

OTIMIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA USANDO TÉCNICAS DE PROGRAMAÇÃO NÃO-LINEAR COM *SOLVERS* TIPO DNLP

Douglas F. Surco^{1,2}, Thelma P. B. Vecchi^{1,2}, Mauro A. S. S. Ravagnani²

1: Departamento de Eng. Civil
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR
Via Rosalina Maria dos Santos, 1233 CEP 87301-899 Campo Mourão – PR – Brasil
e-mail: fukunaga@utfpr.edu.br
thelmapbv@gmail.com

2: Departamento de Engenharia Química
Universidade Estadual de Maringá – UEM
Av. Colombo, 5790 Jd. Universitário CEP 87020-900 Maringá – PR – Brasil
e-mail: mauro.ravagnani@hotmail.com

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo o dimensionamento e a otimização de redes de distribuição de água, a partir de métodos determinísticos. Para isto, utiliza-se o software GAMS, com *solvers* do tipo DNLP e o método de otimização PNL2000. O trabalho considera o equilíbrio hidráulico em regime permanente e, para demonstrar a eficácia do método, foi utilizado um exemplo clássico de rede de distribuição de água, usado por pesquisadores da área, a rede denominada *Two Loop*. Os resultados esperados para um dimensionamento confiável são: custo da rede em um mínimo possível, pressões adequadas nos nós, valores da perda de cargas nos arcos, e os diâmetros comerciais apropriados dos tubos, garantindo as condições requeridas pela NBR 12218/1994. Os resultados obtidos demonstraram a eficiência do *solver* do tipo DNLP para a otimização de redes de distribuição de água.

PALAVRAS CHAVE: Programação não linear, Redes de distribuição de água, DNLP.

ABSTRACT

The goal of this work is the design and the optimization of water distribution networks, from deterministic methods. For this purpose, we use the software GAMS with solvers DNLP type and the PNL2000 as the optimization method. The work considers the hydraulic balance in the steady state and to demonstrate the efficacy of the method we used one classic example of water distribution network, used by professional researchers, the network called *Two Loop*. The results expected for a reliable design are: cost of the network to a minimum possible, appropriate pressures at the nodes, values of load loss of the arches and the appropriate commercial diameters of pipes, ensuring the conditions required by NBR 12218/1994. The results showed the efficiency of the DNLP type solver for optimization of water distribution networks.

KEYWORDS: Nonlinear programming, water distribution networks, DNLP.

1. Introdução

A rede de distribuição é uma parte do sistema de abastecimento de água que faz com que esta seja efetivamente entregue ao consumidor, pronta para ser consumida de forma contínua, em quantidade, qualidade e pressão adequadas para o sistema e para o consumidor. Para Tsutiya (2006), o sistema de abastecimento de água geralmente é constituído das seguintes partes: manancial, captação, estação elevatória, adutora, estação de tratamento de água, reservatório, rede de distribuição.

Segundo Tsutiya (2006), o custo de implantação de uma rede de distribuição para uma população superior a 100.000 habitantes é de aproximadamente 76% do custo total do abastecimento de água. Desta forma, pesquisas são realizadas com o intuito de otimizar o custo de implantação de uma rede de distribuição de água com um desempenho satisfatório.

Para Costa (2005), otimizar consiste em selecionar, dentre um conjunto de possíveis resultados, um que seja ótimo, de acordo com determinados critérios. O objetivo principal dos diversos métodos de otimização de redes de distribuição de água é encontrar o sistema de menor custo, que atenda aos requerimentos hidráulicos de vazão e pressão nos pontos de consumo. Para atingir este objetivo é necessário o desenvolvimento de duas etapas: o dimensionamento da rede e a minimização dos custos.

O sistema pode ser resolvido por métodos que não otimizam, apenas realizam um equilíbrio hidráulico, tais como: a teoria linear de Hardy-Cross (1936) e as técnicas do tipo *Newton-Raphson* para variáveis não lineares. Os resultados destes métodos dependem da experiência do pesquisador e não objetivam a economia do sistema. São iterativos e requerem que as variáveis tenham valores pré-determinados para a solução posterior (GOMES, 2004).

O sistema de rede de distribuição de água (RDA), quando considerado um problema de otimização, é classificado como um problema combinatório NP-hard (Geem, 2009) por se tratar de uma programação não linear, com restrições de funções com derivadas descontínuas e com um total de combinações de $(Dd)^{nt}$, sendo Dd o número de diâmetros disponíveis para a rede e nt o número de trechos da rede. O resultado final não necessariamente é único e também não garante um resultado ótimo global. Sendo assim, o problema de otimização de uma RDA ainda não está resolvido plenamente.

