

## REABILITAÇÃO DE REDES RAMIFICADAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA CONSIDERANDO A OTIMIZAÇÃO DA ENERGIA DE BOMBEAMENTO

Saulo de Tarso Marques Bezerra<sup>1</sup> e Heber Pimentel Gomes<sup>2</sup>

**Resumo:** Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um método de otimização econômica, que tem como objetivo a reabilitação de redes ramificadas de distribuição de água para sistemas pressurizados, podendo ser aplicado em sistemas urbanos de abastecimento, de irrigação pressurizada, redes de combate a incêndio etc, que se encontram com deficiência de vazão e pressão nos pontos de tomada de água. O método de otimização se baseia em um modelo de programação dinâmica, que seleciona, a cada passo, as possibilidades de modificação dos diâmetros das tubulações e/ou da altura manométrica de bombeamento, de forma a minimizar o custo de investimento e energético da reabilitação, proporcionando como resposta, os diâmetros a serem modificados da rede de distribuição, as pressões disponíveis e a altura manométrica ótima de bombeamento, de modo que o custo conjunto, de investimento (intervenção física da rede) e de operação (custo atualizado da energia) do sistema de abastecimento, seja o mínimo possível. O método foi testado para um exemplo de uma rede de distribuição pressurizada, no qual existe deficiência de pressão nos pontos de consumo.

**Abstract:** This work presents the development of an economic optimization method that aims at the rehabilitation of water distribution branched networks, pressurized irrigation, fire extinguishing networks etc, that have a deficiency in flow and pressure in some points of consume. The optimization method has been based on a dynamic programming model that selects, step by step, the possibilities of changing the pipe diameters and/or pumping manometric height, objectifying the minimization of the investment and energetic cost in the rehabilitation. The method provides the diameters to be modified in the distribution network, the available pressures and the best pumping manometric height, in way that the joint cost, investment (physical intervention in the network) and pumping operation (up-to-date energy cost) of the water distribution system be the possible minimum. The method was tested for an example of a pressurized distribution network, in which there is a pressure deficiency in the points of consume.

**Palavras-chave:** otimização, altura manométrica de bombeamento, reabilitação.

---

<sup>1</sup> Mestrando do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande, PB, Brasil, CEP 58109-110, e-mail: [saúlodetarso\\_civil@yahoo.com.br](mailto:saúlodetarso_civil@yahoo.com.br).

<sup>2</sup> Professor do Departamento de Tecnologia da Construção Civil, CT/UFPB. 58050-900, João Pessoa, PB, Brasil, e-mail: [heber@lrh.ct.ufpb.br](mailto:heber@lrh.ct.ufpb.br).

## INTRODUÇÃO

As redes de distribuição constituem uma parte importante dos sistemas públicos de abastecimento de água, em função dos custos elevados para a sua implantação, manutenção e operação. GOMES (2004) as define como sendo o conjunto de tubulações, conexões e peças especiais, destinada a conduzir água em quantidade, qualidade e pressão suficientes para o abastecimento dos diversos pontos de consumo (uso doméstico, industrial e público).

Para um sistema de distribuição de água ser bem projetado, ele dependerá essencialmente do traçado das tubulações, da posição do(s) reservatório(s) elevado(s), o(s) tipo(s) de material(is) utilizado(s), a escolha adequada dos diâmetros dos trechos, peças e acessórios. Porém, mesmo que o projeto atenda inicialmente a todos os requisitos desejados, provavelmente ocorrerão situações que não foram consideradas no projeto original, tais como: 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, que poderão comprometer o desempenho do sistema ao longo de sua vida útil.

As redes de abastecimento existentes no Brasil e no mundo possuem idades que variam desde as recém implantadas até sistemas com dezenas de anos. Neste aspecto é de se esperar que comecem a apresentar problemas de operação, principalmente aqueles relacionados com perdas físicas de água, rompimentos de tubulações, como também o consumo excessivo de energia elétrica derivado da falta de otimização operacional eletromecânica dos bombeamentos. Os problemas de operação são refletidos no desempenho, no que diz respeito à qualidade do abastecimento - vazões e pressões insuficientes nos pontos de consumo, interrupções no fornecimento de água etc - como também a aspectos econômicos - custos elevados de energia, de reparação e de manutenção dos equipamentos. De acordo com BARBOSA & VENTURINI (2002) a importância da reabilitação está intimamente ligada à diminuição do custo operacional, aumentando a segurança e a confiabilidade dos serviços prestados.

Os altos custos despendidos com a energia elétrica refletem a importância de se buscar meios de diminuir os desperdícios tão comuns. BRAILEY & JACOBS (1980) relatam que em torno de 7% da energia elétrica consumida nos Estados Unidos é utilizada pelas empresas de saneamento. TSUTIYA (2001) afirma que os gastos com energia elétrica nas empresas de saneamento básico se constituem em um dos itens mais importantes no orçamento das despesas de exploração, sendo que nos sistemas de distribuição de água, a energia consumida pelas elevatórias representa cerca de 90% do custo total de energia elétrica consumida pelo sistema. Segundo ALLIANCE (2002), o consumo de energia na maioria dos sistemas de água em todo o mundo poderia ser reduzido em pelo menos

25% por meio de ações de eficiência. As companhias de água em todo o mundo têm o potencial para, com um custo efetivo, economizar mais energia do que a utilizada anualmente em toda a Tailândia.

Devido aos fatores apresentados, a análise da reabilitação das redes de distribuição de água deve buscar uma solução mais ampla, que englobe junto com as intervenções físicas, medidas voltadas para a otimização econômica dos sistemas de bombeamento. Os métodos de reabilitação tradicionais têm a particularidade de utilizar, em suas metodologias, a condição da cota de alimentação fixa, ou seja, não buscam a altura piezométrica de cabeceira ideal (ótima) para os sistemas de distribuição.

