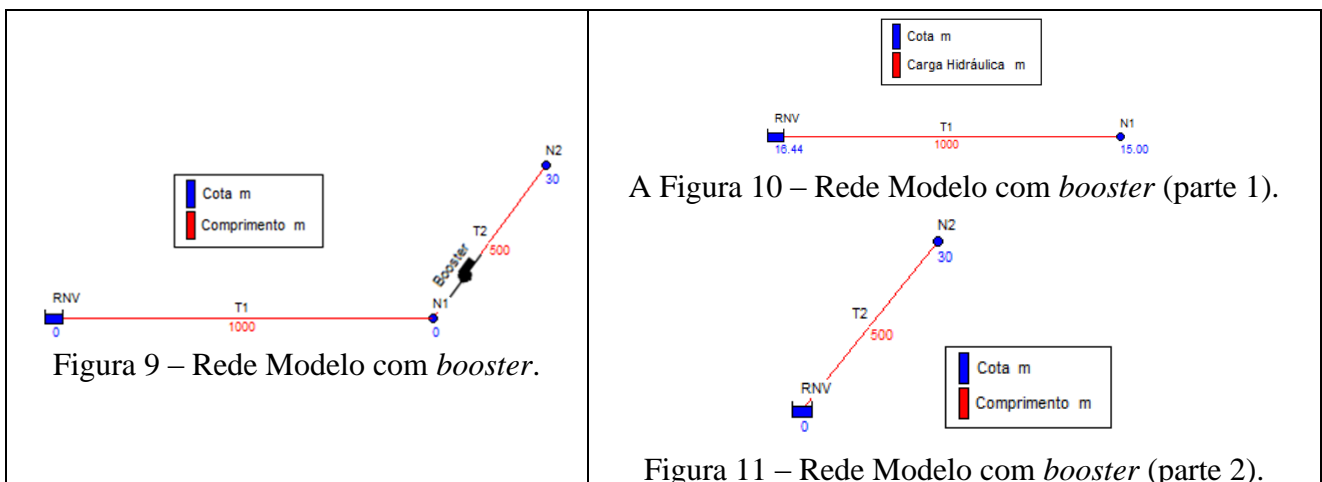


Figura 8 - Relatório final do dimensionamento da Rede Modelo sem *Booster*.

Passo 2

A fim de comparar os resultados e determinar a melhor opção para o dimensionamento otimizado fez-se necessário realizar o dimensionamento da rede Modelo com *booster* (Figura 9). Para isso foram realizados dois dimensionamentos, visto que a rede é particionada para obtenção de duas alturas ótimas de bombeamento, uma para o bombeamento principal e outra para o bombeamento secundário. A Figura 10 representa a rede principal (trecho antes do *booster*) e a Figura 11 representa a sub-rede complementar (trecho após o *booster*). Os dimensionamentos da rede principal e da sub-rede complementar utilizaram a opção cota variável do software LenhsNet Toolkit.



Os dados do projeto para execução do dimensionamento da rede modelo com *booster* (parte 1) foram: pressão mínima requerida de 15 mca; vazão total do sistema ($300 \text{ m}^3/\text{s}$), rendimento esperado do conjunto motor-bomba (75%); 20 anos de vida útil do projeto, taxa de juros anual (12 %), taxa de aumento anual da energia do bombeamento (6%), custo unitário médio da tarifa de energia elétrica (0,2 \$/kWh), 20 horas diárias de bombeamento e cota do nível de água na origem (0 m). Já os dados do projeto para execução do dimensionamento da rede modelo com *booster* (parte 2) foram: pressão mínima requerida de 15 mca; vazão total do sistema ($200 \text{ m}^3/\text{s}$), rendimento esperado do conjunto motor-bomba (75%); 20 anos de vida útil do projeto, taxa de juros anual (12 %), taxa de aumento anual da energia do bombeamento (6%), custo unitário médio da tarifa de energia elétrica (0,2 \$/kWh), 20 horas diárias de bombeamento e cota do nível de água na origem (15 m).

A Figura 12 apresenta o relatório final do dimensionamento otimizado da rede modelo com *booster* (parte 1). A Figura 13 apresenta o relatório final do dimensionamento otimizado da rede modelo com *booster* (parte 2).

