

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA

**MINIMIZAÇÃO DE PERDAS FÍSICAS
EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA
COM A UTILIZAÇÃO DE ALGORITMOS GENÉTICOS**

VICTOR DIB YAZBEK FILHO

*Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Tecnologias Ambientais da Universidade Federal de
Mato Grosso do Sul como requisito parcial para obtenção
do título de Mestre em Saneamento Ambiental e Recursos
Hídricos*

Orientador: Prof. Dr. Robert Schiaveto de Souza

Campo Grande, agosto de 2003

APRESENTAÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, sob a orientação do Prof. Dr. Robert Schiaveto de Souza.

Meus sinceros agradecimentos ao orientador pela ética, profissionalismo, paciência e cordialidade com que conduziu os trabalhos;

Meus reconhecimentos aos Professores Dr. Carlos Nobuyoshi Ide, e Dr. Sérgio João De Luca, pela compreensão e generosidade;

Aos professores e funcionários do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, agradeço a forma cordial com que fui acolhido e pelo constante incentivo;

Agradeço ao mestre e doutorando Peter Batista Chueng pela presteza, sempre que solicitado;

Agradeço também aos colegas mestrandos Luis Fernando de Souza Gameiro e Rita de Cássia do Prado Guido Gameiro, pela ajuda nos momentos de dificuldades, que foram vários;

Aos colegas e dirigentes da Empresa de Saneamento de Mato Grosso do Sul S/A, obrigado pelo apoio durante o período da realização deste trabalho;

Homenageio, *in memoriam*, o amigo e Prof. Hélio Yoshiaki Ikeziri, vítima da violência, ao cursar o mestrado em odontologia na Universidade de São Paulo;

Lembro com saudade de minha mãe, Maria da Gloria;

Minha gratidão a meu pai Victor, e aos meus filhos, Felipe, Murillo e Maysa, pelo incentivo que me deram, e que talvez não saibam;

Sou grato pelas palavras de encorajamento de pessoas queridas que me cercam;

Agradeço aos amigos espirituais, e

Agradeço a Deus, o princípio e o fim de todas as coisas.

SUMÁRIO

	Pág.
LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	ii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	iii
RESUMO.....	v
<i>ABSTRACT</i>	vi
1. INTRODUÇÃO	01
2. OBJETIVO.....	03
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	04
3.1 Análise de Redes.....	04
3.1.1 Métodos de Ajustes Simples.....	
3.1.2 Métodos de Ajustes Simultâneos.....	
3.1.3 Válvulas Redutoras de Pressão.....	
3.2 Minimização de Perdas.....	10
3.3 Algoritmos Genéticos – Aplicações	13
4. METODOLOGIA	17
4.1 Formulação Hidráulica.....	17
4.2 Controle Ótimo de Válvulas em Redes de Distribuição de Água	20
4.3 Formulação Hidráulica com Perdas Físicas na Rede.....	25
4.4 Aspectos Computacionais.....	28
4.5 Algoritmos Genéticos	32
4.6 Procedimento Iterativo.....	38
4.7 Linguagem de Programação e Equipamento Computacional.....	38
4.8 Aplicações	39

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
5.1 Rede Exemplo 1.....	40
5.2 Rede Exemplo 2.....	43
6. CONCLUSÕES.....	61
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 3.1 - Esquema de funcionamento de uma válvula redutora de pressão.....	10
FIGURA 3.2 - Relação entre índice de perda e pressão	11
FIGURA 4.1 - Rede usada por NIELSEN (1989)	28
FIGURA 5.1 - Rede exemplo 1.....	40
FIGURA 5.2 - Rede exemplo 2	44
FIGURA 5.3 - Variação do nível do reservatório 1 (nó 23)	47
FIGURA 5.4 - Variação do nível do reservatório 2 (nó 24)	47
FIGURA 5.5 - Variação do nível do reservatório 3 (nó 25)	47
FIGURA 5.6 - Abertura da válvula 1 da rede exemplo 2.....	50
FIGURA 5.7 - Abertura da válvula 2 da rede exemplo 2.....	50
FIGURA 5.8 - Abertura da válvula 3 da rede exemplo 2.....	50
FIGURA 5.9 - Comparação das vazões de perdas físicas na rede exemplo 2.....	51
FIGURA 5.10 - Comparativo dos volumes de perdas físicas na rede exemplo 2.....	52
FIGURA 5.11 - Pressão no nó 18 da rede exemplo 2, sem válvula de controle.....	54
FIGURA 5.12 - Variação diária da demanda na rede exemplo 2.....	54
FIGURA 5.13 - Pressão no nó 18 da rede exemplo 2, com válvula de controle.....	54

LISTA DE TABELAS

	Pág.
TABELA 5.1 - Informações dos nós da rede exemplo 1.....	41
TABELA 5.2 - Informações complementares da rede exemplo 1.....	41
TABELA 5.3 - Pressões nos nós da rede exemplo 1.....	41
TABELA 5.4 - Vazões nos trechos da rede exemplo 1.....	42
TABELA 5.5 - Configuração otimizada das válvulas de controle na rede exemplo 1..	42
TABELA 5.6 - Vazão de perda física na rede exemplo 1.....	43
TABELA 5.7 - Volume de perda física na rede exemplo 1.....	43
TABELA 5.8 - Níveis dos reservatórios da rede exemplo 2.....	45
TABELA 5.9 - Informações dos nós da rede exemplo 2.....	45
TABELA 5.10 - Informações complementares da rede exemplo 2	46
TABELA 5.11 - Configuração otimizada das válvulas de controle na rede exemplo 2	49
TABELA 5.12 - Vazões de perdas físicas na rede exemplo 2.....	49
TABELA 5.13 - Volume diário de perda física na rede exemplo 2.....	52
TABELA 5.14 - Pressões na rede exemplo 2 (0 a 12 horas).....	55
TABELA 5.15 - Pressões na rede exemplo 2 (12 a 24 horas).....	56
TABELA 5.16 - Vazões na rede exemplo 2, trechos 1 a 22 (0 a 12 horas).....	57
TABELA 5.17 - Vazões na rede exemplo 2, trechos 23 a 37 (0 a 12 horas).....	58
TABELA 5.18 - Vazões na rede exemplo 2, trechos 1 a 22 (12 a 24 horas).....	59
TABELA 5.19 - Vazões na rede exemplo 2, trechos 23 a37 (12 a 24horas).....	60

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Incidência
C	Coefficiente de Hazen-Willians
CL	Coefficiente de perda física de água por unidade de comprimento
D	Diâmetro ou resistência
f	Função
fm	Fator multiplicador
g	Cota geométrica
H	Perda de carga
h	Energia
K	Constante da fórmula de perda de carga
L	Comprimento
m	Número de trechos
n	Número de nós
ng	Número de gerações
np	Número de indivíduos
nr	Número de referencia de nó crítico
P	Pressão média ou probabilidade
p	Pressão
Q	Demanda ou consumo
QS	Vazão de perda de física de água
q	Vazão
R	Constante da fórmula de vazão
RS	Constante da fórmula de perda física de água
r	Numero de reservatórios

V	Condição de abertura de válvula ou variável de decisão
Y	Número de válvulas
α	Expoente da formula de perda de carga
β	Expoente da formula de perda de carga
γ	Coefficiente de linearização
μ	Coefficiente do fator multiplicador de penalidade
φ	Coefficiente do fator multiplicador de penalidade

Índices

apt	Aptidão
c	Recombinação
e	Local
i	Trecho
j	Nó
k	Iteração
m	Mutação
max	Máxima
min	Mínima
obj	Objetivo
r	Reservatório
s	Sobrevivência
set	Contrôle
t	Transposta
x	Perda física
0	Inicial

RESUMO

YAZBEK FILHO, V.D. (2003). *Minimização de perdas físicas em redes de distribuição de água com a utilização de algoritmos genéticos*. Campo Grande, 2003. **66 p.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Brasil.

As perdas físicas em um sistema de abastecimento de água representam um percentual significativo do volume de água produzido e distribuído à população. Elevados índices de perdas físicas causam prejuízos econômicos, além da necessidade de antecipação de investimentos na capacidade produtora do sistema. Este trabalho aborda a minimização das perdas físicas em uma rede de distribuição de água, através do controle de pressões, observadas as mínimas condições de abastecimento, com o emprego de válvulas redutoras de pressão, e a utilização de algoritmos genéticos. Apresenta também, uma nova formulação hidráulica que inclui a componente de perda física para a análise de uma rede. Por fim, a performance do método proposto é demonstrada pela aplicação em duas redes exemplos.

Palavras-chave: *algoritmos genéticos, minimização de perdas, redes de distribuição de água, válvulas redutoras de pressão.*

ABSTRACT

YAZBEK FILHO, V.D. (2003). *Minimization of leakage in water distribution networks by utilization of genetic algorithms*. Campo Grande, 2003. **66p**. Master' Dissertation - Federal University of Mato Grosso do Sul, Brazil (in Portuguese).

The leakage in water supply systems represents a significant percentage of the amount of water produced and distributed to the population. High rates of leakage cause economic loss, and furthermore the necessity for premature investments in order to increase the water producing capacity of the system. The present work concerns the minimization of leakage in water distribution networks, through pressure control, observing the minimum supply conditions through the utilization of pressure control valves and genetic algorithms. A new hydraulic formulation is presented that includes a leakage term for analyzing the network. Finally, the performance of the method is demonstrated by application in two example networks.

Key-words: *genetic algorithms, minimization of leakage, water distribution networks, pressure control valve.*

1. INTRODUÇÃO

As perdas em um sistema de abastecimento de água podem representar uma grande porcentagem do total de água fornecida, dependendo da idade e da deterioração do sistema. Como consequência desta perda e o aumento da população, áreas urbanas podem experimentar falta de água. A perda envolve não apenas o desperdício da água tratada e bombeada, mas pode significar, com frequência, o investimento de capital na expansão da capacidade do sistema, ou a busca por mananciais alternativos. Nestes casos, uma análise econômica do sistema pode recomendar medidas que reduzam as perdas (REIS, PORTO e CHAUDHRY,1997).

As perdas em um sistema de abastecimento de água podem ser consideradas como perdas não físicas e perdas físicas.

As perdas não físicas, estão relacionadas com o processo de comercialização da água consumida pela população: são erros na macro e micromedição, falhas em cadastramento de usuários, ligações clandestinas, enfim eventos que fazem com que volumes efetivamente consumidos não sejam faturados.

Já a perda física está relacionada com os volumes de água que são realmente perdidos ao longo do processo de captação, adução, tratamento, reservação e distribuição da água, ou seja, toda a cadeia de transformação da água bruta em água apropriada para consumo e sua entrega ao consumidor.

O combate à perda física nos sistemas de abastecimento de água torna-se cada vez mais relevante, tanto no aspecto da utilização racional dos recursos hídricos, como também devido a escassez de capitais para investimentos no setor de saneamento básico, principalmente nos casos em que não há incremento de usuários e a análise do empreendimento através do custo marginal mostra-se inviável.

Graças ao desenvolvimento computacional das ultimas décadas, modelos matemáticos cada vez mais complexos, tem possibilitado o surgimento de técnicas avançadas nas questões relacionadas ao projeto e dimensionamento ótimo de redes de distribuição de água.

No entanto o problema do controle operacional das perdas físicas, tem recebido menor atenção (JOWITT e XU,1990).

Este trabalho aborda a minimização de perdas físicas de água utilizando a técnica dos algoritmos genéticos, em redes de distribuição de água, através do controle de pressões, observadas as mínimas condições de abastecimento, com o emprego de válvulas redutoras de pressão. No capítulo a seguir é definido o objetivo da pesquisa. No capítulo 3, é realizada uma revisão bibliográfica descrevendo os mais representativos instrumentos matemáticos de análises de redes; a minimização de perdas com a utilização das válvulas redutoras de pressão; os algoritmos genéticos e algumas de suas aplicações. No Capítulo 4, apresenta-se a metodologia a ser utilizada na pesquisa, descrevendo a formulação para o controle ótimo de válvulas redutoras de pressão; a formulação hidráulica incluindo as perdas físicas na rede; os aspectos computacionais; a técnica dos algoritmos genéticos utilizada no experimento deste trabalho e as aplicações da pesquisa. No capítulo 5 são apresentados os resultados e discussões do experimento, aplicado a duas redes exemplos. No capítulo 6 são apresentadas as conclusões. Por fim, o trabalho é encerrado, com a relação das referências bibliográficas utilizadas.

2. OBJETIVO

Esta pesquisa, tem como objetivo a aplicação da técnica dos algoritmos genéticos na determinação da configuração otimizada para a regulagem de válvulas redutoras de pressão, instaladas em um dado sistema de distribuição, com a finalidade de obter-se o menor volume de perda física de água, para um período de vinte e quatro horas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para que se possa atingir o objetivo desta pesquisa, através de uma metodologia adequada é realizada a seguir, uma revisão bibliográfica em três campos de estudos: a) o conhecimento dos diversos modelos de análise e resolução de redes hidráulicas; b) o conhecimento das técnicas dos algoritmos genéticos e c) o conhecimento de significativos trabalhos na questão da regulação ótima de válvulas redutoras de pressão para minimização de perdas.

3.1 Análise de Redes

Projetar uma rede de distribuição de água consiste em determinar os diâmetros, vazões, perdas de carga para todos os elementos do sistema, e os correspondentes valores das condições de contorno, de acordo com as normas técnicas em vigor.

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas, define as condições gerais e específicas para projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público, através da NBR- 12218/1994 (ABNT,1994).

Os modelos se baseiam em técnicas numéricas iterativas e a solução é obtida quando as vazões satisfazem as equações da continuidade em cada nó e a equação da energia em cada canalização (SOUZA,1994):

- Equação do nó: Para cada nó do sistema, a soma algébrica das vazões (q) no nó é igual a zero:

$$\sum q = 0 \quad (3.1)$$

- Equação do circuito. Para cada circuito fechado do sistema, a soma algébrica das perdas de carga (H) é igual a zero:

$$\sum H = 0 \quad (3.2)$$

Estas equações são não lineares tornando necessária a utilização de métodos numéricos iterativos, iniciando com uma solução aproximada que é aperfeiçoada a cada iteração.

Vários modelos matemáticos tem sido desenvolvidos para a análise de sistemas de distribuição de água . Esses modelos podem ser classificados em dois grupos principais:

- Métodos de ajustes simples;
- Métodos de ajustes simultâneos.

3.1.1 Métodos de ajustes simples

Nos métodos de ajustes simples, os ajustes são calculados de maneira independente, e frequentemente ocorrem problemas quanto à convergência. Em ordem cronológica, destacam-se os seguintes métodos: Analogia Elétrica, Hardy-Cross, Comprimento Equivalente e o de Proporcionalidade das Vazões, descritos a seguir.

Um dos primeiros métodos utilizados desenvolvia uma analogia entre um circuito elétrico e um circuito hidráulico: resistores comuns lineares representavam os tubos; fontes elétricas representavam os reservatórios; parâmetros hidráulicos, tais como a diferença de energia, podiam ser observados pela diferença de potencial; e fatores de atrito das tubulações eram representados pelas resistências elétricas. Assim, quando um circuito era operado, o brilho dos resistores direcionava a atenção para os tubos que tinham a maior perda de carga.

Apesar deste método não necessitar de uma complexa formulação matemática, a característica linear entre a voltagem de um resistor comum era diferente da característica não linear da perda de carga e vazão, necessitando um procedimento iterativo ou a aplicação de um fator de correção, ou a utilização de um resistor especial não linear que permitia uma analogia elétrica direta através de escalas convenientes dos instrumentos elétricos (McILROY,1950).

O mais antigo método matemático para solução sistemática de redes de distribuição de água, é o método de Hardy-Cross (CROSS,1936; SHAMIR e HOWARD,1968). A técnica de relaxação de Hardy-Cross, apresentada em 1936, é um processo iterativo que envolve a aplicação sucessiva de correções ótimas para as vazões em cada linha de circuito fechado ou para as energias em cada nó. Nessa técnica os valores iniciais das vazões ou das energias são assumidos.

O método do balanço de vazão, embora menos usado, é mais desejável para análise de redes quando a análise é feita por computador, assim sendo, as bombas e reservatórios podem ser conectados ao sistema, mas tem sido observado maiores problemas de convergência. O

método do balanço de energia tem sido o mais usado, pois há menos circuitos em uma rede do que nós, conseqüentemente há um número menor de correções para se calcular (SOUZA,1994).

Outro método de ajuste simples é o do comprimento equivalente proposto por O'Connor em 1944 (RAMAN e RAMAN, 1966) que permite a determinação dos diâmetros econômicos por um processo de relaxação através de um fator de correção. Conseqüentemente, este método é útil particularmente no projeto de novas redes e também para projeto de reforço em redes existentes, indicando os diâmetros necessários a serem adicionados.

Já o método da proporcionalidade das vazões, apresentado por McPHERSON (1960) é uma ferramenta aproximada para determinar as perdas de carga entre dois pontos quaisquer da rede, particularmente para redes com reservatórios, pois pode ser calculada rapidamente. A perda de carga para um largo intervalo de demanda de vazões do sistema e a taxa de armazenamento, podem ser calculadas diretamente em apenas duas ou três análises completas da rede.

3.1.2 Métodos de ajustes simultâneos

As equações hidráulicas básicas que descrevem o movimento em redes, são equações não lineares, que não podem ser resolvidas pelos métodos da álgebra linear. Essas equações têm sido expressas de duas maneiras: em termos das incógnitas das vazões nos tubos (equações de circuito) e em termos das incógnitas das energias nos nós (equações dos nós). Muitos algoritmos têm sido propostos para resolver essas equações, e essas técnicas são largamente utilizadas.

No método de Hardy-Cross, e nos descritos anteriormente, os ajustes são calculados independentemente e problemas de convergência são frequentemente encontrados. Procedimentos para calcular simultaneamente os ajustes de correção da variável desconhecida, têm aperfeiçoado muito a convergência e formam uma base para aplicações mais gerais, onde bombas, válvulas, reservatórios, e outros componentes hidráulicos estão presentes na rede. Desta forma, a memória computacional exigida aumenta significativamente (SOUZA,1994).

Método de Newton-Raphson

A técnica de Newton-Raphson, baseia-se em achar um conjunto de aperfeiçoamentos ou correções para os valores das incógnitas em cada iteração. Os aperfeiçoamentos são calculados a partir do termo de primeira ordem de uma expansão de Taylor sobre o argumento atual da solução. A partir de 1963, o método iterativo de Newton-Raphson foi utilizado para resolver problemas de sistemas de distribuição de água, e desde então projetistas e pesquisadores têm preferido este método.

