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

REABILITAÇÃO OTIMIZADA DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA COM A UTILIZAÇÃO DE ALGORITMOS GENÉTICOS

MARILÚCIA PEREIRA SANDIM

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

Orientador: ***Prof. Dr. Robert Schiaveto de Souza***

CAMPO GRANDE, NOVEMBRO DE 2007.

APRESENTAÇÃO

Esta dissertação foi desenvolvida no Programa de Pós-graduação em Tecnologias Ambientais do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, sob a orientação do Prof. Dr. Robert Schiaveto de Souza.

O desenvolvimento e conclusão deste trabalho somente foram possíveis graças àqueles que aqui destaco:

À Deus, pelo privilégio que me concedes-Te de elaborar esta dissertação;

Ao meu esposo, Jorge Martins, pela compreensão e apoio;

Ao Prof. Dr. Robert Schiaveto de Souza, que como orientador, colaborou enormemente no aumento de meus conhecimentos na área de tecnologias ambientais, ensinando e incentivando o desenvolvimento de cada etapa necessária para a formatação desta dissertação;

A Águas Guariroba S.A., empresa do qual integro o quadro de colaboradores, que permitiu a utilização de informações internas sobre sistemas de abastecimento de água, fundamentais para o desenvolvimento dos trabalhos.

Ao colega de trabalho, Vagner Vinciguera, que colaborou na obtenção de dados aplicados nesta pesquisa.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS iii

LISTA DE TABELAS iv

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS v

RESUMO viii

ABSTRACT x

1. INTRODUÇÃO 1

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 3

2.1 Simulação hidráulica 3

2.2 Reabilitação otimizada 9

2.3 Algoritmos genéticos - aplicações 17

3. OBJETIVOS 23

4. METODOLOGIA 24

4.1 Modelo de simulação hidráulica 24

4.2 Modelo de reabilitação otimizada 29

4.3 Taxa de falhas/ruptura 33

4.4 Técnica dos algoritmos genéticos 33

4.5 Linguagem de programação e equipamento computacional 39

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES 40

5.1 Rede Exemplo 40

5.2 Taxa de Falhas/ Ruptura 42

5.3 Simulação do modelo proposto de viabilidade otimizada para a rede exemplo 69

6. CONCLUSÕES 73

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 74

8. ANEXOS 79

8.1 Anexo A – *Unit 1* 79

8.2 Anexo B – *Unit 2* 103

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 4.1. - Interpretação gráfica do método de Newton-Raphson 25

FIGURA 5.1 – Rede exemplo. 40

FIGURA 5.2 – Área I - Vila Carvalho 45

FIGURA 5.3 – Área II - Jardim Imá 58

FIGURA 5.4 – Taxas de rupturas em função do diâmetro, para três sistemas distintos. 67

FIGURA 5.5 – Taxas de rupturas em função da idade, para três sistemas distintos. 68

FIGURA 5.6 – Variação da função-objetivo mínima ao longo das gerações (rede exemplo). 70

LISTA DE TABELAS

TABELA 5.1 – Demanda e cota geométrica nos nós da rede exemplo. 41

TABELA 5.2 – Custos unitários de implantação por metro e diâmetro. 41

TABELA 5.3 – Parâmetros adotados na simulação hidráulica 42

TABELA 5.4 – Fatores de custos de rupturas 42

TABELA 5.5 – Número de vazamentos por trecho e por ano para a Área I 46

TABELA 5.6 – Vazamentos por ano na Área I, para os trechos com diâmetros de 50mm 47

TABELA 5.7 – Vazamentos por ano na Área I, para os trechos com diâmetros de 75mm 48

TABELA 5.8 – Vazamentos por ano na Área I, para os trechos com diâmetros de 100mm ... 48

TABELA 5.9 – Vazamentos por ano na Área I, para os trechos com diâmetros de 400mm ... 49

TABELA 5.10 – Linearização para a Área I 50

TABELA 5.11 – Número de vazamentos por trecho e por ano para a Área II 59

TABELA 5.12 – Vazamentos por ano na Área II, para os trechos com diâmetros de 50mm.. 60

TABELA 5.13 – Vazamentos por ano na Área II, para os trechos com diâmetros de 75mm.. 60

TABELA 5.14 – Vazamentos por ano na Área II, para os trechos com diâmetros de 100mm 61

TABELA 5.15 – Linearização para a Área II 62

TABELA 5.16 – Conjunto de soluções otimizadas obtidas para a rede exemplo. 71

TABELA 5.17 – Altura manométrica nos nós. 72

TABELA 5.18 – Vazão nos trechos. 72

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

A	matriz de incidência dos nós interiores
a	coeficiente da fórmula de Hazen-Williams ou coeficiente de multiplicação da vazão
a.a.	ao ano
AG's	algoritmos genéticos
age	idade
EP's	Programas Evolucionários
b	coeficiente da fórmula de Hazen-Williams
C	coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams
d	coeficiente de resistência ou derivada
D	diâmetro ou matriz diagonal
E	estratégia de seleção elitista
exp	exponencial
f	função
G	número de gerações
h	energia no nó
hr	vetor de energia dos reservatórios
H	perda de carga
Hman	altura manométrica
J	perda de carga unitária
K	constante de perda de carga
k	parâmetro
L	comprimento da tubulação
m	número de trechos

máx máximo

N tamanho da população

n número dos nós ou número das 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

r taxa de juros

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

y taxa de ruptura

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

SANDIM, M.P. (2007). *Reabilitação otimizada de redes de distribuição de água com a utilização de algoritmos genéticos. Campo Grande, 2007. 119p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Brasil.*

O principal objetivo dos sistemas de distribuição de água é atender aos usuários com vazão e pressão conforme padrões de qualidade exigidos pelos órgãos governamentais. Em busca de técnicas mais eficazes para obtenção de soluções confiáveis para a reabilitação de rede de distribuição de água, utilizando menor tempo de máquina, encontrou-se a técnica dos Algoritmos Genéticos. A teoria que deu origem aos Algoritmos Genéticos surgiu na década de 70, e vem sendo ampliada e atualizada a cada ano. A analogia com a natureza é estabelecida a partir da criação por computador de um conjunto de soluções ao qual se dá o nome de população. Cada indivíduo desta população constitui uma possível solução para o problema. Este trabalho apresenta um modelo hidráulico de otimização para a reabilitação de mínimo custo de redes de distribuição de água, utilizando a técnica dos algoritmos genéticos. Para obtenção de resultados mais confiáveis, foram desenvolvidas duas equações de taxas de falhas para duas redes reais de distribuição de água; uma dessas equações foi utilizada neste trabalho. O modelo proposto foi aplicado em uma rede exemplo de um sistema de distribuição de água. A eficiência e agilidade do modelo proposto, e o comportamento e convergência do conjunto final de soluções obtidas com a técnica dos algoritmos genéticos, foram satisfatórios demonstrando ser uma ferramenta apropriada para aplicação na reabilitação de redes de distribuição de água.

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

ABSTRACT

SANDIM, M.P. (2007). *Optimized whitewashing of nets of water distribution with the use of genetic algorithms*. . *Campo Grande, 2007. 119p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Brasil (in Portuguese).*

The main objective of the systems of water distribution is to take care of to the users with outflow and in agreement pressure standards of quality demanded by the governmental bodies. In search of more efficient techniques for attainment of trustworthy solutions for the whitewashing of net of water distribution, using lesser time of machine, met it technique of the Genetic Algorithms. The theory that gave origin to the Genetic Algorithms appeared in the decade of 70, and comes being extended and brought up to date to each year. The analogy with the nature is established from the creation for computer of a set of solutions to which if it gives the population name. Each individual of this population constitutes a possible solution for the problem. This work presents a hydraulical model of optimization for the whitewashing of minimum cost of nets of water distribution, using the technique of the genetic algorithms. For attainment of more trustworthy results, two equations of failure rates for two real nets of water distribution had been developed; one of these equations was used in this work. The considered model was applied in a net example of a system of water distribution. The efficiency and agility of the considered model, and the behavior and convergence of the final set of solutions gotten with the technique of the genetic algorithms, had been satisfactory demonstrating to be an appropriate tool for application in the whitewashing of nets of water distribution.

Word-key: genetic algorithms, nets of water distribution, whitewashing

1. INTRODUÇÃO

A rede de distribuição de água é, em geral, o componente mais caro de um sistema de fornecimento de água, e o mais afetado pelas tensões ambientais e operacionais. Projetadas para operar por um período pré-definido, algumas redes apresentam sobrevidas acima de 50 anos, alem do que, com o passar dos anos, sua capacidade de transporte reduz e as demandas previstas geralmente aumentam. Incrustações e corrosão interna são as principais causas da redução da capacidade de transporte de um sistema de distribuição de água. Rompimentos causados pela deterioração de tubos e desgastes em componentes hidráulicos passam a ser mais freqüentes, resultando em perdas e eventuais contaminações através das tubulações fissuradas ou rompidas.

Além do desempenho insatisfatório, há impactos econômicos diretos em um sistema com falhas. A reabilitação e substituição de sistemas existentes para atender os usuários atuais e futuros tornaram-se problemas econômicos sérios, com aumento do investimento necessário para restabelecer e manter um nível adequado de serviço.

Onde as tubulações estão estruturalmente sadias, é usual limpar e revestir; o custo é menor do que substituir; isso em locais onde a paralisação por vários dias é possível. Se o sistema pode manter a pressão adequada apesar da perda de carga adicional, a capacidade hidráulica da rede também pode ser aumentada usando bombas maiores ou tanques maiores, com incremento associado ao custo de energia. Outras alternativas seriam: a substituição, duplicação, ou reparos de alguns trechos; nestes casos, o problema seria decidir quais componentes deveriam ser alterados ou melhorados (e como melhorá-los) para maximizar os recursos financeiros.

Como é impossível e desnecessário reabilitar e/ou substituir todas as tubulações de um sistema de distribuição de água; metodologias computacionais são necessárias para auxiliar nas decisões, com garantias de resultados satisfatórios e custos mínimos.

O desafio é determinar o plano de melhor custo-benefício em termos de: materiais e equipamentos para reabilitar uma rede, alternativas de reabilitação e horizonte de planejamento, sujeitos as condições de exigências de serviço (confiabilidade de sistema, pressão de serviço, etc.).

A possibilidade de escolher o melhor cenário possível para realizar melhorias na rede, com um orçamento limitado, é apresentada como um grande problema para o qual técnicas

convencionais de otimização talvez não sejam suficientes. A técnica de otimização de sistemas com a utilização de algoritmos genéticos embora esteja em desenvolvimento há mais de vinte anos, é relativamente nova quanto a sua aplicação prática.

A proposta desta pesquisa é implementar um modelo de reabilitação otimizada que identifique a alternativa de menor custo para implantação de intervenções necessárias, mantendo as condições exigidas de vazão e pressão, para uma rede fictícia; utilizando a técnica dos algoritmos genéticos. Dentro do conjunto de soluções a serem apresentadas, o tomador de decisões poderá selecionar outras alternativas com similaridade de preço, de acordo com a necessidade do momento. Serão consideradas três funções de custos: custo de substituição da tubulação, custo de reparo de rede nova e custo de reparo de rede velha. A metodologia considera as decisões a respeito de cada tubo: substituir, revisar, ou deixar como está.

Serão obtidas ainda, taxas de ruptura para duas redes reais do sistema de abastecimento de água de Campo Grande/ MS.

A seguir, são apresentadas referências bibliográficas para simulação hidráulica e reabilitação otimizada de redes de distribuição de água, bem como as aplicações da técnica dos algoritmos genéticos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O desenvolvimento de técnicas de otimização para reabilitação 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 reabilitação otimizada de sistemas de distribuição de água envolve a definição destas variáveis de decisão. Estas variáveis podem ser as demandas de vazão e pressão, 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 reabilitação otimizada 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 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 de 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. Podem ser inseridos reservatórios em qualquer nó e bombas, turbinas, válvulas e outros componentes hidráulicos em cada trecho onde a relação energia-vazão é conhecida.

SHAMIR e HOWARD (1968) descrevem 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.

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 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, e permite a determinação dos diâmetros econômicos por um processo de relaxação através de um fator de correção.

Finalmente, entre os métodos de ajustes simples tem-se o método da proporcionalidade das vazões que foi descrito em 1960 por Mc Pherson (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 as estimativas iniciais são razoáveis.

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 incluir outros componentes hidráulicos, como bombas, válvulas, etc.

SHAMIR e HOWARD (1968) apresentaram um trabalho que explorava combinações de incógnitas como 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 em que as incógnitas incluíam demandas nos nós e resistências nos componentes. A convergência do esquema iterativo não pôde ser garantida quando funções dos componentes na rede não tinham derivada contínua.

Estabelecer um critério de convergência do método de Newton-Raphson para todos os casos, parecia ser impossível. O método converge para uma 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 usava os fatores de correção levando em conta a minimização da função em cada direção. Uma combinação do método de Newton modificado e um algoritmo especial, de eliminação gaussiana para matrizes de banda simétrica, permitiram 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 seria formulado de tal maneira que o número de avaliações ou operações necessárias a cada iteração ficaria 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 é 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 *apud* WOOD E CHARLES (1972). O cálculo simultâneo das energias foi proposto por Marlon, Hardison, Jacobson e Biggs em 1968.

Como o número de tubos em uma rede é maior que o número de nós, 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 também foram sugeridas por WOOD e CHARLES (1972). Eles afirmaram 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 m^3/s a 1,0 m^3/s foram usados e não tiveram efeitos significativos na obtenção da solução. Alternativamente, valores iniciais baseados na mesma velocidade em cada tubo podem ser usados. 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.

2.2 Reabilitação otimizada

Normalmente a demanda de água cresce durante os anos, devido a expansão da população, crescimento industrial e comercial, e aumento do poder aquisitivo. A rede de distribuição de água, por sua vez, piora sua condição física com o passar dos anos, quando surgem vazamentos, rompimento e corrosões. Tal deterioração conduz a perda de água, perdas de pressão, aumento dos custos de bombeamento, problemas de qualidade de água e aumento com gastos de manutenção de emergência. As reclamações dos consumidores também crescem continuamente.

Então, periodicamente redes requerem reabilitação na forma de reforço, expansão e recondicionamento para manter o nível de serviço requerido pelo consumidor. Porém, a reabilitação de um sistema de distribuição de água existente é uma tarefa complexa e necessita de uma estratégia sistemática e investimentos importantes. A avaliação das alternativas de projeto é tarefa onde os modelos de otimização podem desempenhar um papel importante, particularmente quando os recursos financeiros são limitados e os problemas são grandes.

A melhoria no desempenho da distribuição de água pode ser alcançada substituindo, reabilitando, duplicando, ou consertando alguns trechos das redes, ou outros componentes (bombas, tanques, etc.) do sistema, e também implantando componentes completamente novos. É provável que os recursos financeiros sejam suficientes apenas para reabilitar um pequeno número de componentes na rede num determinado período. O problema é escolher quais componentes deveriam ser reabilitados (e como reabilitá-los) para maximizar os benefícios (KLEINER et al, 1998a).

Na hora de maximizar um benefício sujeito a um custo limitado, um critério único de otimização buscará a melhor solução, negligenciando outras soluções mais baratas que rendem menos benefícios e que poderiam ser preferidas normalmente na busca de menores custos.

KIM e MAYS (1990) apresentaram um desenvolvimento matemático de um modelo de otimização restrito utilizando programação não linear inteira, para obtenção do custo mínimo de reabilitação de componentes de um sistema de distribuição de água. Particular atenção foi dada para o tratamento dos fatores de rugosidade e condições de carga incluindo a demanda aleatória e a pressão requerida. As vantagens do modelo proposto incluíam: tempo ótimo de reabilitação de componentes dos sistemas de distribuição de água; interface entre um programa linear inteiro, um programa não linear, e um simulador hidráulico numa estrutura de otimização; incertezas de algumas variáveis; vários tipos de funções custos; e múltiplas condições de cargas. Basicamente, o problema foi determinar os períodos entre as seguintes decisões: aumento da capacidade de bombeamento, substituição e reabilitação de tubulações,. O objetivo global do modelo foi selecionar os tubos a serem reabilitados em um sistema de distribuição de água existente para cada período de planejamento e determinar o que deveria ser aumentado na capacidade de bombeando de forma que cargas múltiplas fossem satisfeitas com custo total mínimo.

Um algoritmo externo foi adotado para decompor o problema de programação não linear inteira em um problema de programação linear inteira e um subproblema de programação não linear. O subproblema de programação não linear foi resolvido como um problema de controle ótimo. O método gradiente foi selecionado para resolver o subproblema não linear. Um modelo de simulação hidráulica foi combinado para resolver implicitamente as condições hidráulicas não lineares (KIM e MAYS, 1990).

QUIMPO e SHAMSI (1991) desenvolveram uma estratégia para priorizar decisões para a manutenção de um sistema de distribuição de água. Usando confiabilidade de redes e componentes baseados nos conceitos de conectividade variável com o tempo, foram calculadas as probabilidades de fornecimento de água nos pontos de demanda. Os componentes específicos que deveriam ser reabilitados foram determinados usando um critério de importância do componente na confiabilidade de sistema.

QUIMPO e SHAMSI (1991) afirmaram ainda que um relatório preparado por um Comitê de Tarefa da Divisão Hidráulica da ASCE (Mays, 1989) forneceu uma revisão dos mais recentes desenvolvimentos, da época, no uso de técnicas de confiabilidade para análise de água de sistemas de distribuição. *Apud* Damelin et al. propuseram uso de técnicas de confiabilidade para o projeto de sistemas de distribuição. Eles mediram a confiabilidade no atendimento da demanda, que é afetada pelas falhas aleatórias do sistema de distribuição.

WALSKI (1982) apresentou uma metodologia para determinar a economia na reabilitação de tubos baseando-se no consumo de energia e na capacidade de bombeamento. O método foi apropriado para linhas alimentadas diretamente por bombas e não linhas de distribuição de pequenos diâmetros de vazões instantâneas alimentadas por tanques de armazenamento. A decisão de reabilitar um tubo foi baseada em muitas variáveis incluindo: o custo para reabilitar o tubo, o preço de energia, o custo com incremento na capacidade de bombeamento, a vazão média e de pico no tubo, o diâmetro nominal, a taxa de juros, o ano no qual a estação de bombeamento foi melhorada e o coeficiente C de Hazen-Williams antes e depois da reabilitação. Neste estudo, WALSKI (1982) considerou o efeito do fator C nas curvas de energia dos sistemas de bombeamento para a cidade de Savannah, Geórgia. Seus estudos mostraram que, com recondicionamento, a mesma vazão pode ser bombeada sem usar bombas *booster*, requeridas para o caso de não haver recondicionamento.

Segundo WALSKI (1982), os tubos poderiam ser restaurados com fatores C de 118-143 para fatores C iniciais de valores de 38-129.

Como na maioria dos sistemas, autoridades têm que gerenciar/operar redes antigas que apresentam graus variados de deterioração; algumas das quais no final de sua vida útil; e a verba anual disponibilizada para reabilitação do sistema de distribuição corresponde a uma pequena parcela do custo para substituição de toda a rede; é importante que os fundos disponíveis sejam usados da melhor maneira possível.

Para KIM e MAYS (1994), basicamente, o problema é determinar o que fazer dentre as decisões seguintes: substituir; reabilitar; ou não fazer nada. Os custos associados são avaliados para cada decisão resultando no custo global mínimo associado às decisões. O custo global inclui a substituição (f1), a reabilitação (f2), o reparo (f3), e a energia necessária (f4); alguns dos quais são expressos através de funções não lineares. As condições principais do modelo são: a conservação de massa e conservação de energia, as condições de demanda, as condições de pressão exigida, as condições características das bombas, e as condições de não negatividade. Muitas destas condições são expressas em funções não lineares. A decisão de reabilitar um tubo ou não, é representada por uma variável inteira zero ou um. Basicamente, são requeridas duas variáveis inteiras para cada tubo no sistema, uma para substituição e outra para reabilitação, respectivamente. A formulação proposta é um problema de programação não linear inteira. Embora a otimização global não possa ser garantida, os resultados das aplicações demonstraram a capacidade do modelo em achar ótimas soluções.

Um modelo para determinar uma solução de custo mínimo para reabilitação e substituição de componentes de um sistema de distribuição de água foi apresentado por Woodburn et al. em 1987 e depois por Lansey et al. em 1992. O modelo desenvolveu um aperfeiçoamento da técnica (reabilitação ou substituição de parte do sistema) para satisfazer as demandas e pressões exigidas, minimizando custos. Os custos considerados foram: custos com substituição, custos com revestimento, custos com reparos e custos de energia. Foram consideradas quatro variáveis contínuas associadas a cada trecho do modelo apresentado, mas apenas três delas eram variáveis de decisão independentes, sendo elas: o comprimento e o diâmetro do tubo a ser substituído em cada trecho, e a duração do tubo velho que foi revestido em cada trecho. A quarta variável, a duração restante do tubo velho que permaneceu inalterado em cada trecho, era uma função das outras três variáveis. Os modelos apresentados são modelos que tratam de reabilitação de rede de água usando um esquema de pesquisa de operações. Estes modelos permitem substituição de parte da rede e reabilitação de parte de um tubo. O modelo previu usos de variáveis integrais (binárias) para representar as decisões de substituição e reabilitação em vez de usar o tempo de vida da rede como variável de decisão (KIM e MAYS, 1994).

Shamir e Howard, apud KIM e MAYS (1994), desenvolveram um procedimento para programar as substituições de tubos baseadas no número previsto de vazamento em tubos existentes; número previsto de vazamentos em um tubo novo; custo para consertar um vazamento; custo para substituir o tubo existente; e a taxa de desconto. Walski e Pelliccia

em1982 desenvolveram um critério para substituir tubos considerando a taxa de vazamento atual e a taxa de vazamento crítico. Eles concluíram que Shamir e Howard em 1979 formularam uma aproximação útil para decidir se grupos inteiros de tubos deveriam ser substituídos, e que o critério é mais útil analisando a substituição econômica de tubo por tubo Walski em 1982 e 1985 considerou a substituição econômica em uma reabilitação para um sistema de água. O critério desenvolvido pode ser usado para determinar se é econômico limpar e revestir um tubo, considerando duas hipóteses: o fluxo não muda significativamente pela reabilitação do tubo, ou o sistema passa a ter uma capacidade significativa de mudança na vazão. O critério de decisão depende do custo para reabilitação e do custo para bombeamento.

Segundo KIM e MAYS (1994) O'Day em 1982 propôs uma avaliação das causas de rompimentos e vazamentos das redes principais e descreveu vários estudos nos quais foram analisadas fraturas nas redes principais em termos de idade, localização geográfica, e diâmetro. Ele concluiu que a manutenção efetiva da rede principal, reabilitação, e decisões de substituição devem estar baseadas em informações realistas e atuais sobre as condições físicas do sistema de distribuição de água, e não simplesmente na idade dos tubos. Sullivan em 1982 defendeu programas em Boston para a reabilitação, manutenção contínua, e substituição do sistema de distribuição de água daquela cidade. Ele declarou que a principal programação para substituir ou reabilitar é baseada no histórico de manutenção, histórico de idade, ensaios de pressão nos nós, e testes de vazões máximas. Ao determinar se um tubo deveria ser revestido com cimento ou substituído, muitos fatores deveriam ser considerados inclusive a capacidade limite, histórico de manutenção, problema de acessibilidade no futuro, e uma mudança no uso; porém, a maioria desses fatores não pode ser considerada em um modelo matemático.

SIMPSON el al (1994), apresentaram uma metodologia para otimização das tubulações da rede usando algoritmos genéticos. Foram codificadas variáveis de decisão desconhecidas e investigado um algoritmo genético com operador triplo incluindo: seleção, recombinação, e mutação. Os resultados foram comparados às técnicas de enumeração completa e programação não linear. O trabalho aplicou algoritmos genéticos para o problema e comparou seu desempenho com as técnicas de enumeração completa e programação não linear. Os resultados demonstraram que a técnica dos algoritmos genéticos é muito efetiva fornecendo soluções ótimas para uma rede de estudo em relação a algumas avaliações.

SCHNEITER et al (1996) descreveram o uso da técnica de confiabilidade para redes com mais de um nó de demanda para determinar distribuições de probabilidade de fluxo nos tubos e demandas nodais fixas. Segundo estes autores, o procedimento de solução gera um conjunto de desigualdades que representa uma condição necessária e suficiente para um fluxo possível. Propuseram então, uma solução para avaliar a probabilidade de que todas as desigualdades fossem satisfeitas pela: eliminação de desigualdades redundantes e determinação de limites para a probabilidade de fluxos possíveis. O poder de confiança, definido como a probabilidade que uma rede tem de conhecer a demanda de todos os nós e sua capacidade de transporte, foi investigado neste trabalho para ajudar na manutenção e decisão de reabilitação de redes de distribuição de água. O método é útil para fornecer opções para reabilitação de rede.

