

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

**DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO DE
REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA COM
A UTILIZAÇÃO DE ALGORITMOS GENÉTICOS**

RITA DE CÁSSIA DO PRADO GUIDO GAMEIRO

*Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Tecnologias Ambientais da Universidade 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 2.003

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.

A dissertação aqui apresentada é fruto da colaboração de pessoas, empresas e órgãos governamentais, dentre as quais tenho a destacar a de:

- Prof. Dr. Robert Schiaveto de Souza, orientador desta pesquisa pela sua constante e efetiva contribuição, e também pelo seu profissionalismo, ética e paciência ao longo da elaboração deste trabalho.

- Professores do Departamento de Hidráulica e Transportes pelo apoio e incentivo.

- AGEPAN Agência Reguladora de Serviços Públicos de Mato Grosso do Sul e SANESUL Empresa de Saneamento Básico de Mato Grosso do Sul, pelo apoio e fornecimento de dados necessários à pesquisa.

- Meu marido Luis Fernando por sua colaboração, incentivo e apoio para a conclusão deste trabalho.

- Minha família, em especial minha filha Natália por seu incentivo e compreensão.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ii
LISTA DE TABELAS	iii
LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS	iv
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Modelos de Simulação Hidráulica	3
2.2 Projetos otimizados de redes de distribuição de água.....	9
2.3 Algoritmos genéticos - aplicações	12
3. OBJETIVOS	19
4. METODOLOGIA	20
4.1 Modelo de simulação hidráulica	21
4.2 Projeto otimizado de redes de distribuição de água.....	27
4.3 Algoritmos genéticos	29
4.4 Linguagem de programação e equipamento computacional.....	36
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
5.1 Simulação da rede exemplo 1	37
5.2 Simulação da rede exemplo 2	47
6. CONCLUSÕES	57
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58

ANEXOS

ANEXO 1 - Composição de preços unitários para fornecimento e assentamento de rede de abastecimento de água.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 4.1 – Informações transferidas entre os modelos de otimização e simulação.	20
FIGURA 4.2 - Interpretação gráfica do método de Newton-Raphson	22
FIGURA 5.1 – Configuração da rede exemplo 1.	37
FIGURA 5.2 – Resultados típicos de simulações com elitismo e sem elitismo (rede exemplo 1).	39
FIGURA 5.3 – Simulação típica com 300 gerações (rede exemplo 1).	40
FIGURA 5.4 – Variação do valor da função objetivo mínima com o número de elementos da população (rede exemplo 1).	41
FIGURA 5.5 - Simulação típica com probabilidade de mutação 0,01 (rede exemplo 1).....	42
FIGURA 5.6 – Variação da função objetivo mínima ao longo das gerações (rede exemplo 1).44	
FIGURA 5.7 – Localização e configuração da rede exemplo 2.	47
FIGURA 5.8 – Variação da função objetivo mínima ao longo das gerações (rede exemplo 2).52	

LISTA DE TABELAS

TABELA 5.1 – Demanda e cota geométrica nos nós da rede exemplo 1.	38
TABELA 5.2 – Custos unitários por diâmetro	38
TABELA 5.3 – Soluções da rede exemplo 1 por diferentes métodos.....	43
TABELA 5.4 – Conjunto de soluções otimizadas obtidas para a rede exemplo 1.....	46
TABELA 5.5 – Pressão mínima nos nós (rede exemplo 1).....	46
TABELA 5.6 – Vazão nos trechos (rede exemplo 1).....	46
TABELA 5.7 – Demandas, cota geométricas e pressões nos nós da rede exemplo 2.....	48
TABELA 5.8 – Diâmetro existente, comprimento, perda de carga unitária, custo unitário e custo total e comprimento dos trechos da rede exemplo 2.	49
TABELA 5.9 – Preços unitários para implantação de redes de distribuição de água.	50
TABELA 5.10 – Conjunto de soluções otimizadas obtidas para a rede exemplo 2.....	54
TABELA 5.11 – Pressão mínima nos nós (rede exemplo 2).....	55
TABELA 5.12 – Perda de carga unitária nos trechos (rede exemplo 2).	56
TABELA 5.13 – Vazões nos trechos (rede exemplo 2).	56

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

A	matriz incidência dos nós interiores
a	coeficiente da fórmula de Hazen-Williams ou coeficiente de multiplicação da vazão
AG's	algoritmos genéticos
EP's	Programas Evolucionários
b	coeficiente da fórmula de Hazen-Williams
C	custo unitário da tubulação ou coeficiente dimensional
d	coeficiente de resistência ou derivada
D	diâmetro ou matriz diagonal
E	estratégia de seleção elitista
f	função
G	número de gerações
h	energia no nó
hr	vetor de energia dos reservatórios
H	perda de carga
J	perda de carga unitária
K	constante de perda de carga
k	parâmetro
L	comprimento da tubulação
M	número total de nós
máx	máximo
N	tamanho da população
n	número dos nós ou número da gerações

p	fator que multiplica a penalidade
P	número total de nós-fonte, estratégia de seleção pura, população de uma geração ou probabilidade
q	vazão
Q	demanda ou consumo
Rh	raio hidráulico
Sf	gradiente hidráulico
S	estratégia de seleção
t	número de trechos ou número de uma geração
u.m.	unidade monetária
v	velocidade do escoamento
x	incógnita
α	coeficiente
β	coeficiente
∂	derivada parcial
φ	constante de multiplicação da penalidade
ω	constante numérica de conversão

Sobrescritos e subscritos

i	nó ou tubulação
j	nó ou tubulação
m	tubulação
n	nó
t	transposta
min	mínimo

max máximo

r reservatório

ger geração

c recombinação

m mutação

RESUMO

GAMEIRO, R.C.P.G (2003). *Dimensionamento otimizado de redes de distribuição de água com a utilização de algoritmos genéticos*. Campo Grande, 2003. 60 p. *Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Brasil*.

Este trabalho apresenta um modelo hidráulico de otimização para o dimensionamento de mínimo custo de redes de distribuição de água, utilizando a técnica dos algoritmos genéticos. A eficiência e a robustez do modelo proposto, e o comportamento e as variações da técnica dos algoritmos genéticos foram avaliados através dos resultados obtidos em relação à convergência e à qualidade do conjunto final de soluções. O modelo proposto demonstrou-se apropriado para o dimensionamento de redes de distribuição de água, e a técnica dos algoritmos genéticos mostrou-se uma ferramenta eficaz na obtenção do projeto otimizado.

Palavras-chave: *algoritmos genéticos, redes de distribuição de água, otimização de projetos.*

ABSTRACT

GAMEIRO, R.C.P.G (2003). *Water distribution network optimization using genetic algorithm. Campo Grande, 2003. 60 p. Master' Dissertation –FederalUniversity of Mato Grosso do Sul, Brazil (in Portuguese).*

This work presents a hydraulic optimization model for minimum cost dimensioning of water distribution networks, using the technique of genetic algorithms. The efficiency and robustness of the proposed model, and the behavior and variations in the genetic algorithm technique, were evaluated through the results obtained, with regard to convergence and the quality of the final solutions. The proposed model showed itself to be appropriate for the dimensioning of water distribution networks, and the genetic algorithm was demonstrated to be an efficient tool in obtaining optimized projects.

Palavras-chave: genetic algorithm, water distribution networks, least-cost design, optimization.

1. INTRODUÇÃO

Uma rede de distribuição de água, além de ser parte vital do sistema de abastecimento, representa o maior custo de investimento do conjunto de obras de engenharia. A construção e manutenção do sistema de distribuição de água custam milhões de reais todos os anos, havendo assim a necessidade de se buscar o máximo aproveitamento do capital investido.

Tradicionalmente o dimensionamento de redes de distribuição de água se baseava na experiência do projetista e no processo de tentativa e erro da seleção de alternativas de projeto. As alternativas mais promissoras tinham seu comportamento hidráulico simulado e analisado, sendo então escolhida a alternativa de menor custo. A medida que os núcleos urbanos foram-se ampliando e os sistemas de distribuição de água destas comunidades foram ficando mais complexos, estes procedimentos se tornaram insuficientes para que se garantisse que a solução resultante estava efetivamente entre as de menor custo.

Aliada a esta necessidade, a disponibilização ocorrida nas duas últimas décadas de computadores pessoais, de grande capacidade e baixo custo, tornou possível o desenvolvimento de modelos que permitissem a avaliação do comportamento hidráulico da rede em regime permanente de forma bastante ágil, possibilitando também o desenvolvimento de técnicas de otimização de projetos e de operação das redes de distribuição de água.

Entre estas técnicas destaca-se a aplicação dos algoritmos genéticos (AG's), que têm se mostrado um eficiente método para a solução de problemas não lineares de otimização, tendo conquistado aceitação entre os planejadores e gestores de recursos hídricos.

Este método tem sido amplamente estudado no caso de otimização de projetos de redes de distribuição de água, buscando-se modificar ou aperfeiçoar o processo visando maior rapidez na obtenção de soluções que irão convergir para resultados satisfatórios.

A proposta desta dissertação é aplicar a técnica dos algoritmos genéticos, comparando os resultados obtidos quanto ao custo da alternativa obtida para uma rede exemplo e uma rede real. Será também avaliada a qualidade do conjunto de soluções produzido pelo algoritmo, permitindo ao tomador de decisões escolher a mais adequada entre as alternativas com similaridade de preço.

No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica dos modelos de simulação hidráulica, dos modelos de otimização e das aplicações da técnica dos algoritmos genéticos.

Esta revisão fundamentou a definição dos objetivos e da metodologia apresentados nos capítulos 3 e 4.

Os resultados e discussões referentes a aplicação da metodologia a duas redes exemplo são apresentados no capítulo 5 e as conclusões obtidas são apresentadas no capítulo 6.

Finalmente, no capítulo 7 encontram-se as referências bibliográficas utilizadas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O desenvolvimento de técnicas de otimização para planejamento, projeto e gerenciamento de sistemas de abastecimento de água tem sido objeto de estudo de vários pesquisadores. A análise destes sistemas envolve um grande número de restrições e variáveis de decisão. A solução do problema de otimização de projetos de rede de distribuição de água envolve a definição destas variáveis de decisão. Estas variáveis podem ser os diâmetros das tubulações, as alternativas de traçado e a localização de singularidades (válvulas e bombas).

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica dos modelos de análise de redes hidráulicas, dos modelos de otimização de projetos de redes de distribuição de água e das aplicações da técnica dos algoritmos genéticos em sistemas hidráulicos para fundamentar a metodologia aplicada neste trabalho.

2.1 Modelos de Simulação Hidráulica

Um sistema de distribuição de água é definido como qualquer arranjo de tubos que tem como propósito transportar água ao consumidor. Esse sistema é considerado como uma coleção de vários tipos de componentes que são interligados em uma pré-determinada maneira (SOUZA, 1994). A rede hidráulica é composta de um número qualquer de nós e trechos dispostos de acordo com a configuração desejada. Fontes ou reservatórios podem ser introduzidos em qualquer nó e cada trecho pode incluir bombas, turbinas, válvulas e outros componentes hidráulicos onde a relação energia-vazão é conhecida.

SHAMIR e HOWARD (1968) enunciaram que a análise de uma rede hidráulica é considerada resolvida quando as energias e os consumos em todos os nós e as vazões em todos os trechos são conhecidos.

A análise em regime permanente de sistemas de distribuição de água é um problema de grande importância na engenharia. As equações hidráulicas, que descrevem o comportamento do sistema, são equações algébricas não lineares e que não podem ser resolvidas algebricamente (SOUZA, 1994).

A solução deste problema é obtida quando para uma determinada configuração de rede (onde são considerados os diâmetros da tubulação, os reservatórios de abastecimento e demais componentes hidráulicos) e de demanda, as seguintes condições hidráulicas são satisfeitas:

- a soma algébrica das vazões em qualquer nó é zero;

- o valor da energia piezométrica em um nó é a mesma para todos os tubos conectados a este nó;

- a relação de perda de carga e vazão é satisfeita para cada elemento da rede.

Vários modelos matemáticos têm 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.

Métodos de ajuste simples

Um dos primeiros métodos de ajuste simples foi desenvolvido com base na analogia entre um circuito elétrico e um sistema de distribuição de água. As principais analogias foram:

Redes	Circuito elétrico
- diferença de energia	- diferença de potencial
- fator de atrito	- resistência
- vazão	- corrente
- reservatório	- fonte

A característica linear entre a voltagem de um resistor comum é muito diferente da característica não linear da perda de carga e vazão. Segundo SOUZA (1994), este inconveniente foi contornado através da aplicação de um fator de correção no caso de circuito simples e no desenvolvimento de um resistor especial não linear. Este método demonstrou ser conveniente para estudar o comportamento de uma rede com os recursos e tecnologias disponíveis na época.

O método mais antigo para a solução de redes e ainda o mais comumente utilizado é o método de Hardy-Cross. A técnica de relaxação proposta em 1936 por Hardy-Cross (SOUZA, 1994) 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. Neste método, uma distribuição de vazão inicial é estimada, satisfazendo a equação da continuidade do nó, sendo repetidamente corrigida pela correção de Hardy-Cross até as equações de circuito serem satisfeitas dentro de um certo limite. Um método análogo, também proposto por Hardy-Cross, estima a distribuição inicial de energia que é repetidamente corrigida pela correção de Hardy-Cross.

Este método, apesar de representar um grande aperfeiçoamento comparado ao método incontrolável de tentativas e erros e ao trabalhoso método da analogia elétrica, consome tempo excessivo de cálculo para grandes redes, além de convergência lenta ou nenhuma convergência. Desde a década de 50 com o advento dos computadores, vários pesquisadores desenvolveram técnicas e ofereceram sugestões para aperfeiçoar a convergência do método de Hardy-Cross. Em alguns casos, no entanto, não é possível encontrar a convergência e em outros encontra-se uma aparente convergência, mas a solução ainda tem erros consideráveis (SOUZA 1994).

Similar ao método de Hardy-Cross, foi proposto em 1944 por O'Connor o método do comprimento equivalente (SOUZA, 1994). Este método baseia-se num balanço das resistências dos tubos ou dos comprimentos equivalentes em cada circuito da rede. O método do comprimento equivalente 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 redes novas e também para projeto de reforço em redes existentes indicando os diâmetros necessários a serem adicionados.

Finalmente, entre os métodos de ajustes simples tem-se o método da proporcionalidade das vazões que foi descrito em 1960 por McPherson (SOUZA, 1994), no qual condições de pressão em um sistema de distribuição de água podem ser obtidas facilmente. A perda de carga sobre um largo intervalo de demanda de vazões do sistema e taxa de armazenamento podem ser calculados diretamente em apenas duas ou três análises completas da rede. Este método permite a obtenção direta das perdas de carga nos tubos, mas é um método aproximado e geralmente válido para áreas predominantemente residenciais.

Métodos de ajustes simultâneos

No método Hardy-Cross e nos descritos anteriormente, os ajustes são calculados independentemente e problemas de convergência são freqüentemente encontrados. Nos métodos de ajustes simultâneos a formulação pode ser expressa em função das vazões, ou em função das energias, ou ainda em termos de fatores de correção das equações dos circuitos. Nenhuma restrição na geometria da rede é requerida e componentes hidráulicos podem ser incluídos em qualquer parte da rede. Cada um desses métodos requer cálculos iterativos onde a solução é aperfeiçoada até que um critério de convergência especificado seja satisfeito. Se um critério de convergência específico for definido, as soluções normalmente serão

essencialmente idênticas para todos os métodos embora necessite diferentes números de iterações e esforço computacional (SOUZA, 1994).

Método de Newton-Raphson

A partir de 1963 o método iterativo Newton-Raphson foi usado para resolver problemas de redes de distribuição de água. Desde então projetistas e pesquisadores tem preferido este método.

A técnica de Newton-Raphson baseia-se em achar um novo conjunto de aperfeiçoamentos ou correções para os valores das incógnitas em cada iteração. Os aperfeiçoamentos são calculados do termo de primeira ordem de uma expansão de Taylor sobre o argumento atual da solução

Segundo SHAMIR e HOWARD (1968), os primeiros trabalhos aplicando a técnica de Newton-Raphson foram desenvolvidos por diversos pesquisadores como Warga, Martin e Peters, Shamir, Lemieux e Smith, Giudice e Pitchai. A existência de única solução para as energias nos nós sob regime permanente em uma rede foi demonstrada por Warga em 1954 e ele verificou que a técnica de Newton-Raphson converge rapidamente quando estimativas iniciais são razoáveis. Esta característica é devida a convergência quadrática na vizinhança da solução. O método pode não convergir para estimativas grosseiras (SOUZA, 1994).

O problema de existência e unicidade de solução é mais complexo quando componentes hidráulicos como bombas são incluídos na rede. Estudos de redes tinham como objetivo principal até então resolver as incógnitas de energia e vazão, mas pouco havia sido feito para resolver outras incógnitas ou ainda a inclusão de componentes hidráulicos, tais como bombas, válvulas, etc.

SHAMIR e HOWARD (1968) apresentaram um trabalho que explorava as combinações de incógnitas que podem ser energias e demandas nos nós ou resistências nos componentes. O método incorporava ainda bombas, válvulas e outros componentes. A existência de unicidade de solução não foi considerada para os casos quando as incógnitas incluem demandas nos nós e resistências nos componentes. A convergência do esquema iterativo não pôde ser garantida quando qualquer das funções dos componentes na rede não tenha derivada contínua.

