Campus de São Carlos

DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO PRESSÃO X
VAZAMENTO PARA SUB-SETORES DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO
DE ÁGUA DE SÃO CARLOS - SP

Rodrigo de Oliveira Caliman

Orientadora: Profª. Dra. Luisa Fernanda Ribeiro Reis

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

**DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO
MODELO PRESSÃO X VAZAMENTO PARA SUB-
SETORES DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE
ÁGUA DE SÃO CARLOS – SP**

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 03 / 09 / 02

Ass.: *Rodrigo Oliveira Caliman*

Rodrigo de Oliveira Caliman

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Hidráulica e Saneamento

DEDALUS - Acervo - EESC

31100037035

ORIENTADORA: Prof^a. Dra. Luisa Fernanda
Ribeiro Reis

Class.	TESE
Cutt.	1048
Tombo	T0210102
Sysno	1263666

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

C153d Caliman, Rodrigo de Oliveira
Determinação dos parâmetros do modelo pressão x vazamento para sub-setores da rede de distribuição de água de São Carlos – SP / Rodrigo de Oliveira Caliman. -- São Carlos, 2002.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 2002.
Área: Hidráulica e Saneamento.
Orientador: Profa. Dra. Luisa Fernanda Ribeiro Reis.

1. Redes de distribuição. 2. Águas para abastecimento. 3. Pressão. 4. Perdas por vazamento. 5. Algoritmos genéticos. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **RODRIGO DE OLIVEIRA CALIMAN**

Dissertação defendida e julgada em 02-08-2002 perante a Comissão Julgadora:

Profa. Dra. **LUISA FERNANDA RIBEIRO REIS (Orientadora)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Ciprovado

Prof. Dr. **RODRIGO DE MELO PORTO**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Dr. **JORGE HAMADA**
(UNESP/Campus de Bauru)

Aprovado.

Profa. Associada **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia (Hidráulica e Saneamento) e
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Aos meus pais, Inácio e

Clarice, por serem meus exemplos de vida e responsáveis por tudo o que sou.

Ao meu irmão Rafael, pela amizade e carinho.

Para Lisa, pelo amor e paciência.

AGRADECIMENTOS

- A Deus, por estar sempre ao meu lado.
- À Prof^ª. Dra.. Luisa Fernanda Ribeiro Reis, pela atenção e valiosa orientação neste trabalho.
- Aos professores Fazal H. Chaudhry e Rodrigo de Melo Porto, pelo auxílio prestado.
- Ao Sistema Autônomo de Água e Esgoto da Cidade de São Carlos (SAAE) pelo apoio logístico para a execução do trabalho.
- Aos funcionários do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC-USP (Edson, Flávia, Pavi, Sá, Rose, Alex) pela colaboração.
- Aos colegas da equipe de trabalho, Fernando, Adílson e Urandi, pela ajuda direta dada neste trabalho.
- À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio e bolsa concedida.
- À Financiadora Nacional de Estudos e Projetos (FINEP) pelo apoio financeiro ao projeto.
- Aos meus pais (Inácio e Clarice), ao meu irmão (Rafael) e a minha noiva (Elisângela), pelo apoio, carinho e amor.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	iii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	v
LISTA DE SÍMBOLOS.....	vi
RESUMO.....	x
ABSTRACT.....	xi
1 INTRODUÇÃO. E OBJETIVOS.....	1
2 REVISÃO DA LITERATURA PERTINENTE.....	7
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	18
3.1 Materiais.....	18
3.2 Métodos.....	22
3.2.1 Definição dos sub-setores a serem analisados.....	22
3.2.2 Setor Monte Carlo.....	22
3.2.2.1 Caracterização do Setor Monte Carlo.....	22
3.2.2.2 Sistematização de dados para o Setor Jardim Monte Carlo.....	23
3.2.3 Setor São Carlos III.....	25
3.2.3.1 Caracterização do Setor São Carlos III.....	25
3.2.3.2 Determinação de nós para o cálculo das demandas.....	26
3.2.3.3 Levantamento histórica da incidência de vazamentos do setor.....	28
3.2.3.4 Testes de Vazamentos Noturnos.....	31
3.2.4 Modelo de otimização.....	33
3.2.5-Modelo Hidráulico.....	34
3.2.6- Método de Otimização utilizado – Algoritmos Genéticos (AGs).....	36
4 Elaboração e implementação do código computacional de AGs para o problema.....	39
4.1 Representação das soluções.....	39
4.1.1 Representação das soluções para o Setor Monte Carlo.....	40

4.1.2 Representação das soluções para o Setor São Carlos III.....	42
4.2 Geração da população inicial.....	44
4.3 Cruzamento e Mutação.....	44
4.4 Forma de seleção.....	45
4.5 Parâmetros para operação dos AGs.....	45
4.6 Fluxograma dos AGs implementados.....	46
5 Resultados	48
5.1 Resultados noturnos para obtenção de medidas de pressão e vazão no setor São Carlos III.....	48
5.2 Resultados obtidos para o Setor Monte Carlo.....	57
5.2.1 Parâmetros globais obtidos por otimização.....	57
5.2.2 Parâmetros específicos para as áreas de características diferentes.....	59
5.2.3 Implementação de faixa busca reduzida para os valores de N1 para o Setor Monte Carlo.....	62
5.2.4 Testes realizados com a tentativa de determinação de vazamentos localizados.....	65
5.2.5 Implementação de faixa logarítmica de busca para o Setor Monte Carlo.....	69
5.2.6 Considerações sobre os resultados obtidos para o Setor Monte Carlo.....	74
5.3 Resultados obtidos para o Setor São Carlos III.....	76
5.3.1 Testes iniciais para o Setor São Carlos III.....	78
5.3.2 Resultados obtidos considerando os 3 primeiros patamares.....	86
5.3.3 Redução da Faixa de Busca do Valor de N1.....	90
5.3.4 Considerações sobre os resultados obtidos para o Setor São Carlos III.....	93
6 Conclusões	94
ANEXO A	98
ANEXO B	101
BIBLIOGRAFIA	103
APÊNDICE	106

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1- Ensaio da Balança.....	18
FIGURA 3.2- Linhas pressurizadas de circuito fechado.....	19
FIGURA 3.3- Geofone eletrônico e haste de escuta.....	20
FIGURA 3.4- Armazenadores de dados tipo <i>Metrolog NA da Technolog</i>	21
FIGURA 3.5- Medidores de vazão ultra-sônico.....	21
FIGURA 3.6- Nós em estudo do Sub-setor Jardim Monte Carlo.....	24
FIGURA 3.7- Sub-setor São Carlos III com nós de demanda e quadras de consumo.....	27
FIGURA 3.8- O rastreamento com ajuda de haste de escuta.....	29
FIGURA 3.9- O rastreamento com ajuda de geofone eletrônico.....	29
FIGURA 3.10 -Localização dos vazamentos.....	30
FIGURA 3.11- Exemplo de ponto de medida de pressão.....	32
FIGURA 3.12- Ponto de medida de vazão na entrada do setor.....	32
FIGURA 3.13- Mecanismo de cruzamento de soluções codificadas em binário.....	37
FIGURA 3.14- Mecanismo de mutação de soluções codificadas em binário.....	38
FIGURA 4.1 – Zoneamento do Setor Monte Carlo.....	42
FIGURA 4.2 – Zoneamento do Setor São Carlos III.....	43
FIGURA 4.3 – Parâmetros utilizados pelo modelo de AG implementado.....	45
FIGURA 4.4 – Fluxograma de operação do código genético implementado.....	46
FIGURA 5.1- Exemplo de ponto de medida de pressão.....	49
FIGURA 5.2- Ponto de medida de vazão na saída do reservatório elevado.....	49
FIGURA 5.3- Ponto de medida de vazão em ponto intermediário da rede.....	50
FIGURA 5.4- Caixa construída pelo SAAE – ponto intermediário da rede.....	50
FIGURA 5.5- Manobra noturna do registro.....	51
FIGURA 5.6- Registro de pressão (nó 65 – ponto crítico).....	52
FIGURA 5.7- Registro de pressão à jusante do reservatório (nó 142 – ponto crítico).....	52
FIGURA 5.8- Registro de pressão (nó 87 – ponto crítico).....	53

FIGURA 5.9- Registro de pressão (nó 76 – ponto médio).....	53
FIGURA 5.10- Registro de pressão (nó 124 – ponto médio).....	54
FIGURA 5.11- Registro de pressão (nó 48 – ponto médio).....	54
FIGURA 5.12- Registro de pressão (nó 16 – ponto extremo).....	55
FIGURA 5.13- Registro de pressão (nó 20 – ponto extremo).....	55
FIGURA 5.14- Registro de vazão (ponto intermediário da rede de distribuição).....	56
FIGURA 5.15- Registro de vazão (ponto de saída do reservatório elevado).....	56
FIGURA 5.16- Evolução ao longo das gerações com faixa logarítmica.....	73
FIGURA 5.17- Evolução ao longo das gerações sem faixa logarítmica.....	73
FIGURA 5.18 – Gráfico das medidas de pressão para 4 manobras.....	77
FIGURA 5.19 – Zoneamento do Setor São Carlos III para 2 zonas.....	79
FIGURA 5.20 – Zoneamento do Setor São Carlos III para 3 zonas.....	80

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 – Pontos utilizados para monitoriamento de pressão e vazão.....	25
TABELA 3.2 - Nós de medidas do Setor São Carlos III.....	31
TABELA 5.1 – Valores de pressão medidos e calculados pelo modelo hidráulico para CI e NI constantes para o setor.....	58
TABELA 5.2 – Resultados obtidos para CI e NI constantes para o setor.....	59
TABELA 5.3 – Valores de pressão medidos e calculados pelo modelo hidráulico para o setor dividido em duas zonas.....	60
TABELA 5.4 - Resultado obtidos para CI e NI diferenciados.....	61
TABELA 5.5 – Valores de pressão medidos e calculados pelo modelo hidráulico para faixa reduzida para os valores de NI	63
TABELA 5.6- Resultado obtidos para faixa reduzida para os valores de NI	64
TABELA 5.7 – Valores de pressão medidos e calculados pelo modelo hidráulico para um trecho.....	66
TABELA 5.8 – Valores de pressão medidos e calculados pelo modelo hidráulico para dois trechos.....	67
TABELA 5.9 - Resultado obtido para CI e NI diferenciados para um trecho.....	68
TABELA 5.10 - Resultado obtido para CI e NI diferenciados para dois trechos.....	68
TABELA 5.11 – Valores de pressão medidos e calculados pelo modelo hidráulico para o setor dividido em duas zonas utilizando faixa logarítmica.....	70
TABELA 5.12 – Valores de pressão medidos e calculados pelo modelo hidráulico para o setor dividido em duas zonas sem faixa logarítmica.....	71
TABELA 5.13- Resultado obtido para CI e NI diferenciados utilizando faixa Logarítmica.....	72
TABELA 5.14- Resultado obtido para CI e NI diferenciados sem faixa Logarítmica.....	72
TABELA 5.15 – Resultados comparativos para parâmetros globais.....	74

TABELA 5.16 – Medidas de Vazão e Pressão do Setor São Carlos III.....	76
TABELA 5.17 – Resultados iniciais obtidos para parâmetros constantes para todo o setor.....	81
TABELA 5.18 – Resultados iniciais obtidos de pressão para 2 zonas.....	82
TABELA 5.19 – Resultados iniciais obtidos de pressão para 3 zonas.....	83
TABELA 5.20 – Resultado obtidos para <i>CI</i> e <i>NI</i> globais para todo o setor.....	84
TABELA 5.21 - Resultado obtidos para <i>CI</i> e <i>NI</i> diferenciados para 2 zonas.....	84
TABELA 5.22 – Resultado obtidos para <i>CI</i> e <i>NI</i> diferenciados para 3 zonas.....	84
TABELA 5.23 – Resultados obtidos para 3 patamares para parâmetros globais.....	87
TABELA 5.24 – Resultado obtidos para <i>CI</i> e <i>NI</i> globais para todo o setor.....	88
TABELA 5.25 – Resultados obtidos para 3 patamares para 3 zonas.....	88
TABELA 5.26– Resultado obtidos para <i>CI</i> e <i>NI</i> para 3 patamares para 3 zonas.....	89
TABELA 5.27 – Resultados obtidos para faixa reduzida de <i>NI</i>	91
TABELA 5.28 – Resultado obtidos para <i>CI</i> e <i>NI</i> faixa reduzida de <i>NI</i>	92

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGs	Algoritmo Genéticos
Eng ^o	Engenheiro
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
NAG	Numerical Algorithm Group
SAAE	Sistema Autônomo de Água e Esgoto
SHS	Departamento de Hidráulica e Saneamento
SP	Estado de São Paulo
USP	Universidade de São Paulo
VRP	Válvula Redutora de Pressão

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Constante que depende das unidades utilizadas no problema (no caso 278,5)
β	Expoente de vazamento
ε_{ij}	Rugosidade absoluta do conduto entre os nós i e j
δ_i	Coefficiente de distribuição de vazão para o nó i
τ	Idade do tubo
θ_{ij}	Vazamento por unidade de superfície do tubo que liga o nó i ao nó j
ΔH	Representa perda de carga (m)
a	Expoente de perda
c_1	Coefficiente único para o setor
c_2	Coefficiente único para o setor
C_i	Demanda de consumo do nó i
CHW_{ij}	Coefficiente de Hazen-Williams para o conduto que liga o nó i ao nó j
CI_{ij}	Coefficiente que relata vazamento por unidade de comprimento do conduto de Acordo com a pressão de serviço e depende das características do sistema (como idade do conduto e propriedades do solo) (L/s.m)
CI	Constante de vazamento (L/s.m)
d	Expoente ajustado de acordo com testes de campo
D	Diâmetro do conduto (m)

D_{ij}	Diâmetro do conduto
f	Fator de atrito
F^*	Medidas de vazão totais
F_i	Medida de vazão do nó i
$FoFo$	Tubos de ferro fundido
FO	Função Objetiva
G_i	Cota topográfica do nó i (m)
H^*	Medidas de cargas totais
H_i	Medida de carga do nó i (mH ₂ O)
H_i^l	Mínima carga hidráulica aceitável
h_j	Elevação do nó j
h^o	Pressão mínima requerida para atender a demanda
I_{ij}	Valor correspondente a um único valor de perda e rugosidade absoluta
ij	Nós do conduto
$IPOP$	Número de elementos resultantes do cruzamento para cada geração
$ISTRG$	Comprimento dos <i>STRINGS</i> das variáveis
k	Número de condutos
l	Comprimento da rede (m)
L	Comprimento do conduto (m)
L_{ij}	Comprimento do conduto
$Máx$	Maximização
M_i	Número de condutos ligados ao nó i
Min	Minimização
$MPOP$	Número de melhores soluções da geração anterior para a prática do elitismo
N	Número de nós
n_0	Número de zonas com fatores de perda homogêneas

NI	Expoente de vazamento
n_c	Número de nós de monitoriamento de vazão
$NCRU$	Número de cruzamentos a serem efetuados para cada geração
n_f	Número de condutos
n_n	Número de nós de monitoriamento de pressão
n_g	Número de zonas com fatores de rugosidades homogêneas
$NGERA$	Número de gerações a serem desenvolvidas
n_h	Número de nós
NP	Número de condutos existentes na rede
NP_N	Número de nós com valores de carga hidráulica desconhecidos
n_{po}	Número de padrões de observação
$NPOP$	Número de elementos da população utilizada pelo genético
n_t	Número de conjuntos de medidas correspondentes a diferentes resistências das válvulas
$NVAR$	Número de variáveis do problema
OF	Função de Otimização
P	Carga de pressão média (mH ₂ O)
P_{SIM}	Representa o valor de pressão simulada (mH ₂ O)
P_{OBS}	Representa o valor de pressão observada (mH ₂ O)
$\bar{P}_{OBS}$	Média dos valores de pressão observados
PVC	Tubos de policloreto de vinila
Q	Representa a vazão (m ³ /s)
q_1	Representa o vazamento
q_2	Representa o vazamento distribuído
$Q_{c,T}$	Porcentagem do vazamento com relação ao valor de demanda total
Q_i	Vazamento do nó i

Q_{ij}	Vazão do conduto que liga o nó i ao nó j
QS_{ij}	Vazão de vazamento no conduto (L/s)
Q_{SIM}	Representa o valor de vazão simulada (mH ₂ O)
Q_{OBS}	Representa o valor de vazão observada (mH ₂ O)
$\bar{Q}_{OBS}$	Média dos valores de vazão observados
Re_y	Número de Reynolds
R_{ij}	Incorpora os termos independentes da equação de Hazen-Williams
RS_{ij}	Parâmetros que representa o produto de Cl_{ij} e L_{ij}
R_0	Vetor das resistências das válvulas
$R^0(V_{ij})$	Resistência local correspondente de uma possível válvula no conduto que liga ao nó i ao j
S_i	Fator de distribuição espacial da demanda relativa ao nó i
$Sign(x)$	Representa o sinal de $(H_i - H_j)$
S_i^0	Fator de distribuição espacial do nó i
$V(k)$	Abertura das válvulas de pressão
w_f	Peso atribuído a grupos de medidas de vazão
w_q	Peso atribuído a grupos de medidas de vazão
w_h	Peso atribuído a grupos de medidas de pressão
W_k	Taxa de vazamento que ocorre no conduto de número k
z_i	Cota topográfica do nó i

RESUMO

CALIMAN, R.O. (2002). *Determinação dos parâmetros do modelo pressão x vazamento para sub-setores da rede de distribuição de água de São Carlos – SP*. São Carlos , 2002. 110 p. Dissertação – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo

As redes de distribuição constituem importantes infra-estruturas, por serem responsáveis pelo abastecimento de água à população. Dessa maneira, tanto o projeto, como a operação e a manutenção dessas infra-estruturas devem ser eficientes, visando manter a sustentabilidade do recurso natural distribuído através das mesmas.

