

I-162 - DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA E OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA UTILIZANDO BOOSTERS**Roberta Macêdo Marques Gouveia**⁽¹⁾

Graduação e Mestrado em Ciência da Computação pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB); Doutoranda em Engenharia Mecânica pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba (PPGEM/UFPB); Pesquisadora do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS).

Heber Pimentel Gomes⁽²⁾

Engenheiro Civil e Mestre em Hidrologia pela UFPB. Doutor em Hidráulica pela Universidad Politécnica de Madrid. Professor do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental (Centro de Tecnologia da UFPB), professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental (PPGEUA) e Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM). Coordenador do LENHS.

Endereço^(1,2): LENHS 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.

RESUMO

Os projetos e manutenções de sistemas de distribuição de água envolvem altos custos para as entidades gestoras, por isso pesquisadores estudam meios de minimizar os desperdícios de água e energia elétrica. O presente trabalho propõe um método de dimensionamento de sistemas de distribuição de água levando-se em conta a otimização energética. O principal objetivo é minimizar os custos do sistema que é formado pelos trechos da rede, pela energia do bombeamento principal (altura manométrica do reservatório) e pela energia do bombeamento secundário, representado pelo *booster*. Os métodos de dimensionamento de redes existentes na literatura consideram apenas o custo de implantação das tubulações e o custo energético do bombeamento principal para o cálculo do custo total. Este trabalho consiste em acrescentar o bombeamento secundário no dimensionamento e, desta forma, apresentar o custo total do sistema de forma otimizada. Com esta forma de dimensionamento, a rede estará com pressões melhores distribuídas evitando-se cargas elevadas que propiciam maiores perdas reais de água e de energia. A fim de alcançar os objetivos propostos, a metodologia empregada neste trabalho compreende um algoritmo iterativo e dinâmico para realizar o dimensionamento otimizado de redes, denominado *LenhsNet Toolkit*. O mesmo utiliza o Toolkit de programação do simulador hidráulico Epanet 2.0. O modelo proposto é comprovado através de um estudo de caso, onde se compara o dimensionamento otimizado de uma rede com *booster* com o dimensionamento de uma rede que não utiliza o *booster*.

PALAVRAS-CHAVE: Dimensionamento, Redes de Distribuição de Água, Otimização, Eficiência Energética.

INTRODUÇÃO

A otimização dos sistemas de distribuição de água vem se tornando cada vez mais necessária, particularmente no que diz respeito ao projeto, implantação e manutenção dos mesmos, em virtude do aumento da demanda de água. Os altos custos envolvidos refletem a importância de se buscar meios de minimizar os desperdícios de água e energia. A ausência de atenção e aplicação de medidas eficazes por parte das prestadoras de serviços de saneamento propicia o desperdício de um dos maiores bens da humanidade: a água.

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, proporcionado

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).

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 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 geral do trabalho consiste em obter a solução ótima do dimensionamento considerando o bombeamento de origem e o do *booster*. 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 da rede de tubulações mais o custo energético da estação elevatória na origem, acrescido do custo energético do *booster*. Através da solução final do dimensionamento são obtidos os diâmetros otimizados de todos os trechos da rede e as alturas manométricas ótimas de bombeamento do sistema principal de impulsão e do *booster*. Os objetivos específicos são: implementação do algoritmo iterativo e dinâmico de otimização de redes de distribuição de água, onde o mesmo deve apresentar 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. As redes modelos, *benchmarks*, servem como testes e comparações para os diversos métodos de dimensionamentos presentes na literatura.

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 otimizada. 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 subsequentes 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 consequente 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 pode ser resolvido com 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 subsequente, 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

subsequente 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 subsequente.

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 custo do sistema corresponde apenas ao custo de implantação da rede de 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 (G_e), apresentado na Tabela 1. O G_e 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 (N_b) e do fator de atualização (F_a). A potência requerida depende da vazão requerida (Q) e do rendimento global do conjunto elevatório (η).