Estabelecer um critério de convergência do método de Newton-Raphson para todos os casos, parece ser impossível. O método converge para a solução rapidamente se um bom conjunto de valores iniciais for adotado para os valores desconhecidos.

EPP e FOWLER (1970) desenvolveram um programa para a solução de redes (cálculo de vazões e energias) usando o método de ajustes simultâneos de vazões. Eles incluíram um método automático para a estimativa das vazões iniciais que assegurasse convergência e introduziram um algoritmo para enumeração automática dos circuitos com o objetivo de produzir uma matriz simétrica e diagonal mínima com conseqüente redução de memória necessária.

LEMIEUX (1972) desenvolveu um programa eficiente para a análise de redes usando o método de ajustes simultâneos das energias. A dificuldade de convergência do método de Newton-Raphson foi superada pela modificação do método assegurando convergência independentemente da suposição inicial e reduzindo o número de iterações. O método de Newton modificado usa os fatores de correção levando em conta o tamanho do passo ótimo para minimização da função em cada direção. Uma combinação do método de Newton modificado e um algoritmo especial de eliminação gaussiana para matrizes banda simétrica permitiu o desenvolvimento de um eficiente programa para o cálculo de redes.

Para reduzir o tempo durante o processo iterativo, LAM e WOLLA (1972) propuseram uma técnica onde o sistema de equações é formulado de tal forma que o número de avaliações ou operações necessárias a cada iteração é reduzido.

CHANDRASHEKAR e STEWART (1975) exploraram o conceito de esparsidade da matriz Jacobiana em um novo método. A esparsidade foi definida como a relação entre o número de elementos iguais a zero e o número total de elementos da matriz Jacobiana. A formulação proposta foi baseada na teoria dos grafos.

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. Foram empregados algoritmos de reordenação dos nós e de matrizes esparsas para diminuir a quantidade de cálculos e reduzir a memória 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. O cálculo simultâneo das vazões foi proposto por Muir em 1967 e também apresentado por WOOD E CHARLES (1972). O cálculo simultâneo das energias foi proposto por Marlon, Hardison, Jacobson e Biggs em 1968 (SOUZA, 1994).

Como o número de tubos em uma rede é maior que o número de nós ou circuitos, a teoria linear para o cálculo simultâneo de vazões resolve um sistema com mais equações e conseqüentemente requer uma memória computacional maior. Por outro lado converge significativamente em um menor número de iterações. Esse método é mais recomendado para problemas em que as vazões de demanda são conhecidas. A convergência oscila quando o valor da iteração está próximo da solução, mas o método é conveniente para o processo iterativo inicial.

No cálculo simultâneo das energias, a vazão em cada tubo pode ser expressa em termos da energia nos nós. Esse método requer poucas equações em relação ao cálculo simultâneo de vazões. Quando todas as demandas são conhecidas e a energia em nenhum nó é conhecida, é necessário fixar uma energia em um nó (geralmente num ponto mais distante da rede). Este método é mais recomendado para problemas em que são conhecidas as energias nos reservatórios.

Estimativas iniciais de vazões são sugeridas por WOOD e CHARLES (1972). Eles afirmam que a convergência para a solução é grandemente afetada pela precisão da estimativa inicial, e estimativas grosseiras podem levar a uma situação onde não há convergência para a solução. Observaram, ainda, que no processo iterativo, os resultados tendem a oscilar quando se aproximam da solução e que a convergência pode ser melhorada quando a média das vazões de duas iterações sucessivas são usadas.

O método da teoria linear, numa comparação com o método de Newton-Raphson mostrou-se ligeiramente superior. A observação dos pesquisadores analisando vários tamanhos de rede indicou que o método da teoria linear obtém soluções em um número bastante constante de iterações, enquanto que o número de iterações pelo método de Newton-Raphson aumenta para grandes redes.

ISAACS e MILLS (1980) desenvolveram um novo algoritmo para cálculo simultâneo das energias. O método requer estimativas iniciais dos valores absolutos das vazões em cada tubo. Esse valor pode ser o mesmo para todos os tubos. Valores de 0,001 m³/s a 1,0 m³/s foram usados e não tiveram efeitos significativos na obtenção da solução. Alternativamente, valores iniciais baseados na mesma velocidade em cada tubo pode ser usado. Uma estimativa inicial de velocidade sugerida é de 1,0 m/s, já que redes são geralmente projetadas para velocidades próximas desse valor, por exemplo, o critério de perda de carga unitária máxima estabelecida pela ABNT resulta em velocidades máximas entre 0,6 e 1,8 m/s.

Métodos combinados

NIELSEN (1989) propôs uma formulação para resolver problemas de redes pelos métodos lineares e não lineares baseada na teoria dos grafos e sugeriu um modelo onde os métodos da teoria linear e Newton-Raphson são combinados. Observa-se que tal hibridização está implícita na formulação proposta por RIGHETTO (1977). O método proposto é uma generalização e um aperfeiçoamento dos métodos apresentados por LAM e WOLLA (1972) e CHANDRASHEKAR e STEWART (1975).

SOUZA (1994), além de realizar uma revisão dos modelos teóricos utilizados para a análise de redes de distribuição de água, propôs uma generalização dos modelos propostos por NIELSEN (1989) para a análise em regime permanente de redes de distribuição de água com configurações gerais incluindo os mais diversos componentes hidráulicos.

A utilização de um modelo de análise de redes visa obter uma solução que satisfaça as equações de conservação de energia e massa, retirando estas restrições do modelo de otimização que será utilizado simultaneamente. Os modelos de otimização, desta forma, consideram em sua formulação os demais aspectos da definição de um projeto de rede de distribuição de água, tais como dimensionamento da tubulação, seleção e localização de válvulas, bombas e reservatórios, conforme apresentado no item 2.2.

2.2 Projetos otimizados de redes de distribuição de água

Um sistema de distribuição de água é composto por uma rede de tubulações e componentes hidráulicos, tais como bombas, válvulas e reservatórios, que distribuem uma demanda conhecida a partir de uma fonte aos consumidores. Devido à complexa interação entre estes componentes do sistema, identificar mudanças que melhorem o projeto pode ser

difícil mesmo para redes de médio porte. Por este motivo, ao longo do tempo, diversos métodos de simplificação foram sugeridos para reduzir a complexidade do problema original.

Em sua forma mais simples, o problema de otimização de projetos de distribuição de água por gravidade é formulado da seguinte maneira (ALPEROVITS e SHAMIR, 1977): Para uma dada configuração de tubos e uma demanda específica nos nós, busca-se uma combinação de diâmetros de tubos que resulte num custo mínimo da função objetivo, e que atenda às seguintes restrições:

- a continuidade da vazão deve ser mantida em todos os nós e junções da rede;
- a perda de carga em cada tubo é uma função conhecida e depende da vazão, do diâmetro, do comprimento, do material da tubulação e das propriedades hidráulicas;
- a perda de carga total em um anel é igual a zero ou a perda de carga ao longo do caminho entre dois reservatórios deve ser igual a diferença dos seus respectivos níveis;
- limitações de pressões mínimas e máximas devem ser satisfeitas;
- restrições de diâmetros máximos e mínimos podem ser aplicados a certos tubos da rede.

Outra restrição pode ser ainda a existência de tubulações, com diâmetros definidos. Nos problemas de otimização podem ser incluídos também os dimensionamentos ou seleção de válvulas, bombas e reservatórios. O escoamento é considerado permanente ao longo da rede, podendo, no entanto, ser considerada mais de uma situação de demanda. Os engenheiros durante a elaboração do projeto de uma rede nova ou de uma ampliação de rede existente devem ainda garantir que a solução definida atenda adequadamente as variações de demanda nas diversas situações de carregamento, tais como atendimento da vazão máxima de projeto, vazão diária média, períodos de vazão mínima, onde os reservatórios de sobras serão abastecidos.

O procedimento tradicional em projetos de engenharia, descrito por Walski em 1985, é o de usar um modelo de simulação de rede de distribuição de água para validar soluções promissoras e obter a mais adequada por um sistema de tentativa e erro. O custo de algumas das melhores alternativas é então calculado para se chegar à solução recomendada. Uma outra abordagem, descrita por Gessler em 1985, também usando um modelo de simulação de rede baseava-se na enumeração de um limitado número de alternativas. Em seu trabalho, Gessler

utiliza testes que eliminam soluções menos adequadas, evitando que elas sejam avaliadas por um modelo de simulação hidráulica (SAVIC e WALTERS, 1997).

Diversos pesquisadores procuraram desenvolver sistemáticas que dessem maior confiabilidade ao processo. Uma abordagem simplificada de otimização de projetos de rede de distribuição de água foi apresentada por ALPEROVITS e SHAMIR (1977) reduzindo a complexidade da natureza não linear original do problema. A solução foi obtida através da decomposição hierárquica do problema de otimização. Sendo as variáveis primárias as vazões na rede, para cada situação de demanda as variáveis de decisão (que são os diâmetros dos tubos, capacidade das bombas, localização das válvulas, elevação dos reservatórios e ponto de funcionamento de bombas e válvulas para cada carregamento) foram otimizadas por programação linear. A análise final da solução encontrada na programação linear forneceu as informações necessárias à obtenção do gradiente do custo total, considerando as mudanças na distribuição de vazão. O gradiente foi usado para alterar as vazões, de forma que o ótimo local fosse obtido.

Este método mostrou-se aplicável para sistemas reais complexos e uma de suas principais características foi trabalhar com diversas situações de carregamento simultaneamente. As decisões operacionais foram incluídas explicitamente na fase de projeto, tendo como resultado uma solução hidraulicamente viável para cada carregamento. A cada iteração, o conjunto solução se aproximava da solução ótima, obtendo-se uma solução otimizada, mesmo que o procedimento fosse interrompido prematuramente.

No trabalho de ALPEROVITS e SHAMIR (1977), assim como em alguns trabalhos que se seguiram, a função objetivo contempla apenas custos de construção e operação. No entanto, não há impedimentos em se considerar outros aspectos, tais como desempenho e aproveitamento.

No procedimento de busca utilizado neste método, ótimos locais foram obtidos e vários pontos de partida foram testados para que não fosse descartado um projeto melhor. O mecanismo de busca se valeu de vários processos heurísticos cuja eficiência no uso requereu experiência do projetista. A vazão de entrada e saída do reservatório foi fixada para cada um dos carregamentos, assegurando uma operação adequada dos reservatórios, não incluindo, porém, a capacidade dos mesmos como variável de decisão. Esta abordagem foi ainda adotada e subseqüentemente melhorada por muitos pesquisadores tais como Quindry em 1981; Goulter e Morgan em 1985; Fujiwara e Khang em 1990 (SAVIC e WALTERS, 1997).

É necessário ressaltar que a solução ótima obtida por esse método foi composta de um ou dois segmentos de tubulação de diferentes diâmetros discretos entre cada par de nós. Para uma solução com diâmetro único entre dois nós, o diâmetro encontrado no método deve ser alterado e a solução adaptada checada para garantir que as restrições de pressão sejam satisfeitas.

O projeto de redes de distribuição de água visto como um problema de otimização de menor custo levou a resultados impraticáveis tais como os obtidos por Goulter (1987) que sugeriu que o projeto de mínimo custo para determinada configuração de rede e uma única situação de carregamento é uma rede ramificada. Na prática, porém, a rede malhada é essencial a operacionalização dos atuais sistemas de distribuição, uma vez que eles fornecem um caminho alternativo para o abastecimento quando da ocorrência de falhas ou reparos na rede, além de evitar a ocorrência de “pontas mortas” onde não se consegue garantir a qualidade da água de abastecimento (SAVIC e WALTERS, 1997).

Até meados da década de 80, grande parte das pesquisas baseava-se na aplicação de técnicas determinísticas de otimização (incluindo programação linear, programação dinâmica e programação não linear) ao projeto de redes de distribuição de água. Nesta época, porém, as técnicas estocásticas de otimização (tais como algoritmos genéticos e *simulated annealing*) começaram a ser estudadas e aperfeiçoadas, demonstrando ter sua aplicação adequada em grandes problemas combinatórios.

Os algoritmos genéticos (AG's) são teoricamente providos de busca válida e robusta nos espaços complexos. Esta técnica se mostrou bastante adequada à solução de problemas de otimização. Projetistas de sistemas artificiais na engenharia verificaram em seus trabalhos a robustez, a eficiência e a flexibilidade de sistemas biológicos. Estes algoritmos são computacionalmente simples e não limitam hipóteses restritivas no seu espaço de busca (GOLDBERG, 1989).

Uma apresentação mais detalhada deste assunto está contida no item 2.3 deste trabalho, onde são apresentados o histórico, as definições básicas e aplicação desta técnica à problemas de otimização de projetos de redes de distribuição de água.

2.3 Algoritmos genéticos - aplicações

Os algoritmos genéticos (AG's), que são provavelmente o tipo mais conhecido de programação evolucionária, são definidos como técnicas de otimização estocásticas, 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).

A otimização estocástica designa a família de técnicas de otimização na qual o espaço de busca é “vasculhado”, através da geração de candidatos à solução com o auxílio de um gerador de números pseudo-aleatório. Conforme o processamento progride, a distribuição de probabilidade pela qual um novo candidato à solução é gerado pode mudar, baseando-se nos resultados obtidos no início do processamento. Devido a esta natureza estocástica não há garantia que o ótimo global seja obtido utilizando-se AG's, porém a aplicação desta técnica em diversos tipos de problemas apresentou uma alta taxa de sucesso na obtenção de boas soluções.

A teoria que deu origem aos AG's foi proposta por Holland em 1975 (GOLDBERG, 1989) e aperfeiçoada por GOLDBERG (1989) e outros pesquisadores na década de 80. A analogia com a natureza é estabelecida a partir da criação por computador de um conjunto de soluções ao qual dá-se o nome de população. Cada indivíduo desta população é representado por um conjunto de valores que descreve completamente as variáveis da solução. Cada indivíduo desta população, intuitivamente denominado "cromossomo", constitui uma possível representação completa de solução para o problema. O cromossomo é um vetor, cujas características ou "genes" podem ser codificadas através de uma representação binária (caracteres podem ser 0's ou 1's). Por exemplo, a solução de uma função com duas variáveis $x = (x_1, x_2)$, pode ser representada por um cromossomo binário de 8 bites: 1001 0011 (ou seja, quatro bites para cada parâmetro, $x_1 = 1001$, $x_2 = 0011$). Neste ponto deve-se ressaltar que nem todos os programas evolucionários restringem a representação ao alfabeto binário, o que faz com que haja maior flexibilidade e aplicabilidade a uma grande variedade de problemas de tomada de decisões.

Cada indivíduo desta população inicial é então avaliado e os que representarem melhores valores satisfazendo a função objetivo serão então alterados e servirão de base para gerar uma nova população. Em resumo, para obtenção dos “descendentes” de uma geração são aplicados três tipos de operadores:

- seleção: escolha dos cromossomos da população que serão selecionados para a reprodução e, em média, os cromossomos mais aptos produzem mais descendentes do que os menos aptos.

- recombinação: intercâmbio de sub-partes de dois cromossomos, imitando de forma grosseira a recombinação que ocorre entre dois cromossomos biológicos.
- mutação: mudança aleatória do valor do alelo em uma determinada posição do cromossomo.

Este algoritmo se vale do processo de aprendizado coletivo entre indivíduos de uma população, sendo que cada um destes indivíduos representa uma solução possível dentro do espaço de busca de potenciais soluções. Estas soluções têm sua potencialização a partir do princípio teórico do paralelismo implícito, no qual soluções com alto grau de adequação recebem mais “descendentes” nas sucessivas gerações levando a uma população de melhores resultados (SAVIC e WALTERS, 1997).

Os algoritmos genéticos diferem da maioria dos métodos tradicionais de busca e otimização de quatro maneiras (GOLDBERG, 1987):

- trabalham não só com os parâmetros propriamente ditos, mas também com a codificação dos parâmetros;
- trabalham a partir de um grupo de soluções, não com solução única;
- utilizam diretamente a função objetivo e não suas derivadas ou outro conhecimento auxiliar;
- utilizam regras probabilísticas e não regras determinísticas.

A partir dos primeiros trabalhos de Holland e Goldberg, os AG's têm demonstrado claramente sua capacidade de atingir boas soluções otimizadas, em casos de funções multimodais, descontínuas e não diferenciáveis (SAVIC e WALTERS, 1997), tais como as resultantes da escolha de bombas e sua localização em sistemas de distribuição extensos e complexos, do estabelecimento de pontos de operação para reservatórios de água, bombas de recalque e válvulas de pressão, da localização e dimensionamento de sistemas de reservação que resultem em reserva de incêndios e de emergência mais eficiente.

Um dos primeiros trabalhos aplicando o método à otimização de tubulações foi proposto pelo próprio GOLDBERG e KUO (1987). Em seu trabalho, foram examinados os mecanismos, robustez e aplicações dos algoritmos genéticos em um problema na busca de alternativas operacionais de um conjunto de 40 bombas instaladas em uma tubulação em série. O procedimento de trabalho, que ao invés de trabalhar com os parâmetros, operou com a codificação dos mesmos, comprovou a independência do método evitando enganos e

tendências pré-existentes. O método não depende da continuidade do espaço de busca e trabalhando a partir de uma população de pontos, demonstrou ter uma perspectiva mais global que muitos procedimentos de otimização da engenharia.

