

PROMOÇÃO

ABRH



**XIV SIMPÓSIO
BRASILEIRO
DE RECURSOS
HÍDRICOS**

**V SIMPÓSIO
DE HIDRAULICA
E RECURSOS HÍDRICOS
DOS PAÍSES DE LÍNGUA
OFICIAL PORTUGUESA**

APOIO

**GOVERNO
DO ESTADO
DO SERGIPE**



**ARACAJU
CONVENTION
& VISITORS
BUREAU**

**Gestão de Recursos Hídricos:
O Desafio da Prática**

DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO PRESSÃO X VAZAMENTO PARA UM SUB-SETOR DA CIDADE DE SÃO CARLOS, SP, COM A UTILIZAÇÃO DE ALGORITMOS GENÉTICOS

Rodrigo de Oliveira Caliman¹; Luisa Fernanda Ribeiro Reis¹; Fernando das Graças Braga da Silva¹;
Rodrigo de Melo Porto¹; Fazal Hussain Chaudhry¹

C153d

Resumo - As redes de distribuição de águas para abastecimento constituem importantes infra-estruturas, por serem responsáveis pelo abastecimento hídrico à população. Dessa maneira, tanto o projeto, como a operação e a manutenção de tais sistemas devem ser eficientes, visando manter a sustentabilidade desse recurso natural. Devido a idade das redes, pressões excessivas nos condutos e outros fatores, as perdas por vazamento representam nos dias de hoje, parcela considerável de toda água bombeada e tratada quimicamente que é destinada ao consumo populacional, através das respectivas redes de distribuição. Com o objetivo de minimizar essas perdas, este trabalho visa a determinação dos parâmetros do modelo hidráulico pressão x vazamento, aplicado a um sub-setor de rede da cidade de São Carlos, SP, onde as perdas por vazamento são expressivas. A determinação dos referidos parâmetros é realizada através de modelo inverso de minimização das diferenças entre valores observados em campo e previstos através de modelo hidráulico de simulação, utilizando algoritmos genéticos (AGs).

Abstract - 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 paper sets out to determine the parameters for the pressure x leakage model, applying it to a sub-sector 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).

¹ Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC-USP, Caixa Postal 359, CEP 13560-970, São Carlos, SP

1227995
190302

SYSNO	1227995
PROD	0001186
ACERVO FESC	

Palavras-Chave: perdas por vazamentos; redes de distribuição de água; algoritmos genéticos

INTRODUÇÃO

Os sistemas de abastecimento de água são responsáveis pela distribuição de um bem de grande valor que é a água de qualidade para o consumo humano. A quantidade de água disponível nos locais de consumo não é só função da sua disponibilidade em termos de quantidade e qualidade, mas depende também do funcionamento hidráulico do sistema de distribuição, principalmente se analisarmos o problema sob a ótica da sustentabilidade do recurso natural água.

Atualmente a crescente demanda se contrapõe à escassez de água para consumo, tornando-se inevitável a necessidade de estudos que visem a eficiência de tais sistemas, reduzindo as perdas por vazamento de águas já bombeadas e tratadas nas respectivas redes de distribuição.

As ocorrências e características das perdas por vazamento dependem de fatores tais como a idade da rede, operação e manutenção, tecnologia e material utilizados na construção da rede, tipo de solo, qualidade da água e principalmente da pressão de operação do sistema. Tais fatores conduzem às ocorrência de vazamentos em peças corroídas, conexões pobres ou comprimidas, ou através de fraturas circunferenciais ou longitudinais no conduto.

As perdas por vazamento podem ser divididas em dois tipos: visíveis e inerentes. As visíveis podem ser detectadas por equipamentos acústicos, sendo facilmente reparadas. Já as inerentes possuem o controle dificultado por não serem detectadas e reparadas com a mesma facilidade.