SCHARTZEN et al (1998) apresentaram um método baseado no uso de programas evolucionários para determinar a reabilitação ótima projetada para sistemas de abastecimento de água, em uma rede existente do Reino Unido. Um método baseado na técnica dos algoritmos genéticos foi desenvolvido para resolver o problema de aperfeiçoamento de custos de reabilitação de um sistema de abastecimento de água. O método foi implementado e demonstrou ser capaz de determinar um esquema de reabilitação ótimo ou quase ótimo. A técnica dos algoritmos genéticos produziu dois projetos que satisfizeram as exigências de serviço especificadas, conduzindo a uma economia de 11% quando comparado às soluções utilizando técnicas convencionais de projetos. Um modelo hidráulico existente foi usado para avaliar o estado atual e o desempenho do sistema. Além do modelo, a informação básica usada pela técnica dos algoritmos genéticos incluiu as opções de reabilitação permissíveis para cada tamanho de tubo e a exigência de pressão mínima no sistema. Concluíram então, que uma vantagem importante de usar AG é que uma vez que o algoritmo de otimização esteja desenvolvido, pode ser ajustado facilmente para as mudanças nos componentes dos sistemas ou exigências de serviço, desde que as rotinas de otimização sejam independentes do sistema modelado.

KLEINER et al (1998 a) propuseram uma metodologia em que a capacidade hidráulica e a economia da rede de distribuição de água foram analisadas simultaneamente sobre um período pré-definido, considerando a deterioração ao longo do tempo explicitamente. A metodologia proposta distingue dois tipos de medidas de reabilitação: medidas que melhoram a integridade estrutural e a capacidade hidráulica do tubo e medidas que melhoram só a

capacidade hidráulica do tubo. Este procedimento de múltiplos estágios identifica uma estratégia ótima de reabilitação para a rede de distribuição de água. .

KLEINER et al (1998 b) apresentaram, ainda, uma metodologia para implementar a aproximação acima descrita em um sistema de apoio de decisão que facilita a identificação de uma estratégia ótima de reabilitação. A metodologia proposta usou uma programação dinâmica combinada com programação parcial e enumeração implícita planejada para selecionar, para cada tubo em uma rede existente, a alternativa de reabilitação e o tempo de sua implementação para minimizar o custo do investimento de reabilitação e o custo de toda a manutenção em um horizonte de tempo pré-definido e sujeito a restrições. Concluíram que as variáveis de decisão são: o tipo de alternativa de reabilitação a ser implementada e o tempo de sua implementação, para cada tubo da rede de distribuição. As condições são: conservação de massa, conservação de energia, e pressão mínima no nó de demanda. As vantagens desta metodologia são: capacidade em considerar explicitamente a deterioração estrutural e da capacidade hidráulica dos tubos, capacidade em comparar fluxos de custo projetados, habilidade para considerar a economia e desempenho da rede inteira, e habilidade, considerando constantemente o período inteiro de análise, para não só determinar cada ação de reabilitação pelo estado atual do sistema, mas também pelas ações de reabilitação futuras.

WALTERS et al (1999) descreveram que a técnica dos algoritmos genéticos recentemente introduzido para otimização da reabilitação de rede de distribuição de água, é ampliada para não só incluir decisões de reabilitação de tubo, mas também às instalações de bombeando e armazenamento com abastecimentos variáveis. Apresentaram um modelo para resolver problemas melhorando o projeto da rede de distribuição de água de uma forma ótima, inclusive com a adição de tubos novos, recondicionamento e substituição de tubos existentes, seccionamento e classificação segundo o tamanho dos reservatórios novos e fornecimento de bombas novas. O método foi aplicado para sistemas de vazão por gravidade, e estendido para incluir o armazenamento e bombeando no processo de decisão. O problema foi resolvido como um problema de múltiplos objetivos, com custo mínimo e benefício máximo aos objetivos gêmeos. Foram testadas duas metodologias para modelar os elementos de armazenamento em uma formulação de múltiplos objetivos. (As duas aplicações diferem do modo como determinam os níveis operacionais para reservatórios novos).

HALHAL et al (1999) apresentou uma metodologia para um projeto ótimo e programação de investimento para a reabilitação de redes de distribuição de água. Baseando-se na técnica de programação evolutiva, a metodologia foi aplicada para uma rede pequena de

quinze tubulações. A técnica dos algoritmos genéticos foi aplicada para encontrar o melhor modo para investir um capital limitado para reabilitação do sistema de distribuição de água. As características físicas, o desempenho hidráulico, a demanda de consumo, e a topografia da rede, podem mudar completamente durante o período programado. O método define a melhor opção de reabilitação para ser empreendido para cada tubo, em cada ano, para o período planejado, em ordem, para maximizar o benefício produzido enquanto mantém-se o preço presente de investimentos requerido no menor período ou iguala ao orçamento disponível.

DANDY e ENGELHARDT (2001) apresentaram o uso da técnica dos algoritmos genéticos para determinar a melhor época para substituir algumas redes de distribuição. A meta foi minimizar o investimento inicial e os gastos com manutenção e reparos. Um estudo de caso realizado em Adelaide, Austrália, mostrou que o algoritmo genético pode ser uma ferramenta poderosa para ajudar no planejamento da reabilitação da tubulação de água.

KLEINER et al (2001) descreveram uma avaliação sobre um trabalho previamente escrito de uma aproximação pormenorizada para um importante problema de uma reabilitação planejada de uma rede de distribuição de água, com ênfase particular nos aspectos de computação envolvidos. Uma programação dinâmica aproximada foi usada para procurar o vasto espaço de soluções combinadas que estão presentes no problema. Um programa de computador foi desenvolvido para implementar estes conceitos. Um *software* de análise de redes hidráulicas foi usado no programa para assegurar a confiabilidade das condições hidráulicas durante a procura de uma solução. O resultado foi uma estratégia que identifica, para cada tubo da rede, a melhor alternativa de reabilitação e seu tempo ótimo de implementação. A contribuição deste método está na sua capacidade em identificar uma ótima estratégia de reabilitação, considerando a deterioração estrutural e a capacidade hidráulica da rede. Um procedimento de múltiplos estágios foi desenvolvido através da programação dinâmica. Este procedimento de múltiplos estágios pôde identificar uma estratégia ótima de reabilitação para a rede de distribuição de água.

KLEINER et al (2001) descreveram uma otimização de múltiplos objetivos usando custos e benefícios. O algoritmo demonstrou ser uma ferramenta efetiva para o problema de otimização atual, sendo particularmente apropriado para uma aproximação de múltiplos objetivos e para problemas que envolvem a seleção de pequenos cenários de várias variáveis numéricas. Descreveram que tal metodologia permite uma escolha sensata de solução ao longo da qual há uma curva entre benefícios e custos, de acordo com parte do fundo disponibilizado e os benefícios resultantes para a reabilitação da rede. Demonstraram também

a efetividade de combinar uma técnica que descrevesse uma estrutura aleatória de algoritmos genéticos como otimizador de múltiplos objetivos para um modelo capaz de manipular problemas reais de melhorias de rede, em particular a seleção de soluções que envolvem os sistemas. O algoritmo foi testado e comparado a sua performance com algoritmos genéticos convencionais.

WU e SIMPSON (2001) aplicaram a técnica dos algoritmos genéticos para o projeto e a reabilitação otimizada de um sistema de distribuição de água, utilizando uma formulação detalhada para aperfeiçoar todos os componentes do sistema e uma formulação de algoritmo genético unificada. O modelo de otimização foi estendido para levar em conta todos os elementos do sistema inclusive tubos, tanques, bombas, e válvulas. A linha e o esquema de representação da solução e a formulação de aptidão definiram dois passos chaves para aplicar os algoritmos genéticos para resolver o problema de otimização da rede. O modelo proposto demonstrou ser simples e eficiente para resolver um problema de otimização de redes de água, embora dificuldades fossem observadas para procurar incremento de soluções ótimas ou sub-ótimas com o aumento das dimensões do problema.

CHEUNG et al (2003) apresentaram um estudo comparativo de dois métodos evolutivos de múltiplos objetivos, isto é, algoritmo genético com múltiplos objetivos e algoritmo evolutivo pela força Pareto. As análises foram administradas em uma rede hipotética simples para minimizar os custos e as exigências de pressão mínima, tratadas como um problema de duplo objetivo. Foi realizada uma análise de sensibilidade do número de gerações com respeito às soluções finais definidas em termos de frentes de Pareto.

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 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 se dá 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 codificados 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 são potencializadas 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 e KUO, 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.

Um dos primeiros trabalhos aplicando o método à otimização de tubulações foi proposto por 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, ao invés de utilizar parâmetros, operou com a codificação dos mesmos e comprovou a independência do método, evitando enganos e tendências pré-existentes. Trabalhando a partir de uma população de pontos, o método 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) apresentaram uma 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 enumeração completa de soluções pode apenas ser usada em redes com poucos tubos; por exemplo, para uma rede de 20 trechos e um conjunto de 10 diâmetros discretos, o espaço total de soluções é de 10^{20} diferentes combinações. Mesmo que 1.000.000 de combinações possam ser validadas por segundo, mais de 3.000.000 de anos de processamento seriam necessários para a completa análise. A programação não linear é uma técnica confiável quando aplicada a uma rede pequena; para a conversão da solução contínua erros devem ser considerados no início do processo. Este método gera apenas uma solução.

Os AG's geram uma classe completa de alternativas de soluções próximas ao ponto ótimo. Dentre essas alternativas podem aparecer soluções superiores à ótima, que serão descartadas quando aferidos todos os parâmetros adotados, como confiabilidade, critérios de qualidade da água e operação da rede. Este é o maior benefício do método dos algoritmos genéticos, ou seja, proporcionar um aperfeiçoamento na busca de soluções ótimas (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, apresentado 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 a 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 de 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 à 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 deu 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, buscando obter a máxima redução nas perdas numa determinada situação de demanda e nível de reservatório.

GAMBALE (2000) apresentou na 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 na 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 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 daquela 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 do *Modelo 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

Esta pesquisa tem como objetivos desenvolver um modelo para obtenção de alternativas para uma reabilitação otimizada de redes de distribuição de água, utilizando técnicas dos algoritmos genéticos, e obter a taxa de ruptura para duas redes reais, aplicando uma delas no modelo.

4. METODOLOGIA

Todo sistema de abastecimento de água está exposto às interferências ambientais e de origem humana, que podem prejudicar a distribuição e acelerar a deterioração. Uma reabilitação planejada é necessária para auxiliar nas decisões sobre as ações necessárias para restabelecimento do sistema.

Esta pesquisa apresenta a aplicação de algoritmos genéticos (AG's) para a reabilitação de redes de água. Para a obtenção de resultados satisfatórios, é necessário que os dados alimentados no programa sejam reais ou o mais próximos dele; caso contrário os resultados poderão estar comprometidos.

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 vem sendo largamente utilizadas.

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 considerando:

- 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 que os cálculos subseqüentes satisfaçam o critério de precisão.

O método iterativo de Newton-Raphson, representado geometricamente na figura 4.1, foi usado para resolver problemas de sistemas de distribuição de água. A técnica baseia-se em achar um novo conjunto de aperfeiçoamentos ou correções para os valores das incógnitas em cada iteração. Os aperfeiçoamentos são calculados no termo de primeira ordem de uma expansão em série de Taylor, sobre o argumento atual da solução.

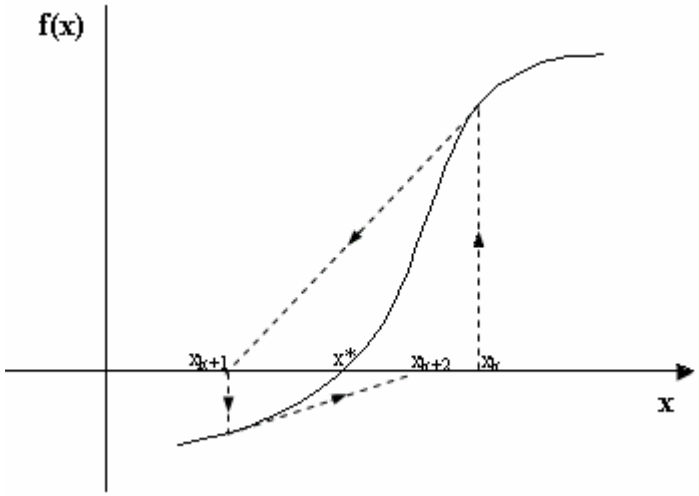

FIGURA 4.1. - Interpretação gráfica do método de Newton-Raphson .

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Formulação hidráulica

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

Considere-se um movimento permanente de água 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 $Q_1,...,Q_n$.
- energia nos reservatórios $h_{n+1},...,h_{n+r}$.

As grandezas desconhecidas são:

- energia nos nós interiores $h_1,...,h_n$.
- vazões nas canalizações $q_1,...,q_m$

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:

$$\sum_{i=1}^{m} a_{ij} q_i = Q_j \qquad j = 1,....n \tag{4.5}$$

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:

$$d_i q_i = H_i \qquad i = 1,...m \tag{4.6}$$

onde $H_i = hj_{i2} - hj_{i1}$; hj_{i1} e hj_{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 :

$$d_i = K_i |q_i|^{\alpha-1} \tag{4.7}$$

$$d_i = K_i^{\beta} |H_i|^{1-\beta} \tag{4.8}$$

onde $\beta = 1/\alpha$; K_i é o coeficiente de resistência do tubo (dependendo do comprimento, diâmetro, material e tipo de 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:

$$Q = [Q_1, ..., Q_n]^t \tag{4.9}$$

$$h_r = [h_{n+1}, ..., h_{n+r}]^t \tag{4.10}$$

$$x = \begin{bmatrix} q \\ h \end{bmatrix} \tag{4.11}$$

$$q = [q_1, ..., q_m]^t \tag{4.12}$$

$$h = [h_1, ..., h_n]^t \tag{4.13}$$

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 $\overline{A}$ de ordem $m \times (n+r)$ composta pelas matrizes A e A_r. Da equação da energia:

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

onde:

$$H = [H_1, ..., H_m]^t \tag{4.15}$$

Da teoria dos grafos, que são uma representação gráfica das relações existentes entre elementos da rede, temos:

$$H = -Ah - A_r h_r \tag{4.16}$$

Da equação (4.6):

$$Dq + Ah = -A_r h_r \tag{4.17}$$

onde:

$$D = diag[d_1,...,d_m] \tag{4.18}$$

$D = D_x$ é expresso em termos de q ou em termos de H.

Da equação (4.5):

$$A^t q = Q \tag{4.19}$$

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

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

onde $D(x) = diag[d_1(x),...,d_m(x)]$.

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:

$$A^t D^{-1} Ah + A^t D^{-1} A_r h_r = -Q \tag{4.21}$$

onde $D^{-1} = diag[1/d_1(h),...,1/d_m(h)]$.

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 possível mostrar que o método da teoria linear e o de Newton-Raphson podem ser expressos numa forma comum:

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

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

Algoritmo - formulação em termos das energias

A formulação original proposta por NIELSEN (1989) é:

$$h_{k+1} = h_k - \gamma[A^t D_k^{-1} A]^{-1}[Q + A^t D_k^{-1}(Ah_k + A_r h_r)] \tag{4.23}$$

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

$$h_{k+1} - h_k = -\gamma[A^t D_k^{-1} A]^{-1}[Q + A^t D_k^{-1}(Ah_k + A_r h_r)] = h_{k,k+1} \tag{4.24}$$

Rearranjando a matriz Jacobiana obtemos um sistema de equações lineares:

$$[A^t D_k^{-1} A]h_{k,k+1} = -\gamma[Q + A^t D_k^{-1}(Ah_k + A_r h_r)] \tag{4.25}$$

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

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 simétricas (4.25), 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 Modelo de reabilitação otimizada

Antes de uma estratégia de reabilitação a ser desenvolvida, é importante a definição de uma estratégia para atendimento das exigências. Estas exigências podem ser divididas nos três critérios principais seguintes: econômico, confiabilidade, e qualidade de água. Este trabalho enfoca o primeiro deles. O critério econômico assegura que o sistema de distribuição de água

funcione eficientemente, que falhas e custos de manutenção sejam contidos, e que o investimento seja otimizado.

Os custos podem ser divididos em: principais, de manutenção, operacionais, e extraordinários. Custos principais são os custos de aquisição e implantação dos tubos. Custos de manutenção são associados aos custos de conserto e prevenção de danos no sistema. Custos operacionais incluem o custo necessário para operação do sistema, como o custo de energia usada pelas bombas. Custos extraordinários incluem todos os custos causados por rupturas de redes inclusive danos em propriedades, transtornos, e perda da normalidade.

O critério de confiança revela o desempenho do sistema em termos do serviço requerido sendo avaliado em tempo integral.

O da qualidade da água considera as mudanças que acontecem nas propriedades químicas da água distribuída, como deterioração da tubulação devido a sua idade.

Nesta pesquisa, a primeira decisão na formulação da estratégia de reabilitação é a escolha de como representar o sistema. Para o estudo de caso, a representação usada no modelo hidráulico do sistema de distribuição de água proverá meios para definir quais os tubos deverão ser consertados ou substituídos. A vantagem principal no uso de um modelo hidráulico é que reflete a distribuição de demanda ao longo do sistema e assegura que o desempenho hidráulico do sistema possa ser medido. Devido ao custo alto de revestimento de tubos, e a dificuldade de paralisar o abastecimento, esta opção não será considerada.

A análise econômica do sistema será empreendida com três modelos separados. O primeiro modelo será usado para decidir se um tubo deve ser substituído imediatamente ou não. Este modelo investiga a eficácia do AG identificando os tubos que requerem substituição. O segundo modelo amplia isto permitindo organizar a substituição durante os próximos 50 anos e inclui uma reserva nos recursos prováveis que estarão disponíveis a cada intervalo de cinco anos. O terceiro modelo inclui o diâmetro do tubo novo como uma variável de decisão.

Os custos de reparo e substituição de tubos utilizados, nesta pesquisa, foram os mesmos, uma vez que reparar eficazmente é substituir a parte danificada por tubos novos; utilizando preços por metros, podemos igualá-los.

Segundo DANDY e ENGELHARDT (2001), os custos esperados de reabilitação nas tubulações incluirão os custos de reparo para os tubos existentes (PVOB) e os custos de reparo para os tubos novos (PVNB).

Os custos de reabilitação esperados, para a rede exemplo, serão calculados para um período de 50 anos, em 10 fases de 5 anos cada. A taxa de falhas utilizada para a simulação hidráulica foi calculada para cada intervalo de 5 anos, assumindo a média deste período para os cálculos.

A equação para obtenção dos custos de reparos de tubulações existentes, ao longo de um tempo t, pode ser apresentada como:

$$PVOB_i(T_{ri}) = \sum_{t=0}^{T_n} \frac{k.BR(d_i,t).BC(d_i).BCF(LU_i).l_i}{(1+r)^{5t}} \tag{4.26}$$

onde $BR(d_i,t)$ é a taxa de falhas para um diâmetro d_i em um tempo t (rompimento/km/ano) esperado para cada tubo i; $BC(d_i)$ é o custo de rompimento; $BCF(LU_i)$ é o fator de custo do rompimento para cada tipo de ocorrência (LU_i); l_i é o comprimento do tubo (km); t é o tempo medido (0,1,2,… anos); $k = 2{,}5$ para $t = 0$ ou $t = T_{ri}$, caso contrário $k = 5$; e r é a taxa de juros.

A equação para obtenção dos custos de reparos de tubulações novas, de diâmetro d_{ni}, quando instalado num período de tempo T_{ri} é determinado por

$$PVNB_i(d_{ni},T_{ri}) = \sum_{t=T_{ri}}^{10} \frac{k.BR(d_{ni},t).BC(d_{ni}).BCF(LU_i).l_i}{(1+r)^{5t}} \tag{4.27}$$

Custo de reparo para tubos novos (T_n = 10 anos).

O valor presente do custo de substituição de um tubo com diâmetro d_{ni}, em um período de tempo t é determinado por:

$$NPR_i(d_{ni},T_{ri}) = \left(\frac{1000.R(d_{ni}).l_i}{(1+r)^{5T_{ri}}} \right) \tag{4.28}$$

onde $R(d_{ni})$ é o custo por unidade de comprimento para substituir o tubo com diâmetro d_{ni}.

O caso de etapa de tempo único é uma decisão entre a substituição imediata dos tubos e a permanência dos tubos existentes em operação. É determinado por:

$$\min\ (Sistema\ de\ Custo) = \min\ \left(\sum_{i=0}^{N} Custos_i(d_{ni}, T_{ri}) \right) \tag{4.29}$$

onde $Custos_i(d_{ni}T_{ri}) = PVOB_i(T_{ri})$ $(com T_{ri} = 10)$ se a tubulação não for substituída, e igual a $NPR_i(d_{ni}, T_{ri}) + PVNB_i(d_{ni}, T_{ri})$ $(para T_{ri} = 0)$ se o tubo for substituído; e N é o número de tubos na rede.

O próximo passo da análise é o caso de etapa de tempo múltiplo, onde a programação dos trabalhos é considerada para os próximos 20 anos, em intervalos de 5 anos. Isto significa que um tubo será determinado para um período de 5 anos no qual será substituído. O problema de etapa de tempo múltiplo pode ser dado por:

$$mim\ (Sistema\ de\ Custos) = \min\ \left(\sum_{i=0}^{N} Custos_i(d_{ni}, T_{ri}) \right) \tag{4.30}$$

onde $Custos_i(d_{ni}, T_{ri}) = PVOB(T_{ri}) + PVNB_i(d_{ni}, T_{ri}) + NPR_i(d_{ni}, T_{ri})$ com $NPR_i(d_{ni}, T_{ri}) = 0$ e $PVNB_i(d_{ni}, T_{ri}) = 0$ se $T_{ri} = 5$; e $T_{ri} = 5$ indica que o tubo i não foi substituído em 20 anos de horizonte planejado estando sujeito a

$$\sum_{i=t}^{n} 1000.\delta(t).R(d_{ni}).l_i \le k.Fundo \quad \text{para cada } t = (0,1,...,4) \text{ e } n \in (1,..., N) \tag{4.31}$$

onde n é o número de tubos que serão substituídos; N é o número total de tubos na rede; $\delta(t) = 1$ se $t = T_{ri}$, ou $\delta(t) = 0$ caso contrário; e $Fundo$ é o orçamento disponível para cada época.

Um conjunto de restrições para o desempenho hidráulico do sistema reabilitado deve ser considerado. Reduzindo os diâmetros dos tubos, os custos da reabilitação também poderão ser reduzidos, mas também podem reduzir as pressões na rede abaixo do nível mínimo requerido. As pressões e velocidades devem satisfazer os seguintes limites:

$$h_j = f_i(d_{ni}, q_i) \ge h_j^{\min} \tag{4.32}$$

$$v_k = f_2(d_{ni}, q_i) \le v_k^{\max} \tag{4.33}$$

onde h_j é a pressão no nó j; $h_j^{\min}$ é o valor mínimo admitido para a pressão; v_k é a velocidade no tubo k (m/s); $v_k^{\max}$ é a velocidade máxima permitida; e q_i é a vazão no tubo i (m^3/s).

4.3 Taxa de falhas/ruptura

O cálculo dos custos de rupturas futuras dado em (4.26) e (4.27) requer a taxa de falhas/rupturas prevista para um intervalo de 5 anos. DANDY e ENGELHARDT (2001) desenvolveram equações de previsão de falhas para uma zona de estudo de caso baseado em dados de rupturas registrados. Estes dados consistem no local geográfico do vazamento, tipo, e diâmetro de tubo consertado. Usando o método dos mínimos quadrados, uma equação da seguinte forma foi desenvolvida para prover os melhores ajustes:

$$y = ax^b \tag{4.34}$$

onde y é a taxa de rupturas (rupturas/km/ano); x é a idade do tubo em anos; e a e b são coeficientes empíricos.

Para cada material [cimento amianto (CA) ou ferro-cimento (CICL)], foi obtido o valor de b, uma constante. A análise de regressão então, avançou para o desenvolvimento de uma relação entre os valores de a e o diâmetro do tubo. A taxa de ruptura para os tubos de ferro-cimento pode ser estimada usando (4.35); semelhantemente, a taxa de ruptura para os tubos de cimento amianto pode ser obtida por (4.36):

$$y = 0{,}02214.\exp(-8{,}64.10^{-3}.d_i).age_i^{1{,}337} \tag{4.35}$$

$$y = 1{,}974.10^{-3}.\exp(-9{,}47.10^{-3}.d_i).age_i^{1{,}808} \tag{4.36}$$

onde age_i = idade do tubo i (anos).