Neste trabalho é apresentado um método de reabilitação de redes ramificadas de distribuição de água considerando a otimização da energia de bombeamento, ou seja, a cota piezométrica de cabeceira variável; podendo também ser aplicado a redes malhadas, desde que estas sejam transformadas em ramificadas.

## METODOLOGIA

A metodologia empregada neste trabalho se baseia em uma programação dinâmica e se divide em duas etapas. A primeira consiste na determinação da solução inicial, no qual a rede será composta pelos seus diâmetros originais, submetidos às novas vazões de projeto. Em consequência do aumento das vazões ocorrem perdas de carga maiores do que as consideradas no projeto original, fazendo com que o sistema requeira uma maior pressão de distribuição. Esta pressão, necessária para alimentar a rede com as novas demandas do projeto, será representada por uma cota piezométrica de cabeceira inicial, que é uma condição de contorno do método. A segunda etapa compreende uma sequência de iterações, na qual diminui-se paulatinamente (a partir da solução inicial) a cota piezométrica de alimentação e obtém-se, para cada decréscimo desta cota, um novo custo de reabilitação da rede de distribuição, decorrente da substituição das tubulações antigas por novas de maiores diâmetros. O processo iterativo termina quando se alcança a cota de cabeceira ótima.

O algoritmo utilizado para a determinação da solução inicial pode ser sintetizado:

- Cálculo da carga hidráulica fictícia (CHf) de cada nó, que é igual à cota do terreno, mais as perdas de carga a montante do nó, mais a pressão requerida neste ponto;
- Determinação da cota de cabeceira fictícia inicial, que corresponderá ao valor da carga hidráulica fictícia máxima ( $CHf_{max}$ ).

De posse da solução inicial, inicia-se a segunda etapa do método. Esta consiste na execução de um processo iterativo de operações que reduz gradualmente a cota piezométrica de alimentação com o mínimo acréscimo de custo da rede.

Para determinar a intervenção ou modificação em uma determinada tubulação da rede, que provoque o menor aumento de custo, utilizar-se-á o conceito de *Gradiente de Câmbio* desenvolvido por Granados (1990). O gradiente de câmbio de determinado trecho da rede corresponde ao acréscimo de custo produzido pela substituição de seu diâmetro pelo nominal consecutivo superior, relacionado com a diminuição da perda de carga correspondente. Representa o custo marginal da diminuição da perda de carga, alcançada em um trecho determinado, mediante a substituição do seu diâmetro pelo consecutivo superior, e é expresso por:

$$C = \frac{P_2 - P_1}{hf_1 - hf_2} \quad (1)$$

em que:

$P_1$  - custo total da tubulação do trecho com o diâmetro  $D_1$ ;

$P_2$  - custo total da tubulação do trecho com o diâmetro consecutivo superior  $D_2$ ;

$hf_1$  - perda de carga no trecho com o diâmetro  $D_1$ ; e

$hf_2$  - perda de carga no trecho com o diâmetro consecutivo superior  $D_2$ .

Para reduzir a cota piezométrica de alimentação da rede é necessário diminuir as perdas de carga que ocorrem na ou nas artérias mais desfavoráveis do sistema de distribuição de água. Em termos de diminuição da perda de carga, com o objetivo de baixar a cota de alimentação, é indiferente que essa diminuição se produza em qualquer trecho da artéria mais desfavorável. Como se pretende baixar a cota, com o menor acréscimo de custo, a diminuição da perda de carga (ou o aumento do diâmetro da tubulação) deve ocorrer no trecho, cuja mudança de diâmetro proporciona um menor aumento de custo da rede, por unidade de altura de carga. Assim sendo, para se baixar a cota de cabeceira da rede, com o menor acréscimo de custo da mesma, deve-se aumentar o diâmetro do trecho de menor gradiente de câmbio (trecho ótimo), pertencente à artéria mais desfavorável, substituindo o diâmetro inicial  $D_1$ , correspondente ao trecho ótimo ( $T^*$ ) da situação atual, por seu consecutivo superior  $D_2$ . Obtém-se assim, uma melhora na perda de carga do trecho ótimo ( $\Delta hf$ ) igual à diferença entre as perdas de carga que ocorrem em  $T^*$ , relativas aos diâmetros  $D_1$  e  $D_2$ .

$$\Delta h_f = h_{f1} - h_{f2} \quad (2)$$

A figura 1 mostra o esquema das linhas piezométricas de uma rede de distribuição de água, com insuficiência de pressão no ponto de consumo mais desfavorável, em três situações distintas: situação antes da proposta de reabilitação do sistema, na solução inicial do método (rede com a cota de cabeceira fictícia inicial) e na solução definitiva (rede com a configuração ao final da avaliação). Na situação do projeto original (linha piezométrica tracejada) nota-se que apenas nos nós 1, 4 e 8 a pressão disponível atende à requerida. Na solução inicial do método, há um acréscimo em toda a linha piezométrica da rede (linha piezométrica pontilhada), de maneira que no nó ou nós mais desfavoráveis da rede a pressão disponível seja igual à requerida. Já na solução definitiva (linha piezométrica cheia), a cota de cabeceira proporciona o custo mínimo do conjunto - intervenção física e operação da rede de distribuição – resultando em uma combinação ótima da substituição das tubulações de determinados trechos, por outras de diâmetros maiores, e da altura manométrica mais adequada.