A bibliografia apresenta diversos trabalhos (Germanopoulos e Jowitt (1989); Jowitt e Xu (1990); Pezzinga (1994); Khadam et al.(1991); Reis et al. (1997); Pezzinga e Gueli (1998); Vairavamoorthy e Lumbers (1998); Tucciarelli et al. (1999)) sobre a localização otimizada de válvulas de controle de pressão, visando minimizar as perdas por vazamentos, utilizando um modelo do tipo pressão x vazamento na forma:

$$L = CI \cdot l \cdot P^{NI} \quad (1)$$

Sendo: L = vazamento em L/s, l = comprimento da rede em m, P = carga de pressão média no trecho considerado em mH₂O, CI e NI = parâmetros relação vazamento x pressão.

Os parâmetros CI e NI , embora bastante estudados em outros países como Reino Unido e Arábia Saudita, devem ser adequados aos sistemas brasileiros, havendo a necessidade de estudos que visem a sua determinação para o caso específico do Brasil.

Segundo Hueb (1985), a quantificação das perdas deve ser realizada no período da madrugada, quando se tem o mínimo consumo de água, para setores isoláveis, de maneira a possibilitar o monitoramento dos fluxos de entrada e saída de água ao setor a ser analisado.

Germanopoulos e Jowitt (1989) reportaram estudos realizados para diversas redes de distribuição de água na Inglaterra, obtendo valores para o parâmetro NI em torno de 1,18 e mostrando que o parâmetro CI depende das características da rede em questão.

Khadam et al. (1991), realizaram estudos sobre as perdas por vazamento geradas na rede de abastecimento da cidade de Ar-Riyadh, Arábia Saudita, visando obter informações sobre a relação vazamento x pressão. Para a realização desse estudo, foram feitas medições e inspeções em seis áreas dessa 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, evidenciando o caráter local dos valores encontrados para os parâmetros em estudo.

Lambert (1999) sugere que os condutos de PVC tendem a apresentar valores entre 1,5 e 2,5 para o parâmetro NI , sugerindo vazamentos através de áreas variáveis e os condutos de ferro fundido valores próximos de 0,5, indicando vazamentos através de áreas fixas.

Tucciarelli et al. (1999) foram os primeiros autores a propor a estimativa da perda de água em redes de distribuição através de modelo inverso de calibração, a partir de zoneamento dos setores levando-se em consideração critérios como homogeneidade de material das tubulações da rede e níveis de pressão. No entanto, tais autores não se utilizam de dados de campo relativos a testes específicos realizados durante o período noturno. Não apresentaram também um critério claro para o zoneamento dos setores estudados de maneira a enquadrar devidamente os vazamentos, com base em critérios como material dos condutos da rede do setor, faixas estabelecidas de pressão e incidência de vazamentos.

O presente trabalho tem como objetivo de quantificar perdas inerentes utilizando-se de levantamentos de campo, para a determinação dos parâmetros do modelo pressão x vazamento para um sub-setor de rede de distribuição de águas para abastecimento da cidade de São Carlos, S.P., utilizando como ferramenta o método de otimização de Algoritmos Genéticos. Os estudos reportados neste trabalho são referentes a testes computacionais realizados admitindo-se parâmetros únicos para todo o setor e parâmetros específicos para área de características diferentes, determinadas através de zoneamento realizado no setor em estudo.

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 e os correspondentes observados em campo, como:

$$\text{Min.}_{C1, N1} \sum_{i=1}^{n_{po}} \left[\sum_{j=1}^{n_n} w_h \frac{|P_{ijOBS} - P_{ijSIM}|^2}{(\bar{P}_{OBS})^2} + \sum_{k=1}^{n_c} w_q \frac{|Q_{ikOBS} - Q_{ikSIM}|^2}{(\bar{Q}_{OBS})^2} \right] \quad (2)$$

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 e 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; $C1$ e $N1$ as variáveis de decisão do problema, que correspondem aos parâmetros do modelo pressão x vazamento (Equação (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 para determinação de valores observados para cálculo dos desvios são obtidos com base em testes noturnos realizados, mantendo fixa a pressão na entrada do setor em estudo em diversos níveis, através das manobras de registro existente, conforme reportado por Santos (2000). A partir do registro totalmente aberto, são realizadas manobras sucessivas de fechamento do mesmo, registrando simultaneamente as medidas de vazão e pressão na entrada do setor, e pressões em pontos preestabelecidos.