2. Revisão bibliográfica

2.1. Sistema de abastecimento de água

A norma brasileira NBR 12218/1994 “Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público” fixa as condições mínimas para a elaboração do projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público. Por exemplo, as de zonas de pressão devem considerar uma pressão dinâmica mínima de 100 kPa (10,0 *mca* – unidades de pressão em metros de coluna de água) e as pressões estáticas máximas não devem ultrapassar 500 kPa (50 *mca*). Outro item a ser mencionado diz respeito à velocidade mínima nos condutos, que deve ser de 0,60 m/s, enquanto a velocidade máxima não deve ser superior a 3,50 m/s. O item 5.6.1 menciona que os condutos principais devem ser localizados em vias públicas, formando preferencialmente circuitos fechados; e o item 5.6.2 menciona que “os condutos secundários devem formar rede malhada, podendo ou não ser interligados nos pontos de cruzamento”. Em quanto ao diâmetro no item 5.7.2 cita que “o diâmetro mínimo dos condutos secundários é de 50 mm.”

O bombeamento pode ser dividido em duas fases: o principal (sistema principal de impulsão) e o secundário, comumente chamado de *boosters*. A NBR 12218/1994, no item 5.10.4, menciona que “a rede de distribuição pode ter *booster* instalado não devendo, entretanto, ser permitido o consumo através da bomba com sucção direta da rede”.

A diferença entre uma rede malhada e uma rede ramificada é a formação de anéis ou circuitos. A rede malhada é um conjunto de circuitos ou anéis, já a rede ramificada não apresenta circuitos. A Figura 1 apresenta um esquema dessas redes.

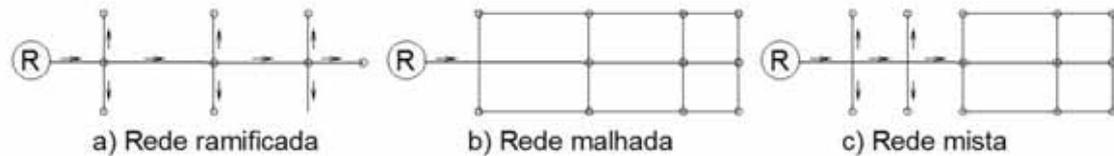


Figura 1: tipos de redes

As fórmulas mais usadas para o cálculo das perdas de carga numa tubulação com água sob pressão são as de Hazen-Williams (1906) e as de Darcy-Weisbach (1845). A seguir, a Figura 2 apresenta uma tubulação sob pressão que mostra as variáveis para visualização das fórmulas acima citadas.

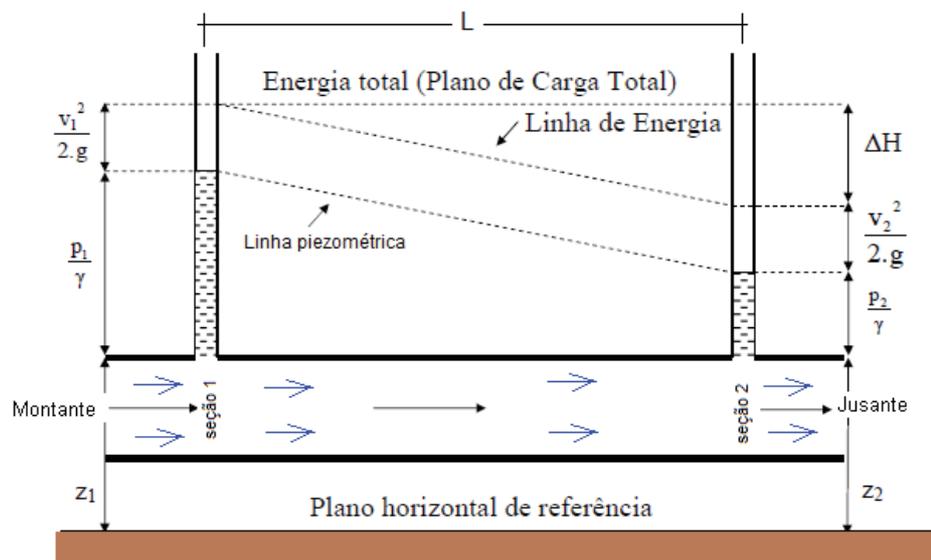


Figura 2: tubulação com água sob pressão.

O sentido do fluxo é da seção 1 (montante) à seção 2 (jusante) e o valor de ΔH pode ser calculado através das fórmulas constantes da Tabela 1.

Tabela 1: Fórmulas mais usadas no cálculo de perda de carga em tubulações.

Fórmula de Darcy-Weibach (Fórmula Universal)	Fórmula de Hazen-Williams
$\Delta H = \left(\frac{8f}{\pi^2 g} \frac{Q^2}{D^5} \right) L$ <p> ΔH: perda de carga linear (mca) L: comprimento do tubo (m) D: diâmetro interno do tubo (m) g: aceleração da gravidade (m/s^2) Q: vazão volumétrica (m^3/s) f: fator do atrito do material (adimensional) </p>	$\Delta H = 10,6792 \frac{Q^{1,852}}{D^{4,871} C^{1,852}} L$ <p> ΔH: perda de carga linear (mca) L: comprimento do tubo (m) D: diâmetro interno do tubo (m) Q: vazão volumétrica (m^3/s) C: coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams em função do tipo de material e tempo de uso (adimensional) </p>

De acordo com Azevedo (1998), a fórmula de Hazen-Williams resultou de um estudo estatístico cuidadoso, onde foram considerados dados experimentais próprios e de outros pesquisadores.