Devido à idade das redes, pressões excessivas nos condutos e outros fatores, as perdas por vazamento representam, nos dias de hoje, grande parte de toda água bombeada e tratada quimicamente para o consumo populacional. Com o objetivo de minimizar essas perdas, este trabalho visa a determinação dos parâmetros do modelo hidráulico pressão x vazamento proposto posteriormente. A determinação de tais parâmetros foi realizada através da aplicação do modelo hidráulico para sub-setores da cidade de São Carlos, onde as perdas por vazamentos mostram-se expressivas. Os referidos parâmetros foram determinados através do modelo inverso de minimização dos desvios entre dados de campo observados e valores simulados por modelo hidráulico, usando Algoritmos Genéticos (AGs). O estudo constitui parte integrante do projeto intitulado “Controle Operacional em Subsistema Urbano de Distribuição de Água”, apoiado pelo FINEP, em andamento.

Palavras-chave: Redes de distribuição; Águas para Abastecimento; Pressão; Perdas por Vazamento; Algoritmo Genéticos

ABSTRACT

CALIMAN, R.O. (2002). *Determination of the parameters of the pressure x leakage model for sub-sectors of São Carlos city*. São Carlos , 2002. 110 p. Master's Dissertation, Carlos School of Engineering, University of São Paulo, SP, Brasil

The water supply networks are very important structures for human consumption. This way, the project as well as the operation and maintenance of such systems must be efficient, focusing on keeping the sustainability of this natural resource. Due to the age of the networks, excessive pressure inside the pipes and other factors, leakage nowadays represents a considerable loss of the total pumped and chemically treated water which is to be supplied to the population. Trying to minimize these losses, this study sets out to determine the parameters for the pressure x leakage model, applying it to sub-sectors of São Carlos city network, SP, where leakage represents a considerable amount. The referred parameters determination is realized through the inverse minimization model of differences between data observed in field and those simulated values by a hydraulic model, using genetic algorithms (GAs).

Keywords : Water Supply Networks; Water Supply; Pressure; Leakage; Genetic Algorithms.

1-INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Os sistemas de abastecimento de água são responsáveis pela distribuição de um bem indispensável, que é a água de qualidade para o consumo humano, principalmente se analisarmos o problema sob a ótica da sustentabilidade de tal recurso. A água a ser distribuída nos locais de consumo não é só função da sua disponibilidade em termos de quantidade e qualidade, mas depende também do funcionamento hidráulico do seu sistema de distribuição. Atualmente, a crescente demanda por água se contrapõe à sua crescente escassez, tornando-se inevitável a necessidade de estudos que visem a redução de perdas por vazamento de águas já bombeadas e quimicamente tratadas. Embora não existam sistemas de abastecimento totalmente estanques, devido às perdas de água, é inadmissível o volume de água bombeada e quimicamente tratada destinada ao abastecimento urbano que as cidades brasileiras perdem devido à ocorrência de vazamentos em suas redes de distribuição.

As perdas por vazamento são enquadradas em dois grupos: físicas, que são decorrentes de vazamentos em redes e ramais prediais e as não físicas, relativas aos consumos de água efetivamente entregues e utilizados pela população, porém não registrados pelos hidrômetros. Geralmente as perdas físicas, resultantes de vazamentos nas redes e em ramais prediais, correspondem à maior porcentagem dos índices de perdas observados.

Os vazamentos podem ocorrer através de furos ou aberturas nas paredes dos condutos da rede e nas junções que promovem as ligações entre os tubos. No primeiro caso, os vazamentos podem ser detectados por equipamentos acústicos (*stick* e geofone), podendo em seguida ser reparadas as tubulações que contenham furos ou aberturas. Já no caso de ocorrência de vazamentos nas junções, a detecção é dificultada, já que os

vazamentos espalham-se por grandes áreas de rede, sob a denominação de vazamentos não visíveis. Portanto, devem ser adotadas sistemáticas alternativas de controle para esse tipo de vazamento. Sabendo-se que tais vazamentos são função das pressões atuantes no interior das tubulações da rede, uma maneira de realizar um controle efetivo sobre essas perdas é a localização estratégica de válvulas de controle de pressão na rede. Tais válvulas permitem flexibilidade de operação da rede de abastecimento urbano, pois ajustam as pressões de acordo com a demanda requerida pela população ao longo do dia, possibilitando um elevado grau de eficiência do sistema de distribuição com a redução de vazamentos. Dessa maneira pode-se promover um bom funcionamento das redes de distribuição de água, gerando quantidade de água suficiente para o consumo da população, com pressão adequada e nível de perdas aceitável.

A bibliografia apresenta diversos trabalhos (GERMANOPOULOS e JOWITT (1989); JOWITT e XU (1990); PEZZINGA (1994); REIS et al. (1997); PEZZINGA e GUELI (1998); VAIRAVAMOORTHY e LUMBERS (1998) sobre o uso de válvulas de controle de pressão, visando minimizar as perdas de água por vazamentos, com auxílio de modelos do tipo pressão x vazamento na forma:

$$L = C1 \cdot l \cdot P^{N1} \quad (1)$$

onde: L = vazamento em L/s, l = comprimento do trecho de rede em m, P = carga de pressão média no trecho considerado em mH_2O , $C1$ e $N1$ = parâmetros da relação vazamento x pressão.

A maioria dos trabalhos publicados pressupõe o conhecimento das relações entre pressão média e vazamento através dos parâmetros $C1$ e $N1$. Essas relações, embora já bastantes estudadas em outros países como Reino Unido e Arábia Saudita, devem ser aplicadas com cautela no caso do Brasil, pois as condições das redes de abastecimento são diferentes no que diz respeito aos materiais empregados, idade das tubulações, tipo de solo, profundidade da rede, montagem, manutenção e outros parâmetros.

Alguns autores (KHADAM et al. (1991), LAMBERT (2000)) reportam a determinação de parâmetros globais para os modelos do tipo pressão x vazamento com base em dados simultâneos de vazão de alimentação e pressões em pontos chave de setores isolados de rede.

TUCCIARELLI et al. (1999) realizam recentemente a determinação dos mesmos através de simulação hidráulica da respectiva rede.

O reconhecimento da importância da simulação na previsão de comportamento das redes, quando submetidas às mais diversas condições operacionais, destaca essa última alternativa como sendo mais robusta.

O presente trabalho tem como objetivo a elaboração de um módulo computacional com propósitos de avaliação das perdas inerentes utilizando-se dados de testes de campo realizados durante a madrugada, para a determinação dos referidos parâmetros do modelo pressão x vazamento aplicados a sub-setores da rede de distribuição de águas para abastecimento da cidade de São Carlos, S.P., utilizando como ferramenta o método de otimização de Algoritmos Genéticos.

2 REVISÃO DA LITERATURA PERTINENTE

O controle das perdas por vazamento em redes de distribuição de água, teve grande evolução a partir de estudos realizados por GERMANOPOULOS e JOWITT (1989) e JOWITT e XU (1990), uma vez que o modelo sugerido por esses autores possibilitaram que as perdas por vazamento fossem incluídas explicitamente nos modelos hidráulicos das redes de abastecimento dedicados à determinação da operação otimizada das válvulas redutoras de pressão.

GERMANOPOULOS e JOWITT (1989), a partir da relação conhecida entre vazamento e pressão de serviço nos condutos de uma rede (eq. (1)), propuseram uma metodologia para a determinação das aberturas ótimas das válvulas de controle de pressão, a partir de uma localização pré-estabelecida para essas válvulas. Tal metodologia tem o objetivo de minimizar o excesso de pressão em uma rede de abastecimento e consequentemente reduzir as perdas por vazamento. Essa minimização é realizada, levando-se em consideração as características hidráulicas da rede, expressas por equações de equilíbrio nos nós, energia e restrições operacionais da rede de abastecimento.

O modelo consiste na determinação do conjunto V das aberturas $V(k)$ ótimas das válvulas de controle de pressão, através da minimização do somatório das diferenças entre as cargas hidráulicas calculadas(H_i) e as cargas hidráulicas requeridas(H_i^*) necessárias para atender a demanda. O problema resolvido por tais autores foi expresso como:

$$\text{Min}_{V_k} \sum_{i \in Id} (H_i - H_i^*) \quad (2)$$

sujeito a:

1- Equilíbrio nos nós:

$$\sum_{j \in R_i} Q_{ij} + 0,5 \sum_{j \in R_i} QS_{ij} + C_i = 0; \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

2- Carga hidráulica mínima aceitável para os nós:

$$H_i \geq H_i^*; \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

3- Abertura máxima e mínima das válvulas:

$$V(k)^{\min} \leq V(k) \leq V(k)^{\max}; \quad k = 1, 2, \dots, NV \quad (5)$$

onde: Q_{ij} representa a vazão do trecho ij , QS_{ij} o vazamento, R_i os nós conectados ao nó i , C_i a demanda de consumo do nó i , N é o número de nós com carga hidráulica desconhecida, NV o número de válvulas na rede de distribuição de água e H_i o valor de carga hidráulica do nó i .

No modelo citado a equação de Hazen-Williams, que relaciona vazão, perda de carga e características do conduto, apesar de ser válida apenas para escoamento turbulento, foi utilizada, devido à aplicabilidade prática:

$$Q_{ij} = \frac{\alpha \cdot CHW_{ij} \cdot D_{ij}^{2.63} \cdot \text{Sign}(H_i - H_j) \cdot |H_i - H_j|^{0.51}}{L_{ij}^{0.54}} \quad (6)$$

onde : Q_{ij} representa a vazão(L/s); D_{ij} diâmetro do conduto(m); L_{ij} comprimento do conduto (m); CHW_{ij} coeficiente de Hazen-Willians para o conduto que liga o nó i ao nó j ; α , constante que depende das unidades utilizadas no problema e $Sign(x)$ representa o sinal de x .

No caso de válvulas localizadas entre os nós i e j , a relação vazão-perda de carga, pode ser expressa por:

$$Q_{ij} = V(k) \cdot R_{ij} \cdot Sign(H_i - H_j) \cdot |H_i - H_j|^{0.54} \quad (7)$$

onde : $V(k)$ é um parâmetro que representa a abertura da válvula correspondente, sendo que $V(k) = 1$ representa a válvula totalmente aberta, e $V(k) = 0$ representa a válvula totalmente fechada e R_{ij} incorpora os termos independentes da equação de Hazen-Williams. A relação não linear entre vazamento e a pressão de serviço foi aproximada pela seguinte função, obtida através de dados experimentais:

$$QS_{ij} = CL_{ij} \cdot L_{ij} \cdot (P_{ij})^{1.18} = RS_{ij} \cdot (P_{ij})^{1.18} \quad (8)$$

onde : QS_{ij} representa a vazão de vazamento no conduto; CL_{ij} é o coeficiente que relata vazamento por unidade de comprimento do conduto de acordo com a pressão de serviço e depende das características do sistema (como idade do conduto e propriedades do solo); RS_{ij} é o parâmetro que representa o produto de CL_{ij} e L_{ij} ; e P_{ij} é a pressão média de serviço, que pode ser calculada por:

$$P_{ij} = 0.5[(H_i - G_i) + (H_j - G_j)] \quad (9)$$

onde : G_i representa a cota topográfica do nó i .

Os referidos autores utilizaram o método da teoria linear para resolver o problema, pela sua simplicidade e facilidade de programação. De acordo com essa formulação as variáveis desconhecidas são as cargas hidráulicas H_i e as aberturas das válvulas incorporadas a rede $V(k)$, enquanto que os dados que devem ser inicialmente conhecidos são: as cargas hidráulicas nos nós ligados aos reservatórios, as aberturas máximas e mínimas das válvulas e a posição das mesmas na rede, as demandas e cotas relativas aos nós, as características hidráulicas dos condutos da rede de distribuição (comprimento, diâmetro e coeficientes de atrito), a carga hidráulica ideal requerida para atender a demanda nos nós, e os parâmetros do modelo vazamento/pressão.

JOWITT e XU (1990), propuseram um refinamento para o modelo de GERMANOPOULOS e JOWITT (1989), sendo que a sistemática é baseada na minimização dos vazamentos de forma direta, e não na minimização das pressões do sistema de distribuição. Assim, o problema de otimização para esse novo modelo é descrito a partir de uma minimização direta das perdas por vazamento, através da alteração da função objetivo como é mostrado a seguir:

$$\underset{V(k)}{\text{Min}} \sum_{j \in R_i} QS_{ij}, \quad i=1,2,\dots,N \quad (10)$$

Na resolução do modelo proposto por JOWITT e XU (1990) também utilizou a técnica de linearizações sucessivas, apoiada na teoria linear. A sistemática de linearização adotada mostrou ser mais apropriada do que a empregada em GERMANOPOULOS e JOWITT (1989), já que resultou em solução mais eficiente para o problema.

Os modelos citados, apesar de promoverem sistemáticas para o controle de perdas por vazamento em uma rede de abastecimento, não enquadraram questões importantes como: a localização otimizada das válvulas na rede e o número de válvulas a adotar. Tais assuntos

vem sendo muito explorados na bibliografia. Dentre autores de trabalhos que tratam de tais aspectos, pode-se citar REIS et al. (1997) e PEZZINGA e GUELI(1999).

REIS et al. (1997), com base no modelo de JOWITT e XU (1990), apresentaram uma metodologia para a determinação da localização ótima de válvulas controladoras de pressão, utilizando algoritmos genéticos como ferramentas de otimização. Partindo de um número máximo estabelecido de válvulas de controle, o algoritmo genético determina a localização dessas válvulas de maneira que a redução de vazamentos seja maximizada, tendo como parâmetros conhecidos os valores de demanda nos nós e os níveis dos reservatórios. O modelo de JOWITT e XU (1990) é usado para avaliação hidráulica da rede e determinação das aberturas otimizadas para as válvulas.

A metodologia proposta por REIS et al. (1997), baseada na determinação das localizações das válvulas de controle, via algoritmos genéticos, difere das propostas anteriores, pois realiza a determinação simultânea das aberturas e localizações ótimas das válvulas na rede de distribuição. O vazamento é minimizado para obter as aberturas das válvulas, para uma determinada localização das válvulas, e a redução de vazamento é maximizada pelos algoritmos genéticos para a determinação da localização das válvulas.

Outros trabalhos presentes na literatura tratam especificamente do problema da dificuldade de convergência que a sistemática nos moldes sugeridos por GERMANOPOULOS e JOWITT (1989) e JOWITT e XU (1990) gera. São exemplos de solução desses problemas os trabalhos elaborados por VAIRAVAMOORTHY e LUMBERS (1995) e GUELI e PEZZINGA (1998).

