

# APLICAÇÃO DE MODELO DE SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO NA GESTÃO DE PERDA DE ÁGUA EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO

## LEAKAGE MANAGEMENT WITH COMPUTATIONAL MODEL IN WATER SUPPLY SYSTEM

CARLOS CÉSAR GUMIER

Engenheiro Civil. Mestre em Engenharia Civil pela UNICAMP

EDEVAR LUVIZOTTO JUNIOR

Engenheiro Civil. Doutor em Engenharia Civil pela Escola Politécnica da USP

Recebido: 19/07/05 Aceito: 27/12/06

### RESUMO

Este artigo apresenta a aplicação de modelo matemático-computacional de simulação e otimização para localização de fugas. O modelo proposto é fundamentado no acoplamento de um simulador hidráulico baseado no *Time Marching Approach* – TMA com o algoritmo otimizador de *Nelder-Mead* e foi aplicado em uma rede de distribuição de água da cidade de Jundiaí-SP. Nos testes realizados ficou claro o funcionamento adequado do modelo apresentado, pois a fuga simulada foi localizada, sendo observado, entretanto, a necessidade de um aprimoramento na localização dos pontos de monitoramento durante a execução da simulação.

**PALAVRAS-CHAVE:** Perda de água, detecção de fuga, modelo matemático de simulação-otimização, *Nelder-Mead*.

### ABSTRACT

*This work presents a computational model as a new tool for leak localization. The considered model was developed through the coupling of hydraulic simulator based in Time Marching Approach – TMA method with the Nelder-Mead optimization algorithm. The model was applied to a real water distribution network, in the city of Jundiaí, Brazil. In the carried through tests it was clearly the adequate functioning of the presented model, therefore the simulated escape was located, being observed, however, the necessity of an improvement in the localization of the monitor points, during the execution of the simulation.*

**KEYWORDS:** Water loss, leak detection, computational model, *Nelder-Mead*

### INTRODUÇÃO

A progressiva deterioração dos rios e mananciais de abastecimento e o agravamento de conflitos entre os diversos setores usuários das águas forçaram o início das discussões sobre a situação e o futuro das águas em todo o mundo. Elaborado pelo Banco Mundial o relatório *Water Resources Management Policy Paper* Organização das Nações Unidas (ONU) (1993), apresenta diversas propostas relacionadas ao uso dos recursos hídricos dentre os quais se destaca o gerenciamento adequado dos sistemas de abastecimento urbanos e a necessidade premente de implementação de políticas e programas voltados à conservação e uso racional da água.

Indicadores de perdas de água em sistemas de abastecimento urbanos de diversos países apontam para índices médios de 17% de perda de toda a água captada e tratada Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água PNCDA (1998). No Brasil esses índices

variam bastante entre as companhias de saneamento, entretanto todos os índices apontam para a necessidade de redução destes valores, alguns muito altos, conforme apresentado na Tabela 1.

A redução destes índices de perda deve ser o principal desafio das companhias de saneamento, uma vez que sistemas de abastecimento que não operam com um bom nível de desempenho implicam, além da captação de um volume hídrico acima do previsto inicialmente, o conseqüente aumento no consumo de energia elétrica pelos componentes de bombeamento e ainda custos adicionais em insumos e mão de obra para operação do sistema. A redução da perda de água nestes sistemas conduz a um maior equilíbrio financeiro para companhia de saneamento, além de adiar ou mesmo evitar a necessidade de expansão da produção de água e os altos investimentos inerentes à execução de novas captações, estações de tratamento e adutoras para transporte da água localizadas, na maioria das vezes, distantes dos centros de consumo.

Cabe observar que o indicador de perdas em percentual, embora seja o mais empregado para a apresentação geral de cenários, deve ser considerado com certo critério. Este indicador retrata as perdas do ponto de vista financeiro e comercial, sendo fortemente influenciado pelo consumo e pela idade da tubulação, e, por não expressar fatores importantes em relação às fugas de água da rede, tais como pressão de operação, extensão e quantidade de ligações atendidas, não é o mais adequado para a avaliação de desempenho operacional das companhias de saneamento. Atualmente o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) recomenda a adoção da unidade litro/dia.ligação.