The screenshot shows the 'LenhsNet Toolkit - Cota Variável' window. On the left, under 'Configurações do Dimensionamento', the following parameters are set: Pressao Minima = 15 mca, Q = 300 l/s, η = 75 %, n = 20 ano, i = 12 % aa, e = 6 % aa, T = 0,2 \$/kWh, Nb = 20 h/dia, and Cota do nível d'água na origem = 0 m. On the right, 'Fator de atualização (Fa)' is 11,13 and 'Gradiente energético (Ge)' is 63.764,21 \$/m. The 'RELATÓRIO DO DIMENSIONAMENTO' section contains the following text:

```

LENHSNET - Método de Dimensionamento Econômico de Redes
Utilizando o Toolkit do EPANET

-> Pressão Mínima: 15 mca
-> Pressão Máxima: 15 mca
-> Velocidade Mínima: 0,99 m/s
-> Velocidade Máxima: 0,99 m/s

-> Altura Manométrica do Bombeamento: 16,44 mca
-> Altura Piezométrica do Bombeamento: 16,44 mca

-> Custo de Implantação das Tubulações: $640.300
-> Custo Energético Atualizado: $1.047.622,31
-> Custo Total: $1.687.922,25

```

Figura 12 - Relatório final do dimensionamento da Rede Modelo com *Booster* (parte 1).

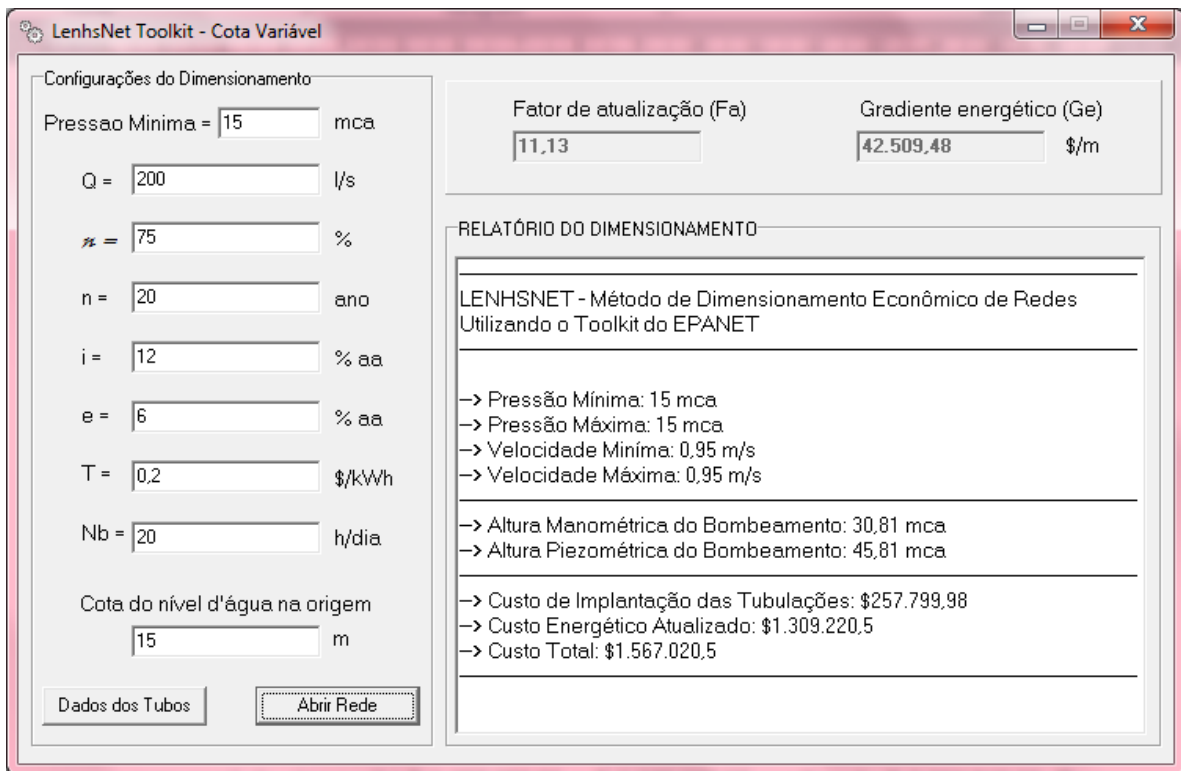


Figura 13 - Relatório final do dimensionamento da Rede Modelo com *Booster* (parte 2).