Outros pesquisadores, tais como Hadji e Murphy em 1990; Duan, Mays e Lansey em 1990; e Sved, Schmik e Simpson em 1991, entre outros, consolidaram a aplicação dos algoritmos genéticos na otimização de redes de distribuição de água (SIMPSON, DANDY e MURPHY, 1994).

SIMPSON, DANDY e MURPHY (1994) elaboraram um trabalho visando comparar esta técnica a outras de aplicação tradicional. Neste trabalho foi apresentada a metodologia para aplicação da técnica dos algoritmos genéticos na otimização de redes de distribuição de água. Os valores de diâmetros comercialmente disponíveis para os tubos utilizados pelos algoritmos genéticos foram selecionados como seqüências binárias. Foram usados três operadores dos algoritmos genéticos: seleção, recombinação, e mutação.

Os resultados obtidos a partir da técnica dos algoritmos genéticos foram comparados com a de enumeração completa e programação não linear. A completa enumeração de soluções pode apenas ser usada em redes com poucos tubos. Por exemplo, considere uma rede de 20 trechos e um conjunto de 10 diâmetros discretos. O espaço total de soluções para este problema é igual a 10^{20} diferentes combinações. Mesmo que 1.000.000 combinações possam ser validadas por segundo, mais de 3.000.000 de anos de processamento serão necessários para a completa análise.

A otimização não linear é uma técnica efetiva quando aplicada a uma rede pequena e devem ser considerados os erros que a conversão da solução contínua para diâmetros discretos podem gerar. O método da programação não linear gera apenas uma solução.

Os AG's geram uma classe completa de alternativas de soluções próximas ao ponto ótimo. Uma destas alternativas pode efetivamente ser superior à solução ótima, baseando-se em aspectos não quantitativos, tais como confiabilidade, critérios de qualidade da água e operação da rede. Este é o maior benefício do método dos algoritmos genéticos. A técnica dos algoritmos genéticos em sua gênese e posteriormente em seu desenvolvimento pode proporcionar um aperfeiçoamento nesta busca para problemas práticos. Resultados apresentados no artigo mostraram que os AG's são eficientes na busca da mais próxima ou da melhor solução para o caso das redes estudadas (SIMPSON, DANDY e MURPHY, 1994).

A sistematização da aplicação dos AG's à solução do problema de projeto de redes de distribuição de água de mínimo custo levou ao desenvolvimento do modelo computacional GANET, desenvolvido por SAVIC e WALTERS (1997). Os algoritmos genéticos, quando comparados às técnicas convencionais de otimização, possuem a vantagem de não necessitar que seja assumida a linearização ou o cálculo de derivadas parciais, além de evitar instabilidades numéricas associadas à inversão de matrizes. Sua aplicação à faixa de soluções é global, reduzindo o risco de assumir erroneamente um mínimo local como mínimo global e desvinculando a dependência existente da solução ao ponto inicial assumido no processo.

No modelo proposto por SAVIC e WALTERS (1997), os algoritmos genéticos foram introduzidos em sua forma original, seguindo-se dos diferentes ajustes que se fizeram necessários para a sua efetiva aplicação à otimização de redes de distribuição de água. Para ilustrar a capacidade do GANET de eficientemente identificar projetos otimizados, três problemas publicados foram resolvidos. Isto levou a descoberta de inconsistências em previsões de desempenho de redes em estudos publicados, devido à utilização de diferentes valores da constante numérica de conversão da fórmula Hazen-Williams. Esta constante apresentou variação entre 10,5088 a 10,9031. Além de ser bastante eficiente para otimização de redes de distribuição de água, o modelo computacional GANET mostrou-se também de fácil aplicação, requerendo praticamente as mesmas entradas de dados dos modelos de simulação hidráulica. Os únicos dados de entrada adicionais necessários são alguns parâmetros próprios dos algoritmos genéticos, os quais foram adotados de acordo com os valores recomendados na literatura. Dois exemplos, uma de projeto de uma nova rede de distribuição e outro de projeto de expansão de rede em paralelo, ilustraram o potencial do GANET como uma ferramenta do planejamento e gerenciamento de redes de distribuição de água (SAVIC e WALTERS, 1997).

Outros pesquisadores também aplicaram os algoritmos genéticos visando à otimização de projetos de redes, sugerindo técnicas e adaptações que reduzissem o tempo de processamento dos AG's e o número de gerações necessárias para se obter a solução otimizada. Assim, DANDY, SIMPSON e MURPHY (1996) desenvolveram um algoritmo genético aperfeiçoado. O AG proposto utiliza uma variável de potencialização (*variable power scaling*) para adequação da função objetivo. O expoente introduzido na função objetivo tem sua magnitude ampliada a medida que o processamento do AG se desenvolve. Foi ainda adicionado um operador de mutação acessório à mutação simples comumente usada.

Finalmente, em substituição ao código binário foi usado o “*gray code*” para representar o conjunto de variáveis de decisão que deram origem ao projeto de rede de distribuição de água.

Outra modificação foi proposta por MONTESINOS, GARCIA-GUZMAN e AYUSO (1999). Em seu trabalho, foram propostas modificações no processo de mutação e seleção de um algoritmo genético simples. Em cada geração, soluções são eliminadas e as selecionadas são classificadas para a recombinação. A cada nova solução, foi permitido efetuar no máximo uma mutação. No modelo apresentado, estas modificações aceleraram a convergência do algoritmo.

Em particular na área de redes de distribuição de água, a utilização dos algoritmos genéticos tem trazido significativas contribuições para a escolha e definições de variáveis de projeto, tais como localização de válvulas e ponto de funcionamento de bombas, etc. REIS, PORTO e CHAUDHRY (1997) apresentaram um trabalho utilizando a técnica dos AG's abordando o problema da localização apropriada das válvulas de controle em uma rede de distribuição de água, para se obter a máxima redução nas perdas numa determinada situação de demanda e nível de reservatório.

GAMBALE (2000) apresentou uma revisão bibliográfica, uma análise crítica dos modelos de otimização e dos algoritmos de calibração de redes de distribuição de água até então desenvolvidos, comparando-os à técnica dos algoritmos genéticos.

SILVA et al (2001) realizaram uma aplicação do método para a seleção de locais para coleta de dados de campo com o propósito de calibração de modelos de redes de distribuição de água. O método foi aplicado em uma rede hipotética e em um setor da rede de distribuição de água da cidade de São Carlos/SP. Os resultados obtidos para a rede teórica mostraram-se consistentes, mesmo partindo de estimativas distintas para os coeficientes de rugosidade a serem determinados pela calibração. Para uma rede real foram obtidos resultados coerentes com os apresentados no trabalho original.

Com o objetivo de minimizar as perdas físicas de água em redes de distribuição de água, foi aplicado em São Carlos/SP, por CALIMAN et al (2001) o método dos algoritmos genéticos para a determinação dos parâmetros do modelo hidráulico pressão x vazamento a um sub-setor da rede da cidade. A determinação dos referidos parâmetros foi realizada através do modelo inverso de minimização das diferenças entre valores observados em campo e previstos através de simulação hidráulica.

CELESTE et al (2001) aplicaram a técnica dos algoritmos genéticos para a calibração automática do modelo de precipitação-vazão *Tank Model* para a bacia do rio Ishite, localizada na cidade de Matsuyama, província de Ehime, no Japão. Todos os catorze parâmetros do modelo foram otimizados e os resultados indicaram que os AG's são eficazes e robustos na calibração do *Tank Model*.

Um outro exemplo é a aplicação do *Modelo Muskingum* para rios e canais, que pode ter certas limitações inerentes ao serem assumidos como lineares as relações entre armazenamento em canais e volume afluente. Apesar de formas não lineares do *Modelo Muskingum* terem sido propostas, um método eficiente de calibração de parâmetros ainda não havia sido obtido. MOHAN (1997) propôs a utilização dos algoritmos genéticos para estimar os parâmetros em dois modelos de fluxo não lineares de Muskingum. O desempenho desta abordagem foi comparado ao de outros métodos publicados, e o desempenho dos parâmetros gerados por algoritmos genéticos demonstrou ser melhor, resultando em um conjunto de variáveis com menor erro.

3. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivos desenvolver e implementar um modelo hidráulico de otimização para o dimensionamento de mínimo custo de redes de distribuição de água, avaliando o comportamento e as variações da técnica dos algoritmos genéticos. Visa, também, avaliar comparativamente a eficiência e a robutez do modelo proposto através de diversas simulações, analisando os resultados em relação à convergência, à qualidade do conjunto final de soluções e a solução “ótima” obtida.

4. METODOLOGIA

O projeto de um sistema de distribuição de água é geralmente visto como um problema de otimização de menor custo, com os diâmetros da tubulação sendo as variáveis de decisão. O traçado da rede, suas interligações, demandas e a pressão mínima requerida nos nós são os elementos conhecidos.

Genericamente, um método de solução eficiente para o dimensionamento de projetos de redes de distribuição de água, consiste em um programa que aplica uma técnica de simulação hidráulica da rede, a um modelo de otimização não linear. O modelo de otimização não linear pode considerar diversas condições de demandas e várias combinações das variáveis de projeto.

A aplicação prática do método de otimização consiste na utilização simultânea, porém independente, de um modelo de simulação hidráulica a um modelo de otimização.

Este modelo gera um conjunto de diâmetros e passa estas informações, juntamente com uma determinada condição de demanda, para um simulador hidráulico, que resolve as equações hidráulicas e determina os valores das pressões nos nós e de vazões nos trechos. Estes resultados retornam então para o modelo de otimização para avaliação das condições de pressão e vazão resultantes. Os valores dos diâmetros são então modificados para que seja obtida uma solução de menor custo e o processo se repete até que o critério de parada seja atingido (LANSEY,1999). Este processo é esquematicamente representado na figura 4.1.

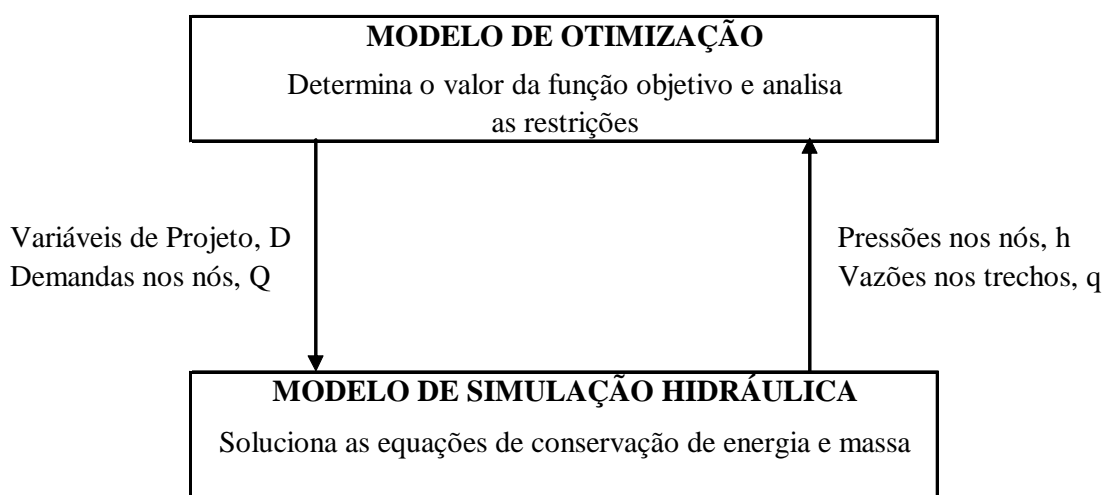


FIGURA 4.1 – Informações transferidas entre os modelos de otimização e simulação.

O modelo de simulação hidráulica a ser utilizado neste trabalho baseia-se no método de análise de redes com ajuste simultâneo das energias apresentado por SOUZA (1994), a partir da formulação original proposta por NIELSEN (1989), onde os métodos da teoria linear e Newton-Raphson são combinados. Este modelo é apresentado no item 4.1.

Diversos aspectos podem ser considerados na avaliação de um projeto, tais como possibilidades de ampliação, flexibilidade na operação, confiabilidade do atendimento e qualidade da água. No entanto, os custos de construção são o critério de maior relevância na verificação da viabilidade de um empreendimento. Os custos de implantação de um sistema abrangem a construção de reservatórios, instalação de conjuntos elevatórios, implantação da rede de distribuição, além do consumo de energia que ocorre durante a vida útil do sistema.

O problema da otimização é não linear, pois além de atender aos critérios de avaliação propostos, deve satisfazer as condições hidráulicas de funcionamento do sistema, tais como vazão transportada, velocidade máxima nos tubos, pressão de trabalho mínima nos nós. Tubos para abastecimento de água são fabricados em uma série de valores discretos de diâmetros, o que introduz uma dificuldade adicional à busca do projeto ótimo. Essas considerações e critérios adotados para a otimização de projetos de redes de distribuição são apresentados no item 4.2.

Para solucionar o problema de otimização com precisão, é sugerido que apenas a completa enumeração pode garantir a obtenção da solução ótima. Esta técnica se torna inviável no caso de redes de distribuição com diâmetros comerciais.

Sendo a completa enumeração um processo inviável, algoritmos computacionais têm imitado certos princípios da natureza e vem se mostrando viáveis em certas áreas de aplicação. Entre eles, os algoritmos genéticos, uma subclasse dos métodos de busca evolutivos-artificiais, baseado na seleção natural e em mecanismos de genética populacional denominados programas evolucionários (EP's) (MICHALEWICZ, 1992).

Os algoritmos genéticos vasculham o espaço de busca, escolhendo aleatoriamente soluções, que serão combinadas sucessivamente, tendo seus resultados melhorados geração a geração através da imitação de mecanismos biológicos. A metodologia de aplicação deste método é apresentada no item 4.3.

4.1 Modelo de simulação hidráulica

As equações hidráulicas básicas que descrevem o movimento em redes são equações algébricas não lineares que não podem ser resolvidas pelos métodos da álgebra linear. Muitos algoritmos têm sido propostos para resolver essas equações e essas técnicas são largamente usadas.

O método de análise de redes com ajuste simultâneo das energias é baseado na solução simultânea das equações básicas dos nós e requer uma linearização dessas equações em termos dos valores aproximados das energias. Esse procedimento tem um conjunto de n equações lineares, onde n é o número de nós. Essas equações são resolvidas como segue:

- estimativa inicial de valores de energia em cada nó .
- resolução das equações linearizadas simultaneamente para obter os aperfeiçoamentos das energias nos nós .
- repetição desse procedimento até os cálculos subseqüentes satisfazerem o critério de precisão.

O método iterativo de Newton-Raphson foi usado para resolver problemas de sistemas de distribuição de água. A técnica de Newton-Raphson baseia-se em achar um novo conjunto de aperfeiçoamentos ou correções para os valores das incógnitas em cada iteração. Os aperfeiçoamentos são calculados do termo de primeira ordem de uma expansão de Taylor sobre o argumento atual da solução. O método de Newton-Raphson está representado geometricamente na figura 4.2.

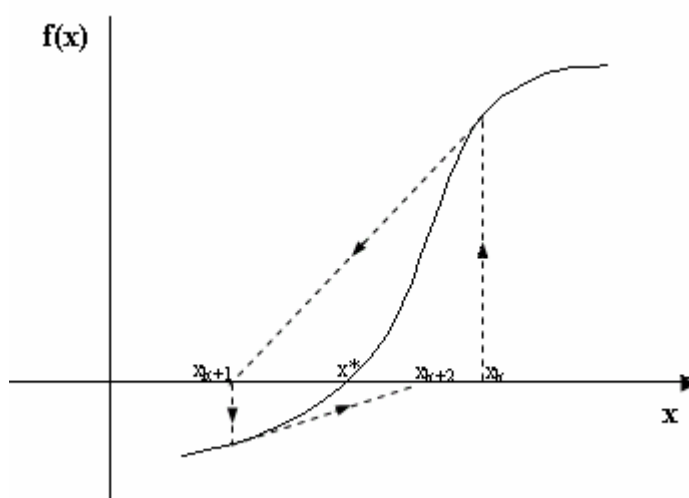


FIGURA 4.2 - Interpretação gráfica do método de Newton-Raphson .

O valor de x^* é a solução procurada, tal que:

$$f(x)_{x=x^*} = f(x^*) = 0 \quad (4.1)$$

Para a k-ésima iteração a aproximação para x^* é denotada por x_k . A iteração seguinte é dada por:

$$x_{k+1} = x_k + \Delta x_k = x_k - \frac{f(x_k)}{df(x_k)/dx} \quad (4.2)$$

onde $df(x_k)/dx$ é a derivada de $f(x)$ avaliada em x_k . A equação para o k-ésimo aperfeiçoamento Δx_k , pode ser escrita como:

$$f(x) + \frac{df}{dx} \Delta x = 0 \quad (4.3)$$

onde $f(x)$ e sua derivada são avaliadas usando o valor atual de x .

Quando há n equações para satisfazer $f_1(x_1, \dots, x_n) = 0$, ..., $f_n(x_1, \dots, x_n) = 0$ e n incógnitas (x_1, \dots, x_n) para serem resolvidas, o conjunto de n aperfeiçoamentos $(\Delta x_1, \dots, \Delta x_n)$ é a solução do conjunto de n equações lineares simultâneas:

$$f_j(x_1, \dots, x_n) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial f_j}{\partial x_i} \Delta x_i = 0 \quad j = 1, \dots, n \quad (4.4)$$

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 da formulação proposta.