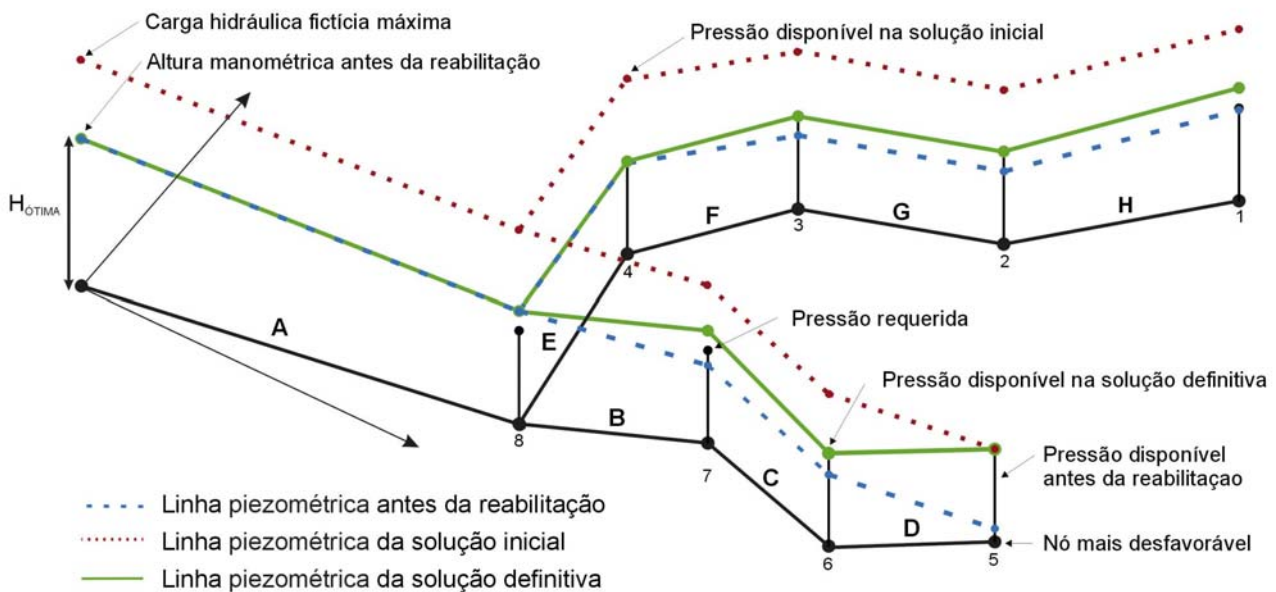


Figura 1. Esquema das linhas piezométricas

O custo total do projeto é a soma dos custos de investimento com os de operação. Porém, os custos de operação incidem ao longo do tempo, diferentemente dos investimentos direcionados às intervenções físicas, devendo-se converter os gastos variáveis em fixos ou os fixos em variáveis, isto é, converter as despesas anuais de exploração em valores fixos atualizados ou os gastos fixos

em anuidades. Para converter financeiramente uma série de custos anuais em um valor fixo e atual, multiplica-se o custo energético por um fator de atualização, que é expresso por:

$$Fa = \left[ \frac{(1+e)^n - (1+i)^n}{(1+e) - (1+i)} \right] \times \left[ \frac{1}{(1+i)^n} \right] \quad (3)$$

em que:

Fa - fator de atualização (adimensional);

e - taxa de aumento de energia;

i - taxa de juros anual; e

n - número de anos estimado para a vida útil do projeto.

O custo da energia de bombeamento capitalizado, por metro de altura manométrica (Ce), se determina através da expressão:

$$Ce = P \times Nb \times Pe \times Fa \quad (4)$$

em que:

Ce - custo atualizado da energia de bombeamento, em unidades monetárias por metro de elevação;

P - potência em kW, por metro de elevação (equação 5);

N<sub>b</sub> - número de horas anual de utilização da estação de bombeamento;

Pe - preço de um kWh; e

Fa - fator de atualização do custo energético anual (equação 3).

A potência requerida por uma estação elevatória de água por metro de elevação, é expressa por:

$$P = \frac{9,81 \times Q}{\eta} \quad (5)$$

em que:

P - potência, em kW/m;

Q - vazão requerida pelo projeto, em m<sup>3</sup>/s; e

η - rendimento global do conjunto elevatório, em decimais.

O custo atualizado da energia de bombeamento por metro de elevação ( $C_e$ ) será chamado de *Gradiente Energético*, que corresponde ao barateamento que se alcança em consumo de energia para um metro na redução da cota piezométrica de cabeceira. Assim sendo, a cota de cabeceira que proporciona o custo ótimo da rede de distribuição mais a energia capitalizada consumida pelo bombeamento, é alcançada quando o valor do gradiente energético iguala ou supera o valor do gradiente de câmbio ótimo ou da combinação dos gradientes de câmbio ótimos ( $C^*$ ) no processo iterativo (2ª etapa).

Em cada iteração da segunda etapa do método, o decréscimo de pressão na cabeceira da rede ( $\Delta Z$ ) será o menor valor entre a melhora da perda de carga, no trecho ótimo, e o mínimo excesso de pressão nos diversos pontos da rede - excetuando os excessos de pressão dos nós situados à jusante do(s) trecho(s) ótimo(s). Caso o valor de  $\Delta h_f$  disponível do trecho ótimo seja menor do que o excesso de pressão mínima na rede ( $EP_{min}$ ), o decréscimo de pressão na cabeceira será igual ao valor  $\Delta h_f$ , e o trecho ótimo será ocupado pelo diâmetro de maior calibre. Neste caso, a linha piezométrica da rede resultante ficará rebaixada em  $\Delta Z$  (excetuando o trecho ótimo e aqueles situados a jusante do mesmo). Os novos excessos de pressão de toda a rede serão iguais aos anteriores, menos  $\Delta Z$  ou  $\Delta h_f$ , excetuando os excessos correspondentes ao trecho ótimo, e aos trechos situados à jusante do mesmo, que permanecem invariáveis.