Dados de rupturas/vazamentos não estavam disponíveis para tubos de aço-cimento (MSCL), ferro-cimento dúctil (DICL), e cloreto de polivinila (PVC). Então foi assumido que tubos de aço-cimento seguiriam as curvas de rupturas dos tubos de ferro-cimento devido à suas naturezas metálicas. Para os outros dois tipos (DICL e PVC) foram assumidas as curvas de rupturas para os tubos de cimento amianto (4.36).

4.4 Técnica dos algoritmos genéticos

Os algoritmos genéticos são métodos que imitam matematicamente os mecanismos da evolução natural das espécies. 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 (GREFENSTETTE 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. 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.

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.

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. Nesta pesquisa, tomaram-se por base os trabalhos de SAVIC e WALTERS (1997), que utilizou uma população de 100 elementos.

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 nesta pesquisa. Para definir o numero ideal foram testadas simulações com 150 a 500 gerações. Neste trabalho foram utilizadas 50.000 gerações.

Probabilidade de recombinação

A probabilidade de recombinação (P_c) controla a freqüência 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 a uma baixa taxa de exploração. GREFENSTETT (1986) sugere uma variação entre 0,25 e 1,00 com incrementos de 0,05. Nesta pesquisa foi utilizado 0,9.

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 sugerida por GREFENSTETT (1986) uma variação entre 0,00 e 1,00. Nesta pesquisa utilizou-se 0,7.

Restrições e penalidades

GEN e CHENG (1997) discutem que o problema central na aplicação de algoritmos genéticos para otimização é a definição do critério de consideração das restrições, e levantam propostas para trabalhar com elas. Também MICHALEWICZ (1992) abordou com ênfase este assunto.

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

- Estratégias de reparação: considera tomar um cromossomo infactível e gerar um factível por algum procedimento. Para problemas de otimizações combinatórias 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, 1992) apontam que tal técnica é confiável.

- Estratégias de rejeição: descarta todos os cromossomos infactíveis criados pelo processo evolucionário. O método trabalha bem quando o espaço de busca é convexo, porém, sua desvantagem está no descarte destes cromossomos infactíveis, 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 funções penalidade. Estas funções são incorporadas à função objetivo gerando uma única função a ser otimizada. Têm a vantagem de considerar as soluções infactíveis, pois algumas podem fornecer informações úteis sobre a busca da solução ótima. Por outro lado, para problemas com muitas restrições, soluções infactíveis 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 infactíveis 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 dos AG's é utilizada para encontrar de 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.

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, na medida em que se processam as gerações do método. Foi sugerido em SAVIC e WALTERS (1997), a seguinte função, que permite o aumento gradual da penalidade:

$$p = \varphi \times \left(\frac{n_{ger}}{n_{ger}^{max}} \right)^{k} \tag{4.37}$$

onde, φ e k são constantes de multiplicação da penalidade; n_{ger} é o número da geração; n_{ger}^{max} é o número máximo de gerações. Nesta pesquisa adotamos $\varphi = 6.000$ e $k = 0{,}8$ (sugeridos 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.

Nesta pesquisa as restrições a serem satisfeitas foram as restrições hidráulicas e de limite de investimentos.

Aptidão do elemento e escala

A função aptidão acrescenta à função objetivo a avaliação da exeqüibilidade da solução e representa uma medida que avalia a capacidade de sobrevivência de um elemento da população durante o processo de evolução. 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.

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.

4.5 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 utilizado foi um computador Genuine Intel (CPU) com processador Pentium IV, 0,99 GB de memória RAM e disco rígido com 20 Gb de capacidade.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No modelo proposto, a técnica dos algoritmos genéticos foi aplicada para a obtenção de alternativas otimizadas de reabilitação de um sistema de distribuição de água para uma rede exemplo.

Para obtenção do coeficiente de ruptura foram utilizadas informações de duas redes de distribuição, distintas; ambas do sistema de abastecimento de água de Campo Grande/MS.

5.1 Rede Exemplo

A metodologia foi aplicada à rede apresentada na figura 5.1; usada por ALPEROVITS e SHAMIR (1977), por SAVIC e WALTERS (1997) e por GAMEIRO (2003).

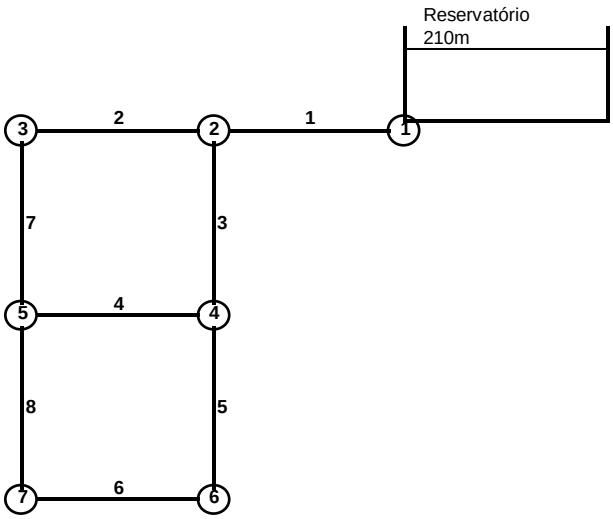

FIGURA 5.1 – Rede exemplo.

A rede possui dois anéis e é abastecida por um reservatório. É composta por 7 nós e 8 trechos, com 1000m de comprimento cada 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 foi utilizada neste trabalho para minimizar a função objetivo que representa os custos de reabilitação de uma rede de distribuição de água, sujeita às restrições hidráulicas, de demandas requeridas, de pressão mínima nos nós e de investimento máximo. Nesta pesquisa, para o exemplo aplicado, o limite máximo para investimento foi de 5 milhões.

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 de implantação adotados.

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

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

TABELA 5.2 – Custos unitários de implantação por metro e diâmetro.

Diâmetros Comerciais	**Custo/m (u.m.)**
1	40
2	50
3	65
4	70
6	75
8	80
10	85
12	100
14	110
16	120
18	130
20	150
22	160
24	170

Os parâmetros adotados na programação estão descritos na tabela 5.3.

O Fator Custo de Rompimento ou Falhas adotado foi o apresentado por DANDY e ENGELHARDT (2001), obtido através de experimentos no campo, conforme tabela 5.4.

TABELA 5.3 – Parâmetros adotados na simulação hidráulica

Parâmetros inseridos no programa	
Número de nós	6
Número de reservatório	1
Número de trechos	8
Fator de custo do rompimento	1,5
Taxa de juros	10% a.a.
População (indivíduos)	50
Gerações (iterações)	50.000
Elitismo	5
Pc - recombinações	0,9
Pm - mutações	0,7
Investimento máximo permitido	5 milhões

TABELA 5.4 – Fatores de custos de rupturas

Uso	**Custo 1**	**Custo 2**	**Custo 3**
Residencial	1,5	1,5	5
Industrial	1,5	1,5	5
Comercial	3	4	5
Vias Principais	3	4	5
Rural	1	1	5

5.2 Taxa de Falhas/ Ruptura

Para obtenção dos custos de reparo para tubos existentes e para tubos novos, previstos nas equações 4.26 e 4.27, é necessária a obtenção da taxa de ruptura ou falhas do sistema. Nesta pesquisa optou-se em determinar uma equação de falhas para ser aplicada na rede modelo a partir da equação 4.36 de DANDY e ENGELHARDT (2001).

A determinação de uma equação de falhas está vinculada a obtenção de dados históricos confiáveis. Nesta pesquisa, isto foi possível, graças a dados obtidos para duas redes de distribuição reais da cidade de Campo Grande, estado de Mato Grosso do Sul.

Os cálculos serão demonstrados para as duas redes exemplo; mas para aplicação na técnica dos algoritmos genéticos, será escolhida apenas uma delas.

Linearização

Para resolução da equação $y = 1{,}974.10^{-3}.\exp(-9{,}47.10^{-3}.d_i).age_i^{1{,}808}$ (4.36) , adotou-se o método de NETO (1977) para uma regressão linear múltipla.

Para o caso de duas variáveis independentes d_i e age_i , a equação do plano estimativa no espaço tridimensional é dada por:

$$\hat{y} = a + bx_1 + cx_2 \tag{4.38}$$

A imposição do critério de mínimos quadrados leva ao seguinte sistema:

$$\sum_{j=1}^{n} y_j = na + b\sum_{j=1}^{n} x_{1j} + c\sum_{j=1}^{n} x_{2j} \tag{4.39}$$

$$\sum_{j=1}^{n} x_{1j}y_j = a\sum_{j=1}^{n} x_{1j} + b\sum_{j=1}^{n} x_{1j}^2 + c\sum_{j=1}^{n} x_{1j}x_{2j} \tag{4.40}$$

$$\sum_{j=1}^{n} x_{2j}y_j = a\sum_{j=1}^{n} x_{2j} + b\sum_{j=1}^{n} x_{1j}x_{2j} + c\sum_{j=1}^{n} x_{2j}^2 \tag{4.41}$$

Considerando:

$$1{,}974.10^{-3} = a \tag{4.42}$$

$$-9{,}47.10^{-3}.d_i = b.x_1 \tag{4.43}$$

$$age_i^{1{,}808} = x_2^c \tag{4.44}$$

Tem-se então:

$$y = a.e^{b.x_1}.x_2^c \tag{4.45}$$

Utilizando logaritmo, teremos:

$$\ln y = \ln(a.e^{b.x_1}.x_2^c) \quad (4.46)$$

$$\ln y = \ln a + \ln e^{b.x_1} + \ln x_2^c \quad (4.47)$$

$$\ln y = \ln a + b.x_1 \ln e + c \ln x_2 \quad (4.48)$$

$$\ln y = \ln a + b.x_1 + c \ln x_2 \quad (4.49)$$

Adotando:

$$\ln y = Y \quad (4.50)$$

$$\ln a = A \quad (4.51)$$

$$b = B \quad (4.52)$$

$$x_1 = X_1 \quad (4.53)$$

$$c = C \quad (4.54)$$

$$\ln x_2 = X_2 \quad (4.55)$$

Tem-se:

$$Y = A + BX_1 + CX_2 \quad (4.56)$$

Equação de falhas/ruptura

Áreas selecionadas

Para obtenção do coeficiente de ruptura da rede de distribuição de água em estudo, foram selecionadas duas regiões distintas do sistema de abastecimento de água de Campo Grande/MS, com idade acima de 5 anos; sendo Área 1 – Vila Carvalho e Área 2 – Jardim Imá.

Área I – Vila Carvalho

A rede de distribuição da Área I possui diâmetros de 50, 75, 100 e 400mm; e os dados históricos de rompimentos são a partir de 1999. A extensão de cada trecho foi obtida a partir da intersecção com outra rede, ou seja, a cada cruzamento de rua. Na média a extensão de cada trecho ficou em 100m.

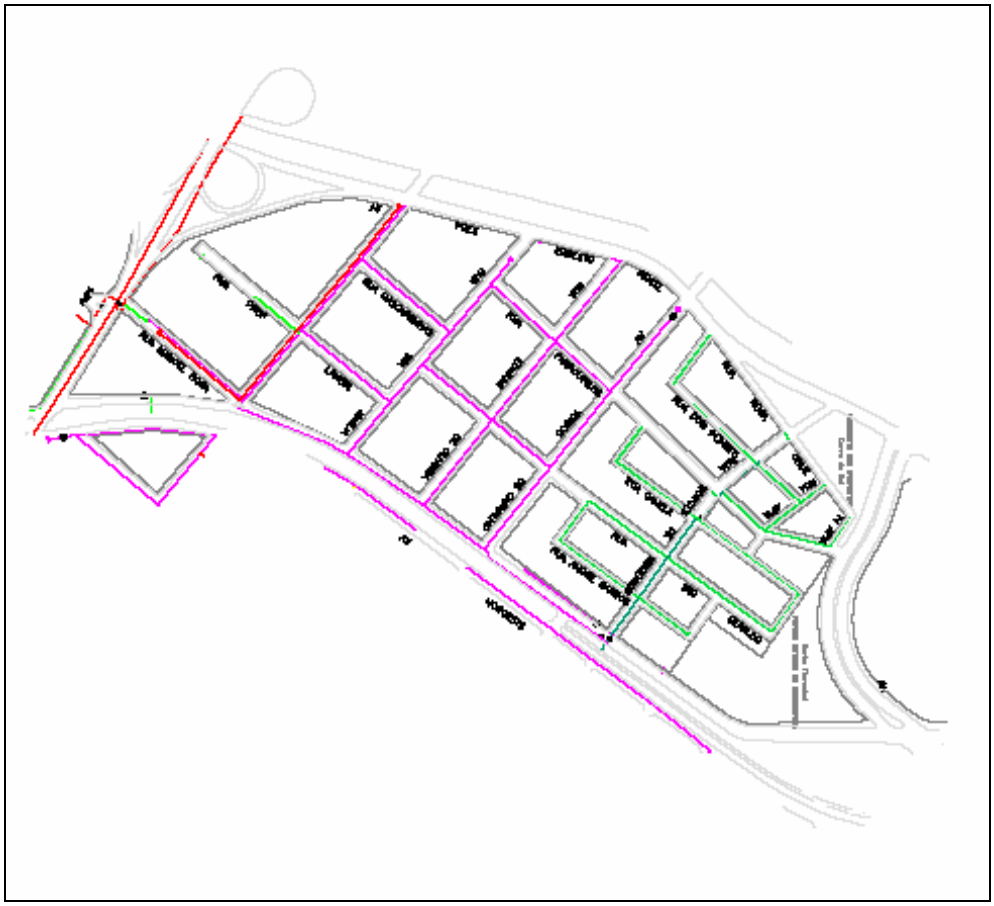

FIGURA 5.2 – Área I - Vila Carvalho

Não houve vazamentos na rede de 400mm, ficando, na maioria, concentrados nos diâmetros de 50 e 75mm. A tabela 5.5 mostra a quantidade de vazamentos para cada trecho, ao longo dos anos.

A partir do número de vazamentos, extensão do trecho e ano de implantação obteve-se o índice vazamento/km e a idade das tubulações. As tabelas 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9, mostram os cálculos, onde L é a extensão do trecho em quilômetros; N é o número de vazamentos no ano; Y é o número de vazamentos por quilômetro e X é a idade da tubulação no ano em questão.

Com a taxa de vazamento/km/ano, diâmetro, e idade da tubulação, alimentam-se as equações 4.39, 4.40 e 4.41, para obtenção de *a*, *b* e *c*, e determinação da equação de falhas/rupturas para a Área I.

Na tabela 5.6, tem-se que $Y = \ln y(vaz/km/ano)$ y; $X_1 = x_1 = d(diâmetro)$ e $X_2 = \ln x_2 = \ln(idade)$.

TABELA 5.5 – Número de vazamentos por trecho e por ano para a Área I

ÁREA I	TRECHO	1.999	2.000	2.001	2.002	2.003	2.004	2.005
Rua das Flores	1	-	-					
	2	-	-					2
Rua das Esmeraldas	1	-	-				1	
	2	-	-			1		
	3	-	-					
	4	-	-					
Av. Murilo Rolin	1	-	-					
	2	-	-				1	
	3	-	-		1	2	2	
	4	-	-					4
	5	-	-					
	6	-	-		1	1		1
Tv. Orzes	1	-	-	1		1	3	1
Rua dos Guaranis	1	-	-	1		5	5	1
	2	-	-		1	2	1	1
	3	-	-			5	1	
	4	-	-		2		1	2
	5	-	-		3	2	1	
	6	-	-		1	2	2	
Rua Gilbratar	1		-				1	
	2		-		1	2	3	1
	3		1			5	4	1
Rua das Tulipas	1	-	-				1	
	2	-	-			1	3	3
Rua Topázio	1	-	-			1	1	
	2	-	-	2	1		2	
	3	-	-		2	2	1	
	4	-	-					
Rua das Acácias	1	-	-					
	2	-	-					
Rua Dardanellos	1	-	-			1		2
	2	-	-			1	3	
Rua Açucenas	1	1	-	1	1		2	1
	2	1	-	1	1	4	4	
Tv. Jades	1	-	-		1			
Tv. Jaspe	1	-	-		1			1

TABELA 5.6 – Vazamentos por ano na Área I, para os trechos com diâmetros de 50mm

Diametro Igual a 50 mm DE PVC

Rua	Trecho	Implantação ano	L Km	1999			2000			2001			2002			2003			2004			2005		
				N	Y	X	N	Y	X	N	Y	X	N	Y	X	N	Y	X	N	Y	X	N	Y	X
Rua Das Flores	2	1992	0,111	0,00	0,000	8	0,00	0,000	9	0,00	0,000	10	0,00	0,000	11	0,00	0,000	12	0,00	0,000	13	2,00	18,018	14
Rua Das Esmeradas	1	1993	0,070	0,00	0,000	7	0,00	0,000	8	0,00	0,000	9	0,00	0,000	10	0,00	0,000	11	1,00	14,286	12	0,00	0,000	13
Rua Das Esmeradas	2	1993	0,100	0,00	0,000	7	0,00	0,000	8	0,00	0,000	9	0,00	0,000	10	1,00	10,000	11	0,00	0,000	12	0,00	0,000	13
Rua Das Esmeradas	4	1993	0,072	0,00	0,000	7	0,00	0,000	8	0,00	0,000	9	0,00	0,000	10	0,00	0,000	11	0,00	0,000	12	0,00	0,000	13
Av. Murilo Rolin Junior	2	1992	0,034	0,00	0,000	8	0,00	0,000	9	0,00	0,000	10	0,00	0,000	11	0,00	0,000	12	1,00	29,412	13	0,00	0,000	14
Av. Murilo Rolin Junior	5	1992	0,045	0,00	0,000	8	0,00	0,000	9	0,00	0,000	10	0,00	0,000	11	0,00	0,000	12	0,00	0,000	13	0,00	0,000	14
Av. Murilo Rolin Junior	6	1992	0,136	0,00	0,000	8	0,00	0,000	9	0,00	0,000	10	1,00	7,353	11	1,00	7,353	12	0,00	0,000	13	1,00	7,353	14
Rua Tv Orzes	1	1992	0,051	0,00	0,000	8	0,00	0,000	9	1,00	19,608	10	0,00	0,000	11	1,00	19,608	12	3,00	58,824	13	1,00	19,608	14
Rua Dos Guaranis	1	1993	0,065	0,00	0,000	7	0,00	0,000	8	1,00	15,385	9	0,00	0,000	10	5,00	76,923	11	5,00	76,923	12	1,00	15,385	13
Rua Dos Guaranis	4	1993	0,038	0,00	0,000	7	0,00	0,000	8	0,00	0,000	9	2,00	52,632	10	0,00	0,000	11	1,00	26,316	12	2,00	52,632	13
Rua Gilbratar	1	1992	0,060	0,00	0,000	8	0,00	0,000	9	0,00	0,000	10	0,00	0,000	11	0,00	0,000	12	1,00	16,667	13	0,00	0,000	14
Rua Gilbratar	2	1992	0,112	0,00	0,000	8	0,00	0,000	9	0,00	0,000	10	1,00	8,929	11	2,00	17,857	12	3,00	26,786	13	1,00	8,929	14
Rua Das Tulipas	1	1993	0,111	0,00	0,000	7	0,00	0,000	8	0,00	0,000	9	0,00	0,000	10	0,00	0,000	11	1,00	9,009	12	6,00	54,054	13
Rua Topazio	1	1993	0,039	0,00	0,000	7	0,00	0,000	8	0,00	0,000	9	0,00	0,000	10	1,00	25,641	11	1,00	25,641	12	0,00	0,000	13
Rua Topazio	2	1993	0,041	0,00	0,000	7	0,00	0,000	8	2,00	48,780	9	1,00	24,390	10	0,00	0,000	11	2,00	48,780	12	0,00	0,000	13
Rua Topazio	3	1993	0,027	0,00	0,000	7	0,00	0,000	8	0,00	0,00	9	2,00	74,074	10	2,00	74,074	11	1,00	37,037	12	0,00	0,000	13
Rua Topazio	4	1993	0,027	0,00	0,000	7	0,00	0,000	8	0,00	0,00	9	0,00	0,000	10	0,00	0,000	11	0,00	0,000	12	0,00	0,000	13
Rua Das Acacias	1	1994	0,073	0,00	0,000	6	0,00	0,000	7	0,00	0,00	8	0,00	0,000	9	0,00	0,000	10	0,00	0,000	11	0,00	0,000	12
Ruas Das Dardanellos	1	1993	0,198	0,00	0,000	7	0,00	0,000	8	0,00	0,00	9	0,00	0,000	10	1,00	5,051	11	0,00	0,000	12	2,00	10,101	13
Ruas Das Dardanellos	2	1993	0,098	0,00	0,000	7	0,00	0,000	8	0,00	0,00	9	0,00	0,000	10	0,00	0,000	11	0,00	0,000	12	0,00	0,000	13
Rua Acucenas	1	1994	0,113	1,00	8,850	6	0,00	0,000	7	1,00	8,850	8	1,00	8,850	9	0,00	0,000	10	2,00	17,699	11	1,00	8,850	12
Rua Acucenas	2	1994	0,123	1,00	8,130	6	0,00	0,000	7	1,00	8,130	8	1,00	8,130	9	4,00	32,520	10	4,00	32,520	11	0,00	0,000	12
Rua Tv Jades	1	1994	0,052	0,00	0,000	6	0,00	0,000	7	0,00	0,000	8	1,00	19,231	9	0,00	0,000	10	0,00	0,000	11	0,00	0,000	12
Rua Tv Jaspe	1	1994	0,050	0,00	0,000	6	0,000	0,000	7	0,00	0,000	8	1,00	20,000	9	0,00	0,000	10	0,00	0,000	11	1,00	20,000	12

TABELA 5.7 – Vazamentos por ano na Área I, para os trechos com diâmetros de 75mm

Diametro Igual a 75 mm DE PVC																									
Rua	Trecho	Implantação ano	L Km	1999			2000			2001			2002			2003			2004			2005		
				N	Y	X	N	Y	X	N	Y	X	N	Y	X	N	Y	X	N	Y	X	N	Y	X
Av. Murilo Rolin Junior	2	1992	0,034	0,00	0,000	8	0,00	0,000	9	0,00	0,000	10	0,00	0,000	11	0,00	0,000	12	1,00	29,412	13	0,00	0,000	14
Av. Murilo Rolin Junior	3	1992	0,083	0,00	0,000	8	0,00	0,000	9	0,00	0,000	10	1,00	12,048	11	2,00	24,096	12	2,00	24,096	13	0,00	0,000	14
Av. Murilo Rolin Junior	4	1992	0,088	0,00	0,000	8	0,00	0,000	9	0,00	0,000	10	0,00	0,000	11	0,00	0,000	12	0,00	0,000	13	4,00	45,455	14
Av. Murilo Rolin Junior	5	1992	0,044	0,00	0,000	8	0,00	0,000	9	0,00	0,000	10	0,00	0,000	11	0,00	0,000	12	0,00	0,000	13	0,00	0,000	14
Rua Dos Guaranis	2	1993	0,043	0,00	0,000	7	0,00	0,000	8	0,00	0,000	9	1,00	23,256	10	2,00	46,512	11	1,00	23,256	12	1,00	23,256	13
Rua Dos Guaranis	5	1993	0,045	0,00	0,000	7	0,00	0,000	8	0,00	0,000	9	3,00	66,667	10	2,00	44,444	11	1,00	22,222	12	2,00	44,444	13
Rua Dos Guaranis	6	1993	0,046	0,00	0,000	7	0,00	0,000	8	0,00	0,000	9	1,00	21,739	10	2,00	43,478	11	2,00	43,478	12	0,00	0,000	13
Rua Gilbratar	3	1992	0,122	0,00	0,000	8	1,00	8,197	9	0,00	0,000	10	0,00	0,000	11	5,00	40,984	12	4,00	32,787	13	1,00	8,197	14
Rua Das Tulipas	2	1993	0,122	0,00	0,000	7	0,00	0,000	8	0,00	0,000	9	0,00	0,000	10	1,00	8,197	11	3,00	24,590	12	3,00	24,590	13
Ruas Das Dardanellos	2	1993	0,093	0,00	0,000	7	0,00	0,000	8	0,00	0,000	9	0,00	0,000	10	0,00	0,000	11	0,00	0,000	12	0,00	0,000	13

TABELA 5.8 – Vazamentos por ano na Área I, para os trechos com diâmetros de 100mm

Diametro Igual a 100 mm DE PVC																									
Rua	Trecho	Implantação ano	L Km	1999			2000			2001			2002			2003			2004			2005		
				N	Y	X	N	Y	X	N	Y	X	N	Y	X	N	Y	X	N	Y	X	N	Y	X
Rua Das Esmeradas	2	1993	0,135	0,00	0,000	7	0,00	0,000	8	0,00	0,000	9	0,00	0,000	10	0,00	0,000	11	0,00	0,00	12	0,00	0,000	13
Rua Das Esmeradas	3	1993	0,139	0,00	0,000	7	0,00	0,000	8	0,00	0,000	9	0,00	0,000	10	0,00	0,000	11	0,00	0,00	12	0,00	0,000	13
Rua Das Acacias	1	1994	0,083	0,00	0,000	6	0,00	0,000	7	0,00	0,000	8	0,00	0,000	9	0,00	0,000	10	0,00	0,00	11	0,00	0,000	12
Ruas Das Dardanellos	2	1993	0,054	0,00	0,000	7	0,00	0,000	8	0,00	0,000	9	0,00	0,000	10	1,00	18,519	11	3,00	55,56	12	0,00	0,000	13