VAIRAVAMOORTHY e LUMBERS (1995), também tratam da otimização das aberturas das válvulas, devido à dimensão do problema e da não-linearidade do modelo empregado. Esses autores propuseram uma metodologia para a otimização das aberturas de válvulas de controle, baseada em uma técnica de solução que envolve a resolução sucessiva de subproblemas quadráticos, como sendo uma aproximação do problema original. Tal

metodologia foi proposta para contornar as dificuldades inerentes à aplicação da teoria linear conforme sugeridas por GERMANOPOULOS e JOWITT (1989) e JOWITT e XU (1990).

O modelo matemático proposto emprega duas funções objetivo, sendo que ambas avaliam as pressões nos nós da rede de abastecimento. A primeira minimiza o total de vazamentos:

$$Min_z = \sum_{k=1}^{NP} w_k \quad (11)$$

onde: NP é número de condutos existente na rede; w_k a taxa de vazamento que ocorre no conduto de número k , que liga o nó i ao nó j , podendo ser estimada por:

$$w_k = C_{ij} L_{ij} \left[\frac{1}{2} \left\{ (H_i - h_j) + (H_j - h_j) \right\} \right]^{1,18} \quad (12)$$

onde: C_{ij} é coeficiente que relaciona o vazamento por unidade de comprimento, sendo função da pressão média de serviço; L_{ij} o comprimento do conduto que liga o nó i ao nó j ; H_i a carga hidráulica no nó i e h_j a cota do nó j .

A segunda minimiza a soma dos quadrados dos desvios entre a pressão nos nós e a pressão de serviço requerida para esses nós.

$$Min_z = \sum_{i=1}^{NPN} (H_i - H_i^L)^2 \quad (13)$$

onde: H_i^L é a mínima carga hidráulica aceitável e NPN o número de nós com valores de carga hidráulica desconhecidos.

A técnica de resolução de VAIRAVAMOORTHY e LUMBERS (1995) mostrou-se mais robusta e eficiente computacionalmente do que técnicas propostas anteriormente. Também foram obtidas outras vantagens, devido a utilização da sequência de programação quadrática, como o fato de o problema possuir poucos graus de liberdade e apresentar melhor convergência em relação aos métodos aplicados em estudos anteriores, tais como propostos por GERMANOPOULOS e JOWITT (1989) e JOWITT e XU (1990).

GUELI e PEZZINGA (1998) propuseram o emprego de AGs para a determinação das aberturas otimizadas das válvulas redutoras de pressão em substituição à técnica de programação não-linear, que segundo eles, apresenta a mesma dificuldade de convergência da programação linear.

PEZZINGA(1994) propôs ainda o uso da lógica nebulosa (*fuzzy logic*) para a determinação da operação otimizada das válvulas redutoras de pressão, considerando demandas incertas.

Nota-se, contudo, que os referidos estudos foram desenvolvidos com base em relações pré-estabelecidas para a relação pressão x vazamento. Os trabalhos de KHADAM et al.(1991) e TUCCIARELLI et al. (1999) apresentam metodologias para a determinação de tais relações.

KHADAM et al. (1991) realizaram estudos sobre as perdas por vazamento geradas na rede de abastecimento da cidade de Ar-Riyadh, localizada na Arábia Saudita, visando obter informações sobre a relação vazamento x pressão. Para realização do estudo, foram feitas medições e inspeções em seis áreas da cidade, com 25 hectares cada, selecionadas por possuírem diferentes características.

As taxas de vazamentos foram calculadas com base nas pressões de serviço médias de cada área, e as relações vazamento x pressão obtidas não mostraram seguir uma relação exponencial específica. De acordo com os autores, essa não uniformidade da relação vazamento x pressão, aparentemente, resultou de fatores relacionados às variações das pressões de serviço, à fadiga devido a mudanças de temperatura nos condutos e à má

instalação, que resultam em vazamentos nas juntas da rede de distribuição. Esses estudos evidenciaram o caráter local dos valores encontrados para os parâmetros do modelo pressão x vazamento.

Recentemente, TUCCIARELLI et al.(1999) propuseram a estimativa da perda de água em redes de distribuição por meio de um processo iterativo realizado em duas etapas. A primeira etapa consiste na estimativa dos parâmetros do modelo de simulação da rede. Essa estimativa é realizada através da minimização do somatório dos quadrados das diferenças entre os valores observados e calculados da carga hidráulica e vazão, tendo como dados conhecidos o número de nós e condutos da rede em questão. Dentre os parâmetros estimados estão a constante e o expoente de perda, que correspondem à perda por vazamento por unidade de comprimento relativa a cada área da rede (zona).

A segunda etapa corresponde à realização da otimização das aberturas das válvulas incluídas na rede, respeitando as pressões mínimas nos nós e restrições de balanço hídrico.

O modelo empregado assume que os vazamentos ocorram nas regiões vizinhas aos nós, admitindo que as perdas de água sejam proporcionais às dimensões dos vazamentos e aos valores das pressões de serviço elevados a um expoente $C1$.

O modelo de simulação empregado na calibração promove a relação numérica entre os parâmetros da rede e as variáveis de estado (vazão e cargas hidráulicas). Esse modelo assume condições de escoamento permanente e combina as equações de balanço hídrico nas seguintes equações algébricas:

$$\sum_{j=1}^{M_i} \frac{H_j - H_i}{\sqrt{R_{ij} |H_j - H_i|}} - \delta_i Q_i - PS_i = 0 \quad i=1,2,\dots,N \quad (14)$$

onde: N é o número de nós; M_i o número de condutos ligados ao nó i ; H_i a carga hidráulica no nó i ; Q_i o vazamento no nó; δ_i é igual a 1 ou zero se a carga total no nó i é

maior ou menor que a elevação topográfica; P a demanda total do sistema; e S_i o fator de distribuição espacial da demanda relativa ao nó i . Q_i é o termo calculado, assumindo que os condutos em cada zona possuem valores constantes de vazamento por área de superfície de tubo, resultante da expressão:

$$Q_i = (H_i - z_i)^a \sum_{j=1}^{M_i} \frac{\pi}{2} D_{ij} \theta_{ij} L_{ij} \quad (15)$$

onde: a é expoente de perda; L_{ij} comprimento do tubo que liga o nó i ao nó j ; D_{ij} o diâmetro do conduto; Z_i a cota topográfica no nó i e θ_{ij} vazamento por unidade de superfície do tubo que liga o nó i ao nó j , z_i cota topográfica. O fator de distribuição espacial S_i é assumido igual a:

$$\begin{aligned} S_i &= S_i^0 & \text{para} & \quad H_i - z_i > h^0 \\ S_i &= S_i^0 \sin^2 \left(\frac{H_i - z_i}{2h^0} \right) & \text{para} & \quad h^0 \geq H_i - z_i > 0 \\ S_i &= 0 & \text{para} & \quad 0 \geq H_i - z_i \end{aligned} \quad (16)$$

onde: S_i^0 é o fator de distribuição espacial do nó i (sendo a soma desses fatores igual a 1); h^0 a pressão mínima requerida para atender a demanda; R_{ij} é o coeficiente de resistência do conduto que liga o nó i ao nó j de acordo com a fórmula de Prandtl-Nikuradse, e foi avaliada pelos autores como:

$$R_{ij} = R^0(V_{ij}) + 0,0826 \frac{L_{ij}}{\lambda \cdot D_{ij}^5} \quad (17)$$

$$\text{sendo: } \lambda = 4 \left(\log \left(\frac{\varepsilon_{ij}}{3,17 \cdot D_{ij}} \right) \right)^2 \quad (18)$$

onde: $R^0(V_{ij})$ é a resistência local correspondente de uma possível válvula, no conduto que liga o nó i ao nó j e ε_{ij} a rugosidade absoluta do ij .

Avaliando a perda de água através da solução do problema inverso, o valor de Q_i pode ser calculado através dos valores estimados P , θ_{ij} e ε_{ij} . A estimativa dos parâmetros pode ser realizada através de medidas das cargas totais (H^*) e vazões (F^*) de um conjunto de n_h nós e n_f condutos. As medidas são usadas para a solução do problema inverso:

$$\text{MinOF}_1 = \sum_{j=1}^{n_h} w_h \frac{(H_j - H_j^*)^2}{\left(\sum_{i=1}^{n_h} H_i^* \right)^2} + \sum_{j=1}^{n_f} w_f \frac{(F_j - F_j^*)^2}{\left(\sum_{i=1}^{n_f} F_i^* \right)^2} \quad (19)$$

onde: OF_1 representa a função objetivo, F os valores de vazão computados e H as medidas de carga hidráulica para os primeiros n_h nós e n_f condutos, respectivamente; e w_h e w_f são pesos atribuídos a grupo de medidas de pressão e vazão respectivamente. O quadrado das diferenças é dividido pela soma dos valores de cada conjunto de medidas elevada ao quadrado, assim a função objetivo não depende das unidades do sistema.

As variáveis de decisão do problema de otimização da eq. (19) são os parâmetros da rede: a total demanda P , o expoente de perda α , o coeficiente de perda de perda θ_{ij} ; e a rugosidade ε_{ij} . O fator de distribuição espacial pode ser estimado com certo grau de confiança, a partir do conhecimento da distribuição populacional.

Para conseguir um problema determinado e estável, é necessário reduzir o nível de parametrização, assumindo que os valores de rugosidade absoluta e de perda sejam

homogêneos para áreas específicas (zonas). Isso leva ao uso de um número menor de variáveis de decisão. As eqs. (14) e (15), podem ser expressas como:

$$\sum_{j=1}^{M_i} \frac{H_j - H_i}{\sqrt{R_{ij}(I_{ij}, V_{ij})|H_j - H_i|}} - \delta_i \cdot Q_i - P \cdot S_i = 0 \quad (20)$$

$$Q_i = (H_i - z_i)^a \sum_{j=1}^{M_i} \frac{\pi}{2} D_{ij} \cdot \theta(I_{ij}) \cdot L_{ij} \quad (21)$$

onde: I é um vetor, com cada valor correspondendo a um único valor de perda e rugosidade absoluta. O problema de otimização (19), pode ser escrito na forma:

$$\begin{aligned} & \text{Min}_Z OF_1 \\ & Z = (P, a, \theta_1, \dots, \theta_{n_\theta}, \varepsilon_1, \dots, \varepsilon_{n_\varepsilon}) \end{aligned} \quad (22)$$

onde: Z é o vetor das variáveis de decisão; e n_θ e n_ε são os números de zonas com fatores de perda e rugosidade homogêneos, respectivamente.

De acordo com os autores, a solução do problema (19) pode diferir dos valores reais de demanda total, expoente de perda, fatores de rugosidade, e fatores de perda, devido a 3 tipos de erro. O primeiro erro diz respeito à simplificação da realidade através da utilização de um modelo em que são adotadas condições de escoamento permanente, homogeneidade das perdas e dos fatores de rugosidade. O segundo, consiste na diferença entre os valores observados e os valores verdadeiros das variáveis de estado, ou seja, erros de medida, e o terceiro, devido à forma não convexa da função objetivo OF_1 .

Para melhorar a forma da função objetivo são usados os logaritmos dos fatores de rugosidade, como variáveis de decisão.

Se o número de variáveis desconhecidas é igual ao número de equações, o problema inverso da eq. (19), tem infinitas soluções, pois os mesmos valores para vazão e pressão podem ser obtidos por diferentes combinações de fator de perda e demanda . De acordo com os autores, para se obter uma única solução é possível fechar parcialmente as válvulas para a medição de diferentes valores de vazão e pressão, mudando o problema (19) para a forma:

$$\text{Min}_Z OF_1 = \sum_{t=1}^{n_t} \left[\sum_{j=1}^{n_h} w_h \frac{(H_{t,j} - H_{t,j}^*)^2}{\left(\sum_{i=1}^{n_h} H_{t,i}^* \right)^2} + \sum_{j=1}^{n_f} w_f \frac{(F_{t,j} - F_{t,j}^*)^2}{\left(\sum_{i=1}^{n_f} F_{t,i}^* \right)^2} \right] \quad (23)$$

onde: n_t é o número de conjuntos de medidas correspondentes a diferentes resistências das válvulas (dois conjuntos no caso) . A diferença entre os dois conjuntos aumenta, para mesmo valor de abertura, juntamente com a relação perda de água x carga hidráulica, porque a carga hidráulica não depende da pressão até um valor mínimo ser encontrado.

Através da avaliação de P , α , θ e ε com a otimização das aberturas das válvulas, o problema (23) é descrito por:

$$\text{Máx}_{R_0} OF_2 = \left(\text{Min}_t \left(\sum_{j=1}^{n_h} w_h \frac{|H_{n_t,j} - H_{t,j}^*|}{\left| \sum_{i=1}^{n_h} H_{t,i}^* \right|} + \sum_{j=1}^{n_f} w_f \frac{|F_{n_t,j} - F_{t,j}^*|}{\left| \sum_{i=1}^{n_f} F_{t,i}^* \right|} \right) \right) \quad (24)$$

$$\text{sujeito a: } H_{n_t,j} - z_j \geq h^0, \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (25)$$

onde: R_o é vetor das resistências das válvulas, que são as variáveis de decisão do problema de otimização e $Min_t(.)$ é o valor mínimo para qualquer inteiro t entre 1 e $(n_t - 1)$.

A metodologia descrita foi testada com sucesso em alguns experimentos numéricos, usando medidas de vazão e pressão.

MARTINEZ et. al (1999) também propuseram um modelo para um sistema de distribuição de água. Esse modelo foi criado para o sistema de abastecimento da cidade de Valência responsável pelo fornecimento de água para 1.500.000 pessoas, ao longo de 1500 km de rede. Tal rede é abastecida por duas estações de tratamento e é regulada por um número de válvulas, sendo esses fatores levados em consideração para a construção e calibração do modelo dinâmico da rede em questão.

O modelo de calibração dinâmico foi explorado para diferentes objetivos: simulações sob diferentes condições de operação, estabelecimento da idade da água (tempo de permanência da água na rede). No modelo foram considerados vazamentos de acordo com as expressões (26) e (27) e demandas dependentes da pressão:

$$q_1 = c_1 \cdot L \cdot D^d \cdot e^{a\tau} \cdot p^\beta \quad (26)$$

onde: q_1 representa o vazamento; c_1 é um coeficiente único para o setor, p a pressão média ao longo do tubo; L e D comprimento e diâmetro do tubo; a o coeficiente dependente do material do tubo; e a espessura do tubo; d o expoente ajustado de acordo com testes de campo; τ a idade do tubo e β o expoente de vazamento, tendo valores entre 1,1 e 1,2.

Também foram incorporados ao modelo os vazamentos com ocorrência em conexões e furos ao longo dos condutos através da formulação que segue:

$$q_2 = c_2 \cdot Q_{C,T} \cdot p^\beta \quad (27)$$

onde : q_2 representa o vazamento, c_2 um coeficiente único para o setor, determinado anteriormente, admitindo como sendo esse tipo de vazamento o total de vazamento do sistema e $Q_{C,T}$ a porcentagem do vazamento com relação ao valor de demanda total.

O modelo proposto por MARTINEZ et. al (1999) apresentou progressos na medida em que incorporou vazamentos distribuídos ao longo dos condutos e localizados nos encaixes entre eles.

Pode-se dizer que a revisão bibliográfica realizada indicou uma variedade de trabalhos que se apoiam em relações pré-estabelecidas entre vazamentos e pressões. Entretanto, poucos trabalhos tratam do problema da determinação de tais parâmetros, que constitui o alvo das investigações aqui reportadas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

A presente pesquisa, aplicada aos sub-setores da cidade de São Carlos, cujas redes apresentam-se esquematizadas nas FIGURAS 3.6 e 3.8, foi desenvolvida com base em ensaios computacionais e de campo. Para tanto utilizou os recursos abaixo relacionados:

Laboratórios: A pesquisa utilizou o laboratório de simulação computacional do SHS-EESC-USP devidamente instrumentado com computadores, impressora, *softwares* como *Fortran*, Biblioteca da NAG (Numerical Algorithm Group) e planilhas eletrônicas. No laboratório de Hidráulica do SHS-EESC-USP foram aferidos os instrumentos de medidas de pressão, utilizando-se manômetro de peso morto *Haenni* e medidores de vazão ultrassônico através de balança (FIGURA 3.1) e linhas pressurizadas de circuito fechado (FIGURA 3.2).