### PROGRAMAS DE REDUÇÃO DE PERDA DE ÁGUA

O combate à perda de água nos sistemas de abastecimento é com-

Tabela 1 - Índice de perdas de faturamento médio dos prestadores de serviços segundo abrangência e região geográfica

Região	Abrangência			
	Regional (Estaduais)	Microrregional	Local (DAE / SAAE)	Brasil
	%	%	%	%
Norte	52,8	-	69,0	57,6
Nordeste	45,5	-	43,7	45,5
Sudeste	38,2	40,8	40,3	38,8
Sul	37,9	30,7	34,1	37,3
Centro-Oeste	29,2	-	49,5	34,0
Brasil	39,9	38,6	42,8	40,5

Fonte: SNIS (2002)

plexo, envolvendo de início a distinção entre as perdas aparentes, de ordem econômica e que são reduzidas com ações administrativas e as perdas reais (fugas) que ocorrem em todo o sistema de abastecimento, principalmente nas redes de distribuição.

A condição da infra-estrutura das redes de distribuição de água, suas características e necessidades operacionais são os principais fatores que influenciam no volume de perdas reais de água em um sistema de abastecimento. A maioria das redes é, na prática, uma mistura de tubos de diferentes tipos de materiais, assentados ao longo de várias décadas e que, geralmente, apresentam sinais de deterioração em maior ou menor escala conforme a idade de assentamento, material do tubo, técnicas de instalação empregadas e características do solo nas proximidades. A sinergia destas características potencializa o surgimento destas fugas.

Observa-se hoje, uma grande evolução e preocupação das companhias de saneamento com o levantamento de indicadores de desempenho mais precisos e elaborados dos sistemas de abastecimento, entretanto é fundamental a busca de novas ferramentas que auxiliem os gestores dos programas de redução de perdas nas tomadas de decisão. Desta forma faz-se essencial o estudo de novos métodos e ferramentas que direcionem os trabalhos de detecção de fugas de água, permitindo pré-localizar áreas com fortes indícios de ocorrências destas, direcionando as campanhas de inspeção da rede para as áreas suspeitas, tornando o trabalho mais ágil e menos dispendioso, viabilizando sua aplicação em maior escala.

Uma das medidas de maior impacto na redução geral do volume de

água perdido é o controle ativo dos vazamentos, que é a implementação de uma política que, de tempos em tempos, realiza uma pesquisa nas redes de distribuição do sistema com o objetivo de localizar e reparar as fugas que permanecem ocultas. Embora existam diversos métodos de detecção destes vazamentos o principal e mais tradicional método utilizado é a inspeção periódica com equipamentos acústicos em toda a extensão de tubulações e conexões da rede existente.

O controle ativo dos vazamentos está associado à realização de campanhas de inspeção das redes, chamadas de “varredura” por inspecionar a totalidade das redes com equipamentos de detecção acústica. Introduzida no Brasil na década de 70 esta metodologia de pesquisa de fugas vem sendo empregada até os nossos dias praticamente da mesma forma, muito embora os fabricantes tenham modernizado os aparelhos de detecção e criado novos equipamentos. Estas campanhas sofrem com os vícios adquiridos, ou seja, mesmo com a evolução dos equipamentos, os trabalhos são planejadas e praticadas da mesma forma, carecendo de estudos, metodologias e mesmo ferramentas que as tornem mais ágeis e menos dispendiosas. Quando há alguma tentativa de direcionamento destas campanhas de varredura a seleção das áreas críticas ou prioritárias ainda é realizada de modo empírico, através de análise de dados históricos dos vazamentos consertados e mapeados, o que não esclarece muito devido o grande número de fugas geralmente cadastrado. Outro critério, ainda mais empírico, tenta revelar áreas suspeitas através de condições desfavoráveis às quais a infra-estrutura

possa estar submetida, tais como: locais de pressão elevadas, locais de solo com má qualidade, redes antigas, redes executadas com materiais inadequados ou de baixa qualidade etc.