2.2. Simuladores hidráulicos

Um dos simuladores mais utilizados é o simulador hidráulico EPANET, que foi desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*U.S. Environmental Protection Agency - EPA*). Agora na sua versão 2.0 é um software livre que pode ser obtido em diferentes idiomas e tem o código aberto para que possa ser adaptado e/ou traduzido, por programadores, de acordo com suas necessidades. A versão nacional foi traduzida e adaptada pelo Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento – LENHS, da Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

Costa (2010) relata a importância de utilizar um simulador hidráulico para verificar a consistência dos resultados em processos de dimensionamento e otimização tais como: identificação de problemas de pressões insuficientes ou excedentes na rede; simulação em bombeamentos tanto na produção como na distribuição. Na etapa da operabilidade pode ser usado no treinamento de técnicos das unidades operacionais, ligamento e desligamento de válvulas para execuções de rotina (manutenções, interligações, reparos etc.).

2.3. Métodos de otimização de redes de distribuição de água

De acordo com Azevedo (1998), uma rede de distribuição de água como sistema é hidráulicamente indeterminado. Admitindo-se m igual ao número de nós e n igual ao número de trechos (arcos) da rede, o problema apresenta $m+n$ incógnitas, (m pressões ou cotas piezométricas e n diâmetros) e apenas n equações disponíveis.

A indeterminação desse problema pode ser resolvida introduzindo novas equações alheias à Hidráulica, como por exemplo, condições de custo mínimo.

As técnicas de otimização de menor custo em redes hidráulicas começaram a ser aplicadas no final dos anos 1960 por Karmeli *et al.* (FORMIGA, 1999). Estes autores utilizaram a programação linear em redes ramificadas. De acordo com Alperovits e Shamir (1977) estudos em redes malhadas usando a programação linear foram revistos por: Shamir (1973, 1974), Watanada (1973), Hamberg (1974) e Rasmusen (1976). Em 1977, Alperovits e Shamir apresentaram o método de Gradiente de Programação Linear (LPG - *Linear Programming Gradient*), usando a programação linear (LP – *Linear Programming*) para resolver redes com bombeamento, válvulas, reservatórios, etc.

Segundo Zecchin (2005), estudos com programação não linear (NLP - *Non Linear Programming*) foram realizados por Lansey e Mays, em 1989, e também por Fujiwara e Khang, em 1990. Estes métodos são determinísticos e apresentam convergência rápida, devido à convexidade da função, e em muitos casos convergência para ótimos locais. No caso de redes de distribuição de água, as funções e restrições não são convexas. Devido a este fato, várias pesquisas foram realizadas nas últimas décadas para a otimização de redes de distribuição de água usando algoritmos evolutivos (EA's).

De acordo com Viana (2007), até os anos de 1980, os problemas eram resolvidos usando apenas métodos determinísticos, tais como: LP, NLP e DP (*Dinamic Programming*). Entretanto, ainda hoje, existe a dificuldade para a aplicação destes métodos a redes de distribuição de água, pelo fato de o problema conter algumas restrições e a função objetivo não lineares, bem como algumas variáveis discretas. Devido a estas dificuldades, surgiram os métodos heurísticos, destacando-se os algoritmos genéticos (GA's – *Genetics Algorithms*). Para Mognon (2004), os GA's são métodos computacionais de otimização fundamentados nos princípios e conceitos da seleção natural e evolução concebidos a partir de metáforas biológicas, que surgiram para resolver problemas que apresentam descontinuidade de funções ou características altamente não lineares. A aplicação dos GA's à solução do problema de projeto de redes de distribuição de água levou ao desenvolvimento do modelo computacional GANET, desenvolvido por Savic & Walters (1997). Para Viana (2007), a aplicação dos GA's apresenta a vantagem de não necessitar da linearização ou do cálculo de derivadas parciais, além de evitar instabilidades numéricas associadas à inversão de matrizes. Sua aplicação à faixa de soluções é global, reduzindo o risco de assumir erroneamente

um mínimo local como mínimo global e desvinculando a dependência existente da solução ao ponto inicial assumido no processo.

Outros algoritmos que se destacam: Otimização por Enxame de Partículas (PSO - *Particle Swarm Optimization*), introduzido por Kennedy e Eberhart (1995), que pertence a uma classe de algoritmos inspirados em comportamentos sociais naturais inteligentes, chamada *Swarm Intelligence* (SI). Para Rosendo (2010), o algoritmo PSO tem sido aplicado com sucesso na resolução de problemas de otimização contínua. No entanto, o seu potencial em problemas discretos não foi suficientemente explorado; Algoritmo de otimização por colônia de formigas (ACO – *Ant Colony Optimizations*), baseado no forrageamento das formigas (ZECCHIN *et al.*, 2005); *Simulated Annealing* (SA), baseado na técnica de recozimento simulado de metais (CUNHA e SOUZA, 1999); *Shuffled Complex Evolution* (SCE), cujos resultados mostram ser computacionalmente muito mais rápidos, se comparado a outros algoritmos amplamente utilizados, como o AG's (LIONG e ATIQUZZAMAN, 2004); *Harmony Search* (HS), algoritmo do fenômeno musical, inspirado pelo processo de improvisação dos músicos (GEEM, 2006).