FIGURA 3.1- Ensaio da Balança

FIGURA 3.2- Linhas pressurizadas de circuito fechado

Equipamentos para medidas de campo: A determinação dos parâmetros do modelo pressão x vazamento foi realizada após a etapa de detecção e reparo de vazamentos visíveis relativos a cada sub-setor de rede isolável estudado, utilizando para esse propósito específico os equipamentos abaixo relacionados:

- Geofone eletrônico e haste de escuta (FIGURA 3.3), instrumento de comunicação (via rádio) em campo, acessórios para a segurança pessoal da equipe.

FIGURA 3.3- Geofone eletrônico e haste de escuta

Os dados requeridos para a determinação dos parâmetros do modelo incluem leituras simultâneas de pressão e vazão. Assim, foram utilizados os seguintes instrumentos para medidas de pressão e vazão:

- Pressão :. Foram disponibilizados para o trabalho oito medidores armazenadores de dados tipo *Metrolog NA* da *Technolog* (FIGURA 3.4), utilizados para medir e armazenar dados de pressão simultaneamente no sistema de distribuição, sendo a equipe de pesquisadores treinada para o seu uso.

FIGURA 3.4- Armazenadores de dados tipo *Metrolog NA* da *Technolog*

- Vazão : Para esse fim, contou-se com dois medidores de vazão ultra-sônicos não intrusivos, modelo *Porta Flow 300* da *Micronics* (FIGURA 3.4), utilizados no trabalho de campo , cujo treinamento também foi realizado.

FIGURA 3.5- Medidores de vazão ultra-sônico

3.2 Métodos

3.2.1 Definição dos sub-setores a serem analisados

Através de análise conjunta com diretores e gerentes do SAAE - São Carlos e da equipe de trabalho do Departamento de Hidráulica da USP, foram determinados os sub-setores da rede de distribuição de água da cidade de São Carlos alvos do estudo, tendo sido escolhidos os sub-setores Jardim Monte Carlo e São Carlos 3. Tais setores caracterizam-se por apresentar elevado índice de ocorrência de vazamentos, além de serem facilmente isoláveis para efeito da realização do balanço hídrico.

3.2.2 Setor Monte Carlo

3.2.2.1 Caracterização do Setor Monte Carlo

O Jardim Monte Carlo faz parte do sistema de distribuição de águas para abastecimento da cidade de São Carlos (SP). Abastece uma população em torno de 5.072 habitantes (ano 2000), ao longo dos seus 9.173 metros de extensão, com tubulações de ferro fundido e PVC.

Trata-se de um setor isolado, uma vez que a adutora que reforçava o abastecimento da área teve seu registro fechado, de maneira a manter um único ponto de abastecimento de vazão à sub-rede em estudo.

3.2.2.2 Sistematização de dados para o Setor Jardim Monte Carlo

Testes do modelo computacional elaborado foram realizados utilizando medidas de vazão e pressão obtidas durante um teste noturno de vazamentos no setor da rede de São Carlos, responsável pelo abastecimento do Bairro Monte Carlo. Essas medidas foram obtidas pela equipe formada pelos seguintes engenheiros: Adilson dos Santos, Urandi Gratão e Fernando das Graças Braga da Silva, no âmbito do projeto FINEP, do qual este trabalho é integrante.

Tais medidas de pressão foram realizadas em diferentes nós da rede do setor Monte Carlo, como é mostrado pela FIGURA 3.6, considerando pontos médios (cotas intermediárias), pontos críticos (cotas topográficas mais elevadas) e pontos extremos (cotas topográficas mais baixas), conforme indicação na TABELA 3.1. Com relação às medidas de vazão, foram realizadas medições na entrada do setor, mediante manobras de fechamento gradual da VRP (válvula redutora de pressão) existente, durante período noturno (4 manobras baseadas no número de voltas: registro totalmente aberto = manobra 1; 75% aberto = manobra 2; 50% aberto = manobra 3 e 25% aberto = manobra 4), com a finalidade de obter quatro patamares para os valores de pressão e seus respectivos valores de vazão. Todo procedimento para a geração do arquivo de dados, assim como atividades relacionadas ao trabalho de campo desenvolvido nesse setor, são detalhados por Santos (2000).

TABELA 3.1 – Pontos utilizados para monitoriamento de pressão e vazão

nó	tipo de medida	cota(m)	natureza
56a	pressão	855,0	entrada do setor
56b	pressão/vazão	855,0	entrada do setor
57	pressão	834,0	médio
7	pressão	853,7	crítico
19	pressão	857,3	crítico
26	pressão	837,6	médio
38	pressão	836,5	médio
51	pressão	816,4	extremo

* a e b - antes e depois da VRP (nó 56)

3.2.3 Setor São Carlos III

3.2.3.1 Caracterização do Setor São Carlos III

O Setor São Carlos III, esquematizado na FIGURA 3.7 (melhor visualização – APÊNDICE), que também faz parte do sistema de distribuição de águas para abastecimento da cidade de São Carlos (SP), é responsável pelo abastecimento de uma população em torno de 10.000 habitantes (ano 2001), ao longo dos seus 23.060 metros de extensão, com tubulações de PVC e fibro-cimento.

Trata-se de um setor isolado, uma vez que a interligação com o setor responsável pelo abastecimento do bairro Santa Felícia, que reforçava o abastecimento, teve o seu registro fechado durante os experimentos, de maneira a evitar qualquer fuga hídrica do setor em estudo.

3.2.3.2 Determinação de nós para o cálculo das demandas

Os nós para o Setor São Carlos III foram estabelecidos considerando as junções da rede, os consumidores especiais (com consumo maior ou igual a 200m³) e pontos estratégicos do setor. Para tanto foram utilizados cadastros do SAAE referentes ao consumo do mês de Dezembro de 2001 em que são registrados os consumos das quadras do Setor São Carlos III. A FIGURA 3.7 mostra o mapa do setor São Carlos III com os respectivos nós de demanda, assim como as quadras.

O cálculo da demanda de cada nó foi realizado estabelecendo-se as respectivas áreas de influência. Dividiu-se o consumo mensal das quadras pelo número de nós pertencentes às mesmas, sendo assim, a demanda atribuída a cada nó i proporcionalmente ao consumo das quadras que o abastecem. Tais demandas foram utilizadas para análise do setor, podendo ser visualizadas no ANEXO A.

FIGURA 3.7- Sub-setor São Carlos III com nós de demanda e quadras de consumo

3.2.3.3 Levantamento histórico da incidência de vazamentos do setor

Com a finalidade de verificar a ocorrência de vazamentos no setor São Carlos III e localizar as áreas de maior incidência, foram obtidos junto ao SAAE os registros de reparos de vazamentos realizados no período de 06/2000 a 12/2000. Tais informações foram de suma importância no trabalho em questão, na medida em que funcionaram como ferramenta na subdivisão do setor em diferentes zonas, de maneira a melhor representar hidraulicamente o Setor São Carlos III. Também foi realizado o rastreamento com ajuda de haste de escuta (FIGURA 3.8) e geofone eletrônico (FIGURA 3.9). Essa atividade visou localizar vazamentos localizados passíveis de serem detectados para posterior reparo pelo SAAE, já que o modelo hidráulico utilizado não incorpora tais vazamentos explicitamente. A FIGURA 3.10 mostra a localização dos vazamentos reparados pelo SAAE no citado período, assim como os localizados pelo rastreamento.

FIGURA 3.8- O rastreamento com ajuda de haste de escuta

FIGURA 3.9- O rastreamento com ajuda de geofone eletrônico

3.2.3.4 Testes de Vazamentos Noturnos

Os testes de vazamentos noturnos no setor São Carlos III foram realizados no período das 00:00 às 4:00 horas do dia 06/12/00, durante o qual o consumo pode ser considerado irrelevante para aquele setor e, portanto, adequado para experimentos.

Levando-se em consideração a topografia do terreno e a disposição espacial da rede, foram selecionados nós para a instalação de medidores de pressão e vazão (FIGURA 3.10). Nós representativos de naturezas diversas: entrada no setor, críticos (altitude elevada), médios (altitude média) e extremos (altitude baixa), foram escolhidos para a análise de comportamento da rede em estudo, conforme lista a TABELA 3.1.

TABELA 3.2- Nós de medidas do Setor São Carlos III

Nós	TIPO DE MEDIDA	COTA (m)	NATUREZA
65	Pressão	868,80	Crítico
142	Pressão /Vazão	872,90	Crítico Jusante-Res Elevado Entrada do setor
87	Pressão	872,70	Crítico
76	Pressão	865,50	Médio
124	Pressão	862,40	Médio
48	Pressão	858,30	Médio
16	Pressão	846,70	Extremo
20	Pressão	853,70	Extremo

O experimento foi realizado variando-se pressões e vazões na rede como resultado de manobras sucessivas de fechamento do registro a jusante do reservatório elevado (nó 142) responsável pelo abastecimento do setor. Foram instalados oito medidores contínuos de pressão em cavaletes residenciais próximos aos nós da TABELA 3.2 e medidores de vazão e pressão na entrada do setor, conforme as ilustrações das FIGURAS 3.11 e 3.12. Dessa maneira, foram registradas medidas simultâneas de vazão e pressões no setor .

FIGURA 3.11- Exemplo de ponto de medida de pressão

FIGURA 3.12- Ponto de medida de vazão na entrada do setor.

3.2.4 Modelo de otimização

O problema inverso de determinação dos parâmetros do modelo de vazamentos a partir de observações de campo pode ser expresso através da minimização dos desvios entre os valores calculados pelo modelo de avaliação hidráulica (TUCCIARELLI et. al. (1999)) e os correspondentes observados em campo, como:

$$\text{Min}_{CI, NI} \sum_{i=1}^{n_{po}} \left[\sum_{j=1}^{n_n} w_h \frac{|P_{ijOBS} - P_{ijSIM}|^2}{(\bar{P}_{OBS})^2} + \sum_{k=1}^{n_c} w_q \frac{|Q_{ikOBS} - Q_{ikSIM}|^2}{(\bar{Q}_{OBS})^2} \right] \quad (28)$$

onde: P_{ijSIM} e P_{ijOBS} representam os valores de pressão simulada e observada, respectivamente, para o nó j e padrão de observação i ; Q_{ikSIM} e Q_{ikOBS} representam os valores de vazão simulada e observada, respectivamente, para o conduto k e padrão de observação i ; n_n representa o conjunto de nós de monitoramento dos valores de pressão; n_c representa o conjunto de condutos de monitoramento dos valores de vazão; $\bar{P}_{OBS}$ é a média dos valores de pressão observados; $\bar{Q}_{OBS}$ é a média dos valores de vazão observados, n_{po} número de padrões de observação; CI e NI as variáveis de decisão do problema, que correspondem aos parâmetros do modelo pressão x vazamento (eq. (1)) e w_h e w_q são pesos atribuídos à importância relativa de minimização dos desvios entre os valores calculados e observados de carga hidráulica e vazão respectivamente.

Os dados de campo utilizados para o cálculo dos desvios foram obtidos com base nos testes noturnos realizados, mantendo fixa a pressão na entrada do setor em estudo em diversos níveis, através de manobras de registro existente, conforme reportado por SANTOS (2000). A partir do registro totalmente aberto, foram realizadas manobras sucessivas de

fechamento, registrando simultaneamente as medidas de vazão e pressão na entrada do setor, e pressões em pontos pré-estabelecidos.

3.2.5-Modelo Hidráulico

Em conformidade com o modelo inverso de otimização representado pela eq. (28), são requeridas avaliações hidráulicas do setor. Para tanto, foi elaborado um código computacional, tomando-se como ponto de partida a rotina computacional utilizada por REIS et al. (1997), baseada no modelo de JOWITT e XU (1990), que pressupõe:

1-Equilíbrio nos nós:

$$\sum_{j \in R_i} Q_{ij} + 0.5 \sum_{j \in R_i} QS_{ij} + C_i = 0; \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

2- Carga hidráulica mínima aceitável para os nós:

$$H_i \geq H_i^*; \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

onde: QS_{ij} representa o vazamento no conduto que liga os nós i e j , Q_{ij} representa a vazão (L/s), C_i a demanda de consumo do nó i , H_i a carga hidráulica no nó i , H_i^* a carga hidráulica mínima aceitável no nó i e N é o número de nós com carga hidráulica desconhecida.

Neste modelo a Fórmula Universal foi incorporada, em substituição à Fórmula de Hazen-Williams, por representar uma formulação mais geral, válida para diferentes tipos de escoamento.

$$\Delta H = 0,0827 \frac{f Q^2 L}{D^5} \quad (29)$$

onde : ΔH representa perda de carga (m); Q representa a vazão (m³/s); D diâmetro do conduto (m); L comprimento do conduto (m); f fator de atrito.

O fator de atrito f , foi expresso através da expressão proposta por SWAMEE (1993), válida para os escoamentos, laminar, turbulento liso, de transição e turbulento rugoso:

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{\text{Re } y} \right)^8 + 9,5 \left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{\text{Re } y^{0,9}} \right) - \left(\frac{2500}{\text{Re } y} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125} \quad (30)$$

A revisão da literatura mostrou basicamente três possibilidades de enquadramento dos vazamentos através de modelos de simulação. Dentre eles, o método proposto por MARTINEZ et. al (1999) apresenta dificuldades relativas a sua complexidade, principalmente no que se refere ao número de parâmetros necessários, cuja avaliação não é clara. Já os modelos GERMANOPOULOS e JOWITT (1989); JOWITT e XU (1990) e TUCCIARELLI et al. (1999) diferem pelo emprego de constante de vazamentos por unidade de comprimento e área dos condutos, respectivamente. Optou-se pelo primeiro, pela simplicidade e seu uso difundido nos trabalhos de controle de vazamentos. Assim, a relação não linear entre vazamento e pressão de serviço foi incorporada pela seguinte função:

$$QS_{ij} = C L_{ij} (P_{ij})^{N1} \quad (31)$$

onde : QS_{ij} representa o vazamento através do conduto ij ; C e $N1$ são os parâmetros da relação vazamento x pressão, L_{ij} o comprimento do conduto ij e P_{ij} a pressão média no interior do conduto ij , calculada como:

$$P_{ij} = 0.5 \left[(H_i - G_i) + (H_j - G_j) \right] \quad (32)$$

onde : G_i representa a cota topográfica do nó i .

G_j representa a cota topográfica do nó j .

O modelo hidráulico empregado é melhor visualizado pelo fluxograma apresentado pelo ANEXO B.

3.2.6 Método de Otimização utilizado – Algoritmos Genéticos (AGs)

Face às características do problema de minimização expresso matematicamente pela eq. (28), uma técnica de otimização por busca direta mostra-se adequada à sua resolução. A técnica de busca a ser empregada deve evitar o uso de informações tais como derivações da função. Assim, apesar do número reduzido de variáveis de decisão do problema, os AGs foram então escolhidos devido a características próprias bem conhecidas tais como robustez associada à solução de problemas de natureza combinatória complexa, evitando que o ótimo seja aprisionado em pontos de mínimo ou máximo local.

Os AGs são tipos de programação evolucionária por Holland (1975) nos Estados Unidos. Baseiam-se nos processos de seleção e genética naturais, de acordo com mecanismos de sobrevivência e reprodução preferenciais dos indivíduos mais aptos da população, na herança de informação genética dos pais e na mutação casual dos genes. A evolução natural ocorre nos cromossomos, que são elementos microscópicos das células nucleares, responsáveis pelas características hereditárias através dos genes.

Matematicamente, cada cromossomo, referido como *string*, deve representar completamente uma possível solução para o problema em estudo, sendo que uma população

de cromossomos representa um conjunto de possíveis soluções para o mesmo. A implementação dos AGs geralmente compreende a escolha do código de representação das possíveis soluções (binário, real), a geração da população inicial de soluções, bem como a sistemática de implementação dos três operadores genéticos: reprodução, recombinação e mutação, os quais são aplicados repetidamente em busca de soluções eficientes para o problema em questão. A reprodução é o mecanismo através do qual os *strings* são copiados na próxima geração, em analogia aos processos biológicos de sobrevivência dos indivíduos mais aptos, ou seja, que resultem em valores mais promissores para a função objetivo ou de aptidão. Geralmente, a reprodução utiliza o método da roleta, de maneira a ponderar o número de cópias proporcionalmente aos valores da função de aptidão. Sistemáticas elitistas de reprodução podem ser adotadas com o objetivo de garantir que as melhores soluções sejam mantidas ao longo das gerações; assim, são realizadas cópias das melhores soluções ao longo das gerações posteriores, não ocorrendo perda de material genético dos melhores cromossomos. A recombinação promove a troca parcial de segmentos correspondentes entre dois *strings* pais, gerando dois *strings* filhos (FIGURA 3.13). Já a mutação, ilustrada na FIGURA 3.14, é uma degeneração casual dos valores, permitindo a introdução de novas características às populações.