Herpetz (2003) apresenta sua concepção metodológica para realização dos serviços de investigação de fugas em campo dividindo os trabalhos em três etapas:

- levantamento da área
- pré-localização da fuga e
- detecção da fuga

O levantamento da área é uma primeira investigação da rede de distribuição, sendo realizada através de medição das vazões para avaliação das perdas do setor. Revelados indícios de grande volume de perdas no setor iniciam-se os trabalhos referentes à etapa seguinte de pré-localização da fuga, através da procura das regiões suspeitas de conter fugas. A busca destas regiões pode ser realizada de duas diferentes maneiras: com equipamentos que coletam e armazenam ruídos ao longo de um período (data-loggers) ou através da simulação hidráulica da rede por modelagem computacional.

A detecção da fuga ou pinpoint, terceira etapa da realização dos trabalhos, é a localização exata do local da fuga, com auxílio dos aparelhos acústicos de geofone. Desta forma, o trabalho mais árduo, lento e minucioso – que é o de caminhar sobre a linha, posicionar o aparelho a cada metro e avaliar as leituras apontadas – fica resumido apenas aos trechos suspeitos, não necessitando mais ser aplicado em toda a extensão de rede existente.

A simulação hidráulica da rede por modelagem computacional pode se agregar a esta metodologia na fase de pré-localização da fuga, ou mesmo na fase seguinte de localização da fuga, necessitando para tanto apenas do aperfeiçoamento dos modelos existentes.

## MODELOS COMPUTACIONAIS DE SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO

Os modelos computacionais de simulação hidráulica de sistemas de abastecimento são ferramentas cujo objetivo é reproduzir, através de um equacionamento matemático, com maior exatidão possível, o comportamento real do sistema físico que representa. A este equacionamento matemático

é associado um método numérico de solução e então transformados em uma seqüência ordenada de comandos. Não é necessário que o modelo reproduza todos os componentes físicos do sistema, mas talvez somente aqueles significativos, dependendo da confiabilidade exigida e do uso a que se destina o modelo. Na prática, a modelação de uma rede se reduz ao estudo de um esquema simplificado da mesma, a cujas tubulações se associam os parâmetros adequados para reproduzir, o mais fielmente possível, seu comportamento efetivo.

O modelo computacional, proposto no presente trabalho para detecção de fugas foi desenvolvido por Luvizotto Jr. (1998) com simulação hidráulica baseada na análise do regime permanente pelo método elástico (*Time Marching Approach – TMA*), e localização de fugas através da minimização de erros entre cargas monitoradas em campo e as obtidas nas simulações pelo processo de busca do ótimo da função dos quadrados das diferenças (a ser minimizada) pelo método de *Nelder-Mead*. O modelo adota a hipótese do método elástico propondo a análise das variáveis de estado “carga” e “vazão” no espaço e no tempo, permitindo assim descrever as condições estáticas (regime permanente). Embora não utilizadas no presente trabalho, o modelo permite ainda determinar as condições dinâmicas (transitórios) dos escoamentos. O modelo de simulação hidráulica é denominado *SPERTS* e a ferramenta de localização de fugas *MUFFLED DETECTION*.

O acoplamento do método elástico com o método de *Nelder-Mead* é feito de maneira natural, uma vez que este otimizador se baseia em avaliações da função objetivo, para um conjunto de pontos, que irão convergir para a solução ótima com a aplicação do método. A aplicação deste modelo possibilita a análise de sistemas complexos de forma não-matricial, permitindo uma melhor estabilização dos sistemas e soluções mais rápidas. A proposição de modelos para localização de fugas com base em valores monitorados emprega os mesmos princípios adotados para calibração: Minimização dos erros entre as cargas ou vazões monitoradas  $H^*$  e as cargas ou vazões obtidas durante os cálculos  $H$ , minimizando a função objetivo  $x^2$ , conforme descrito na Equação (1).

$$\min x^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(H_i^* - H_i)^2}{\sigma^2} \quad (1)$$

na qual  $H^*$  é a carga ou vazão monitorada no nó;  $H$  é a carga ou vazão obtida durante os cálculos;  $N$  é o número de pontos monitorados e  $\sigma^2$  o desvio padrão.