Quando  $\Delta h_f$  disponível do trecho ótimo é maior que  $EP_{min}$ , o decréscimo de pressão na cabeceira será igual a  $EP_{min}$ , e o trecho ótimo torna-se composto por dois diâmetros (o anterior e o consecutivo superior). Em tal caso, e para esse trecho, o novo valor de  $\Delta h_f$  disponível será igual ao  $\Delta h_{f,disp}$  anterior, menos  $\Delta Z$  ou  $EP_{min}$ . A nova cota piezométrica de cabeceira, e os novos excessos de pressão da rede ficarão rebaixadas em  $EP_{min}$ , com exceção do trecho ótimo e dos situados à jusante do mesmo.

Definida a nova cota de cabeceira da rede, faz-se necessário reajustar os preços e gradientes de câmbio das tubulações. O novo custo de reabilitação será igual ao custo anterior de reabilitação, mais a diferença de custo proporcionado pelo aumento de diâmetro do(s) trecho(s) ótimo(s).

A metodologia da segunda etapa pode ser sintetizada em:

- Determinação dos gradientes de câmbio da rede ( $C$ );
- Comparação do gradiente de câmbio ótimo ( $C^*$ ) com o gradiente energético ( $C_e$ );
- Cálculo do decréscimo do excesso de pressão ( $\Delta EP$ );
- Modificação dos diâmetros dos trechos ótimos ( $T^*$ );
- Obtenção da nova cota piezométrica de cabeceira e dos novos excessos de pressão;
- Reajuste dos custos e dos gradientes de câmbio nos trechos onde houve mudança de diâmetro; e
- Cálculo do novo custo ótimo de reabilitação da rede.

O método de otimização segue a metodologia antes apresentada, baixando a cota piezométrica de cabeceira, até alcançar a cota piezométrica de cabeceira ótima, que atende aos requerimentos de pressão em todos os pontos de consumo.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O sistema escolhido para a reabilitação corresponde a uma rede fictícia de distribuição de água, cujo traçado e topografia são mostrados na figura 2. A tabela 1 apresenta os preços de implantação das tubulações, enquanto a tabela 2 fornece os dados da rede e as condições originais de operação.

Os dados para a reabilitação do sistema são:

- A pressão mínima requerida nos nós é de 15 mca.
- As tubulações são de PVC, cujo coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams é igual a 145 para tubos novos e 125 para tubos usados.
- A estação de bombeamento terá uma utilização de 18 h/dia, com rendimento médio de 75%. A energia está avaliada a um preço de R\$ 0,20 por KWh e o período de amortização da obra é igual a 15 anos. O nível de captação da água é 100 metros.
- A taxa de juros anual é 10,5% e a de aumento da energia é de 8%.

Tabela 1. Custos de implantação, por metro linear, das tubulações de PVC/DEFoFo.

Fonte: Companhia de Água e Esgoto da Paraíba - Brasil, 2004

Diâmetro Nominal	Diâmetro Interno (mm)	Custo da Tubulação (R\$/m)	Custo de Montagem (R\$/m)	Custo de Implantação (R\$/m)
100	108,4	17,09	24,30	41,39
150	156,4	33,80	26,89	60,69
200	204,2	57,62	32,78	90,40
250	252,0	88,59	34,59	123,18
300	299,8	122,24	40,02	162,26
400	394,6	207,09	45,64	252,73
500	489,4	319,44	53,16	372,60



Tabela 2. Situação original do sistema de distribuição d'água (cota de cabeceira = 130 metros)

Trecho	Vazão (l/s)	DN (mm)	D Interno (mm)	Coefic. H. W.	Comp. (m)	Perdas (mca)	Velocidade (m/s)
1	6,00	100	108,4	125	120	0,64	0,65
2	12,00	100	108,4	125	100	1,93	1,30
3	32,00	150	156,4	125	200	3,99	1,67
4	14,40	100	108,4	125	180	4,88	1,56
5	12,80	100	108,4	125	160	3,49	1,39
6	75,20	200	204,2	125	200	5,30	2,30
7	10,00	100	108,4	125	125	1,72	1,08
8	20,00	150	156,4	125	125	1,04	1,04
9	29,60	150	156,4	125	120	2,07	1,54
10	39,20	200	204,2	125	120	0,95	1,20
11	114,40	300	299,8	125	485	4,31	1,62

Nó	Altura (mca)	Cota do (m)	Pressão (mca)	Pressão (mca)	Déficit de (mca)
1	113,83	100,0	15	13,83	1,17
2	114,47	101,0	15	13,47	1,53
3	116,41	100,0	15	16,41	-
4	112,03	102,5	15	9,53	5,47
5	116,91	104,0	15	12,91	2,09
6	120,40	103,0	15	17,40	-
7	119,90	105,0	15	14,90	0,10
8	121,63	110,0	15	11,63	3,37
9	122,67	109,0	15	13,67	1,33
10	124,74	110,0	15	14,74	0,26
11	125,69	108,0	0	17,69	-