FIGURA 3.13– Mecanismo de cruzamento de soluções codificadas em binário

FIGURA 3.14- Mecanismo de mutação de soluções codificadas em binário

No código computacional de AGs implementado foram empregados os mecanismos de representação binária das soluções, geração aleatória da população inicial, reprodução elitista, cruzamento entre as soluções geradas, mutação das soluções resultantes do cruzamento.

4 ELABORAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DO CÓDIGO COMPUTACIONAL DE AGs PARA O PROBLEMA

O presente capítulo descreve a maneira como os AGs foram implementados para a resolução do problema inverso de determinação dos parâmetros do modelo pressão x vazamento, através da minimização dos desvios entre os dados observados e simulados (eq. 28), indicando as sistemáticas adotadas para a representação das soluções alternativas do problema, geração da população inicial, seleção, cruzamento e mutação, além dos parâmetros adotados e fluxograma relativo ao código computacional utilizado.

4.1 Representação das soluções

Dentre as possibilidades de representação das soluções oferecidos pela literatura especializada, optou-se pela representação das soluções alternativas utilizando-se o código binário, que compreende um vetor ou cadeia de *bits (string)*, vislumbrando-se que a representação binária possa produzir resultados mais precisos do que a representação real.

Como exemplo, o número 698 é codificado em binário através do *string* de comprimento $l = 10$: 1010111010.

Para decodificar esse *string* é feita a operação:

$$b = 1^0 \text{ bit da cadeia} \times 2^{l-1} + 2^0 \text{ bit da cadeia} \times 2^l + \dots + \text{último bit} \times 2^0 \quad (33)$$

A representação binária propicia precisão maior às soluções à medida que o comprimento do l do *string* for maior. Uma vez escolhido esse comprimento e conhecida a

faixa de valores que a variável pode assumir $[min; máx]$, um número b qualquer dentro da referida faixa deve ser reavaliado, como x , para posterior codificação segundo:

$$x = min + (max - min) \frac{b}{2^l - 1} \quad (34)$$

sendo: l o tamanho da cadeia de *bits* (comprimento do *string*), *min* e *max*. os valores mínimo e máximo que a variável b pode atingir, respectivamente, referente à decodificação da cadeia de bits (representada pelo valor 698, no exemplo citado).

4.1.1 Representação das soluções para o Setor Monte Carlo

Para a representação das soluções do modelo pressão x vazamento (eq. (31)), foram adotadas faixas de $[10 \text{ a } 1] \times 10^{-5}$ (L/s.m) para os valores de CI e $0,5 \text{ a } 2,5$ para os valores de NI , conforme indicações de LAMBERT (2000).

Inicialmente vislumbrou-se parâmetros únicos para o modelo pressão x vazamento, como sendo representativos da área em estudo. Para tanto foi adotado um *string* de comprimento igual a 20, sendo os 10 primeiros dígitos representantes da cadeia binária referente à constante de vazamento CI e os 10 restantes ao expoente de vazamento NI da eq. (31).

Numa segunda etapa, seguindo TUCCIARELLI et al.(1999), a rede foi subdividida em duas zonas (FIGURA 4.1), norteando critérios como homogeneidade de material das tubulações da rede, cotas topográficas e incidência de vazamentos registrados, para a determinação de parâmetros diferenciados. Para a determinação de tais parâmetros foi adotado um comprimento de *string* igual a 40, sendo os 20 primeiros dígitos referentes aos valores de CI e NI para área 1 e os restantes referentes aos valores de CI e NI para área 2.

Visando identificar ainda possíveis trechos de rede com vazamentos localizados e, portanto, com valores mais elevados para o parâmetro *CI*, internamente às áreas de características homogêneas preestabelecidas, foram induzidas algumas modificações no modelo computacional, de maneira a admitir valores distintos para o parâmetro *CI*. A seleção do trecho é feita via AGs. Assim, o valor do parâmetro *CI* referente à zona a que este pertence é substituído por um outro valor gerado pelo algoritmo, ao longo das sucessivas gerações. O valor do parâmetro *NI* é mantido constante, igual ao calculado para a zona a que o trecho pertence. Testes computacionais foram realizados para a determinação de valores de *CI* diferenciados para um e dois trechos. Para tanto, foi adotado um *string* de comprimento igual a 60 para um trecho, sendo os 40 primeiros dígitos referentes aos valores de *CI* e *NI* para as áreas 1 e 2, e os 20 restantes referentes ao trecho selecionado e para o seu valor de *CI* correspondente. Para dois trechos adotou-se *string* de 80, sendo os 40 primeiros dígitos correspondentes aos valores de *CI* e *NI* das áreas 1 e 2 e os outros 40 aos trechos e *CI* correspondentes.

FIGURA 4.1 – Zoneamento do Setor Monte Carlo

4.1.2 Representação das soluções para o Setor São Carlos III

Tanto as faixas adotadas para os parâmetros globais do setor, como a sistemática de representação das soluções para o setor São Carlos III foram adotadas as mesmas considerações do Setor Monte Carlo.

Na Segunda etapa, seguindo TUCCIARELLI et al.(1999), a rede foi subdividida em três zonas(FIGURA 4.2) , também norteando critérios como homogeneidade de material das tubulações da rede, cotas topográficas e incidência de vazamentos registrados, para a determinação de parâmetros diferenciados. Para a determinação de tais parâmetros foi adotado um comprimento de *string* igual a 60, sendo os 20 primeiros dígitos referentes aos

4.2 Geração da população inicial

A geração da população inicial de soluções alternativas foi realizada na forma binária e de maneira aleatória através de roleta (50% de probabilidade para 0 ou 1 para a formação da cadeia de *bits* do *string*), utilizando uma população inicial de 30 elementos ($NPOP=30$), cujo número foi mantido constante ao longo das gerações

4.3 Cruzamento e Mutação

Com relação ao mecanismo de cruzamento, foi admitida a probabilidade de ocorrência igual a 100%, produzindo 30 novas soluções que são introduzidas ou não na próxima geração de acordo com o critério de seleção adotado para composição da nova geração.

São escolhidos para cada cruzamento dois indivíduos "pais" da geração anterior de forma aleatória. Escolhidos os indivíduos pais é feita a determinação dos pontos de troca de material genético, e, a partir daí, a permuta de características correspondentes para a formação de novos indivíduos "filhos".

A mutação foi implementada com probabilidade de ocorrência de 5% para cada solução resultante do cruzamento, com possível alteração de apenas um dígito da cadeia de *string* de cada variável do problema.

Para a determinação de parâmetros únicos referentes à área em estudo foram utilizados 2 pontos simultaneamente de corte para a obtenção de cada cruzamento. A determinação dos pontos de troca entre as soluções "pais", foi feita de maneira aleatória, sendo que cada um desses pontos de troca deve ocorrer obrigatoriamente em cada variável, no caso, um na cadeia representativa da constante CI e outro na cadeia representativa do expoente NI .

4.4 Forma de seleção

Optou-se pela sistemática elitista de reprodução, que mantém as melhores soluções ao longo das gerações. Assim, impõe-se a cópia das 5 melhores soluções ($MPOP=5$) avaliadas para a geração seguinte. Tais cópias são arrastadas para gerações futuras, não havendo, portanto, perda de material genético das melhores soluções produzidas ao longo das gerações.

4.5 Parâmetros para operação dos AGs

Na FIGURA 4.3 são apresentados os parâmetros utilizados pelos mecanismos dos AGs no modelo computacional, assim como o fluxograma dos AGs empregados para a resolução do modelo de otimização expresso pela eq. (28).

Parâmetro	Especificação
NPOP	Número de elementos da população utilizada pelo algoritmo genético durante sua evolução (30)
IPOP	Número de elementos resultantes do cruzamento para cada geração (25)
MPOP	Número de melhores soluções da geração anterior para a prática do elitismo (5)
NVAR	Número de variáveis do problema
ISTRG	Comprimento dos <i>STRINGS</i> das variáveis
NCRU	Número de cruzamentos a serem efetuados para cada geração (30)
NGERA	Número de gerações a serem desenvolvidas

FIGURA 4.3 – Parâmetros utilizados pelo modelo de AG implementado

4.6 Fluxograma dos AGs implementados

A FIGURA 4.4 apresenta o fluxograma de operação dos AGs aplicados ao problema de determinação dos parâmetros do modelo pressão x vazamento.

FIGURA 4.4 – Fluxograma de operação do código genético implementado

Observa-se que a avaliação das alternativas, quanto a “*fitness*”, conforme a eq. (28). requer a simulação hidráulica da rede para as diversas manobras a que ela foi submetida, durante o teste noturno de vazamentos (no caso 4, manobras). Tais cálculos são gerenciados pela subrotina EFE, que chama o módulo de avaliação hidráulica.

O módulo de avaliação hidráulica, por sua vez, consiste basicamente da rotina computacional empregada por REIS et. al. (1997), na qual a Fórmula Universal (eq. (31)) foi empregada em substituição à Equação de Hazen Willians.

Como dados para o programa computacional, foram utilizados os arquivos de SANTOS (2000) para o setor Monte Carlo, e resultante do levantamento efetuado em campo para o setor São Carlos III. Tratam-se de 2 arquivos para cada setor, sendo o primeiro responsável pelo fornecimento de informações básicas da rede em questão: comprimentos das tubulações (m), diâmetros (m), cargas hidráulicas, rugosidades dos condutos, cotas topográficas (m) e demandas nodais . O segundo consiste das informações coletadas em campo durante os testes noturnos de vazamentos.

Mais especificamente, o segundo arquivo de dados foi confeccionado com informações de pressão (mH₂O) e vazão (L/s) obtidas através do ensaio de vazamento noturno . Visando identificar ainda possíveis trechos de rede com vazamentos localizados foram realizados aprimoramentos no modelo computacional.

5 RESULTADOS

O presente capítulo foi dividido de maneira a descrever os testes noturnos de vazamento para o setor São Carlos III, bem como as simulações realizadas para obtenção dos parâmetros do modelo pressão x vazamento para os dois subsetores estudados (Monte Carlo e São Carlos III).

5.1 Resultados dos ensaios noturnos para obtenção de medidas de pressão e vazão no setor São Carlos III

Os ensaios noturnos propriamente ditos compreenderam a realização de medidas de vazão e pressão de maneira simultânea durante o período da madrugada do dia 06/12/2000. Para a realização dessas medidas foram instalados oito medidores contínuos de pressão e dois medidores de vazão ultra-sônicos. Os pontos de medida de pressão indicados na FIGURA 4.2, foram escolhidos levando-se em consideração a topografia do terreno (ponto crítico – ponto de cota alta; ponto médio – ponto de cota média; ponto extremo – ponto de cota baixa), a fim de enquadrar várias faixas de valores de pressão, sendo estes distribuídos de maneira a abranger os vários bairros pertencentes ao setor São Carlos III. As medidas de vazão foram realizadas em dois pontos: um na saída do reservatório elevado (FIGURA 5.2), responsável pelo abastecimento do setor, e o outro em um ponto intermediário da rede de distribuição (FIGURA 5.3), com a finalidade de monitorar a vazão de entrada no setor e de conhecer um valor de vazão intermediário ao setor. Vale salientar o apoio do SAAE - São Carlos, no sentido de viabilizar as obras necessárias à construção de caixas de inspeção (FIGURA 5.4) para a realização de tais medidas.

FIGURA 5.1- Exemplo de ponto de medida de pressão

FIGURA 5.2- Ponto de medida de vazão na saída do reservatório elevado

FIGURA 5.3- Ponto de medida de vazão em ponto intermediário da rede

FIGURA 5.4- Caixa construída pelo SAAE – ponto intermediário da rede

Os testes noturnos foram realizados através de manobras de fechamento gradativo do registro do tipo gaveta de saída do reservatório elevado, utilizando intervalos de trinta minutos para cada manobra, partindo-se do registro totalmente aberto, como ilustrado na FIGURA 5.5. Tais manobras visaram a formação de patamares nas medidas simultâneas de vazão e pressão, de maneira a possibilitar a obtenção de dados médios reais da rede. As FIGURAS 5.6 a 5.15 mostram os registros de vazão e pressão obtidos durante o ensaio noturno.

FIGURA 5.5- Manobra noturna do registro

FIGURA 5.6- Registro de pressão (nó 65 – ponto crítico)

FIGURA 5.7- Registro de pressão à jusante do reservatório (nó 142 – ponto crítico)

FIGURA 5.8- Registro de pressão (nó 87 – ponto crítico)

FIGURA 5.9- Registro de pressão (nó 76 – ponto médio)

FIGURA 5.10- Registro de pressão (nó 124 – ponto médio)

FIGURA 5.11- Registro de pressão (nó 48 – ponto médio)

FIGURA 5.12- Registro de pressão (nó 16 – ponto extremo)

FIGURA 5.13- Registro de pressão (nó 20 – ponto extremo)

FIGURA 5.14- Registro de vazão (ponto intermediário da rede de distribuição)

FIGURA 5.15- Registro de vazão (saída do reservatório elevado – nó 142)

5.2 Resultados obtidos para o Setor Monte Carlo

Para a obtenção dos resultados do modelo computacional elaborado para o Setor Monte Carlo foram utilizadas medidas de vazão e pressão obtidas durante teste noturno de vazamentos no setor da rede de São Carlos responsável pelo abastecimento do Bairro Monte Carlo (FIGURA 3.6).

Tais medidas de pressão foram realizadas em diferentes nós da rede do setor Monte Carlo, levando em consideração pontos médios(cota intermediária), pontos críticos (alta cota topográfica) e pontos extremos (baixa cota topográfica). Com relação às medidas de vazão, foram realizadas medições na entrada do setor, mediante manobras de fechamento gradual da VRP existente, durante período noturno (4 manobras: registro totalmente aberto = manobra 1; 75% aberto = manobra 2; 50% aberto = manobra 3 e 25% aberto = manobra 4), com a finalidade de obter quatro patamares para os valores de pressão e seus respectivos valores de vazão, conforme indicados na segunda coluna da TABELA 5.1.

Os testes computacionais aqui reportados admitiram, na eq. (28), o valor 1 para wh e wq , dando a mesma importância aos desvios de pressão e vazão durante as simulações.

5.2.1 Parâmetros globais obtidos por otimização

O modelo computacional elaborado, que tem por finalidade a determinação dos valores de constante de vazamento e expoente de vazamento (ver eq. (31)), foi testado, admitindo esses valores como sendo constantes para todo o setor.

As TABELAS 5.1 e 5.2 possibilitam a análise comparativa entre os valores simulados e observados de pressão e vazão, respectivamente.

TABELA 5.1 – Valores de pressão medidos e calculados pelo modelo hidráulico para *CI* e *NI* constantes para o setor

<i>Manobra 1</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio (%)</i>
57	44,39	45,34	2,15
7	23,79	25,76	8,28
19	23,82	23,61	0,88
26	38,88	42,21	8,56
38	37,35	41,25	10,44
51	56,65	61,84	9,16
<i>Manobra 2</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio (%)</i>
57	34,44	35,27	2,71
7	13,58	15,57	14,65
19	13,38	13,19	1,42
26	29,80	32,23	8,15
38	28,37	31,18	9,90
51	47,85	51,88	8,42
<i>Manobra 3</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio (%)</i>
57	27,48	28,24	2,77
7	6,46	8,46	30,96
19	6,18	5,92	4,20
26	23,26	25,25	8,56
38	21,90	24,15	10,27
51	41,66	44,93	7,85
<i>Manobra 4</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio (%)</i>
57	20,91	21,78	4,16
7	-2,00	1,92	196,00
19	-0,50	-0,76	52,00
26	17,11	18,84	10,11
38	15,79	17,69	12,03
51	35,65	38,53	8,08

TABELA 5.2 – Resultados obtidos para $C1$ e NI constantes para o setor

<i>Valor da Função Objetivo</i>	<i>$C1(10^{-5})$</i>	<i>NI</i>	<i>Manobra</i>	<i>Vazão Medida (L/s)</i>	<i>Vazão Calculada (L/s)</i>	<i>Desvio (%)</i>
0,2398	9,7889	0,5411	1	7,61	7,55	0,79
			2	6,16	6,43	4,38
			3	5,28	5,52	4,55
			4	4,32	4,50	4,17

5.2.2 Parâmetros específicos para as áreas de características diferentes

Com o objetivo de produzir parâmetros mais realísticos, baseados na minimização das diferenças entre os valores de pressão e vazão calculados pelo modelo hidráulico e medidos em campo, foi realizada a divisão do setor em duas zonas. O zoneamento foi realizado levando-se em consideração as cotas topográficas do setor, mapa de incidência de vazamentos no setor e material empregado na rede (PVC ou ferro fundido), nos moldes sugeridos por TUCCIARELLI et al. (1999).