MODELO HIDRÁULICO

Em conformidade com o modelo inverso de otimização representado pela na equação (2), 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:

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

2- Carga hidráulica mínima aceitável para os nós:

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

onde: $Q S_{ij}$ 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.

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

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:

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

A relação não linear entre vazamento e pressão de serviço foi incorporada pela seguinte função:

$$Q S_{ij} = C1 L_{ij} (P_{ij})^{N1} \quad (7)$$

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

$$P_{ij} = 0.5[(H_i - G_i) + (H_j - G_j)] \quad (8)$$

onde : G_i representa a cota topográfica do nó i .

ALGORITMOS GENÉTICOS

Face às características do problema de minimização expresso matematicamente pela equação (2), uma técnica de otimização por busca direta mostra-se adequada à sua resolução. 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 desenvolvida por Rechenberg (1973), na Alemanha, em paralelo ao desenvolvimento proposto 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.

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. 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 do 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 manter as melhores soluções 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 (Fig.1). Já a mutação, ilustrada na Fig. 2, é uma degeneração casual dos valores, permitindo a introdução de novas características às populações.

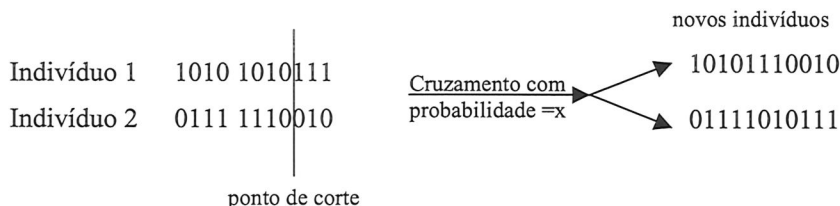


Figura 1 – Mecanismo de cruzamento de soluções codificadas em binário

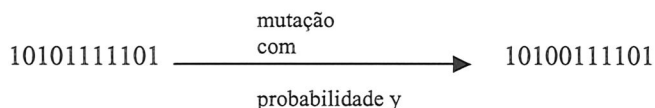


Figura 2- Mecanismo de mutação de soluções codificadas em binário

IMPLEMENTAÇÃO DOS ALGORITMOS GENÉTICOS PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO PRESSÃO X VAZAMENTO

A técnica de Algoritmos Genéticos (AGs) requer que soluções alternativas para o problema sejam codificadas e os mecanismos de geração da população inicial de alternativas, cruzamento e mutação sejam estabelecidos em conformidade com as características do problema. Assim, a implementação da técnica de AGs aplicada ao problema de determinação dos parâmetros do modelo pressão x vazamento, definidos como variáveis de decisão do problema, através da minimização dos desvios anteriormente citados (equação (2)) é descrita a seguir.

Representação das soluções:

A representação das soluções alternativas foi realizada utilizando o código binário, que compreende um vetor ou cadeia de *bits* (*string*), por possibilitar uma maior precisão dos resultados.

Para a representação das soluções do modelo pressão x vazamento, foram adotadas faixas de $10 \cdot 10^{-5}$ a $1 \cdot 10^{-5}$ (L/s.m) para os valores de *CI* e 0,5 a 2,5 para os valores de *NI*, conforme indicações de Lambert (1999).

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 da cadeia binária relativos à constante de vazamento *CI* e os 10 restantes ao expoente de vazamento *NI*.

Numa segunda etapa, seguindo Tucciarelli et al.(1999), a rede foi subdividida em duas zonas, norteando critérios como homogeneidade no que se refere ao material das tubulações da rede, cotas topográficas e incidência de vazamentos registrados, para a determinação de parâmetros diferenciados. Para a determinação de tais parâmetros foram adotados *strings* de comprimento 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.