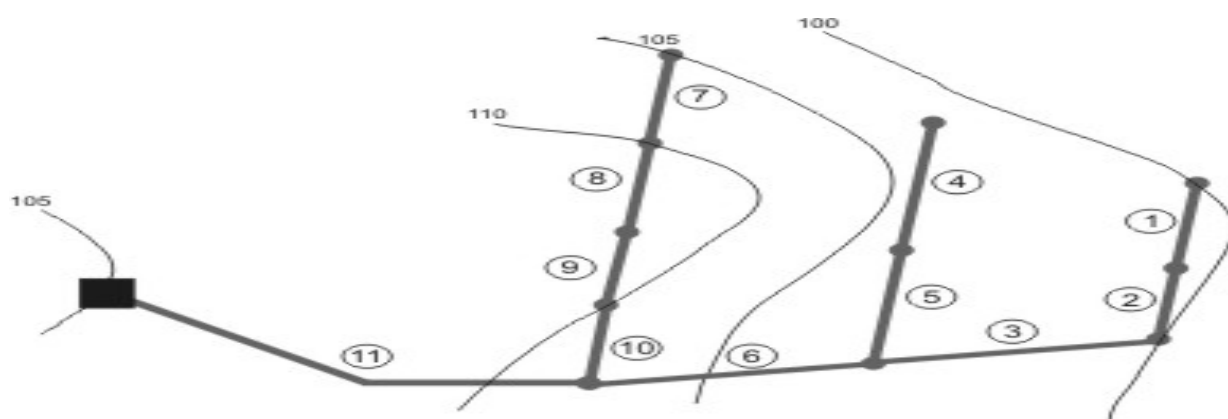


Figura 2. Esquema da rede de distribuição

Como pode ser observado na tabela 1, apenas nos nós 3, 6 e 11 as pressões disponíveis são superiores às requeridas.

O primeiro passo da metodologia consiste na determinação das cargas hidráulicas fictícias dos nós, cujos valores estão descritos na tabela 3. A cota piezométrica de cabeceira inicial será o maior valor entre as cargas hidráulicas fictícias ( $CHf_{max}$ ), neste caso, 135,47 m ( $Z_o$ ). Em seguida, executa-se o processo iterativo de cálculo, no qual se baixa, passo a passo, a cota piezométrica de cabeceira inicial, até alcançar a cota de alimentação ótima, que proporcionará o custo mínimo de investimento mais energético.

Tabela 3. Carga hidráulica fictícia dos nós em metros

Nó	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
CHf	131,2	131,5	128,6	135,47	132,1	127,6	130,1	133,4	131,3	130,3	112,3

O fator de atualização será:

$$Fa = \frac{(1+0,105)^{15} - (1+0,08)^{15}}{(1+0,105) - (1+0,08)} \times \frac{1}{(1+0,105)^{15}} = 11,62$$

O custo unitário da energia capitalizada por metro será:

$$Ce = \left( 9,81 \times \frac{114}{1000} \times \frac{1}{0,75} \right) \times 6.570 \times 0,20 \times 11,62 = 22.767,43 \text{ R\$/m}$$

Na solução inicial, o EP = 0 ocorre no nó 4; o menor gradiente de câmbio na artéria formada pelos trechos 4, 5, 6 e 11 corresponde ao do trecho 4, sendo igual a 2.567,00 R\$/m, que é menor que Ce (22.767,43 R\$/m). Sendo assim, o decréscimo da cota de cabeceira será igual a 2,09 m, referente ao menor valor entre a perda de carga disponível no trecho 4 e os excessos de pressão nos outros trechos da rede. O custo de reabilitação da rede será igual a R\$ 5.377,00, resultado do produto de  $\Delta hf_8$  por  $C^*$ . Ficando o trecho ocupado pelos diâmetros 100 e 150, e os novos excessos de pressão passam a ser iguais aos anteriores menos 2,09 metros. Os valores das pressões disponíveis nos nós serão iguais, em cada iteração, aos valores de EP mais a pressão requerida.

Como resultado da 1ª iteração, os excessos de pressão são nulos nos nós 1 e 3 situados em paralelo. Como consequência, o gradiente de cambio ótimo será o menor valor entre:  $C_4+C_6$  (R\$ 16.219),  $C_4+C_9$  (R\$ 9.172),  $C_4+C_{10}$  (R\$ 23.936),  $C_5+C_8$  (R\$ 16.844),  $C_5+C_9$  (R\$ 9.797),  $C_5+C_{10}$  (R\$ 24.561),  $C_6+C_8$  (R\$ 20.047),  $C_6+C_9$  (R\$ 12.999) e  $C_6+C_{10}$  (R\$ 27.763), neste caso,  $C^* = C_4+C_9$  (R\$ 9.172), novamente o  $C^*$  é menor que Ce. O decréscimo da cota de cabeceira será igual a 1,28 metros, que é o menor valor entre EP<sub>1</sub>, EP<sub>2</sub>, EP<sub>3</sub>,  $\Delta hf_4$ , EP<sub>5</sub>, EP<sub>6</sub>,  $\Delta hf_9$ , EP<sub>10</sub>, EP<sub>11</sub>.

Seguindo o processo iterativo de cálculo da tabela 4, a cota piezométrica de alimentação que proporciona o custo mínimo do sistema é alcançada na 6ª iteração, quando o valor de  $C^*$  passa de 20.684,00 R\$/m para 27.763,00 R\$/m, que é maior que  $C_e$  (22.767,43 R\$/m). Os valores das variáveis da última iteração (6ª), sintetizam os resultados, cujo custo de recuperação é igual a R\$ 42.297,00. Os diâmetros definitivos dos trechos e as pressões disponíveis resultantes se encontram nas colunas 2 e 6, respectivamente. A cota piezométrica ótima de cabeceira é de 130,63 metros, o que corresponde a uma altura manométrica de bombeamento de 30,63 mca.