A rede dividida em duas zonas é mostrada na FIGURA 4.1, onde a zona 1 caracteriza-se por apresentar PVC na maioria dos condutos e elevada cota topográfica e a zona 2 por apresentar ferro fundido na maioria dos condutos e baixa cota topográfica.

As TABELAS 5.3 e 5.4 mostram a análise comparativa entre os valores simulados e observados de pressão e vazão, respectivamente, para o zoneamento. Também é mostrada a evolução dos AGs implementados com relação ao valor da função objetivo ao longo das gerações (FIGURA 5.16).

TABELA 5.3 – Valores de pressão medidos e calculados pelo modelo hidráulico para o setor dividido em duas zonas

<i>Manobra 1</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio (%)</i>
57	44,39	45,61	2,75
7	23,79	26,05	9,50
19	23,82	23,67	0,63
26	38,88	41,85	7,64
38	37,35	40,03	7,18
51	56,65	58,37	3,04
<i>Manobra 2</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio (%)</i>
57	34,44	35,53	3,16
7	13,58	15,80	16,36
19	13,38	13,24	1,05
26	29,80	32,09	7,68
38	28,37	30,43	7,26
51	47,85	49,62	3,70
<i>Manobra 3</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio (%)</i>
57	27,48	28,46	3,57
7	6,46	8,63	33,59
19	6,18	5,95	3,72
26	23,26	25,21	8,38
38	21,90	23,65	8,00
51	41,66	43,34	4,03
<i>Manobra 4</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio (%)</i>
57	20,91	21,93	4,88
7	-2,00	2,03	201,50
19	-0,50	-0,74	48,00
26	17,11	18,84	10,11
38	15,79	17,35	9,88
51	35,65	37,44	5,02

TABELA 5.4- Resultado obtidos para *C1* e *N1* diferenciados

<i>Valor da Função Objetivo</i>	<i>C1 Área 1 (10⁵)</i>	<i>N1 Área 1</i>	<i>C1 Área 2 (10⁵)</i>	<i>N1 Área 2</i>	<i>Manobra</i>	<i>Vazão Medida (L/s)</i>	<i>Vazão Calculada (L/s)</i>	<i>Desvio (%)</i>
0,1605	7,5455	1,1061	0,9912	0,5547	1	7,61	7,87	3,41
					2	6,16	6,54	6,17
					3	5,28	5,59	5,87
					4	4,32	4,69	8,56

Os resultados apresentados pelas TABELAS 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 mostram que houve sensível melhora no valor da função objetivo, em decorrência da redução dos valores dos desvios entre os valores medidos e simulados, mostrando o zoneamento como uma melhor representação das características reais do setor em estudo.

5.2.3 Implementação de faixa de busca reduzida para os valores de NI para o Setor Monte Carlo

Com base em trabalhos já publicados, onde se admitiu o valor de 1.18 para NI (expoente de vazamento) para a determinação da constante de vazamento CI foram realizadas simulações computacionais reduzindo-se a faixa de busca para a determinação dos valores de NI do modelo computacional. Para tanto, foram adotadas para a representação das soluções do modelo pressão x vazamento (eq. (31)), faixas de $[10 \text{ a } 1] \times 10^{-5}$ (L/s.m) para os valores de CI e 1,1 a 1,2 para os valores de NI .

Os resultados obtidos são mostrados a seguir nas TABELAS 5.5 e 5.6, onde são relatados os valores de vazão e pressão simulados, assim como os valores de função objetivo, CI e NI correspondentes.

TABELA 5.5 – Valores de pressão medidos e calculados pelo modelo hidráulico para faixa reduzida para os valores de *NI*

<i>Manobra 1</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio(%)</i>
57	44,39	44,87	0,05
7	23,79	25,55	7,40
19	23,82	23,59	0,97
26	38,88	41,16	5,86
38	37,35	40,09	7,34
51	56,65	59,50	5,03
<i>Manobra 2</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio(%)</i>
57	34,44	35,18	2,15
7	13,58	15,58	14,73
19	13,38	13,21	1,27
26	29,80	31,81	6,75
38	28,37	30,63	8,12
51	47,85	50,59	5,72
<i>Manobra 3</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio(%)</i>
57	27,48	28,31	3,02
7	6,46	8,54	32,19
19	6,18	5,94	3,88
26	23,26	25,13	8,04
38	21,90	23,90	9,13
51	41,66	44,18	6,05
<i>Manobra 4</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio(%)</i>
57	20,91	21,91	4,78
7	-2,00	2,01	201,50
19	-0,50	-0,74	48,00
26	17,11	18,88	10,35
38	15,79	17,61	11,53
51	35,65	38,14	6,98

TABELA 5.6- Resultado obtidos para faixa reduzida para os valores de *NI*

<i>Valor da Função Objetivo</i>	<i>CI Área 1 (10⁻⁵)</i>	<i>NI Área 1</i>	<i>CI Área 2 (10⁻⁵)</i>	<i>NI Área 2</i>	<i>Manobra</i>	<i>Vazão Medida (L/s)</i>	<i>Vazão Calculada (L/s)</i>	<i>Desvio (%)</i>
0,2100	4,0968	1,1293	0,9208	1,1025	1	7,61	8,81	15,77
					2	6,16	6,88	0,12
					3	5,28	5,53	4,74
					4	4,32	4,31	0,23

Como visualizado, o valor da função objetivo aumentou devido ao aumento dos desvios entre os valores medidos e simulados de pressão e vazão , chegando-se à conclusão que os valores obtidos para uma faixa maior de busca para os valores de *NI* apresentaram resultados mais condizentes para o Setor Monte Carlo.

5.2.4 Testes realizados com a tentativa de determinação de vazamentos localizados

Visando identificar ainda possíveis trechos de rede com vazamentos localizados, e, portanto, com valores mais elevados para o parâmetro CI , internamente às áreas de características homogêneas preestabelecidas, foram induzidas algumas modificações no modelo computacional, de maneira a admitir valores distintos para o parâmetro CI , cuja seleção é feita via AGs. Assim o valor do parâmetro CI referente à zona a que este pertence é substituído por um outro valor gerado pelo algoritmo ao longo das sucessivas gerações. O valor do parâmetro NI é mantido constante, igual ao calculado para a zona a que o trecho pertence. Os resultados apresentados pelas TABELAS 5.7, 5.8, 5.9, 5.10 foram realizados para um e dois trechos, sendo que para ambos foram utilizadas 4000 gerações.

TABELA 5.7 – Valores de pressão medidos e calculados pelo modelo hidráulico para um trecho

<i>Manobra 1</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio(%)</i>
57	44,39	45,62	2,77
7	23,79	26,06	9,54
19	23,82	23,67	0,63
26	38,88	41,85	7,64
38	37,35	40,01	7,12
51	56,65	58,31	2,93
<i>Manobra 2</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio(%)</i>
57	34,44	35,57	3,28
7	13,58	15,83	16,57
19	13,38	13,24	1,06
26	29,80	32,14	7,85
38	28,37	30,49	7,47
51	47,85	49,70	3,87
<i>Manobra 3</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio(%)</i>
57	27,48	28,50	3,71
7	6,46	8,66	34,06
19	6,18	5,96	3,56
26	23,26	25,28	8,68
38	21,90	23,73	8,36
51	41,66	43,48	4,37
<i>Manobra 4</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio(%)</i>
57	20,91	21,97	5,10
7	-2,00	2,05	202,50
19	-0,50	-0,74	48,00
26	17,11	18,91	10,52
38	15,79	17,44	10,45
51	35,65	37,60	5,47

TABELA 5.8 – Valores de pressão medidos e calculados pelo modelo hidráulico para dois trechos

<i>Manobra 1</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio(%)</i>
57	44,39	45,58	2,68
7	23,79	26,03	9,42
19	23,82	23,66	0,67
26	38,88	41,79	7,48
38	37,35	40,03	7,18
51	56,65	58,18	2,70
<i>Manobra 2</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio(%)</i>
57	34,44	35,53	3,16
7	13,58	15,80	16,35
19	13,38	13,24	1,05
26	29,80	32,09	7,68
38	28,37	30,43	7,26
51	47,85	49,59	3,64
<i>Manobra 3</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio(%)</i>
57	27,48	28,48	3,64
7	6,46	8,65	33,90
19	6,18	5,96	3,56
26	23,26	25,24	8,51
38	21,90	23,68	8,13
51	41,66	43,39	4,15
<i>Manobra 4</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio(%)</i>
57	20,91	21,95	4,97
7	-2,00	2,04	202,00
19	-0,50	-0,75	50,00
26	17,11	18,87	10,29
38	15,79	17,39	10,13
51	35,65	37,51	5,22

TABELA 5.9- Resultado obtido para *CI* e *NI* diferenciados para um trecho

Valor da Função Objetivo	CI Área 1 (10 ⁵)	NI Área 1	CI Área 2 (10 ⁵)	NI Área 2	Manobra	Vazão Medida (L/s)	Vazão Calculada (L/s)	Desvio (%)
0,1600	4,6686	1,7805	0,9736	0,5215	1	7,61	7,88	3,54
					2	6,16	6,45	4,71
					3	5,28	5,44	3,03
					4	4,32	4,49	3,94
CI(Trecho 41) (10 ⁵)					1,7302			

TABELA 5.10- Resultado obtido para *CI* e *NI* diferenciados para dois trechos

Valor da Função Objetivo	CI Área 1 (10 ⁵)	NI Área 1	CI Área 2 (10 ⁵)	NI Área 2	Manobra	Vazão Medida (l/s)	Vazão Calculada (l/s)	Desvio (%)
0,1602	4,9329	1,2181	1,1192	0,5088	1	7,61	8,01	5,26
					2	6,16	6,59	6,98
					3	5,28	5,57	5,49
					4	4,32	4,62	6,94
CI(Trecho 1) (10 ³)			1,8182	CI(Trecho 58) (10 ³)			2,5132	

Os resultados das TABELAS 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10 comparados com os das TABELAS 5.3 e 5.4 mostraram que os valores de pressão e vazão simulados apresentaram pouca variação, o mesmo se podendo dizer dos valores da função objetivo. Os valores de vazões obtidos continuaram muito próximos, o mesmo não ocorrendo para as pressões.

5.2.5 Implementação de faixa logarítmica de busca para o Setor Monte Carlo

Visando melhorar a resolução do problema de minimização dos desvios entre os valores de pressão e vazão calculados pelo modelo hidráulico e aqueles obtidos em campo, foi implementada a faixa logarítmica de busca para os valores das variáveis de decisão no modelo de otimização baseado na técnica de Algoritmo Genéticos (AGs). Tal mecanismo tem o objetivo de estreitar a faixa de busca de soluções, na medida em que se trabalha com o logaritmo dos parâmetros a serem determinados. O processo evolucionário toma por base os logaritmos dos parâmetros, sendo esses valores transformados para a realização da respectiva simulação hidráulica e avaliação da função de aptidão, para cada geração do modelo computacional, e assim sucessivamente. Tal função de aptidão, que se caracteriza na minimização dos desvios entre os valores calculados pelo modelo hidráulico e os correspondentes observados em campo é expressada pela eq. (28).

Os resultados obtidos referentes ao setor Monte Carlo, considerando duas zonas homogêneas em termos do comportamento dos vazamentos e 4000 gerações de AGs, são apresentados pelas TABELAS 5.11, 5.12, 5.13 e 5.14, assim como os resultados comparáveis sobre a evolução do genético ao longo das gerações em relação aos resultados obtidos anteriormente, pelas FIGURAS 5.16 e 5.17.

TABELA 5.11 – Valores de pressão medidos e calculados pelo modelo hidráulico para o setor dividido em duas zonas utilizando faixa logarítmica

<i>Manobra 1</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio(%)</i>
57	44,39	45,58	2,68
7	23,79	26,03	9,42
19	23,82	23,66	0,63
26	38,88	41,79	6,72
38	37,35	40,03	7,18
51	56,65	58,18	2,70
<i>Manobra 2</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio(%)</i>
57	34,44	35,53	3,16
7	13,58	15,80	16,35
19	13,38	13,24	1,05
26	29,80	32,09	7,68
38	28,37	30,43	7,26
51	47,85	49,59	3,64
<i>Manobra 3</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio(%)</i>
57	27,48	28,48	3,64
7	6,46	8,65	33,90
19	6,18	5,96	3,56
26	23,26	25,24	8,51
38	21,90	23,68	8,12
51	41,66	43,39	4,15
<i>Manobra 4</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio(%)</i>
57	20,91	21,96	5,02
7	-2,00	2,04	202,00
19	-0,50	-0,74	48,00
26	17,11	18,88	10,35
38	15,79	17,40	10,20
51	35,65	37,53	5,27

TABELA 5.12 – Valores de pressão medidos e calculados pelo modelo hidráulico para o setor dividido em duas zonas sem faixa logarítmica

<i>Manobra 1</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio(%)</i>
57	44,39	45,59	2,70
7	23,79	26,04	9,46
19	23,82	23,67	0,63
26	38,88	41,78	7,46
38	37,35	39,90	6,83
51	56,65	58,08	2,52
<i>Manobra 2</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio(%)</i>
57	34,44	35,56	3,25
7	13,58	15,82	16,49
19	13,38	13,24	1,06
26	29,80	32,12	7,78
38	28,37	30,45	6,83
51	47,85	49,61	3,68
<i>Manobra 3</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio(%)</i>
57	27,48	28,50	3,71
7	6,46	8,66	34,00
19	6,18	5,96	3,69
26	23,26	25,28	8,68
38	21,90	23,72	8,31
51	41,66	43,45	4,30
<i>Manobra 4</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio(%)</i>
57	20,91	21,98	5,11
7	-2,00	2,06	203,00
19	-0,50	-0,74	48,00
26	17,11	18,92	10,58
38	15,79	17,45	10,51
51	35,65	37,62	5,53

TABELA 5.13- Resultado obtido para *CI* e *NI* diferenciados utilizando faixa logarítmica

<i>Valor da Função Objetivo</i>	<i>CI Área 1 (10⁻⁵)</i>	<i>NI Área 1</i>	<i>CI Área 2 (10⁻⁵)</i>	<i>NI Área 2</i>	<i>Manobra</i>	<i>Vazão Medida (L/s)</i>	<i>Vazão Calculada (L/s)</i>	<i>Desvio (%)</i>
0,1602	4,9329	1,2181	1,1192	0,5088	1	7,61	7,99	5,00
					2	6,16	6,56	6,49
					3	5,28	5,54	4,92
					4	4,32	4,59	6,25

TABELA 5.14- Resultado obtido para *CI* e *NI* diferenciados sem faixa logarítmica

<i>Valor da Função Objetivo</i>	<i>CI Área 1 (10⁻⁵)</i>	<i>NI Área 1</i>	<i>CI Área 2 (10⁻⁵)</i>	<i>NI Área 2</i>	<i>Manobra</i>	<i>Vazão Medida (L/s)</i>	<i>Vazão Calculada (L/s)</i>	<i>Desvio (%)</i>
0,1602	3,6745	1,2957	0,9912	0,5000	1	7,61	8,00	5,13
					2	6,16	6,51	5,68
					3	5,28	5,45	3,21
					4	4,32	4,47	3,47

Os resultados das TABELAS 5.13 e 5.14 mostraram-se muito próximos. Com relação ao tempo computacional disponibilizado, a utilização de faixa logarítmica para a realização da busca reduziu o número de gerações necessárias para a convergência, se confrontada com o uso dos parâmetros propriamente ditos, como demonstrado nas FIGURAS 5.16 e 5.17.