Segundo LEMIEUX (1972), o método de Newton-Raphson tem convergência quadrática sendo um dos melhores métodos conhecidos.

No método do ajuste simultâneo das energias, as estimativas iniciais podem ser escolhidas arbitrariamente, mas infelizmente várias dificuldades levam a baixa convergência e o número de equações é maior em relação ao método de ajuste simultâneo das vazões (equações de circuito), uma vez que o número de nós é maior que o número de circuitos.

No método do ajuste simultâneo das vazões, é necessário definir os circuitos, e estimar vazões iniciais em todos os tubos, de tal forma que atendam a continuidade (SOUZA,1994).

Vários pesquisadores propuseram modificações na programação do método de Newton-Raphson, levando em consideração a questão da possibilidade de não convergência para estimativas iniciais grosseiras, redução do tempo de iteração e de recursos computacionais, podendo ser citados entre outros:

EPP e FOWLER (1970) criaram um completo e eficiente programa para resolver os problemas de escoamento permanente em redes de água. As novas características do programa incluem um método automático de estimativas de vazões iniciais, que leva a uma mais rápida convergência e redução da memória computacional, através de um algoritmo que numera automaticamente os circuitos, gerando uma matriz simétrica e diagonal mínima.

LAM e WOLLA (1972 a,b) propuseram um programa que, em contraste com outros, gera o sistema de equações nos nós apenas uma vez, no início do processo de análise, e desta forma minimiza o tempo requerido no processo iterativo.

DODGE, HOELLEIN e TETMAJER (1978), apresentaram um programa que permite o cálculo de redes de até 1.000 nós, e a inclusão dos mais diversos componentes hidráulicos, como bombeamento a partir de poços ou reservatórios, *boosters*, válvulas de retenção, válvulas redutoras de pressão, reservatórios com qualquer forma geométrica, etc. Algoritmos

de reordenação dos números dos nós e de matriz esparsa, foram utilizados para redução da memória computacional requerida.

Método da Teoria Linear

O método da teoria linear, está baseado na linearização das equações básicas não lineares da hidráulica, em termos de uma aproximação inicial, e pode ser formulado para o cálculo simultâneo das vazões nas canalizações, ou das energias nos nós. Primeiramente o cálculo simultâneo das vazões foi proposto por MUIR (1967) e WOOD e CHARLES (1972), e o cálculo simultâneo das energias por MARLON, HARDISON, JACOBSON e BIGGS (1966).

Como o número de tubos em uma rede é muito maior que o número de nós ou circuitos, o método da teoria linear para o cálculo simultâneo de vazões, resulta em um sistema com mais equações e, conseqüentemente, requer uma memória computacional maior. Por outro lado, converge significativamente em um menor número de iterações em relação aos outros métodos, e não requer restrições na inicialização. Essa formulação é mais recomendada para problemas em que as vazões externas são conhecidas.

Já a formulação para o cálculo das energias dos nós, necessita de um número menor de equações em relação ao cálculo simultâneo de vazões. Quando se conhece todas as demandas e a energia em nenhum nó é conhecida, é necessário fixar uma energia em um nó (geralmente num ponto mais distante da rede). Esta formulação é mais recomendada para problemas em que são conhecidas as energias nos reservatórios.

O método baseado na formulação das vazões apresenta menos problemas de divergência do que o método baseado na formulação das energias nos nós.

Com o objetivo de aperfeiçoar a convergência do método linear, MUIR (1967) propôs uma formulação para o cálculo simultâneo das vazões nos tubos, adotando para os valores de vazões a partir da segunda iteração, a média ponderada das vazões da iteração anterior e as vazões atuais.

WOOD e CHARLES (1972) sugerem estimativas iniciais de vazões para utilização no método linear e afirmam que a convergência da solução é afetada pela precisão da estimativa inicial, sendo que estimativas grosseiras podem levar a uma situação onde a solução não converge. WATANATADA (1973), FIETZ (1973) e KALLY (1973) sugeriram aperfeiçoamentos no programa desenvolvido por WOOD e CHARLES (1972).

JEPPSON e TAVALLALE (1975) adicionaram bombas e reservatórios na análise de redes para estudar o comportamento da convergência pelo método da teoria linear.

ISAACS e MILLS (1980) desenvolveram um novo algoritmo para o cálculo simultâneo das energias, aplicado no método linear, apropriado para computadores de pequeno porte. O método requer estimativas dos valores absolutos das vazões em cada tubo, podendo ser adotado inicialmente o mesmo valor de vazão para todos os tubos, ou valores de vazões que correspondam a uma velocidade de 1,0 m/s nas tubulações.

NIELSEN (1989) propôs uma nova formulação para resolver problemas de redes pelos métodos lineares e não lineares baseado na teoria dos grafos.

(Teoria dos grafos)

O método proposto por NIELSEN (1989), é uma generalização e um aperfeiçoamento dos métodos apresentados por LAM e WOLLA (1972 a, b) e CHANDRASHEKAR e STEWART (1975), observa-se que tal hibridização está implícita na linearização proposta por RIGHETTO (1977).

3.1.3 Válvulas redutoras de pressão

Dada a relevância que este componente hidráulico tem no modelo a ser estudado, é feito, na sequência, um breve estudo sobre o dispositivo.

Uma válvula redutora de pressão pode ser idealizada, supondo ser governada por uma equação característica (relação pressão-vazão). Os principais trabalhos encontrados na literatura sobre análise de redes, incluindo válvulas à rede são: ZARGHAMEE (1971), JEPPSON e DAVIS (1976), DODGE, HOELLEIN e TETMAJER (1978), CHANDRASHEKAR (1980).

ZARGHAMEE (1971) desenvolveu um modelo matemático para análise de redes consistindo de condutos, bombas, válvulas redutoras de pressão e reservatórios. O trabalho dá uma descrição do comportamento de vários componentes de um sistema de distribuição de água. Os componentes hidráulicos são governados por diferentes equações, que relacionam as vazões com as pressões.

JEPPSON e DAVIS (1976) apresentaram um eficiente método para incorporar válvulas redutoras de pressão em redes, para diversas situações e formulações. Segundo os

pesquisadores, uma válvula redutora de pressão é projetada para manter uma pressão constante a jusante independentemente da pressão a montante da válvula.

DODGE, HOELLEIN e TETMAJER (1978) escreveram um programa usando o método de ajustes simultâneos das energias e a técnica de Newton-Raphson, para a análise de grandes redes com bombas, reservatórios, válvulas de retenção, válvulas redutoras de pressão e outros elementos hidráulicos.

CHANDRASHEKAR (1980) apresentou um modelo simples e fácil de implementar ou incorporar válvulas redutoras de pressão. Esse modelo é particularmente desejável, quando a análise de redes é feita para o cálculo simultâneo das energias.

Apresenta-se a seguir, de forma resumida, o modelo apresentado por CHANDRASHEKAR (1980):

Uma válvula é projetada para manter uma energia constante a jusante dela se a energia de montante h_e , for maior que a energia de controle da válvula h_{set} . Considerando um tubo i , com uma válvula, onde o nó j_2 é suposto ser o nó de montante (Figura 3.1). Definindo h_e e h_{set} como os valores de energia calculada e fixada no local da válvula, então se $h_e > h_{set}$, a válvula redutora é ativada, tal que a energia imediatamente depois da válvula seja igual a h_{set} . A vazão no tubo i é uma função de h_{set} e h_{j1} . Além disso, a vazão que deixa o nó j_2 deve ser ajustada a q_i :

$$q_i = \bar{K}_i^{-1/\alpha} (h_{set} - h_{j1})^{1/\alpha} \quad (3.3)$$

onde, \bar{K}_i é uma constante obtida da fórmula de perda de carga utilizada em função do comprimento, diâmetro e coeficiente de atrito da tubulação entre a válvula e o nó de jusante e α é um expoente ($1.8 \leq \alpha \leq 2.0$).

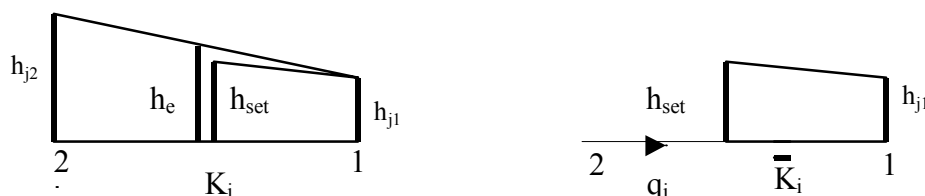


FIGURA 3.1 - Esquema de funcionamento de uma válvula redutora de pressão.

3.2 Minimização de Perdas

A tarefa básica de uma empresa operadora de uma rede de abastecimento é o fornecimento de água em quantidade suficiente, em condições de pressões adequadas, com qualidade aceitável, tão economicamente quanto possível (JOWITT e XU, 1990).

De alguma forma, as perdas sempre estão presentes em todos os sistemas de distribuição de água (PUDAR e LIGGETT, 1992).

Vários fatores afetam as perdas, tais como o estado e a qualidade dos tubos, as características do solo aonde foram assentados e a pressão na rede (quanto mais alta a pressão, maior o índice de perdas). Desta forma, é vantajoso reduzir as pressões tanto quanto possível, pois a pressão é o fator, dentre aqueles que afetam as perdas, que pode ser facilmente controlado (HINDI e HAMAM, 1991 a,b).

As implicações econômicas da redução das perdas são todas muito óbvias. A perda de água não apenas envolve despesas desnecessárias nos custos de bombeamento e tratamento, como também podem gerar prematuras necessidades de investimentos em novas fontes de captação de água, ou a expansão da capacidade do sistema para acompanhar o ritmo da demanda. As reduções das perdas resultarão em menor custo anual de operação e, além disso, o adiamento de investimentos de capital referentes à demanda do sistema.

O controle das perdas físicas de água, também concorre para a racionalização da utilização de recursos hídricos e seu melhor aproveitamento.

Pode ser visto na figura 3.2, que a perda aumenta com o aumento da pressão média, com a curva acentuando-se para pressões mais altas. Assim, redução de altas pressões, resulta em consideráveis reduções de perdas físicas de água. De um ponto de vista econômico é desejável que se regule pressões excessivas em níveis aceitáveis (JOWITT e XU, 1990).

Existem vários meios de se alcançar a redução da pressão excessiva, de acordo com o padrão de demanda na rede, tais como o estabelecimento de zonas de pressão na rede, redução na pressão de bombeamento e válvulas controladoras de fluxo (VAIRAVAMOORTHY e LUMBERS, 1998).

RATCLIFFE (1986) descreveu a operação e o desempenho destas válvulas através de várias pesquisas para redução de pressões na rede e, conseqüentemente, as perdas físicas,

sendo que o problema foi formulado como a busca da minimização das pressões excessivas do sistema, sujeito às suas restrições operacionais.

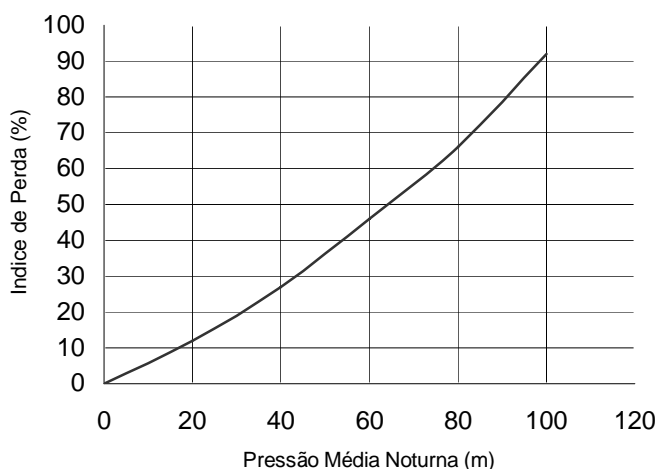


FIGURA 3.2 - Relação entre índice de perda e pressão.

STERLING e BARGIELA (1984) usaram uma função objetivo que buscava a minimização da soma de todas as pressões na rede, uma vez que pressões excessivas incrementam as perdas do sistema de distribuição de água. A formulação matemática baseava-se nas restrições do problema, mas não incluíam termos referentes às perdas, e aplicava o método de Newton-Raphson para a linearização das equações (VAIRAVAMOORTHY e LUMBERS, 1998).

GERMANOPOULOS e JOWITT (1989) propuseram uma formulação matemática em que as perdas eram explicitamente incorporadas às equações, neste caso linearizadas pelo método da teoria linear de ISAACS e MILLS (1980). VAIRAVAMOORTHY e LUMBERS (1998) apontaram uma desvantagem deste método, quanto ao procedimento adotado para linearizar a equação de perda de carga para os elementos da rede com válvulas de pressão. O procedimento baseava-se apenas nas pressões da iteração anterior, não incluindo a posição de abertura das válvulas.

JOWITT e XU (1990) apresentaram um algoritmo que ampliava o trabalho desenvolvido por GERMANOPOULOS e JOWITT (1989) em que se buscava minimizar diretamente a perda do sistema e não minimizar as pressões excessivas da rede. Os potenciais benefícios econômicos deste tipo de esquema de controle de válvulas, são avaliados pela comparação dos volumes de perdas resultantes, para os casos em que há controle e em que não há controle através das válvulas. O usual conjunto de equações não lineares, descrevendo

as pressões nos nós da rede e as condições de escoamento nas tubulações, são acrescentadas por termos que explicitamente levam em conta a dependência entre pressão e perda, e por termos que descrevem o efeito da ação das válvulas. Sucessivas linearizações destas equações usando o método da teoria linear proposto por WOOD e CHARLES (1972), permitiu formular e resolver um programa linear de minimização de perda (JOWITT e XU, 1990). O procedimento adotado para linearizar a equação de perda de carga dos elementos com válvulas redutoras de vazão, inclui a posição de abertura das válvulas da iteração anterior (VAIRAVAMOORTHY e LUMBERS, 1998).

STERLING e BARGIELA (1984); GERMANOPOULOS e JOWITT (1989) e JOWITT e XU (1990) aplicaram uma variante do método de programação linear para resolver o problema da otimização. O método da programação linear é um procedimento iterativo que envolve a linearização da função objetivo e das restrições a partir de um ponto atual, obtendo-se um novo ponto de solução, resolvendo-se o programa linear resultante. Este ponto é então usado para linearizar a função objetivo e as restrições, e o procedimento é repetido até atingir-se uma precisão desejada através de um critério de parada.

VAIRAVAMOORTHY e LUMBERS (1998) propuseram uma metodologia mais robusta e computacionalmente mais eficiente que as anteriormente formuladas por estes autores. A solução técnica envolve a resolução de uma seqüência de subproblemas de programação quadrática, que é uma aproximação do problema original, gerando assim a cada etapa elementos que são utilizados para atualizar o vetor solução. O método proposto tem uma melhor convergência, pois é quadrática, comparado com os anteriormente apresentados, que convergem linearmente.

HINDI e HAMAM (1991a,b) desenvolveram modelos matemáticos e técnicas computacionais para determinar as regulagens das válvulas redutoras de pressão para minimizar as perdas enquanto garantiam o suprimento para uma determinada demanda fixa e para um conjunto de demandas que representam a variação diária de consumo na rede, através da técnica da programação separável, por meio do qual as relações não lineares são consideradas como funções separadas, transformando assim um problema de programação não linear, em um outro equivalente e linear.

ALONSO *et al.* (2000) trataram a questão da minimização da perda total de um sistema para todo um período, pela adoção de uma aproximação do problema em que a perda total é minimizada através de uma série de sub-problemas, considerados independentes uns dos outros. Este procedimento recebeu o nome de paralelização do processo de otimização.

3.3 Algoritmos Genéticos – Aplicações

A procura da eficácia e eficiência em métodos numéricos de otimização tem levado os pesquisadores a observar e tentar reproduzir mecanismos de sistemas que são naturalmente robustos. Algoritmos genéticos são robustos métodos de busca, que procuram reproduzir matematicamente, os mecanismos genéticos naturais de seleção das populações, de acordo com os processos biológicos de sobrevivência e adaptação (GOLDBERG, 1989).

Desenvolvidos em 1975 por John Holland, os algoritmos genéticos são aceitáveis não só pela sua imitação aos sistemas naturais, pelos segredos de adaptação e sobrevivência das espécies, mas também por constituir-se em um mecanismo de busca robusta nos espaços complexos.

Popularizados por David Goldberg, os algoritmos genéticos são aplicados, principalmente em problemas de engenharia, não limitam hipóteses restritivas no seu espaço de busca e são computacionalmente simples.

Os objetivos dos autores foram investigar e projetar sistemas artificiais referentes aos mecanismos naturais das espécies (GOLDBERG, 1989).

Os algoritmos genéticos diferem das técnicas de busca convencionais, pois iniciam o processo gerando um conjunto inicial de soluções possíveis denominadas de “população”. Cada indivíduo desta população, denominado “cromossomo”, constitui uma possível representação completa da solução do problema. O cromossomo é um vetor, cujas características ou "genes" podem ser codificadas através de representação binária ou real. Por exemplo, no caso de representação binária, uma função com duas variáveis de decisão $V = (V(1), V(2))$, poderá ser representada por um cromossomo de 6 *bites*: 011001, sendo $V(1) = 011$ e $V(2) = 001$.

Gerada a “população inicial” de forma aleatória, o conjunto de vetores é submetido à avaliação da função aptidão, que representa uma medida da capacidade de sobrevivência de um elemento da população durante o processo de evolução.

Os cromossomos selecionados servirão de base para uma nova geração, através de alterações de suas codificações originais que podem se efetuadas de duas formas:

- Recombinação: dois cromossomos selecionados (cromossomos pais) têm sua cadeia de *bits* cortada em uma posição aleatória, produzindo dois novos indivíduos (cromossomos filhos), pela combinação das sub-partes em que foram divididos.
- Mutação: o objetivo deste operador é introduzir diversidade entre os novos indivíduos da população, sendo utilizado após a aplicação do operador de recombinação, quando é alterado um elemento da codificação, em uma posição definida aleatoriamente.

GOLDBERG e KUO (1987) afirmam que os algoritmos genéticos diferem da maioria dos métodos tradicionais pois trabalham com a codificação dos parâmetros e não com os parâmetros em si; trabalham a partir de um grupo de soluções e não com uma única solução; utilizam diretamente a função objetivo e utilizam regras probabilísticas e não determinísticas.

Muitos pesquisadores têm aplicado a técnica dos algoritmos genéticos para o projeto de aspectos de sistemas de tubulações (DANDY, SIMPSON e MURPHY, 1996).