Considere-se 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 $J_{i,1}$ e $J_{i,2}$ ($J_{i,2} > J_{i,1}$). A vazão q_i é positiva quando a direção do movimento é do nó $J_{i,2}$ para o nó $J_{i,1}$.

A equação da continuidade é aplicada para cada nó interior:

$$\sum_{i=1}^m a_{ij} q_i = Q_j \quad j = 1, \dots, n \quad (4.5)$$

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:

$$d_i q_i = H_i \quad i = 1, \dots, m \quad (4.6)$$

onde $H_i = h_{j_{i2}} - h_{j_{i1}}$; $h_{j_{i1}}$ e $h_{j_{i2}}$ são as energias nos nós do tubo i ; m é o número de total de trechos 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 :

$$d_i = K_i |q_i|^{\alpha-1} \quad (4.7)$$

$$d_i = K_i^\beta |H_i|^{1-\beta} \quad (4.8)$$

onde $\beta = 1/\alpha$; K_i é o coeficiente do tubo (dependendo do comprimento, diâmetro, material do tubo e fluido); α é o expoente compreendido no intervalo $1,8 \leq \alpha \leq 2,0$.

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

$$Q = [Q_1, \dots, Q_n]^t \quad (4.9)$$

$$h_r = [h_{n+1}, \dots, h_{n+r}]^t \quad (4.10)$$

$$x = \begin{bmatrix} q \\ h \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

$$q = [q_1, \dots, q_m]^t \quad (4.12)$$

$$h = [h_1, \dots, h_n]^t \quad (4.13)$$

onde t denota a transposta de um 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 conservação de energia:

$$H_i = -\sum_{j=1}^{n+r} a_{ij} h_j \quad (4.14)$$

onde:

$$H = [H_1, \dots, H_m]^t \quad (4.15)$$

Da teoria dos grafos:

$$H = -Ah - A_r h_r \quad (4.16)$$

Da equação (4.6):

$$Dq + Ah = -A_r h_r \quad (4.17)$$

onde:

$$D = \text{diag}[d_1, \dots, d_m] \quad (4.18)$$

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

Da equação (4.5):

$$A^t q = Q \quad (4.19)$$

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

$$\begin{bmatrix} D(x) & A \\ A^t & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ h \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_r h_r \\ -Q \end{bmatrix} = 0 \quad (4.20)$$

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

A equação do movimento (4.17) 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 (4.17) por $A^t D^{-1}$ e subtraindo isto da equação (4.19), a solução é dada por:

$$A^t D^{-1} A h + A^t D^{-1} A_r h_r = -Q \quad (4.21)$$

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 (4.6).

Quando a expressão (4.8) é usada, é fácil mostrar que o método da teoria linear e o de Newton-Raphson podem ser expressos numa forma comum:

$$h_{k+1} = h_k - \gamma [A^t D_k^{-1} A]^{-1} [Q + A^t D_k^{-1} (A h_k + A_r h_r)] \quad (4.22)$$

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

Algoritmo - formulação em termos das energias

A formulação original proposta por Nielsen (1989) é:

$$h_{k+1} = h_k - \gamma [A^t D_k^{-1} A]^{-1} [Q + A^t D_k^{-1} (A h_k + A_r h_r)] \quad (4.33)$$

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

$$h_{k+1} - h_k = -\gamma [A^t D_k^{-1} A]^{-1} [Q + A^t D_k^{-1} (A h_k + A_r h_r)] = h_{k,k+1} \quad (4.34)$$

Rearranjando a matriz Jacobiana obtemos um sistema de equações lineares:

$$[A^t D_k^{-1} A] h_{k,k+1} = -\gamma [Q + A^t D_k^{-1} (A h_k + A_r h_r)] \quad (4.35)$$

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

a) 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 $D_0'^{-1} = \text{diag}[K_1^{-1/\alpha}, \dots, K_m^{-1/\alpha}]$.

b) 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 .

- c) Resolver o sistema de equações lineares simétrico (4.35), cuja solução é o vetor $h_{k,k+1}$.
- d) Calcular o vetor de energias $h_{k+1} = h_{k,k+1} + h_k$.
- e) Repetir os passos (b) a (d) do procedimento até a convergência do processo iterativo.

4.2 Projeto otimizado de redes de distribuição de água

Os exemplos avaliados neste trabalho representam redes de distribuição que trabalham abastecidas por reservatórios, com a distribuição de água ocorrendo por gravidade. Desta forma o custo mais significativo que será avaliado é o custo de aquisição e assentamento da tubulação.

A rede de distribuição de água, que será obtida com esta minimização de custos, deverá atender as demandas requeridas nos nós da rede com pressões de trabalho adequadas. Finalmente, a vazão nos trechos da rede de distribuição e a pressão nos nós devem satisfazer as leis de conservação de energia e massa.

Em resumo o problema pode ser descrito como:

minimizar: o custo de investimento de capital;

sujeito a: atender as restrições hidráulicas,

suprir a demanda requerida e,

manter pressões nos pontos de descarga dentro da faixa admissível.

ALPEROVITS E SHAMIR (1977) apresentaram a formulação do projeto ótimo para uma rede de distribuição de água genérica. A função objetivo f que será minimizada é assumida como função dos diâmetros dos tubos e de seus respectivos comprimentos:

$$f(D_1, D_2, \dots, D_m) = \sum_{i=1}^m C(D_i, L_i) \quad (4.36)$$

onde m é o número total de tubos no sistema e $C(D_i, L_i)$ é o custo do tubo i de diâmetro D_i e comprimento L_i . A função objetivo deve ser minimizada satisfazendo as restrições descritas a seguir.

Para cada nó (exceto fonte) a equação da continuidade deve ser satisfeita:

$$\sum Q_{\text{ent}} - \sum Q_{\text{sai}} = Q_e \quad (4.37)$$

onde, Q_{ent} é vazão que está chegando ao nó; Q_{sai} é a vazão que sai do nó e Q_e é a vazão de abastecimento ou demanda do nó. De acordo com esta convenção, quando a vazão Q_e é positiva, há uma demanda ou consumo no nó, e quando a vazão Q_e é negativa, está havendo abastecimento no nó.

Para cada um dos anéis básicos da rede a equação da conservação da energia pode ser expressa como:

$$\sum H_i = 0 \quad (4.38)$$

onde, H_i é a perda de carga ao longo de uma tubulação i pertencente ao anel, determinada pelas fórmulas de Hazen-Williams ou Darcy-Weisbach. Se existir mais de um nó-fonte no sistema, é necessário escrever uma restrição adicional da conservação de energia, para os caminhos entre quaisquer dois nós-fonte. Para um total de P nós-fonte (reservatórios) são necessárias $P-1$ restrições independentes.

A restrição de pressão mínima para cada nó da rede é dada na forma:

$$h_j \geq h_j^{\text{min}}; \quad j=1, \dots, n \quad (4.39)$$

onde, h_j é a pressão no nó j ; h_j^{min} é a pressão mínima requerida no mesmo nó e n é o número total de nós no sistema.

Vários aspectos do planejamento de redes de distribuição de água requerem compreensão das equações hidráulicas de condutos forçados. Projetistas têm como preocupação principal a previsão acurada da capacidade de condução do sistema de dutos. Para possibilitar a determinação destes valores são necessárias algumas funções descrevendo a relação entre pressão, vazão, comprimento e diâmetro. Várias fórmulas foram desenvolvidas para determinar a perda de carga devido ao atrito. As mais conhecidas e usadas são as de Darcy-Weisbach e de Hazen-Williams. A equação empírica de Hazen-Williams é a mais utilizada nas formulações. Em sua forma original temos a equação 4.40:

$$v = C R h^{0,63} S f^{0,54} \quad (4.40)$$

onde, v é a velocidade do escoamento, em pés/s; R_h é o raio hidráulico, em pés; S_f é o gradiente hidráulico e C é o coeficiente dimensional cujo valor numérico pode mudar de acordo com o sistema de unidades de medida utilizado. Para um conduto circular R_h é igual a $D/4$. A fim de manter a fórmula em uma forma de fácil aplicação, o valor de C é considerado constante, e assim a fórmula pode ser escrita na forma:

$$v = \alpha C D^{0,63} S_f^{0,54} \quad (4.41)$$

onde D é o diâmetro do tubo; e α assume o valor de 0,55 no Sistema Britânico de Unidades e 0,355 no Sistema Internacional de Unidades. Se a perda de carga H é desejada, tendo a vazão Q conhecida, a equação para uma tubulação pode ser escrita como:

$$H = \omega \frac{L}{C^a D^b} Q^a \quad (4.42)$$

onde ω é a constante numérica de conversão, que depende do sistema de unidades utilizado; a é um coeficiente que vale $1/0,54 = 1,85$; b é um coeficiente que vale $2,63/0,54 = 4,87$; e L é o comprimento da tubulação. Diferentes pesquisadores tem usado diferentes valores para a constante de conversão α e ω em nas equações 4.41 e 4.42. Por exemplo, SAVIC e WALTERS (1997) utilizaram o coeficiente $\omega = 10,5088$, ALPEROTIVS E SHAMIR (1977) consideraram $\omega = 10,6792$.

O coeficiente usualmente utilizado na literatura brasileira e apresentado por PORTO (1999) é apresentado na equação 4.43.

$$H = 10,65 \frac{L}{C^{1,85} D^{4,87}} Q^{1,85} \quad (4.43)$$

4.3 Algoritmos genéticos

Os algoritmos genéticos são métodos de busca estocástica que imitam matematicamente os mecanismos de evolução natural da espécie. Diferem das técnicas de busca convencionais, pois iniciam o processo gerando um conjunto inicial de soluções possíveis aleatoriamente. A força dos algoritmos genéticos vem em grande parte do paralelismo implícito, isto é, a alocação simultânea dos esforços de busca a várias regiões do espaço amostral (GREFFENSTETTE E BAKER, 1989).

Este conjunto de soluções aleatórias é denominado de população. Cada indivíduo desta população é em geral denominado cromossomo e constitui uma representação completa de solução para o problema. Neste trabalho, cromossomo é também denominado elemento ou indivíduo. O cromossomo ou elemento é um conjunto, cujos genes ou características podem ser codificadas através de representação binária ou real.

Os cromossomos tendem a evoluir-se gradativamente através de sucessivas iterações produzindo novas gerações de indivíduos mais aptos ou capazes em termos da função de aptidão (GEN e CHENG, 1997). Durante cada geração, os cromossomos são avaliados através da função objetivo e também da função aptidão.

A função aptidão representa uma medida que avalia a capacidade de sobrevivência de um elemento da população durante o processo de evolução. Por exemplo, em um problema de minimização, a função aptidão será inversamente proporcional ao valor da função objetivo. Com isso, cada elemento da população terá sua medida de aptidão que servirá como elemento de classificação dessas soluções indicando as chances de reprodução de cada um. A classificação pode ser feita através de uma ordenação das soluções de forma decrescente ou crescente às suas aptidões, respectivamente ao problema de maximização ou minimização (CHEUNG, 2002).

Uma nova geração é formada pelo processo de seleção, segundo a qual os cromossomos que resultem em altos valores da função objetivo possuem elevada probabilidade de serem preservados para a próxima geração. Em seguida, baseado na aptidão dos indivíduos, os melhores são selecionados para serem recombinados para que seja obtida a geração seguinte. Por exemplo, no caso da representação dos gens ser feita por binários, se dois cromossomos escolhidos como os de maior aptidão, são $x = (x_1, x_2) = 1111\ 1111$ e $y = (y_1, y_2) = 0000\ 0000$, o resultado do cruzamento dos dois pode ser: $z = 1100\ 0000$ e $w = 0011\ 1111$.

A probabilidade de um cromossomo da população inicial ser selecionado para produzir os indivíduos das gerações seguintes depende do resultado da função objetivo e/ou aptidão que ele produz. O indivíduo com melhor aptidão terá probabilidade maior de ser selecionado que os de baixa aptidão, resultando em uma geração com média de adequação melhor que a geração anterior. Após várias gerações o algoritmo converge para a sua solução ótima ou sub-ótima do problema.

A mutação é outro operador que também desempenha um papel importante na fase de reprodução, não tendo porém um efeito dominante. A mutação altera um *bit* de algum ou alguns indivíduos de uma geração; por exemplo, o cromossomo original $x = (x_1, x_2) = 1111 1111$ após a mutação pode ficar: $x = (x_1, x_2) = 1110 1111$. Porém, se a probabilidade de mutação for muito alta, pode levar a um processo aleatório não convergente.

Os cromossomos tendem a evoluir-se gradativamente através de sucessivas iterações produzindo novas gerações de indivíduos mais aptos ou capazes em termos da função de aptidão.

Diversas são as possibilidades de implementação dos AG's em termos da sistemática de representação das soluções (binária ou real), número de indivíduos da população de soluções, número de iterações e critérios de convergência, operadores genéticos e parâmetros a serem adotados como as probabilidades de recombinação e mutação. A seguir são apresentadas as sistemáticas e características principais que serão adotadas neste trabalho nas diversas etapas de implementação do método.

Representação dos elementos ou cromossomos

Na rede exemplo 1 (figura 5.1) as variáveis de decisão do problema são os diâmetros dos 8 trechos de tubulação de 1000m cada, que podem assumir cada um, qualquer dos 14 diâmetros discretos relacionados na tabela 5.2, e que variam de 1 a 24 polegadas.

Neste estudo, o método dos algoritmos genéticos será aplicado utilizando-se números reais para a representação dos indivíduos ou cromossomos, e para que os mesmos sejam gerados serão obtidos aleatoriamente números inteiros variando de 1 a 14 e que correspondem a cada um diâmetros disponíveis. Assim será criado um indivíduo $x = (D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6, D_7, D_8)$ onde D_1 a D_8 são os diâmetros dos trechos 1 a 8. Por exemplo, a geração aleatória de um indivíduo $x = (3, 8, 2, 1, 1, 4, 12, 2)$, corresponderá aos seguintes diâmetros em polegadas $x = (3, 12, 2, 1, 1, 4, 20, 2)$.

Tamanho da população e número de gerações

O tamanho da população (N) afeta tanto o desempenho como a eficiência dos algoritmos genéticos. Ao se adotar uma população pequena o desempenho do algoritmo é insatisfatório, pois a mesma não é capaz de fornecer um exemplo apropriado do espaço de busca (GREFENSTETTE, 1986). Uma grande população, apesar de desejável por evitar a

convergência prematura a uma solução sub-ótima, pode resultar em tempo de processamento inaceitável com uma taxa de convergência excessivamente lenta. O tamanho da população pode variar entre 10 e 160 indivíduos, com incrementos de 10 unidades. Neste experimento, tomando por base os trabalhos de SAVIC e WALTERS (1997), que utilizou uma população de 50 elementos em suas simulações, serão realizadas simulações para populações variando entre 20 e 160 indivíduos.

Existem vários critérios de parada para o algoritmo. O algoritmo pode ser encerrado quando todos os elementos em uma geração forem idênticos, ou quando a diferença entre os valores da função objetivo para os elementos da população esteja em um intervalo de tolerância (BUCKLES, 1994).

Um outro critério de parada é fixar um número de gerações e considerar o melhor resultado desta geração. Este foi o critério utilizado por SAVIC e WALTERS (1997) e também o critério utilizado neste trabalho. Para definir o número ideal foram testadas simulações com 150 a 500 gerações.

Probabilidade de recombinação

A probabilidade de recombinação (P_c) controla a frequência com a qual o operador de recombinação é aplicado. Em cada nova geração ($N P_c$) elementos sofrem recombinação. Quanto mais altas a taxa de recombinação, mais rapidamente novas estruturas são introduzidas na população. Se uma taxa de recombinação é excessivamente alta, elementos de bom desempenho são descartados mais rapidamente do que a seleção pode produzir aprimoramentos. Ainda se a taxa é muito baixa a busca pode estagnar devido à uma baixa taxa de exploração. GREFENSTETT (1986) sugere uma variação entre 0,25 e 1,00 com incrementos de 0,05. Neste trabalho serão aplicados e avaliados de $P_c \in (0,60; 1,00)$ sugerido por SAVIC e WALTERS (1997).

Probabilidade de mutação

Mutação é o operador de busca secundário que acelera a variabilidade populacional. Após a seleção, cada indivíduo poderá sofrer uma alteração aleatória em um de seus componentes, sendo a probabilidade de ocorrência da mesma considerada igual a P_m . É sugerido por GREFENSTETT (1986) uma variação entre 0,00 e 1,00. Neste trabalho serão

feitas simulações baseando-se no trabalho de SAVIC e WALTERS (1997) que estabelece $P_m \in (0,01; 0,30)$.

Restrições e penalidades

GEN e CHENG (1997) discutem que o problema central para aplicação de algoritmos genéticos para otimização é a definição do critério de consideração das restrições, e levantam propostas para trabalhar com elas. Também MICHALEWICZ (1994) abordou com ênfase este assunto.

Segundo estes pesquisadores, as técnicas existentes podem ser classificadas em:

- estratégias de reparação: considera tomar um cromossomo inactível e gerar um factível por algum procedimento. Para problemas de otimização combinatorial torna-se fácil aplicar o processo de reparação. No entanto, esta técnica requer um procedimento de reparação determinística e pode ser tão complexo quanto resolver o problema original.