2.4. Aplicação da Programação não linear em redes de distribuição de água.

De forma generalizada, os problemas de otimização podem ser escritos matematicamente conforme a Tabela 2.

Tabela 2: estrutura da formulação de programação linear e programação não linear.

Programação Linear (LP)	Programação não linear (NLP)
Minimizar ou maximizar Cx s.a: $Ax \geq 0$ $L \leq x \leq U$ C: vetor de coeficientes A: matriz de coeficientes U: vetor limite superior L: vetor limite inferior x: vetor de variáveis de decisão $\in \mathfrak{R}^n$	Minimizar $f(x)$ s.a: $g(x) \leq 0$ $L \leq x \leq U$ $f(x)$: função objetivo $g(x)$: um conjunto de restrições U: vetor limite superior L: vetor limite inferior x: vetor de variáveis de decisão $\in \mathfrak{R}^n$

Segundo Ghahraman e Sepaskhah (2004), um modelo linear garante uma solução ótima global, enquanto que o não linear garante uma solução ótima local, que pode em alguns casos coincidir com a solução ótima global.

Os *solvers* do tipo DNLP (*Nonlinear Programming with Discontinuous Derivatives*) são derivativos dos *solvers* NLP. Eles levam em conta o fato de que as derivadas de algumas funções não são contínuas, tais como a função valor absoluto, a função máximo, a função mínimo, etc. Integrados nos aplicativos de pesquisa operacional, os *solvers* tipo DNLP conseguem trabalhar com estes tipos de funções.

O método conhecido como PNL2000 quando aplicado para otimizar redes de distribuição de água, utiliza NLP para minimizar o custo total do sistema, sendo um dos precursores para este método o pesquisador Heber Pimentel Gomes (GOMES, 2009).

A Figura 3 mostra os dados necessários para iniciar uma rede de distribuição de água.

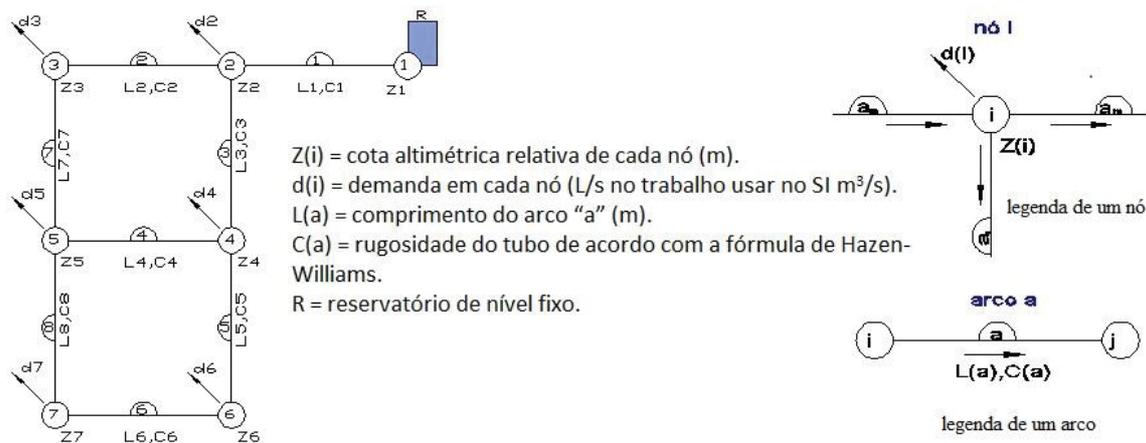


Figura 3: numeração dos nós e arcos com os dados necessários de uma rede.

Para dimensionar e otimizar uma rede de distribuição de água é necessário ter os dados planialtimétricos da rede, o tipo de material a ser usado, as demandas de consumo em cada nó e a posição da fonte (reservatório). A Figura 3 mostra a numeração dos nós e arcos e os dados necessários para a resolução de uma rede de distribuição.

3. Metodologia

Para a aplicação do modelo de otimização desenvolvido, foi escolhido um exemplo clássico da literatura, o *Two Loop* (ALPEROVITS e SHAMIR, 1977), com o objetivo de realizar um comparativo entre os seus resultados desta pesquisa com os de outros autores.

3.1. Estudo de caso

Primeira etapa:

Este sistema considera 14 tubos disponíveis com os diâmetros em polegadas e seus respectivos custos de implantação em US\$, e os requisitos de pressão mínima em cada nó igual a 30 mca.