FIGURA 5.16- Evolução ao longo das gerações com faixa logarítmica

FIGURA 5.17- Evolução ao longo das gerações sem faixa logarítmica

5.2.6 Considerações sobre os resultados obtidos para o Setor Monte Carlo

Os resultados obtidos via modelo inverso de otimização para o setor Monte Carlo mostraram erros percentuais consideráveis entre as pressões calculadas e observadas de até 196% , os desvios percentuais entre as vazões de abastecimento do setor observadas e calculadas não excederam 4,55%.

Observa-se que os máximos desvios ocorreram para valores baixos de pressão medida, que é justamente para os quais a confiabilidade é reduzida.

Os parâmetros globais obtidos para o setor foram muito próximos aos alcançados por SANTOS (2000), o qual utilizou o Método de Busca Direta Univariada como ferramenta de otimização, podendo ser visualizado pela TABELA 5.15. Tais resultados sugeriram NI muito próximo do expoente usado para cálculo de descarga para atmosfera de orifício (0,50).

TABELA 5.15 – Resultados comparativos para parâmetros globais

Método de Otimização	$CI \times 10^{-5}$	NI
Algoritmos Genéticos	9,79	0,54
Busca Direta (SANTOS (2000))	10,08	0,54

Já os resultados da otimização realizada para o setor Monte Carlo subdividido em 2 sub-áreas homogêneas quanto ao material e idade dos condutos e pressões atuantes, implicaram em desvios percentuais de pressão e vazão da mesma ordem de grandeza dos anteriores. Entretanto, os parâmetros do modelo pressão x vazamento tiveram os valores do expoente NI mais coerentes com a natureza dos condutos das respectivas áreas (0,50 para condutos em ferro fundido e 1,30 para condutos em PVC), em conformidade com LAMBERT (2000)

Resultados semelhantes foram alcançados trabalhando-se com os parâmetros em escala logarítmica.

Com relação aos testes realizados para a determinação de vazamentos localizados, os resultados das TABELAS 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10, comparados com os das TABELAS 5.3 e 5.4, mostraram que os valores de pressão e vazão simulados apresentaram pouca variação, o mesmo se podendo dizer dos valores da função objetivo. Os valores de vazões obtidos continuaram muito próximos, o mesmo não ocorrendo para as pressões. Também se observa que os grandes erros percentuais de pressão para os nós 57 e 7 foram mantidos. Comparando-se as TABELAS 5.9 e 5.10, pode-se constatar que não foram relacionados os mesmos trechos de rede, o que não leva a se ter total convicção de que os segmentos de rede selecionados possuem elevado índice de vazamento localizado. Com relação aos parâmetros obtidos para as zonas pré-estabelecidas, incorporando a identificação de possíveis trechos de rede com vazamentos localizados, os valores de *CI* e *NI* referentes a Área 1 sofreram maior alteração em relação aos valores da Área 2.

5.3 Resultados obtidos para o Setor São Carlos III

Para a obtenção dos resultados do modelo computacional para o Setor São Carlos III foram utilizadas medidas de vazão e pressão obtidas durante teste noturno de vazamentos no setor da rede de São Carlos.

Tais medidas de pressão foram realizadas em diferentes nós da rede do setor São Carlos III, levando em consideração pontos médios (cota intermediária), pontos críticos (alta cota topográfica) e pontos extremos (baixa cota topográfica), como pode ser visualizado na FIGURA 4.2. Com relação às medidas de vazão foram realizadas medições na entrada do setor, mediante manobras de fechamento gradual do registro existente, durante período noturno (4 manobras). Os registros de medidas apresentadas nas FIGURAS 5.6 a 5.15 podem ser melhor visualizadas pela TABELA 5.16.

TABELA 5.16 – Medidas de Vazão e Pressão do Setor São Carlos III

Manobra	Vazão (L/s)	Pressão (mca)							
		Nó 16	Nó 20	Nó 48	Nó 124	Nó 76	Nó 65	Nó 87	Nó 142
1	10,09	42,04	35,55	29,23	25,93	22,08	19,39	16,32	15,60
2	7,09	32,04	25,55	19,23	16,12	11,93	9,23	6,66	5,43
3	5,46	27,87	21,05	14,51	11,67	7,55	4,54	2,66	1,03
4	2,18	26,21	19,30	13,12	9,63	5,99	3,14	1,32	0,57

As medidas de vazão e pressão obtidas para o quarta manobra mostraram-se não compatíveis com as apresentadas pelos patamares 1, 2 e 3, podendo ser visualizado pela FIGURA 5.18.

FIGURA 5.18 – Gráfico das medidas de pressão para 4 manobras

Tal fato pode ser explicado pela presença de ar nas tubulações da rede de distribuição, em decorrência da pequena vazão resultante da manobra 4, acarretando redução de precisão dos aparelhos medidores de vazão e pressão. Esse fato é melhor ilustrado pelos testes iniciais realizados para o setor São Carlos III, elucidados a seguir.

5.3.1 Testes iniciais para o Setor São Carlos III

Para a realização de testes computacionais iniciais para o Setor São Carlos III foram utilizadas medidas de vazão e pressão obtidas durante teste noturno de vazamentos, conforme elucidado no item anterior. Esses testes foram realizados considerando valores de CI (constante de vazamento) e NI (expoente de vazamento) como sendo parâmetros constantes para todo o setor e como parâmetros específicos para as áreas de características diferentes. Para parâmetros específicos foram realizados testes para o setor dividido em 2 e 3 zonas, sendo esse zoneamento apresentado nas FIGURAS 5.19 e 5.20. Os resultados realizados obtidos sugerindo tais considerações é visualizado nas TABELAS 5.17, 5.18, 5.19, 5.20, 5.21, 5.22 e 5.23.

FIGURA 5.19 – Zoneamento do Setor São Carlos III para 2 zonas

FIGURA 5.20 – Zoneamento do Setor São Carlos III para 3 zonas

TABELA 5.17 – Resultados iniciais obtidos para parâmetros constantes para todo o setor

<i>Manobra 1</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio (%)</i>
16	42,04	41,59	1,07
20	35,55	34,68	2,45
48	29,23	29,16	0,24
124	25,93	26,12	0,73
76	22,08	22,97	4,03
65	19,39	19,68	1,50
87	16,32	15,88	2,77
<i>Manobra 2</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio (%)</i>
16	32,04	31,57	1,47
20	25,55	24,62	3,64
48	19,23	20,08	4,42
124	16,12	16,00	0,74
76	11,93	12,89	8,05
65	9,23	9,60	4,00
87	6,66	5,72	14,11
<i>Manobra 3</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio (%)</i>
16	27,87	27,22	2,33
20	21,05	20,26	3,75
48	14,51	15,71	8,27
124	11,67	11,61	0,51
76	7,55	8,51	12,72
65	4,54	5,22	14,98
87	2,66	1,33	50,00
<i>Manobra 4</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio (%)</i>
16	26,21	26,77	2,14
20	19,30	19,81	2,64
48	13,12	15,25	16,23
124	9,63	11,16	15,89
76	5,99	8,05	34,39
65	3,14	4,76	51,59
87	1,32	0,87	34,09

TABELA 5.18 – Resultados iniciais obtidos de pressão para 2 zonas

<i>Manobra 1</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio (%)</i>
16	42,04	41,82	0,52
20	35,55	34,83	2,02
48	29,23	29,91	2,33
124	25,93	25,98	0,19
76	22,08	22,74	2,99
65	19,39	19,46	0,36
87	16,32	15,86	2,82
<i>Manobra 2</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio (%)</i>
16	32,04	31,69	1,09
20	25,55	24,69	3,37
48	19,23	20,01	4,06
124	16,12	15,96	8,15
76	11,93	12,82	1,00
65	9,23	9,55	3,47
87	6,66	5,72	14,11
<i>Manobra 3</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio (%)</i>
16	27,87	27,31	2,00
20	21,05	20,31	3,52
48	14,51	15,68	8,06
124	11,67	11,60	0,60
76	7,55	8,48	12,32
65	4,54	5,20	14,54
87	2,66	1,32	50,37
<i>Manobra 4</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio (%)</i>
16	26,21	26,85	2,44
20	19,30	19,85	2,85
48	13,12	15,22	15,77
124	9,63	11,14	15,68
76	5,99	8,03	34,06
65	3,14	4,74	50,96
87	1,32	0,87	34,09

TABELA 5.19 – Resultados iniciais obtidos de pressão para 3 zonas

<i>Manobra 1</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio (%)</i>
16	42,04	41,85	0,45
20	35,55	34,86	1,98
48	29,23	30,04	2,77
124	25,93	26,11	0,69
76	22,08	22,85	3,49
65	19,39	18,98	2,11
87	16,32	15,84	2,94
<i>Manobra 2</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio (%)</i>
16	32,04	31,71	1,03
20	25,55	24,71	3,29
48	19,23	20,05	4,26
124	16,12	16,00	0,75
76	11,93	12,85	7,71
65	9,23	9,44	2,28
87	6,66	5,72	14,11
<i>Manobra 3</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio (%)</i>
16	27,87	27,32	1,97
20	21,05	20,32	3,47
48	14,51	15,69	8,13
124	11,67	11,61	0,51
76	7,55	8,50	12,58
65	4,54	5,16	13,66
87	2,66	1,33	50,00
<i>Manobra 4</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio (%)</i>
16	26,21	26,86	2,48
20	19,30	19,86	2,90
48	13,12	15,24	16,16
124	9,63	11,16	15,89
76	5,99	8,04	34,22
65	3,14	4,71	50,00
87	1,32	0,87	34,09

TABELA 5.20– Resultado obtidos para *CI* e *NI* globais para todo o setor

<i>Valor da Função Objetivo</i>	<i>CI(10⁵)</i>	<i>NI</i>	<i>Manobra</i>	<i>Vazão Medida (L/s)</i>	<i>Vazão Calculada (L/s)</i>	<i>Desvio (%)</i>
0,6997	0,9120	1,1041	1	10,09	7,84	22,29
			2	7,09	4,64	34,56
			3	5,46	3,32	39,19
			4	2,18	3,18	45,87

TABELA 5.21- Resultado obtidos para *CI* e *NI* diferenciados para 2 zonas

<i>Valor da Função Objetivo</i>	<i>CI Área 1 (10⁵)</i>	<i>NI Área 1</i>	<i>CI Área 2 (10⁵)</i>	<i>NI Área 2</i>	<i>Manobra</i>	<i>Vazão Medida (L/s)</i>	<i>Vazão Calculada (L/s)</i>	<i>Desvio (%)</i>
0,5667	1,0000	0,6232	0,9120	1,2918	1	10,09	9,88	2,08
					2	7,09	5,02	29,20
					3	5,46	3,21	41,21
					4	2,18	3,03	38,99

TABELA 5.22– Resultado obtidos para *CI* e *NI* diferenciados para 3 zonas

<i>Valor da Função Objetivo</i>	<i>CI(10⁵)</i>	<i>NI</i>	<i>Manobra</i>	<i>Vazão Medida (L/s)</i>	<i>Vazão Calculada (L/s)</i>	<i>Desvio (%)</i>
0,5525			1	10,09	9,74	3,47
Zona 1	1,2727	0,5626	2	7,09	4,75	33,00
Zona 2	1,4399	1,3074	3	5,46	2,90	46,89
Zona 3	2,4516	0,6955	4	2,18	2,73	25,23

Os resultados dos testes iniciais não se mostraram satisfatórios na medida em que os valores medidos e simulados de pressão aproximam-se para os 3 primeiros patamares, o mesmo não ocorrendo para o último patamar, mostrando incoerência nos resultados obtidos para o quarto patamar em relação aos demais. Também foi observado que os valores de pressão simulados e observados se mostraram muito próximos, o mesmo não ocorrendo com valores de vazão. Tal incoerência se deve ao fato de o último patamar ser realizado para um vazão muito baixa (e conseqüentemente para uma velocidade muito baixa), o que fez com que a resposta nos pontos de medida não fosse sentida devido ao pequeno tempo disponibilizado para a estabilização do último patamar. Deve-se salientar que tal resultado é explicado pelo fato de estimarem rugosidades em conformidade com o material empregado nas tubulações da rede, sem sequer introduzir singularidades como registros, ou seja, para uma rede não calibrada.

Também pode ser visualizado que houve uma melhora no valor da função objetivo do resultante do zoneamento realizado do setor em 3 zonas específicas, justificando assim o zoneamento para os testes computacionais finais realizados para o Setor São Carlos III, mostrados a seguir.

5.3.2 Resultados obtidos considerando os 3 primeiros patamares

Levando-se em conta as conclusões obtidas pelos resultados iniciais, foram realizadas simulações considerando apenas os 3 primeiros patamares obtidos pelo ensaio de teste de vazamento noturno. Tais simulações foram realizadas para parâmetros globais para todo o setor e para 3 zonas específicas (FIGURA 5.20), sendo tal zoneamento responsável pelo melhor valor da função objetivo apresentado pelos testes iniciais.

TABELA 5.23 – Resultados obtidos para 3 patamares para parâmetros globais

<i>Manobra 1</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio (%)</i>
16	42,04	41,49	1,31
20	35,55	34,61	2,64
48	29,23	30,07	2,87
124	25,93	26,08	0,58
76	22,08	22,89	3,67
65	19,39	19,59	1,03
87	16,32	15,87	2,76
<i>Manobra 2</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio (%)</i>
16	32,04	31,47	1,78
20	25,55	24,55	3,91
48	19,23	20,02	4,11
124	16,12	15,97	0,93
76	11,93	12,83	7,55
65	9,23	9,54	3,36
87	6,66	5,72	14,11
<i>Manobra 3</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio (%)</i>
16	27,87	27,13	2,66
20	21,05	20,20	4,04
48	14,51	15,66	7,93
124	11,67	11,59	0,69
76	7,55	8,47	12,19
65	4,54	5,18	14,10
87	2,66	1,32	50,38

TABELA 5.24– Resultado obtidos para *CI* e *NI* globais para todo o setor

<i>Valor da Função Objetivo</i>	<i>CI(10⁻⁵)</i>	<i>NI</i>	<i>Manobra</i>	<i>Vazão Medida (L/s)</i>	<i>Vazão Calculada (L/s)</i>	<i>Desvio (%)</i>
0,0507	4,0440	0,7370	1	10,09	10,11	0,20
			2	7,09	7,03	0,85
			3	5,46	5,49	0,55

TABELA 5.25 – Resultados obtidos para 3 patamares para 3 zonas

<i>Manobra 1</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio (%)</i>
16	42,04	41,87	0,41
20	35,55	34,87	1,91
48	29,23	29,61	1,30
124	25,93	25,71	0,85
76	22,08	22,51	1,95
65	19,39	19,59	1,03
87	16,32	15,86	2,82
<i>Manobra 2</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio (%)</i>
16	32,04	31,71	1,03
20	25,55	24,71	3,29
48	19,23	19,79	2,91
124	16,12	15,80	1,99
76	11,93	12,64	5,95
65	9,23	9,53	3,25
87	6,66	5,71	14,26
<i>Manobra 3</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio (%)</i>
16	27,87	27,32	1,97
20	21,05	20,32	3,47
48	14,51	15,62	7,65
124	11,67	11,49	1,54
76	7,55	8,34	10,46
65	4,54	5,17	13,88
87	2,66	1,32	50,40

TABELA 5.26– Resultado obtidos para CI e NI para 3 patamares para 3 zonas

<i>Valor da Função Objetivo</i>	$CI(10^{-5})$	NI	<i>Manobra</i>	<i>Vazão Medida (L/s)</i>	<i>Vazão Calculada (L/s)</i>	<i>Desvio (%)</i>
0,0400			1	10,09	10,35	2,58
Zona 1	1,2551	0,4922	2	7,09	7,06	0,42
Zona 2	5,7771	0,6036	3	5,46	5,39	1,28
Zona 3	7,5367	0,8030				

Os resultados mostrados pelas TABELAS 5.23 e 5.25 mostram que os valores simulados e medidos de pressão ficaram bem próximos, sendo melhores os resultados apresentados para o zoneamento de 3 áreas. Também pode ser vista nas TABELAS 5.24 e 5.26 grande melhora para o valor da função objetivo e valores de vazão simulados e medidos bastante próximos. Tais resultados mostram de maneira muito clara a eficiência da simulação computacional considerando apenas os 3 primeiros patamares do testes noturno.