GOLDBERG e KUO (1987) aplicaram algoritmos genéticos para a otimização da operação de tubulação de gás, com estações compressoras e bombas em série. O objetivo deste estudo foi minimizar as pressões enquanto era mantido um determinado fluxo para atendimento da demanda.

SAVIC e WALTERS (1997) aplicaram algoritmos genéticos em complexos e extensos sistemas de distribuição de água para dimensionamento e localização de bombas, de sistemas de reservação que resultem em reserva de incêndio e de emergência mais eficientes, bem como o estabelecimento do ponto de operação com custo mínimo para reservatórios de água, bombas de recalque e válvulas de pressão.

REIS, PORTO e CHAUDHRY (1997) utilizaram algoritmos genéticos para o problema da locação apropriada de válvulas de controle de pressão em um sistema de abastecimento de água e para sua regulagem de forma a obter-se a máxima redução de perdas para uma dada demanda nos nós e níveis dos reservatórios.

No estudo da otimização da operação de sistemas de distribuição de água, MONTESINOS *et al.* (1999) apresentaram um algoritmo genético modificado para incrementar a convergência do método, quando várias mudanças foram introduzidas nos processos de seleção e mutação.

Aspectos importantes em um sistema de distribuição de água, como a detecção de perdas e a calibração da rugosidade interna das tubulações, foram estudados com a utilização de algoritmos genéticos, inclusive com a adoção de novos operadores de recombinação e mutação, associado ao método do transiente inverso (VÍTKOVSKÝ *et al.*, 2000).

Algoritmos genéticos também foram utilizados para se definir a rede de amostragem ótima para medidas de vazões e pressões, com o propósito de calibração de redes, já que a rede de amostragem de monitoramento é geralmente constituída de reduzido número de pontos de observação, devendo ser escolhidos de maneira a fornecer o máximo de informações possíveis (SILVA *et al.*, 2001).

Depreende-se desta revisão bibliográfica, que o estado da arte continua avançando e que vários modelos matemáticos têm sido desenvolvidos para a análise e controle de sistemas de abastecimento e distribuição de água, e que um número significativo de aperfeiçoamentos têm sido implementados.

O problema da minimização de perdas em redes de distribuição de água, apenas recentemente tem recebido especial atenção, embora já existam algoritmos e técnicas sendo utilizadas.

Este trabalho focaliza sua atenção no desenvolvimento de conceitos e técnicas requeridas para a implementação de um eficiente esquema de controle ótimo de válvulas redutoras de pressão, com a utilização da técnica dos algoritmos genéticos, visando a minimização de perdas físicas em sistemas de distribuição de água.

No capítulo a seguir desenvolver-se-á a metodologia utilizada neste estudo.

4. METODOLOGIA

Válvulas podem ser incorporadas em uma rede de distribuição de água para manter as pressões em níveis que atendam as especificações de serviço, e minimizar as perdas físicas. As variáveis de decisão para o problema de minimização de perdas, são as diversas possibilidades de regulagens das válvulas, sendo necessário para cada conjunto de abertura (uma solução), o cálculo hidráulico da rede através da resolução das equações hidráulicas que determinem os valores das pressões nos nós e as vazões nos tubos, e o respectivo volume de água perdida.

Neste capítulo serão apresentados os instrumentos para a obtenção desta regulação ótima; o modelo matemático proposto para a resolução hidráulica do problema; a linguagem de programação; equipamento computacional e aplicações.

4.1 Formulação Hidráulica

NIELSEN (1989) propôs uma formulação para resolver problemas de redes pelos métodos lineares e não lineares baseado na teoria dos grafos. A seguir são apresentados detalhes desta formulação.

Considerando um movimento permanente de água ou gás em uma rede com m tubos, r reservatórios e n nós interiores, as grandezas conhecidas são:

- Tubos: comprimento, diâmetro e material.
- Vazões de projeto nos nós interiores: Q_1, \dots, Q_n .
- Energia nos reservatórios: h_{n+1}, \dots, h_{n+r} .
- As grandezas desconhecidas são:
- Energia nos nós interiores h_1, \dots, h_n .
- Vazões nas canalizações q_1, \dots, q_m .

sendo o tubo i conectado com os nós j_2 e j_1 ($j_2 > j_1$), a vazão q_i é positiva quando o sentido do movimento é do nó j_2 para o nó j_1 .

A equação da continuidade é aplicada para cada nó interior:

$$\sum_{i=1}^m A_{ij} q_i = Q_j \quad j = 1, \dots, n \quad (4.1)$$

onde $A_{ij} = 1$ quando j é um nó absorvente, $A_{ij} = -1$ quando j é um nó não absorvente e $A_{ij} = 0$ para outra situação.

As equações de perda de carga são aplicadas para cada circuito:

$$D_i q_i = H_i \quad i = 1, \dots, m \quad (4.2)$$

onde $H_i = h_{j2} - h_{j1}$;

h_{j1} e h_{j2} são as energias nos nós do tubo i , e D_i é o coeficiente de resistência do tubo i .

A resistência ao movimento D_i pode ser expressa em termos de q_i ou H_i :

$$D_i = K_i |q_i|^{\alpha-1} \quad i = 1, \dots, m \quad (4.3)$$

$$D_i = K_i^\beta |H_i|^{1-\beta} \quad i = 1, \dots, m \quad (4.4)$$

onde $\beta = 1/\alpha$, K_i é o coeficiente do tubo (dependendo do comprimento, diâmetro, material do tubo e fluido); e α é um expoente ($1.8 \leq \alpha \leq 2.0$).

Para facilitar o desenvolvimento, formula-se o problema em termos de vetores e matrizes:

$$Q = [Q_1, \dots, Q_n]^t \quad (4.5)$$

$$h_r = [h_{n+1}, \dots, h_{n+r}]^t \quad (4.6)$$

$$x = \begin{bmatrix} q \\ h \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$$q = [q_1, \dots, q_m]^t \quad (4.8)$$

$$h = [h_1, \dots, h_n]^t \quad (4.9)$$

onde o sobrescrito t denota a transposta do vetor.

Definindo a matriz A de ordem $m \times n$ composta pelos elementos A_{ij} dos nós interiores, a matriz A_r de ordem $m \times r$ composta pelos elementos A_{ij} dos nós com

reservatórios, e a matriz \bar{A} de ordem $m \times (n+r)$ composta pelas matrizes A e A_r , da equação da energia resulta:

$$H_i = -\sum_{j=1}^{n+r} A_{ij} h_j \quad i = 1, \dots, m \quad (4.10)$$

onde:

$$H = [H_1, \dots, H_m]^t \quad (4.11)$$

Da teoria dos grafos (SAVULESCO, 1980), que permite uma representação gráfica das relações existentes entre os elementos de uma rede, tem-se:

$$H = -Ah - A_r h_r \quad (4.12)$$

Da equação (4.2) e (4.12):

$$Dq + Ah = -A_r h_r \quad (4.13)$$

onde:

$$D = \text{diag}[d_1, \dots, d_m] \quad (4.14)$$

$D = D(x)$ é expresso em termos de q ou em termos de H .

Da equação (4.1):

$$A^t q = Q \quad (4.15)$$

Finalmente o sistema de equações para determinação de x pode ser escrito:

$$\begin{bmatrix} D(x) & A \\ A^t & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ h \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_r h_r \\ -Q \end{bmatrix} = 0 \quad (4.16)$$

onde $D(x) = \text{diag}[d_1(x), \dots, d_m(x)]$.

A equação do movimento (4.13) é linear em q . Supondo H_i diferente de zero, ou seja, D_i diferente de zero, tal que D é não singular e multiplicando a equação (4.13) por $A^t D^{-1}$ e considerando a equação (4.15), a solução é dada por:

$$A^t D^{-1} Ah + A^t D^{-1} A_r h_r = -Q \quad (4.17)$$

onde $D^{-1} = \text{diag}[1/d_1(h), \dots, 1/d_m(h)]$. Esse sistema é não linear de n equações com incógnita h . Uma vez calculado h , q é facilmente encontrado da equação (4.2).

Quando a expressão (4.4) é usada, é fácil mostrar que o método da teoria linear, e o método de Newton-Raphson, podem ser expressos numa forma comum:

$$h_{k+1} = h_k - \gamma[A^t D_k^{-1} A]^{-1}[Q + A^t D_k^{-1}(Ah_k + A_r h_r)] \quad (4.18)$$

onde $\gamma = 1$ para o método da teoria linear, e $\gamma = 1/\alpha$ para o método de Newton-Raphson .

Algoritmo - formulação em termos das energias

A formulação original proposta por Nielsen (1989) é:

$$h_{k+1} = h_k - \gamma[A^t D_k^{-1} A]^{-1}[Q + A^t D_k^{-1}(Ah_k + A_r h_r)] \quad (4.18)$$

Passando o vetor de energia atual h_k para o lado esquerdo da formulação obtém-se:

$$h_{k+1} - h_k = -\gamma[A^t D_k^{-1} A]^{-1}[Q + A^t D_k^{-1}(Ah_k + A_r h_r)] = h_{k,k+1} \quad (4.19)$$

Rearranjando a matriz Jacobiana obtemos um sistema de equações lineares:

$$[A^t D_k^{-1} A]h_{k,k+1} = -\gamma[Q + A^t D_k^{-1}(Ah_k + A_r h_r)] \quad (4.20)$$

O procedimento para a avaliação do vetor de energias h_{k+1} no processo iterativo é resumido abaixo:

1) Calcular a estimativa inicial do vetor de energias h_0 de tal forma a satisfazer as equações de energia $[A^t D_0^{-1} A]h_0 = -[Q + A^t D_0^{-1}(A_r h_r)]$ com $D_0^{-1} = \text{diag}[K_1^{-1/\alpha}, \dots, K_m^{-1/\alpha}]$.

2) Calcular a matriz dos coeficientes e o vetor independente do sistema de equações lineares. Note que A^t, A, Q, A_r, h_r são dados do problema e que D_k^{-1} é função de h_k .

3) Resolver o sistema de equações lineares simétrico (4.20), cuja solução é o vetor $h_{k,k+1}$.

4) Calcular o vetor de energias $h_{k+1} = h_{k,k+1} + h_k$.

5) Repetir os passos (2) a (4) do procedimento até a convergência do processo iterativo.

4.2 Controle Ótimo de Válvulas em Redes de Distribuição de Água

Um sistema de distribuição de água, consiste em um conjunto de nós que são interligados por vários elementos tais como tubos, válvulas, bombas e reservatórios. Cada elemento na rede é caracterizado por uma função matemática que descreve a relação da vazão e da pressão, entre as duas extremidades do elemento. A forma deste relação depende das características físicas do elemento.

O conjunto de equações que regula o sistema, pode ser formulado de acordo com estas duas regras:

- Balanço de massa nos nós: a soma algébrica do total de vazões, que chegam e que saem de cada nó, é igual a zero;
- Conservação da energia: a soma total de todas das perdas, em cada anel da rede, é igual a zero.

Existem diversas fórmulas disponíveis que relacionam vazão e perda de carga, aos vários regimes de escoamento. As mais conhecidas são as equações de Darcy-Weisbach-Colebrook e Hazen-Williams (TWORT *et al.*,1985). A equação de Darcy-Weisbach combinada com a fórmula de Colebrook-White, é a mais acurada representação do vasto espectro das condições de escoamento, mas requer maiores esforços computacionais. Por outro lado a equação de Hazen-Williams tem a vantagem da simplicidade computacional, e assim tem sido mais largamente aplicada.

Usando a equação de Hazen-Williams, as características da vazão e da perda de carga em um tubo, podem assim ser expressas:

$$q_i = \frac{C_i D_i^{2,63} H_i^{0,54}}{10,643^{0,54} L_i^{0,54}} \quad (4.21)$$

onde q_i representa a vazão (m^3/s); D_i é o diâmetro do tubo (m); L_i é o comprimento do tubo (m); H_i é a perda de carga em metros de coluna de água (m); C_i é o coeficiente de Hazen-Williams do tubo.

Alguns dos elementos da equação (4.21) não variam com a vazão e a pressão, assim eles podem ser reunidos em um termo R_i , como mostrado na equação (4.22).

$$q_i = R_i H_i^{0,54} \quad (4.22)$$

com

$$R_i = \frac{C_i D_i^{2,63}}{10,643^{0,54} L_i^{0,54}} \quad (4.23)$$

No caso de uma válvula de controle de pressão localizada no trecho i , a relação entre a vazão e a perda de carga, pode ser expressa de uma forma análoga à equação (4.22):

$$q_i = V(y)_i R_i H_i^{0,54} \quad (4.24)$$

onde $V(y)$ é um parâmetro que representa a condição de abertura da y -ésima válvula de controle de vazão no trecho i .

Nesta equação, a situação da válvula completamente fechada é representado por $V(y)$ igual a zero ou $V(y)^{\min}$; enquanto o valor de $V(y)$ de uma unidade representaria a situação da válvula totalmente aberta ou $V(y)^{\max}$, que não produz nenhuma perda de carga além daquela própria da tubulação.

Em geral, existem limites físicos para $V(y)$ que restringe seus valores para um intervalo situado entre zero e um. No desenvolvimento a seguir, a questão relativa a qual tipo de válvula é utilizada, é deixado em aberto. O objetivo é demonstrar a eficácia do controle operacional das válvulas na minimização de perdas. Deve ser também observado que alguns tipos de válvulas somente permitem vazão em uma direção, este aspecto não é explicitamente considerado no desenvolvimento.

É considerado que, agindo desta forma, não se causaria nenhuma outra dificuldade além das já reportadas em outros trabalhos, no que se refere à convergência do método numérico usado para resolver as equações não lineares, que descrevem o comportamento hidráulico da rede.

A relação não linear, entre a perda e a pressão média, indicada na figura 3.2 pode ser aproximadamente expressa pela seguinte função (BARGIELA, 1984; GERMANOPOULOS, 1988), obtida a partir de dados experimentais (NATIONAL WATER COUNCIL, 1980):

$$QS_i = CL_i L_i (P_i)^{1,18} \quad (4.25)$$

$$QS_i = RS_i \cdot (P_i)^{1,18} \quad (4.26)$$

onde QS_i é o vazão de perda de água, ocorrendo no tubo de comprimento L_i , do trecho i ; CL_i é um coeficiente que relaciona a perda física por unidade de comprimento do tubo, com

a pressão, e depende das características do sistema (idade, deterioração do tubo, as propriedades do solo, etc.); RS_i é um parâmetro representando o produto de CL_i e L_i .

P_i é a pressão média, que pode ser aproximadamente estimada pela média da pressão relativa ao nível do solo nas duas extremidades do trecho i :

$$P_i = 0,5[(h_{j2} - g_{j2}) + (h_{j1} - g_{j1})] \quad (4.27)$$

onde g_j é o nível do solo (m) nos nós $j2$ e $j1$.

A perda física QS_i de um trecho i é igualmente distribuída entre os nós inicial e final do trecho. O balanço das vazões em torno dos nós, toma assim a seguinte forma:

$$\sum_{i=1}^m A_{ij}q_i = Q_j + 0,5 \sum_{i=1}^m |A_{ij}| QS_i \quad j = 1, \dots, n \quad (4.28)$$

onde Q_j é a demanda ou consumo do nó j .

As equações (4.22) a (4.28) resultam em um conjunto de n equações simultâneas com n pressões desconhecidas. As pressões podem ser determinadas unicamente resolvendo-se estas equações não lineares. Esta etapa consiste na análise estática da rede.

Vários métodos tem sido desenvolvidos para a solução deste sistema resultante de equações, incluindo o método de Hardy-Cross (CROSS, 1936), Newton-Raphson (MARTIN e PETER, 1963; SHAMIR e HOWARD, 1968), o método da teoria linear (WOOD e CHARLES, 1972; ISAACS e MILLS, 1980) e o método do gradiente (TODINI e PILATI, 1987).

A tarefa de reduzir as perdas físicas do sistema, pode ser considerada como a determinação do esquema ótimo de aberturas das válvulas $V(y)$, sob as condições operacionais de restrição da rede, de forma a minimizar a soma dos termos que representam as perdas físicas QS_i , em cada trecho da rede:

$$\text{Min}_{v(y)} \sum_{i=1}^m QS_i \quad (4.29)$$

A minimização da equação (4.29) requer que os termos das perdas físicas QS_i estejam funcionalmente relacionados com as variáveis de controle $V(y)$ e que as condições hidráulicas e quaisquer outras restrições sejam satisfeitas.

O efeito da ação da válvula é explicitado pela equação (4.24), e pode ser incorporado ao problema da otimização pela imposição do sistema descrito pela equação (4.28), como uma restrição.

A estratégia do controle não deve ser à custa da falha em atingir a continuidade do suprimento aos consumidores; isto deve ser garantido pela manutenção da pressão dos nós, acima de valores mínimos especificados.

As restrições de demanda em alguns nós críticos, tais como aqueles mais elevados, mais distantes da fonte de fornecimento, e de pressão mínima, geralmente serão as que dominarão a otimização do problema.

Se estas restrições são satisfeitas, as condições de pressão em todos os outros nós estarão implicitamente atendidas. O perfil da pressão mínima aceitável nestes nós críticos, pode ser incorporado ao problema de otimização:

$$p_j \geq p_{\min} \quad j = 1, \dots, nr \quad (4.30)$$

onde nr é o número de referência dos nós selecionados; p_{\min} é a pressão mínima requerida no nó selecionado j.

Estes nós críticos podem ser escolhidos, pelo atento exame da topografia e o padrão de carregamento do sistema. Eles podem também serem identificados através da investigação dos registros de operação, examinando quais partes do sistema freqüentemente experimentam baixas pressões.

Alternativamente, estes nós podem ser identificados através de uma simulação da rede usando a máxima demanda dos consumidores. As restrições na variação operacional das válvulas podem ser expressas da seguinte forma:

$$V^{\min}(y) \leq V(y) \leq V^{\max}(y) \quad y = 1, \dots, Y \quad (4.31)$$

onde Y é o número de válvulas de controle de pressão na rede.