TABELA 5.9 – Vazamentos por ano na Área I, para os trechos com diâmetros de 400mm

Diametro Igual a 400 mm DE PVC																								
Rua	Trecho	Implantação ano	L Km	1999			2000			2001			2002			2003			2004			2005		
				N	Y	X	N	Y	X	N	Y	X	N	Y	X	N	Y	X	N	Y	X	N	Y	X
Ruas Das Dardanellos	1	1993	0,18	0,00	0,000	7	0,00	0,000	8	0,00	0,000	9	0,00	0,000	10	0,00	0,000	11	0,00	0,000	12	0,00	0,000	13
Ruas Das Dardanellos	2	1993	0,04	0,00	0,000	7	0,00	0,000	8	0,00	0,000	9	0,00	0,000	10	0,00	0,000	11	0,00	0,000	12	0,00	0,000	13

TABELA 5.10 – Linearização para a Área I

Lineralização da Equação - Área I											
y Vaz/ km/ Ano	**d = x_1 diâ- metro**	**x_2 (idade) Ano atual - Ano implantação + 1**	**Y = ln y**	**D = X_1**	**X_2 = ln x_2**	**X_1 x Y**	**X_1^2**	**X_1 x X_2**	**X_2 x Y**	**X_2^2**	**n**
-	50,00	8,00	-	50,00	2,08	-	2.500,00	103,97	-	4,32	1,00
-	50,00	7,00	-	50,00	1,95	-	2.500,00	97,30	-	3,79	2,00
-	50,00	7,00	-	50,00	1,95	-	2.500,00	97,30	-	3,79	3,00
-	50,00	7,00	-	50,00	1,95	-	2.500,00	97,30	-	3,79	4,00
-	50,00	8,00	-	50,00	2,08	-	2.500,00	103,97	-	4,32	5,00
-	50,00	8,00	-	50,00	2,08	-	2.500,00	103,97	-	4,32	6,00
-	50,00	8,00	-	50,00	2,08	-	2.500,00	103,97	-	4,32	7,00
-	50,00	8,00	-	50,00	2,08	-	2.500,00	103,97	-	4,32	8,00
-	50,00	7,00	-	50,00	1,95	-	2.500,00	97,30	-	3,79	9,00
-	50,00	7,00	-	50,00	1,95	-	2.500,00	97,30	-	3,79	10,00
-	50,00	8,00	-	50,00	2,08	-	2.500,00	103,97	-	4,32	11,00
-	50,00	8,00	-	50,00	2,08	-	2.500,00	103,97	-	4,32	12,00
-	50,00	7,00	-	50,00	1,95	-	2.500,00	97,30	-	3,79	13,00
-	50,00	7,00	-	50,00	1,95	-	2.500,00	97,30	-	3,79	14,00
-	50,00	7,00	-	50,00	1,95	-	2.500,00	97,30	-	3,79	15,00
-	50,00	7,00	-	50,00	1,95	-	2.500,00	97,30	-	3,79	16,00
-	50,00	7,00	-	50,00	1,95	-	2.500,00	97,30	-	3,79	17,00
-	50,00	6,00	-	50,00	1,79	-	2.500,00	89,59	-	3,21	18,00
-	50,00	7,00	-	50,00	1,95	-	2.500,00	97,30	-	3,79	19,00
-	50,00	7,00	-	50,00	1,95	-	2.500,00	97,30	-	3,79	20,00
8,85	50,00	6,00	2,18	50,00	1,79	109,02	2.500,00	89,59	3,91	3,21	21,00
8,13	50,00	6,00	2,10	50,00	1,79	104,78	2.500,00	89,59	3,75	3,21	22,00
-	50,00	6,00	-	50,00	1,79	-	2.500,00	89,59	-	3,21	23,00
-	50,00	6,00	-	50,00	1,79	-	2.500,00	89,59	-	3,21	24,00
-	50,00	9,00	-	50,00	2,20	-	2.500,00	109,86	-	4,83	25,00
-	50,00	8,00	-	50,00	2,08	-	2.500,00	103,97	-	4,32	26,00
-	50,00	8,00	-	50,00	2,08	-	2.500,00	103,97	-	4,32	27,00
-	50,00	8,00	-	50,00	2,08	-	2.500,00	103,97	-	4,32	28,00
-	50,00	9,00	-	50,00	2,20	-	2.500,00	109,86	-	4,83	29,00
-	50,00	9,00	-	50,00	2,20	-	2.500,00	109,86	-	4,83	30,00
-	50,00	9,00	-	50,00	2,20	-	2.500,00	109,86	-	4,83	31,00
-	50,00	9,00	-	50,00	2,20	-	2.500,00	109,86	-	4,83	32,00
-	50,00	8,00	-	50,00	2,08	-	2.500,00	103,97	-	4,32	33,00
-	50,00	8,00	-	50,00	2,08	-	2.500,00	103,97	-	4,32	34,00
-	50,00	9,00	-	50,00	2,20	-	2.500,00	109,86	-	4,83	35,00
-	50,00	9,00	-	50,00	2,20	-	2.500,00	109,86	-	4,83	36,00

Lineralização da Equação - Área I											
y Vaz/ km/ Ano	**d = x_1 diâ- metro**	**x_2 (idade) Ano atual - Ano implantação + 1**	**Y = ln y**	**D = X_1**	**X_2 = ln x_2**	**X_1 x Y**	**X_1^2**	**X_1 x X_2**	**X_2 x Y**	**X_2^2**	**n**
-	50,00	8,00	-	50,00	2,08	-	2.500,00	103,97	-	4,32	38,00
-	50,00	8,00	-	50,00	2,08	-	2.500,00	103,97	-	4,32	39,00
-	50,00	8,00	-	50,00	2,08	-	2.500,00	103,97	-	4,32	40,00
-	50,00	8,00	-	50,00	2,08	-	2.500,00	103,97	-	4,32	41,00
-	50,00	7,00	-	50,00	1,95	-	2.500,00	97,30	-	3,79	42,00
-	50,00	8,00	-	50,00	2,08	-	2.500,00	103,97	-	4,32	43,00
-	50,00	8,00	-	50,00	2,08	-	2.500,00	103,97	-	4,32	44,00
-	50,00	7,00	-	50,00	1,95	-	2.500,00	97,30	-	3,79	45,00
-	50,00	7,00	-	50,00	1,95	-	2.500,00	97,30	-	3,79	46,00
-	50,00	7,00	-	50,00	1,95	-	2.500,00	97,30	-	3,79	47,00
-	50,00	7,00	-	50,00	1,95	-	2.500,00	97,30	-	3,79	48,00
-	50,00	10,00	-	50,00	2,30	-	2.500,00	115,13	-	5,30	49,00
-	50,00	9,00	-	50,00	2,20	-	2.500,00	109,86	-	4,83	50,00
-	50,00	9,00	-	50,00	2,20	-	2.500,00	109,86	-	4,83	51,00
-	50,00	9,00	-	50,00	2,20	-	2.500,00	109,86	-	4,83	52,00
-	50,00	10,00	-	50,00	2,30	-	2.500,00	115,13	-	5,30	53,00
-	50,00	10,00	-	50,00	2,30	-	2.500,00	115,13	-	5,30	54,00
-	50,00	10,00	-	50,00	2,30	-	2.500,00	115,13	-	5,30	55,00
19,61	50,00	10,00	2,98	50,00	2,30	148,80	2.500,00	115,13	6,85	5,30	56,00
15,38	50,00	9,00	2,73	50,00	2,20	136,67	2.500,00	109,86	6,01	4,83	57,00
-	50,00	9,00	-	50,00	2,20	-	2.500,00	109,86	-	4,83	58,00
-	50,00	10,00	-	50,00	2,30	-	2.500,00	115,13	-	5,30	59,00
-	50,00	10,00	-	50,00	2,30	-	2.500,00	115,13	-	5,30	60,00
-	50,00	9,00	-	50,00	2,20	-	2.500,00	109,86	-	4,83	61,00
-	50,00	9,00	-	50,00	2,20	-	2.500,00	109,86	-	4,83	62,00
48,78	50,00	9,00	3,89	50,00	2,20	194,37	2.500,00	109,86	8,54	4,83	63,00
-	50,00	9,00	-	50,00	2,20	-	2.500,00	109,86	-	4,83	64,00
-	50,00	9,00	-	50,00	2,20	-	2.500,00	109,86	-	4,83	65,00
-	50,00	8,00	-	50,00	2,08	-	2.500,00	103,97	-	4,32	66,00
-	50,00	9,00	-	50,00	2,20	-	2.500,00	109,86	-	4,83	67,00
-	50,00	9,00	-	50,00	2,20	-	2.500,00	109,86	-	4,83	68,00
8,85	50,00	8,00	2,18	50,00	2,08	109,02	2.500,00	103,97	4,53	4,32	69,00
8,13	50,00	8,00	2,10	50,00	2,08	104,78	2.500,00	103,97	4,36	4,32	70,00
-	50,00	8,00	-	50,00	2,08	-	2.500,00	103,97	-	4,32	71,00
-	50,00	8,00	-	50,00	2,08	-	2.500,00	103,97	-	4,32	72,00
-	50,00	11,00	-	50,00	2,40	-	2.500,00	119,89	-	5,75	73,00
-	50,00	10,00	-	50,00	2,30	-	2.500,00	115,13	-	5,30	74,00
-	50,00	10,00	-	50,00	2,30	-	2.500,00	115,13	-	5,30	75,00

Lineralização da Equação - Área I											
y Vaz/ km/ Ano	**d = x_1 diâ- metro**	**x_2 (idade) Ano atual - Ano implantação + 1**	**Y = ln y**	**D = X_1**	**X_2 = ln x_2**	**X_1 x Y**	**X_1^2**	**X_1 x X_2**	**X_2 x Y**	**X_2^2**	**n**
-	50,00	10,00	-	50,00	2,30	-	2.500,00	115,13	-	5,30	76,00
-	50,00	11,00	-	50,00	2,40	-	2.500,00	119,89	-	5,75	77,00
-	50,00	11,00	-	50,00	2,40	-	2.500,00	119,89	-	5,75	78,00
7,35	50,00	11,00	2,00	50,00	2,40	99,76	2.500,00	119,89	4,78	5,75	79,00
-	50,00	11,00	-	50,00	2,40	-	2.500,00	119,89	-	5,75	80,00
-	50,00	10,00	-	50,00	2,30	-	2.500,00	115,13	-	5,30	81,00
52,63	50,00	10,00	3,96	50,00	2,30	198,17	2.500,00	115,13	9,13	5,30	82,00
-	50,00	11,00	-	50,00	2,40	-	2.500,00	119,89	-	5,75	83,00
8,93	50,00	11,00	2,19	50,00	2,40	109,46	2.500,00	119,89	5,25	5,75	84,00
-	50,00	10,00	-	50,00	2,30	-	2.500,00	115,13	-	5,30	85,00
-	50,00	10,00	-	50,00	2,30	-	2.500,00	115,13	-	5,30	86,00
24,39	50,00	10,00	3,19	50,00	2,30	159,71	2.500,00	115,13	7,35	5,30	87,00
74,07	50,00	10,00	4,31	50,00	2,30	215,25	2.500,00	115,13	9,91	5,30	88,00
-	50,00	10,00	-	50,00	2,30	-	2.500,00	115,13	-	5,30	89,00
-	50,00	9,00	-	50,00	2,20	-	2.500,00	109,86	-	4,83	90,00
-	50,00	10,00	-	50,00	2,30	-	2.500,00	115,13	-	5,30	91,00
-	50,00	10,00	-	50,00	2,30	-	2.500,00	115,13	-	5,30	92,00
8,85	50,00	9,00	2,18	50,00	2,20	109,02	2.500,00	109,86	4,79	4,83	93,00
8,13	50,00	9,00	2,10	50,00	2,20	104,78	2.500,00	109,86	4,60	4,83	94,00
19,23	50,00	9,00	2,96	50,00	2,20	147,83	2.500,00	109,86	6,50	4,83	95,00
20,00	50,00	9,00	3,00	50,00	2,20	149,79	2.500,00	109,86	6,58	4,83	96,00
-	50,00	12,00	-	50,00	2,48	-	2.500,00	124,25	-	6,17	97,00
-	50,00	11,00	-	50,00	2,40	-	2.500,00	119,89	-	5,75	98,00
10,00	50,00	11,00	2,30	50,00	2,40	115,13	2.500,00	119,89	5,52	5,75	99,00
-	50,00	11,00	-	50,00	2,40	-	2.500,00	119,89	-	5,75	100,00
-	50,00	12,00	-	50,00	2,48	-	2.500,00	124,25	-	6,17	101,00
-	50,00	12,00	-	50,00	2,48	-	2.500,00	124,25	-	6,17	102,00
7,35	50,00	12,00	2,00	50,00	2,48	99,76	2.500,00	124,25	4,96	6,17	103,00
19,61	50,00	12,00	2,98	50,00	2,48	148,80	2.500,00	124,25	7,39	6,17	104,00
76,92	50,00	11,00	4,34	50,00	2,40	217,14	2.500,00	119,89	10,41	5,75	105,00
-	50,00	11,00	-	50,00	2,40	-	2.500,00	119,89	-	5,75	106,00
-	50,00	12,00	-	50,00	2,48	-	2.500,00	124,25	-	6,17	107,00
17,86	50,00	12,00	2,88	50,00	2,48	144,12	2.500,00	124,25	7,16	6,17	108,00
-	50,00	11,00	-	50,00	2,40	-	2.500,00	119,89	-	5,75	109,00
25,64	50,00	11,00	3,24	50,00	2,40	162,21	2.500,00	119,89	7,78	5,75	110,00
-	50,00	11,00	-	50,00	2,40	-	2.500,00	119,89	-	5,75	111,00
74,07	50,00	11,00	4,31	50,00	2,40	215,25	2.500,00	119,89	10,32	5,75	112,00

Lineralização da Equação - Área I											
y Vaz/ km/ Ano	**d = x_1 diâ- metro**	**x_2 (idade) Ano atual - Ano implantação + 1**	**Y = ln y**	**D = X_1**	**X_2 = ln x_2**	**X_1 x Y**	**X_1^2**	**X_1 x X_2**	**X_2 x Y**	**X_2^2**	**n**
-	50,00	11,00	-	50,00	2,40	-	2.500,00	119,89	-	5,75	113,00
-	50,00	10,00	-	50,00	2,30	-	2.500,00	115,13	-	5,30	114,00
5,05	50,00	11,00	1,62	50,00	2,40	80,97	2.500,00	119,89	3,88	5,75	115,00
-	50,00	11,00	-	50,00	2,40	-	2.500,00	119,89	-	5,75	116,00
-	50,00	10,00	-	50,00	2,30	-	2.500,00	115,13	-	5,30	117,00
32,52	50,00	10,00	3,48	50,00	2,30	174,09	2.500,00	115,13	8,02	5,30	118,00
-	50,00	10,00	-	50,00	2,30	-	2.500,00	115,13	-	5,30	119,00
-	50,00	10,00	-	50,00	2,30	-	2.500,00	115,13	-	5,30	120,00
-	50,00	13,00	-	50,00	2,56	-	2.500,00	128,25	-	6,58	121,00
14,29	50,00	12,00	2,66	50,00	2,48	132,96	2.500,00	124,25	6,61	6,17	122,00
-	50,00	12,00	-	50,00	2,48	-	2.500,00	124,25	-	6,17	123,00
-	50,00	12,00	-	50,00	2,48	-	2.500,00	124,25	-	6,17	124,00
29,41	50,00	13,00	3,38	50,00	2,56	169,07	2.500,00	128,25	8,67	6,58	125,00
-	50,00	13,00	-	50,00	2,56	-	2.500,00	128,25	-	6,58	126,00
-	50,00	13,00	-	50,00	2,56	-	2.500,00	128,25	-	6,58	127,00
58,82	50,00	13,00	4,07	50,00	2,56	203,73	2.500,00	128,25	10,45	6,58	128,00
76,92	50,00	12,00	4,34	50,00	2,48	217,14	2.500,00	124,25	10,79	6,17	129,00
26,32	50,00	12,00	3,27	50,00	2,48	163,51	2.500,00	124,25	8,13	6,17	130,00
16,67	50,00	13,00	2,81	50,00	2,56	140,67	2.500,00	128,25	7,22	6,58	131,00
26,79	50,00	13,00	3,29	50,00	2,56	164,39	2.500,00	128,25	8,43	6,58	132,00
9,01	50,00	12,00	2,20	50,00	2,48	109,91	2.500,00	124,25	5,46	6,17	133,00
25,64	50,00	12,00	3,24	50,00	2,48	162,21	2.500,00	124,25	8,06	6,17	134,00
48,78	50,00	12,00	3,89	50,00	2,48	194,37	2.500,00	124,25	9,66	6,17	135,00
37,04	50,00	12,00	3,61	50,00	2,48	180,60	2.500,00	124,25	8,98	6,17	136,00
-	50,00	12,00	-	50,00	2,48	-	2.500,00	124,25	-	6,17	137,00
-	50,00	11,00	-	50,00	2,40	-	2.500,00	119,89	-	5,75	138,00
-	50,00	12,00	-	50,00	2,48	-	2.500,00	124,25	-	6,17	139,00
-	50,00	12,00	-	50,00	2,48	-	2.500,00	124,25	-	6,17	140,00
17,70	50,00	11,00	2,87	50,00	2,40	143,68	2.500,00	119,89	6,89	5,75	141,00
32,52	50,00	11,00	3,48	50,00	2,40	174,09	2.500,00	119,89	8,35	5,75	142,00
-	50,00	11,00	-	50,00	2,40	-	2.500,00	119,89	-	5,75	143,00
-	50,00	11,00	-	50,00	2,40	-	2.500,00	119,89	-	5,75	144,00
18,02	50,00	14,00	2,89	50,00	2,64	144,57	2.500,00	131,95	7,63	6,96	145,00
-	50,00	13,00	-	50,00	2,56	-	2.500,00	128,25	-	6,58	146,00
-	50,00	13,00	-	50,00	2,56	-	2.500,00	128,25	-	6,58	147,00
-	50,00	13,00	-	50,00	2,56	-	2.500,00	128,25	-	6,58	148,00
-	50,00	14,00	-	50,00	2,64	-	2.500,00	131,95	-	6,96	149,00
-	50,00	14,00	-	50,00	2,64	-	2.500,00	131,95	-	6,96	150,00

Lineralização da Equação - Área I											
y Vaz/ km/ Ano	**d = x_1 diâ- metro**	**x_2 (idade) Ano atual - Ano implantação + 1**	**Y = ln y**	**D = X_1**	**X_2 = ln x_2**	**X_1 x Y**	**X_1^2**	**X_1 x X_2**	**X_2 x Y**	**X_2^2**	**n**
7,35	50,00	14,00	2,00	50,00	2,64	99,76	2.500,00	131,95	5,27	6,96	151,00
19,61	50,00	14,00	2,98	50,00	2,64	148,80	2.500,00	131,95	7,85	6,96	152,00
15,38	50,00	13,00	2,73	50,00	2,56	136,67	2.500,00	128,25	7,01	6,58	153,00
52,63	50,00	13,00	3,96	50,00	2,56	198,17	2.500,00	128,25	10,17	6,58	154,00
-	50,00	14,00	-	50,00	2,64	-	2.500,00	131,95	-	6,96	155,00
8,93	50,00	14,00	2,19	50,00	2,64	109,46	2.500,00	131,95	5,78	6,96	156,00
54,05	50,00	13,00	3,99	50,00	2,56	199,50	2.500,00	128,25	10,23	6,58	157,00
-	50,00	13,00	-	50,00	2,56	-	2.500,00	128,25	-	6,58	158,00
-	50,00	13,00	-	50,00	2,56	-	2.500,00	128,25	-	6,58	159,00
-	50,00	13,00	-	50,00	2,56	-	2.500,00	128,25	-	6,58	160,00
-	50,00	13,00	-	50,00	2,56	-	2.500,00	128,25	-	6,58	161,00
-	50,00	12,00	-	50,00	2,48	-	2.500,00	124,25	-	6,17	162,00
10,10	50,00	13,00	2,31	50,00	2,56	115,63	2.500,00	128,25	5,93	6,58	163,00
-	50,00	13,00	-	50,00	2,56	-	2.500,00	128,25	-	6,58	164,00
8,85	50,00	12,00	2,18	50,00	2,48	109,02	2.500,00	124,25	5,42	6,17	165,00
-	50,00	12,00	-	50,00	2,48	-	2.500,00	124,25	-	6,17	166,00
-	50,00	12,00	-	50,00	2,48	-	2.500,00	124,25	-	6,17	167,00
20,00	50,00	12,00	3,00	50,00	2,48	149,79	2.500,00	124,25	7,44	6,17	168,00
-	100,00	7,00	-	100,00	1,95	-	10.000,00	194,59	-	3,79	169,00
-	100,00	7,00	-	100,00	1,95	-	10.000,00	194,59	-	3,79	170,00
-	100,00	6,00	-	100,00	1,79	-	10.000,00	179,18	-	3,21	171,00
-	100,00	7,00	-	100,00	1,95	-	10.000,00	194,59	-	3,79	172,00
-	100,00	8,00	-	100,00	2,08	-	10.000,00	207,94	-	4,32	173,00
-	100,00	8,00	-	100,00	2,08	-	10.000,00	207,94	-	4,32	174,00
-	100,00	7,00	-	100,00	1,95	-	10.000,00	194,59	-	3,79	175,00
-	100,00	8,00	-	100,00	2,08	-	10.000,00	207,94	-	4,32	176,00
-	100,00	9,00	-	100,00	2,20	-	10.000,00	219,72	-	4,83	177,00
-	100,00	9,00	-	100,00	2,20	-	10.000,00	219,72	-	4,83	178,00
-	100,00	8,00	-	100,00	2,08	-	10.000,00	207,94	-	4,32	179,00
-	100,00	9,00	-	100,00	2,20	-	10.000,00	219,72	-	4,83	180,00
-	100,00	10,00	-	100,00	2,30	-	10.000,00	230,26	-	5,30	181,00
-	100,00	10,00	-	100,00	2,30	-	10.000,00	230,26	-	5,30	182,00
-	100,00	9,00	-	100,00	2,20	-	10.000,00	219,72	-	4,83	183,00
-	100,00	10,00	-	100,00	2,30	-	10.000,00	230,26	-	5,30	184,00
-	100,00	11,00	-	100,00	2,40	-	10.000,00	239,79	-	5,75	185,00
-	100,00	11,00	-	100,00	2,40	-	10.000,00	239,79	-	5,75	186,00
-	100,00	10,00	-	100,00	2,30	-	10.000,00	230,26	-	5,30	187,00
18,52	100,00	11,00	2,92	100,00	2,40	291,88	10.000,00	239,79	7,00	5,75	188,00