Neste exemplo, a alimentação principal é por gravidade e a cota do reservatório (z) é elevada suficientemente para dar pressões mínimas nos nós. A sequência determinada para a solução do problema é a seguinte: 1- Numerar os nós e arcos; 2 - indicar o sentido do fluxo nos arcos; 3 - numerar os circuitos, 4 - estabelecer uma relação entre o custo das tubulações através de uma regressão não linear, de forma que o trabalho no primeiro estágio do processo da otimização seja contínua. A relação estabelecida neste caso é dada por:

$$P(D) = 3,5712e^{0,0081D}, \text{ em que } D \text{ é dado em mm e } P \text{ em US$}.$$

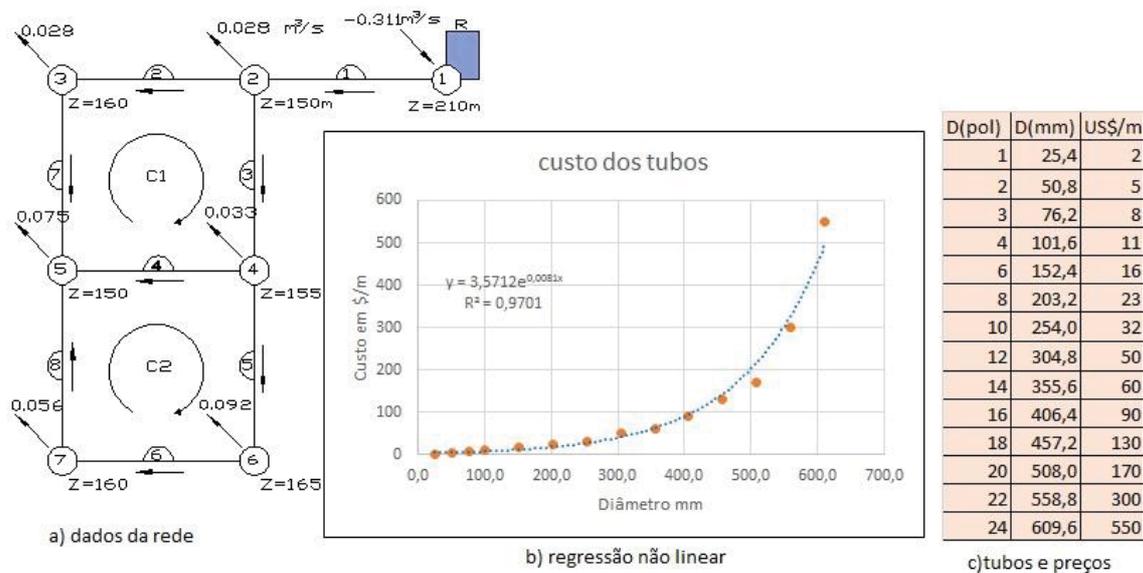


Figura 4: a) numeração dos nós e arcos com sentidos dos fluxos pré-direcionados b) gráfico de custos/ diâmetro (mm) e a equação da regressão exponencial c) tubos disponíveis para serem utilizados na rede e o custo unitário de implantação

A função objetivo e as restrições são dadas da seguinte forma:

$$\text{Min } Z \equiv \sum_{a=1}^M L(a) P(D(a))$$

s.a:

$$\sum Q_{\text{entrada}}(i) - \sum Q_{\text{saída}}(i) = \text{demanda}(i) \quad \forall \text{nó} \quad (\text{R1})$$

$$h(a) = \frac{10,6792|Q(a)|Q(a)^{0,852}}{C(a)^{1,852}D(a)^{4,87}} L(a) \quad \forall \text{arco} \quad (\text{R2})$$

$$\sum h(a) = 0 \quad \forall \text{circuitos} \quad (\text{R3})$$

$$v(a) = \frac{4|Q(a)|}{\pi D(a)^2} \quad \forall \text{arco} \quad (\text{R4})$$

$$D(a) = \sqrt[2]{\frac{4|Q(a)|}{\pi v(a)}} \quad \forall \text{arco} \quad (\text{R5})$$

$$p(j) = p(i) - h(a) + Z(i) - Z(j) \quad \forall \text{nó} \quad (\text{R6})$$

$$v(a) \leq v_{\text{máx}} \quad \forall \text{arco} \quad (\text{R7})$$

$$v(a) \geq v_{\text{mín}} \quad \forall \text{arco} \quad (\text{R8})$$

$$p(i) \geq p_{\text{mín}} \quad \forall \text{nó} \quad (\text{R9})$$

$$D_{\text{mín}} \leq D(a) \leq D_{\text{máx}} \quad \forall \text{arco} \quad (\text{R10})$$

A função objetivo nesta primeira etapa trabalha com dados contínuos através da relação de regressão não linear. A restrição R1 faz o balanço de fluxo de massa em cada nó, a restrição R2 calcula a perda de carga em cada arco através da fórmula de Hazen-Williams. A restrição R2 e as restrições R4 e R5 utilizam a função *abs* (valor absoluto), pois o expoente não é um número par, e o valor de Q pode tomar valores positivos (pré-direcionamento do fluxo correto) ou valores negativos (sentido oposto ao pré-direcionamento). A restrição R3 representa o balanço de energia em cada anel ou circuito. Neste caso, apresentam-se dois circuitos: C1 e C2, e convencionou-se que as perdas são positivas se está no sentido horário e negativo no sentido anti-horário. Os valores de $v_{\text{máx}}$, $v_{\text{mín}}$, $p_{\text{mín}}$, $D_{\text{máx}}$ e $D_{\text{mín}}$ são escalares próprios da imposição ao sistema. Para o sistema em estudo considerou-se: $v_{\text{máx}} = 3\text{m/s}$; $v_{\text{mín}} = 0,3\text{m/s}$; $p_{\text{mín}} = 30\text{ mca}$; $D_{\text{máx}} = 0,609\text{m}$ e $D_{\text{mín}} = 0,0254\text{m}$.