Portanto, em resumo, a minimização das perdas físicas de água da rede é obtida através da solução do seguinte sistema de equações:

$$\text{Min}_{v(y)} \sum_{i=1}^m QS_i \quad i = 1, \dots, m \quad (4.29)$$

(perda física total)

sujeito a :

$$\sum_{i=1}^m A_{ij} q_i = Q_j + 0,5 \sum_{i=1}^m |A_{ij}| QS_i \quad j = 1, \dots, n \quad (4.28)$$

(balanço de vazão)

$$p_j \geq p_{\min} \quad j = 1, \dots, nr \quad (4.30)$$

(pressão mínima requerida)

$$V^{\min}(y) \leq V(y) \leq V^{\max}(y) \quad y = 1, \dots, Y \quad (4.31)$$

(válvulas de controle)

junto com as equações associadas:

$$q_i = R_i H_i^{0,54} \quad i = 1, \dots, m \quad (4.22)$$

(relação entre vazão/perda de carga em um trecho i sem válvula)

$$q_i = V(y)_i R_i H_i^{0,54} \quad i = 1, \dots, m \quad (4.24)$$

(relação entre vazão/perda de carga em um trecho i com válvula)

$$QS_i = CL_i L_i (P_i)^{1,18} \quad i = 1, \dots, m \quad (4.25)$$

(relação entre perda física/pressão)

$$P_i = 0,5 [(h_{j2} - g_{j2}) + (h_{j1} - g_{j1})] \quad i = 1, \dots, m \quad (4.27)$$

(relação entre pressão/ cota do terreno)

4.3 Formulação Hidráulica com Perdas Físicas na Rede

A equação da continuidade, incluindo-se as perdas físicas de água na rede, aplicada para cada nó interior, pode ser assim definida:

$$\sum_{i=1}^m A_{ij} q_i = Q_j + 0,5 \sum_{i=1}^m |A_{ij}| QS_i \quad j = 1, \dots, n \quad (4.28)$$

onde

$$QS_i = CL_i L_i (P_i)^{1,18} \quad i = 1, \dots, m \quad (4.25)$$

com

$$P_i = 0,5[(h_{j_2} - g_{j_2}) + (h_{j_1} - g_{j_1})] \quad i = 1, \dots, m \quad (4.27)$$

A equação (4.28) pode ser representada matricialmente como:

$$A^t q = (Q + Q_x) \quad (4.32)$$

onde

$$Q_x = [Q_{x_1}, \dots, Q_{x_n}]^t \quad (4.33)$$

com

$$Q_{x_i} = 0,5 \sum_{j=1}^m |A_{ij}| Q S_j \quad j = 1, \dots, n \quad (4.34)$$

Na forma matricial Q_x pode ser obtida utilizando-se as equações (4.25), (4.27) e (4.34).

$$Q_x = |A^t| W \quad (4.35)$$

com

$$W = Z T \quad (4.36)$$

$$Z = \text{diag}[z_1, \dots, z_m] \quad (4.37)$$

e

$$T = [t_1, \dots, t_m]^t \quad (4.38)$$

sendo

$$z_i = \frac{1}{2} [CL_1 L_1, \dots, CL_m L_m] \quad (4.39)$$

$$t_i = \frac{1}{2} [u_1^{1,18}, \dots, u_m^{1,18}] \quad (4.40)$$

com

$$U = |A|h + |A_r|h_r \quad (4.41)$$

Multiplicando-se a equação (4.13) por $A^t D^{-1}$ e levando-se em conta a equação (4.32), a solução é dada por

$$A^t D^{-1}(Ah + A_r h_r) = -(Q + Q_x) \quad (4.42)$$

Esta expressão pode ser usada tanto para o método da teoria linear, como para o método de Newton-Raphson, em uma mesma forma comum:

$$h_{k+1} = h_k - \gamma[A^t D_k^{-1} A]^{-1}[Q + Q_x + A^t D_k^{-1}(Ah_k + A_r h_r)] \quad (4.43)$$

Note que a formulação que considera as perdas físicas de água na rede, difere da formulação sem perdas na rede, proposta por NIELSEN (1989) e expressa pela equação (4.18), apenas pelo acréscimo do vetor Q_x no termo independente do sistema.

É interessante observar que o sistema resultante permanece simétrico, uma vez que o vetor Q_x é calculado com valores das variáveis da iteração anterior.

Algoritmo - formulação em termos das energias incluindo as perdas físicas na rede

A formulação proposta incluindo-se as perdas físicas da rede é

$$h_{k+1} = h_k - \gamma[A^t D_k^{-1} A]^{-1}[Q + Q_x + A^t D_k^{-1}(Ah_k + A_r h_r)] \quad (4.43)$$

Passando o vetor de energia atual h_k para o lado esquerdo da formulação obtém-se:

$$h_{k+1} - h_k = -\gamma[A^t D_k^{-1} A]^{-1}[Q + Q_x + A^t D_k^{-1}(Ah_k + A_r h_r)] = h_{k,k+1} \quad (4.44)$$

Rearranjando a matriz Jacobiana obtemos um sistema de equações lineares:

$$[A^t D_k^{-1} A]h_{k,k+1} = -\gamma[Q + Q_x + A^t D_k^{-1}(Ah_k + A_r h_r)] \quad (4.45)$$

O procedimento para a avaliação do vetor de energias h_{k+1} no processo iterativo é resumido abaixo:

1) Calcular a estimativa inicial do vetor de energias h_0 de tal forma a satisfazer as equações de energia $[A^t D_0^{-1} A]h_0 = -[Q + A^t D_0^{-1}(A_r h_r)]$ com $D_0^{-1} = \text{diag}[K_1^{-1/\alpha}, \dots, K_m^{-1/\alpha}]$.

2) Calcular a matriz dos coeficientes e o vetor independente do sistema de equações lineares. Note que A^t, A, Q, A_r, h_r são dados do problema e que D_k^{-1} é função de h_k .

3) Resolver o sistema de equações lineares simétrico (4.45), cuja solução é o vetor $h_{k,k+1}$.

4) Calcular o vetor de energias $h_{k+1} = h_{k,k+1} + h_k$.

5) Repetir os passos (2) a (4) do procedimento até a convergência do processo iterativo.

4.4 Aspectos Computacionais

Considere-se a rede da figura 4.1:

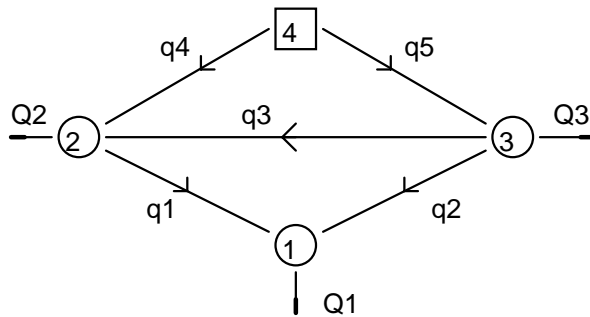


FIGURA 4.1 - Rede usada por NIELSEN (1989).

Quando as perdas físicas são incorporadas na formulação hidráulica, a equação (4.13) não é afetada, alterando-se apenas a equação da continuidade, de forma que a equação (4.15) é substituída pela equação (4.32).

A seguir exemplificar-se-á a resolução da equação da continuidade, na nova formulação proposta, para a rede da figura 4.1.

Analiticamente, considerando-se a equação (4.28) a continuidade é expressa pelo conjunto de equações (4.46):

$$\begin{aligned} q_1 + q_2 &= Q_1 + \frac{1}{2}QS_1 + \frac{1}{2}QS_2 \\ q_4 + q_3 - q_1 &= Q_2 + \frac{1}{2}QS_4 + \frac{1}{2}QS_3 + \frac{1}{2}QS_1 \\ q_5 - q_2 - q_3 &= Q_3 + \frac{1}{2}QS_5 + \frac{1}{2}QS_2 + \frac{1}{2}QS_3 \end{aligned} \quad (4.46)$$

onde

$$QS_i = CL_i L_i (P_i)^{1,18} \quad i = 1, \dots, m \quad (4.25)$$

e

$$P_i = 0,5[(h_{j_2} - g_{j_2}) + (h_{j_1} - g_{j_1})] \quad i = 1, \dots, m \quad (4.27)$$

Admitindo-se as cotas do solo nos nós iguais a zero, ou seja $g_i = 0$, as pressões médias nos nós são definidas pela equação (4.27):

$$\begin{aligned} P_1 &= 0.5(h_1 + h_2) \\ P_2 &= 0.5(h_3 + h_1) \\ P_3 &= 0.5(h_3 + h_2) \\ P_4 &= 0.5(h_4 + h_2) \\ P_5 &= 0.5(h_4 + h_3) \end{aligned} \quad (4.47)$$

e as vazões de perdas físicas de água nos trechos são definidas pela equação (4.25):

$$\begin{aligned} QS_1 &= CL_1 L_1 (P_1)^{1,18} \\ QS_2 &= CL_2 L_2 (P_2)^{1,18} \\ QS_3 &= CL_3 L_3 (P_3)^{1,18} \\ QS_4 &= CL_4 L_4 (P_4)^{1,18} \\ QS_5 &= CL_5 L_5 (P_5)^{1,18} \end{aligned} \quad (4.48)$$

substituindo-se (4.47), (4.48) em (4.46), obtemos:

$$\begin{aligned} q_1 + q_2 &= Q_1 + 0.5CL_1 L_1 [0.5(h_1 + h_2)]^{1,18} + 0.5CL_2 L_2 [0.5(h_3 + h_1)]^{1,18} \\ q_4 + q_3 - q_1 &= Q_2 + 0.5CL_4 L_4 [0.5(h_4 + h_2)]^{1,18} + 0.5CL_3 L_3 [0.5(h_3 + h_2)]^{1,18} \\ &\quad + 0.5CL_1 L_1 [0.5(h_1 + h_2)]^{1,18} \\ q_5 - q_2 - q_3 &= Q_3 + 0.5CL_5 L_5 [0.5(h_4 + h_3)]^{1,18} + 0.5CL_2 L_2 [0.5(h_3 + h_1)]^{1,18} \\ &\quad + 0.5CL_3 L_3 [0.5(h_3 + h_2)]^{1,18} \end{aligned} \quad (4.49)$$

Em termos matriciais, consideremos a formulação do item 4.3 aplicada a rede da figura 4.1.

Da equação (4.41):

$$U = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} [h_4] = \begin{bmatrix} h_1 + h_2 \\ h_1 + h_3 \\ h_2 + h_3 \\ h_2 + h_4 \\ h_3 + h_4 \end{bmatrix} \quad (4.50)$$

Das equações (4.40) e (4.38)

$$T = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(h_1 + h_2)^{1,18} \\ \frac{1}{2}(h_1 + h_3)^{1,18} \\ \frac{1}{2}(h_2 + h_3)^{1,18} \\ \frac{1}{2}(h_2 + h_4)^{1,18} \\ \frac{1}{2}(h_3 + h_4)^{1,18} \end{bmatrix} \quad (4.51)$$

Das equações (4.37) e (4.39):

$$Z = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(CL_1L_1) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}(CL_2L_2) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2}(CL_3L_3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(CL_4L_4) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(CL_5L_5) \end{bmatrix} \quad (4.52)$$

Da equação (4.36):

$$W = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(CL_1L_1)\frac{1}{2}(h_1 + h_2)^{1,18} \\ \frac{1}{2}(CL_2L_2)\frac{1}{2}(h_1 + h_3)^{1,18} \\ \frac{1}{2}(CL_3L_3)\frac{1}{2}(h_2 + h_3)^{1,18} \\ \frac{1}{2}(CL_4L_4)\frac{1}{2}(h_2 + h_4)^{1,18} \\ \frac{1}{2}(CL_5L_5)\frac{1}{2}(h_3 + h_4)^{1,18} \end{bmatrix} \quad (4.53)$$

Da equação (4.35):

$$Q_x = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(CL_1L_1)\frac{1}{2}(h_1 + h_2)^{1,18} \\ \frac{1}{2}(CL_2L_2)\frac{1}{2}(h_1 + h_3)^{1,18} \\ \frac{1}{2}(CL_3L_3)\frac{1}{2}(h_2 + h_3)^{1,18} \\ \frac{1}{2}(CL_4L_4)\frac{1}{2}(h_2 + h_4)^{1,18} \\ \frac{1}{2}(CL_5L_5)\frac{1}{2}(h_3 + h_4)^{1,18} \end{bmatrix} \quad (4.54)$$

ou

$$Q_x = \begin{bmatrix} 0.5CL_1L_1[0.5(h_1 + h_2)]^{1,18} + 0.5 \cdot CL_2L_2[0.5(h_3 + h_1)]^{1,18} \\ 0.5CL_4L_4[0.5(h_4 + h_2)]^{1,18} + 0.5CL_3L_3[0.5(h_3 + h_2)]^{1,18} \\ + 0.5CL_1L_1[0.5(h_1 + h_2)]^{1,18} \\ 0.5CL_5L_5[0.5(h_4 + h_3)]^{1,18} + 0.5CL_2L_2[0.5(h_3 + h_1)]^{1,18} \\ + 0.5CL_3L_3[0.5(h_3 + h_2)]^{1,18} \end{bmatrix} \quad (4.55)$$

Substituindo a equação (4.55) na equação (4.32), obter-se-á o conjunto de equações (4.49).

4.5 Algoritmos Genéticos

Algoritmos genéticos são métodos de busca estocástica, que imitam matematicamente os mecanismos de evolução natural das espécies, compreendendo processos da genética das populações e da sobrevivência e adaptação dos indivíduos (GEN e CHENG, 1997).

Inicialmente e de forma aleatória, é gerado um conjunto inicial de possíveis soluções denominada de “população”. Cada indivíduo desta população é chamado de “cromossomo”. As características de um cromossomo, também chamado de elemento ou indivíduo, são denominadas de “genes”, que podem ser codificadas através de representações binária ou real.

Os cromossomos, através de iterações, podem evoluir gradativamente originando novas gerações de indivíduos, mais aptos em termos de uma função de aptidão definida (CHEUNG e REIS, 2001).

Em cada nova etapa, aqui chamada de geração, os indivíduos ou cromossomos, são avaliados por meio desta função aptidão, que permite sua ordenação e classificação qualitativa enquanto solução.

Cada nova geração é formada por esta “seleção”, segundo os cromossomos com altos valores da função aptidão, e que têm elevada probabilidade de serem aproveitados para a próxima etapa ou geração seguinte.

Para se criar uma nova geração, novos cromossomos, denominados “filhos ou descendentes” são produzidos pela combinação de dois indivíduos pais da geração corrente, utilizando processos denominados de operadores genéticos de “recombinação” (*crossover*) e mutação (modificação eventual de genes).

Representação dos indivíduos ou cromossomos

Cada variável do problema, é denominada de variável de decisão e ela pode ser codificada por um sistema binário, ou através de números reais e/ou inteiros ou ainda, seqüência de caracteres.

Um cromossomo é representado pela forma concatenada de todas as variáveis de decisão, sendo seu comprimento total, as V variáveis de decisão (ARGOLO, 2000).

No caso do problema a ser analisado neste trabalho, as variáveis de decisão são as aberturas das válvulas redutoras de pressão. A codificação será feita através de números reais.

Assim um indivíduo, para o caso de três válvulas de controle $V(1)$, $V(2)$ e $V(3)$, terá três variáveis de decisão, e é representado pelo vetor

$$V = (V(1), V(2), V(3)) \quad (4.56)$$

Número de indivíduos (np) e número de gerações (ng)

Após definido o processo de codificação, a população inicial é gerada usualmente de forma aleatória, sendo que o número de indivíduos depende de cada problema.

Tanto uma população inicial pequena pode reduzir o espaço de busca, como uma população inicial com grande número de indivíduos pode levar a um desperdício de tempo computacional.

Tomando como indicativo os resultados obtidos por SAVIC e WALTERS (1997), neste trabalho serão adotadas populações iniciais de 30 a 110 indivíduos.

O número de gerações ou iterações para o problema em estudo, será determinado em função da minimização da soma da vazão de perda física de água de todos os trechos da rede, o que leva ao menor volume total de perda física.

Função objetivo

Neste trabalho a função objetivo é definida pela equação:

$$f_{\text{obj}}((V(1), V(2), V(3))) = \sum_{i=1}^m QS_i \quad (4.57)$$

onde $V(1)$, $V(2)$ e $V(3)$ são as aberturas das válvulas redutoras de pressão; QS_i é a perda física do trecho i . Trata-se de determinar o vetor da equação (4.56), a partir dos indivíduos da população inicial, que minimize a equação (4.57).

Função aptidão

Por tratar-se de um algoritmo conceitualmente inspirado em mecanismos de seleção natural das espécies, a capacidade de sobrevivência de um indivíduo da população, durante o processo de evolução, é representada matematicamente pela função aptidão.

Como cada indivíduo representa uma possível solução do problema, a medida de aptidão servirá para sua classificação dentre as demais soluções, representadas pelos outros indivíduos da população, indicando as chances de reprodução de cada um.

Dependendo ser o problema de maximização ou minimização, a classificação pode ser feita pelo ordenamento das soluções em ordem decrescente ou crescente, respectivamente. A mais simples função aptidão, é definida como a própria função objetivo (função avaliação).

Funções com restrições nos algoritmos genéticos

Segundo LEMONGE (1999), vários problemas físicos contém restrições em suas formulações. De fato, na resolução de uma rede de abastecimento de água, existem restrições quanto às pressões mínimas, que devem ser atendidas, que é o caso específico do experimento deste trabalho.

Segundo GEN e CHENG (1997) a aplicação de algoritmos genéticos para solucionar problemas de otimização com restrições tem sido considerada importante questão, sendo que as técnicas existentes são classificadas em:

- Estratégias de rejeição;
- Estratégias de reparação;
- Estratégias de modificação dos operadores genéticos, e
- Estratégias de penalidades.

As estratégias de rejeição, descartam todos os cromossomos inactivos criados pelo processo evolucionário, que no entanto podem conter melhores informações que alguns cromossomos factíveis; sendo esta, sua desvantagem.

As estratégias de reparação, geram um cromossomo factível, a partir de um inactivo. Como esta técnica requer um procedimento de reparação determinística, pode ser tão complexo quanto o problema original.

As estratégias de modificação dos operadores genéticos, baseiam-se em representar um problema específico e operadores genéticos para manter o indivíduo na região factível. MICHALEWICZ (1992) aponta tal técnica como confiável.

As estratégias de penalidades, tem a vantagem de não descartarem todos os cromossomos inactivos criados pelo processo evolucionário, não perdendo informações que alguns cromossomos factíveis podem conter. Para problemas com muitas restrições, soluções inactivas podem tomar lugar em grande parte da população.

Um problema que tenha restrições, pode ser transformado em outro problema sem restrições, pela associação à função objetivo de uma função denominada penalidade, daí resultando a função aptidão, que será utilizada para a seleção dos indivíduos mais aptos.

Função aptidão com termo penalidade

Para este experimento foi adotada a estratégia de penalidades. Neste trabalho, considera-se aceitável a pressão mínima em todos os nós da rede como não inferior a 30 metros de coluna de água. Para efeito de verificação foram selecionados alguns nós chamados nós críticos, em função da geometria e das características da rede.