Geração da população inicial:

A geração da população inicial de soluções alternativas foi realizada 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, cujo número foi mantido constante ao longo das gerações.

Cruzamento e mutação:

O cruzamento foi realizado de forma que são escolhidos dois indivíduos "pais" da presente geração de forma aleatória, determinados os pontos de troca de material genético, e, a partir daí, a permuta entre as suas características genéticas para a formação de novas soluções. Ao cruzamento foi atribuída a probabilidade de 100%, com número de recombinações igual a 30

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 dois pontos de corte para cada cruzamento. A determinação dos pontos de troca entre soluções "pais", foi feita de maneira aleatória, sendo cada ponto de troca obrigatoriamente pertencente a uma variável, no caso um na cadeia representativa da constante *CI* e outro na cadeia representativa do expoente *NI*.

No caso da subdivisão da rede em duas áreas foi estabelecido cruzamento com dois pontos de corte, sendo um com ocorrência obrigatória nos 20 primeiros dígitos(correspondentes aos valores de

CI e *NI* para área 1), e o outro nos dígitos restantes (correspondentes aos valores de *CI* e *NI* para área 2).

A mutação foi implementada da mesma maneira para ambos os casos, através da mudança eventual de um dígito de cada variável. No caso de parâmetros únicos, 2 variáveis, *CI* e *NI*, e no caso da subdivisão, 4 variáveis, *CI* e *NI* para as áreas 1 e 2.

Forma de seleção

Optou-se pela sistemática elitista de reprodução, impondo-se a cópia das 5 melhores soluções 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.

SETOR E ESTUDOS REALIZADOS

Os estudos foram realizados em uma sub-rede denominada Jardim Monte Carlo, esquematizada na Fig.1, que 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, 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 distribuição de vazão a sub-rede em estudo.

A aquisição de dados reais de pressão e vazão foram realizados durante o período noturno, tendo como medidas oito pontos de monitoriamento de pressão e um ponto de vazão (Tabela 1). Os pontos de medida de pressão indicados 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 vários níveis de valores de pressão, enquanto o monitoriamento da vazão foi realizado na entrada do setor. Tais experimentos foram realizados variando a pressão no sistema através de 3 manobras de fechamento gradual da válvula redutora de pressão existente na entrada do setor.