5.3.3 Redução da Faixa de Busca do Valor de NI

Com base em trabalhos já publicados, onde se admitiu o valor de 1.18 para NI (expoente de vazamento) para a determinação da constante de vazamento CI , foram realizadas simulações computacionais reduzindo-se a faixa de busca para a determinação dos valores de NI do modelo computacional. Para tanto foram adotadas, para a representação das soluções do modelo pressão x vazamento (eq. (31)), faixas de $[10 \text{ a } 1] \times 10^{-5} \text{ (L/s.m)}$ para os valores de CI e 1,1 a 1,2 para os valores de NI .

Os resultados obtidos são mostrados a seguir pelas TABELAS 5.27 e 5.28, onde são relatados os valores de pressão vazão e pressão simulados, assim como os valores de função objetivo, CI e NI correspondentes.

TABELA 5.27 – Resultados obtidos para faixa reduzida de *Nl*

<i>Manobra 1</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio (%)</i>
16	42,04	40,78	3,00
20	35,55	34,15	3,93
48	29,23	30,11	3,01
124	25,93	26,10	0,66
76	22,08	22,93	3,85
65	19,39	19,67	1,44
87	16,32	15,87	2,76
<i>Manobra 2</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio (%)</i>
16	32,04	31,18	2,68
20	25,55	24,38	4,00
48	19,23	20,06	4,32
124	16,12	15,99	0,80
76	11,93	12,87	7,88
65	9,23	9,59	3,90
87	6,66	5,72	14,11
<i>Manobra 3</i>			
<i>Nó</i>	<i>Pressão Medida(mH₂O)</i>	<i>Pressão Calculada(mH₂O)</i>	<i>Desvio (%)</i>
16	27,87	26,96	3,27
20	21,05	20,10	4,51
48	14,51	15,69	8,13
124	11,67	11,61	0,51
76	7,55	8,50	12,58
65	4,54	5,21	14,76
87	2,66	1,32	50,38

TABELA 5.28– Resultado obtidos para *CI* e *NI* faixa reduzida de *NI*

<i>Valor da Função Objetivo</i>	<i>CI(10⁻⁵)</i>	<i>NI</i>	<i>Manobra</i>	<i>Vazão Medida (L/s)</i>	<i>Vazão Calculada (L/s)</i>	<i>Desvio (%)</i>
0,0800			1	10,09	11,31	10,79
Zona 1	1,4663	1,1701	2	7,09	6,93	2,26
Zona 2	0,9208	1,1113	3	5,46	5,12	6,23
Zona 3	1,0440	1,0991				

Como pode ser visto, apesar do valor da função objetivo aumentar devido ao aumento dos desvios apresentados, os valores obtidos de *CI* e *NI* mostraram-se ser mais coerentes com relação ao Setor São Carlos III, já que a Zona 1 apresentou valores maiores de *CI* e *NI* do que os obtidos para as Zonas 2 e 3. Tal resultado era esperado, já que a Zona 1 representa a área de maior ocorrência de vazamentos, por representar os maiores valores de pressão do setor.

5.3.4 Considerações sobre os resultados obtidos para o Setor São Carlos III

Os resultados obtidos mostraram-se satisfatórios na medida em que houve sensível melhora no valor da função objetivo com o zoneamento apresentado pela FIGURA 5.19. Também se observa sensível melhora no valor da função objetivo utilizando-se dos 3 primeiros patamares, mostrando incoerência dos dados obtidos por esses patamares ao serem confrontados com os dados do último (quarto patamar).

Com relação aos valores obtidos para os coeficientes do modelo pressão x vazamento (CI e NI), os resultados não se mostraram satisfatórios, na medida em que os valores apresentados pela área 1 se mostraram menores do que os apresentados pelas áreas 2 e 3, já que aquela área apresentou maiores valores de pressão e, como consequência, maiores índices de vazamento. Esse resultado pode ser explicado pelo fato de estimarem rugosidades em conformidade com o material empregado nas tubulações da rede, sem sequer introduzir singularidades, como registros, ou seja, para uma rede não calibrada, podendo provocar resultados não esperados para o Setor em questão.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho visou verificar o estado de funcionamento de sub-setores da rede de distribuição de água para abastecimento da cidade de São Carlos (SP). A análise concentrou-se principalmente no estudo dos vazamentos. Para tanto, foram eleitos dois sub-setores considerados como tendo perdas por vazamentos expressivas : Monte Carlo e São Carlos III.

Com vistas à determinação de grandezas realísticas para tais setores, foi realizado trabalho de levantamento de informações de campo. Inicialmente a equipe realizou o geofonamento das áreas visando a identificação de vazamentos detectáveis para posterior reparo. Em seguida, foram realizados testes noturnos de vazamentos durante os quais pressões e vazões foram monitoradas.

As informações obtidas em campo foram então utilizadas para alimentar um programa de computador, codificado em *FORTRAN*, com o objetivo de determinação dos parâmetros do modelo de vazamentos em função da pressão. Essa determinação foi realizada através do modelo inverso de minimização dos desvios entre valores observados e simulados de pressão e vazão, usando a tecnologia de algoritmos genéticos (AG).

Apesar do número reduzido de parâmetros a serem determinados, os AGs foram escolhidos como ferramenta de otimização do problema em questão por considerar características tais como robustez .

Os dados de campo permitiram que se concluísse que, ao contrário do que se tinha como certo, os dois setores analisados apresentaram características distintas no que se refere aos vazamentos. Primeiramente, poucos vazamentos detectáveis foram identificados na área

correspondente ao setor São Carlos III, em comparação com o setor Monte Carlo. No primeiro caso, foi registrada uma vazão noturna máxima de 10,09 L/s para uma rede de extensão aproximada de 23.000 m (0,44 L/s.Km) , ao passo que no setor Monte Carlo foi constada vazão noturna máxima de 7,61 L/s para 9.173 m de rede (0,83 L/s.Km). A análise dos dados coletados em campo mostrou, inclusive, que as pressões observadas no setor São Carlos III praticamente correspondem às pressões estáticas (máxima diferença de 1 mH₂O) , sendo que no caso do setor Monte Carlo as pressões observadas distanciaram-se consideravelmente (em torno de 20 mH₂O) das respectivas pressões estáticas.

Os testes computacionais realizados para o setor Monte Carlo revelaram que:

- Os valores dos parâmetros globais determinados para esse setor coincidiram com aqueles obtidos anteriormente por SANTOS (2000), o que nos dá confiança quanto ao desempenho do módulo computacional produzido.
- Os resultados obtidos com base na subdivisão do setor em áreas homogêneas do ponto de vista dos vazamentos mostraram-se mais adequados às características reais do setor em estudo. Em conformidade com LAMBERT (2000), valores próximos de 0,50 foram obtidos para áreas cujos condutos eram predominantemente de ferro fundido e superiores a 1,0, mais especificamente 1,30, para condutos de PVC, representando vazamentos através de áreas fixas e variáveis respectivamente.
- Alguns testes foram realizados ainda com o objetivo de detectar vazamentos localizados. Idealizando-se um único segmento de rede com vazamento localizado, obteve-se um trecho da área de maior incidência de vazamentos. O mesmo comportamento foi observado para dois trechos. Porém, pouca confiança pode ser atribuída a tais resultados, haja visto que elas implicam na ampliação do grau de parametrização do problema.
- Do ponto de vista da implementação dos algoritmos genéticos, a implantação da faixa logarítmica para representação dos valores das variáveis possibilitou

economia no tempo de processamento computacional, por reduzir o número de iterações necessárias à convergência.

Com relação ao setor São Carlos III, os resultados permitiram as seguintes conclusões:

- Dos quatro conjuntos de observações monitoradas, para as diferentes manobras de fechamento do registro localizado na entrada do setor, aquele correspondente à abertura mínima mostrou-se ineficiente em guiar a busca dos desvios mínimos. Tal fato pode ser atribuído principalmente à imprecisão das medidas de vazão realizadas.
- Com relação aos resultados obtidos para o zoneamento do setor em duas e três áreas características de vazamentos, o valor da função objetivo obteve sensível melhora em confronto com os valores obtidos para a simulação de parâmetros globais para todo o setor, mostrando o zoneamento ser melhor representativo das características reais da rede do setor São Carlos III.

Apesar do reconhecimento de que os parâmetros buscados devem ser obtidos via calibração, os resultados das simulações mostraram que, como era esperado, eles estão fortemente ligados aos parâmetros da rede propriamente dita (rugosidades, diâmetros, etc.). Assim, o módulo computacional desenvolvido deve ser integrado a um modelo de calibração em termos das características da rede.

Apesar da eficiência dos AGs em "varrer" o espaço de busca, o tempo computacional empenhado mostrou-se excessivo. Tal fato se deveu, em parte, à necessidade de simulações hidráulicas repetidas para avaliação da função de aptidão. No caso, as simulações foram realizadas através de rotina computacional elaborada e codificada para esse propósito, porém não otimizada.

Sugere-se, como aprimoramento desse trabalho, a utilização do módulo computacional desenvolvido integrado ao modelo de calibração em termos das características da rede, para que conclusões possam ser obtidas com maior clareza.

Recomenda-se, também, a utilização de simulador hidráulico otimizado e de desempenho comprovado, da mesma forma que uma biblioteca de algoritmos genéticos otimizada seria de grande valia para fazer face ao tempo computacional dispendioso que caracteriza esse método de busca.

ANEXO A

Cotas Topográficas e Demandas dos nós do Setor São Carlos III

nó	cota(m)	Demanda(m ³ /h)	nó	cota(m)	Demanda(m ³ /h)
1	836,5	0,03	74	865,8	0,36
2	837,8	0,09	75	863,5	0,51
3	842,2	0,14	76	865,5	0,36
4	846,5	0,08	77	869,6	0,64
5	846,4	0,07	78	868,3	0,43
6	848,6	0,17	79	871,1	0,64
7	857,3	0,17	80	871,6	0,42
8	850,7	0,15	81	871,6	0,44
9	851,1	0,15	82	869,2	0,36
10	850,9	0,14	83	862	0,34
11	850,2	0,13	84	870,1	0,34
12	848,8	0,09	85	870,1	0,41
13	845,4	0,03	86	863	0,41
14	858,9	0,09	87	872,7	0,42
15	844,2	0,03	88	871,7	0,41
16	846,7	0,06	89	868,8	0,33
17	852,1	0,07	90	863,9	0,39
18	857,7	0,10	91	870,2	0,13
19	853,6	0,07	92	872,3	0,36
20	853,7	0,08	93	872,9	0,30
21	853,8	0,08	94	872,9	0,00
22	852,8	0,07	95	872,9	0,28
23	851,3	0,06	96	871,6	0,59
24	852,5	0,11	97	859,1	0,20
25	854,9	0,03	98	863,1	0,32
26	858,8	0,11	99	862,9	0,46
27	852,3	0,05	100	862,6	0,48

nó	cota(m)	Demanda(m ³ /h)	nó	cota(m)	Demanda(m ³ /h)
28	854,6	0,03	101	862,9	0,53
29	858,7	0,05	102	863,5	0,49
30	852,3	0,15	103	863,7	0,31
31	859	0,15	104	872,1	0,17
32	850,4	0,09	105	872,4	0,22
33	853	0,14	106	872,7	0,24
34	855	0,08	107	871,4	0,56
35	856,1	0,07	108	870,7	0,37
36	857,4	0,17	109	865,8	0,37
37	858,3	0,17	110	864,4	0,50
38	858,9	0,15	111	865,2	0,54
39	859,2	0,15	112	868,3	0,38
40	859	0,14	113	867,7	0,19
41	858,4	0,13	114	869,1	0,32
42	857,6	0,06	115	869,6	0,58
43	856,8	0,09	116	870,1	0,26
44	854,4	0,03	117	870,8	0,31
45	851,4	0,16	118	870,9	0,64
46	859,2	0,30	119	869,4	0,44
47	859,7	0,27	120	864,4	0,44
48	858,3	0,30	121	863,5	0,30
49	859,1	0,20	122	860,6	0,51
50	858,6	0,13	123	862,7	0,48
51	852,7	0,17	124	862,4	0,34
52	863,4	0,30	125	863,5	0,48
53	864,2	0,30	126	864,3	0,53
54	864,6	0,27	127	866,9	0,47
55	864,4	0,31	128	867	0,12
56	864,2	0,30	129	867,1	0,09
57	863	0,29	130	868,9	0,21
58	861	0,73	131	869,3	0,26
59	857,8	0,60	132	862,7	0,03
60	860,1	0,44	133	862,7	0,03
61	856,7	0,16	134	864,8	0,03
62	864	0,22	135	864	0,06
63	860,8	0,38	136	864,3	0,00
64	859,4	0,24	137	863	0,04
65	868,8	0,38	138	863,5	0,06
66	868,2	0,34	139	860,5	0,02
67	869,6	0,67	140	854,5	0,00
68	870,3	0,85	141	873	0,33
69	864,5	0,36	142	873	38,30

nó	cota(m)	Demanda(m ³ /h)	nó	cota(m)	Demanda(m ³ /h)
70	870,7	0,59	143	865	0,27
71	869	0,00	144	865	0,46
72	867,6	0,26	145	866,2	0,39
73	867,8	0,47	146	869,8	0,26

ANEXO B

Fluxograma do Modelo Hidráulico

BIBLIOGRAFIA

GERMANOPOULOS, G.; JOWITT, P.W. (1989). *Leakage reduction by excess pressure minimization in a water supply network*. Proc. Instn. Civ. Engng, parte I, n.87, p.215-224, June.

GUELI, R.; PEZZINGA, G. (1998). *Algoritmi genetici per la regolazione di valvole ai fini della riduzione delle perdite*. Atti, XXVI Conv. di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Catania, Italy.

JOWITT, P.W.; XU, C. (1990). *Optimal Valve Control in Water Distribution Networks*. Journal of Water Resources Planning and Management, v.116, n.4, p.455-472, July.

KHADAM, M.O.; SHAMAS, N.KH.; AL-FERAIHEEDI, Y.(1991). *Water International*. Water losses from municipal utilities and their impacts, v.14, n.4, p.254-261.

LAMBERT, A.O. (2000). Leakage Estimation. E-mail (7 de Agosto)

MARTÍNEZ, F. et al.(1999). *Construction and Use of Dynamic Simulation Model for the Valencia Metropolitan Water Supply and Distribution Network* In: Savic, D. A.(ed.); Walters, G. A.(ed.), *Water Industry Systems: modelling and optimization applications*, vol. 1, p. 155-174, 1999.

PEZZINGA, G. (1994). *Modelli per la regolazione della piezometria ai fini della riduzione delle perdite in rete*. Atti, XXIV Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, v.II, n.T3b, p.25-38, Cuem, Italy.

PEZZINGA,G.;GUELI ,R. (1999). *Optimal Location of Control Valves in Water Supply Networks by Genetic Algorithm*. Discussion. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 125, n. 1,p. 67.

REIS L.F.R.; PORTO R.M.; CHAUDRY F.H. (1997). *Optimal location of control valves in pipe networks by genetic algorithm*. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v.123, n.6, p.317-326, Nov/Dec.

TUCCIARELLI, T.; CRIMISI, A.; TERMINI, D. (1999). *Leak Analysis in pipeline systems by means of optimal valve regulation*. *Journal of Hydraulic Engineering*, v.125, n.3, p.277-285, Mar.

TABLESH, M.; BURROWS, R.; TANYIMBOH, T.T. (1996). *Water consumption and network leakage evaluation using a best parameter technique*. *Hydroinformatics'96: Proceedings of the International Conference on Hydroinformatics, Rotterdam*,v.9, n.13, p.394 –387, Sep.

VAIRAVAMOORTHY, K.; LUMBERS, J.; *Leakage Reduction in Water Distribution Systems: Optimal Valva Control*. Journal of Hidraulic Engineering, v.124, n.11, p.1146-1153, Nov.

APÊNDICE

Setor de Abastecimento São Carlos III

Setor de Abastecimento São Carlos III
São Carlos – SP