Quando as pressões nos nós críticos não são atendidas, aplica-se então a penalidade. A função aptidão é expressa por:

$$f_{\text{apt}}((V(1), V(2), V(3))) = \sum_{i=1}^m QS_i + f_m(\sum_{j=1}^{nr} (p_j - p_{\text{min}})^2) \quad (4.58)$$

onde f_m é o fator que multiplica a penalidade, nr é o número de referência dos nós críticos, p_j é a pressão no nó j e p_{min} é a pressão mínima requerida.

SAVIC e WALTERS (1997), sugeriram a seguinte função para o fator multiplicador:

$$f_m = \varphi \left(\frac{ng}{ng^{\text{max}}} \right)^{\mu} \quad (4.59)$$

onde, φ é a constante de multiplicação da penalidade; ng é o número da geração; ng^{max} é o número máximo de gerações e μ um parâmetro experimental. Ao final das simulações das gerações o fator de multiplicação f_m deve assumir um valor através do qual nenhuma solução infactível assuma um valor maior que as soluções factíveis do problema.

A utilização deste fator é para tornar mais severa a penalidade à medida que se processam as gerações, além de compatibilizar os valores nominais da penalidade e da função objetivo.

Seleção

Pela teoria de Darwin, os indivíduos mais aptos de uma população devem ser escolhidos para sobreviver e gerar filhos. A finalidade da seleção é escolher os melhores cromossomos, ou seja, os melhores indivíduos de uma população, que servirão de pais no processo de seleção (CHEUNG,2002).

Isto significa escolher as melhores soluções do problema, dentre o conjunto delas, para a partir daí, realizar-se a próxima iteração, buscando a convergência.

Dependendo ser o problema de maximização ou minimização, a classificação pode ser feita pelo ordenamento as soluções em ordem decrescente ou crescente, respectivamente.

LEMONGE (1999) afirma que existem várias formas de efetuar-se a seleção, sendo as mais comuns, a seleção por posição (*rank*), seleção proporcional à aptidão (*roulette wheel*) e seleção por torneio. No método clássico de seleção proposto por Holland em 1975, denominada roleta, e utilizado neste experimento, a probabilidade de sobrevivência é determinada para cada cromossomo proporcionalmente ao seu valor de aptidão (f_{apti}).

$$P_{si} = \frac{f_{apti}}{\sum_{i=1}^{np} f_{apti}} \quad (4.60)$$

Elitismo

Feita a seleção, os melhores indivíduos são passados para a geração seguinte, melhorando assim a convergência do problema. Neste trabalho, o número de indivíduos que passam para a geração seguinte foi assumido ser 10% do número total de indivíduos da população.

Os demais indivíduos da população, vão receber o tratamento dos operadores genéticos.

Operadores Genéticos

Os operadores genéticos podem ser classificados em dois tipos: de recombinação (*crossover*) e de mutação. Existem várias técnicas de operadores, encontradas em textos especializados como GOLDBERG (1989), MICHALEWICZ (1992), GEN e CHENG (1997).

O operador recombinação é aplicado a um par de cromossomos retirados da população intermediária (*Matting Pool*), gerando seus descendentes. Por população intermediária se entende o conjunto de vetores, obtidos a partir da população inicial ou iteração anterior, melhor classificado, após a aplicação da função aptidão.

Pode-se ilustrar o processo de recombinação utilizado neste trabalho considerando-se dois cromossomos chamados pais (geração atual) com as características $Pai^1 = (V(y_1^1), V(y_2^1), V(y_3^1))$ e $Pai^2 = (V(y_1^2), V(y_2^2), V(y_3^2))$ cortadas em uma posição aleatória,

produzindo dois novos indivíduos denominados filhos (geração seguinte) com as características, Filho¹ = (V(y₁¹), V(y₂¹), V(y₃¹)) e Filho² = (V(y₁²), V(y₂²), V(y₃²)).

A probabilidade de recombinação (P_c) mostra a frequência com o qual o operador de recombinação é aplicado. Se P_c é baixa, a busca pode estagnar. Se P_c é alta, elementos de bom desempenho podem ser descartados. Neste trabalho serão adotados para efeito de experimentação os valores utilizados por SAVIC e WALTERS (1997), ou seja:

$$0,6 \leq P_c \leq 1,0 \quad (4.61)$$

A mutação é determinada pela substituição do valor da variável de decisão, no cromossomo, respeitando-se os seus domínios. No processo utilizado neste experimento, aleatoriamente determina-se qual posição do cromossomo, ou seja qual a variável de decisão, que terá o seu valor substituído; em seguida, gera-se também aleatoriamente, um novo valor para esta variável de decisão, dentro dos limites de seu domínio, e faz-se a substituição.

Por exemplo, pode-se ter um vetor $V=(0,1;0,5;0,8)$, em que se determine aleatoriamente que a segunda posição (valor 0,5) deva ser substituída. Determina-se então, de forma aleatória, um novo valor entre zero e um (por exemplo, 0,8) e então o novo vetor V , passa a ser $V = (0,1;0,8;0,8)$.

A probabilidade de mutação (P_m) representa a aceleração da variação populacional. Nas simulações que serão realizadas neste trabalho os valores de P_m tomarão como base o intervalo estabelecido por SAVIC e WALTERS (1997), ou seja:

$$0,01 \leq P_m \leq 0,30 \quad (4.62)$$

4.6 Procedimento Iterativo

No caso do problema proposto, as simulações variarão em intervalos de duas horas, ou seja, simulação 1 corresponderá ao período de zero a duas horas; simulação 2 para o período de duas a quatro horas; simulação 3 para o período de quatro a seis horas e assim sucessivamente até simulação 12, para o período das vinte e duas a vinte e quatro horas.

O procedimento iterativo da metodologia proposta, pode ser resumido da seguinte maneira, para uma simulação qualquer dentro do período de 24 horas:

a- Gera-se aleatoriamente um conjunto inicial de vetores, cada um deles correspondente as diversas possibilidades de aberturas das válvulas (população inicial);

b- Com a demanda nos nós (inclusive as perdas físicas de água nos trechos) e níveis dos reservatórios, para o instante considerado, procede-se a análise hidráulica da rede utilizando a formulação descrita no item 4.3 para cada vetor solução da população inicial;

c- Determina-se a função aptidão para cada um destes vetores;

d- Procede-se a ordenação e seleção destes vetores;

e- Aplica-se os operadores de recombinação e mutação para obter-se um novo conjunto de vetores, representando as novas possíveis soluções (geração seguinte);

f- Retorna-se ao item b, até alcançar-se a minimização da equação (4.57), obtendo-se a regulagem otimizada das válvulas, para a simulação considerada.

4.7 Linguagem de Programação e Equipamento Computacional

A programação dos algoritmos genéticos foi desenvolvida especificamente para a pesquisa e implementada na linguagem Delphi versão 5.0. sendo que o equipamento utilizado foi um micro-computador AMD, com processador Duron 1.0 Gb, 128 MB RAM.

4.8 Aplicações

As simulações a serem realizadas nas redes exemplos, tem as seguintes finalidades:

- Comprovar a eficiência da nova formulação, verificando as características computacionais do modelo hidráulico proposto combinado com a técnica dos algoritmos genéticos;

- Realizar comparações entre a técnica dos algoritmos genéticos e outros métodos de otimização;

- Realizar simulações para possíveis generalizações e aperfeiçoamentos dos modelos e formulações propostas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir serão apresentados os resultados da aplicação da formulação descrita no capítulo de metodologia:

- Em uma rede de pequeno porte, semelhante à rede de NIELSEN(1989), adaptada para o estudo proposto, chamada rede exemplo 1.
- Em uma rede proposta por JOWITT e XU (1990), chamada rede exemplo 2.

5.1 Rede exemplo 1

A rede exemplo 1 tem 3 nós, 5 trechos, 1 reservatório e 2 válvulas de controle: V(1) instalada no trecho 4-2 e V(2) instalada no trecho 4-3, (figura 5.1). A configuração e os parâmetros da rede exemplo 1 são dados nas tabelas 5.1 e 5.2.

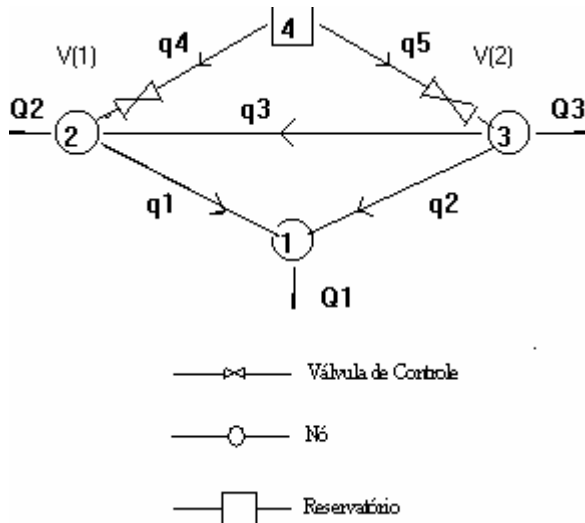


FIGURA 5.1 - Rede exemplo 1.

TABELA - 5.1 Informações dos nós da rede exemplo 1.

Nó	Nível do solo (m)	Demanda (m ³ /s)
1	0,00	0,005
2	0,00	0,005
3	0,00	0,005
4 (Reservatório)	90,00	0,000

TABELA - 5.2 Informações complementares da rede exemplo 1.

Trecho/válvula	Nós	Comprimento (m)	Diâmetro (m)	Coefficiente C
1	2-1	500,00	0,10	90,00
2	3-1	500,00	0,10	90,00
3	3-2	500,00	0,10	90,00
4/ V1	4-2	500,00	0,10	90,00
5 / V2	4-3	500,00	0,10	90,00

As simulações foram feitas para três condições distintas: a primeira condição não considera o efeito das válvulas redutoras de pressão e a formulação hidráulica não inclui as perdas físicas na rede (sem válvulas e sem perdas); a segunda condição não considera o efeito das válvulas redutoras de pressão e a formulação hidráulica já leva em conta as perdas físicas na rede (sem válvulas e com perdas); e a terceira condição considera o efeito das válvulas redutoras de pressão e a formulação hidráulica leva em conta as perdas físicas na rede (com válvulas e com perdas).

Os resultados das simulações são mostrados nas tabelas 5.3, 5.4 e 5.5.

TABELA - 5.3 Pressões nos nós da rede exemplo 1.

Nós	Pressão (m)		
	sem válvulas sem perdas	sem válvulas com perdas	com válvulas com perdas
1	77,38	72,01	30,04
2	78,83	73,89	32,70
3	78,83	73,89	30,69

Observa-se que houve uma redução das pressões nos nós da condição sem válvulas e com perdas em relação a condição sem válvulas e sem perdas, como mostrada na tabela 5.3, e que é devido a inclusão das perdas físicas na formulação hidráulica, o que acarreta um aumento de vazões nos trechos para a condição sem válvulas e com perdas, o que é mostrado na tabela 5.4.

TABELA - 5.4 Vazões nos trechos da rede exemplo 1.

Trechos	Vazão (m ³ /s)		
	sem válvulas sem perdas	sem válvulas com perdas	com válvulas com perdas
1	0,0025	0,0028	0,0035
2	0,0024	0,0028	0,0017
3	0,0000	0,0000	-0,0028
4	0,0074	0,0091	0,0120
5	0,0075	0,0091	0,0044

Já a condição com válvulas e com perdas, mostra claramente a redução das pressões e das vazões devido a ação das válvulas de controle. As pressões nos nós, estabilizam-se em torno da pressão mínima exigida para a rede, ou seja 30 metros de coluna de água, o que permite concluir que o objetivo foi alcançado.

O sinal negativo da vazão que aparece na tabela 5.4 trecho 3, na condição com válvulas e com perdas significa que a sentido da vazão é contrário ao da convenção adotada na figura 5.1.

A configuração otimizada das válvulas de controle, obtida através da técnica dos algoritmos genéticos, é mostrada na tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Configuração otimizada das válvulas de controle na rede exemplo 1.

Válvula	sem válvulas com perdas	com válvulas com perdas
V(1)	1	0,66
V(2)	1	0,24

A vazão de perda física de água na rede, e os volumes totais perdidos na rede em 24 horas são mostrados nas tabelas 5.6 e 5.7.

Observa-se que houve uma redução de 48,89% no volume de perda total diária com a utilização das válvulas de controle.

Estes resultados podem ser obtidos com uma população de 20 indivíduos e 50 gerações; com probabilidade de recombinação $P_c = 0,6$ e probabilidade de mutação $P_m = 0,3$.

TABELA - 5.6 Vazão de perda física da rede exemplo 1.

Condição	sem válvulas com perdas	com válvulas com perdas
Vazão Perda (m ³ /s)	0,00419	0,00214

TABELA - 5.7 Volume de perda física da rede exemplo 1.

Condição	sem válvulas com perdas	com válvulas com perdas
Volume Perda (m ³ /dia)	362	185

Foram consideradas na função aptidão como penalidades, os três nós da rede exemplo 1 como críticos. Sendo que para a equação (4.59) foram adotados $\varphi = 0,40$ e $\mu = 0,80$.

O coeficiente $\varphi = 0,40$ foi estabelecido após várias simulações de modo que as pressões nos nós de referência estabilizassem o mais próximo possível da pressão mínima requerida ou seja 30 metros de coluna de água.

O valor do coeficiente $\mu = 0,80$, foi adotado de acordo com o valor experimental obtido por SAVIC e WALTERS (1997).

É importante observar que sem alteração do volume de perda física de água foram obtidas, também como solução, as aberturas das válvulas $V(1) = 0,24$ e $V(2) = 0,66$, dada a simetria geométrica da rede exemplo1, o que leva a deduzir-se que não se tem garantia de solução única.

COMENTARIOS SOBRE o questão dos 50%

5.2 Rede Exemplo 2

O desempenho do modelo proposto, será ilustrado também através de uma rede utilizada por JOWITT e XU (1990), mostrada esquematicamente na figura.5.2.

A rede exemplo 2 tem 25 nós, 37 trechos, 3 reservatórios e 3 válvulas de controle: V(1) instalada entre os nós 13-12, V(2) instalada entre os nós 15-12 e V(3) instalada entre os nós 22-21. A configuração e os parâmetros do sistema são apresentados nas tabelas 5.8, 5.9 e 5.10.

A representação matemática que relaciona a pressão com as perdas físicas, utilizada neste trabalho foi obtida através de dados específicos de experimentos de campo e podem não ser representativos para outras circunstâncias. Os coeficientes CL_{ij} , relacionando a perda física com a pressão, foram considerados iguais a 10^{-8} (JOWITT e XU, 1990).

A pressão mínima aceitável nos nós da rede foi fixada em 30 metros acima do nível do solo. Considerando-se as características da rede e as cotas do terreno, foram selecionados como críticos os nós 13, 19, 21 e 22 (JOWITT e XU, 1990).

Para simular as características dinâmicas de uma rede real, um esquema de controle é desenvolvido durante um período de 24 horas. Uma típica variação de demanda diária é fixada, como mostra a figura 5.12. As variações dos níveis dos reservatórios são indicadas através das figuras 5.3, 5.4 e 5.5, representando a usual prática de encher os reservatórios à noite, durante os períodos de bombeamento com menor custo.

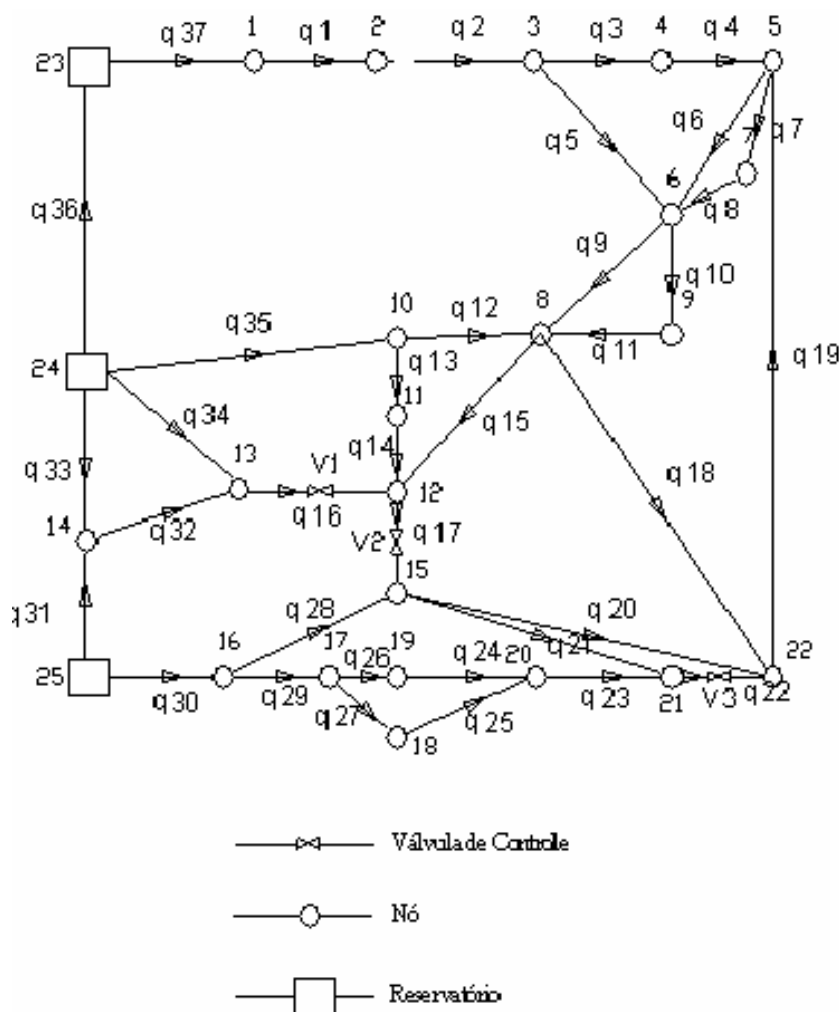


FIGURA 5.2 - Rede exemplo 2.

TABELA 5.8 - Níveis dos reservatórios da rede exemplo 2.

Nó	Nível máximo acima nível de referência (m)	Nível normal acima nível de referência (m)	Nível mínimo acima nível de referência (m)
23	56,00	54,66	54,50
24	55,50	54,60	54,50
25	55,50	54,50	54,00

TABELA - 5.9 Informações dos nós da rede exemplo 2.

Nó	Nível do solo (m)	Demanda (m ³ /s)
1	18,00	0,01
2	18,00	0,01
3	14,00	0,00
4	12,00	0,01
5	14,00	0,03
6	15,00	0,01
7	14,50	0,00
8	14,00	0,02
9	14,00	0,00
10	15,00	0,005
11	12,00	0,010
12	15,00	0,000
13	23,00	0,000
14	20,00	0,005
15	8,00	0,020
16	10,00	0,000
17	7,00	0,000
18	8,00	0,005
19	10,00	0,005
20	7,00	0,000
21	10,00	0,000
22	15,00	0,020

Tabela 5.10 - Informações complementares da rede exemplo 2.