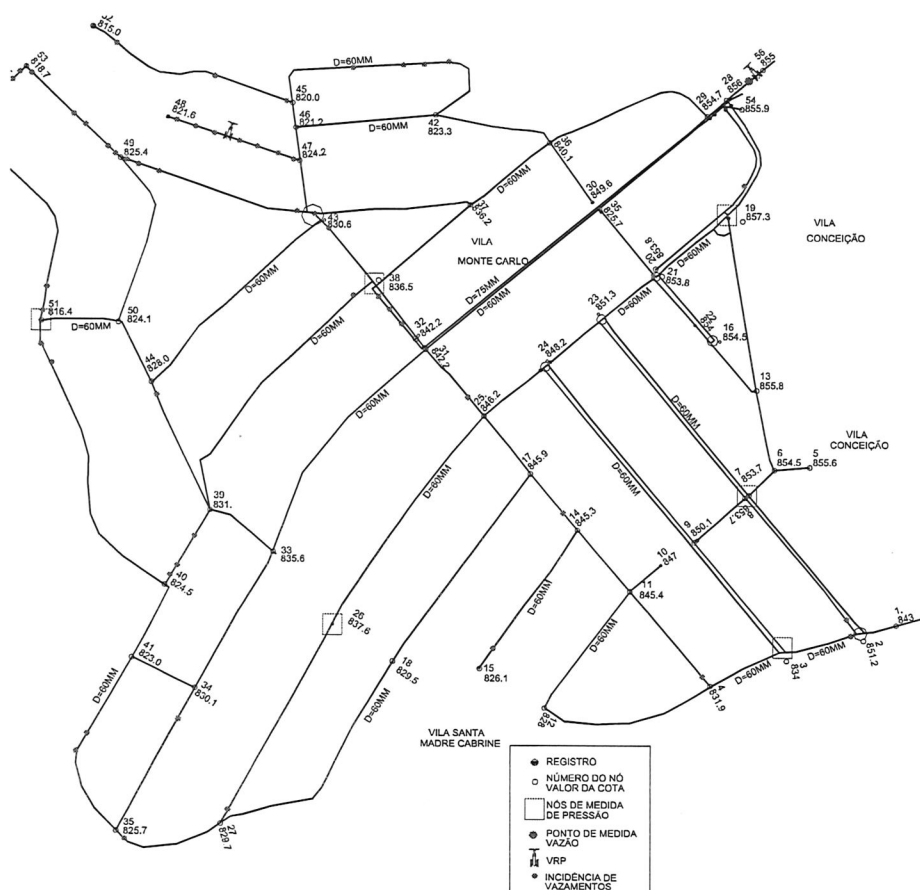


Figura. 3 – Sub – rede Jardim Monte Carlo

Tabela 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
3	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

O zoneamento foi realizado levando-se em consideração as cotas topográficas do setor, dados de incidência de vazamentos e material da rede (PVC ou ferro fundido), nos moldes sugeridos por Tucciarelli et al.(1999).

A rede dividida em duas zonas é mostrada na Fig. 4, 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.

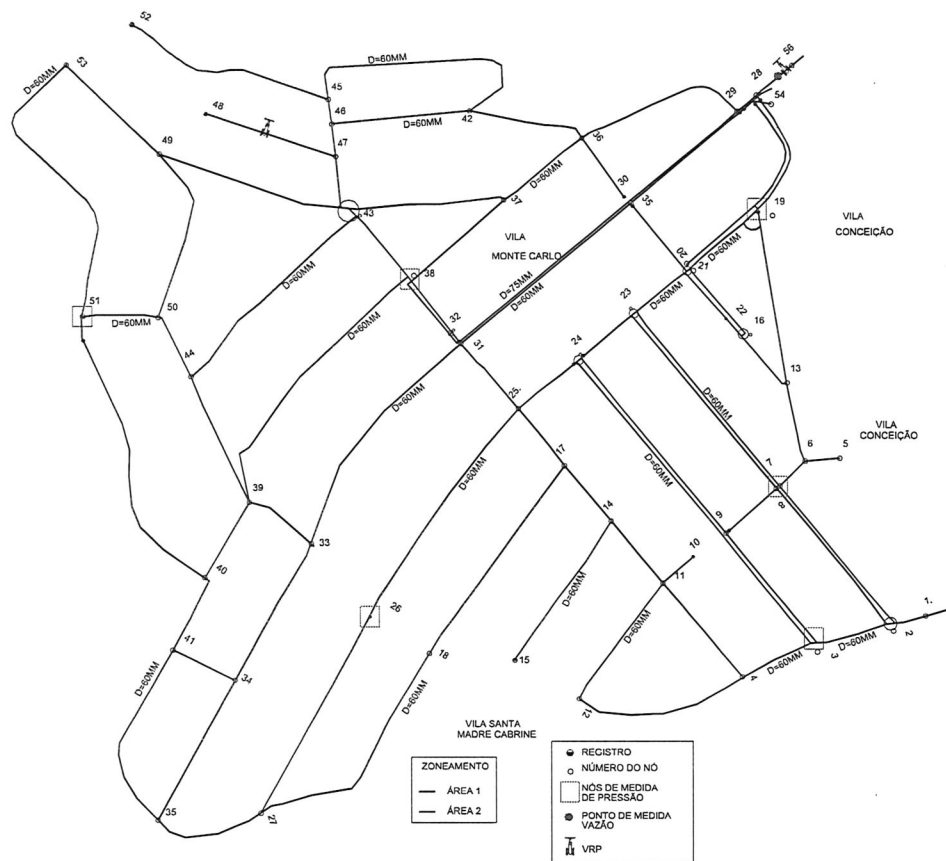


Figura. 4 – zoneamento do setor estudado

RESULTADOS E CONCLUSÕES

Testes computacionais foram realizados, admitindo-se o valor 1 para w_h e w_q , na equação (2), primeiramente para avaliação de parâmetros globais e, em seguida, para avaliação de parâmetros específicos para as áreas de características diferentes, conforme descrição.