Na tabela 4 encontram-se os resultados das variáveis necessárias para fornecer, em cada iteração, o custo ótimo da reabilitação da rede de distribuição (\$R) e a cota piezométrica de cabeceira ( $Z_i$ ) correspondente. A tabela ainda fornece em cada iteração, para o(s) diâmetro(s) de cada trecho, os gradientes de câmbio (coluna 3), os excessos de pressão (coluna 4), a diferença das perdas de carga (coluna 5) e as pressões disponíveis no nó de jusante de cada trecho (coluna 6). O(s) trecho(s) sublinhado(s) indica(m) os valores ótimos de  $C$  ( $C^*$ ), enquanto que os valores em itálico são os “candidatos” a serem o decréscimo de pressão na cabeceira da rede, dentre estes, o valor em negrito corresponde ao decréscimo adotado (menor valor entre os “candidatos”).

Tabela 4. Processo de iterações (2ª etapa)

Solução Inicial		Cota Piezométrica de Cabeceira = 135,47 m			
Trecho	Do (mm)	C (R\$/m)	EP (m)	$\Delta h_f$ (m)	Pd (m)
1	100	12.987	4,30	0,56	19,30
2	100	3.597	3,94	1,69	18,94
3	150	5.717	6,87	3,16	21,87
<u>4</u>	100	2.567	0,00	4,26	15,00
5	100	3.192	3,38	3,04	18,38
6	200	6.394	7,86	3,85	22,86
7	100	5.042	5,37	1,50	20,37
8	150	13.652	<b>2,09</b>	0,83	17,09
9	150	6.605	4,14	1,64	19,14
10	200	21.369	5,21	0,69	20,21
11	300	35.553	23,16	3,45	23,16

$\$R_0 = 0$

$C^* = 2.567,00$

**1ª Iteração**

Cota Piezométrica de Cabeceira = 133,37 m

Trecho	Do (mm)	C (R\$/m)	EP (m)	$\Delta h_f$ (m)	Pd (m)
1	100	12.987	2,20	0,56	17,20
2	100	3.597	1,85	1,69	16,85
3	150	5.717	4,78	3,16	19,78
<u>4</u>	100/150	2.567	0,00	2,16	15,00
5	100	3.192	<b>1,28</b>	3,04	16,28
6	200	6.394	5,77	3,85	20,77
7	100	5.042	3,28	1,50	18,28
8	150	13.652	0,00	0,83	15,00
<u>9</u>	150	6.605	2,04	1,64	17,04
10	200	21.369	3,12	0,69	18,12
11	300	35.553	21,07	3,45	21,07

$$\text{\$R}_1 = 2,09 * 2.567 = \text{R\$ } 5.377,00$$

$$C^* = 2.567 + 6.605 = 9.172,00$$

**2ª Iteração**

Cota Piezométrica de Cabeceira = 132,09 m

Trecho	Do (mm)	C (R\$/m)	EP (m)	$\Delta h_f$ (m)	Pd (m)
1	100	12.987	0,92	0,56	15,92
2	100	3.597	0,56	1,69	15,56
3	150	5.717	3,50	3,16	18,50
4	100/150	2.567	0,00	0,88	15,00
<u>5</u>	100	3.192	0,00	3,04	15,00
6	200	6.394	4,49	3,85	19,49
7	100	5.042	3,28	1,50	18,28
8	150	13.652	0,00	0,83	15,00
<u>9</u>	150/200	6.605	2,04	<b>0,36</b>	17,04
10	200	21.369	1,83	0,69	16,83
11	300	35.553	19,78	3,45	19,78

$$\text{\$R}_2 = 5.377 + 1,28 * (2.567 + 6.605) = \text{R\$ } 17.145,00$$

$$C^* = 3.192 + 6.605 = 9.797,00$$

**3ª Iteração**

Cota Piezométrica de Cabeceira = 131,73 m

Trecho	Do (mm)	C (R\$/m)	EP (m)	$\Delta h_f$ (m)	Pd (m)
1	100	12.987	0,56	0,56	15,56
2	100	3.597	<b>0,20</b>	1,69	15,20
3	150	5.717	3,14	3,16	18,14
4	100/150	2.567	0,00	0,88	15,00
<u>5</u>	100/150	3.192	0,00	2,68	15,00
6	200	6.394	4,13	3,85	19,13
7	100	5.042	3,28	1,50	18,28
<u>8</u>	150	13.652	0,00	0,83	15,00
9	200	14.290	2,04	0,28	17,04
10	200	21.369	1,47	0,69	16,47
11	300	35.553	19,42	3,45	19,42

$$\text{\$R}_3 = 17.145 + 0,36 * (3.192 + 6.605) = \text{R\$ } 20.665,00$$

$$C^* = 3.192 + 13.652 = 16.844,00$$

**4ª Iteração**

Cota Piezométrica de Cabeceira = 131,53 m

Trecho	Do (mm)	C (R\$/m)	EP (m)	$\Delta h_f$ (m)	Pd (m)
1	100	12.987	0,36	0,56	15,36
2	100	3.597	0,00	1,69	15,00
3	150	5.717	2,93	3,16	17,93
4	100/150	2.567	0,00	0,88	15,00
5	100/150	3.192	0,00	2,48	15,00
<u>6</u>	200	6.394	3,92	3,85	18,92
7	100	5.042	3,28	1,50	18,28
<u>8</u>	150/200	13.652	0,00	<b>0,62</b>	15,00
9	200	14.290	1,84	0,28	16,84
10	200	21.369	1,27	0,69	16,27
11	300	35.553	19,22	3,45	19,22

$$\text{\$R}_4 = 20.665 + 0,20 * (3.192 + 13.652) = \text{\$R} 24.103,00$$

$$C^* = 6.394 + 13.652 = 20.047,00$$

**5ª Iteração**

Cota Piezométrica de Cabeceira = 130,90 m

Trecho	Do (mm)	C (R\$/m)	EP (m)	$\Delta h_f$ (m)	Pd (m)
1	100	12.987	0,36	0,56	15,36
2	100	3.597	0,00	1,69	15,00
3	150	5.717	2,93	3,16	17,93
4	100/150	2.567	0,00	0,88	15,00
5	100/150	3.192	0,00	2,48	15,00
<u>6</u>	200/250	6.394	3,92	3,23	18,92
7	100	5.042	3,28	1,50	18,28
8	200	29.535	0,00	0,14	15,00
<u>9</u>	200	14.290	1,22	<b>0,28</b>	16,22
10	200	21.369	0,65	0,69	15,65
11	300	35.553	18,60	3,45	18,60