- estratégias de modificação dos operadores genéticos: baseia-se em representar um problema específico e operadores genéticos para manter o indivíduo na região factível. Alguns autores (MICHALEWICZ, 1994) apontam que tal técnica é confiável.

- estratégias de rejeição: descarta todos os cromossomos inactíveis criados pelo processo evolucionário. O método trabalha bem quando o espaço de busca é convexo, porém, sua desvantagem está no descarte destes cromossomos inactíveis, que podem conter melhores informações que alguns cromossomos factíveis.

- estratégias de penalidades: esta estratégia faz com que um problema com restrições seja tratado como sem restrições pela associação de uma função penalidade. Estas funções são incorporadas à função objetivo gerando uma única função a ser otimizada. Têm a vantagem de considerar as soluções inactíveis, pois algumas podem fornecer informações úteis sobre a busca da solução ótima. Por outro lado, para problemas com muitas restrições, soluções inactíveis podem tomar lugar em grande parte da população e neste caso, soluções factíveis podem ser difíceis de serem encontradas.

A técnica de penalidade é a técnica mais comum utilizada para trabalhar soluções inactíveis nos AG's, considerando problemas com restrições (GEN e CHENG, 1997). Esta será a estratégia utilizada neste trabalho.

Em geral, no caso de rede de distribuição de água, a restrição considerada é a pressão mínima nos nós, e o déficit em cada um deles um componente da penalidade.

Esta técnica nos AG's é utilizada para encontrar uma certa quantidade de soluções infactíveis em cada geração tal que os operadores genéticos buscam a solução ótima nos espaços factíveis e infactíveis. As soluções infactíveis não são rejeitadas, pois algumas podem fornecer informações úteis sobre a solução ótima, havendo a possibilidade inclusive de contribuir para a obtenção de algumas soluções factíveis.

A inclusão da penalidade na validação da função objetivo, baseada na equação 4.36, que será utilizada neste trabalho, é apresentada conforme a equação (4.44) será:

$$f(D_1, D_2, \dots, D_m) = \sum_{i=1}^m C(D_i, L_i) + p \left(\sum_{j=1}^n \max[h_{\min} - h_j, 0] \right) \quad (4.44)$$

onde $C(D_i, L_i)$ é o custo do tubo i de diâmetro D_i e comprimento L_i ; m é número total de tubos do sistema; p é o fator que multiplica a penalidade; n é o número total de nós do sistema; h_{\min} é a pressão mínima admissível no nó e h_j a pressão disponível no nó. A expressão $\max[h_{\min} - h_j, 0]$ indica que será considerado o valor máximo obtido entre $(h_{\min} - h_j)$ e 0 .

O fator p que multiplica a penalidade é escolhido de forma a conduzir os valores nominais de penalidades à mesma escala dos custos básicos da rede. O maior problema ao determinar o termo penalidade é justamente conseguir um equilíbrio entre a preservação de informações (encontrar soluções infactíveis) e a pressão de seleção (rejeitar algumas soluções). Outro objetivo deste fator é se tornar mais severo a medida que se processam as gerações do método. Foi sugerido em SAVIC e WALTERS(1997) a seguinte função, que permite o aumento gradual da penalidade:

$$p = \varphi \times \left(\frac{n_{ger}}{n_{ger}^{\max}} \right)^k \quad (4.45)$$

onde, φ é a constante de multiplicação da penalidade; n_{ger} é o número da geração; n_{ger}^{\max} é o número máximo de gerações e k é um parâmetro (foi considerado $k=0,8$, sugerido por SAVIC e WALTERS, 1997). Ao final das simulações das gerações o fator de multiplicação p deve

assumir um valor através do qual nenhuma solução infactível assuma um valor maior que as soluções factíveis do problema.

Aptidão do elemento e escala

Utilizando os problemas exemplo de redes de distribuição de água, o valor da função objetivo (equação 4.36) para cada indivíduo da população é obtido a partir da soma do custo da tubulação que forma a rede. A simulação das vazões e perdas de carga para cada uma dessas soluções indica a exequibilidade da mesma. A função aptidão acrescenta à função objetivo (equação 4.36) a avaliação da exequibilidade da solução e representa uma medida que avalia a capacidade de sobrevivência de um elemento da população durante o processo de evolução (equação 4.44). Com isso, cada elemento da população, terá sua medida de aptidão que servirá como elemento de classificação dessas soluções indicando as chances de reprodução de cada um.

A classificação pode ser feita através de uma ordenação das soluções de forma decrescente ou crescente às suas aptidões, respectivamente ao problema de maximização ou minimização. Várias alternativas têm sido propostas para definir o valor da aptidão. A mais simples iguala a função aptidão à função objetivo (avaliação). Porém, os valores da função objetivo podem assumir números negativos e alguns algoritmos de seleção, como roda roleta, não funcionam. Com isso, deve-se buscar outro procedimento de seleção, por exemplo, seleção por torneio ou aplicar algum procedimento de parametrização.

Neste trabalho serão utilizados dois procedimentos de parametrização das soluções:

$$f_i = \left(\frac{1}{f(D_1, D_2, \dots, D_N)_i} \right) \quad (4.46)$$

$$f_i = f(D_1, D_2, \dots, D_N)_{\text{máximo}} \times 1,1 - f(D_1, D_2, \dots, D_N)_i \quad (4.47)$$

Estratégia de seleção

São definidas duas estratégias de seleção, a seleção pura (P) e a elitista (E). Na seleção pura, a escolha dos indivíduos e o número de vezes que o mesmo será recombinado obedece a uma relação direta com o seu desempenho. Na estratégia elitista, os melhores indivíduos de uma geração passam para a seguinte. Neste trabalho serão simuladas e comparadas as duas estratégias.

4.4 Linguagem de programação e equipamento computacional

Para a realização das simulações propostas, foram desenvolvidos programas utilizando-se o aplicativo Borland DELPHI versão 5.0, que utiliza a linguagem de programação PASCAL.

O equipamento a ser utilizado é um computador GenuinIntel com processador Pentium III, 120 MHz de memória RAM e disco rígido com 9,4 Gb de capacidade.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o objetivo de testar e avaliar o desempenho dos algoritmos genéticos, esta técnica foi aplicada para a obtenção de um projeto de mínimo custo para duas redes exemplo. A primeira rede exemplo consiste de uma configuração teórica e a segunda rede exemplo consiste de uma rede real.

5.1 Simulação da rede exemplo 1

Descrição dos parâmetros de projeto

A metodologia proposta para análise da performance do método dos algoritmos genéticos foi aplicada à rede apresentada na figura 5.1 e que foi usada por ALPEROVITS e SHAMIR (1977) e por SAVIC e WALTERS (1997).

A rede possui dois anéis e é abastecida por um reservatório. A rede é composta por 7 nós e 8 trechos, com 1000m de comprimento cada um e coeficiente de Hazen-Williams igual a 130. Os dados de demanda e cota geométrica referentes a cada nó são apresentados na Tabela 5.1.

A técnica dos algoritmos genéticos será utilizada neste trabalho para minimizar a função objetivo que representa os custos de implantação de uma rede de distribuição de água, sujeita às restrições hidráulicas, de demandas requeridas e de pressão mínima nos nós.

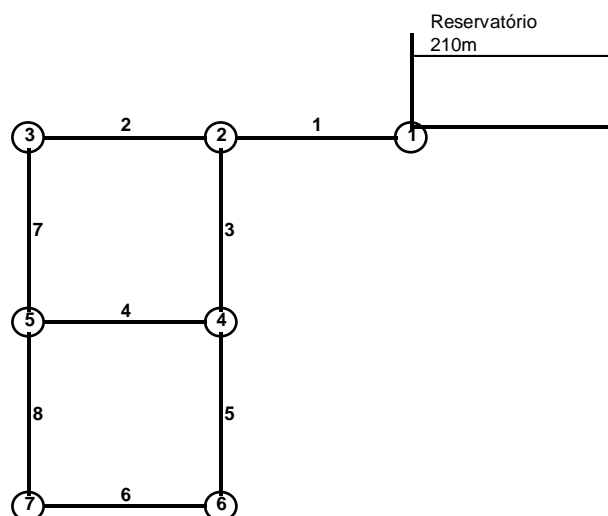


FIGURA 5.1 – Configuração da rede exemplo 1.

TABELA 5.1 – Demanda e cota geométrica nos nós da rede exemplo 1.

NÓ	Demanda (m³/h)	Cota (m)
1 (reservatório)	-1.120,0	210,00
2	100,0	150,00
3	100,0	160,00
4	120,0	155,00
5	270,0	150,00
6	330,0	165,00
7	200,0	160,00

Em resumo, o problema pode ser descrito como:

- minimizar: o custo de investimento de capital mais consumo de energia;
- sujeito a: atender as restrições hidráulicas,
 suprir as demanda requeridas (figura 5.1),
 satisfazer a pressão mínima admissível de 30 m acima do nível do solo para os nós de 2 a 7.

Os diâmetros mínimo e máximo considerados nesta rede exemplo são respectivamente de 25mm e 600mm. Na Tabela 5.2 apresentam-se os 14 diâmetros comerciais disponíveis e seus respectivos custos em unidade monetária (u.m) por metro de tubulação (ALPEROVITS, 1977).

TABELA 5.2 –Custos unitários por diâmetro

Diâmetro (pol)	Custo Unitário (u.m.)
1	2
2	5
3	8
4	11
6	16
8	23
10	32
12	50
14	60
16	90
18	130
20	170
22	300
24	550

Considerações e parâmetros utilizados no algoritmo genético

Conforme apresentado no item 4.3 existem diversas possibilidades de implementação dos AG's em termos da sistemática de representação das soluções (binária ou real), número de indivíduos da população, número de iterações, estratégias de seleção, probabilidades de recombinação e mutação. A definição de cada um destes critérios foi feita através de análise comparativa e gráfica a partir de diversas simulações.

O primeiro parâmetro definido foi a estratégia de seleção. Foram realizadas simulações utilizando a estratégia de seleção pura (P) e a estratégia elitista (E). Os melhores resultados foram obtidos quando utilizada a estratégia de seleção elitista, com os 4 melhores elementos de cada geração sendo mantidos na geração seguinte. Nas simulações adotando a estratégia de seleção pura a convergência foi muito lenta, com o valor mínimo em cada geração oscilando bastante, não havendo garantia se a interrupção da simulação ocorreria com o menor valor encontrado no processamento. A figura 5.2 apresenta o comportamento típico dos resultados mínimos por geração, quando utilizando ou não a estratégia do elitismo.

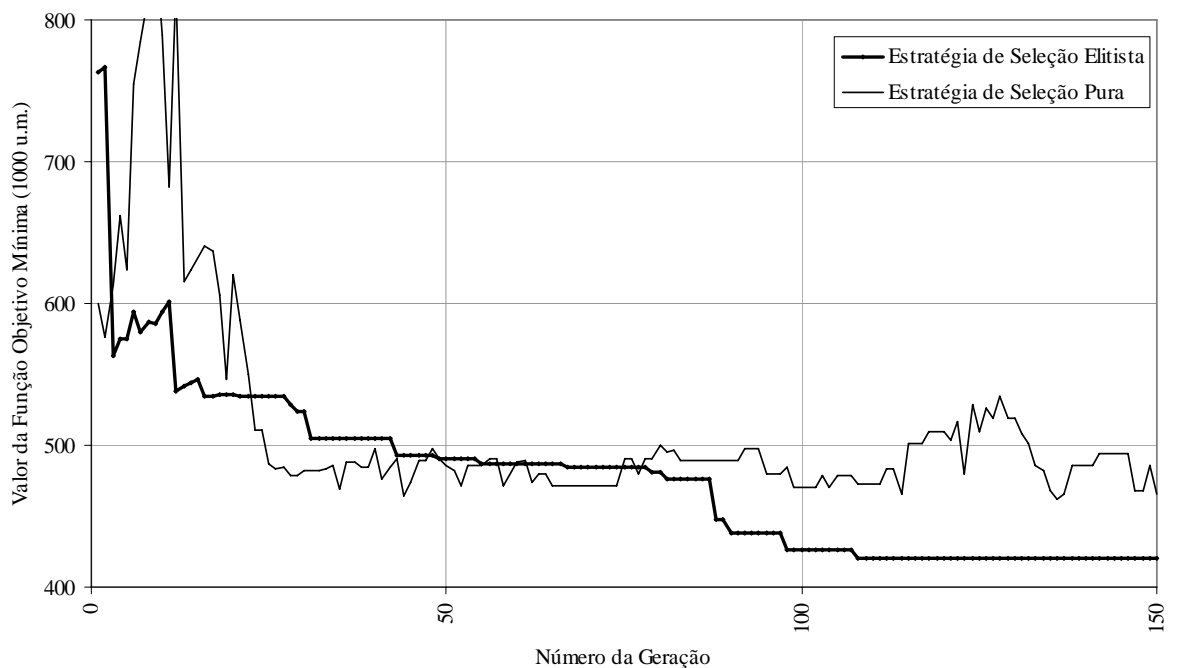


FIGURA 5.2 – Resultados t\u00edpicos de simula\u00e7\u00f5es com elitismo e sem elitismo (rede exemplo 1).

Ap\u00f3s ser definido que a estrat\u00e9gia de sele\u00e7\u00e3o adotada seria a elitista, foram realizadas simula\u00e7\u00f5es para obter o n\u00famero de elementos da popula\u00e7\u00e3o e o n\u00famero de gera\u00e7\u00f5es a serem utilizados.

Para definir o número de gerações, foram realizadas uma série de simulações com 300 gerações cada uma, onde observou-se decréscimo no valor mínimo da função objetivo até a geração de número 110, aproximadamente. Na figura 5.3 a representação típica de uma simulação com 50 elementos de população e 300 gerações. Baseando-se nestas considerações, concluiu-se serem suficientes 150 gerações para obtenção de resultados satisfatórios.

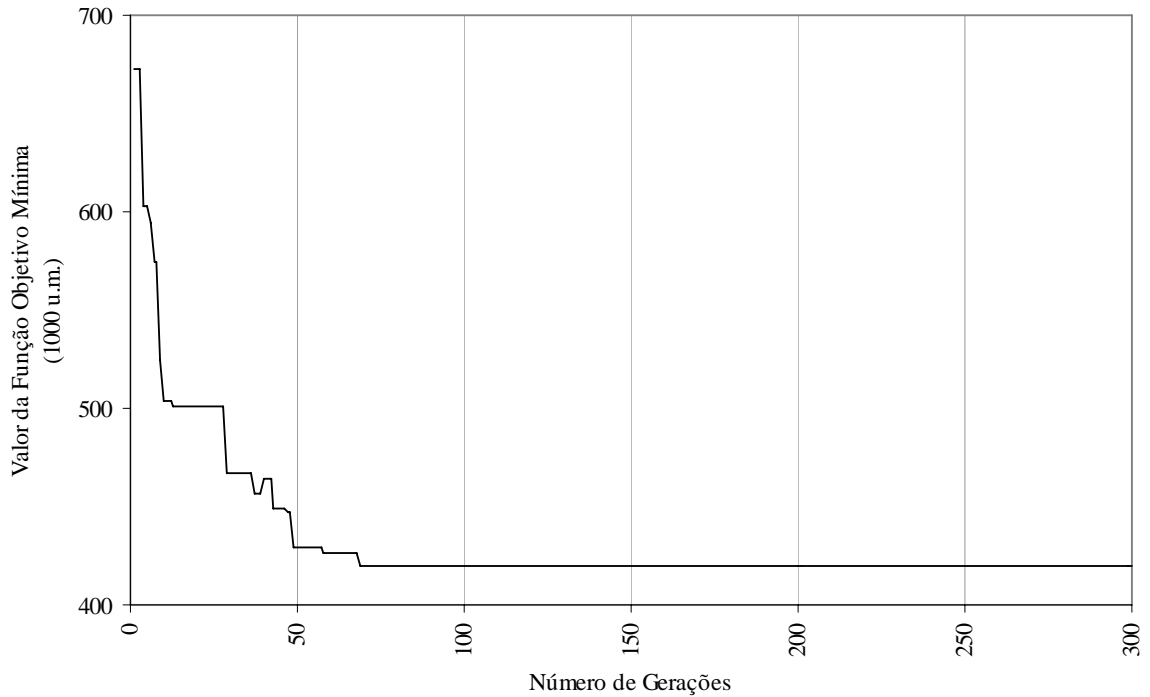


FIGURA 5.3 – Simulação típica com 300 gerações (rede exemplo 1).

Para definição do número de elementos da população (N) foram realizadas simulações com a população variando de 20 a 160 elementos com incrementos de 20 elementos. Foram realizadas 5 simulações para cada valor de população e considerado o valor médio obtido. Foi observado que, com populações abaixo de 40 elementos, não foram obtidos valores satisfatórios da função objetivo (figura 5.4). Foram obtidos valores satisfatórios com uma população de aproximadamente 50 elementos. A ampliação da população não apresentou melhora significativa na qualidade da solução encontrada, tendo por outro lado aumentado o tempo de processamento de cada simulação.

É interessante notar que nas simulações realizadas com 160 elementos verificou-se uma tendência do aumento no valor médio da função objetivo. A análise do comportamento destas simulações indicou que devido ao grande número de elementos, o método não conseguiu convergir a valores satisfatórios.