Parâmetros globais:

O modelo computacional elaborado com a finalidade de determinação dos valores de CI (constante de vazamento) e NI (expoente de vazamento), foi testado, admitindo-se inicialmente tais valores como sendo representativos do setor todo.

Os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 2 e 3, possibilitando análises comparativas entre os valores simulados e observados de vazão e pressão. Observa-se que os valores de abertura das tabelas são aproximados.

Tabela 2 – Valores de pressão medidos e calculados pelo modelo hidráulico para o todo o setor

	Padrão1 (VRP aberta)		Padrão2 (VRP 25% aberta)		Padrão3 (VRP 50% aberta)		Padrão4 (VRP 75% aberta)	
Nó	Pmed.(mca)	Pcal.(mca)	Pmed.(mca)	Pcal.(mca)	Pmed.(mca)	Pcal.(mca)	Pmed.(mca)	Pcal.(mca)
57	44,39	45,34	34,44	35,27	27,48	28,24	20,91	21,78
7	23,79	25,76	13,58	15,57	6,46	8,46	-2,00	1,92
19	23,82	23,61	13,38	13,19	6,18	5,92	-0,50	-0,76
26	38,88	42,21	29,80	32,23	23,26	25,25	17,11	18,84
38	37,35	41,25	28,37	31,18	21,90	24,15	15,79	17,69
51	56,65	61,84	47,85	51,88	41,66	44,93	35,65	38,53

Tabela 3 – Resultados obtidos para CI e NI constantes para o setor

Valor da Função Objetivo	$C1(10^{-5})$	NI	Padrão	Vazão Medida (L/s)	Vazão Calculada (L/s)	Erro (%)
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

Parâmetros específicos para as áreas de características diferentes

Com o objetivo de produzir parâmetros mais realísticos, através da 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, conforme indica a Fig.4.

A Fig. 5 mostra a evolução no valor da função de aptidão ao longo das sucessivas gerações de AGs e as Tabelas 3 e 4 possibilitam que os resultados obtidos adotando-se o zoneamento sejam avaliados e comparados com aqueles obtidos anteriormente.

Tabela 4 – Valores de pressão medidos e calculados pelo modelo hidráulico para o zoneamento

	Padrão1 (VRP aberta)		Padrão2 (VRP 25% aberta)		Padrão3 (VRP 50% aberta)		Padrão4 (VRP 75% aberta)	
Nó	Pmed.(mca)	Pcal.(mca)	Pmed.(mca)	Pcal.(mca)	Pmed.(mca)	Pcal.(mca)	Pmed.(mca)	Pcal.(mca)
57	44,39	45,59	34,44	35,56	27,48	28,50	20,91	21,98
7	23,79	26,04	13,58	15,82	6,46	8,66	-2,00	2,06
19	23,82	23,67	13,38	13,24	6,18	5,96	-0,50	-0,74
26	38,88	41,78	29,80	32,12	23,26	25,28	17,11	18,92
38	37,35	39,90	28,37	30,45	21,90	23,72	15,79	17,45
51	56,65	58,08	47,85	49,61	41,66	43,45	35,65	37,62

Tabela 5- Resultado obtidos para C1 e N1 diferenciados

Valor da Função Objetivo	C1 Área 1 (10 ⁻⁵)	N1 Área 1	C1 Área 2 (10 ⁻⁵)	N1 Área 2	Padrão	Vazão Medida (L/s)	Vazão Calculada (L/s)	Erro (%)
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	8,57