$$\text{\$R}_5 = 24.103 + 0,62 * (6.394 + 13.652) = \text{\$R} 36.604,00$$

$$C^* = 6.394 + 14.290 = 20.684,00$$

**6ª Iteração**

Cota Piezométrica de Cabeceira = 130,63 m

Trecho	Do (mm)	C (R\$/m)	EP (m)	$\Delta h_f$ (m)	Pd (m)
1	100	12.987	0,36	0,56	15,36
2	100	3.597	0,00	1,69	15,00
3	150	5.717	2,93	3,16	17,93
4	100/150	2.567	0,00	0,88	15,00
5	100/150	3.192	0,00	2,48	15,00
<u>6</u>	200/250	6.394	3,92	2,95	18,92
7	100	5.042	3,28	1,50	18,28
8	200	29.535	0,00	0,14	15,00
9	250	53.278	1,22	0,09	16,22
<u>10</u>	200	21.369	0,37	0,69	15,37
11	300	35.553	18,32	3,45	18,32

$$\text{\$R}_6 = 36.604 + 0,28 * (6.394 + 14.290) = \text{\$R} 42.297,00$$

$$C^* = 6.394 + 21.369 = 27.763,00$$

As combinações para o cálculo dos gradientes de câmbio estão descritas resumidamente na tabela 5. Os comprimentos correspondentes aos pares de diâmetros dos trechos 4, 5, e 6 estão apresentados na tabela 6, e são proporcionais às relações existentes, respectivamente, entre as perdas de carga em cada sub-trecho e a requerida em todo o trecho.

Tabela 5. Resumo do cálculo dos gradientes de câmbio (G)

Sol. Inicial - 1ª Iteração		1ª - 2ª Iteração		2ª - 3ª Iteração	
C <sub>4</sub>	2.567	C <sub>4</sub> + C <sub>8</sub>	16.219	C <sub>5</sub> + C <sub>8</sub>	16.844
C <sub>5</sub>	3.192	C <sub>4</sub> + C <sub>9</sub>	9.172	C <sub>5</sub> + C <sub>9</sub>	9.797
C <sub>6</sub>	6.394	C <sub>4</sub> + C <sub>10</sub>	23.936	C <sub>5</sub> + C <sub>10</sub>	24.561
C <sub>11</sub>	35.553	C <sub>5</sub> + C <sub>8</sub>	16.844	C <sub>6</sub> + C <sub>8</sub>	20.047
3ª - 4ª Iteração		C <sub>5</sub> + C <sub>9</sub>	9.797	C <sub>6</sub> + C <sub>9</sub>	12.999
C <sub>5</sub> + C <sub>8</sub>	16.844	C <sub>5</sub> + C <sub>10</sub>	24.561	C <sub>6</sub> + C <sub>10</sub>	27.763
C <sub>5</sub> + C <sub>9</sub>	17.482	C <sub>6</sub> + C <sub>8</sub>	20.047	C <sub>11</sub>	35.553
C <sub>5</sub> + C <sub>10</sub>	24.561	C <sub>6</sub> + C <sub>9</sub>	12.999		
C <sub>6</sub> + C <sub>8</sub>	20.047	C <sub>6</sub> + C <sub>9</sub>	27.763		
C <sub>6</sub> + C <sub>9</sub>	20.684	C <sub>11</sub>	35.553		
C <sub>6</sub> + C <sub>10</sub>	27.763				
C <sub>11</sub>	35.553				
4ª - 5ª Iteração		5ª - 6ª Iteração		6ª - 7ª Iteração	
C <sub>1</sub> + C <sub>5</sub> + C <sub>8</sub>	29.831	C <sub>1</sub> + C <sub>5</sub> + C <sub>8</sub>	45.714	C <sub>1</sub> + C <sub>5</sub> + C <sub>8</sub>	45.714
C <sub>1</sub> + C <sub>5</sub> + C <sub>9</sub>	30.468	C <sub>1</sub> + C <sub>5</sub> + C <sub>9</sub>	30.468	C <sub>1</sub> + C <sub>5</sub> + C <sub>9</sub>	69.457
C <sub>1</sub> + C <sub>5</sub> + C <sub>10</sub>	37.548	C <sub>1</sub> + C <sub>5</sub> + C <sub>10</sub>	37.548	C <sub>1</sub> + C <sub>5</sub> + C <sub>10</sub>	37.548
C <sub>2</sub> + C <sub>5</sub> + C <sub>8</sub>	20.442	C <sub>2</sub> + C <sub>5</sub> + C <sub>8</sub>	36.325	C <sub>2</sub> + C <sub>5</sub> + C <sub>8</sub>	36.325
C <sub>2</sub> + C <sub>5</sub> + C <sub>9</sub>	21.079	C <sub>2</sub> + C <sub>5</sub> + C <sub>9</sub>	21.079	C <sub>2</sub> + C <sub>5</sub> + C <sub>9</sub>	60.068
C <sub>2</sub> + C <sub>5</sub> + C <sub>10</sub>	28.159	C <sub>2</sub> + C <sub>5</sub> + C <sub>10</sub>	28.159	C <sub>2</sub> + C <sub>5</sub> + C <sub>10</sub>	28.159
C <sub>3</sub> + C <sub>5</sub> + C <sub>8</sub>	22.561	C <sub>3</sub> + C <sub>5</sub> + C <sub>8</sub>	38.445	C <sub>3</sub> + C <sub>5</sub> + C <sub>8</sub>	38.445
C <sub>3</sub> + C <sub>5</sub> + C <sub>9</sub>	23.199	C <sub>3</sub> + C <sub>5</sub> + C <sub>9</sub>	23.199	C <sub>3</sub> + C <sub>5</sub> + C <sub>9</sub>	62.187
C <sub>3</sub> + C <sub>5</sub> + C <sub>10</sub>	30.278	C <sub>3</sub> + C <sub>5</sub> + C <sub>10</sub>	30.278	C <sub>3</sub> + C <sub>5</sub> + C <sub>10</sub>	30.278
C <sub>6</sub> + C <sub>8</sub>	20.047	C <sub>6</sub> + C <sub>8</sub>	35.930	C <sub>6</sub> + C <sub>8</sub>	35.930
C <sub>6</sub> + C <sub>9</sub>	20.684	C <sub>6</sub> + C <sub>9</sub>	20.684	C <sub>6</sub> + C <sub>9</sub>	59.672
C <sub>6</sub> + C <sub>10</sub>	27.763	C <sub>6</sub> + C <sub>10</sub>	27.763	C <sub>6</sub> + C <sub>10</sub>	27.763
C <sub>11</sub>	35.553	C <sub>11</sub>	35.553	C <sub>11</sub>	35.553