Trecho/válvula	Nós	Comprimento (m)	Diâmetro (m)	Coefficiente C
1	2-1	1.930,00	0,457	110,00
2	3-2	5.150,00	0,305	10,00
3	4-3	326,00	0,152	100,00
4	5-4	844,00	0,229	110,00
5	6-3	1.274,00	0,152	100,00
6	5-6	1.115,00	0,229	90,00
7	5-7	500,00	0,381	110,00
8	7-6	615,00	0,381	110,00
9	6-8	743,00	0,381	110,00
10	6-9	300,00	0,229	90,00
11	9-8	443,00	0,229	90,00
12	8-10	249,00	0,305	105,00
13	10-11	542,00	0,229	90,00
14	11-12	777,00	0,229	90,00
15	8-12	1.600,00	0,457	110,00
16/V1	12-13	762,00	0,457	110,00
17/V2	12-15	1.996,00	0,229	95,00
18	22-8	931,00	0,229	125,00
19	5-22	1.408,00	0,152	100,00
20	22-15	2.334,00	0,229	100,00
21	21-15	832,00	0,152	90,00
22/V3	22-21	2.689,00	0,152	100,00
23	21-20	71,00	0,152	90,00
24	20-19	864,00	0,152	90,00
25	20-18	701,00	0,229	110,00
26	19-17	1.072,00	0,229	135,00
27	18-17	411,00	0,152	100,00
28	15-16	914,00	0,229	125,00
29	17-16	822,00	0,305	140,00
30	16-25	1.097,00	0,381	6,00
31	25-14	304,00	0,381	135,00
32	14-13	1.014,00	0,381	135,00
33	24-14	2.782,00	0,229	105,00
34	13-24	1.777,00	0,475	110,00
35	10-24	3.382,00	0,305	100,00
36	23-24	454,00	0,457	110,00
37	23-1	606,00	0,457	110,00

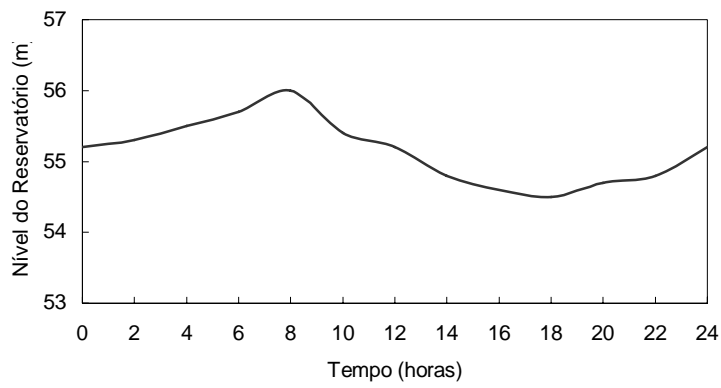


FIGURA 5.3 - Variação do nível do reservatório 1 (nó 23).

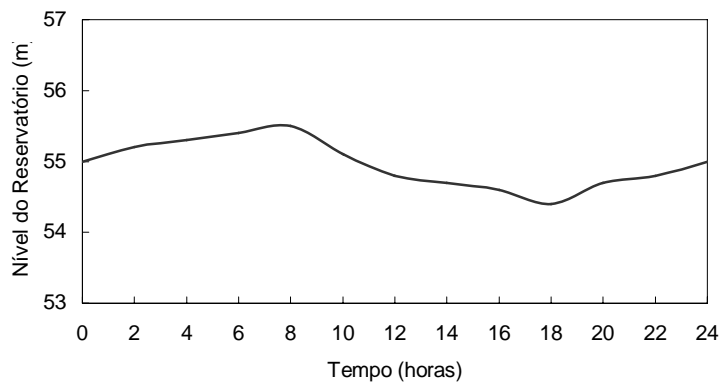


FIGURA 5.4 - Variação do nível do reservatório 2 (nó 24).

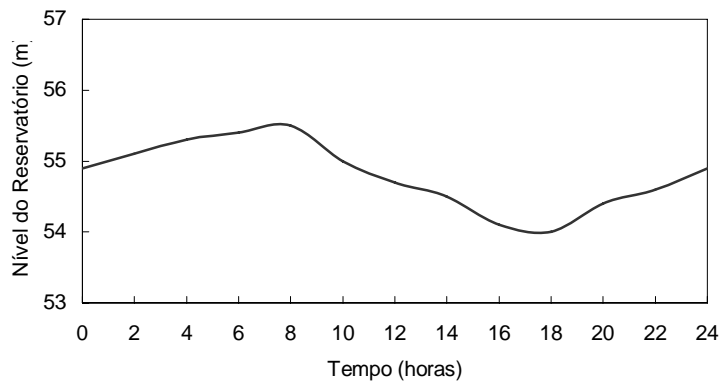


FIGURA 5.5 - Variação do nível do reservatório 3 (nó 25).

As tabelas 5.14 e 5.15 mostram as pressões nos nós da rede exemplo 2 para os dois tipos de condições: sem válvulas de controle na rede, e com válvulas de controle na rede, a cada período de duas horas (período de simulação).

Com a ação das válvulas de controle, observa-se que as pressões na quase totalidade dos nós da rede, estabilizam-se em torno da pressão mínima exigida, ou seja 30 metros de coluna de água, o que permite concluir que o objetivo foi alcançado.

Apenas nos nós 1, 2, 13 e 14, as pressões se mantêm na mesma ordem de grandeza para as duas condições, o que sugere para um estudo futuro a discussão se o número de válvulas é insuficiente, ou se a posição delas não é a melhor, ou ambas as situações.

As tabelas 5.16, 5.17, 5.18 e 5.19, mostram as vazões por trecho da rede exemplo 2 para os dois tipos de condições: sem válvulas de controle na rede, e com válvulas de controle na rede, a cada período de duas horas (período de simulação).

Observa-se que de um modo geral, há uma redução nas vazões na quase totalidade dos trechos, sendo que em alguns deles a vazão torna-se nula, devido a ação de fechamento das válvulas.

Dada a ação das válvulas, as vazões em alguns trechos aumenta, para que a demanda no restante da rede possa ser atendida. Por exemplo, nos trechos 12 e 35, há um incremento de até 140% das vazões comparando-se as duas condições da pesquisa.

O sinal negativo das vazões que aparecem nas tabelas 5.16, 5.17, 5.18, e 5.19 significa que a sentido das vazões é contrário ao da convenção adotada na figura 5.2.

A configuração otimizada para as válvulas V(1), V(2) e V(3), obtida com a técnica dos algoritmos genéticos, é mostrada na tabela 5.11.

A ação das válvulas de redução de pressão ao longo do período de 24 horas é mostrada através das figuras 5.6, 5.7 e 5.8.

Dentre as três válvulas, V(1) é a que apresenta o maior grau de fechamento durante as 24 horas, sendo que sua abertura máxima corresponde a 0,17 no período das 8:00 as 10:00 horas, quando a demanda diária é máxima e a pressão tende a cair, buscando assim atender a pressão mínima requerida .

Observa-se que as três válvulas tendem a fechar quando a demanda é mínima e a pressão tende a aumentar, no período das duas as seis horas da manhã.

A tabela 5.11 mostra uma configuração otimizada obtida com a técnica dos algoritmos genéticos.

Tabela 5.11 - Configuração otimizada das válvulas da rede exemplo 2.

Tempo (horas)	Configuração otimizada		
	V(1)	V(2)	V(3)
0 a 2	0,02	0,07	0,84
2 a 4	0,00	0,00	0,02
4 a 6	0,00	0,00	0,00
6 a 8	0,06	0,89	0,63
8 a 10	0,17	0,95	0,93
10 a 12	0,15	0,72	0,96
12 a 14	0,09	0,86	0,95
14 a 16	0,09	0,96	0,79
16 a 18	0,12	0,91	0,96
18 a 20	0,10	0,53	0,89
20 a 22	0,07	0,49	0,87
22 a 24	0,02	0,13	0,76

A tabela 5.12, mostra as vazões das perdas físicas de água na rede nas condições pesquisadas.

Tabela 5.12 - Vazões de perdas físicas na rede exemplo 2.

Tempo (horas)	Vazões perdas(m ³ /s)	
	sem válvulas de controle	com válvulas de controle
0 a 2	0,0349	0,0216
2 a 4	0,0358	0,0247
4 a 6	0,0360	0,0248
6 a 8	0,0344	0,0215
8 a 10	0,0324	0,0223
10 a 12	0,0325	0,0222
12 a 14	0,0333	0,0215
14 a 16	0,0331	0,0214
16 a 18	0,0324	0,0216
18 a 20	0,0328	0,0217
20 a 22	0,0336	0,0215
22 a 24	0,0347	0,0214

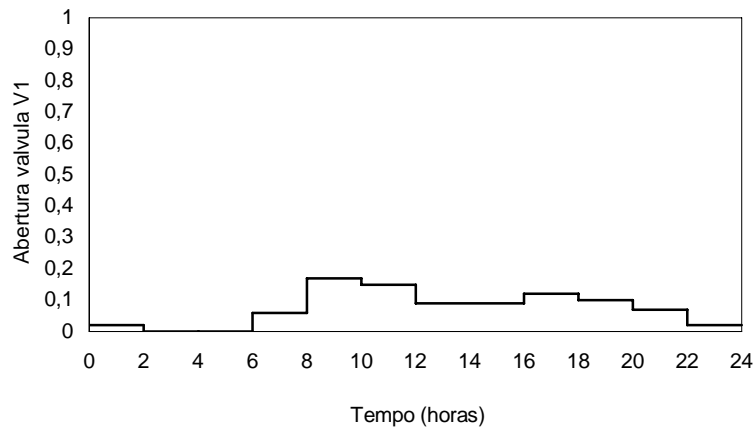


FIGURA 5.6 - Abertura da válvula 1 na rede exemplo 2.

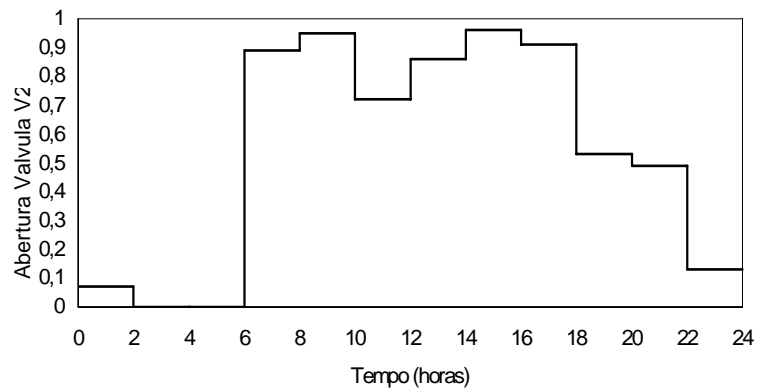


FIGURA 5.7 - Abertura da válvula 2 na rede exemplo 2.

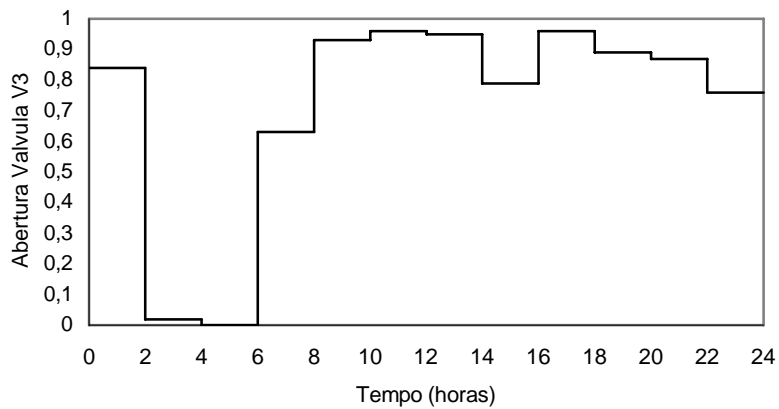


FIGURA 5.8 - Abertura da válvula 3 na rede exemplo 2.

A redução das perdas físicas é claramente mostrada na figura 5.9, apresentando as curvas das vazões das perdas físicas, sem e com a ação das válvulas de controle de pressão, para o período de 24 horas.

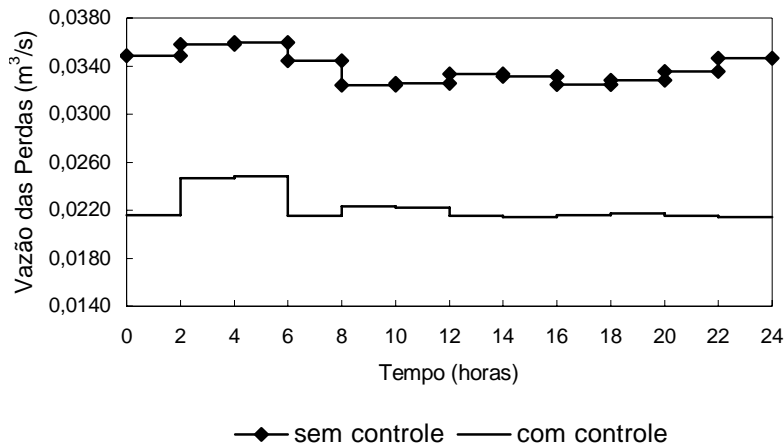


FIGURA 5.9 - Comparação das vazões de perdas físicas na rede exemplo 2.

Nota-se claramente na figura 5.9, que a curva representada pelas perdas físicas na rede exemplo 2, com a ação das válvulas redutoras de pressão, tende a ser uniforme, constante ao longo do tempo, exceto no período das 2 as 6 horas da manhã, quando a demanda é mínima, o que sugere para um estudo futuro a discussão se o número de válvulas é insuficiente, ou se a posição delas não é a melhor, ou ambas as situações.

Para as mesmas condições analisadas, a tabela 5.13 mostra os volumes das perdas físicas na rede exemplo 2, para cada período de duas horas, e o total por dia, com os respectivos percentuais de reduções.

O total diário das perdas físicas na situação sem válvula de controle é de 2.918 m^3 , e com a ação das válvulas este volume se reduz para 1.914 m^3 , o que representa uma redução no volume de perda física na rede para um período de 24 horas de 34,40%.

A figura 5.10, mostra para cada simulação, os valores dos volumes das perdas físicas na rede exemplo 2, para as duas condições analisadas.

Tabela 5.13 - Volume diário de perdas físicas na rede exemplo 2.

Tempo (horas)	Volumes perdas(m ³)		redução (%)
	sem válvulas de controle	com válvulas de controle	
0 a 2	251	155	38,24
2 a 4	257	177	31,12
4 a 6	259	178	31,27
6 a 8	248	155	27,50
8 a 10	233	160	31,33
10 a 12	234	160	31,62
12 a 14	239	155	35,14
14 a 16	238	154	35,29
16 a 18	233	155	33,47
18 a 20	236	156	33,89
20 a 22	241	155	35,68
22 a 24	249	154	38,15
Total dia	2918	1914	34,40

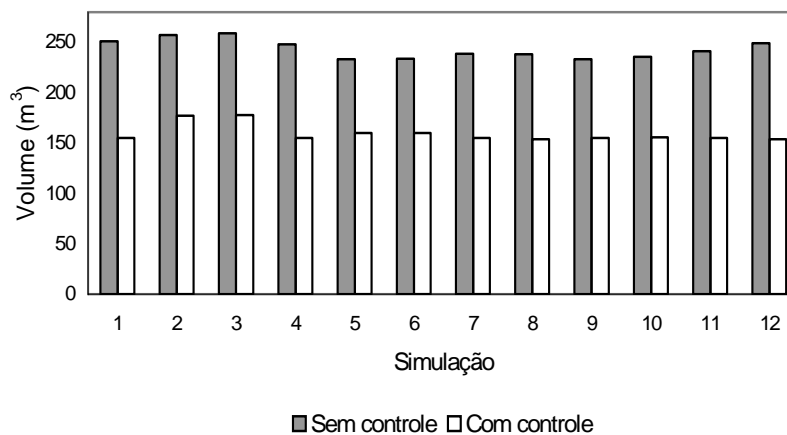


FIGURA 5.10 - Comparativo dos volumes de perdas físicas na rede exemplo 2.

Para efeito de exemplificação da variação das pressões com a demanda durante o período de 24 horas, mostra-se na figura 5.11 a curva da pressão no nó 18 sem a ação de válvula de controle, e na figura 5.12 a variação da demanda diária, observando-se claramente que quando a demanda diminui a pressão aumenta. A figura 5.13 mostra a regularização das pressões neste mesmo nó, com a ação das válvulas de controle.

Em relação à técnica dos algoritmos genéticos, os resultados da rede exemplo 2 podem ser obtidos com uma população de 40 indivíduos e 80 gerações. Utilizou-se como probabilidade de recombinação $P_c = 0,6$ e probabilidade de mutação $P_m = 0,3$.

Inicialmente foram consideradas na função aptidão como penalidades, os nós selecionados como críticos para a rede exemplo 2, ou seja, os nós 13, 19, 21 e 22 ((JOWITT e XU, 1990). No entanto após sucessivas simulações e observando-se o comportamento das pressões nos nós de toda a rede, foram selecionados como críticos e incorporados também como penalidades os nós 15, 18 e 20, pois estes nós apresentavam pressões em torno de 1% abaixo de 30 metros de coluna de água.

Incorporando-se à função aptidão, como penalidades, os nós críticos 13, 15, 18, 19, 20, 21 e 22, observou-se uma melhor estabilização das pressões para todos os nós da rede próximas da pressão mínima de 30 metros de coluna de água.

Para a equação (4.59) foram adotados $\varphi = 0,4$ e $\mu = 0,8$. O coeficiente $\varphi = 0,4$, foi estabelecido após várias simulações, de modo que as pressões nos nós de referência estabilizassem, o mais próximo possível, da pressão mínima requerida, ou seja, 30 metros de coluna de água.

O valor do coeficiente $\mu = 0,80$, foi adotado de acordo com o valor experimental obtido por SAVIC e WALTERS (1997).