Lineralização da Equação - Área I											
y Vaz/ km/ Ano	**d = x_1 diâ- metro**	**x_2 (idade) Ano atual - Ano implantação + 1**	**Y = ln y**	**D = X_1**	**X_2 = ln x_2**	**X_1 x Y**	**X_1^2**	**X_1 x X_2**	**X_2 x Y**	**X_2^2**	**n**
-	100,00	12,00	-	100,00	2,48	-	10.000,00	248,49	-	6,17	189,00
-	100,00	12,00	-	100,00	2,48	-	10.000,00	248,49	-	6,17	190,00
-	100,00	11,00	-	100,00	2,40	-	10.000,00	239,79	-	5,75	191,00
55,56	100,00	12,00	4,02	100,00	2,48	401,74	10.000,00	248,49	9,98	6,17	192,00
-	100,00	13,00	-	100,00	2,56	-	10.000,00	256,49	-	6,58	193,00
-	100,00	13,00	-	100,00	2,56	-	10.000,00	256,49	-	6,58	194,00
-	100,00	12,00	-	100,00	2,48	-	10.000,00	248,49	-	6,17	195,00
-	100,00	13,00	-	100,00	2,56	-	10.000,00	256,49	-	6,58	196,00
-	75,00	8,00	-	75,00	2,08	-	5.625,00	155,96	-	4,32	197,00
-	75,00	8,00	-	75,00	2,08	-	5.625,00	155,96	-	4,32	198,00
-	75,00	8,00	-	75,00	2,08	-	5.625,00	155,96	-	4,32	199,00
-	75,00	8,00	-	75,00	2,08	-	5.625,00	155,96	-	4,32	200,00
-	75,00	7,00	-	75,00	1,95	-	5.625,00	145,94	-	3,79	201,00
-	75,00	7,00	-	75,00	1,95	-	5.625,00	145,94	-	3,79	202,00
-	75,00	7,00	-	75,00	1,95	-	5.625,00	145,94	-	3,79	203,00
-	75,00	8,00	-	75,00	2,08	-	5.625,00	155,96	-	4,32	204,00
-	75,00	7,00	-	75,00	1,95	-	5.625,00	145,94	-	3,79	205,00
-	75,00	7,00	-	75,00	1,95	-	5.625,00	145,94	-	3,79	206,00
-	75,00	9,00	-	75,00	2,20	-	5.625,00	164,79	-	4,83	207,00
-	75,00	9,00	-	75,00	2,20	-	5.625,00	164,79	-	4,83	208,00
-	75,00	9,00	-	75,00	2,20	-	5.625,00	164,79	-	4,83	209,00
-	75,00	9,00	-	75,00	2,20	-	5.625,00	164,79	-	4,83	210,00
-	75,00	8,00	-	75,00	2,08	-	5.625,00	155,96	-	4,32	211,00
-	75,00	8,00	-	75,00	2,08	-	5.625,00	155,96	-	4,32	212,00
-	75,00	8,00	-	75,00	2,08	-	5.625,00	155,96	-	4,32	213,00
8,20	75,00	9,00	2,10	75,00	2,20	157,78	5.625,00	164,79	4,62	4,83	214,00
-	75,00	8,00	-	75,00	2,08	-	5.625,00	155,96	-	4,32	215,00
-	75,00	8,00	-	75,00	2,08	-	5.625,00	155,96	-	4,32	216,00
-	75,00	10,00	-	75,00	2,30	-	5.625,00	172,69	-	5,30	217,00
-	75,00	10,00	-	75,00	2,30	-	5.625,00	172,69	-	5,30	218,00
-	75,00	10,00	-	75,00	2,30	-	5.625,00	172,69	-	5,30	219,00
-	75,00	10,00	-	75,00	2,30	-	5.625,00	172,69	-	5,30	220,00
-	75,00	9,00	-	75,00	2,20	-	5.625,00	164,79	-	4,83	221,00
-	75,00	9,00	-	75,00	2,20	-	5.625,00	164,79	-	4,83	222,00
-	75,00	9,00	-	75,00	2,20	-	5.625,00	164,79	-	4,83	223,00
-	75,00	10,00	-	75,00	2,30	-	5.625,00	172,69	-	5,30	224,00
-	75,00	9,00	-	75,00	2,20	-	5.625,00	164,79	-	4,83	225,00
-	75,00	9,00	-	75,00	2,20	-	5.625,00	164,79	-	4,83	226,00

Lineralização da Equação - Área I											
y Vaz/ km/ Ano	**d = x_1 diâ- metro**	**x_2 (idade) Ano atual - Ano implantação + 1**	**Y = ln y**	**D = X_1**	**X_2 = ln x_2**	**X_1 x Y**	**X_1^2**	**X_1 x X_2**	**X_2 x Y**	**X_2^2**	**n**
-	75,00	11,00	-	75,00	2,40	-	5.625,00	179,84	-	5,75	227,00
12,05	75,00	11,00	2,49	75,00	2,40	186,67	5.625,00	179,84	5,97	5,75	228,00
-	75,00	11,00	-	75,00	2,40	-	5.625,00	179,84	-	5,75	229,00
-	75,00	11,00	-	75,00	2,40	-	5.625,00	179,84	-	5,75	230,00
23,26	75,00	10,00	3,15	75,00	2,30	235,99	5.625,00	172,69	7,25	5,30	231,00
66,67	75,00	10,00	4,20	75,00	2,30	314,98	5.625,00	172,69	9,67	5,30	232,00
21,74	75,00	10,00	3,08	75,00	2,30	230,93	5.625,00	172,69	7,09	5,30	233,00
-	75,00	11,00	-	75,00	2,40	-	5.625,00	179,84	-	5,75	234,00
-	75,00	10,00	-	75,00	2,30	-	5.625,00	172,69	-	5,30	235,00
-	75,00	10,00	-	75,00	2,30	-	5.625,00	172,69	-	5,30	236,00
-	75,00	12,00	-	75,00	2,48	-	5.625,00	186,37	-	6,17	237,00
24,10	75,00	12,00	3,18	75,00	2,48	238,65	5.625,00	186,37	7,91	6,17	238,00
-	75,00	12,00	-	75,00	2,48	-	5.625,00	186,37	-	6,17	239,00
-	75,00	12,00	-	75,00	2,48	-	5.625,00	186,37	-	6,17	240,00
46,51	75,00	11,00	3,84	75,00	2,40	287,98	5.625,00	179,84	9,21	5,75	241,00
44,44	75,00	11,00	3,79	75,00	2,40	284,57	5.625,00	179,84	9,10	5,75	242,00
43,48	75,00	11,00	3,77	75,00	2,40	282,92	5.625,00	179,84	9,05	5,75	243,00
40,98	75,00	12,00	3,71	75,00	2,48	278,49	5.625,00	186,37	9,23	6,17	244,00
8,20	75,00	11,00	2,10	75,00	2,40	157,78	5.625,00	179,84	5,04	5,75	245,00
-	75,00	11,00	-	75,00	2,40	-	5.625,00	179,84	-	5,75	246,00
29,41	75,00	13,00	3,38	75,00	2,56	253,60	5.625,00	192,37	8,67	6,58	247,00
24,10	75,00	13,00	3,18	75,00	2,56	238,65	5.625,00	192,37	8,16	6,58	248,00
-	75,00	13,00	-	75,00	2,56	-	5.625,00	192,37	-	6,58	249,00
-	75,00	13,00	-	75,00	2,56	-	5.625,00	192,37	-	6,58	250,00
23,26	75,00	12,00	3,15	75,00	2,48	235,99	5.625,00	186,37	7,82	6,17	251,00
22,22	75,00	12,00	3,10	75,00	2,48	232,58	5.625,00	186,37	7,71	6,17	252,00
43,48	75,00	12,00	3,77	75,00	2,48	282,92	5.625,00	186,37	9,37	6,17	253,00
32,79	75,00	13,00	3,49	75,00	2,56	261,75	5.625,00	192,37	8,95	6,58	254,00
24,59	75,00	12,00	3,20	75,00	2,48	240,18	5.625,00	186,37	7,96	6,17	255,00
-	75,00	12,00	-	75,00	2,48	-	5.625,00	186,37	-	6,17	256,00
-	75,00	14,00	-	75,00	2,64	-	5.625,00	197,93	-	6,96	257,00
-	75,00	14,00	-	75,00	2,64	-	5.625,00	197,93	-	6,96	258,00
45,45	75,00	14,00	3,82	75,00	2,64	286,25	5.625,00	197,93	10,07	6,96	259,00
-	75,00	14,00	-	75,00	2,64	-	5.625,00	197,93	-	6,96	260,00
23,26	75,00	13,00	3,15	75,00	2,56	235,99	5.625,00	192,37	8,07	6,58	261,00
44,44	75,00	13,00	3,79	75,00	2,56	284,57	5.625,00	192,37	9,73	6,58	262,00
-	75,00	13,00	-	75,00	2,56	-	5.625,00	192,37	-	6,58	263,00
8,20	75,00	14,00	2,10	75,00	2,64	157,78	5.625,00	197,93	5,55	6,96	264,00

Lineralização da Equação - Área I											
y Vaz/ km/ Ano	**d = x_1 diâ- metro**	**x_2 (idade) Ano atual - Ano implantação + 1**	**Y = ln y**	**D = X_1**	**X_2 = ln x_2**	**X_1 x Y**	**X_1^2**	**X_1 x X_2**	**X_2 x Y**	**X_2^2**	**n**
24,59	75,00	13,00	3,20	75,00	2,56	240,18	5.625,00	192,37	8,21	6,58	265,00
-	75,00	13,00	-	75,00	2,56	-	5.625,00	192,37	-	6,58	266,00
-	400,00	7,00	-	400,00	1,95	-	160.000,00	778,36	-	3,79	267,00
-	400,00	7,00	-	400,00	1,95	-	160.000,00	778,36	-	3,79	268,00
-	400,00	8,00	-	400,00	2,08	-	160.000,00	831,78	-	4,32	269,00
-	400,00	8,00	-	400,00	2,08	-	160.000,00	831,78	-	4,32	270,00
-	400,00	9,00	-	400,00	2,20	-	160.000,00	878,89	-	4,83	271,00
-	400,00	9,00	-	400,00	2,20	-	160.000,00	878,89	-	4,83	272,00
-	400,00	10,00	-	400,00	2,30	-	160.000,00	921,03	-	5,30	273,00
-	400,00	10,00	-	400,00	2,30	-	160.000,00	921,03	-	5,30	274,00
-	400,00	11,00	-	400,00	2,40	-	160.000,00	959,16	-	5,75	275,00
-	400,00	11,00	-	400,00	2,40	-	160.000,00	959,16	-	5,75	276,00
-	400,00	12,00	-	400,00	2,48	-	160.000,00	993,96	-	6,17	277,00
-	400,00	12,00	-	400,00	2,48	-	160.000,00	993,96	-	6,17	278,00
-	400,00	13,00	-	400,00	2,56	-	160.000,00	1.025,98	-	6,58	279,00
-	400,00	13,00	-	400,00	2,56	-	160.000,00	1.025,98	-	6,58	280,00
		∑	**224,23**	**22.050,00**	**642,60**	**13.427,14**	**3.333.750,00**	**50.546,59**	**544,13**	**1.487,68**	

Alimentando as equações 4.39, 4.40 e 4.41, teremos:

$$224{,}23 = 280A + 22.050B + 642{,}60C$$

$$13.427{,}14 = 22.050A + 3.333.750B + 50.546{,}60C$$

$$544{,}13 = 642{,}60A + 50.546{,}59B + 1.487{,}68C$$

Portanto, $A = -4{,}209$; $B = -0{,}003$ e $C = 2{,}271$.

Aplicando nas equações 4.51, 4.52, e 4.54, temos $a = e^A = 0{,}015$; $b = B = -0{,}003$ e $c = C = 2{,}271$.

Aplicando na equação 4.45, tem-se a equação que determina a taxa de falhas/rupturas para a Área 1.

$$y = 0{,}015.e^{-0{,}003x_1}.x_2^{2{,}271} \tag{4.57}$$

onde, x_1 é o diâmetro e x_2 a idade do tubo.

Área II – Vila Carvalho

A rede de distribuição da Área II possui diâmetros de 50, 75 e 100mm; e os dados históricos de rompimentos são a partir de 1999. A extensão de cada trecho foi obtida a partir da intersecção com outra rede, ou seja, a cada cruzamento de rua. .

FIGURA 5.3 – Área II - Jardim Imá

A tabela 5.11, abaixo, mostra a quantidade de vazamentos para cada trecho, ao longo dos anos.

A partir do número de vazamentos, extensão do trecho e ano de implantação obteve-se o índice vazamento/km e a idade das tubulações. As tabelas 5.12, 5.13 e 5.14, mostram os cálculos, onde L é a extensão do trecho em quilômetros; N é o número de vazamentos no ano; Y é o número de vazamentos por quilômetro; e X é a idade da tubulação no ano em questão.

Com a taxa de vazamento/km/ano, diâmetro, e idade da tubulação, alimentam-se as equações 4.39, 4.40 e 4.41, para obtenção de *a*, *b* e *c*, e determinação da equação de falhas/rupturas para a Área 1.

Na tabela 5.10, tem-se que $Y = \ln y(vaz/km/ano)$ y; $X_1 = x_1 = d(diâmetro)$; e $X_2 = \ln x_2 = \ln(idade)$.

TABELA 5.11 – Número de vazamentos por trecho e por ano para a Área II

ÁREA II	TRECHO	1.999	2.000	2.001	2.002	2.003	2.004	2.005
Av. Noroeste	1	-	-		1	7		
	2	-	-		1	3	1	1
Rua André Barros	1	-	-			6	5	1
	2	-	-		1	-	1	1
Rua São Geraldo	1	-	-					4
	2	-	1		1		3	3
Rua Canelas	1	-	-		1			1
	2	-	-	1	2		4	
Rua Borge de Medeiros	1	-	-					1
	2	-	-			1		
	3	-	-		2			
	4	-	-	1		1		2
	5	-	-				1	
Rua Farroupilha	1	-	-		1	3	3	2
	2	-	-					
	3	1	-			2	2	1
Rua Dom Pedrito	1	-	-		2	2	2	1
	2	-	-	1			2	
	3	-	-		2	3		
Rua Rosa Cruz	1	-	-	4	2			
	2	-	-					
Rua Ápia	1	-	-				2	
	2	-	-					
Tv. Ápia	1	-	-					1

TABELA 5.12 – Vazamentos por ano na Área II, para os trechos com diâmetros de 50mm

Diametro Igual a 50 mm DE PVC																							
Rua	Trecho	Implantação/ ano	L Km	1999			2000			2001			2002			2003			2004			2005		
				N	Y	X	N	Y	X	N	Y	X	N	Y	X	N	Y	X	N	Y	X	N	Y	X
Av. Noroeste	1	1994	0,107	0,00	0,00	6	0,00	0,00	7	0,00	0,00	8	1,00	9,346	9	7,00	65,421	10	0,00	0,000	11	0,00	0,000	12
Av. Noroeste	2	1994	0,059	0,00	0,00	6	0,00	0,00	7	0,00	0,00	8	1,00	16,949	9	3,00	50,847	10	1,00	16,949	11	1,00	16,949	12

TABELA 5.13 – Vazamentos por ano na Área II, para os trechos com diâmetros de 75mm

Diametro Igual a 75 mm DE PVC																							
Rua	Trecho	Implantação ano	L Km	1999			2000			2001			2002			2003			2004			2005		
				N	Y	X	N	Y	X	N	Y	X	N	Y	X	N	Y	X	N	Y	X	N	Y	X
Rua Andre Barros	1	1995	0,146	0,00	0,00	5	0,00	0,000	6	0,00	0,00	7	0,00	0,000	8	6,00	41,096	9	5,00	34,247	10	1,00	6,849	11
Rua Andre Barros	2	1995	0,059	0,00	0,00	5	0,00	0,000	6	0,00	0,00	7	1,00	16,949	8	0,00	0,000	9	1,00	16,949	10	1,00	16,949	11
Rua São Geraldo	1	1995	0,096	0,00	0,00	5	0,00	0,000	6	0,00	0,00	7	0,00	0,000	8	0,00	0,000	9	0,00	0,000	10	4,00	41,667	11
Rua São Geraldo	2	1995	0,172	0,00	0,00	5	1,00	5,814	6	0,00	0,00	7	1,00	5,814	8	0,00	0,000	9	3,00	17,442	10	3,00	17,442	11
Rua Canelas	1	1994	0,139	0,00	0,00	6	0,00	0,000	7	0,00	0,00	8	1,00	7,194	9	0,00	0,000	10	0,00	0,000	11	1,00	7,194	12
Rua Canelas	2	1994	0,126	0,00	0,00	6	0,00	0,000	7	1,00	7,94	8	2,00	15,873	9	0,00	0,000	10	4,00	31,746	11	0,00	0,000	12
Rua Farropinha	1	1994	0,104	0,00	0,00	6	0,00	0,000	7	0,00	0,00	8	1,00	9,615	9	3,00	28,846	10	3,00	28,846	11	2,00	19,231	12
Rua Farropinha	2	1994	0,056	0,00	0,00	6	0,00	0,000	7	0,00	0,00	8	0,00	0,000	9	0,00	0,000	10	0,00	0,000	11	0,00	0,000	12
Rua Farropinha	3	1994	0,067	1,00	14,93	6	0,00	0,000	7	0,00	0,00	8	0,00	0,000	9	2,00	29,851	10	2,00	29,851	11	1,00	14,925	12
Rua Dom Pedrito	1	1995	0,06	0,00	0,00	5	0,00	0,000	6	0,00	0,00	7	2,00	33,333	8	2,00	33,333	9	2,00	33,333	10	1,00	16,667	11
Rua Dom Pedrito	2	1995	0,115	0,00	0,00	5	0,00	0,000	6	1,00	8,70	7	0,00	0,000	8	0,00	0,000	9	2,00	17,391	10	0,00	0,000	11
Rua Dom Pedrito	3	1995	0,058	0,00	0,00	5	0,00	0,000	6	0,00	0,00	7	2,00	34,483	8	3,00	51,724	9	0,00	0,000	10	0,00	0,000	11
Rua Rosa Cruz	1	1994	0,131	0,00	0,00	6	0,00	0,000	7	4,00	30,53	8	2,00	15,267	9	0,00	0,000	10	0,00	0,000	11	0,00	0,000	12
Rua Rosa Cruz	2	1994	0,096	0,00	0,00	6	0,00	0,000	7	0,00	0,00	8	0,00	0,000	9	0,00	0,000	10	0,00	0,000	11	0,00	0,000	12
Rua Apia	1	1995	0,029	0,00	0,000	5	0,00	0,000	6	0,00	0,000	7	0,00	0,000	8	0,00	0,000	9	2,00	68,966	10	0,00	0,000	11
Rua Apia	2	1995	0,046	0,00	0,000	5	0,00	0,000	6	0,00	0,000	7	0,00	0,000	8	0,00	0,000	9	0,00	0,000	10	0,00	0,000	11
Rua Tv Apia	1	1995	0,034	0,00	0,000	5	0,00	0,000	6	0,00	0,000	7	0,00	0,000	8	0,00	0,000	9	0,00	0,000	10	1,00	29,412	11

TABELA 5.14 – Vazamentos por ano na Área II, para os trechos com diâmetros de 100mm

Diametro Igual a 100 mm DE PVC																							
Rua	**Trecho**	**Implantação ano**	**L Km**	**1999**			**2000**			**2001**			**2002**			**2003**			**2004**			**2005**		
				N	**Y**	**X**	**N**	**Y**	**X**	**N**	**Y**	**X**	**N**	**Y**	**X**	**N**	**Y**	**X**	**N**	**Y**	**X**	**N**	**Y**	**X**
Rua Borge De Medeiros	1	1994	0,039	0,00	0,00	6	0,00	0,00	7	0,00	0,00	8	0,00	0,00	9	0,00	0,00	10	0,00	0,00	11	1,00	25,641	12
Rua Borge De Medeiros	2	1994	0,045	0,00	0,00	6	0,00	0,00	7	0,00	0,00	8	0,00	0,00	9	1,00	22,22	10	0,00	0,00	11	0,00	0,000	12
Rua Borge De Medeiros	3	1994	0,037	0,00	0,00	6	0,00	0,00	7	0,00	0,00	8	2,00	54,05	9	0,00	0,00	10	0,00	0,00	11	0,00	0,000	12
Rua Borge De Medeiros	4	1994	0,047	0,00	0,00	6	0,00	0,00	7	1,00	21,28	8	0,00	0,00	9	1,00	21,28	10	0,00	0,00	11	2,00	42,553	12
Rua Borge De Medeiros	5	1994	0,103	0,00	0,00	6	0,00	0,00	7	0,00	0,00	8	0,00	0,00	9	0,00	0,00	10	1,00	9,71	11	0,00	0,000	12

TABELA 5.15 – Linearização para a Área II

Lineralização da Equação - Área II											
y Vaz/km/ Ano	d = x1 diâmetro	x2 (idade) Ano atual - Ano implantação + 1	Y = ln y	D = X1	X2 = ln x2	X1 x Y	X12	X1 x X2	X2 x Y	X22	n
-	75,00	5,00	-	75,00	1,61	-	5.625,00	120,71	-	2,59	1,00
-	75,00	5,00	-	75,00	1,61	-	5.625,00	120,71	-	2,59	2,00
-	75,00	5,00	-	75,00	1,61	-	5.625,00	120,71	-	2,59	3,00
-	75,00	5,00	-	75,00	1,61	-	5.625,00	120,71	-	2,59	4,00
-	75,00	6,00	-	75,00	1,79	-	5.625,00	134,38	-	3,21	5,00
-	75,00	6,00	-	75,00	1,79	-	5.625,00	134,38	-	3,21	6,00
-	75,00	6,00	-	75,00	1,79	-	5.625,00	134,38	-	3,21	7,00
-	75,00	6,00	-	75,00	1,79	-	5.625,00	134,38	-	3,21	8,00
14,93	75,00	6,00	2,70	75,00	1,79	202,73	5.625,00	134,38	4,84	3,21	9,00
-	75,00	5,00	-	75,00	1,61	-	5.625,00	120,71	-	2,59	10,00
-	75,00	5,00	-	75,00	1,61	-	5.625,00	120,71	-	2,59	11,00
-	75,00	5,00	-	75,00	1,61	-	5.625,00	120,71	-	2,59	12,00
-	75,00	6,00	-	75,00	1,79	-	5.625,00	134,38	-	3,21	13,00
-	75,00	6,00	-	75,00	1,79	-	5.625,00	134,38	-	3,21	14,00
-	75,00	5,00	-	75,00	1,61	-	5.625,00	120,71	-	2,59	15,00
-	75,00	5,00	-	75,00	1,61	-	5.625,00	120,71	-	2,59	16,00
-	75,00	5,00	-	75,00	1,61	-	5.625,00	120,71	-	2,59	17,00
-	75,00	6,00	-	75,00	1,79	-	5.625,00	134,38	-	3,21	18,00
-	75,00	6,00	-	75,00	1,79	-	5.625,00	134,38	-	3,21	19,00
-	75,00	6,00	-	75,00	1,79	-	5.625,00	134,38	-	3,21	20,00
5,81	75,00	6,00	1,76	75,00	1,79	132,02	5.625,00	134,38	3,15	3,21	21,00
-	75,00	7,00	-	75,00	1,95	-	5.625,00	145,94	-	3,79	22,00
-	75,00	7,00	-	75,00	1,95	-	5.625,00	145,94	-	3,79	23,00
-	75,00	7,00	-	75,00	1,95	-	5.625,00	145,94	-	3,79	24,00
-	75,00	7,00	-	75,00	1,95	-	5.625,00	145,94	-	3,79	25,00
-	75,00	7,00	-	75,00	1,95	-	5.625,00	145,94	-	3,79	26,00
-	75,00	6,00	-	75,00	1,79	-	5.625,00	134,38	-	3,21	27,00
-	75,00	6,00	-	75,00	1,79	-	5.625,00	134,38	-	3,21	28,00
-	75,00	6,00	-	75,00	1,79	-	5.625,00	134,38	-	3,21	29,00
-	75,00	7,00	-	75,00	1,95	-	5.625,00	145,94	-	3,79	30,00
-	75,00	7,00	-	75,00	1,95	-	5.625,00	145,94	-	3,79	31,00
-	75,00	6,00	-	75,00	1,79	-	5.625,00	134,38	-	3,21	32,00
-	75,00	6,00	-	75,00	1,79	-	5.625,00	134,38	-	3,21	33,00
-	75,00	6,00	-	75,00	1,79	-	5.625,00	134,38	-	3,21	34,00
-	75,00	7,00	-	75,00	1,95	-	5.625,00	145,94	-	3,79	35,00
-	75,00	7,00	-	75,00	1,95	-	5.625,00	145,94	-	3,79	36,00
-	75,00	7,00	-	75,00	1,95	-	5.625,00	145,94	-	3,79	37,00