Tabela 1 - Fórmula do Gradiente Energético (G_e)

$G_e (\$/m) = P (\text{kW/m}) * T (\$/\text{kWh}) * N_b (\text{anual}) * F_a$	
$P(\text{kW/m}) = \frac{9,81 \times Q(\text{m}^3/\text{s})}{\eta (\text{decimais})}$	$F_a = \left[\frac{(1+e)^n - (1+i)^n}{(1+e) - (1+i)} \right] \times \left[\frac{1}{(1+i)^n} \right]$
A tarifa de energia elétrica (T) e o número de horas de bombeamento (N_b) são dados do projeto	

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 ($GP_{\text{ótimo}}$) com o Gradiente Energético (G_e) calculado, e não mais com a pressão mínima da rede como é feito na cota piezométrica fixa.

Enquanto o $GP_{\text{ótimo}}$ é menor que G_e , o custo de investimento para aumentar o diâmetro do trecho (e consequentemente 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 $GP_{\text{ótimo}}$ iguale ou supere o valor do G_e . 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, restando determinar o valor da cota piezométrica do reservatório. O cálculo para determinar a cota piezométrica de origem é feito da seguinte forma: soma o valor da pressão no nó mais desfavorável, em módulo, ao valor da pressão mínima determinada no projeto da rede. A cota piezométrica definitiva será configurada na rede, como sendo o nível de água do reservatório do sistema. Ao elevar o nível do reservatório, a pressão no nó mais desfavorável passa a ser o valor determinado no projeto.

O custo total do sistema consiste em somar o custo de implantação das tubulações com o custo atualizado da energia de bombeamento (GOMES, 2009). O custo das tubulações é determinado com base nos diâmetros dos trechos da última iteração, e é determinado pelo somatório da multiplicação dos seus respectivos comprimentos pelos custos unitários correspondentes. Para o cálculo do custo energético, faz-se necessário determinar a cota manométrica na origem. A cota manométrica na origem é obtida subtraindo-se da cota piezométrica na origem dimensionada anteriormente a cota do terreno neste ponto. Assim, o cálculo do custo da energia do sistema será o valor da cota manométrica multiplicada pelo Gradiente Energético (Ge).

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 do bombeamento principal mais o bombeamento secundário (através dos *booster*), 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 programa de dimensionamento implementado neste trabalho, nomeado *LenhsNet Toolkit*, é uma extensão e aprimoramento do *LenhsNet*, e traz algumas vantagens e novos recursos. 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.

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 dimensionar uma rede já conhecida na literatura, entretanto, a mesma foi ampliada, sendo acoplada a ela uma nova rede. Para isso, foi inserido um *booster* entre a rede original e sua sub-rede complementar. A modelagem de sistemas de distribuição de água utilizando *booster* se faz necessário quando se pretende fazer uma expansão na rede pressurizada de distribuição de água, a partir de um nó existente, para atender uma área que se encontra em uma cota, significativamente, superior a do nó existente ou distante de um ponto de impulsão. Segundo (TSUTIYA, 2004), o *booster* utilizado na adução de água é conhecido como *booster* em linha, pois o conjunto motor-bomba fica intercalado na tubulação, onde o mesmo recebe água a montante com uma determinada pressão e injeta-a a jusante com uma pressão mais elevada.

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 Figura 1 ilustra um exemplo de uma expansão em uma rede de distribuição de água utilizando *booster*. O nó 6 está situado na cota 112 m e deverá atender ao nó 12, situado na cota 125 m. Como a cota do nó 12 é, significativamente, superior à do nó 6, a pressão disponível da água no nó 6 não será suficiente para atender ao

nó 12, nas horas do dia de maiores demandas hídricas. Neste caso, é necessário dispor de um *booster* conectado ao nó 6 para pressurizar a água para o nó 12, nos horários de maiores demandas.

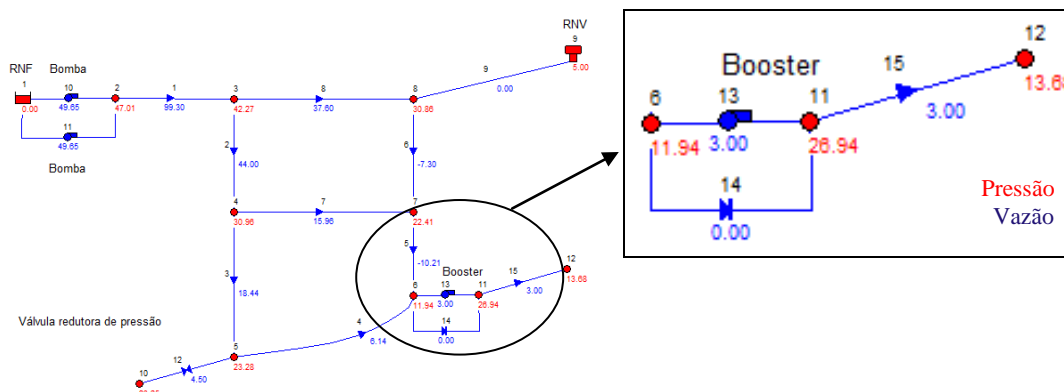
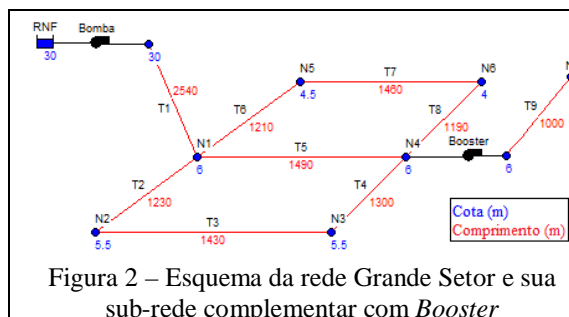


Figura 1 - Expansão em uma rede utilizando *booster*. Fonte: adaptado de (GOMES, 2009).

O dimensionamento da rede estudada é realizado através da configuração de projeto “cota piezométrica no bombeamento secundário”, e para isso são realizados dois procedimentos. O primeiro procedimento consiste em executar o dimensionamento utilizando a opção cota variável para a rede completa (rede original mais a sub-rede complementar). Já o segundo consiste em executar o dimensionamento utilizando a opção cota variável isoladamente para a rede original e sua sub-rede complementar. Em seguida comparam-se os resultados obtidos e verifica em qual situação o programa obteve a melhor solução, ou seja, a solução de menor custo.

RESULTADOS

A fim de simular e comparar o dimensionamento de uma rede de distribuição de água abastecida com *booster* (ver Figura 2) e sem o *booster* (ver Figura 3), utilizou-se a rede Grande Setor para o estudo de caso deste trabalho. A rede Grande Setor foi acoplada a uma nova rede a partir do nó 4, visando atender um ponto de consumo (nó 7) que se encontra em uma cota superior à do nó 4.



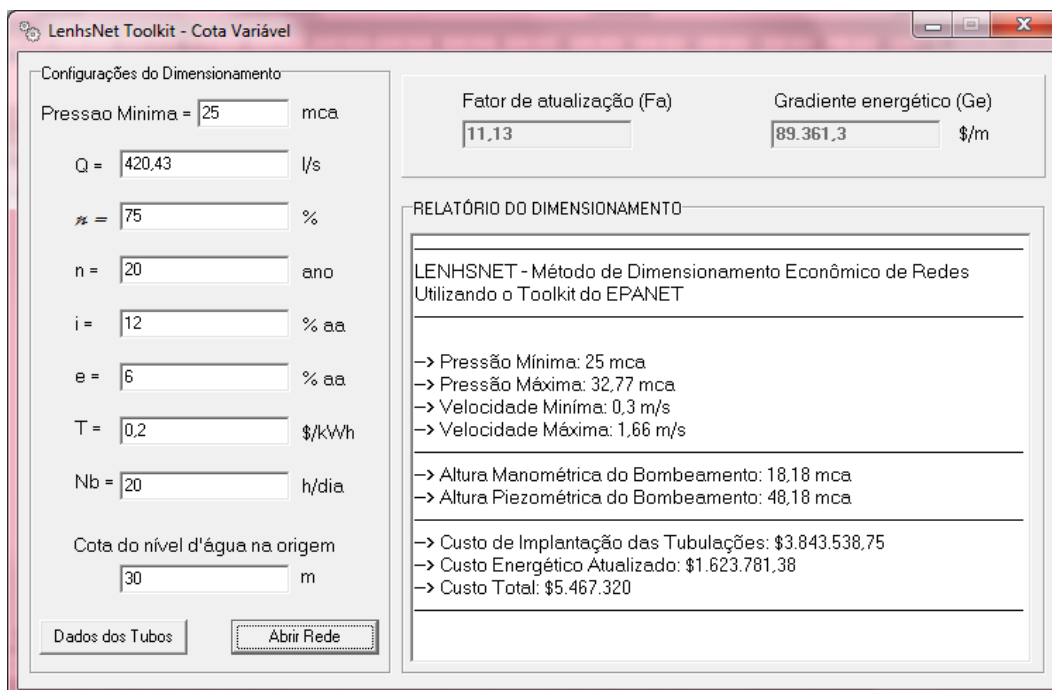


Figura 4 – Relatório final do dimensionamento da Rede Grande Setor e sub-rede complementar sem *Booster*.

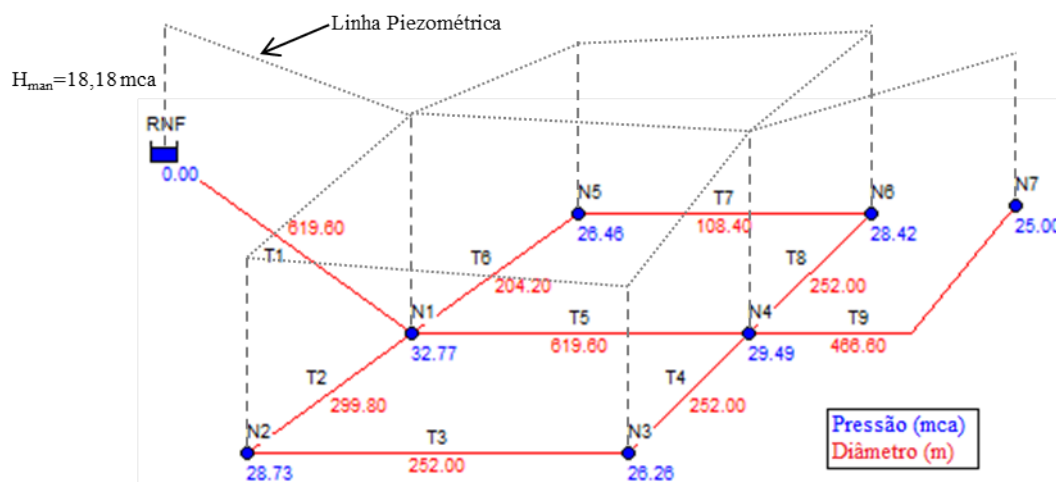


Figura 5 – Diâmetros ótimos da rede Grande Setor e sub rede complementar sem *Booster*.

A fim de comparar os resultados e determinar a melhor opção para o dimensionamento otimizado de redes abastecidas com *booster* ou sem *booster*, fez-se necessário realizar o dimensionamento, separadamente, da rede Grande Setor e sua sub-rede complementar.

A Figura 6 apresenta o relatório final do dimensionamento da rede Grande Setor sem a sub rede complementar. A mesma foi dimensionada através da opção Cota Variável do *LenhsNet Toolkit* e os dados do dimensionamento foram os mesmos utilizados no dimensionamento da rede acoplada (ver Figura 4). Conforme relatório do dimensionamento da rede Grande Setor, a altura ótima do bombeamento obtida foi de 11,64 mca. A carga hidráulica no nó 4 foi 32,7 mca. O custo total da rede Grande Setor sem a sub rede complementar foi de \$ 4.601.007,00. A Figura 7 ilustra os diâmetros ótimos de todos os trechos e as pressões em cada nó da rede em questão, sendo apresentada também a linha piezométrica.

LenhsNet Toolkit - Cota Variável

Configurações do Dimensionamento

Pressão Mínima = 25 mca

Q = 420,43 l/s

α = 75 %

n = 20 ano

i = 12 % aa

e = 6 % aa

T = 0,2 \$/kWh

Nb = 20 h/dia

Cota do nível d'água na origem
30 m

Dados dos Tubos Abrir Rede

Fator de atualização (Fa) 11,13

Gradiente energético (Ge) 89.361,3 \$/m

RELATÓRIO DO DIMENSIONAMENTO

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

→ Pressão Mínima: 25 mca
 → Pressão Máxima: 28,83 mca
 → Velocidade Mínima: 0,22 m/s
 → Velocidade Máxima: 1,39 m/s

→ Altura Manométrica do Bombeamento: 11,64 mca
 → Altura Piezométrica do Bombeamento: 41,64 mca

→ Custo de Implantação das Tubulações: \$3.561.043,5
 → Custo Energético Atualizado: \$1.039.963,31
 → Custo Total: \$4.601.007

Figura 6 – Relatório final do dimensionamento da rede Grande Setor.

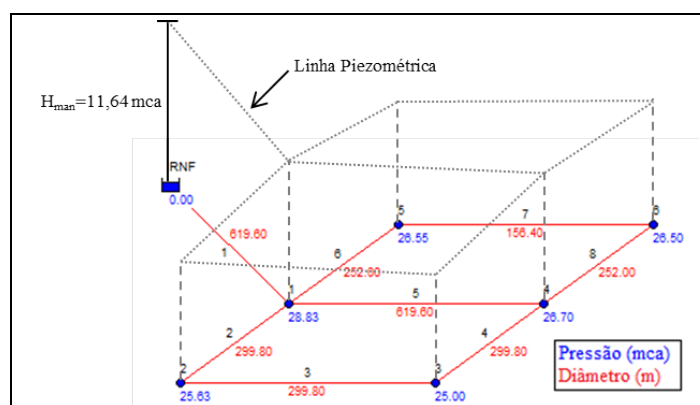
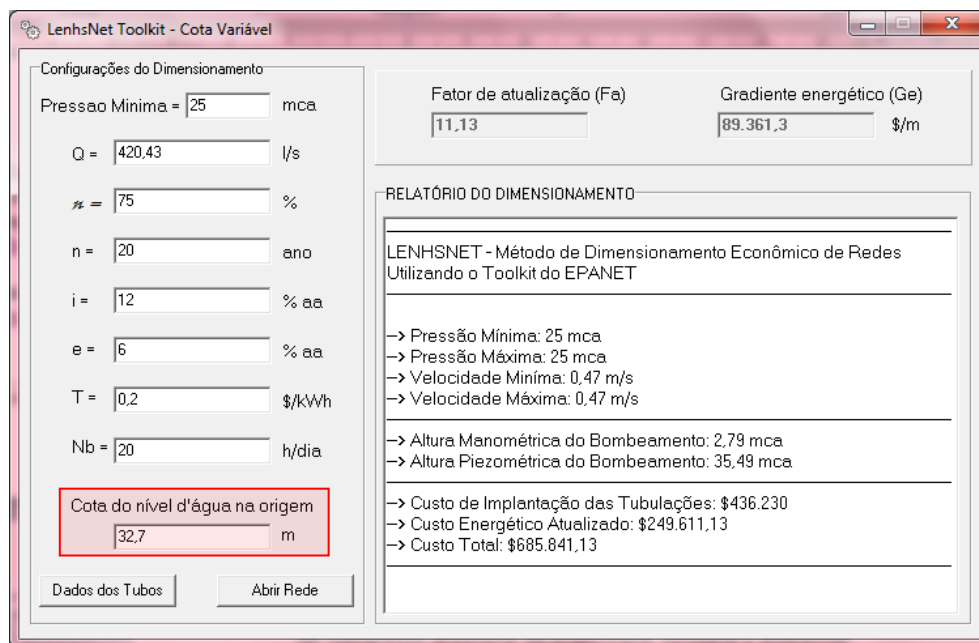


Figura 7 – Diâmetros ótimos da rede Grande Setor.

A Figura 8 apresenta o relatório final do dimensionamento referente à sub-rede complementar da rede Grande Setor. A mesma foi dimensionada através da opção Cota Variável do *LenhsNet Toolkit*. Nas configurações do dimensionamento, o que diferiu das simulações anteriores foi apenas o parâmetro “Cota do nível d’água na origem”, que para este caso foi de 32,7 m. Este valor foi obtido da carga hidráulica do nó 4, pois é o nó responsável pela junção da rede Grande Setor com a sua sub-rede complementar. Esta carga hidráulica corresponde à pressão de montante do *booster*, que pressurizará a água até o nó 8.

O relatório do dimensionamento, referente à sub-rede complementar da rede Grande Setor, apresentou uma altura manométrica ótima do bombeamento de 2,79 mca. A carga hidráulica no nó 8 foi de 35 mca e a pressão requerida de 25 mca. O custo total da sub-rede complementar à rede Grande Setor foi \$ 685.841,13. A Figura 9 apresenta os diâmetros ótimos de todos os trechos e as pressões em cada nó da rede em questão, assim como apresenta a linha piezométrica. O custo total da rede Grande Setor mais a sua sub-rede complementar foi \$ 5.286.848,13 (\$ 4.601.007,00 + \$ 685.841,13).



LenhsNet Toolkit - Cota Variável

Configurações do Dimensionamento

Pressão Mínima = 25 mca

Q = 420,43 l/s

n = 75 %

n = 20 ano

i = 12 % aa

e = 6 % aa

T = 0,2 \$/kWh

Nb = 20 h/dia

Cota do nível d'água na origem: 32,7 m

Fator de atualização (Fa): 11,13

Gradiente energético (Ge): 89.361,3 \$/m

RELATÓRIO DO DIMENSIONAMENTO

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

→ Pressão Mínima: 25 mca
 → Pressão Máxima: 25 mca
 → Velocidade Mínima: 0,47 m/s
 → Velocidade Máxima: 0,47 m/s

→ Altura Manométrica do Bombeamento: 2,79 mca
 → Altura Piezométrica do Bombeamento: 35,49 mca

→ Custo de Implantação das Tubulações: \$436.230
 → Custo Energético Atualizado: \$249.611,13
 → Custo Total: \$685.841,13

Dados dos Tubos Abrir Rede

Figura 8 – Relatório final do dimensionamento da sub-rede complementar à rede Grande Setor.

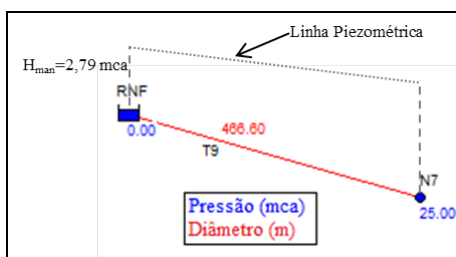


Figura 9– Diâmetros ótimos da sub-rede complementar à rede Grande Setor.

Ao comparar os resultados do dimensionamento da rede acoplada (Grande Setor e sua sub-rede complementar) com os resultados da rede desacoplada pode-se observar que a altura manométrica do bombeamento baixou de 18,18 mca para 11,64 mca (rede Grande Setor) e 2,79 mca (sub-rede complementar), o que implica na diminuição do custo de implantação das tubulações e custo energético atualizado para o sistema desacoplado. Desta forma, quanto menor a altura manométrica, melhor será a distribuição das pressões na rede. E quanto mais adequada é a distribuição das pressões na rede, menores são as perdas reais de água.

Portanto, verificou-se que no dimensionamento da rede particionada houve uma economia de \$ 180.471,87, proporcionando uma redução de custo de 3,3%, se comparado ao dimensionamento da rede acoplada. Os resultados alcançados se mostram viáveis em relação à terceira alternativa sugerida neste trabalho para obtenção do custo ótimo do dimensionamento, esta que por sua vez leva em consideração o custo da rede de tubulações mais o custo energético da estação elevatória, acrescido do custo energético do *booster*.

CONCLUSÕES

As simulações realizadas e apresentadas neste trabalho, através do programa desenvolvido, denominado *LenhsNet Toolkit*, mostram a viabilidade de sua aplicação. O mesmo demonstrou ser eficiente como ferramenta de auxílio à tomada de decisão, haja vista que realiza o dimensionamento otimizado de redes de distribuição com deficiência de vazão e pressão nos pontos de consumo, de maneira que a solução encontrada proporciona o menor custo de investimento e operação.

A metodologia de dimensionamento e otimização de sistemas de distribuição de água proposta por este trabalho foi implementada através do Epanet Programmer's Toolkit, que consiste de um conjunto de funções pré-definidas para resolver as equações hidráulicas e de qualidade de água na simulação de redes pressurizadas

do software Epanet. Visando a usabilidade da metodologia proposta, o *LenhsNet Toolkit* foi desenvolvido através de uma interface gráfica simplificada e de fácil utilização, a fim de apresentar o resultado do dimensionamento de forma clara e intuitiva para o usuário. Como saída do programa é gerado um relatório com o resultado da rede dimensionada. Neste relatório constam os diâmetros finais dos trechos, os valores da pressão máxima e mínima; a velocidades máxima e mínima; os custos de implantação e os custos energéticos da rede de distribuição de água.

O método desenvolvido e apresentado neste trabalho representa uma importante alternativa para o dimensionamento econômico de redes de distribuição de água, levando-se em conta a otimização energética do sistema de bombeamento primário e secundário.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALEGRE, H., et al. 2006. Performance Indicators for Water Supply Services. s.l. : IWA, 2006.
2. GOMES, H. P., S. T. M. BEZERRA, P. S. CARVALHO, e M. M. SALVINO. "Optimal dimensioning model of water distribution systems." *Water S. A.*, 2009: 421-432.
3. GOMES, Heber Pimentel. Sistema de Abastecimento de Água: Dimensionamento Econômico e Operação de Redes e Elevatórias. 3ª (Revisada e Ampliada). João Pessoa, Paraíba: Editora Universitária, 2009.
4. GOMES, H. P., GARCÍA, Rafael Pérez e REY, Pedro L. Iglesias. 2007. Abastecimento de Água - O estado da arte e técnicas avançadas. 1ª edição. João Pessoa/PB : Editora Universitária, 2007. p. 386.
5. LOPES, A. V. 2002. Otimização do dimensionamento e análise de confiabilidade de redes de distribuição de água. Universidade de Brasília. Brasília/DF : s.n., 2002. p. 148, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental).
6. MARCKA, Estanislau, SILVA, Ricardo Toledo e CONEJO, João Gilberto Lotufo. Revisão 2004. Indicadores de Perdas nos Sistemas de Abastecimento de Água. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, PNCDA - Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água. Revisão 2004. DTA A2 - Documento Técnico de Apoio.
7. MARQUES, Alfeu, e Joaquim José de Oliveira SOUSA. Hidráulica Urbana: Sistemas de Abastecimento de Água. 2006.
8. NBR12218. 1994. Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público. Rio de Janeiro/RJ : Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 1994.
9. ROSSMAN, Lewis A. 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), 2009.
10. SNIS, Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. "Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos." Relatório, Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental - SNSA, Brasília, 2010, 412.
11. TSUTIYA, M. T. Abastecimento de Água. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004.
12. TSUTIYA, M. T. Redução do custo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água. São Paulo/SP: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental - ABES, 2001.
13. WALSKI, Thomas M., et al. 2003. Advanced Water Distribution Modeling and Management. Waterbury, CT, USA : Hasted Press, 2003. p. 800.