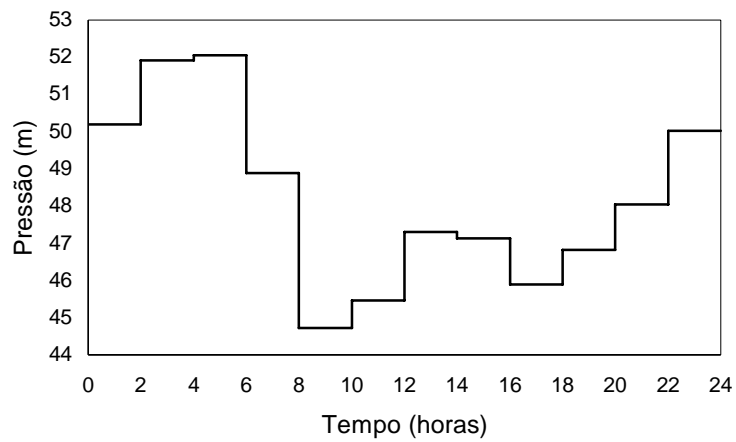


FIGURA 5.11 - Pressão no nó 18 da rede exemplo 2, sem válvula de controle.

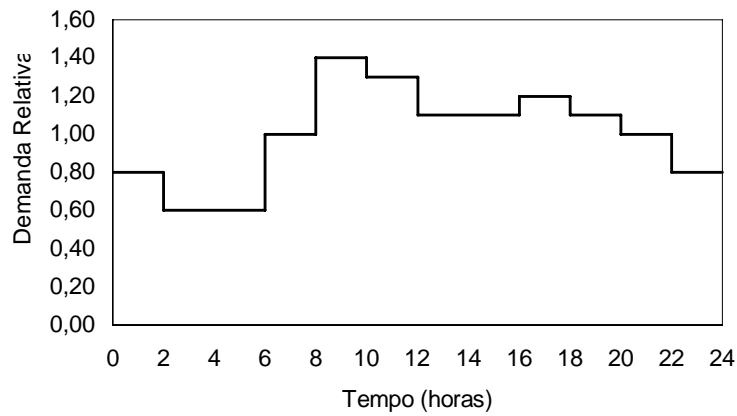


Figura 5.12 - Variação diária da demanda na rede exemplo 2.

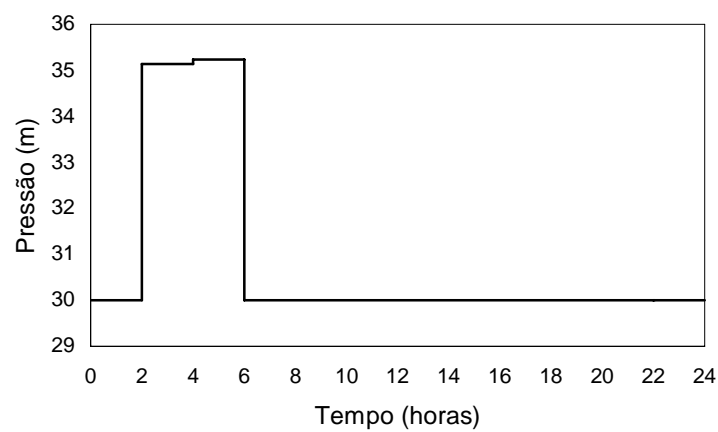


Figura 5.13 - Pressão no nó 18 da rede exemplo 2, com válvula de controle.

Ressalte-se que a configuração otimizada das válvulas não é única, ou seja, pode-se obter o mesmo volume de perda física de água por simulação e total diário, com diferentes aberturas de válvulas ao longo do período de 24 horas.

As tabelas 5.20 e 5.21 mostram, como exemplos, outras duas configurações de aberturas das válvulas V(1), V(2) e V(3), que levam aos mesmos valores de perdas físicas obtidos com as aberturas das válvulas, apresentadas na tabela 5.11.

Tabela 5.20 - Exemplo (1) de configuração otimizada das válvulas da rede exemplo 2.

Tempo (horas)	Configuração otimizada		
	V(1)	V(2)	V(3)
0 a 2	0,02	0,11	0,50
2 a 4	0,00	0,00	0,01
4 a 6	0,00	0,00	0,24
6 a 8	0,06	0,87	0,87
8 a 10	0,17	0,97	0,35
10 a 12	0,15	0,75	0,53
12 a 14	0,09	0,87	0,81
14 a 16	0,09	0,87	0,60
16 a 18	0,13	0,55	0,93
18 a 20	0,10	0,56	0,57
20 a 22	0,07	0,50	0,76
22 a 24	0,02	0,19	0,27

Tabela 5.21 - Exemplo (2) de configuração otimizada das válvulas da rede exemplo 2.

Tempo (horas)	Configuração otimizada		
	V(1)	V(2)	V(3)
0 a 2	0,02	0,12	0,42
2 a 4	0,00	0,00	0,04
4 a 6	0,00	0,01	0,39
6 a 8	0,06	0,90	0,52
8 a 10	0,18	0,71	0,90
10 a 12	0,15	0,73	0,87
12 a 14	0,09	0,86	0,95
14 a 16	0,10	0,45	0,85
16 a 18	0,12	0,93	0,69
18 a 20	0,10	0,55	0,67
20 a 22	0,07	0,52	0,55
22 a 24	0,02	0,12	0,86

TABELA 5.14- Pressões na rede exemplo 2 (0 a 12 horas).

Tempo (horas)	0 a 2		2 a 4		4 a 6		6 a 8		8 a 10		10 a 12	
	sem válvulas de controle	com válvulas de controle	sem válvulas de controle	com válvulas de controle	sem válvulas de controle	com válvulas de controle	sem válvulas de controle	com válvulas de controle	sem válvulas de controle	com válvulas de controle	sem válvulas de controle	com válvulas de controle
1	55,15	55,13	55,32	55,31	55,58	55,57	55,74	55,72	55,93	55,92	55,30	55,29
2	55,10	55,06	55,28	55,25	55,54	55,51	55,67	55,62	55,82	55,78	55,20	55,16
3	52,19	32,23	53,31	36,93	53,45	37,04	51,55	31,64	49,01	33,42	49,29	33,65
4	52,14	31,97	53,30	36,76	53,44	36,87	51,45	31,31	48,78	32,92	49,10	33,19
5	52,18	31,97	53,33	36,76	53,47	36,87	51,50	31,32	48,83	32,93	49,16	33,20
6	52,45	32,19	53,50	36,89	53,64	37,00	51,88	31,62	49,50	33,51	49,75	33,72
7	52,30	32,07	53,40	36,82	53,55	36,93	51,67	31,45	49,13	33,19	49,42	33,43
8	52,77	32,41	53,71	37,03	53,85	37,14	52,33	31,95	50,28	34,16	50,43	34,29
9	52,57	32,28	53,58	36,95	53,72	37,06	52,06	31,75	49,81	33,77	50,02	33,95
10	52,88	33,29	53,78	37,75	53,92	37,86	52,48	32,85	50,54	35,04	50,67	35,15
11	52,92	32,64	53,81	37,23	53,95	37,34	52,54	32,19	50,62	34,80	50,74	34,88
12	53,60	32,47	54,26	37,04	54,40	37,15	53,52	32,11	52,32	35,01	52,24	35,01
13	54,40	54,90	54,79	55,15	54,93	55,29	54,65	55,31	54,23	54,98	53,93	54,65
14	54,76	54,88	55,03	55,12	55,20	55,29	55,22	55,38	55,18	55,35	54,73	54,90
15	50,47	30,01	52,11	35,18	52,25	35,28	49,22	30,14	45,24	30,37	45,93	30,30
16	50,41	30,21	52,06	35,32	52,20	35,42	49,16	30,28	45,18	30,42	45,86	30,36
17	50,36	30,16	52,02	35,28	52,16	35,39	49,09	30,21	45,07	30,32	45,76	30,28
18	50,20	30,00	51,91	35,14	52,05	35,24	48,88	30,00	44,72	30,00	45,46	30,00
19	50,25	30,05	51,94	35,20	52,08	35,31	48,94	30,07	44,81	30,08	45,53	30,07
20	50,21	30,00	51,91	35,14	52,06	35,24	48,90	30,01	44,76	30,03	45,49	30,03
21	50,38	30,04	52,02	35,14	52,16	35,24	49,13	30,09	45,15	30,32	45,84	30,29
22	51,09	30,85	52,57	36,02	52,71	36,13	50,02	30,42	46,45	31,07	47,03	31,26

TABELA 5.15- Pressões na rede exemplo 2 (12 a 24 horas).

Tempo (horas)	12 a 14		14 a 16		16 a 18		18 a 20		20 a 22		22 a 24	
	sem válvulas de controle	com válvulas de controle	sem válvulas de controle	com válvulas de controle	sem válvulas de controle	com válvulas de controle	sem válvulas de controle	com válvulas de controle	sem válvulas de controle	com válvulas de controle	sem válvulas de controle	com válvulas de controle
1	55,07	55,06	54,77	54,76	54,58	54,57	54,45	54,44	54,66	54,64	54,87	54,86
2	54,99	54,95	54,70	54,65	54,50	54,46	54,38	54,33	54,59	54,55	54,82	54,78
3	50,34	32,14	50,17	31,99	49,34	32,55	49,88	33,07	50,71	32,49	52,02	32,09
4	50,21	31,77	50,05	31,62	49,18	32,14	49,75	32,70	50,61	32,16	51,97	31,83
5	50,26	31,77	50,09	31,62	49,23	32,14	49,80	32,70	50,66	32,16	52,01	31,83
6	50,71	32,14	50,54	31,99	49,75	32,58	50,25	33,09	51,04	32,48	52,28	32,05
7	50,46	31,94	50,29	31,78	49,46	32,34	50,00	32,88	50,83	32,31	52,13	31,93
8	51,23	32,54	51,06	32,39	50,35	33,06	50,77	33,51	51,49	32,83	52,60	32,27
9	50,91	32,30	50,75	32,15	49,98	32,77	50,45	33,26	51,21	32,62	52,40	32,13
10	51,41	33,41	51,25	33,25	50,56	33,92	50,95	34,34	51,65	33,67	52,71	33,15
11	51,46	32,87	51,30	32,70	50,62	33,52	51,01	33,90	51,70	33,11	52,75	32,49
12	52,60	32,86	52,44	32,69	51,91	33,54	52,13	33,91	52,66	33,07	53,43	32,32
13	53,90	54,58	53,73	54,39	53,39	54,04	53,41	53,99	53,77	54,30	54,22	54,70
14	54,50	54,66	54,28	54,44	53,93	54,08	53,86	53,99	54,17	54,30	54,51	54,62
15	47,68	30,19	47,52	30,20	46,33	30,26	47,21	30,18	48,37	30,13	50,29	30,02
16	47,62	30,30	47,46	30,30	46,26	30,33	47,15	30,29	48,31	30,26	50,23	30,21
17	47,55	30,23	47,38	30,23	46,17	30,25	47,07	30,22	48,25	30,20	50,18	30,16
18	47,30	30,00	47,14	30,00	45,90	30,00	46,83	30,00	48,04	30,00	50,02	30,00
19	47,37	30,06	47,20	30,07	45,97	30,07	46,90	30,06	48,09	30,06	50,07	30,06
20	47,33	30,02	47,16	30,02	45,93	30,02	46,86	30,02	48,06	30,01	50,04	30,00
21	47,60	30,16	47,43	30,15	46,24	30,22	47,13	30,18	48,29	30,12	50,20	30,03
22	48,58	30,59	48,42	30,53	47,33	30,75	48,12	31,11	49,18	30,86	50,92	30,78

TABELA 5.16- Vazões na rede exemplo 2, trechos 1 a 22 (0 e 12 horas).

Tempo (horas)	0 a 2		2 a 4		4 a 6		6 a 8		8 a 10		10 a 12	
	sem válvulas de controle	com válvulas de controle	sem válvulas de controle	com válvulas de controle	sem válvulas de controle	com válvulas de controle	sem válvulas de controle	com válvulas de controle	sem válvulas de controle	com válvulas de controle	sem válvulas de controle	com válvulas de controle
1	0,0120	0,0160	0,0100	0,0130	0,0100	0,0140	0,0150	0,0180	0,0190	0,0220	0,0180	0,0210
2	0,0020	0,0060	0,0010	0,0050	0,0010	0,0050	0,0020	0,0060	0,0030	0,0060	0,0030	0,0060
3	0,0010	0,0040	0,0000	0,0030	0,0000	0,0030	0,0020	0,0040	0,0030	0,0050	0,0030	0,0050
4	-0,0020	0,0000	-0,0020	0,0000	-0,0020	0,0000	-0,0030	0,0000	-0,0030	-0,0010	-0,0030	-0,0010
5	-0,0010	0,0000	-0,0010	0,0000	-0,0010	0,0000	-0,0020	0,0000	-0,0020	-0,0010	-0,0020	0,0000
6	-0,0050	-0,0040	-0,0040	-0,0030	-0,0040	-0,0030	-0,0060	-0,0060	-0,0090	-0,0080	-0,0080	-0,0080
7	-0,0260	-0,0230	-0,0200	-0,0180	-0,0200	-0,0180	-0,0320	-0,0280	-0,0430	-0,0400	-0,0400	-0,0380
8	-0,0260	-0,0230	-0,0210	-0,0180	-0,0210	-0,0180	-0,0320	-0,0280	-0,0430	-0,0400	-0,0410	-0,0380
9	-0,0360	-0,0300	-0,0280	-0,0230	-0,0280	-0,0230	-0,0440	-0,0360	-0,0580	-0,0530	-0,0550	-0,0500
10	-0,0070	-0,0060	-0,0060	-0,0040	-0,0060	-0,0040	-0,0090	-0,0070	-0,0120	-0,0110	-0,0110	-0,0100
11	-0,0070	-0,0060	-0,0060	-0,0040	-0,0060	-0,0040	-0,0090	-0,0070	-0,0120	-0,0110	-0,0110	-0,0100
12	0,0190	0,0600	0,0150	0,0540	0,0150	0,0540	0,0230	0,0610	0,0310	0,0600	0,0290	0,0590
13	-0,0030	0,0130	-0,0020	0,0120	-0,0020	0,0120	-0,0030	0,0130	-0,0040	0,0080	-0,0040	0,0080
14	-0,0110	0,0050	-0,0090	0,0050	-0,0090	0,0050	-0,0140	0,0030	-0,0180	-0,0060	-0,0170	-0,0040
15	-0,0650	-0,0150	-0,0520	-0,0040	-0,0520	-0,0040	-0,0790	-0,0260	-0,1060	-0,0650	-0,0990	-0,0600
16	0,0950	0,0110	0,0760	0,0000	0,0760	0,0000	0,1150	0,0350	0,1520	0,0920	0,1430	0,0810
17	0,0160	0,0010	0,0130	0,0000	0,0130	0,0000	0,0190	0,0110	0,0250	0,0190	0,0240	0,0150
18	0,0230	0,0220	0,0190	0,0180	0,0190	0,0180	0,0280	0,0220	0,0360	0,0320	0,0340	0,0320
19	-0,0040	-0,0040	-0,0030	-0,0030	-0,0030	-0,0030	-0,0040	-0,0030	-0,0060	-0,0050	-0,0050	-0,0050
20	-0,0060	-0,0070	-0,0050	-0,0070	-0,0050	-0,0070	-0,0070	-0,0040	-0,0090	-0,0070	-0,0090	-0,0080
21	0,0010	0,0000	0,0010	0,0000	0,0010	0,0000	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0000
22	-0,0020	-0,0010	-0,0010	0,0000	-0,0010	0,0000	-0,0020	0,0000	-0,0030	-0,0020	-0,0020	-0,0020

TABELA 5.17- Vazões na rede exemplo 2, trechos 23 a 37 (0 a 12 horas).

Tempo (horas)	0 a 2		2 a 4		4 a 6		6 a 8		8 a 10		10 a 12	
	sem válvulas de controle	com válvulas de controle	sem válvulas de controle	com válvulas de controle	sem válvulas de controle	com válvulas de controle	sem válvulas de controle	com válvulas de controle	sem válvulas de controle	com válvulas de controle	sem válvulas de controle	com válvulas de controle
23	-0,0010	0,0000	-0,0010	0,0000	-0,0010	0,0000	-0,0020	-0,0010	-0,0030	-0,0020	-0,0020	-0,0020
24	0,0000	0,0010	0,0000	0,0010	0,0000	0,0010	0,0000	0,0010	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
25	-0,0010	-0,0010	-0,0010	0,0000	-0,0010	0,0000	-0,0020	-0,0010	-0,0030	-0,0030	-0,0020	-0,0020
26	0,0050	0,0050	0,0040	0,0040	0,0040	0,0040	0,0060	0,0060	0,0080	0,0080	0,0080	0,0070
27	0,0020	0,0020	0,0020	0,0020	0,0020	0,0020	0,0030	0,0030	0,0040	0,0040	0,0040	0,0030
28	-0,0030	0,0070	-0,0030	0,0060	-0,0030	0,0060	-0,0030	0,0060	-0,0040	0,0030	-0,0040	0,0040
29	0,0090	0,0080	0,0070	0,0070	0,0070	0,0070	0,0100	0,0100	0,0130	0,0120	0,0120	0,0120
30	0,0060	0,0170	0,0050	0,0150	0,0050	0,0150	0,0080	0,0170	0,0100	0,0170	0,0090	0,0160
30	0,0420	-0,0050	0,0340	-0,0060	0,0370	0,0030	0,0550	0,0220	0,0720	0,0460	0,0650	0,0380
32	0,0400	-0,0080	0,0320	-0,0090	0,0340	0,0000	0,0520	0,0160	0,0680	0,0410	0,0620	0,0330
33	0,0030	0,0020	0,0020	0,0010	0,0020	0,0000	0,0030	0,0000	0,0040	0,0020	0,0040	0,0030
34	0,0560	0,0210	0,0450	0,0110	0,0430	0,0010	0,0640	0,0200	0,0850	0,0520	0,0820	0,0480
35	0,0220	0,0790	0,0180	0,0700	0,0170	0,0700	0,0260	0,0810	0,0350	0,0770	0,0330	0,0760
36	-0,0560	-0,0560	-0,0530	-0,0520	-0,0740	-0,0740	-0,0840	-0,0840	-0,0980	-0,0980	-0,0680	-0,0680
37	0,0170	0,0210	0,0140	0,0170	0,0140	0,0170	0,0210	0,0240	0,0270	0,0300	0,0260	0,0280

TABELA 5.18- Vazões na rede exemplo 2, trechos 1 a 22 (12 e 24 horas).