O custo de implantação (resultados gerados para o sistema de rede usando o GAMS) nesta primeira etapa é de US\$ 416.530,00 e os demais resultados são mostradas na Tabela 3:

Tabela 3: resultados da primeira etapa e a variável diâmetro D é contínua.

arco	$Q(m^3/s)$	$v(m/s)$	$D(m)$	$h(m)$	nó	$p(mca)$
1	0,3110	1,91	0,456	6,89	1	35,00
2	0,1020	1,89	0,263	12,85	2	53,11
3	0,1810	1,39	0,407	4,41	3	30,25
4	0,0003	0,53	0,025	18,70	4	43,70
5	0,1470	1,23	0,390	3,70	5	30,00
6	0,0560	1,11	0,253	5,00	6	30,00
7	0,0750	1,59	0,244	10,25	7	30,00
8	0,0002	0,37	0,025	10,00		

Os resultados apresentados na Tabela 3 correspondem às variáveis dos arcos (Q = vazão, v = velocidade, D = diâmetro, h = perda de carga) e à variável pressão p nos nós. A variável D ainda não é um valor comercial ou disponível. O resultado tem boa aproximação, pois apresenta três nós com pressões mínimas impostas de 30 mca. Os dados de inicialização usados no programa foram: $D(a) = 200$ mm, $v(a) = v_{\min}$, e $Q(a) = 0,05m^3/s$ para todos os arcos.

Segunda etapa:

Na etapa anterior, o valor do diâmetro D do arco “ a ” é um valor que comercialmente não existe ou não está disponível para usar na rede. Então, nesta segunda etapa, o valor de D será ajustado para valores comerciais (variáveis discretas), disponíveis de acordo com a tabela mostrada na Figura 4c.

A Figura 5 mostra o desdobramento do diâmetro não comercial encontrado na primeira etapa em diâmetros comerciais que melhor se aproximam.


 Figura 5: desdobramento do diâmetro D do arco “ a ” em diâmetros comerciais.

O objetivo desta etapa é usar diâmetros comerciais imediatamente superiores a D , que será denominado D inicial e o imediato inferior a D , denominado D final, de tal forma que sejam usados dois trechos. Observe-se o sentido de fluxo da água na Figura 5; o primeiro trecho (L inicial) deve utilizar o diâmetro D inicial; o segundo trecho (L final) deve utilizar o diâmetro D final.

Para esta segunda etapa, considera-se:

$$\text{Min } Z \equiv \sum_{a=1}^M L(a)_{\text{inicial}} \cdot P(D(a)_{\text{inicial}}) + L(a)_{\text{final}} \cdot P(D(a)_{\text{final}})$$

s.a.:

$$\sum Q_{entrada}(i) - \sum Q_{saida}(i) = demanda(i) \quad \forall \text{ nó} \quad (R11)$$

$$h(a) = \frac{10,6792|Q(a)|Q(a)^{0,852}}{C(a)^{1,852}D(a)_{inicial}^{4,87}}L(a)_{inicial} + \frac{10,6792|Q(a)|Q(a)^{0,852}}{C(a)^{1,852}D(a)_{final}^{4,87}}L(a)_{final} \quad \forall \text{ arco} \quad (R12)$$

$$\sum h(a) = 0 \quad \forall \text{ circuitos} \quad (R13)$$

$$p(j) = p(i) - h(a) + Z(i) - Z(j) \quad \forall \text{ nó} \quad (R14)$$

$$p(i) \geq p_{\min} \quad \forall \text{ nó} \quad (R15)$$

$$v(a)_{inicial} = \frac{4|Q(a)|}{\pi D(a)_{inicial}^2} \quad \forall \text{ arco} \quad (R16)$$

$$v(a)_{final} = \frac{4|Q(a)|}{\pi D(a)_{final}^2} \quad \forall \text{ arco} \quad (R17)$$

$$v(a)_{inicial} \leq v_{\max} \quad \forall \text{ arco} \quad (R18)$$

$$v(a)_{final} \leq v_{\max} \quad \forall \text{ arco} \quad (R19)$$

$$v(a)_{inicial} \geq v_{\min} \quad \forall \text{ arco} \quad (R20)$$

$$v(a)_{final} \geq v_{\min} \quad \forall \text{ arco} \quad (R21)$$

$$L(a)_{inicial} + L(a)_{final} = L(a) \quad (R22)$$

$$L(a)_{inicial} \geq 0; L(a)_{final} \geq 0$$

As variáveis do problema são:

$$L(a)_{inicial}, L(a)_{final}, v(a)_{inicial}, v(a)_{final}, p(i), h(a) \text{ e } Q(a).$$

As variáveis $D(a)_{inicial}$ e $D(a)_{final}$ serão decididas pelos comprimentos respectivos $L(a)_{inicial}$ e $L(a)_{final}$, como pode observar-se na Tabela 4.