Tabela 6. Comprimentos dos pares de diâmetros dos trechos 4, 5 e 6

Trecho	Sub-trecho 1			Sub-trecho 2			Trecho		
	D <sub>1</sub>	L <sub>1</sub>	hf <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	L <sub>2</sub>	hf <sub>2</sub>	D <sub>1</sub> /D <sub>2</sub>	L	hf
4	100	37,15	1,01	150	142,85	0,49	100/150	180	1,50
5	100	130,37	2,84	150	29,63	0,08	100/150	160	2,92
6	200	153,34	4,06	250	46,66	0,34	200/250	200	4,40

A tabela 7 apresenta as ações a serem implantadas para a retomada das condições hidráulicas exigidas no projeto da rede de distribuição.

Tabela 7. Decisões de reabilitação propostas pelo método

Trecho	Diâmetro Nominal Original (mm)	Solução Proposta	
		DN Final (mm)	Comprimento (m)
1	100	100	120
2	100	100	100
3	150	150	200
4	100	100	37
		150	143
5	100	100	130
		150	30
6	200	200	121
		250	79
7	100	100	125
8	150	200	125
9	150	250	120
10	200	200	11
11	300	300	485
Altura Manométrica Ótima = 30,63 metros			

De acordo com os resultados obtidos pelo método (tabela 7), o custo proporcionado pelas substituições é de R\$ 42.297,00, que corresponde a 29,37 % do custo total de implantação da rede original (R\$ 144.032,00), calculado com base nos preços constantes da tabela 2. O custo energético capitalizado para uma vida útil de 15 anos é de R\$ 669.760,00.

## CONCLUSÕES

O método desenvolvido e apresentado neste trabalho representa uma importante alternativa para a tomada de decisão sobre a reabilitação de redes pressurizadas ramificadas, que se encontram com deficiência de vazão e pressão nos pontos de consumo, de maneira que a solução encontrada proporcione o menor custo possível do conjunto - investimento mais operação.

O método, baseado em um processo dinâmico de programação, permite ao analista visualizar, a cada passo, as diversas alternativas de modificações do sistema original com vista a sua reabilitação, podendo ainda, visualizar os valores resultantes dos custos energéticos.

O método pode ser aplicado também a redes malhadas, desde que se utilize o método do seccionamento fictício para transformá-la em ramificada, sendo aconselhável à utilização de um programa de simulação de sistemas de abastecimento de água.

As decisões sobre as modificações nos trechos da rede foram tomadas com base na minimização dos custos referentes às mudanças nos diâmetros das tubulações e no consumo energético, sem considerar inconvenientes na substituição das tubulações.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio concedido pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLIANCE - Aliança para Conservação de Energia. Água e Energia: Aproveitando as oportunidades de eficiência de água e energia não exploradas nos sistemas de água municipais. PROCEL/ELETRONBRAS. Washington, EUA, 2002.
- BARBOSA, P. S. F e VENTURINI, M. A G. Subsídios à escolha de técnicas de reabilitação de redes de distribuição de água. In: Seminário: Planejamento, Projeto e Operação de Redes de Abastecimento de Água: O Estado da Arte e Questões Avançadas. 2002. João Pessoa. Anais do Seminário: Planejamento, Projeto e Operação de Redes de Abastecimento de Água: O Estado da Arte e Questões Avançadas. Universidade Federal da Paraíba, 2002. 1 CD.
- BRAILEY, D., JACOBS, A. Energy management in the waterworks Industry. J. N. Eng. Water Works Association. V. 94, n.3, p. 216-226, 1980.



- CAGEPA - Companhia de Água e Esgoto da Paraíba. Relatório Técnico. João Pessoa, Brasil, 2004.
- GRANADOS, A. Infraestructuras de regadíos: redes colectivas de riego a presión. Madrid: Servicio de Publicación de E.T.S.I. de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid, Espanha, 1990.
- GOMES, H. P. Sistema de Abastecimento de Água: Dimensionamento Econômico e Operação de Redes e Elevatórias. 242p. Editora da UFPB, João Pessoa, 2004.
- TSUTIYA, M. T. Redução do Custo de Energia Elétrica em Sistemas de Abastecimento de Água, 1<sup>a</sup> ed., São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001, 185 p.