Tempo (horas)	12 a 14		14 a 16		16 a 18		18 a 20		20 a 22		22 a 24	
	sem válvulas de controle	com válvulas de controle	sem válvulas de controle	com válvulas de controle	sem válvulas de controle	com válvulas de controle	sem válvulas de controle	com válvulas de controle	sem válvulas de controle	com válvulas de controle	sem válvulas de controle	com válvulas de controle
Vazão trecho (m ³ /s)												
1	0,0160	0,0190	0,0160	0,0190	0,0170	0,0200	0,0160	0,0190	0,0150	0,0180	0,0120	0,0160
2	0,0020	0,0060	0,0020	0,0060	0,0020	0,0060	0,0020	0,0060	0,0020	0,0060	0,0020	0,0060
3	0,0020	0,0050	0,0020	0,0050	0,0030	0,0050	0,0020	0,0050	0,0020	0,0040	0,0010	0,0040
4	-0,0030	0,0000	-0,0030	0,0000	-0,0030	0,0000	-0,0030	0,0000	-0,0030	0,0000	-0,0020	0,0000
5	-0,0020	0,0000	-0,0020	0,0000	-0,0020	0,0000	-0,0020	0,0000	-0,0020	0,0000	-0,0010	0,0000
6	-0,0070	-0,0060	-0,0070	-0,0060	-0,0080	-0,0070	-0,0070	-0,0060	-0,0060	-0,0060	-0,0050	-0,0040
7	-0,0350	-0,0310	-0,0350	-0,0310	-0,0370	-0,0340	-0,0350	-0,0320	-0,0320	-0,0290	-0,0260	-0,0230
8	-0,0350	-0,0310	-0,0350	-0,0310	-0,0380	-0,0340	-0,0350	-0,0320	-0,0320	-0,0290	-0,0260	-0,0230
9	-0,0470	-0,0410	-0,0470	-0,0410	-0,0510	-0,0450	-0,0470	-0,0420	-0,0430	-0,0370	-0,0360	-0,0300
10	-0,0100	-0,0080	-0,0100	-0,0080	-0,0100	-0,0090	-0,0100	-0,0080	-0,0090	-0,0070	-0,0070	-0,0060
11	-0,0100	-0,0080	-0,0100	-0,0080	-0,0110	-0,0090	-0,0100	-0,0090	-0,0090	-0,0080	-0,0070	-0,0060
12	0,0250	0,0600	0,0250	0,0600	0,0280	0,0590	0,0260	0,0580	0,0240	0,0590	0,0200	0,0600
13	-0,0030	0,0120	-0,0030	0,0120	-0,0030	0,0100	-0,0030	0,0110	-0,0030	0,0120	-0,0020	0,0130
14	-0,0150	0,0010	-0,0150	0,0010	-0,0160	-0,0010	-0,0150	0,0000	-0,0130	0,0020	-0,0110	0,0050
15	-0,0850	-0,0380	-0,0850	-0,0370	-0,0920	-0,0480	-0,0850	-0,0430	-0,0780	-0,0330	-0,0650	-0,0140
16	0,1240	0,0510	0,1230	0,0510	0,1320	0,0660	0,1230	0,0540	0,1140	0,0390	0,0950	0,0110
17	0,0210	0,0130	0,0210	0,0140	0,0220	0,0150	0,0210	0,0090	0,0190	0,0070	0,0160	0,0010
18	0,0300	0,0250	0,0300	0,0250	0,0320	0,0280	0,0300	0,0280	0,0280	0,0250	0,0230	0,0220
19	-0,0050	-0,0040	-0,0050	-0,0030	-0,0050	-0,0040	-0,0050	-0,0040	-0,0040	-0,0040	-0,0040	-0,0030
20	-0,0080	-0,0050	-0,0080	-0,0040	-0,0080	-0,0050	-0,0080	-0,0080	-0,0070	-0,0070	-0,0060	-0,0070
21	0,0010	0,0000	0,0010	0,0010	0,0010	0,0000	0,0010	0,0000	0,0010	0,0000	0,0010	0,0000
22	-0,0020	-0,0010	-0,0020	-0,0010	-0,0020	-0,0010	-0,0020	-0,0020	-0,0020	-0,0010	-0,0020	-0,0010

TABELA 5.19- Vazões na rede exemplo 2, trechos 23 a 37 (12 e 24 horas).

Tempo (horas)	12 a 14		14 a 16		16 a 18		18 a 20		20 a 22		22 a 24	
	sem válvulas de controle	com válvulas de controle	sem válvulas de controle	com válvulas de controle	sem válvulas de controle	com válvulas de controle	sem válvulas de controle	com válvulas de controle	sem válvulas de controle	com válvulas de controle	sem válvulas de controle	com válvulas de controle
23	-0,0020	-0,0010	-0,0020	-0,0010	-0,0020	-0,0010	-0,0020	-0,0010	-0,0020	-0,0020	-0,0010	-0,0010
24	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0010
25	-0,0020	-0,0020	-0,0020	-0,0020	-0,0020	-0,0020	-0,0020	-0,0020	-0,0020	-0,0020	-0,0010	-0,0010
26	0,0070	0,0060	0,0070	0,0060	0,0070	0,0070	0,0070	0,0060	0,0060	0,0060	0,0050	0,0050
27	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030	0,0020	0,0020
28	-0,0030	0,0050	-0,0030	0,0050	-0,0040	0,0040	-0,0040	0,0050	-0,0030	-0,0030	-0,0030	0,0070
29	0,0110	0,0100	0,0110	0,0100	0,0120	0,0110	0,0110	0,0100	0,0100	0,0100	0,0090	0,0080
30	0,0080	0,0160	0,0080	0,0160	0,0090	0,0160	0,0080	0,0160	0,0070	0,0070	0,0060	0,0160
30	0,0560	0,0220	0,0520	0,0150	0,0510	0,0140	0,0460	0,0040	0,0430	0,0430	0,0360	-0,0160
32	0,0530	0,0170	0,0500	0,0120	0,0500	0,0120	0,0450	0,0030	0,0420	0,0420	0,0350	-0,0180
33	0,0040	0,0030	0,0050	0,0040	0,0060	0,0050	0,0060	0,0050	0,0050	0,0050	0,0040	0,0040
34	0,0720	0,0340	0,0740	0,0390	0,0830	0,0550	0,0790	0,0520	0,0720	0,0720	0,0610	0,0310
35	0,0290	0,0790	0,0290	0,0790	0,0320	0,0770	0,0290	0,0760	0,0270	0,0270	0,0230	0,0790
36	-0,0740	-0,0740	-0,0450	-0,0450	-0,0250	-0,0240	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
37	0,0220	0,0260	0,0220	0,0250	0,0240	0,0270	0,0220	0,0250	0,0200	0,0200	0,0170	0,0210

6. Conclusões

Sistemas de água são planejados e projetados para suprir os atuais e futuros picos de demanda. É inevitável que pressões excessivas existam e freqüentemente ocorrerão, principalmente em períodos de menor demanda. Embora pressões adequadas sejam essenciais para manter um serviço satisfatório, pressões excessivas são indesejáveis pois elas podem produzir um significativo nível de perdas físicas de água.

As perdas físicas de água devem ser reduzidas a níveis apropriados, sem prejudicar a qualidade dos serviços, e sua redução leva ao uso mais racional dos recursos hídricos, uma economia financeira nos custos operacionais anuais, e ao adiamento de investimentos para incrementar a capacidade produtora do sistema.

Este trabalho apresenta um modelo para minimizar as perdas nas redes de distribuição de água, através do controle otimizado de válvulas redutoras de pressão com a utilização da técnica dos algoritmos genéticos. Propõe também uma generalização da formulação para análise de redes de distribuição incluindo-se as perdas físicas de água.

O modelo demonstrou-se apropriado para minimização de perdas, e a técnica dos algoritmos genéticos mostrou-se uma ferramenta eficaz na resolução do problema. A redução de perdas físicas nas duas redes exemplos estudadas neste trabalho foi superior a 30%, resultado semelhante ao obtido por outras técnicas de otimização.

Constatou-se através das simulações realizadas, que para as mesmas condições de experimentação, podem ser obtidas diferentes configurações de aberturas das válvulas redutoras de pressão para o mesmo volume de perdas físicas, deduzindo-se que não se tem garantia de solução única.

Observou-se também que foram obtidos os mesmos valores para o coeficiente do fator de penalidade $\varphi = 0,40$, para a probabilidade de recombinação $P_c = 0,6$ e para a probabilidade de mutação $P_m = 0,3$, tanto para a rede exemplo 1, como para a rede exemplo 2, e em várias situações de simulação, o que pode ser uma referência em problemas similares.

Finalmente, embora não considerado neste trabalho, estudos podem ser desenvolvidos para se determinar o número ótimo e a melhor localização das válvulas redutoras de pressão.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALONSO, J.M.; ALVARRUIZ, F.; GUERRERO, D.; HERNÁNDEZ,V.; RUIZ, P.A.; VIDAL, A.M; MARTÍNEZ, F.; VERCHER,J.;ULANICKI,B. – **Parallel computing in water network analysis and leakage minimization**. Journal of Water Resources Planning and Management, Vol.126, n°.4, p. 251-260, 2000.
- ARGOLO, W.P.de, - **Otimização de seções de concreto armado submetido a flexo-compressão utilizando algoritmos genéticos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 12.218 - Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público**. Rio de Janeiro, 1994.
- BARGIELA, A. - **On line monitoring of water distribution systems**. Tese de Doutorado University of Durham, United Kingdom,1984.
- CHANDRASHEKAR, M. - **Extended set of components in pipe networks**. Journal of the Hydraulics Division, Vol. 106, n°. HY1, p.133-149, 1980.
- CHANDRASHEKAR, M.; STEWART, K.H. – **Sparsity oriented analysis of large pipe networks**. Journal of the Hidraulic Division, Vol. 101, n° HY4, p. 341-355, 1975.
- CHEUNG, P.B. - **Curso de introdução aos algoritmos genéticos**. Campo Grande, MS, Março 2002.
- CHEUNG, P.B.; REIS, L.F.R. – **Análise de reabilitação de sistemas de distribuição de águas para abastecimento**. Plano de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2001.
- CROSS, H. - **Analysis of flow in networks of conduits or conductors**. Bulletin n° 286, University of Illinois Engineering, Experimental Station, Urbana,III,1936.
- DANDY, G.C.; SIMPSON, A.R.; MURPHY, L.J. - **An improved genetic algorithm for pipe network optimization**. Water Resources Research, Vol. 32, n° 2, p. 449-458, 1996.
- DODGE, E.R.; HOELLEIN, H.R.; TETMAJER, L. - **The analysis of large complex water networks with small computer systems**. Journal American Water Works Association, p.366-370, 1978.

- EPP, R.; FOWLER, A.G. - **Efficient code for steady-state flows in networks.** Journal of the Hydraulic Division, Vol. 96, n° HY1, p. 43-56, 1970.
- FIETZ, T.R. - **Hydraulics network analysis using linear theory.** Journal of the Hydraulics Division, n°. HY5, p.855-857, 1973.
- GEN, M.; CHENG, R. - **Genetic Algorithms and Engineering Design.** New York, John Wiley & Sons, INC., 1997.
- GERMANOPOULOS, G. - **Modelling and operational control of water supply networks.** Tese de Doutorado.University of London, 1988.
- GERMANOPOULOS, G.; JOWITT, P.W. - **Leakage reduction by excessive pressure minimization in a water supply network.** Proc. Institution Civ.Engrs., Part.2, n° 87, p.195-214, 1989.
- GOLDBERG, D. - **Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning.** Addison-Wesley, Reading, MA, 1989.
- GOLDBERG, D.; KUO, C.H. - **Genetic algorithms in pipeline optimization.** Journal of Computing in Civil Engineering, Vol. 1, n° 2, 1987.
- HINDI, K.S; HAMAM, Y.M. - **Pressure control for leakage minimization in water supply networks. Part 1 – Single period models.** Int. J. Systems Sci, Vol. 22, n° 9, p. 1573-1585, 1991a.
- HINDI, K.S.; HAMAM, Y.M. - **Pressure control for leakage minimization in water supply networks. Part 2 – Multi-period models.** Int. J. Systems Sci, Vol. 22, n° 9, p. 1587-1598, 1991b.
- ISSACS, L.T.; MILLS, K.G. - **Linear teory methods for pipe network analysis.** Journal of the Hidraulics Division, Vol. 106, n° HY12, p. 1191-1201, 1980.
- JEPPSON, R.W.; DAVIS, A.L. - **Pressure reducing valves in pipe networks analysis.** Journal of the Hydraulics Division, Vol. 102, n. HY7, p. 987-1001, 1976 .
- JEPPSON, R.W.; TAVALLAEE, A. - **Improved Design of Fluid Network with Computers.** Journal of the Hydraulics Division , Vol. 101 , n° HY3 , p. 576-580 , 1975 .
- JOWITT, P.; XU, C. - **Optical valve control in water distribution networks.** Journal of Water Resurces Planning and Management, Vol. 116, n° 4, p.455-472, 1990.

- KALLY, E. - **Hydraulic network analysis using linear theory.** Journal of the Hydraulics Division, n° HY5, p. 857-859, 1973
- LAM, C.F.; WOLLA, M.L. - **Computer analysis of water distribution systems. Part 1 – Formulation of equations.** Journal of the Hidraulics Division, Vol. 98, n° HY2, p. 335-344, 1972a.
- LAM, C.F.; WOLLA, M.L. - **Computer analysis of water distribution systems. Part 2 – Numerical solution.** Journal of the Hidraulics Division, Vol. 98, n° HY3, p. 447-460, 1972b,
- LEMIEUX, P.F. - **Efficient algorithm for distribution networks.** Journal of the Hidraulics Division, Vol. 98, n° HY11, p. 1911-1920, 1972.
- LEMONGE, A.C. de C. - **Aplicação de algoritmos genéticos em otimização estrutural.** Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1999.
- MARLON, TA; HARDISON, R.L.; JACOBSON, H.; BIGGS, G.E. - **Improved Design of Fluid Network with Computers.** Journal of the Hydraulics Division , Vol. 92 , n° HY4 , p. 43-61 , 1966 .
- MARTIN, D.W; PETER, S.G. - **The application of Newton´s method to network analysis by digital computer.** J.Inst.of Water Engineers , Vol. 17, n° 2, p. 115-129, 1963.
- McILROY, M.S. - **Direct-reading electric analyser for pipeline networks.** Journal American Water Works Association, p.347-365, 1950.
- McPHERSON, M.B. - **Generalized distribution network head loss characteristics.** Journal of the Hydraulics Division, Vol. 86, n° HY1, p.75-91,1960.
- MICHALEWICZ, Z. - **Genetic Algorithm + Data Structures = Evolution Programs.** 2 nd. ed., New York, Springer-Verlag, 1992.
- MONTESINOS, P.; GARCIA-GUZMAN, A.; AYUSO, J. L. **Water distribution network optimization using a modified genetic algorithm.** Water Resources Research, Vol. 35, n° 11, p. 3467-3474, 1999.
- MUIR, J.F. - **Improved Design of Fluid Networks with Computers.** Journal of the Hydraulics Division, n.° HY2 , p. 88-90 . 1967.

- NATIONAL WATER COUNCIL - **Leakage control policy and practice**. Standing technical committee reports, n^o26, Dept.of the Envir. Britain, 1980.
- NIELSEN, H.B. - **Methods for analyzing pipe networks**. Journal of Hidraulic Engineering, Vol. 115, n^o 2, p. 139-157, 1989.
- PUDAR, R.S.; LIGGETT, J.A. - **Leaks in pipe networks**. Journal of Hidraulic Engineering, Vol. 118, n^o 7, p. 1031-1045, 1992.
- RAMAN, V. ; RAMAN, S. – **New method of solving distribution system networks based on equivalent pipe length**. Journal American Water Works Association, p.615-627, 1966.
- RATCLIFFE, B. - **The performance and selection of pressure reducing valves, part 1**. WRC Tech. Report 238, Water Resource Centre, Swindon, United Kingdon, 1986.
- REIS, L.F.R.; PORTO, R.M.; CHAUDHRY, F.H.- **Optimal location of control valves in pipe networks by genetic algorithm**. Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 123, n^o 6, p.317-326, 1997.
- RIGHETTO, A.M. - **Desenvolvimento de modelos de simulação para o desenvolvimento de redes de distribuição de água**. São Carlos, SHS-EESC. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1977.
- SAVIC, D.A.; WALTERS, G.A. - **Genetic algorithm for least-cost design of water distribution networks**. Journal of Water Resurces Planning and Management, Vol. 123, n^o 2, p. 67-77, 1997.
- SAVULESCO, S.C. – **Grafos, dígrafos, e redes elétricas: aplicação na pesquisa operacional**. São Paulo: Instituto Brasileiro de Edições Científicas,1980.
- SHAMIR, U.; HOWARD, C.D.D. - **Water distribution system analysis**. Journal of the hydraulic division, Vol.94, n^o HY1, p.219-234, 1968.
- SILVA, F.G.B.; REIS, L.F.R.; CALIMAN, R.O.; PORTO, R.M.; CHAUDHRY, F.H. – **Aplicação de método de determinação da rede de amostragem ótima para calibração de sistemas de distribuição de água de abastecimento através de algoritmos genéticos (AGs)**. Trabalho apresentado no XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Aracaju, 2001.

- SOUZA, R.S. - **Aspectos computacionais da análise de redes de distribuição de água com componentes hidráulicos em regime permanente.** Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1994.
- STERLING, M; BARGIELA, A - **Leakage reduction by optimized control of valves in water networks.** Trans. Inst. Meas. Control, Vol. 6, p.293-298,1984.
- TODINI, E.; PILATI, S. - **A gradiente algorithm for the analysis of pipe networks.** Proc., Int. Conf.of Computer Applications for Water Supply and Distribution, Leicester, United Kingdom, 1987.
- TWORT, A.C.; LAW, F.M.; CROWLEY, F.W. - **Water supply.** 3rd Ed., Edward Arnold, London, United Kingdom,1985.
- VAIRAVAMOORTHY, K.; LUMBERS, J. - **Leakage reduction in water distribution systems:optical valve control.** Journal of Hidraulic Engineering, Vol. 124, nº 11, p. 1146-1154, 1998.
- VÍTKOVSKÝ, J.P.; SIMPSON, A.R.; LAMBERT, M. - **Leak detection and calibration using transients and genetic algorithms.** Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 126, nº 4, p. 262-265, 2000.
- ZARGHAMEE, M.S. - **Mathematical model for water distribution systems.** Journal of the Hydraulics Division, Vol. 97, nº HY1, p. 1-13, 1971.
- WATANATADA, T. - **Hydraulic network analysis usign linear.** Journal of the Hydraulics Division, nº HY4, p. 693-694, 1973 .
- WOOD, D.J. CHARLES, C.O.A. - **Hydraulic network analysis using linear theory.** Journal of the Hydraulics Division, Vol.98, nº HY7, p.1157-1170, 1972.