O custo de implantação da segunda etapa (resultados gerados para o sistema de rede usando o GAMS) é de US\$ 410.690,00. Os demais resultados são mostrados na Tabela 4:

Tabela 4: resultado final da otimização (GAMS)

arco	Q(m ³ /s)	L _{inicial}	L _{final}	h(m)	nó	p(mca)	arco	D _{inicial}	D(mm)	D _{final}
1	0,3110	1.000,00	0,00	6,81	1	35,00	1	457,2	456,0	406,4
2	0,1020	204,40	795,60	13,19	2	53,19	2	304,8	263,0	254,0
3	0,1820	0,00	1.000,00	4,47	3	30,00	3	457,2	407,0	406,4
4	0,0006	807,26	192,74	18,72	4	43,72	4	50,8	25,0	25,4
5	0,1480	759,71	240,29	3,72	5	30,00	5	406,4	390,0	355,6
6	0,0560	1.000,00	0,00	5,01	6	30,01	6	254,0	253,0	203,2
7	0,0740	895,47	104,53	10,00	7	30,00	7	254,0	244,0	203,2
8	0,0006	913,56	86,45	10,00	8		8	50,8	25,0	25,4

O arco 1 tem o diâmetro de 457,2 mm (18") em toda sua extensão, enquanto o arco 2 tem os primeiros 204,40 m com o diâmetro de 304,8 mm (12") e os outros 795,60 m com o diâmetro 254,0mm (10").

A Figura 6 apresenta os resultados comparativos entre a versão original e os obtidos a partir da utilização de: Alverovits, PNL2000 via Excel e PNL2000 via GAMS (DNLP).

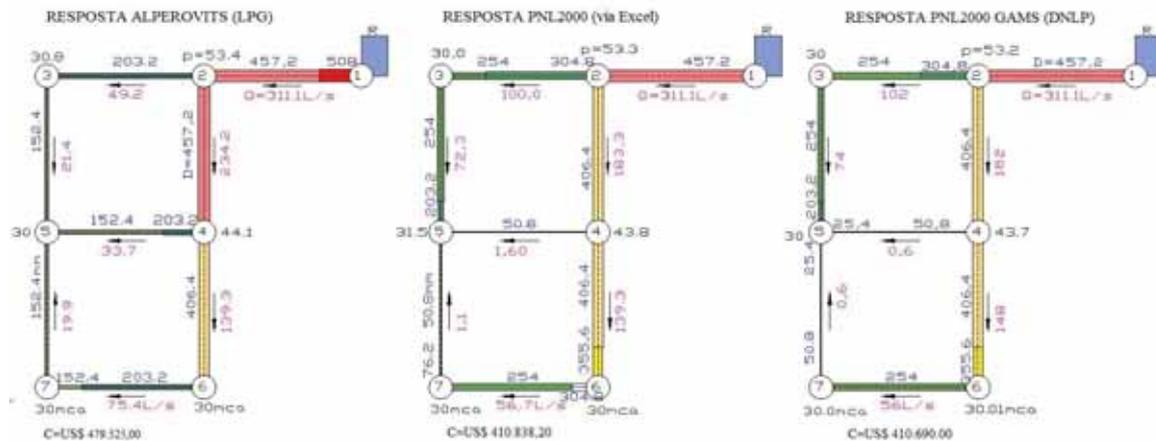


Figura 6: resultados comparativos (diâmetros, vazões e pressões).

A Tabela 5 apresenta os custos de implantação da rede de distribuição de água *Two Loop* obtidos por diferentes pesquisadores e pelos métodos PNL2000 (via Excel) e PNL2000 (GAMS, *solver* DNLP), utilizados neste trabalho.

Tabela 5: comparativo com outros métodos e pesquisadores

	Alverovits (GLP) 1977	Ezzeldin <i>et al.</i> (PSO) 2013	Liong <i>et al.</i> (SCE) 2004	Savic e Walters (GA's) 1997	PNL2000 via Excel	PNL2000 via Gams
custo US\$	479.525,00	419.000,00	419.000,00	419.000,00	410.838,20	410.690,00
%	100,00%	87,38%	87,38%	87,38%	85,68%	85,65%

Como pode ser observado na Tabela 5, o método de PNL2000, programado em GAMS, apresentou o menor custo de implantação do sistema. Liong e Atiquzzaman (2004) usaram o método de SCE e compararam os resultados com diferentes algoritmos. Os custos finais encontrados foram de US\$ 419.000,00.

Os resultados do sistema foram comparados com o simulador hidráulico Epanet 2.0, os dados requeridos pelo programa Epanet são: diâmetro, comprimento e rugosidade dos arcos, demandas e cotas dos nós. Os resultados de pressão e vazão coincidiram o que confirma que as respostas do sistema já apresentam resultados hidráulicamente equilibrados.

4. Conclusões

Este estudo permite concluir que o método determinístico que utiliza programação não linear, apresentado neste trabalho, é eficaz para a otimização de problemas de dimensionamento de redes de distribuição de água. Devido ao fato da existência de variáveis discretas e ainda não inteiras no problema, é necessário a implementação em duas etapas. Neste caso, o modelo PNL2000 se mostrou uma boa alternativa de solução. Ao tratar de programação não linear, é necessário o uso de *solvers* mais atualizados que suportem o tipo DNLP.