Lineralização da Equação - Área 2											
y Vaz/km/ Ano	**d = x1 diâmetro**	**x2 (idade) Ano atual - Ano implantação + 1**	**Y = ln y**	**D = X1**	**X2 = ln x2**	**X1 x Y**	**X12**	**X1 x X2**	**X2 x Y**	**X22**	**n**
-	75,00	7,00	-	75,00	1,95	-	5.625,00	145,94	-	3,79	38,00
-	75,00	8,00	-	75,00	2,08	-	5.625,00	155,96	-	4,32	39,00
7,94	75,00	8,00	2,07	75,00	2,08	155,36	5.625,00	155,96	4,31	4,32	40,00
-	75,00	8,00	-	75,00	2,08	-	5.625,00	155,96	-	4,32	41,00
-	75,00	8,00	-	75,00	2,08	-	5.625,00	155,96	-	4,32	42,00
-	75,00	8,00	-	75,00	2,08	-	5.625,00	155,96	-	4,32	43,00
-	75,00	7,00	-	75,00	1,95	-	5.625,00	145,94	-	3,79	44,00
8,70	75,00	7,00	2,16	75,00	1,95	162,21	5.625,00	145,94	4,21	3,79	45,00
-	75,00	7,00	-	75,00	1,95	-	5.625,00	145,94	-	3,79	46,00
30,53	75,00	8,00	3,42	75,00	2,08	256,41	5.625,00	155,96	7,11	4,32	47,00
-	75,00	8,00	-	75,00	2,08	-	5.625,00	155,96	-	4,32	48,00
-	75,00	7,00	-	75,00	1,95	-	5.625,00	145,94	-	3,79	49,00
-	75,00	7,00	-	75,00	1,95	-	5.625,00	145,94	-	3,79	50,00
-	75,00	7,00	-	75,00	1,95	-	5.625,00	145,94	-	3,79	51,00
-	75,00	8,00	-	75,00	2,08	-	5.625,00	155,96	-	4,32	52,00
16,95	75,00	8,00	2,83	75,00	2,08	212,27	5.625,00	155,96	5,89	4,32	53,00
-	75,00	8,00	-	75,00	2,08	-	5.625,00	155,96	-	4,32	54,00
5,81	75,00	8,00	1,76	75,00	2,08	132,02	5.625,00	155,96	3,66	4,32	55,00
7,19	75,00	9,00	1,97	75,00	2,20	148,00	5.625,00	164,79	4,34	4,83	56,00
15,87	75,00	9,00	2,76	75,00	2,20	207,35	5.625,00	164,79	6,07	4,83	57,00
9,62	75,00	9,00	2,26	75,00	2,20	169,75	5.625,00	164,79	4,97	4,83	58,00
-	75,00	9,00	-	75,00	2,20	-	5.625,00	164,79	-	4,83	59,00
-	75,00	9,00	-	75,00	2,20	-	5.625,00	164,79	-	4,83	60,00
33,33	75,00	8,00	3,51	75,00	2,08	262,99	5.625,00	155,96	7,29	4,32	61,00
-	75,00	8,00	-	75,00	2,08	-	5.625,00	155,96	-	4,32	62,00
34,48	75,00	8,00	3,54	75,00	2,08	265,53	5.625,00	155,96	7,36	4,32	63,00
15,27	75,00	9,00	2,73	75,00	2,20	204,43	5.625,00	164,79	5,99	4,83	64,00
-	75,00	9,00	-	75,00	2,20	-	5.625,00	164,79	-	4,83	65,00
-	75,00	8,00	-	75,00	2,08	-	5.625,00	155,96	-	4,32	66,00
-	75,00	8,00	-	75,00	2,08	-	5.625,00	155,96	-	4,32	67,00
-	75,00	8,00	-	75,00	2,08	-	5.625,00	155,96	-	4,32	68,00
41,10	75,00	9,00	3,72	75,00	2,20	278,69	5.625,00	164,79	8,16	4,83	69,00
-	75,00	9,00	-	75,00	2,20	-	5.625,00	164,79	-	4,83	70,00
-	75,00	9,00	-	75,00	2,20	-	5.625,00	164,79	-	4,83	71,00
-	75,00	9,00	-	75,00	2,20	-	5.625,00	164,79	-	4,83	72,00
-	75,00	10,00	-	75,00	2,30	-	5.625,00	172,69	-	5,30	73,00
-	75,00	10,00	-	75,00	2,30	-	5.625,00	172,69	-	5,30	74,00
28,85	75,00	10,00	3,36	75,00	2,30	252,15	5.625,00	172,69	7,74	5,30	75,00

Lineralização da Equação - Área II											
y Vaz/km/ Ano	**d = x1 diâmetro**	**x2 (idade) Ano atual - Ano implantação + 1**	**Y = ln y**	**D = X1**	**X2 = ln x2**	**X1 x Y**	**X12**	**X1 x X2**	**X2 x Y**	**X22**	**n**
-29,85	75,00	10,00	-	75,00	2,30	-	5.625,00	172,69	-	5,30	76,00
33,33	75,00	10,00	3,40	75,00	2,30	254,72	5.625,00	172,69	7,82	5,30	77,00
-	75,00	9,00	3,51	75,00	2,20	262,99	5.625,00	164,79	7,70	4,83	78,00
51,72	75,00	9,00	-	75,00	2,20	-	5.625,00	164,79	-	4,83	79,00
-	75,00	9,00	3,95	75,00	2,20	295,94	5.625,00	164,79	8,67	4,83	80,00
-	75,00	10,00	-	75,00	2,30	-	5.625,00	172,69	-	5,30	81,00
-	75,00	10,00	-	75,00	2,30	-	5.625,00	172,69	-	5,30	82,00
-	75,00	9,00	-	75,00	2,20	-	5.625,00	164,79	-	4,83	83,00
-	75,00	9,00	-	75,00	2,20	-	5.625,00	164,79	-	4,83	84,00
-	75,00	9,00	-	75,00	2,20	-	5.625,00	164,79	-	4,83	85,00
34,25	75,00	10,00	3,53	75,00	2,30	265,02	5.625,00	172,69	8,14	5,30	86,00
16,95	75,00	10,00	2,83	75,00	2,30	212,27	5.625,00	172,69	6,52	5,30	87,00
-	75,00	10,00	-	75,00	2,30	-	5.625,00	172,69	-	5,30	88,00
17,44	75,00	10,00	2,86	75,00	2,30	214,42	5.625,00	172,69	6,58	5,30	89,00
-	75,00	11,00	-	75,00	2,40	-	5.625,00	179,84	-	5,75	90,00
31,75	75,00	11,00	3,46	75,00	2,40	259,33	5.625,00	179,84	8,29	5,75	91,00
28,85	75,00	11,00	3,36	75,00	2,40	252,15	5.625,00	179,84	8,06	5,75	92,00
-	75,00	11,00	-	75,00	2,40	-	5.625,00	179,84	-	5,75	93,00
29,85	75,00	11,00	3,40	75,00	2,40	254,72	5.625,00	179,84	8,14	5,75	94,00
33,33	75,00	10,00	3,51	75,00	2,30	262,99	5.625,00	172,69	8,07	5,30	95,00
17,39	75,00	10,00	2,86	75,00	2,30	214,20	5.625,00	172,69	6,58	5,30	96,00
-	75,00	10,00	-	75,00	2,30	-	5.625,00	172,69	-	5,30	97,00
-	75,00	11,00	-	75,00	2,40	-	5.625,00	179,84	-	5,75	98,00
-	75,00	11,00	-	75,00	2,40	-	5.625,00	179,84	-	5,75	99,00
68,97	75,00	10,00	4,23	75,00	2,30	317,52	5.625,00	172,69	9,75	5,30	100,00
-	75,00	10,00	-	75,00	2,30	-	5.625,00	172,69	-	5,30	101,00
-	75,00	10,00	-	75,00	2,30	-	5.625,00	172,69	-	5,30	102,00
6,85	75,00	11,00	1,92	75,00	2,40	144,31	5.625,00	179,84	4,61	5,75	103,00
16,95	75,00	11,00	2,83	75,00	2,40	212,27	5.625,00	179,84	6,79	5,75	104,00
41,67	75,00	11,00	3,73	75,00	2,40	279,73	5.625,00	179,84	8,94	5,75	105,00
17,44	75,00	11,00	2,86	75,00	2,40	214,42	5.625,00	179,84	6,86	5,75	106,00
7,19	75,00	12,00	1,97	75,00	2,48	148,00	5.625,00	186,37	4,90	6,17	107,00
-	75,00	12,00	-	75,00	2,48	-	5.625,00	186,37	-	6,17	108,00
19,23	75,00	12,00	2,96	75,00	2,48	221,74	5.625,00	186,37	7,35	6,17	109,00
-	75,00	12,00	-	75,00	2,48	-	5.625,00	186,37	-	6,17	110,00
14,93	75,00	12,00	2,70	75,00	2,48	202,73	5.625,00	186,37	6,72	6,17	111,00
16,67	75,00	11,00	2,81	75,00	2,40	211,01	5.625,00	179,84	6,75	5,75	112,00

Lineralização da Equação - Área II											
y Vaz/km/ Ano	**d = x1 diâmetro**	**x2 (idade) Ano atual - Ano implantação + 1**	**Y = ln y**	**D = X1**	**X2 = ln x2**	**X1 x Y**	**X12**	**X1 x X2**	**X2 x Y**	**X22**	**n**
-	75,00	11,00	-	75,00	2,40	-	5.625,00	179,84	-	5,75	113,00
-	75,00	11,00	-	75,00	2,40	-	5.625,00	179,84	-	5,75	114,00
-	75,00	12,00	-	75,00	2,48	-	5.625,00	186,37	-	6,17	115,00
-	75,00	12,00	-	75,00	2,48	-	5.625,00	186,37	-	6,17	116,00
-	75,00	11,00	-	75,00	2,40	-	5.625,00	179,84	-	5,75	117,00
-	75,00	11,00	-	75,00	2,40	-	5.625,00	179,84	-	5,75	118,00
29,41	75,00	11,00	3,38	75,00	2,40	253,60	5.625,00	179,84	8,11	5,75	119,00
-	100,00	6,00	-	100,00	1,79	-	10.000,00	179,18	-	3,21	120,00
-	100,00	6,00	-	100,00	1,79	-	10.000,00	179,18	-	3,21	121,00
-	100,00	6,00	-	100,00	1,79	-	10.000,00	179,18	-	3,21	122,00
-	100,00	6,00	-	100,00	1,79	-	10.000,00	179,18	-	3,21	123,00
-	100,00	6,00	-	100,00	1,79	-	10.000,00	179,18	-	3,21	124,00
-	100,00	7,00	-	100,00	1,95	-	10.000,00	194,59	-	3,79	125,00
-	100,00	7,00	-	100,00	1,95	-	10.000,00	194,59	-	3,79	126,00
-	100,00	7,00	-	100,00	1,95	-	10.000,00	194,59	-	3,79	127,00
-	100,00	7,00	-	100,00	1,95	-	10.000,00	194,59	-	3,79	128,00
-	100,00	7,00	-	100,00	1,95	-	10.000,00	194,59	-	3,79	129,00
-	100,00	8,00	-	100,00	2,08	-	10.000,00	207,94	-	4,32	130,00
-	100,00	8,00	-	100,00	2,08	-	10.000,00	207,94	-	4,32	131,00
-	100,00	8,00	-	100,00	2,08	-	10.000,00	207,94	-	4,32	132,00
21,28	100,00	8,00	3,06	100,00	2,08	305,76	10.000,00	207,94	6,36	4,32	133,00
-	100,00	8,00	-	100,00	2,08	-	10.000,00	207,94	-	4,32	134,00
-	100,00	9,00	-	100,00	2,20	-	10.000,00	219,72	-	4,83	135,00
-	100,00	9,00	-	100,00	2,20	-	10.000,00	219,72	-	4,83	136,00
54,05	100,00	9,00	3,99	100,00	2,20	399,00	10.000,00	219,72	8,77	4,83	137,00
-	100,00	9,00	-	100,00	2,20	-	10.000,00	219,72	-	4,83	138,00
-	100,00	9,00	-	100,00	2,20	-	10.000,00	219,72	-	4,83	139,00
-	100,00	10,00	-	100,00	2,30	-	10.000,00	230,26	-	5,30	140,00
22,22	100,00	10,00	3,10	100,00	2,30	310,11	10.000,00	230,26	7,14	5,30	141,00
-	100,00	10,00	-	100,00	2,30	-	10.000,00	230,26	-	5,30	142,00
21,28	100,00	10,00	3,06	100,00	2,30	305,76	10.000,00	230,26	7,04	5,30	143,00
-	100,00	10,00	-	100,00	2,30	-	10.000,00	230,26	-	5,30	144,00
-	100,00	11,00	-	100,00	2,40	-	10.000,00	239,79	-	5,75	145,00
-	100,00	11,00	-	100,00	2,40	-	10.000,00	239,79	-	5,75	146,00
-	100,00	11,00	-	100,00	2,40	-	10.000,00	239,79	-	5,75	147,00
-	100,00	11,00	-	100,00	2,40	-	10.000,00	239,79	-	5,75	148,00
9,71 25,64	100,00	11,00	2,27	100,00	2,40	227,30	10.000,00	239,79	5,45	5,75	149,00

	100,00	12,00	3,24	100,00	2,48	324,42	10.000,00	248,49	8,06	6,17	150,00

Lineralização da Equação - Área II											
y Vaz/km/ Ano	**d = x1 diâmetro**	**x2 (idade) Ano atual - Ano implantação + 1**	**Y = ln y**	**D = X1**	**X2 = ln x2**	**X1 x Y**	**X12**	**X1 x X2**	**X2 x Y**	**X22**	**n**
-	100,00	12,00	-	100,00	2,48	-	10.000,00	248,49	-	6,17	151,00
-	100,00	12,00	-	100,00	2,48	-	10.000,00	248,49	-	6,17	152,00
42,55	100,00	12,00	3,75	100,00	2,48	375,08	10.000,00	248,49	9,32	6,17	153,00
-	100,00	12,00	-	100,00	2,48	-	10.000,00	248,49	-	6,17	154,00
-	50,00	6,00	-	50,00	1,79	-	2.500,00	89,59	-	3,21	155,00
-	50,00	6,00	-	50,00	1,79	-	2.500,00	89,59	-	3,21	156,00
-	50,00	7,00	-	50,00	1,95	-	2.500,00	97,30	-	3,79	157,00
-	50,00	7,00	-	50,00	1,95	-	2.500,00	97,30	-	3,79	158,00
-	50,00	8,00	-	50,00	2,08	-	2.500,00	103,97	-	4,32	159,00
-	50,00	8,00	-	50,00	2,08	-	2.500,00	103,97	-	4,32	160,00
9,35	50,00	9,00	2,23	50,00	2,20	111,75	2.500,00	109,86	4,91	4,83	161,00
16,95	50,00	9,00	2,83	50,00	2,20	141,51	2.500,00	109,86	6,22	4,83	162,00
65,42	50,00	10,00	4,18	50,00	2,30	209,04	2.500,00	115,13	9,63	5,30	163,00
50,85	50,00	10,00	3,93	50,00	2,30	196,44	2.500,00	115,13	9,05	5,30	164,00
-	50,00	11,00	-	50,00	2,40	-	2.500,00	119,89	-	5,75	165,00
16,95	50,00	11,00	2,83	50,00	2,40	141,51	2.500,00	119,89	6,79	5,75	166,00
-	50,00	12,00	-	50,00	2,48	-	2.500,00	124,25	-	6,17	167,00
16,95	50,00	12,00	2,83	50,00	2,48	141,51	2.500,00	124,25	7,03	6,17	168,00
		Σ	**147,92**	**13.125,00**	**356,04**	**11.185,16**	**1.054.375,00**	**27.842,88**	**336,21**	**765,16**	

Alimentando as equações 4.39, 4.40 e 4.41, teremos:

$$147{,}92 = 168A + 13.125B + 356{,}04C$$

$$11.185{,}16 = 13.125A + 1.054.475B + 27.842{,}88C$$

$$336{,}21 = 356{,}04A + 27.842{,}88B + 765{,}16C$$

Portanto A = -0,533; B = -0,014; e C = 1,180.

Aplicando nas equações 4.51, 4.52, e 4.54, temos $a = e^{A} = 0{,}587$; $b = B = -0{,}014$; e $c = C = 1{,}180$.

Aplicando na equação 4.41, tem-se a equação que determina a taxa de falhas/rupturas para a Área 2.

$$y = 0{,}587.e^{-0{,}014.x_1}.x_2^{1{,}180} \qquad (4.58)$$

Onde, x_1 é o diâmetro e x_2 a idade do tubo.

Comparativo entre as equações de falhas/rupturas

As equações 4.36, 4.57 e 4.58, teoricamente deveriam levar aos mesmos resultados; mas informações particulares podem influenciar na escolha soluções do modelo. Maiores taxas de falhas levam a reabilitações antecipadas.

DANDY e ENGELHARDT (2001) obtiveram a equação 4.36 em função de dados obtidos em uma parte do sistema de distribuição de água da cidade de Adelaide, na costa sul da Austrália.

As características de temperatura, pressão, componentes de fabricação do material, resistência, tipo de solo, e forma de assentamento são alguns dos fatores que influenciam na eficiência do material. Por esta razão, é conveniente que, sempre que um sistema for selecionado para determinação da reabilitação otimizada, através da técnica dos algoritmos genéticos, a equação de falhas seja determinada; ou, que seja utilizada uma equação conhecida de uma rede com características semelhantes a em estudo.

As figuras 5.4 e 5.5 mostram a diferença entre taxas de rupturas de três sistemas distintos.

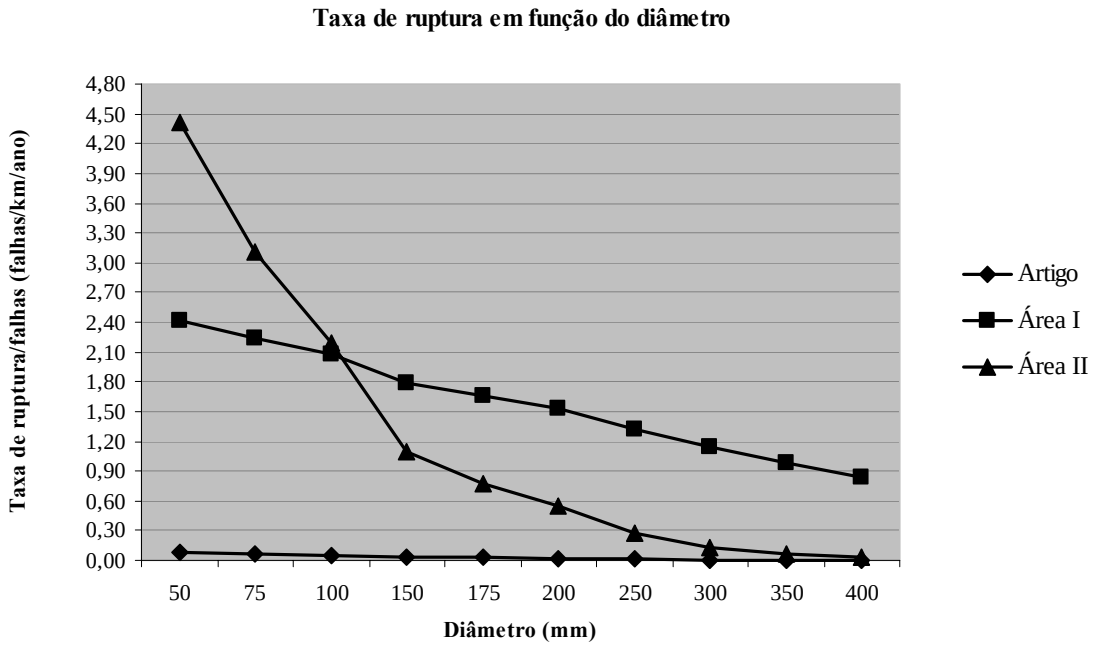

FIGURA 5.4 – Taxas de rupturas em função do diâmetro, para três sistemas distintos.

Embora os custos operacionais obtidos tenham sido para diâmetros até 150mm, pode-se admitir que para diâmetros superiores os custos seguirão a tendência acima. Para diâmetros maiores, onde não há tanta intervenção, a tendência mostrada em dados históricos evidencia o que mostra a figura 5.4, ou seja, quanto maior o diâmetro menor a taxa de ruptura.

Os sistemas brasileiros (Área I e Área II) possuem taxas maiores que o sistema australiano (DANDY e ENGELHARDT (2001)). No Brasil as perdas são maiores que em países desenvolvidos, podendo ser, também, um dos fatores que contribuem para essas taxas.

Independente do sistema, fatores como idade e diâmetro do material interferem diretamente na taxas de rupturas. Quanto maior o diâmetro, menor a taxa de falhas. Quanto mais antiga a rede, mais aumenta a probabilidade de rompimentos.

Diâmetros maiores geralmente são usados como anéis de distribuição, submetendo-se em quantidade menores de intervenções, seja para novas ligações ou pequenas extensões. Geralmente isso acontece com mais freqüência em diâmetros de 50 a 100mm. Observem na figura 5.4, que há uma queda na taxa a partir do diâmetro de 150mm.

Quanto mais antiga a rede, mais aumenta a probabilidade de ruptura, isso em geral, é influenciado pelo estresse acumulado ao longo dos anos. A figura 5.5 ilustra essa tendência.

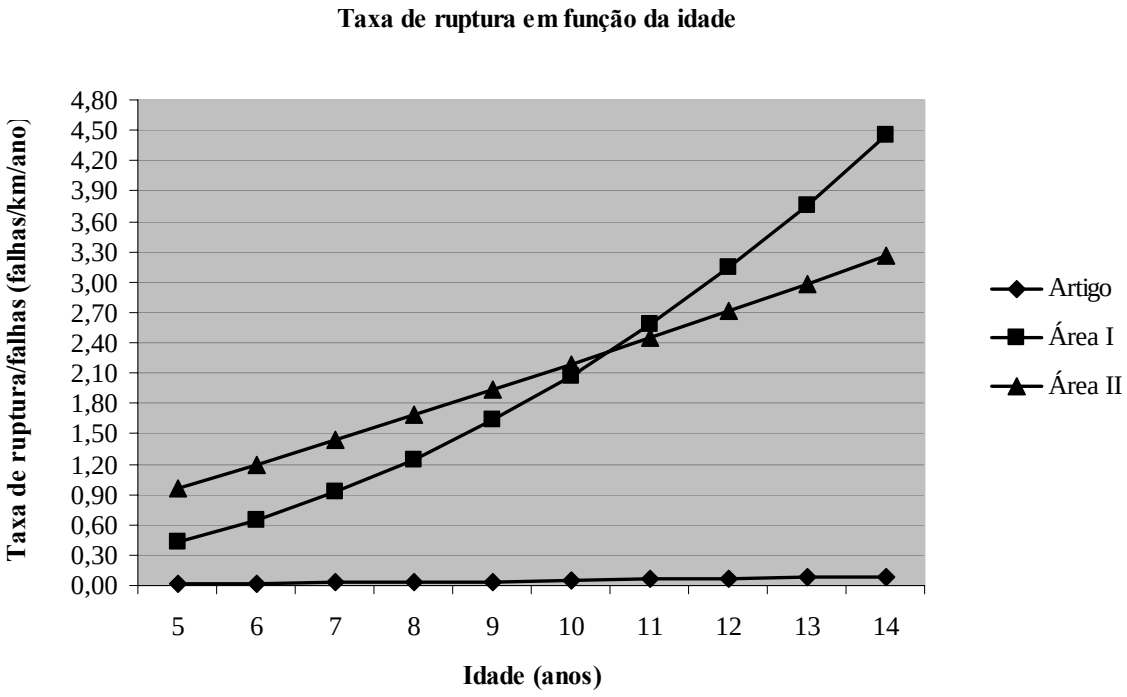

FIGURA 5.5 – Taxas de rupturas em função da idade, para três sistemas distintos.

5.3 Simulação do modelo proposto de viabilidade otimizada para a rede exemplo

Considerações e parâmetros utilizados no algoritmo genético

Conforme apresentado no item 4.4 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 tabela 5.3 apresenta os parâmetros adotados nesta pesquisa. A probabilidade de recombinação dos elementos selecionados que resultou em melhores resultados foi a taxa de recombinação P_c = 0,90. As simulações com melhores resultados foram aquelas com probabilidade de mutação mais alta, em torno de 0,70.

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, foi a variável custo, com a aplicação das equações 4.29, 4.30 e 4.31.

A equação 4.57 obtida para a Área I, foi adotada para obtenção de BR (taxa de falhas) para aplicação nas equações 4.26 e 4.27.

Soluções obtidas

Foram selecionadas três soluções otimizadas, obtidas através do programa desenvolvido em Delphi, utilizando a técnica dos algoritmos genéticos. A simulação utilizou-se da estratégia elitista, garantindo a passagem para a geração seguinte dos 5 melhores elementos da geração, e considerando uma população de 100 elementos e 50.000 gerações.

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-Willians com a constante numérica de conversão ω = 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.

Neste exemplo simples, com 8 trechos e 14 diâmetros discretos de tubulação possíveis, e 10 períodos possíveis o espaço total de soluções compreende 14^8 x10^8 = 1,47x10^{17} 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 100x50.000=5.000.000 validações. Essas validações correspondem a aproximadamente 3,40x10^{-9} % do espaço de busca.

O programa aplicado para simulação do modelo proposto utilizando a técnica dos algoritmos genéticos encontra-se nos anexos A e B.

A alternativa "ótima" de reabilitação resultou em uma solução com custo de R$647.171,32.