Conforme relatórios dos dimensionamentos da Rede Modelo com *Booster* (parte 1 e parte 2), o custo total do sistema foi \$ 1.687.922,25 + \$ 1.567.020,50, totalizando 3.254.942,75. Desta forma, pode-se observar que o dimensionamento da Rede Modelo com *Booster* foi mais vantajoso se comparado ao dimensionamento da mesma rede sem o *booster*. Houve uma economia de 2.914.853,25 na rede com *booster*.

Análise de sensibilidade

Para finalizar o estudo de caso, foram realizadas as análises de sensibilidade entre as variáveis “comprimento do trecho” e “cota do nó”. A Tabela 1 apresenta a relação entre o dimensionamento da rede modelo sem *booster* e com *booster* à medida que o comprimento do trecho T1 aumenta. As células hachuradas em azul correspondem ao custo total do dimensionamento da rede sem *booster*, e as células hachuradas em vermelho correspondem ao custo total do dimensionamento da rede com *booster* (soma-se rede modelo parte 1 com parte 2).

Como se pode observar na Tabela 1, a medida que o trecho T1 aumenta de comprimento, mais vantajoso se torna a utilização do *booster* na rede, chegando a economias na ordem de \$ 3.818.685,77 quando o trecho T1 possui comprimento de 4.000 m.

Tabela 1 – Aumento do trecho T1 da rede Modelo

| T1 = 2.000 m | | T1 = 3.000 m | | T1 = 4.000 m | |
|-----------------------------|--------------------|-----------------------------|--------------------|-----------------------------|--------------------|
| Sem <i>Booster</i> | Com <i>Booster</i> | Sem <i>Booster</i> | Com <i>Booster</i> | Sem <i>Booster</i> | Com <i>Booster</i> |
| | 2.420.239,34 | | 3.152.127,40 | | 3.884.015,45 |
| | 1.569.559,37 | | 1.569.559,37 | | 1.569.559,37 |
| 7.205.373,35 | 3.989.798,71 | 8.238.816,76 | 4.721.686,77 | 9.272.260,59 | 5.453.574,82 |
| Economia de \$ 3.215.574,64 | | Economia de \$ 3.517.129,99 | | Economia de \$ 3.818.685,77 | |

Assim como é mais vantajoso o uso de *booster* à medida que o comprimento do trecho T1 aumenta, o mesmo ocorre com o trecho T2. A Tabela 2 apresenta a relação entre o dimensionamento da rede modelo sem *booster* e com *booster* à medida que o comprimento do trecho T2 aumenta. As células hachuradas em azul correspondem ao custo total do dimensionamento da rede sem *booster*, e as células hachuradas em vermelho correspondem ao custo total do dimensionamento da rede com *booster* (soma-se rede modelo parte 1 com parte 2).

Como se pode observar na Tabela 2, a medida que o trecho T2 aumenta de comprimento, mais vantajoso se torna a utilização do *booster* no processo de dimensionamento otimizado, chegando a economias na ordem de \$ 3.298.153,04 quando o trecho T2 possui comprimento de 3.500 m.

Tabela 2 – Aumento do trecho T2 da rede Modelo

| T2 = 1.500 m | | T2 = 2.500 m | | T2 = 3.500 m | |
|-----------------------------|--------------------|-----------------------------|--------------------|-----------------------------|--------------------|
| Sem <i>Booster</i> | Com <i>Booster</i> | Sem <i>Booster</i> | Com <i>Booster</i> | Sem <i>Booster</i> | Com <i>Booster</i> |
| | 1.687.282,93 | | 1.687.282,93 | | 1.687.282,93 |
| | 2.154.209,48 | | 2.738.859,66 | | 3.323.509,69 |
| 6.884.268,23 | 3.841.492,41 | 7.596.606,95 | 4.426.142,59 | 8.308.945,66 | 5.010.792,62 |
| Economia de \$ 3.042.775,82 | | Economia de \$ 3.170.464,36 | | Economia de \$ 3.298.153,04 | |

A Tabela 3 apresenta a relação entre o dimensionamento da rede modelo sem *booster* e com *booster* à medida que a cota do nó N2 aumenta. As células hachuradas em azul correspondem ao custo total do dimensionamento da rede sem *booster*, e as células hachuradas em vermelho correspondem ao custo total do dimensionamento da rede com *booster* (soma-se rede modelo parte 1 com parte 2).

Como se pode observar na Tabela 3, a medida que a cota do nó N2 aumenta, mais vantajoso se torna a utilização do *booster* no processo de dimensionamento otimizado, chegando a economias na ordem de \$ 6.737.040,10 quando a cota do nó N2 é 90 mca.