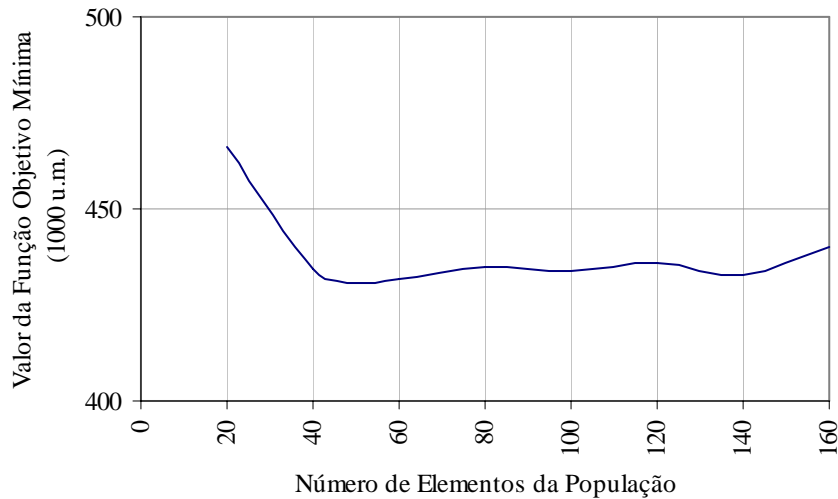


FIGURA 5.4 – Variação do valor da função objetivo mínima com o número de elementos da população (rede exemplo 1).

A probabilidade de recombinação dos elementos selecionados que resultou em melhores resultados foi a taxa de recombinação $P_c = 0,95$, lembrando que a estratégia de seleção é elitista. Para confirmar a escolha da estratégia de seleção elitista, foram também feitas simulações com a estratégia de seleção pura, com probabilidade de recombinação mais baixa, em torno de 0,6 a 0,7, para aumentar a chance dos melhores elementos passarem para a geração seguinte. É necessário porém ressaltar, que mesmo com esta redução no valor da probabilidade de recombinação, as simulações utilizando esta estratégia de seleção apresentou convergência lenta.

Para determinar o valor da probabilidade de mutação foi analisado a curva de decréscimo do valor da função objetivo. Na figura 5.5 é apresentada uma simulação típica com probabilidade de mutação de 0,01. Verificou-se que nas primeiras 50 gerações (2500 validações), ocorreu uma queda rápida do custo mínimo até o patamar de aproximadamente 430.000 u.m., independente do valor da taxa de mutação considerado, indicando que nesta etapa o processo é dominado pela seleção e pela recombinação.

A partir deste patamar, o processo começa a sofrer maior influência do valor utilizado para a probabilidade de mutação. As simulações com melhores resultados foram aquelas com probabilidade de mutação mais alta, em torno de 0,30. A avaliação dos efeitos da mutação foi bastante importante. A partir do patamar de 50 gerações, a recombinação tende a repetir elementos sendo significativo o efeito da mutação para propiciar elementos novos e auxiliar a recombinação.

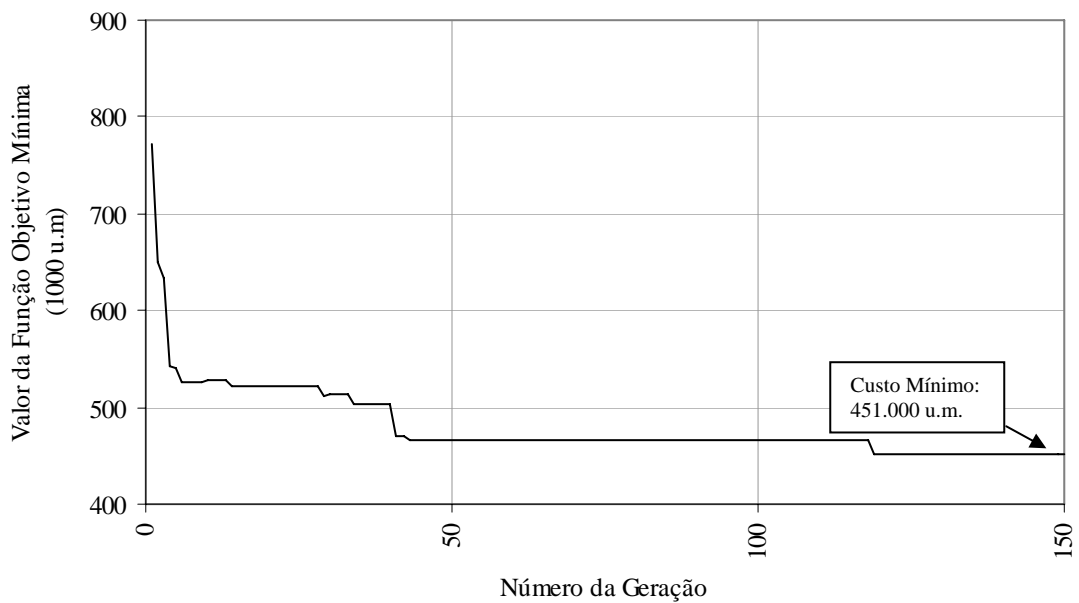


FIGURA 5.5 - Simulação típica com probabilidade de mutação 0,01 (rede exemplo 1).

Por ser um problema com restrições, foi utilizada a estratégia de penalidades para se obter as soluções factíveis. As soluções infactíveis não foram rejeitadas, pois algumas podem fornecer informações úteis sobre a solução ótima, havendo a possibilidade inclusive de contribuir para a obtenção de algumas soluções factíveis. A penalidade na validação da função objetivo, utilizada neste trabalho, é apresentada conforme a equação 5.1:

$$f(D_1, D_2, \dots, D_m) = \sum_{i=1}^m C(D_i, L_i) + p \left(\sum_{i=1}^n \max[30 - h_j, 0] \right) \quad (5.1)$$

onde $C(D_i, L_i)$ é o custo do tubo i de diâmetro D_i e comprimento L_i ; m é número total de tubos do sistema, p é o fator que multiplica a penalidade; n é o número total de nós do sistema e h_j a pressão disponível no nó. O fator p que multiplica a penalidade foi escolhido de forma a trazer os valores nominais de penalidades à mesma escala dos custos básicos da rede, sendo definido como:

$$p = 800000 \left(\frac{n_{\text{ger}}}{n_{\text{ger}}^{\text{max}}} \right)^{0,8} \quad (5.2)$$

onde, n_{ger} é o número da geração; $n_{\text{ger}}^{\text{max}}$ é o número máximo de gerações.

Os resultados obtidos por diversos pesquisadores da rede exemplo 1 foram utilizados como parâmetro de comparação das soluções obtidas neste trabalho. Na Tabela 5.3 foram

resumidos os resultados mais significativos obtidos em simulações utilizando esta rede exemplo (SAVIC e WALTERS, 1997).

TABELA 5.3 –Soluções da rede exemplo 1 por diferentes métodos

Trecho Nº	Alperovits e Shamir (1977)		Goulter et al (1986)		Kessler e Shamir (1989)		Eiger et al (1994)		Savic e Walters (1997) AG1		Savic e Walters (1997) AG2	
	(1)		(2)		(3)		(4)		(5)		(6)	
	L (m)	D (pol)	L (m)	D (pol)	L (m)	D (pol)	L (m)	D (pol)	L (m)	D (pol)	L (m)	D (pol)
1	256,00	20	383,00	20	1000,00	18	1000,00	18	1000,00	18	1000,00	18
	744,00	18	617,00	18								
2	996,38	8	1000,00	10	66,00	12	238,02	12	1000,00	10	1000,00	10
	3,62	6			934,00	10	761,98	10				
3	1000,00	18	1000,00	16	1000,00	16	1000,00	16	1000,00	16	1000,00	16
4	319,38	8	687,00	6	713,00	3	1000,00	1	1000,00	4	1000,00	1
	680,62	6	313,00	4	287,00	2						
5	1000,00	16	1000,00	16	836,00	16	628,86	16	1000,00	16	1000,00	14
					164,00	14	371,14	14				
6	784,94	12	98,00	12	107,00	12	989,05	10	1000,00	10	1000,00	10
	215,06	10	902,00	10	891,00	10	10,95	8				
7	1000,00	6	492,00	10	819,00	10	921,86	10	1000,00	10	1000,00	10
			508,00	8	181,00	8	78,14	8				
8	990,93	6	20,00	2	920,00	3	1000,00	1	1000,00	1	1000,00	1
	9,07	4	980,00	1	80,00	2						
CUSTO (u.m)	497.525,00		435.015,00		417.500,00		402.352,00		419.000,00		420.000,00	

Na tabela 5.3, os resultados apresentados nas colunas (1) a (4) foram obtidos antes da aplicação da técnica dos algoritmos genéticos. A solução ótima obtida por esses métodos era composta de um ou dois segmentos de tubulação de diferentes diâmetros discretos entre cada par de nós, uma vez que o resultado teórico de diâmetro obtido deveria ser transformado em dois trechos equivalentes com diâmetros comerciais.

Nas colunas (5) e (6) são apresentados os resultados obtidos por SAVIC e WALTERS (1997) utilizando a técnica dos algoritmos genéticos. Deve-se notar que a busca da solução ótima visava obter um diâmetro comercial por trecho. Foram obtidas duas soluções, que diferem entre si quanto à constante numérica de conversão ω da fórmula de Hazen-Williams, equação 4.42. A coluna (5) apresenta os resultados obtidos utilizando o coeficiente $\omega = 10,5088$ e a coluna (6) utilizando o coeficiente $\omega = 10,9031$. Estes dois valores foram escolhidos por SAVIC e WALTERS (1997) por representar os extremos da faixa de valores utilizados em publicações.

Soluções obtidas

O projeto “ótimo” obtido neste trabalho resultou em uma solução com custo de 420.000 u.m. Esta solução foi obtida em uma simulação utilizando a estratégia elitista, garantindo a passagem para a geração seguinte dos 4 melhores elementos da geração, e considerando uma população de 50 elementos e 150 gerações. A probabilidade de recombinação utilizada foi de $P_c = 0,95$ e probabilidade de mutação $P_m = 0,30$. Para consideração das restrições da função objetivo foi considerada a estratégia de penalidades, o valor do coeficiente de multiplicação sendo considerado crescente ao longo das gerações. Na formulação hidráulica da perda de carga, foi utilizada a fórmula de Hazen-Williams com a constante numérica de conversão $\omega = 10,5088$.

A figura 5.6 mostra a representação gráfica de uma simulação típica que resultou no custo da melhor solução e apresenta o custo mínimo obtido em cada geração.

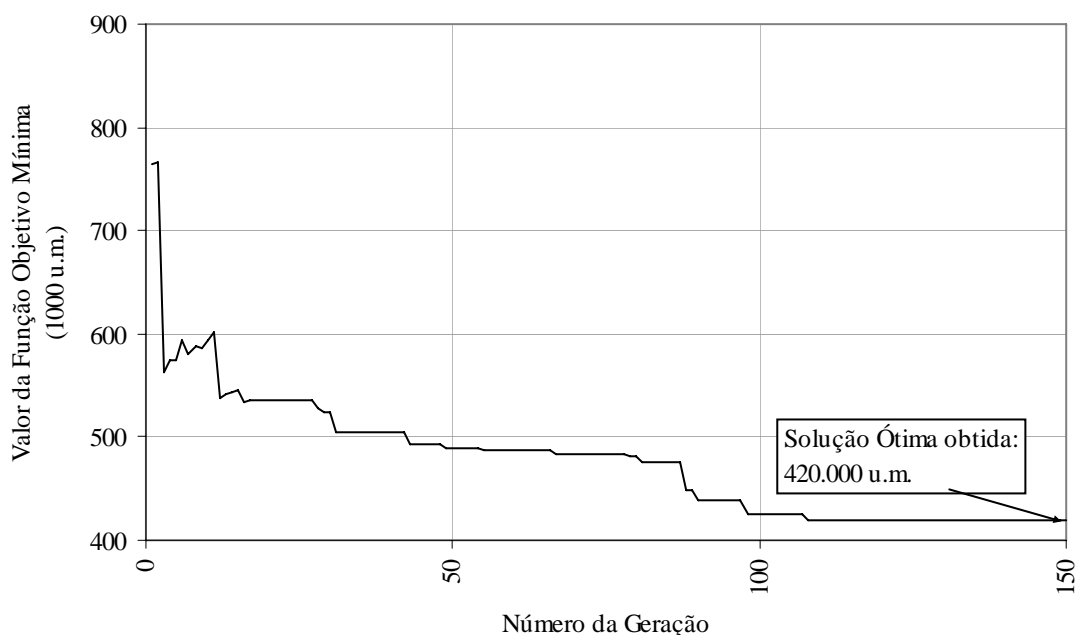


FIGURA 5.6 – Variação da função objetivo mínima ao longo das gerações (rede exemplo 1).

Neste exemplo simples, com 8 trechos e 14 diâmetros discretos de tubulação possíveis, o espaço total de soluções compreende $14^8 = 1,48 \times 10^9$ diferentes configurações de rede. Na simulação do AG que obteve o projeto otimizado, o total de funções objetivas validadas corresponde ao produto do número de elementos da população pelo número de gerações, portanto para se obter a solução otimizada houve $50 \times 150 = 7500$ validações. Essas validações correspondem a aproximadamente 0,0005% do espaço de busca.

Além da avaliação de custo de uma alternativa de projeto, outro aspecto que pode ser considerado, quando da avaliação de um projeto de redes de distribuição de água, é a confiabilidade do sistema. Não há atualmente nenhuma definição universalmente aceita ou medida de confiabilidade de redes de distribuição de água. Em geral, a confiabilidade é definida como a probabilidade que um sistema tem que operar satisfatoriamente dentro de limites específicos para determinado período de tempo em um ambiente específico.

A questão da confiabilidade de redes de distribuição de água se refere à capacidade do sistema fornecer as demandas nos nós em níveis de pressão admissíveis. Com o objetivo de determinar tais confiabilidades, devem ser determinadas as probabilidades de falhas dos vários componentes. As falhas dos componentes em uma rede de distribuição de água incluem rupturas de tubos e mau funcionamento de bombas, válvulas, e reservatórios, etc. A confiabilidade destes componentes deve ser usada para determinar a confiabilidade global do sistema.

A metodologia apresentada neste trabalho visa substituir o processo convencional de projetos de redes de distribuição de água utilizando procedimentos de tentativa e erro, por uma técnica que garanta que o projeto obtido satisfaça as demandas e as pressões mínimas de trabalho a um custo mínimo. Enquanto este método ainda não esteja analisando os aspectos de confiabilidade, os algoritmos genéticos mostram-se particularmente efetivos ao oferecer ao projetista, um conjunto de soluções sub-ótimas, uma vez que a cada simulação, além da solução “ótima”, têm-se como resultado um conjunto de soluções de baixo custo. Desta forma, o tomador de decisões pode escolher entre as alternativas com similaridade de preço, utilizando na análise outros critérios de avaliação para a escolha da alternativa final, tais como possibilidades de ampliação, flexibilidade e facilidade de operação e critérios de confiabilidade.

Para ilustrar esta possibilidade, é apresentado na Tabela 5.4 um conjunto de configurações contendo a solução “ótima” obtida neste trabalho e algumas soluções sub-ótimas. Estas soluções sub-ótimas, quando comparadas aos resultados publicados na literatura demonstram resultados bastante satisfatórios, principalmente quando comparados aos resultados obtidos por ALPEROVITS E SHAMIR (1977) e Gouter (1986), apud SAVIC e WALTERS (1997). As soluções apresentadas na Tabela 5.4 foram obtidas com a constante numérica de conversão $\omega = 10,5088$. Nas Tabelas 5.5 e 5.6 são apresentados os valores de pressão nos nós e vazão nos trechos resultantes em cada solução.

TABELA 5.4 – Conjunto de soluções otimizadas obtidas para a rede exemplo 1.

Trecho n°	L (m)	Soluções Obtidas							
		Solução Ótima D (pol)	Solução 1 D (pol)	Solução 2 D (pol)	Solução 3 D (pol)	Solução 4 D (pol)	Solução 5 D (pol)	Solução 6 D (pol)	Solução 7 D (pol)
1	1.000,00	18	18	18	18	18	18	18	18
2	1.000,00	14	14	14	14	12	14	12	14
3	1.000,00	14	14	14	14	16	14	16	14
4	1.000,00	1	2	1	2	1	2	3	2
5	1.000,00	14	14	14	14	16	14	16	14
6	1.000,00	6	6	2	1	10	2	10	4
7	1.000,00	14	14	14	14	10	14	10	14
8	1.000,00	10	10	12	12	1	12	1	12
CUSTO (u.m.)		420.000	423.000	427.000	427.000	428.000	430.000	434.000	436.000

TABELA 5.5 – Pressão mínima nos nós (rede exemplo 1)

N° do nó	Pressão mínima nos nós em cada solução							
	Solução Ótima h (m)	Solução 1 h (m)	Solução 2 h (m)	Solução 3 h (m)	Solução 4 h (m)	Solução 5 h (m)	Solução 6 h (m)	Solução 7 h (m)
1	53,27	53,27	53,27	53,27	53,27	53,27	53,27	53,27
2	37,70	37,73	36,79	36,80	37,52	36,85	37,64	37,15
3	43,94	44,00	42,27	42,28	39,96	42,38	40,30	42,93
4	43,16	43,13	43,97	43,97	43,70	43,92	43,65	43,66
5	30,99	31,04	30,33	30,29	30,00	30,44	30,30	31,25
6	30,10	30,07	31,54	31,57	30,55	31,49	30,57	31,03

TABELA 5.6 – Vazão nos trechos (rede exemplo 1).

Trecho n°	Soluções Obtidas							
	Solução Ótima q (m³/s)	Solução 1 q (m³/s)	Solução 2 q (m³/s)	Solução 3 q (m³/s)	Solução 4 q (m³/s)	Solução 5 q (m³/s)	Solução 6 q (m³/s)	Solução 7 q (m³/s)
1	0,3111	0,3111	0,3111	0,3111	0,3111	0,3111	0,3111	0,3111
2	0,1450	0,1445	0,1572	0,1572	0,0982	0,1564	0,0971	0,1525
3	0,1383	0,1388	0,1260	0,1261	0,185	0,1268	0,1861	0,1308
4	0,0001	0,0007	0,0001	0,0009	0,0001	0,0009	0,0031	0,0008
5	0,1048	0,1047	0,0925	0,0918	0,1515	0,0925	0,1496	0,0966
6	0,0132	0,0130	0,0009	0,0001	0,0598	0,0009	0,0580	0,0049
7	0,1172	0,1167	0,1294	0,1294	0,0705	0,1287	0,0694	0,1247
8	0,0423	0,0424	0,0546	0,0554	0,0043	0,0546	0,0024	0,0506

5.2 Simulação da rede exemplo 2

Descrição dos parâmetros de projeto

Para testar a eficiência da utilização do modelo proposto em projetos de redes de distribuição de água a partir dos critérios de projeto e custos utilizados no Brasil, foram feitas simulações baseadas em uma rede existente na cidade de Aparecida do Taboado, interior de Mato Grosso do Sul. O objetivo desta análise foi buscar combinações de diâmetros para os dois anéis principais da rede existente. Estas novas combinações deveriam atender as restrições de pressão mínima nos nós e perda de carga máxima nos trechos para uma determinada situação de demanda. Os custos destas soluções obtidas foram então avaliados comparando-os ao custo de implantação da rede existente.

A rede existente principal é formada por um reservatório e dois anéis, com 13 nós e 15 trechos. A rede, bem como sua localização na cidade, é apresentada na figura 5.7.

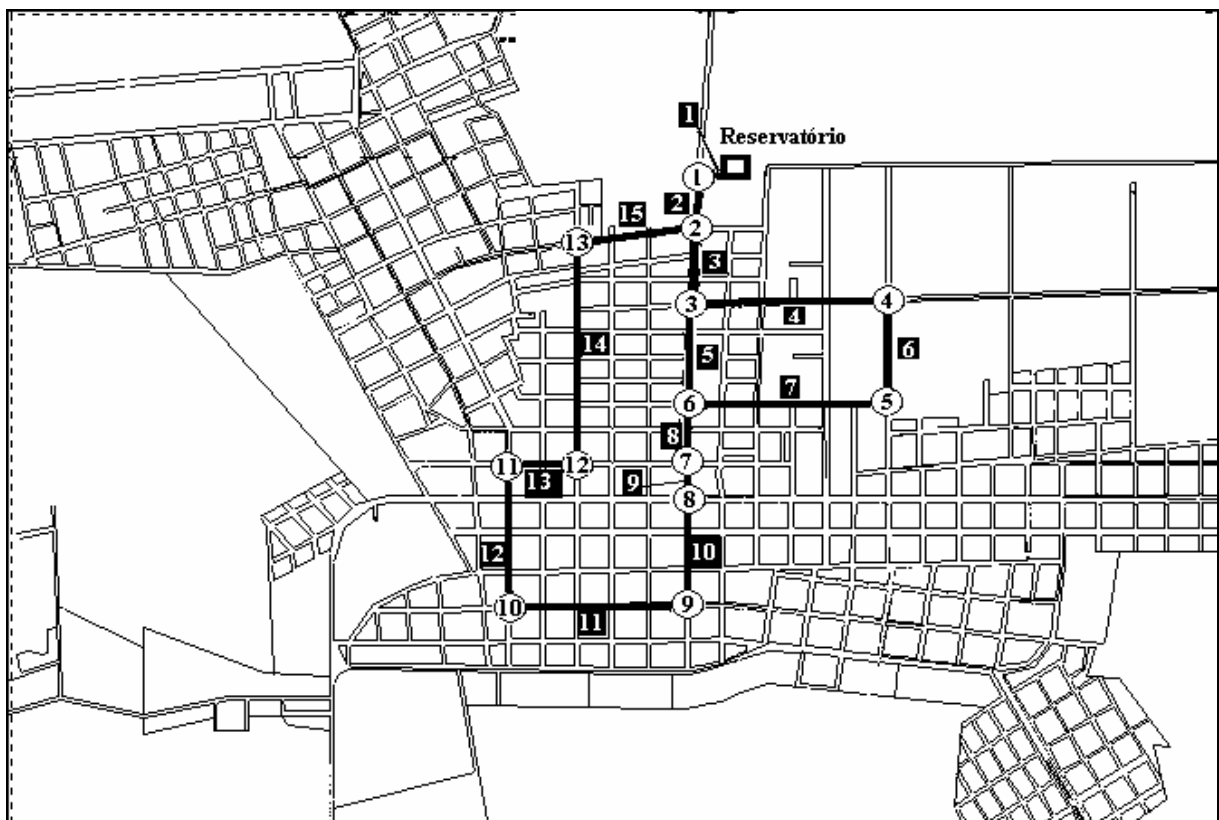


FIGURA 5.7 – Localização e configuração da rede exemplo 2.

A rede existente atende às restrições hidráulicas, sendo observado em todos os nós da tubulação primária pressão dinâmica acima da mínima admissível, que de acordo com a NBR12218 (ABNT, 1994) é de 10,0 m.c.a. (tabela 5.7). Verifica-se ainda que as perdas de carga unitárias nos trechos estão abaixo do valor mínimo admissível de 8,0 m/Km (tabela 5.8). As vazões consideradas foram as do dia e hora de maior consumo.

Este exemplo não representa a situação de implantação da rede, e sim uma configuração que considera a situação de demanda atual, atendida pela rede antiga com ampliações e adaptações, que atende as novas vazões requeridas pelo crescimento da cidade. Em relação ao traçado também houve simplificações, sendo os trechos de diâmetro menor que 100mm transformados em demanda equivalente nos nós e os trechos que foram duplicados substituídos por seus diâmetros equivalentes.

As demandas, as cotas geométricas e pressões nos nós são apresentadas na tabela 5.7. Na tabela 5.8 são apresentados os diâmetros, os comprimentos, a perda de carga unitária, os custos unitários e custos totais dos trechos da rede existente. O coeficiente de Hazen-Williams da tubulação foi considerado de 130 e a constante numérica de conversão $\omega = 10,65$.

TABELA 5.7 – Demandas, cota geométricas e pressões nos nós da rede exemplo 2.

NÓ	Demanda (m³/s)	Cota (m)	Pressão (m)
Reservatório	-0,1745	127,20	
1	0,0066	112,00	14,07
2	0,0084	111,00	15,60
3	0,0044	110,00	15,68
4	0,0205	113,50	10,24
5	0,0368	111,00	11,76
6	0,0000	105,00	20,20
7	0,0063	103,00	21,89
8	0,0050	101,00	23,57
9	0,0076	94,00	30,24
10	0,0126	93,00	31,24
11	0,0116	100,00	24,74
12	0,0039	101,50	23,97
13	0,0509	107,00	18,89

TABELA 5.8 – Diâmetro existente, comprimento, perda de carga unitária, custo unitário e custo total e comprimento dos trechos da rede exemplo 2.

Trecho	Diâmetro (mm)	Comprimento (m)	J (m/km)	Custo Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)
1	400	30,00	4,41	351,39	10.541,70
2	400	113,22	4,11	351,39	39.784,38
3	300	221,87	4,46	137,87	30.589,22
4	250	562,72	3,44	100,75	56.694,04
5	250	281,51	2,04	100,75	28.362,13
6	200	299,65	3,24	67,66	20.274,32
7	150	579,00	3,94	43,03	24.914,37
8	200	170,00	2,51	67,66	11.502,20
9	150	100,00	5,25	43,03	4.303,00
10	150	309,00	2,42	43,03	13.296,27
11	100	516,08	1,01	24,08	12.427,21
12	200	417,31	0,68	67,66	28.235,19
13	200	195,00	2,74	67,66	13.193,70
14	200	632,00	3,71	67,66	42.761,12
15	350	354,69	1,84	294,15	104.332,06
Custo Total				R\$	441.210,91

Os custos unitários foram calculados de acordo com o Boletim de Preços SANESUL - Março - 2003. Para a composição de preços foram considerados os serviços de locação e cadastro da rede de distribuição de água, escavação e reaterro de valas e fornecimento e assentamento de tubos. Considerando uma situação hipotética, em que esta seria uma rede nova, não foram considerados os serviços de remoção e recomposição de pavimento uma vez que a construção geralmente é executada quando as ruas ainda são em terra. Este custo, porém, pode ter um peso significativo quando do orçamento da ampliação e da reabilitação de redes existentes.

Para obtenção dos custos unitários foi ainda considerado que as redes de distribuição com diâmetros de 50 e 75 mm serão em tubos de PVC linha PBA, classe 12; os diâmetros de 100 a 300mm serão em tubos de PVC Linha DEFOFO - 1MPa e os diâmetros entre 350 e 600 mm serão em tubos de Ferro Fundido Dúctil. Na tabela 5.9 apresentam-se os custos unitários obtidos. As planilhas com a composição de preços para cada diâmetro de tubulação são apresentadas no ANEXO 1.

O diâmetro mínimo foi considerado 50 mm de acordo com NBR12218 (ABNT, 1994) que dispõe sobre projeto de redes de distribuição de água para abastecimento público. A norma prevê a utilização de diâmetros menores em extremidades de rede e em situações de

vazão específicas, o que não ocorre nos anéis de distribuição em estudo. O diâmetro máximo considerado foi de 600mm, pois acima deste valor o assentamento e operação apresentam custos diferenciados.

TABELA 5.9 –Preços unitários para implantação de redes de distribuição de água.

Rede em tubos de PVC PBA DN 50	R\$	10,56
Rede em tubos de PVC PBA DN 75	R\$	16,18
Rede em tubos de PVC 1MPa DN 100	R\$	24,08
Rede em tubos de PVC 1MPa DN 150	R\$	43,03
Rede em tubos de PVC 1MPa DN 200	R\$	67,66
Rede em tubos de PVC 1MPa DN 250	R\$	100,75
Rede em tubos de PVC 1MPa DN 300	R\$	137,87
Rede em tubos de FºFº Dúctil DN 350	R\$	294,15
Rede em tubos de FºFº Dúctil DN 400	R\$	351,39
Rede em tubos de FºFº Dúctil DN 450	R\$	393,40
Rede em tubos de FºFº Dúctil DN 500	R\$	475,98
Rede em tubos de FºFº Dúctil DN 600	R\$	630,53

Considerações e parâmetros utilizados no algoritmo genético

A função objetivo da rede exemplo 2 visou minimizar o custo de implantação de uma rede real de distribuição de água. As restrições consideradas foram que a demanda requerida fosse suprida com uma pressão mínima nos pontos de descarga (nós) de 10 m.c.a e perda de carga unitária máxima nos trechos de 8 m/km. Adicionalmente as vazões nos trechos e as pressões nos nós devem satisfazer as leis de conservação de energia e massa.

Em resumo, o problema pode ser descrito como:

- minimizar: o custo de implantação da rede;
- sujeito a: atender as restrições hidráulicas,
 suprir as demandas requeridas (tabela 5.7),
 satisfazer a pressão mínima admissível de 10 m acima do nível do solo (para os nós de 1 a 13), e
 satisfazer a perda de carga unitária máxima de 8m/km (nos trechos 1 a 15).

Por ser um problema com restrições, foi utilizada a estratégias de penalidades. A penalidade na validação da função objetivo, utilizada neste trabalho é apresentada na equação 5.3:

$$f(D_1, D_2, \dots, D_m) = \sum_{i=1}^m C(D_i, L_i) + p \left(\sum_{j=1}^n \max[10 - h_j, 0] + \sum_{i=1}^m \max[J_i - 8, 0] \right) \quad (5.3)$$

onde $C(D_i, L_i)$ é o custo do tubo i de diâmetro D_i e comprimento L_i ; e m é número total de tubos do sistema; p é o fator que multiplica a penalidade, n é o número total de nós do sistema e h_j a pressão disponível no nó e J_i é perda de carga unitária no trecho i em m/km.

O fator p que multiplica a penalidade foi escolhido de forma a conduzir os valores nominais de penalidades à mesma escala dos custos básicos da rede, sendo definido como:

$$p = 2000000 \left(\frac{n_{\text{ger}}}{n_{\text{ger}}^{\text{max}}} \right)^{0.8} \quad (5.4)$$

onde, n_{ger} é o número da geração; $n_{\text{ger}}^{\text{max}}$ é o número máximo de gerações.

Na obtenção do projeto otimizado deste exemplo, foi utilizada a estratégia de seleção elitista, com os 6 melhores elementos de cada geração sendo mantidos na geração seguinte.

Também nesta rede exemplo, as simulações com melhores resultados foram aquelas com probabilidade de mutação mais alta, em torno de 0,30. A avaliação dos efeitos da mutação foi bastante importante. A partir do patamar de 100 gerações a recombinação tende a repetir elementos, sendo significativo o efeito da mutação para propiciar elementos novos, aumentando a diversidade e auxiliando a recombinação.

Quanto a taxa de recombinação, os melhores resultados foram obtidos com taxa de recombinação $P_c = 0,95$ e $P_c = 0,90$. Não houve diferenças significativas nos resultados utilizando estas duas taxas, porém com taxa de recombinação menor que $P_c = 0,90$ houve uma maior lentidão na convergência.

Para a definição do número de elementos da população foram realizadas simulações com 50, 80, 100 e 150 elementos. Neste exemplo a população de 50 elementos não foi suficiente para produzir resultados satisfatórios. A população de 80 elementos conseguiu uma diversidade suficiente para resultar em elementos de boa qualidade. Simulações ampliando o número de elementos da população para 100 e 150 elementos não apresentaram melhora

significativa na velocidade de obtenção e qualidade da solução encontrada, tendo então sido adotada a população de 80 elementos.

Para definir o número de gerações, foi realizada uma série de simulações com 300 gerações cada uma, para uma população de 80 elementos, $P_c = 0,95$, $P_m = 0,30$.

Observou-se que as reduções no valor mínimo da função objetivo ocorreram até a geração de número 180. Foram também testadas simulações com 400 e 500 gerações, sem que fosse obtido melhora no valor mínimo obtido.

Soluções Obtidas

O resultado ótimo obtido a partir de diversas simulações resultou em uma configuração de diâmetros para esta rede exemplo 2 com custo total de R\$ 355.150,22. A avaliação desta solução é feita comparando-se o resultado obtido ao custo da rede existente, que é de R\$ 441.210,91 (tabela 5.8). Verifica-se que o custo da solução otimizada é 19,5% menor que o custo da rede existente.

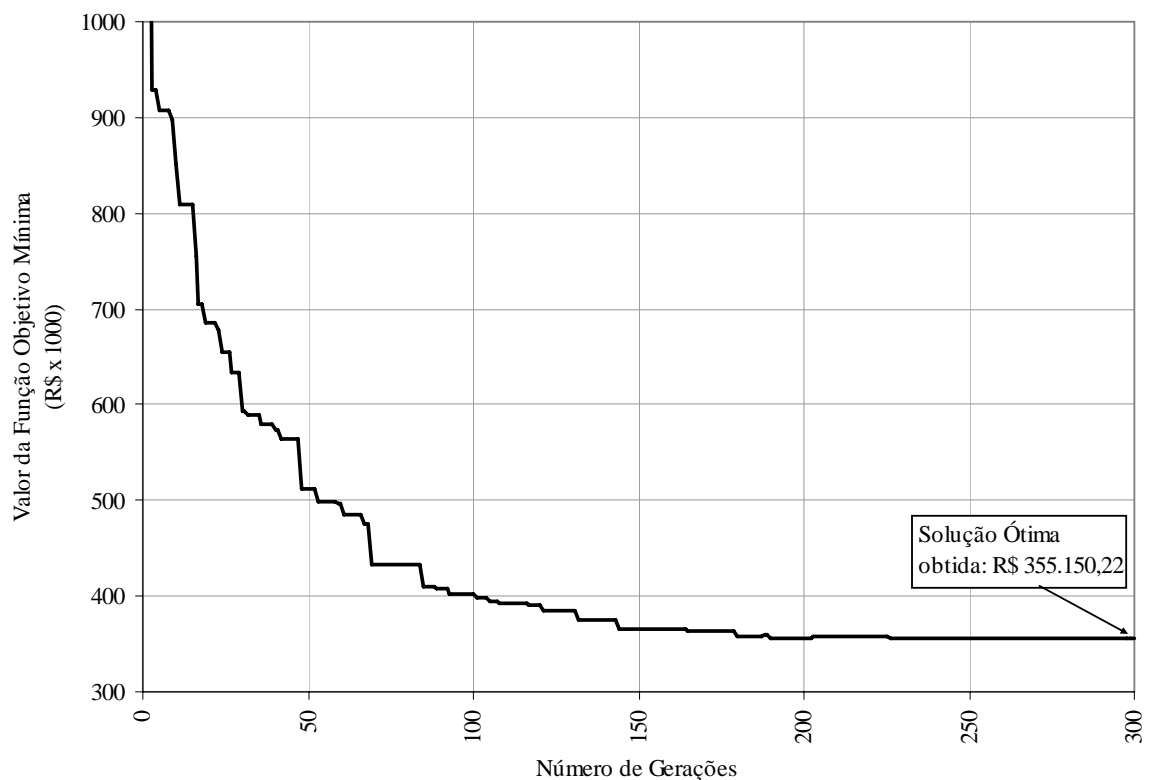


FIGURA 5.8 – Variação da função objetivo mínima ao longo das gerações (rede exemplo 2).