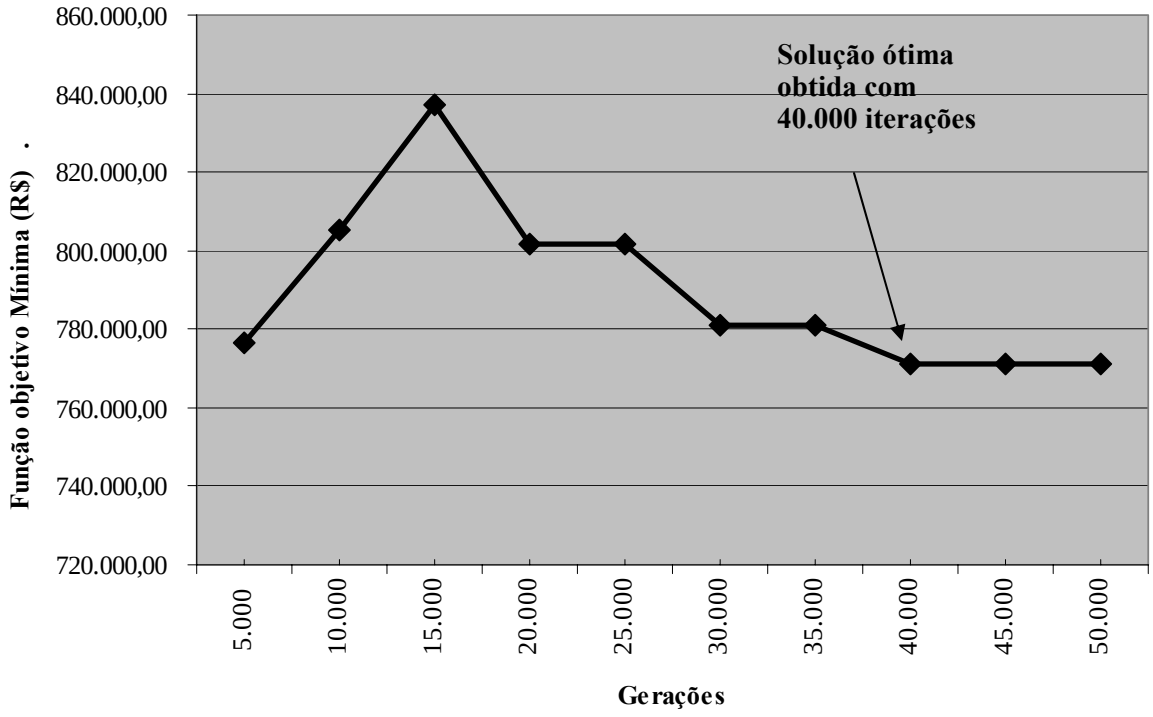

FIGURA 5.6 – Variação da função-objetivo mínima ao longo das gerações (rede exemplo).

Para ilustrar esta possibilidade, é apresentado na Tabela 5.16 um conjunto de configurações contendo soluções otimizadas obtidas nesta pesquisa, com a solução de menor custo denominada ótima e algumas outras de soluções sub-ótimas. Isso demonstra que a técnica dos algoritmos genéticos fornece não apenas uma solução ótima, mas *n* soluções

otimizadas, que poderão ser elencadas de acordo com a necessidade e disponibilidade do momento.

A tabela 5.16 descreve que o trecho1, de 1.000 metros de extensão, de DN 25mm, deverá ser substituído por uma outra rede de mesmo material, mesma extensão, e DN 250mm, no sexto período. Da mesma forma segue a interpretação dos demais trechos.

Os resultados demonstram que alguns trechos deverão ser substituídos por diâmetros muito distintos, o que pode sugerir erros de projeto. Em casos onde o sistema encontra-se em fase de concepção ou projeto executivo, o mesmo pode ser aferido com a técnica apresentada nesta pesquisa.

As alturas manométricas nos nós e as vazões nos trechos da rede exemplo, para as soluções ótimas e sub-ótimas, estão apresentadas respectivamente nas tabelas 5.17 e 5.18.

TABELA 5.16 – Conjunto de soluções otimizadas obtidas para a rede exemplo.

Trecho n°	**L (m)**	**Dn Original (mm)**	**Solução Ótima R$ 647.171,32**		**Solução Sub-ótima 1 R$ 771.120,81**		**Solução Sub-ótima 2 R$ 882.268,94**	
			Dn (mm)	**Período**	**Dn (mm)**	**Período**	**Dn (mm)**	**Período**
1	1.000	25	250	6	250	4	275	9
2	1.000	50	125	10	50	6	225	9
3	1.000	75	225	8	225	6	150	2
4	1.000	100	175	5	225	9	250	10
5	1.000	125	250	5	250	8	200	10
6	1.000	150	350	10	225	10	25	2
7	1.000	175	75	6	125	5	225	9
8	1.000	200	125	10	200	9	250	9

TABELA 5.17 – Altura manométrica nos nós.

Nó n°	Hman Original (m)	Solução Ótima	Solução Sub-ótima 1	Solução Sub-ótima 2
		Hman (m)	Hman (m)	Hman o(m)
1	150	198	198	203
2	160	171	172	191
3	150	171	172	182
4	155	181	179	182
5	160	170	170	180
6	165	178	177	180

Observa-se que todas as pressões atendem as restrições mínimas estabelecidas e as vazões garantem a continuidade do sistema.

Desprende-se dos resultados obtidos que o modelo proposto de reabilitação otimizada de redes de distribuição de água demonstrou ser uma ferramenta eficaz na obtenção das alternativas otimizadas.

TABELA 5.18 – Vazão nos trechos.

Trecho n°	Solução Ótima	Solução Sub-ótima 1	Solução Sub-ótima 2
	Q (m^3/s)	Q (m^3/s)	Q (m^3/s)
1	0,312	0,312	0,312
2	0,023	0,002	0,216
3	0,261	0,282	0,068
4	0,083	0,156	0,014
5	0,145	0,092	0,021
6	0,054	0,001	0,071
7	0,005	0,026	0,188
8	0,002	0,055	0,127

6. CONCLUSÕES

Todos os sistemas de abastecimento de água estão expostos a problemas ambientais e de origem humana, o que pode causar falhas na distribuição e acelerar a deterioração. Uma estratégia de reabilitação é necessária para permitir decisões sobre os trabalhos importantes, exigidos para aliviar estes problemas. Esta estratégia precisa representar as propriedades físicas do sistema com precisão e predizer como o sistema se deteriorará no futuro.

Esta pesquisa apresenta um modelo para otimização 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 reabilitação com menores custos, avaliando o comportamento e as variações dos parâmetros da técnica dos algoritmos genéticos.

Duas redes reais foram utilizadas para levantamento das equações de falhas. Essas equações são importantes para implementação do modelo proposto, e poderão ser aplicadas em outros estudos. Sem elas os resultados poderão não representar adequadamente alternativas otimizadas de reabilitação. Retratando duas redes tipicamente brasileiras, essas equações servem como referência nacional de dados.

As simulações apresentaram resultados satisfatórios, atendendo aos parâmetros de pressão, altura manométrica e custos.

O modelo mostrou ser apropriado para a reabilitação de redes de distribuição de água a utilização da técnica dos algoritmos genéticos, como uma ferramenta eficaz na obtenção de resultados otimizados.

A técnica dos algoritmos genéticos permitiu obter soluções otimizadas com menores iterações que as teoricamente necessárias utilizando métodos convencionais, ou seja, com apenas $3{,}40 \times 10^{-9}$ % do espaço de busca, obteve-se as respostas esperadas.

Finalmente, a técnica dos algorítmicos genéticos provou ser um instrumento eficiente de pesquisa, e para aplicação em sistemas reais para obtenção de resultados confiáveis em tempos mínimos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALPEROVITS, A.; SHAMIR, U. - Design of optimal water distribution systems. Water Resources Research, Vol. 13, nº 6, p. 885-900. Dezembro 1977.

BUCKLES, B.P. - Genetic Algoritms. 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.; SANTANA, C.W.S. – Calibração automática do tank model via algoritmos genéticos. Trabalho apresentado no XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Aracaju. 2001.

CHANDRASHEKAR, M., STEWART, K.H. – Sparsity oriented analysis of large pipe networks. Journal of the Hidraulic Division, Vol. 101, nº HY4, p. 341-355, 1975.

CHEUNG, P.B. Curso de introdução aos algoritmos genéticos. UFMS/USP. Março 2002.

CHEUNG, P.B.; REIS, L.F.R.; FORMIGA, K.T.M.; CHAUDHRY, F.H.; TICONA, W.C. – Multiobjective evolutionary algorithms applied to the rehabilitation of a water distribution system: A comparative study. Second International Conference on Evolutionary Multi-criterion Optimization. Universidade do Algarve, Faro, Portugal (8-11 Abril), 2003.

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.

DANDY, G.C.; ENGELHARDT, M. – Optimal scheduling of water pipe replacement using genetic algorithms. Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 127, n° 4, p. 214-223, Julho/Agosto 2001.

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.

GAMEIRO, R.C.P.G. – Dimensionamento otimizado de redes de distribuição de água com a utilização de algoritmos genéticos. Dissertação de Mestrado, UFMS. 2003.

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 parallelim. The proceedings of the third international conference on genetic algoritms. Morgan Kaufmann Publishers, San Mateo, California. 1989.

HALHAL, D.; WATERS, G.A.; OUAZAR, D.; SAVIC, D.A. – Scheduling of water distribution system rehabilitation using structured messy genetic algorithms. Massachucetts institute of Technology - Evolutionary Computation, Vol. 7, n° 3, p. 311-329, 1999.

ISAACS, L.T.; MILLS, K. G. – Linear theory methods for pipe network analysis. Journal of the Hydraulic Division, Vol. 106, n° HY12, p. 1191-1201, 1980.

KIM, J.H.; MAYS, L.W. – Optimal rehabilitation model for water-distribution systems. Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 120, n° 5, p. 674-692, Setembro/Outubro 1994.

KIM, J.H.; MAYS, L.W. – Rehabilitation and replacement of water distribution system components considering uncertainties. Stochastic Hydrology and Hidraulics, n° 4(1990), p. 277-294. Springer-Verlag, 1990.

KLEINER, Y.; ADAMS, B.J.; ROGERS, J.S. – Long-term planning methodology water distribution system rehabilitation. Water Resources Research, Vol. 34, n° 8, p. 2039-2051, Agosto 1998a.

KLEINER, Y.; ADAMS, B.J.; ROGERS, J.S. – Selection and scheduling of rehabilitation alternatives for water distribution systems. Water Resources Research, Vol. 34, n° 8, p. 2053-2061, Agosto 1998b.

KLEINER, Y.; ADAMS, B.J.; ROGERS J.S. – Water distribution network renewal planning. Journal of Computing in Civil Engineering, Vol. 15, p. 15-26, n° 1, Janeiro 2001.

LAM, C.F., WOLLA, M.L. – Computer analysis of water distribution systems. Part 1 – Formulation of equations. Journal of the Hydraulics Division, Vol. 98, n° HY2, p. 335-344, 1972.

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, Fevereiro1997

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.

NETO, P.L.O.C. – Estatística. Editora Edgard Blücher Ltda, 1977.

QUIMPO, R.G.; SHAMSI, U.M. – Reliability-Based distribution system maintenance. Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 117, n° 3, p. 321-339, Maio/Junho 1991.

REIS, L.F.R.; PORTO, R.M.; CHAUDHRY, F.H.- Optimal location of control valves in pipe netwoks 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.

SAVIC, D.A.; WALTERS, G.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.

SCHAETZEN, W.; RANDALL M.J.; SAVIC, D.; WATERS, G.A. – A genetic algorithm approach for rehabilitation in water supply systems. International Conference Rehabilitation Technology for the Water Industry, session 5, p. 1-11, Lille, França, 23/25 Março 1998.

SCHNEITER, C.R.; YACOV Y.H.; LI, D. LAMBERT, J.H. – Capacity reliability of water distribution networks and optimum rehabilitation decision making. Water Resources Research, Vol. 32, n° 7, p. 2271-2278, Julho 1996.

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 (AG's). Trabalho apresentado no XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Aracaju. 2001.

SIMPSON, A.R.; DANDY, G.C.; MURPHY, L.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.

WALSKI, T.M.; ASCE, A.M. – Economic Analysis of Rehabilitation of Water Mains. Journal of the Water Resources Planning and Management Division, Vol. 108, n° WR3, p. 296-308, Outubro 1982.

WALTERS, G.A.; HALHAL, D.; SAVIC, D.; OUAZAR, D. – Improved design of “Anytown” distribution network using structured messy genetic algorithms. Elsevier Science Ltd. - Urban Water, n° 1, p. 23-38, 1999.

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.

WU, Z.Y.; SIMPSON, A.R. – Competent genetic-evolutionary optimization of water distribution systems. Journal of Computing in Civil Engineering, Vol. 15, n° 2, p. 89-101, Abril 2001.

8. ANEXOS

8.1 Anexo A – *Unit 1*

Programa computacional para obtenção de reabilitação otimizada utilizando a técnica dos algoritmos genéticos – *Unit 1*.

```
unit Unit1;

interface

uses

Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs, StdCtrls;

type

TForm1 = class(TForm)

Memo1: TMemo;

Memo2: TMemo;

Button1: TButton;

Button2: TButton;

Memo3: TMemo;

procedure Button2Click(Sender: TObject);

procedure Button1Click(Sender: TObject);

private

{ Private declarations }

public

{ Public declarations }

end;

var

Form1: TForm1;

implementation
```

```
{$R *.DFM}

uses unit2;

{*********************************************************************}

{*********************************************************************}

{ Simulador Hidráulico de Sistemas de Distribuição de Águas }

{ Algoritmo baseado em SOUZA (1994) }

{*********************************************************************}

{*********************************************************************}

procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);

var t,n,r:integer;

gama,BCF,tj:real;

DN,CH,H,HR,Q,HK,H1,LT,AH,CAH,QA,AHK,S1,M2,S2,hkk,qt:Vet;

AR,AT,CM,CA,CA1,K,A:Mat;

{variaveis do AG}

DD1,C,BC,DF,BC2 : array[1..14] of real;

DE,X,X2: array[1..8] of real;

PT: array[1..11] of real;

pressao,cota: array[1..6] of real;

fObjetivo,fPenalidade,fAptidao1,fAptidao2,Aux,prob,acum: array[1..1000] of real;

V,pai1,pai2,TPVN,TE,TN,TV: array[1..1000,1..8] of integer;

PVOB,PVNB,NPR,BR,Cmt,BR2: array[1..1000,1..8]of real;

npop,nit,elit,i1,i2,k1,k2,k3,j1,e1,e2,g1,it,flag,w1,w3,w2,compara1,r1,r2:integer;

rd,rd1,maximo,compara,somaApt,soma,pc,pm,r3,minimo,residuo,penal:real;

begin

{********************* ENTRADA DE DADOS ***************************}

t:=8; {Número de Trechos}
```

n:=6; *{Número de Nós}*

r:=1; *{Número de Reservatórios}*

BCF:=0.50; *{Fator De Custo Do Rompimento }*

tj:=0.01;

gama:=1;

{Matriz Incidência A}

A[1,1]:=1; A[1,2]:=0; A[1,3]:=0;

A[1,4]:=0; A[1,5]:=0; A[1,6]:=0;

A[2,1]:=-1; A[2,2]:=1; A[2,3]:=0;

A[2,4]:=0; A[2,5]:=0; A[2,6]:=0;

A[3,1]:=-1; A[3,2]:=0; A[3,3]:=0;

A[3,4]:=1; A[3,5]:=0; A[3,6]:=0;

A[4,1]:=0; A[4,2]:=0; A[4,3]:=1;

A[4,4]:=-1; A[4,5]:=0; A[4,6]:=0;

A[5,1]:=0; A[5,2]:=0; A[5,3]:=0;

A[5,4]:=-1; A[5,5]:=0; A[5,6]:=1;

A[6,1]:=0; A[6,2]:=0; A[6,3]:=0;

A[6,4]:=0; A[6,5]:=1; A[6,6]:=-1;

A[7,1]:=0; A[7,2]:=-1; A[7,3]:=1;

A[7,4]:=0; A[7,5]:=0; A[7,6]:=0;

A[8,1]:=0; A[8,2]:=0; A[8,3]:=-1;

A[8,4]:=0; A[8,5]:=1; A[8,6]:=0;

{Matriz Ar}

AR[1,1]:=-1; AR[2,1]:=0; AR[3,1]:=0; AR[4,1]:=0;

AR[5,1]:=0; AR[6,1]:=0; AR[7,1]:=0; AR[8,1]:=0;

{Comprimentos}

LT[1]:=1000; LT[2]:=1000; LT[3]:=1000; LT[4]:=1000;

LT[5]:=1000; LT[6]:=1000; LT[7]:=1000; LT[8]:=1000;

{Coeficiente de Hazen-Williams}

CH[1]:=130; CH[2]:=130; CH[3]:=130; CH[4]:=130;

CH[5]:=130; CH[6]:=130; CH[7]:=130; CH[8]:=130;

{Demanda nos Nós}

Q[1]:=0.02778;

Q[2]:=0.02778;

Q[3]:=0.07500;

Q[4]:=0.03333;

Q[5]:=0.05556;

Q[6]:=0.09167;

{Energia do Reservatório}

HR[1]:=210;

{Cota dos Nós}

cota[1]:=150;

cota[2]:=160;

cota[3]:=150;

cota[4]:=155;

cota[5]:=160;

cota[6]:=165;

{Diâmetros Possíveis}

DD1[1]:=1*0.0254;

DD1[2]:=2*0.0254;

DD1[3]:=3*0.0254;