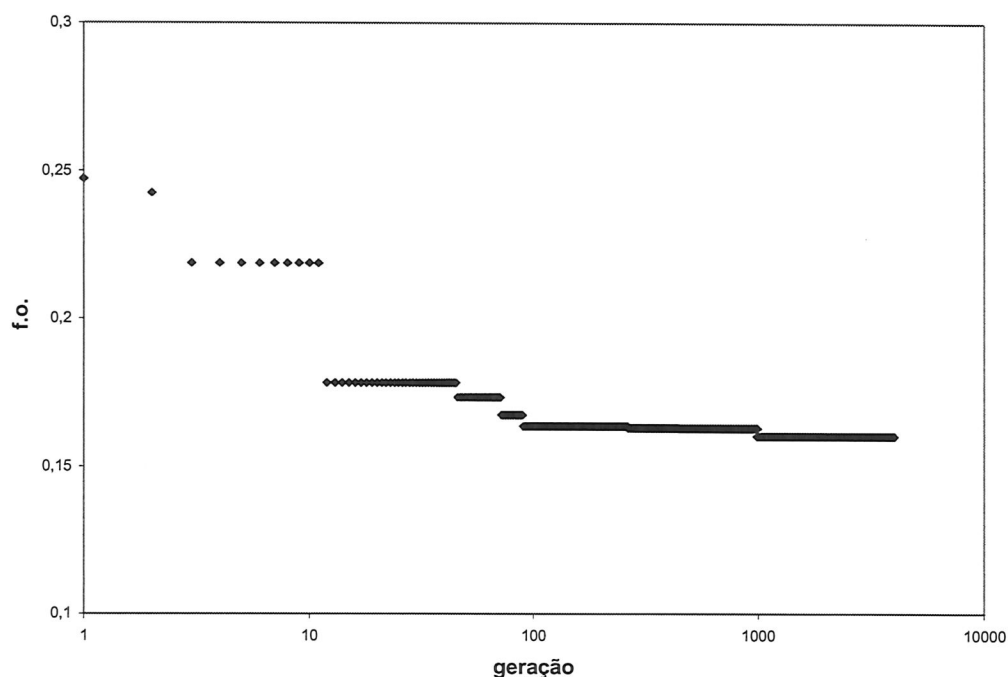


Fig. 15- Evolução do valor da f.o ao longo das gerações

Considerações sobre os resultados

Os resultados obtidos adotando-se o zoneamento mostraram-se satisfatórios, na medida em que houve sensível melhora no valor da função objetivo, apesar do aumento no desvio percentual entre os valores observados e simulados de vazão assumindo-se parâmetros únicos. Também foi visualizado que houve uma tendência de os valores de NI para os condutos de PVC apresentarem valores entre 1,5 e 2,5, sugerindo vazamentos através de áreas variáveis e os valores para os condutos de ferro fundido apresentarem valores próximos de 0,5, indicando vazamentos através de áreas fixas, em conformidade com Lambert (1999) .

Observa-se que, embora o modelo realize ajuste de parâmetros com base na minimização dos desvios entre valores simulados de vazão e pressão, os valores de vazões obtidos são muito próximos, o mesmo não ocorrendo para as pressões. 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 real não calibrada.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FINEP como agência financiadora do projeto RECOPE-REHIDRO, em que se insere o presente estudo; ao SAAE - São Carlos pelo auxílio e cooperação; e à FAPESP pela concessão de bolsas a autores deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- GOLDBERG, D.E. (1989). Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, USA.
- GERMANOPOULOS, G.; JOWITT, P.W. (1989). Leakage reduction by excess pressure minimization in a water supply network. Proc. Instn. Civ. Engng, parte1, n.87, p.215-224, June.
- 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. (1999). Leakage Estimation. E-mail (7 de Agosto)
- PEZZINGA, G.; GUELI, R. (1998). *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.
- SANTOS, A. (2000). *Estudo das perdas por vazamento aplicado a um setor da rede de abastecimento de São Carlos*, SP. 114p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- 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.
- VAIRAVAMOORTHY, K.; LUMBERS, J.(1998). Leakage Reduction in Water Distribution Systems: Optimal Valve Control. Journal of Hydraulic Engineering, v.124, n.11, p.1146-1153, Nov.