No que se diz respeito às fórmulas de Hazen-Williams, estas utilizam expoentes reais, onde o argumento pode ser um número positivo ou negativo. Daí a importância de usar a função valor absoluto, mas sem perder o sinal (indicativo do sentido), pois é importante saber qual é o sentido do fluxo da água.

No sistema de redes de distribuição de água *Two Loop*, o *solver* utilizado que suporta o DNLP mostrou a eficácia em resolver este tipo de problema, apresentando resultados mais econômicos comparados aos métodos LPG, SCE, PNL2000 (via Excel) e GA's.

Para trabalhos futuros seria interessante o desenvolvimento de *solvers* do tipo MDNLP (*Mixed Discrete Nonlinear Programming*), o que tornaria possível a solução do problema de redes de distribuição de água em uma única etapa, sem a necessidade de utilização de simuladores hidráulicos, com a possibilidade de obtenção de resultados que convirjam para valores ótimos globais.

Referências

- Abebe, A. J., Solomatine, D. P.** (1998). Application of global optimization to the design of pipe networks. Proc., 3rd Int. Conf. on Hydroinformatics, Balkema, Rotterdam, Netherlands.
- ABNT**, NBR 12218 - Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público - Rio de Janeiro, 1994.
- Alperovits, E.; Shamir, U.** (1977) Design of optimal water distribution systems. Journal of Water Resources Research, New York - USA, v. 13, n. 6, p. 885-900
- Azevedo Netto, J. M.** et al. Manual de Hidráulica. 8ª edição. Edgard Blucher Ltda. São Paulo/SP. 1998.
- Ghahraman, B., Sepaskhah A.** Linear and non-linear optimization models for allocation of a limited water supply. 2004 John Wiley & Sons, Ltd.
- Costa, L. H. M.; Castro, M. A. H.; Ramos, H.** (2010). Utilização de um algoritmo genético híbrido para operação ótima de sistemas de abastecimento de água. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 187-196, Abril/Junho 2010.
- Cunha, M. D. C., Sousa, J.** (1999). Water distribution network design optimization: Simulated annealing approach." J. Water Resour. Plann. Manage. 10.1061/(ASCE)0733-496(1999)125:4(215), 215–221.
- Ezzeldin, R., Djebedjian, B., Saafan, T.** (2013) Integer discret particle swarm optimization of water distribution networks. J. Pipeline Syst. Eng. Pract. ASCE, 04013013-1 to 11.
- Formiga, K. T. M.** (1999). Metodologia de Otimização de Redes Malhadas Através da Programação Não-linear. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil). UFPB. 1999.
- Geem, Z. W.** (2006). Optimal cost design of water distribution networks using harmony search. Eng. Optimiz., 38(3), 259–280.
- Geem, Z. W.** (2009). Particle-swarm harmony search for water network design. Engineering Optimization, Vol. 41, 297–311.
- Gomes, H. P.; Formiga, K. T. M.** (2001), PNL2000 - Método prático de dimensionamento econômico de redes malhadas de abastecimento de água. Revista Brasileira de Recursos Hídricos - RBRH, Porto Alegre/RS, v. 6, n. 4, p. 91-108.
- Gomes, H.P.** Sistemas de Abastecimento de Água – Dimensionamento Econômico e Operação de Redes e Elevatórias. 2ª Edição. João Pessoa: UFPB, 2004.
- Gouveia, R.M.M.**, Modelo computacional de otimização para dimensionamento de redes de distribuição de água abastecidas por múltiplos bombeamentos - tese de doutorado -UFPB -João Pessoa, 2012.
- Kennedy, J., Eberhart, R.** (1995). Particle swarm optimization. IEEE Int. Conf. on Neural Networks, Vol IV, IEEE Service Center, Piscataway, 1942 – 1948.
- Liong, S.-Y., and Atiquzzaman,** (2004). Optimal design of water distribution network using shuffled complex evolution. J. Inst. Eng., 44(1), 93–107.
- Mognon V. R.** Algoritmos Genéticos Aplicados na Otimização de Antenas, UFPR, Dissertação de Mestrado. 2004
- Rosendo, M. Pozo, A.** (2010). A hybrid particle swarm optimization algorithm for combinatorial optimization problems. In: Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2010. Barcelona, Spain: IEEE Computer Society, p. 1–8.
- Savic, D. A.; Walters, G. A.** - Genetic algorithm for least-cost design of water distribution networks. Journal of water resources planning and management, v. 123, n. 2, p. 67-77, 1997.
- Tsutiya, M.T.** Abastecimento de Água. 3ª Edição. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2006.

Viana, S. Dimensionamento otimizado de redes de distribuição de água com componentes hidráulicos utilizando algoritmos genéticos. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande. 2007.

Zecchin, A. C., Simpson, A. R. Maier, H. R. Nixon, J. B. (2005). Parametric study for an ant algorithm applied to water distribution system optimization. IEEE Trans. Evol. Comput., 9(2), 175–191.