DD1[4]:=4*0.0254;

```
DD1[5]:=6*0.0254;
DD1[6]:=8*0.0254;
DD1[7]:=10*0.0254;
DD1[8]:=12*0.0254;
DD1[9]:=14*0.0254;
DD1[10]:=16*0.0254;
DD1[11]:=18*0.0254;
DD1[12]:=20*0.0254;
DD1[13]:=22*0.0254;
DD1[14]:=24*0.0254;
{Diâmetros Existentes}
DE[1]:=1*0.0254;
DE[2]:=2*0.0254;
DE[3]:=3*0.0254;
DE[4]:=4*0.0254;
DE[5]:=5*0.0254;
DE[6]:=6*0.0254;
DE[7]:=7*0.0254;
DE[8]:=8*0.0254;
{Idade do Tubo Existentes}
X[1]:=8;
X[2]:=7;
X[3]:=5;
X[4]:=8;
X[5]:=7;
X[6]:=16;
```

```
X[7]:=5;

X[8]:=18;

{ Período do tempo de reabilitação da tubulação}

PT[1]:=0;

PT[2]:=1;

PT[3]:=2;

PT[4]:=3;

PT[5]:=4;

PT[6]:=5;

PT[7]:=6;

PT[8]:=7;

PT[9]:=8;

PT[10]:=9;

PT[11]:=10;

{Custos Unitários por Diâmetro}

C[1]:=40;

C[2]:=50;

C[3]:=65;

C[4]:=70;

C[5]:=75;

C[6]:=80;

C[7]:=85;

C[8]:=100;

C[9]:=110;

C[10]:=120;

C[11]:=130;
```

```
C[12]:=150;
C[13]:=160;
C[14]:=170;
{********** ALGORITMO GENETICO **********}
{********** Dados sobre a População **********}
npop:=100; {população}
nit:=50000; {numero de iterações}
elit:=5; {Elitismo: nº de elementos que passarão para geração seguinte}
pc:=0.9;
pm:=0.7;
form1.memo2.lines.add('População = '+floattostr(npop));
form1.memo2.lines.add('Gerações = '+floattostr(nit));
form1.memo2.lines.add('Elitismo = '+floattostr(elit));
form1.memo2.lines.add('Pc = '+floattostr(pc));
form1.memo2.lines.add('Pm = '+floattostr(pm));
randomize;
{*********************************************************************}
minimo:=100000000;
{********** Geração da População Inicial **********}
for i1:=1 to npop do
begin
for i2:=1 to t do
begin
rd:=random;
TE[i1,i2]:=trunc(rd*11);
TV[i1,i2]:=TE[i1,i2];
```

```
begin
if TV[i1,i2]= 10
then
begin
V[i1,i2]:=i2;
end
else
begin
rd:=random;
V[i1,i2]:=trunc(rd*14)+1;
end;
end;
end;
end;
{ Impressão da População Inicial}
form1.memo1.lines.add('*****Imprime a População Inicial *****');
for i1:=1 to npop do
begin
form1.memo1.lines.add('v['+floattostr(i1)+']=('+floattostr(v[i1,1])+','
+floattostr(v[i1,2])+','+floattostr(v[i1,3])+','
+floattostr(v[i1,4])+','+floattostr(v[i1,5])+','
+floattostr(v[i1,6])+','+floattostr(v[i1,7])+','
+floattostr(v[i1,8])+')'+' TV['+floattostr(i1)+']=('
+floattostr(TV[i1,1])+','
+floattostr(TV[i1,2])+','+floattostr(TV[i1,3])+','
+floattostr(TV[i1,4])+','+floattostr(TV[i1,5])+','
```

```
+floattostr(TV[i1,6])+','+floattostr(TV[i1,7])+','
+floattostr(TV[i1,8])+')');
end;
{********************** Simulação hidráulica da rede ********************}
{**************** e cálculo da função objetivo e penalidade**************}
for it:=1 to nit do
begin
{ form1.memo1.lines.add('*********Geração'+floattostr(it)); }
for i1:=1 to npop do
begin
fObjetivo[i1]:=0;
for j1:=1 to 8 do
begin
TN[i1,j1]:=TV[i1,j1];
if TN[i1,j1]=10
then
begin
DN[j1]:=DE[V[i1,j1]];
end
else
begin
DN[j1]:=DD1[V[i1,j1]];
end;
{Determinação da Função Objetivo}
if TN[i1,j1]=10
then
```

```
begin
BC[j1]:=1.50*DN[j1];
BR[i1,j1]:=0.015*exp(-0.003*DN[j1])*exp(2.271*ln(X[j1]+(TN[i1,j1]*5)));
PVOB[i1,j1]:=2.5*(BR[i1,j1]*BC[j1]*BCF*LT[j1])/exp(5*TN[i1,j1]*ln(1+tj));
PVNB[i1,j1]:=0;
NPR[i1,j1]:=0;
end
else
begin
if TN[i1,j1]=0
then
begin
BC[j1]:=1.50*DN[j1];
BR[i1,j1]:=0.015*exp(-0.003*DN[j1])*exp(2.271*ln(X[j1]));
PVOB[i1,j1]:=0;
PVNB[i1,j1]:=2.5*(BR[i1,j1]*BC[j1]*BCF*LT[j1])/exp(5*TN[i1,j1]*ln(1+tj));
NPR[i1,j1]:=1000*(C[v[i1,j1]])*LT[j1]/exp(5*TN[i1,j1]*ln(1+tj));
end
else
begin
BC2[j1]:=1.50*DE[j1];
BR2[i1,j1]:=0.015*exp(-0.003*DE[j1])*exp(2.271*ln(X[j1]+(TN[i1,j1]*5)));
PVOB[i1,j1]:=5*(BR[i1,j1]*BC[j1]*BCF*LT[j1])/exp(5*TN[i1,j1]*ln(1+tj));
X2[j1]:=(10-TN[i1,j1])*5;
TPVN[i1,j1]:= 10-TN[i1,j1];
BC[j1]:=1.50*DN[j1];
```

```
BR[i1,j1]:=0.015*exp(-0.003*DN[j1])*exp(2.271*ln(X2[j1]));
PVNB[i1,j1]:=5*(BR[i1,j1]*BC[j1]*BCF*LT[j1])/exp(5*TPVN[i1,j1]*ln(1+tj));
NPR[i1,j1]:=1000*(C[v[i1,j1]])/exp(5*TPVN[i1,j1]*ln(1+tj));
end;
end;
{Custo Total de Uma Tubulação}
Cmt[i1,j1]:=PVOB[i1,j1]+PVNB[i1,j1]+NPR[i1,j1];
{Custo Total }
fObjetivo[i1]:=fObjetivo[i1]+Cmt[i1,j1];
end;
{Dn[1]:=0.254;
Dn[2]:=0.508;
Dn[3]:=0.762;
Dn[4]:=1.016;
Dn[5]:=1.27;
Dn[6]:=1.524;
Dn[7]:=1.778;
Dn[8]:=2.032;}
redev1(gama,t,n,r,A,Ar,Dn,Ch,Lt,Hr,Q,H1,qt);{Simulador Hidráulico}
{H1 são as energias nos nós e qt sao as vazões nos trechos}
{Determinação da Função Penalidade}
for i2:=1 to n do
begin
pressao[i2]:=H1[i2]-cota[i2]
end;
{ Impressão da População }
```

```
if it=nit
then
begin
form1.memo1.lines.add('*********');
form1.memo1.lines.add('v['+floattostr(i1)+']=('+floattostr(v[i1,1])+','
+floattostr(v[i1,2])+','+floattostr(v[i1,3])+',' +floattostr(v[i1,4])+','+floattostr(v[i1
+floattostr(v[i1,6])+','+floattostr(v[i1,7])+','
+floattostr(v[i1,8])+')'+' DN['+floattostr(i1)+']=('
+floattostr(DN[v[i1,1]])+','
+floattostr(DN[v[i1,2]])+','+floattostr(DN[v[i1,3]])+','
+floattostr(DN[v[i1,4]])+','+floattostr(DN[v[i1,5]])+','
+floattostr(DN[v[i1,6]])+','+floattostr(DN[v[i1,7]])+','
+floattostr(DN[v[i1,8]])+')'+' TN['+floattostr(i1)+']=('
+floattostr(TN[i1,1])+','
+floattostr(TN[i1,2])+','+floattostr(TN[i1,3])+','
+floattostr(TN[i1,4])+','+floattostr(TN[i1,5])+','
+floattostr(TN[i1,6])+','+floattostr(TN[i1,7])+','
+floattostr(TN[i1,8])+')');
form1.memo1.lines.add('pressão['+floattostr(i1)+']=('+floattostr(pressao[1])+';'
+floattostr(pressao[2])+';'+floattostr(pressao[3])+';'
+floattostr(pressao[4])+';'+floattostr(pressao[5])+';'
+floattostr(pressao[6]));
end;
for i2:=1 to n do
begin
if pressao[i2]>10
```

```
then
begin
pressao[i2]:=0
end
else
begin
pressao[i2]:=(10-pressao[i2])
end;
end;
penal:=0;
for i2:=1 to n do
begin
penal:=penal+pressao[i2];
end;
if penal>500
then
begin
penal:=500+sqrt(penal-500);
end;
fPenalidade[i1]:= (6000*(exp(0.8*ln(it/nit)))*penal);
{fPenalidade[i1]:= 3000*penal; }
if fObjetivo[i1]>5000000
then
begin
fPenalidade[i1]:=fPenalidade[i1]+(fObjetivo[i1]-5000000)*50;
end;
```

```
end;
{Cálculo da função aptidão}
Maximo:=0;
for i1:=1 to npop do
begin
fAptidao1[i1]:=fObjetivo[i1]+fPenalidade[i1];
end;
{ordenação da população em ordem decrescente de Aptidao}
flag:=1;
while flag = 1 do
begin
flag:=0;
for k1:=1 to npop-1 do
begin
if fAptidao1[k1]<fAptidao1[k1+1]
then
begin
compara:=fAptidao1[k1];
fAptidao1[k1]:=fAptidao1[k1+1];
fAptidao1[k1+1]:=compara;
compara:=fObjetivo[k1];
fObjetivo[k1]:=fobjetivo[k1+1];
fObjetivo[k1+1]:=compara;
compara:=fPenalidade[k1];
fPenalidade[k1]:=fPenalidade[k1+1];
fPenalidade[k1+1]:=compara;
```

```
for k2:=1 to 8 do
begin
compara1:=V[k1,k2];
V[k1,k2]:=V[k1+1,k2];
V[k1+1,k2]:=compara1;
compara1:=TV[k1,k2];
TV[k1,k2]:=TV[k1+1,k2];
TV[k1+1,k2]:=compara1;
end;
flag:=1;
end;
end;
end;
{Cálculo da Probabilidade}
somaApt:=0;
Aux[1]:=fAptidao1[1]*1.1;
for k1:=1 to npop do
begin
fAptidao2[k1]:=Aux[1]-fAptidao1[k1];
end;
for k1:=1 to npop do
begin
somaApt:=somaApt+fAptidao2[k1];
end;
for k1:=1 to npop do
begin
```

```
prob[k1]:=fAptidao2[k1]/somaApt;
end;
{Cálculo da Probabilidade Acumulada}
soma:=0;
for k1:=1 to npop do
begin
soma:=soma+prob[k1];
acum[k1]:=soma;
end;
{Impressão dos resultados da 1 geração}
{ if it=1 then
begin
for k1:=1 to npop do
begin
form1.memo1.lines.add('v['+floattostr(it)+']=('+floattostr(v[k1,1])+','
+floattostr(v[k1,2])+','+floattostr(v[k1,3])+','
+floattostr(v[k1,4])+','+floattostr(v[k1,5])+','
+floattostr(v[k1,6])+','+floattostr(v[k1,7])+','
+floattostr(v[k1,8])+')'+' TN['+floattostr(k1)+']=('
+floattostr(TN[k1,1])+','+floattostr(TN[k1,2])+','
+floattostr(TN[k1,3])+','+floattostr(TN[k1,4])+','
+floattostr(TN[k1,5])+','+floattostr(TN[k1,6])+','
+floattostr(TN[k1,7])+','+floattostr(TN[k1,8])+') '
+' Prob'+floattostr(k1)+'='
+(floattostr(int(prob[k1]*100)))+'%'
+' fObjetivo'+floattostr(k1)+'='
```

```
+(floattostr(int(fObjetivo[k1]*100)/100))+
' fPenalidade'+floattostr(k1)+'='
+(floattostr(int(fpenalidade[k1]*100)/100)));
end;
end;}
{Impressão dos 10 melhores resultados}
{for k1:=1 to 1 do
begin
form1.memo1.lines.add('v['+floattostr(it)+']=('+floattostr(v[k1,1])+','
+floattostr(v[k1,2])+','+floattostr(v[k1,3])+','
+floattostr(v[k1,4])+','+floattostr(v[k1,5])+','
+floattostr(v[k1,6])+','+floattostr(v[k1,7])+','
+floattostr(v[k1,8])+')'+' TN['+floattostr(k1)+']=('
+floattostr(TN[k1,1])+','+floattostr(TN[k1,2])+','
+floattostr(TN[k1,3])+','+floattostr(TN[k1,4])+','
+floattostr(TN[k1,5])+','+floattostr(TN[k1,6])+','
+floattostr(TN[k1,7])+','+floattostr(TN[k1,8])+') '
+' Prob'+floattostr(k1)+'='
+(floattostr(int(prob[k1]*100)))+'%'
+' fObjetivo'+floattostr(k1)+'='
+(floattostr(int(fObjetivo[k1]*100)/100))+
' fPenalidade'+floattostr(k1)+'='
+(floattostr(int(fpenalidade[k1]*100)/100)));}
form1.memo2.lines.add('MINIMA'+floattostr(it)+'='
+(floattostr(int((fObjetivo[npop]+fPenalidade[npop])*100)/100)));
{ end; }
```

```
{********************** Inicia Recombinação **********************}
for k1:=1 to npop do
begin
flag:=0;
rd1:=random;
k2:=1;
while flag=0 do
begin
if rd1<=acum[k2]
then
begin
pai1[k1,1]:=V[k2,1];
pai1[k1,2]:=V[k2,2];
pai1[k1,3]:=V[k2,3];
pai1[k1,4]:=V[k2,4];
pai1[k1,5]:=V[k2,5];
pai1[k1,6]:=V[k2,6];
pai1[k1,7]:=V[k2,7];
pai1[k1,8]:=V[k2,8];
pai2[k1,1]:=TN[k2,1];
pai2[k1,2]:=TN[k2,2];
pai2[k1,3]:=TN[k2,3];
pai2[k1,4]:=TN[k2,4];
pai2[k1,5]:=TN[k2,5];
pai2[k1,6]:=TN[k2,6];
pai2[k1,7]:=TN[k2,7];
```

```
pai2[k1,8]:=TN[k2,8];
flag:=1;
end;
k2:=k2+1;
if ((flag=0) and (rd1>acum[k2-1]) and (rd1<acum[k2]))
then
begin
pai1[k1,1]:=V[k2,1];
pai1[k1,2]:=V[k2,2];
pai1[k1,3]:=V[k2,3];
pai1[k1,4]:=V[k2,4];
pai1[k1,5]:=V[k2,5];
pai1[k1,6]:=V[k2,6];
pai1[k1,7]:=V[k2,7];
pai1[k1,8]:=V[k2,8];
pai2[k1,1]:=TN[k2,1];
pai2[k1,2]:=TN[k2,2];
pai2[k1,3]:=TN[k2,3];
pai2[k1,4]:=TN[k2,4];
pai2[k1,5]:=TN[k2,5];
pai2[k1,6]:=TN[k2,6];
pai2[k1,7]:=TN[k2,7];
pai2[k1,8]:=TN[k2,8];
flag:=1;
end
end;
```

```
end;
{ form1.memo2.lines.add('*****Pai Geração '+floattostr(it)+' *******');
for i1:=1 to 5 do
begin
form1.memo2.lines.add('pai['+floattostr(i1)+']=('+floattostr(pai[i1,1])+','
+floattostr(pai[i1,2])+','+floattostr(pai[i1,3])+','
+floattostr(pai[i1,4])+','+floattostr(pai[i1,5])+','
+floattostr(pai[i1,6])+','+floattostr(pai[i1,7])+','
+floattostr(pai[i1,8])+')');
end; }
{Recombinação}
j1:=1;
while j1<npop-elit do
begin
rd:=random;
if rd<=pc then
begin
r1:=trunc(random*npop)+1;
r2:=trunc(random*npop)+1;
r3:=random;
V[j1,1]:=round(r3*pai1[r1,1]+(1-r3)*pai1[r2,1]);
V[j1+1,1]:=round(r3*pai1[r2,1]+(1-r3)*pai1[r1,1]);
V[j1,2]:=round(r3*pai1[r1,2]+(1-r3)*pai1[r2,2]);
V[j1+1,2]:=round(r3*pai1[r2,2]+(1-r3)*pai1[r1,2]);
V[j1,3]:=round(r3*pai1[r1,3]+(1-r3)*pai1[r2,3]);
V[j1+1,3]:=round(r3*pai1[r2,3]+(1-r3)*pai1[r1,3]);
```

```
V[j1,4]:=round(r3*pai1[r1,4]+(1-r3)*pai1[r2,4]);
V[j1+1,4]:=round(r3*pai1[r2,4]+(1-r3)*pai1[r1,4]);
V[j1,5]:=round(r3*pai1[r1,5]+(1-r3)*pai1[r2,5]);
V[j1+1,5]:=round(r3*pai1[r2,5]+(1-r3)*pai1[r1,5]);
V[j1,6]:=round(r3*pai1[r1,6]+(1-r3)*pai1[r2,6]);
V[j1+1,6]:=round(r3*pai1[r2,6]+(1-r3)*pai1[r1,6]);
V[j1,7]:=round(r3*pai1[r1,7]+(1-r3)*pai1[r2,7]);
V[j1+1,7]:=round(r3*pai1[r2,7]+(1-r3)*pai1[r1,7]);
V[j1,8]:=round(r3*pai1[r1,8]+(1-r3)*pai1[r2,8]);
V[j1+1,8]:=round(r3*pai1[r2,8]+(1-r3)*pai1[r1,8]);
TN[j1,1]:=round(r3*pai2[r1,1]+(1-r3)*pai2[r2,1]);
TN[j1+1,1]:=round(r3*pai2[r2,1]+(1-r3)*pai2[r1,1]);
TN[j1,2]:=round(r3*pai2[r1,2]+(1-r3)*pai2[r2,2]);
TN[j1+1,2]:=round(r3*pai2[r2,2]+(1-r3)*pai2[r1,2]);
TN[j1,3]:=round(r3*pai2[r1,3]+(1-r3)*pai2[r2,3]);
TN[j1+1,3]:=round(r3*pai2[r2,3]+(1-r3)*pai2[r1,3]);
TN[j1,4]:=round(r3*pai2[r1,4]+(1-r3)*pai2[r2,4]);
TN[j1+1,4]:=round(r3*pai2[r2,4]+(1-r3)*pai2[r1,4]);
TN[j1,5]:=round(r3*pai2[r1,5]+(1-r3)*pai2[r2,5]);
TN[j1+1,5]:=round(r3*pai2[r2,5]+(1-r3)*pai2[r1,5]);
TN[j1,6]:=round(r3*pai2[r1,6]+(1-r3)*pai2[r2,6]);
TN[j1+1,6]:=round(r3*pai2[r2,6]+(1-r3)*pai2[r1,6]);
TN[j1,7]:=round(r3*pai2[r1,7]+(1-r3)*pai2[r2,7]);
TN[j1+1,7]:=round(r3*pai2[r2,7]+(1-r3)*pai2[r1,7]);
TN[j1,8]:=round(r3*pai2[r1,8]+(1-r3)*pai2[r2,8]);
TN[j1+1,8]:=round(r3*pai2[r2,8]+(1-r3)*pai2[r1,8]);
```

```
j1:=j1+2;
end
else
begin
v[j1,1]:=pai1[j1,1];
v[j1,2]:=pai1[j1,2];
v[j1,3]:=pai1[j1,3];
v[j1,4]:=pai1[j1,4];
v[j1,5]:=pai1[j1,5];
v[j1,6]:=pai1[j1,6];
v[j1,7]:=pai1[j1,7];
v[j1,8]:=pai1[j1,8];
TN[j1,1]:=pai2[j1,1];
TN[j1,2]:=pai2[j1,2];
TN[j1,3]:=pai2[j1,3];
TN[j1,4]:=pai2[j1,4];
TN[j1,5]:=pai2[j1,5];
TN[j1,6]:=pai2[j1,6];
TN[j1,7]:=pai2[j1,7];
TN[j1,8]:=pai2[j1,8];
j1:=j1+1;
end;
end;
{mutação}
for k1:=1 to npop-elit do
begin
```

```
rd:=random;
if rd<=pm then
begin
rd:=random;
k2:=trunc(rd*9);
rd:=random;
v[k1,k2]:=trunc(rd*14)+1;
rd:=random;
k2:=trunc(rd*9);
rd:=random;
TN[k1,k2]:=trunc(rd*11)+1;
end;
end;
end;
{Impressão dos resultados finais}
for k1:=1 to npop do
begin
form1.memo1.lines.add('v['+floattostr(k1)+']=('+floattostr(v[k1,1])+','
+floattostr(v[k1,2])+','+floattostr(v[k1,3])+','
+floattostr(v[k1,4])+','+floattostr(v[k1,5])+','
+floattostr(v[k1,6])+','+floattostr(v[k1,7])+','
+floattostr(v[k1,8])+')'+' TN['+floattostr(k1)+']=('
+floattostr(TN[k1,1])+','+floattostr(TN[k1,2])+','
+floattostr(TN[k1,3])+','+floattostr(TN[k1,4])+','
+floattostr(TN[k1,5])+','+floattostr(TN[k1,6])+','
+floattostr(TN[k1,7])+','+floattostr(TN[k1,8])+') '
```

```
+' Prob'+floattostr(k1)+'='
+(floattostr(int(prob[k1]*100)))+'%'
+' fObjetivo'+floattostr(k1)+'='
+(floattostr(int(fObjetivo[k1]*100)/100))+
' fPenalidade'+floattostr(k1)+'='
+(floattostr(int(fpenalidade[k1]*100)/100)));
end;
for k1:=1 to t do
begin
form1.memo1.lines.add('qt['+floattostr(k1)+']='+floattostr(qt[k1]));
end;
for k1:=1 to n do
begin
form1.memo1.lines.add('h['+floattostr(k1)+']='+floattostr(H1[k1]));
end;
form1.memo1.lines.add('F i m');
end;
procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);
begin
close;
end;
end.
```

8.2 Anexo B – *Unit 2*

Programa computacional para obtenção de reabilitação otimizada utilizando a técnica dos algoritmos genéticos – *Unit 2*.

```
unit Unit2;

interface

uses

Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs, Unit1;

const mm=50;

type Mat=array [1..mm,1..mm] of real;

Vet=array [1..mm] of real;

Veti= array [1..mm] of integer;

Mati= array [1..mm,1..mm] of integer;

Procedure

redev1(gama:real;tt,nn,rr:integer;A,Ar:Mat;Dn,Ch,Lt,Hr,Q:Vet;var H1,qt:vet);

type

TForm2 = class(TForm)

private

{ Private declarations }

public

{ Public declarations }

end;

var

Form2: TForm2;

implementation

{$R *.DFM}

procedure
```

```
redev1(gama:real;tt,nn,rr:integer;A,AR:Mat;Dn,Ch,Lt,Hr,Q:Vet;var H1,qt:vet);
var
NH,NH1,norma1,norma2:real;
prec1,norma:real;
flag,w,l,i,j,k:integer;
MM,D1,AT,CM,CA,CA1:Mat;
S1,s11,S2,S3,S4,Bb,Ah,CAh,Qa,AHk,H,Hk,M2,HKk,P,SS1:Vet;
begin
prec1:=1e-10;
norma:=10;
{Diag(t,LT,CH,DN,D1)}
for i:=1 to tt do
begin
for j:=1 to tt do
begin
if i=j
then
begin
P[i]:=10.65*Lt[i]/(exp(1.85*Ln(Ch[i]))*exp(4.87*
Ln(Dn[i])));
D1[i,i]:=exp((-1)*(1/1.85)*Ln(P[i]));
end
else
begin
D1[i,j]:=0;
end;
```

```
end;
end;
{Matriz A Transposta}
for i:=1 to tt do
begin
for j:=1 to nn do
begin
AT[j,i]:=A[i,j];
end;
end;
{Multiplicaçao AT x D1 = CM}
for k:=1 to nn do
begin
for j:=1 to tt do
begin
CM[k,j]:=0;
for i:=1 to tt do
begin
CM[k,j]:=CM[k,j]+AT[k,i]*D1[i,j];
end;
end;
end;
{Multiplicaçao CM X A = CA}
for k:=1 to nn do
begin
for j:=1 to nn do
```

```
begin
CA[k,j]:=0;
for i:=1 to tt do
begin
CA[k,j]:=CA[k,j]+CM[k,i]*A[i,j];
end;
end;
end;
{Multiplicaçao AR X Hr = Ah (vetor)}
for k:=1 to tt do
begin
Ah[k]:=0;
for i:=1 to rr do
begin
Ah[k]:=Ah[k]+AR[k,i]*Hr[i];
end;
end;
{Multiplicaçao CM x Ah = CAh (vetor)}
for k:=1 to nn do
begin
CAh[k]:=0;
for i:=1 to tt do
begin
CAh[k]:=CAh[k]+CM[k,i]*Ah[i];
end;
end;
```

```
{Soma Q + CAh = Qa}
for k:= 1 to nn do
begin
Qa[k]:=Q[k]+CAh[k];
end;
for w:= 1 to nn do
begin
Qa[w]:=(-1)*Qa[w];
end;
for i:= 1 to nn do
begin
for j:= 1 to nn do
begin
CA1[i,j]:=CA[i,j];
end;
end;
for i:= 1 to nn do
begin
CA1[i,nn+1]:= Qa[i];
end;
{Eliminação Gaussiana}
for k:= 1 to nn-1 do
begin
if CA1[k,k]=0
then
begin
```

```
flag:=0;
for l:= k to nn-1 do
begin
if CA1[l+1,k]<>0
then
begin
flag:=1;
for j:=1 to nn+1 do
begin
CA1[k,j]:=CA1[k,j]+CA1[l+1,j];
end;
end;
end;
if flag=0
then
begin
form1.memo1.lines.add('cálculo impossível');
end;
end;
l:= k+1;
for i:= k+1 to nn do
begin
if CA1[l-1,l-1] = 0
then
begin
CA1[l-1,l-1] := 1e-4;
```

```
end;
MM[i,l-1]:=CA1[i,l-1]/CA1[l-1,l-1];
for j:=l to nn+1 do
begin
CA1[i,j]:=CA1[i,j]-MM[i,l-1]*CA1[l-1,j];
end;
end;
end;
for i:=1 to nn do
begin
for j:=1 to nn+1 do
begin
if j>nn
then
begin
BB[i]:=CA1[i,j]
end;
end;
end;
if CA1[nn,nn] = 0
then
begin
CA1[nn,nn] := 1e-4;
end;
H[nn]:=BB[nn]/CA1[nn,nn];
for i:=nn-1 downto 1 do
```

```
begin
j:=i+1;
S3[j-1]:=0;
for j:=i+1 to nn do
begin
S3[j]:=CA1[i,j]*H[j]+S3[j-1];
H[i]:=BB[i]/CA1[i,i]-S3[j]/CA1[i,i]
end;
end;
for w:= 1 to nn do
begin
HK[w]:=H[w]
end;
while norma>prec1 do
begin
{Multiplicação A x Hk = AHk}
for k:=1 to tt do
begin
AHk[k]:=0;
for w:=1 to nn do
begin
AHk[k]:=AHk[k]+A[k,w]*Hk[w];
if AHk[k]=0
then
begin
AHk[k]:=1e-4;
```

```
end;
end;
end;
{Soma AHk+Ah = S1}
for k:= 1 to tt do
begin
S1[k]:=AHk[k]+Ah[k];
end;
{Diagonal}
for i:=1 to tt do
begin
S11[i]:=-S1[i];
end;
for i:=1 to tt do
begin
for j:=1 to tt do
begin
if i=j
then
begin
P[i]:=10.65*LT[i]/(exp(1.85*Ln(CH[i]))*
exp(4.87*Ln(DN[i])));
if s11[i]<=1e-4
then
begin
d1[i,i]:=1e4;
```

```
end
else
begin
D1[i,i]:=exp((-1)*(1/1.85)*Ln(P[i]))*
exp((1/1.85-1)*ln(abs(s11[i])));
end;
end
else
begin
D1[i,j]:=0;
end;
end;
end;
{Multiplicação AT x D1 = CM}
for k:=1 to nn do
begin
for j:=1 to tt do
begin
CM[k,j]:=0;
for i:=1 to tt do
begin
CM[k,j]:=CM[k,j]+AT[k,i]*D1[i,j];
end;
end;
end;
{Multiplicaçao CM X A = CA}
```

```
for k:=1 to nn do
begin
for j:=1 to nn do
begin
CA[k,j]:=0;
for i:=1 to tt do
begin
CA[k,j]:=CA[k,j]+CM[k,i]*A[i,j];
end;
end;
end;
{Multiplicaçao CM x S1 = M2 (vetor)}
for k:=1 to nn do
begin
M2[k]:=0;
for i:=1 to tt do
begin
M2[k]:=M2[k]+CM[k,i]*S1[i];
if M2[k]=0
then
begin
M2[k]:=1e-4;
end;
end;
end;
{Soma Q + M2 = S2}
```

```
for k:= 1 to nn do
begin
S2[k]:=Q[k]+M2[k];
end;
if norma<0.1
then
begin
GAMA:=1;
end;
for w:=1 to nn do
begin
S2[w]:=(-1)*(GAMA)*S2[w];
end;
for i:= 1 to nn do
begin
for j:= 1 to nn do
begin
CA1[i,j]:=Ca[i,j];
end;
end;
for i:= 1 to nn do
begin
CA1[i,nn+1]:= S2[i];
end;
{Eliminação Gaussiana HKK}
for k:= 1 to nn-1 do
```

```
begin
if CA1[k,k]=0
then
begin
flag:=0;
for l:= k to nn-1 do
begin
if CA1[l+1,k]<>0
then
begin
flag:=1;
for j:=1 to nn+1 do
begin
CA1[k,j]:=CA1[k,j]+CA1[l+1,j];
end;
end;
end;
if flag=0
then
begin
form1.memo1.lines.add('cálculo impossível');
end;
end;
l:= k+1;
for i:= k+1 to nn do
begin
```

```
if CA1[l-1,l-1] = 0
then
begin
CA1[l-1,l-1] := 1e-8;
end;
MM[i,l-1]:=CA1[i,l-1]/CA1[l-1,l-1];
for j:=l to nn+1 do
begin
CA1[i,j]:=CA1[i,j]-MM[i,l-1]*CA1[l-1,j];
end;
end;
end;
for i:=1 to nn do
begin
for j:=1 to nn+1 do
begin
if j>nn then
begin
Bb[i]:=CA1[i,j]
end;
end;
end;
if CA1[nn,nn] = 0
then
begin
CA1[nn,nn] := 1e-4;
```

```
end;
HKk[nn]:=Bb[nn]/CA1[nn,nn];
for i:=nn-1 downto 1 do
begin
j:=i+1;
S3[j-1]:=0;
for j:=i+1 to nn do
begin
S3[j]:=CA1[i,j]*HKk[j]+S3[j-1];
HKk[i]:=Bb[i]/CA1[i,i]-S3[j]/CA1[i,i]
end;
end;
for w:= 1 to nn do
begin
H1[w]:=HKK[w]+HK[w];
end;
NH:=0;
NH1:=0;
for w:=1 to nn do
begin
NH:=NH+sqr(Hk[w]);
NH1:=NH1+sqr(H1[w]);
end;
norma1:=sqrt(NH);
norma2:=sqrt(NH1);
norma:=abs((norma2-norma1)/(norma2));
```

```
for w:= 1 to nn do
begin
HK[w]:=H1[w]
end;
end;
{vazao (tt,D1,S1,Qt) }
for i:=1 to tt do
begin
S1[i]:=-S1[i];
end;
{Multiplicação d1,s1 = qt}
for k:=1 to tt do
begin
for j:=1 to 1 do
begin
Qt[k]:=0;
for i:=1 to tt do
begin
Qt[k]:=Qt[k]+D1[k,i]*S1[i];
if Qt[k]=0
then
begin
Qt[k]:=1e-4;
end;
end;
end;
```

```
    end;

    end;

    end.
```