O projeto “ótimo” foi obtido a partir de simulações que utilizaram a estratégia elitista, garantindo a passagem para a geração seguinte dos seis melhores elementos da geração. Nesta simulação foi considerada uma população de 80 elementos e 300 gerações. Foram consideradas probabilidades de recombinação de $P_c = 0,95$ e probabilidade de mutação considerada $P_m = 0,30$.

Quanto às restrições da função objetivo, foi considerada a estratégia de penalidades com o valor do coeficiente de multiplicação crescente ao longo das gerações (equações 5.3 e 5.4). A figura 5.8 mostra a representação gráfica de uma simulação típica do AG que resultou na solução ótima, apresentando a variação do custo mínimo a cada geração

Neste exemplo, com 15 trechos e 12 diâmetros discretos possíveis, o espaço total de soluções compreende $12^{15} = 1,54 \times 10^{16}$ diferentes configurações de rede. Na simulação do AG que obteve o projeto “ótimo”, o total de funções objetivas validadas corresponde ao produto do número de elementos da população (N) pelo número de gerações (G), portanto para se obter a solução ótima houve $80 \times 300 = 24000$ validações. Estas validações representam aproximadamente $1,5 \times 10^{-10}\%$ do espaço de busca

Em todas as simulações deste exemplo a constante numérica de conversão da fórmula de Hazen-Williams considerada foi $\omega = 10,65$, por ser usualmente utilizado em projetos de redes de distribuição de água no Brasil (PORTO, 1999).

Como já mencionado no exemplo anterior, este método considera para a avaliação das soluções apenas o critério do custo mínimo de construção de uma rede de distribuição. Por outro lado, a aplicação do método dos algoritmos genéticos traz como resultado um conjunto contendo a solução “ótima” e algumas soluções sub-ótimas.

Este conjunto de soluções pode auxiliar o tomador de decisões a escolher entre alternativas com similaridade de preço, utilizando, na análise, outros critérios de avaliação para a escolha da alternativa final, tais como possibilidades de ampliação, flexibilidade e facilidade de operação e critérios de confiabilidade.

Para ilustrar esta possibilidade, na tabela 5.10, são apresentadas opções de diâmetros para rede exemplo 2 com seus respectivos custos de implantação, referentes à configuração existente (coluna 1), à solução “ótima” (coluna 2) e à cinco soluções sub-ótimas (colunas 3 a 7).

TABELA 5.10 – Conjunto de soluções otimizadas obtidas para a rede exemplo 2.

Trecho n°	L (m)	Soluções Obtidas						
		Rede existente	Solução ótima	Solução 1	Solução 2	Solução 3	Solução 4	Solução 5
		D (mm) (1)	D (mm) (2)	D (mm) (3)	D (mm) (4)	D (mm) (5)	D (mm) (6)	D (mm) (7)
1	30,00	400	400	450	400	400	450	400
2	113,22	400	400	400	400	400	450	450
3	221,87	300	300	300	300	300	300	300
4	562,72	250	250	300	300	200	250	250
5	281,51	250	250	200	200	250	250	300
6	299,65	200	150	200	200	50	200	200
7	579,00	150	200	75	50	250	150	150
8	170,00	200	200	200	200	200	200	200
9	100,00	150	200	200	150	150	200	200
10	309,00	150	200	150	150	150	200	200
11	516,08	100	150	150	50	50	150	150
12	417,31	200	50	100	150	150	50	50
13	195,00	200	150	150	200	200	150	200
14	632,00	200	150	150	200	200	150	150
15	354,69	350	250	300	300	300	300	250
CUSTO (R\$)		441.211	355.150	356.754	361.297	366.214	367.453	368.279

Para avaliar a qualidade das soluções obtidas, outros critérios podem ser utilizados. A partir das soluções apresentadas na tabela 5.10, o projetista pode escolher, por exemplo, aquela que apesar de não ser a de menor custo, apresenta valores de diâmetros menos variáveis, o que facilita a operação, manutenção e manobras na rede.

Outro aspecto que pode ser usado para avaliar a qualidade das soluções obtidas é a distribuição de pressão na rede. Na tabela 5.11 são apresentados os valores de pressão nos nós para a rede existente (coluna 1) e para cada uma das soluções apresentadas na tabela 5.10 (colunas 2 a 7). Verifica-se que as soluções com custos otimizados apresentam distribuição de pressão na rede bastante próximas à situação da rede existente, com variações em média de 4% em relação a situação existente, sendo a diferença máxima verificada igual a 14% .

TABELA 5.11– Pressão mínima nos nós (rede exemplo 2).

Nº do nó	Pressão nos nós						
	Rede existente	Solução ótima	Solução 1	Solução 2	Solução 3	Solução 4	Solução 5
	h (m)	h (m)	h (m)	h (m)	h (m)	h (m)	h (m)
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	14,07	14,07	14,13	14,07	14,07	14,13	14,07
2	15,60	15,60	15,66	15,60	15,60	15,86	15,81
3	15,61	15,35	15,48	15,63	15,64	15,63	15,55
4	10,15	10,57	10,77	10,88	10,66	10,11	10,11
5	11,65	11,39	11,28	11,30	11,80	11,57	11,65
6	20,02	18,98	19,01	19,94	19,16	19,71	20,13
7	21,59	20,04	20,21	21,56	20,77	20,80	21,17
8	23,05	21,68	21,91	23,10	22,32	22,45	22,79
9	29,27	27,93	26,54	29,50	28,74	28,74	29,01
10	29,71	26,76	26,13	27,46	27,41	27,75	27,70
11	23,00	19,76	19,69	21,94	21,91	21,18	20,70
12	22,05	18,91	19,15	21,05	21,03	20,40	19,35
13	18,95	17,04	18,53	18,17	18,17	18,79	17,28

Na tabela 5.11 observa-se que todas as soluções atendem a restrição de pressão mínima disponível de 10 m.c.a.

Na tabela 5.12 são apresentados os resultados das soluções em termo de perda de carga unitária. Observa-se que as soluções com custos otimizados também atendem à restrição de perda de carga unitária limitada a 8 m/km.

Finalmente na Tabela 5.13 são apresentadas as vazões nos trechos para a rede existente e para o conjunto de soluções apresentado na tabela 5.10.

TABELA 5.12– Perda de carga unitária nos trechos (rede exemplo 2).

Trecho n°	Perda de Carga Unitária						
	Rede existente	Solução ótima	Solução 1	Solução 2	Solução 3	Solução 4	Solução 5
	J (m/km)	J (m/km)	J (m/km)	J (m/km)	J (m/km)	J (m/km)	J (m/km)
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	4,41	4,41	2,49	4,41	4,41	2,49	4,41
2	4,11	4,11	4,11	4,11	4,11	2,31	2,31
3	4,46	5,60	5,31	4,33	4,32	5,53	5,65
4	3,44	2,25	2,12	2,20	2,56	3,54	3,38
5	2,04	4,82	5,12	2,40	5,18	3,23	1,45
6	3,24	5,45	6,49	6,84	3,84	3,42	3,14
7	3,94	2,67	2,78	3,84	2,31	3,54	4,18
8	2,51	5,40	4,61	2,23	2,21	5,21	5,56
9	5,25	3,58	2,93	4,42	4,36	3,42	3,71
10	2,42	2,38	7,49	1,85	1,81	2,25	2,49
11	1,01	4,06	2,66	4,92	3,84	3,71	4,36
12	0,68	0,37	1,20	3,43	3,49	0,79	3,84
13	2,74	3,22	4,73	3,05	3,07	3,54	0,73
14	3,71	5,59	7,49	4,06	4,09	6,00	5,25
15	1,84	7,15	3,16	4,01	4,02	2,99	7,05

TABELA 5.13– Vazões nos trechos (rede exemplo 2).

Trecho n°	Vazão nos trechos						
	Rede existente	Solução ótima	Solução 1	Solução 2	Solução 3	Solução 4	Solução 5
	q (m³/s)	q (m³/s)	q (m³/s)	q (m³/s)	q (m³/s)	q (m³/s)	q (m³/s)
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	0,1746	0,1746	0,1746	0,1746	0,1746	0,1746	0,1746
2	0,1680	0,1680	0,1680	0,1680	0,1680	0,1680	0,1680
3	0,0827	0,0934	0,0908	0,0814	0,0813	0,0928	0,0939
4	0,0446	0,0355	0,0555	0,0565	0,0212	0,0453	0,0442
5	0,0337	0,0535	0,0308	0,0205	0,0556	0,0431	0,0452
6	0,0241	0,0150	0,0350	0,0360	0,0007	0,0248	0,0237
7	0,0126	0,0217	0,0017	0,0007	0,0360	0,0119	0,0130
8	0,0210	0,0317	0,0291	0,0197	0,0196	0,0311	0,0322
9	0,0147	0,0254	0,0228	0,0134	0,0133	0,0248	0,0259
10	0,0097	0,0204	0,0178	0,0084	0,0083	0,0198	0,0209
11	0,0021	0,0128	0,0102	0,0008	0,0007	0,0122	0,0133
12	0,0104	0,0002	0,0023	0,0117	0,0118	0,0003	0,0007
13	0,0220	0,0113	0,0139	0,0233	0,0234	0,0119	0,0108
14	0,0259	0,0152	0,0178	0,0272	0,0273	0,0158	0,0147
15	0,0768	0,0661	0,0687	0,0781	0,0782	0,0667	0,0656

6. CONCLUSÕES

Uma rede de distribuição de água, além de ser parte vital do sistema de abastecimento, representa o maior custo de investimento do conjunto de obras de engenharia, havendo assim a necessidade de se buscar o máximo aproveitamento do capital investido.

Com a disponibilidade atual de microcomputadores, tornou-se possível o desenvolvimento de projetos de redes de distribuição de água com a aplicação de técnicas modernas de otimização. Entre estas técnicas, destaca-se a aplicação dos algoritmos genéticos, que têm se mostrado eficiente para a solução de problemas não lineares.

Este trabalho, apresenta um modelo para otimização de projetos de redes de distribuição de água, com a utilização dos algoritmos genéticos. Teve como objetivos implementar e comprovar a eficiência de um modelo hidráulico de otimização para o dimensionamento de mínimo custo, e avaliar o comportamento e as variações dos parâmetros da técnica dos algoritmos genéticos.

O modelo demonstrou-se apropriado para o dimensionamento de redes de distribuição de água, e a técnica dos algoritmos genéticos mostrou-se uma ferramenta eficaz na obtenção do projeto otimizado.

Duas redes exemplos foram estudadas. As simulações realizadas na primeira rede exemplo, com uma configuração teórica, apresentaram resultados semelhantes aos obtidos por outros pesquisadores utilizando a técnica dos algoritmos genéticos e compatíveis aos obtidos por outras técnicas de otimização. Para testar a eficiência do modelo proposto em projetos de redes e com critérios de dimensionamento utilizados na prática, foram realizadas simulações numa segunda rede exemplo, com configuração de uma rede existente, resultando em uma solução 19,5% menor que o custo de implantação original.

A técnica dos algoritmos genéticos permitiu obter, após um número fixo de gerações, além da solução de mínimo custo, um conjunto final de soluções que torna possível ao tomador de decisões escolher entre alternativas com similaridade de preço, considerando na análise outros critérios de avaliação.

Finalmente, embora não considerados neste trabalho, estudos podem ser desenvolvidos para incluir aspectos de confiabilidade, qualidade de água e reabilitação no projeto otimizado de redes de distribuição de água.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- _____. Boletim de Preços SANESUL - Março - 2003.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público, NBR12218. 1994.
- ALPEROVITS, A.; SHAMIR, U. - Design of optimal water distribution systems. *Water Resources Research*, Vol. 13, nº 6, p. 885-900. Dezembro 1977.
- BUCKLES, BILL P. *Genetic Algorithms*. IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, California, 1994.
- CALIMAN, R.O.; REIS, L.F.R.; SILVA, F.G.B.; PORTO, R.M.; CHAUDHRY, F.H. – Determinação dos parâmetros do modelo pressão x vazamento para um sub-setor da cidade de São Carlos, SP., Com a utilização de algoritmos genéticos. Trabalho apresentado no XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Aracaju. 2001.
- CELESTE, A.B.; SUZUKI, K.; WATANABE, M. e SANTANA, C.W.S. – Calibração automática do tank model via algoritmos genéticos. Trabalho apresentado no XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Aracaju. 2001.
- CHANCRASHEKAR, M., STEWART, K.H. – Sparsity oriented analysis of large pipe networks. *Journal of the Hydraulic Division*, Vol. 101, nº HY4, p. 341-355. 1975.
- CHEUNG, P.B. Curso de introdução aos algoritmos genéticos. Março 2002.
- DANDY, G.C.; SIMPSON, A.R.; MURPHY, L.J. - An improved genetic algorithm for pipe network optimization. *Water Resources Research*, Vol. 32, nº 2, p. 449-458. Fevereiro 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, nº HY1, p. 43-56. 1970,
- GAMBALE, S.R. - Aplicação de algoritmo genético na calibração de redes de água. Dissertação de Mestrado POLI/USP. 2000.

- GEN,M.; CHENG, R. - Genetic Algorithms and Engineering Design. New York, John Wiley & Sons, INC. 1997.
- 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, nº 2. Abril 1987
- GREFENSTETTE, J.J. - Optimization of control parameters for genetic algorithm. IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) Transactions on Systems, Man and Cybernetic, Vol.16, nº 1, p.122-128. 1986.
- GREFENSTETTE, J.J.; BAKER, J.E. – How genetic algorithms work: a critical look at implicit parallelism. The proceedings of the third international conference on genetic algorithms. Morgan Kaufmann Publishers, San Mateo, California. 1989
- ISAACS, L.T., MILLS, K. G. – Linear theory methods for pipe network analysis. Journal of the Hydraulic Division, V. 106, n. HY12, p. 1191-1201. 1980
- LAM, C.F., WOLLA, M.L. – Computer analysis of water distribution systems. Part 1 – Formulation of equations. Journal of the Hydraulic Division, V. 98, n. HY2, p. 335-344. 1972.
- LANSEY, K.E. - Optimal design of water distribution systems. In MAYS, L.W. - Water distribution systems handbook. Nova York, Mcgraw-Hill/AWWA. 1999.
- LEMIEUX, P.F. – Efficient algorithm for distribution networks. Journal of the Hydraulic Division, Vol. 98, nº HY11, p. 1911-1920. 1972.
- MICHALEWICZ, Z. - Genetic Algorithm + Data Structures = Evolution Programs. 2 nd. ed., New York, Springer-Verlag. 1992.
- MOHAN, S. – Parameter estimation of nonlinear Muskingum Models using genetic algorithm. Journal of Hydraulic Engineering, Vol.123, nº 2, p. 137-142. Fevereiro 1997
- MONTESINOS, P.; GARCIA-GUZMAN, A.; AYUSO, J. L. Water distribution network optimization using a modified genetic algorithm. Water Resources Research, Vol. 35, nº 11, p. 3467-3474. Novembro 1999.
- NIELSEN, H.B. – Methods for analyzing pipe networks. Journal of the Hydraulic Engineering, Vol. 115, nº 2, p. 139-157, 1989.

- PORTO, R.M. – Hidráulica Básica. São Carlos, EESC-USP.1999
- 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, nº 6, p.317-326. Novembro/Dezembro 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 Federal de São Carlos, 1977.
- RIGHETTO, A.M. – Cálculo hidráulico de rede de distribuição de água a partir de condições transitórias: adequação e estudo de casos. São Carlos, SHS-EESC. Tese de Livre Docência – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade Federal de São Carlos, 1994.
- SAVIC, Dragan A.; WALTERS, Godfrey A. - Genetic algorithm for least-cost design of water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 123, nº 2, p. 67-77. Março/Abril 1997.
- 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.
- SIMPSON, Angus R.; DANDY, Graeme C.; MURPHY, Laurence J. - Genetic algorithms compared to other techniques for pipe optimization. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 120, nº 4, p.423-444. Julho/Agosto 1994.
- SHAMIR, U.; HOWARD, C.D.D. - Water distribution system analysis. *Journal of the hydraulic division*, Vol.94, nº HY1, p.219-234. 1968.
- SOUZA, R.S. – Aspectos computacionais da análise de redes de distribuição de água com componentes hidráulicos em regime permanente. Dissertação de Mestrado, EESC/USP. 1994
- 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.