Tabela 3 – Aumento da cota do nó N2 da rede Modelo

| Cota N2 = 50 mca | | Cota N2 = 70 mca | | Cota N2 = 90 mca | |
|-----------------------------|--------------------|-----------------------------|--------------------|-----------------------------|--------------------|
| Sem <i>Booster</i> | Com <i>Booster</i> | Sem <i>Booster</i> | Com <i>Booster</i> | Sem <i>Booster</i> | Com <i>Booster</i> |
| | 1.687.282,93 | | 1.687.282,93 | | 1.687.282,93 |
| | 2.421.048,81 | | 3.272.538,49 | | 4.124.028,01 |
| 8.297.403,36 | 4.108.331,74 | 10.422.877,20 | 4.959.821,42 | 12.548.351,04 | 5.811.310,94 |
| Economia de \$ 4.189.071,62 | | Economia de \$ 5.463.055,78 | | Economia de \$ 6.737.040,10 | |

Todos os menores custos dos dimensionamentos otimizados foram obtidos através da rede com *booster*. Diante dos valores apresentados nas Tabelas 1, 2 e 3, conclui-se que os custos obtidos com o dimensionamento da rede com *booster* se mostram mais viáveis em relação à terceira alternativa sugerida neste trabalho. Esta que por sua vez leva em consideração o custo da rede de tubulações mais o custo energético dos dois bombeamentos (primário e secundário).

As maiores economias comparando o dimensionamento das redes sem *booster* e com *booster* foram obtidas com o aumento da cota no nó N2 (ver Tabela 3). Foram verificadas grandes economias, como por exemplo, ao elevar a cota do nó N2 para 90 mca, onde a economia foi de \$ 6.737.040,10 no dimensionamento realizado na rede com *booster* em comparação com o dimensionamento da mesma rede sem a utilização do *booster*.

As melhores soluções foram obtidas nas redes com *booster*, pois elas proporcionaram os menores custos, assim como as pressões mais adequadas na rede e as menores alturas manométricas nos múltiplos bombeamentos.

CONCLUSÕES

Com o estudo de caso realizado neste trabalho pode-se determinar que quanto menores e mais adequadas as alturas manométricas (Hman) dos múltiplos bombeamentos, melhor será a distribuição das pressões na rede, evitando-se cargas elevadas, estas que por sua vez, propiciam maiores perdas reais de água e de energia. Tais aspectos estão diretamente relacionados à minimização do custo de implantação das tubulações e custo energético dos bombeamentos. A rede de distribuição de água que utiliza o *booster* na fase de projeto foi a que apresentou tais características.

O método desenvolvido neste trabalho representa uma importante alternativa para o dimensionamento econômico de redes de distribuição de água, tendo em vista que leva em consideração a otimização energética dos múltiplos bombeamentos. Portanto, os resultados alcançados no estudo de caso mostram viável a 3ª alternativa para condição de parada do algoritmo LenhsNet Toolkit. Os dimensionamentos realizadas e apresentadas neste trabalho, através do

software desenvolvido, demonstrou ser eficiente como ferramenta de apoio a decisão quanto a utilização ou não do *booster* em redes de distribuição de água.

BIBLIOGRAFIA

GOMES, H. P., S. T. M. BEZERRA, P. S. CARVALHO, e M. M. SALVINO. (2009). *Optimal dimensioning model of water distribution systems*. Water SA, vol.35, no.4, p.421-431.

GOMES, Heber Pimentel. (2009). *Sistema de Abastecimento de Água: Dimensionamento Econômico e Operação de Redes e Elevatórias*. 3ª (Revisada e Ampliada). João Pessoa, Paraíba: Editora Universitária.

MARQUES, Alfeu, e Joaquim José de Oliveira SOUSA. (2006). *Hidráulica Urbana: Sistemas de Abastecimento de Água*.

NBR12218. (1994). *Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público*. Rio de Janeiro/RJ : Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

ROSSMAN, Lewis A. (2009). *EPANET 2.0 - Manual do Usuário (Tradução e Adaptação)*. United States Environmental Protection Agency (EPA), Cincinnati, Ohio. Tradução: Heber Pimentel GOMES e Moisés Menezes SALVINO. Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento, Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

SNIS, Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. (2010). *Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos*. Relatório, Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental - SNSA, Brasília, 412.

TSUTIYA, M. T. (2001). *Redução do custo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água*. São Paulo/SP: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES.