

OTIMIZAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA USANDO A METODOLOGIA DE MORGAN E O EPANET

Marco Aurélio Holanda de Castro¹ e Luis Henrique Magalhães Costa¹

Resumo – Várias metodologias surgiram ao longo dos últimos 30 anos, no sentido de obter um dimensionamento econômico ótimo das redes de distribuição de água. Tais redes constituem relevante importância nos grandes setores da sociedade, pois abastecem pontos de consumo como residências, indústrias, comércios, hospitais, etc. Neste trabalho, objetivou-se estudar uma metodologia para a otimização de redes de abastecimento de água apresentada por Morgan & Goulter (1985), onde se formula um problema de programação linear aliado ao software de dimensionamento hidráulico EPANET. Tal metodologia pode ser aplicada ao dimensionamento de novas redes, assim como na expansão das já existentes, respeitando as exigências estabelecidas pelas normas técnicas vigentes. Com isso, consegue-se efetuar a implantação de uma rede de abastecimento a um custo mínimo.

Abstract – Several methodologies intended to optimize water distribution networks were presented in the last 30 years. Such networks are extremely important since they make clean water available to domestic, industrial, business and health use. The main objective of the present work is study and propose a optimization methodology based on linear programming which was first proposed by Morgan and Goulter in 1985 associated to the public domain hydraulic software EPANET. Such methodology may be applied to new water distribution networks as well as to expansions of already built networks, once technical and regulation requirements are met. The final and important goal is to obtain a network for which we have the diameters of the pipes and elevations of the tanks which we obtain the minimum cost once the hydraulic requirements are met (minimum pressure, maximum head loss, etc).

Palavras-chave: otimização, redes de distribuição, EPANET.

¹Universidade Federal do Ceará – Campus do Pici – Centro de Tecnologia – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental – Fortaleza – CE CEP: 60451-970 Fone: 0xx85-2889623 Fax: 0xx85-2889627 E-mail: marco@ufc.br ; lhenriquemc@secrel.com.br

INTRODUÇÃO

Um grande número de pesquisas tem-se realizado na área de otimização de redes de distribuição de água, cujo objetivo principal é encontrar o sistema de menor custo e que atenda aos requerimentos hidráulicos de vazão e pressão nos pontos de consumo. As redes supracitadas também representam uma grande parcela sobre o custo de implantação de sistemas públicos de abastecimento de água.

Existe uma aparente exigência nos projetos de rede de distribuição de água no tocante às considerações cobradas pelas normas técnicas. Tais critérios objetivam uma perfeita funcionalidade do sistema, assim como a manutenção de um padrão de qualidade relativamente uniforme nos diversos pontos da rede.

A realização deste trabalho visa apresentar um estudo sobre a metodologia de otimização em redes de distribuição de água apresentado por Morgan & Goulter (1985). Tal metodologia ocorre em dois estágios: a simulação e obtenção dos parâmetros hidráulicos através do software de domínio público EPANET e os ajustes dos diâmetros por meio da programação linear, objetivando um menor custo.

Diversos critérios e parâmetros devem ser considerados nos processos de desenvolvimento de redes de distribuição de água, principalmente por conta da complexidade desses sistemas de distribuição. Vários desses critérios são utilizados com a finalidade de simplificar o estudo para o dimensionamento, de acordo com as considerações a seguir:

1. O sistema deve garantir uma determinada pressão em nós específicos da rede, mesmo quando uma das ligações não estiver em funcionamento. Dessa forma, pelo menos dois caminhos independentes desde a fonte de abastecimento até um determinado nó devem ser considerados.
2. O método deve ser aplicado tanto para novos modelos como para expansão dos modelos já existentes.
3. O método deve incorporar funções de custos reais que utilizem valores unitários de seus componentes dados por fornecedores da área.
4. O fluxo na rede é considerado permanente, sendo as vazões calculadas para as condições críticas.

METODOLOGIA

O desenvolvimento da metodologia é baseado na formulação de um problema de programação linear unido a um procedimento de equilíbrio hidráulico na rede, visando garantir a consistência hidráulica. A programação linear é utilizada para modificar os diâmetros das tubulações visando um menor custo, enquanto que a utilização do EPANET nos fornece as variáveis hidráulicas como vazões e pressões. Tais processos ocorrem em fases distintas.

A partir de uma configuração inicial de dimensões das tubulações, vazões e pressões são obtidas através do EPANET. Em seguida utiliza-se a programação linear para determinar os novos diâmetros. Nesta etapa, o procedimento de otimização tenta reduzir o diâmetro das tubulações, mantendo o equilíbrio hidráulico. A nova configuração é repassada ao EPANET para obter novas vazões e pressões. O processo é repetido até que os ajustes dos diâmetros aplicados às novas vazões e pressões sejam o adequado à solução ótima. A Figura 1 demonstra o esquema do método proposto.

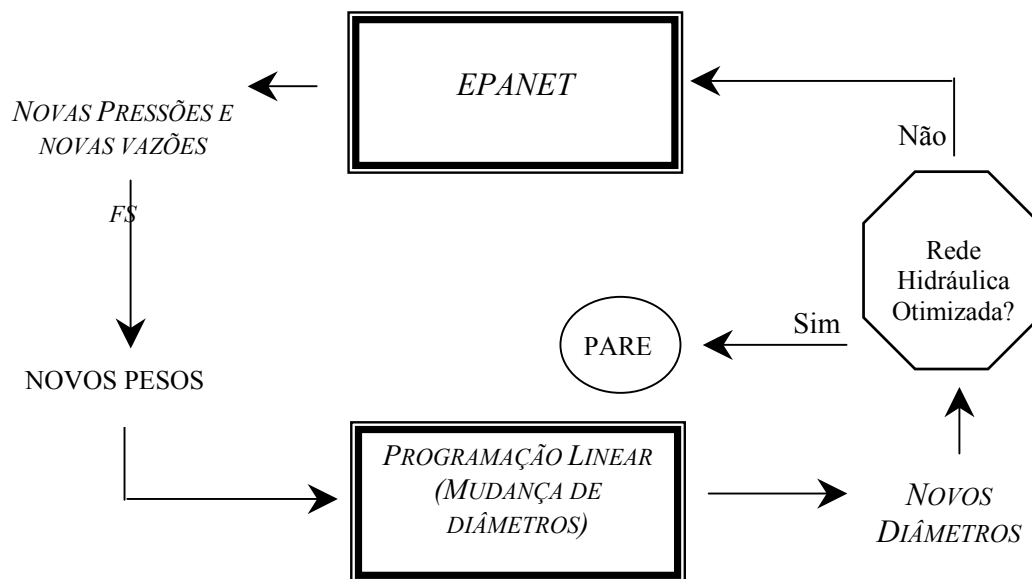


Figura 1 – Esquema da Metodologia Proposta.

Formulação da Programação Linear

Função Objetivo:

$$\text{Minimizar } \sum_{j=1}^{NL} (K_{jdr} X_{jdr} + K_{jds} X_{jds}) \quad (1)$$

Onde:

K_{jdr} – custo unitário de reposição do tubo no trecho j , de diâmetro d para um diâmetro maior representado por r , portanto: $K_{jdr} = C_r - C_d > 0$,

K_{jds} - custo unitário de reposição do tubo no trecho j , de diâmetro d para um diâmetro menor representado por s , $K_{jds} = C_s - C_d < 0$,

C_d – custo unitário do tubo de diâmetro d ;

C_r - custo unitário do tubo repostado de diâmetro maior r ,

C_s – custo unitário do tubo repostado de diâmetro menor s ;

X_{jdr} e X_{jds} – Variáveis de decisão, representam o comprimento do tubo de diâmetro d , a ser substituído pelo tubo de diâmetro r ou s , respectivamente;

NL – representa o número de ligações.

Restrições:

A fim de assegurar o equilíbrio hidráulico da rede, algumas restrições foram inseridas no modelo da programação linear, como segue:

1. Restrição de Pressão

Estas restrições mantêm as exigências mínimas de pressão em cada nó.

$$\sum_{j \in Pi}^{N_{tubos}} (W_{ij} G_{jdr} X_{jdr} + W_{ij} G_{jds} X_{jds}) \leq H_i - h_i \quad \forall i \quad (2)$$

Onde:

W_{ij} – Peso atribuído ao trecho j em relação aos seus efeitos no nó i . Para cada restrição, os trechos j assumem pesos diferentes, pois suas influências são específicas para cada nó. Uma descrição completa do **Algoritmo dos Pesos** é demonstrada posteriormente.

G_{idr} – variação no gradiente hidráulico, no trecho j , causado pela substituição do comprimento unitário do tubo d pelo tubo de diâmetro maior r .

$$G_{idr} = J_{jr} - J_{jd} \dots < 0$$

G_{ids} – variação no gradiente hidráulico, no trecho j , causado pela substituição do comprimento unitário do tubo d pelo tubo de diâmetro maior s .

$$G_{ids} = J_{js} - J_{jd} \dots > 0$$

J_{jd}, J_{jr}, J_{js} – perda de carga unitária, em m/m, para os tubos no trecho j , de diâmetros d, r e s , respectivamente.

P_i – Conjunto de caminhos da fonte ao nó i . Cada trecho deve ser contado somente uma vez.

H_i – Carga piezométrica mínima admissível

h_i – Carga piezométrica inicial

2. Restrição de Comprimento.

As restrições de comprimento asseguram que o tubo a ser trocado não terá o comprimento maior que o existente.

$$X_{jdr} \leq L_j$$

$$X_{jds} \leq L_j$$

Onde L_j é o comprimento da ligação j . Se a ligação a ser substituída compuser dois trechos de diâmetros diferentes, os comprimentos aptos a serem repostos devem ser menores ou iguais ao comprimento existente em cada ligação.

$$X_{jdr} \leq l_{1j}$$

$$X_{jds} \leq l_{2j}$$

Onde L_{1j} e L_{2j} são os comprimentos de menor e maior diâmetro a serem substituídos, respectivamente. Pode-se considerar a seguinte restrição para cada ligação:

$$l_{1j} + l_{2j} = L_j \quad \forall j \quad (3)$$

DISCUSSÃO DA FORMULAÇÃO

As novas vazões que serão calculadas, através do EPANET, após as devidas variações nos diâmetros das tubulações ocorridas na programação linear serão utilizadas para determinar os novos pesos das ligações. A nova configuração é repassada à técnica da programação linear, formando um processo iterativo, até alcançar a solução ótima.

O critério utilizado pela programação linear para modificar as ligações da rede funciona da seguinte forma: se as pressões, em algum nó, estiverem inferior ao mínimo permissível, a tubulação deverá ser substituída por outra de maior diâmetro. Ao contrário, quando as pressões estiverem acima do mínimo permitido serão substituídas por outra de diâmetro menor.

Percebe-se que ao longo do processamento, existem constantes reduções nos diâmetros das ligações em relação ao inicialmente assumido. Apesar disso, não há capacidade, por parte da programação linear, de eliminar, permanentemente, diâmetros que não ofereçam grandes vantagens econômicas.

Dentro desta perspectiva, há uma determinação de pesos para cada uma das ligações da rede, e tais pesos são utilizados nas restrições de pressão. A tubulação com o peso inferior a um valor estipulado poderá ser removida da rede, em cada processamento, de acordo com as definições do projetista e as vazões serão obtidas através do EPANET. Por exemplo, pode-se adotar a prática da eliminação de um tubo com peso inferior a 0,5.

A existência de pequenos pesos em uma ligação denota pequena influência sobre as vazões e pressões em cada nó, fazendo com que a adoção deste critério permita que ocorra a remoção de tal ligação. Ao iniciar, o processo de otimização é facultado também para que o projetista indique, com sua sensibilidade, qual peso deverá ser adotado como referência, para que, qualquer trecho que tenha valor inferior a este, seja eliminado.

Portanto, a partir do momento em que a programação linear não consegue optar em substituir qualquer parte da rede e o peso mínimo em qualquer ligação é maior que um valor antecipadamente especificado, dessa forma, obtém-se a otimização.

Quando a otimização de uma solução é encontrada, nenhuma restrição de comprimento será violada. O motivo que se observa é o das restrições de comprimento terem como base as variáveis de decisão X_{jds} e X_{jdr} , onde estas não representam os comprimentos atuais das ligações na rede, mas os comprimentos das ligações que poderão ser substituídos para se ter uma solução que ofereça um custo menor. Quando se alcança a otimização, não ocorrem substituições nas tubulações da rede e as variáveis X_{jds} e X_{jdr} apresentam valores iguais a zero, além do que tais restrições de comprimento

não serão utilizadas, mas serão necessárias inicialmente quando a primeira solução encontrar-se longe da ótima.

A diferença entre este modelo e outros que já foram publicados para a análise de sistemas de redes malhadas, é que durante o processo de otimização não ocorrem restrições que assegurem que as perdas em cada ciclo sejam iguais a zero. Tal fato ocorre, pois o procedimento de otimização acontece em fases distintas em relação ao método de obtenção das variáveis hidráulicas (EPANET).

A cada iteração a programação linear tende a variar o diâmetro das tubulações, alterando as vazões e, com isso, tornando o sistema hidraulicamente inconsistente.

Portanto, uma solução ótima é obtida a partir do momento em que a função objetivo é igual a zero, pois não verifica-se ocorrências de modificações na configuração da rede. Dessa forma, atinge-se um dimensionamento econômico ótimo.

ALGORITMO DOS PESOS

Para cada restrição de pressão, um peso é atribuído a cada ligação j referente ao nó i , sendo representada por W_{ij} . A equação que se utiliza para determinar W_{ij} é representada da seguinte maneira:

$$W_{ij} = W_j = (Q_j/I_m) \times W_m$$

onde,

Q_j – fluxo na ligação j ;

I_m – representa a soma das vazões que chegam ao nó m ;

W_m – peso do nó imediatamente a jusante da ligação j .

Pode-se também dizer que o peso do nó m pode ser calculado por:

$$W_m = \sum_{j \in B} W_j$$

onde B representa o conjunto de vazões que saem do nó m .

Para a demonstração do cálculo dos pesos faz-se a exemplificação abaixo, onde as vazões, em cada ligação, foram obtidas através do método de Hardy-Cross.

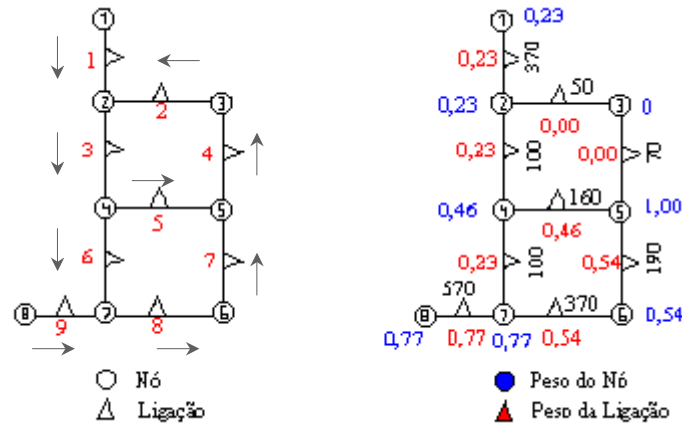


Figura 2 - Exemplo do cálculo dos pesos na rede.

No referido exemplo, a equação de restrição no nó 5 será desenvolvida. Inicialmente, o peso das ligações a montante do nó 5 é calculado. A vazão total que chega ao nó 5 através das ligações 5 e 7 é igual a 350 (160 + 190), onde 160 refere-se à ligação 5 e 190 à ligação 7. Portanto:

$$W_5 = (160/350) \cdot 1 = 0,46$$

$$W_7 = (190/350) \cdot 1 = 0,54$$

Estes pesos são associados aos nós a montante das ligações, isto é, nós 4 e 6. Portanto, os mesmos receberão, respectivamente, os pesos com valores: 0,46 e 0,54.

Seguindo este princípio, há uma contribuição da ligação 8 com 100% da vazão para o nó 6 via nó 7. O nó 8 recebe então o seguinte peso:

$$W_8 = 1 \cdot (0,54) = 0,54.$$

A ligação 3 contribui com 50% do fluxo para o nó 4, portanto:

$$W_3 = (0,5) \cdot (0,46) = 0,23.$$

Da mesma forma tem-se:

$$W_6 = (0,5) \cdot (0,46) = 0,23.$$

O fluxo do nó 5 para o nó 7 percorre dois caminhos diferentes. O peso no nó 7 representa a soma de W_6 e W_8 :

$$W_7 = (0,23) + (0,54) = 0,77.$$

As ligações 2 e 4 não exercem influência sobre o nó 5, pois nenhum fluxo que chegue a este nó passa por tais ligações. Sendo assim, W_2 e W_4 têm pesos iguais a zero.

Pode-se observar que a soma dos pesos dos trechos imediatamente a jusante dos reservatórios tem valor igual a 1, confirmando um correto balanceamento hidráulico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL, Paulo Sérgio S. do, **Otimização de redes de Distribuição de Água - Análise e Implementação da Metodologia de Morgan**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) UFC, Fortaleza, 1998

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, **EPANET 2.0 em Português - Manual do Utilizador**, LNEC.Lisboa 2002

MACULAN FILHO N., PEREIRA M. V. F. **Programação linear**, Atlas, São Paulo, 1980.

MORGAN, D.R.;GOULTER, I.C. **Optimal Urban Water Distribution Design. Water Resource Research**, v.21, n.5, p.642-652, 1985.

MORGAN, D. R. **Optimal Urban Water Distribution Design**. Manitoba, CA 1983. 177p. Dissertação University of Manitoba, 1983.