O método de busca do mínimo da função objetivo (1) é o procedimento de *Nelder-Mead*, escolhido por ser um método que não utiliza derivadas no processo de busca da solução, uma vez que a avaliação destas derivadas é de difícil implementação. Uma técnica alternativa e muito utilizada na atualidade são os algoritmos genéticos, entretanto a técnica de busca baseada no procedimento de *Nelder-Mead* se mostra mais rápida e “robusta” para solução do problema conforme apresentado em Luvizotto Jr. et al, (2000) e Luvizotto Jr. e Ocampos (2002). O acoplamento dos dois módulos de simulação e otimização é feito de forma direta sem maiores interferências nos códigos padrão individuais de cada modelo, conforme mostrado na Figura 1. No modelo são acrescentadas rotinas para leitura de dados de monitoramento e de fugas a serem avaliadas, rotina com a função objetivo e rotina de interface que faz a chamada do simulador para cada opção de vetor de valores de fugas nodais.

O conceito do modelo proposto é manter os princípios da função objetivo descrita na Equação (1) considerando a evolução da carga  $H_i$  como uma dependência direta da vazão de fuga nos nós considerados suspeitos  $H_i = f(q_j)$ . O procedimento de solução integrado consiste em eleger os  $N$  nós com suspeita de fuga e adotar  $N+1$  combinações de fugas  $q_f^1, \dots, q_f^{n+1}$  onde o vetor  $q_f^i$  representa o vetor  $i$  de valores de fuga para  $N$  possíveis nós ( $q_{f_1}^i, \dots, q_{f_n}^i$ ). Para todas estas situações é avaliada a função objetivo em relação aos  $N$  nós monitorados.

Com base em vazões iniciais aleatórias (sementes), introduzidas no modelo são gerados, pelo procedimento de *Nelder-Mead*, valores correspondentes ao valor da fuga atribuído a cada nó suspeito. Cabe lembrar que estes vetores são modificados ao longo do procedimento de busca resultando ao final em vetores iguais, com a suposta solução do problema. Uma vez gerados os vetores iniciais, passa-se ao procedimento de ajuste destes vetores onde o simulador é acionado para resolução do problema

hidráulico da rede utilizando os valores de cada vetor com um caso possível da solução. Após o processamento o simulador retorna as cargas calculadas para os nós que estão sendo monitorados. Estas cargas nodais obtidas permitem a avaliação da função objetivo, descrita em termos da somatória das diferenças quadráticas entre cargas monitoradas e calculadas, cujo mínimo é almejado.

As funções objetivo, calculadas para cada vetor, resulta um conjunto de valores que são hierarquizadas da melhor para a pior solução. O vetor de coeficientes que levou a pior solução (maior valor da função objetivo) é substituído pelo procedimento de busca, como descrito anteriormente e reavaliado em conjunto com outros vetores, sendo assim sucessivamente melhorados os piores vetores até que se atinja uma detecção dentro do padrão de erro desejado.

## ESTUDO DE CASO

A análise do modelo computacional de localização de fugas foi realizada no município de Jundiá-SP. O Município possui uma população de aproximadamente 330 mil habitantes urbanos com 95,41% de sua população atendida com rede de água e 91,31% com coleta de esgoto. Existem 84.552 ligações de água e o índice geral de perdas é da ordem de 35%. O setor de abastecimento Vila Liberdade foi escolhido por ter seus limites bem definidos e, principalmente, possuir uma rede nova, recentemente substituída, com cadastro digitalizado e com informações confiáveis e também apresentar um índice de perdas baixo, com média de 7,56% ou 75 L/dia.ligação no ano de 2003 e média de 5,29% ou 40 L/dia.ligação nos cinco primeiros meses de 2004. Valores muito baixos se comparados aos índices de perdas gerais do município, ou mesmo aos indicadores nacionais e internacionais. Estes baixos índices de perda do setor são fruto da recente troca de suas tubulações, reduzindo portanto a quase nulas as ocorrências de vazamentos na rede. Desta forma não houve necessidade de realização de uma campanha de pesquisa, detecção e reparo de vazamentos antes da construção do modelo, tornando sua aplicação mais rápida e precisa.

Mesmo o setor apresentando condições favoráveis para a realização do estudo em campo, como redes novas com

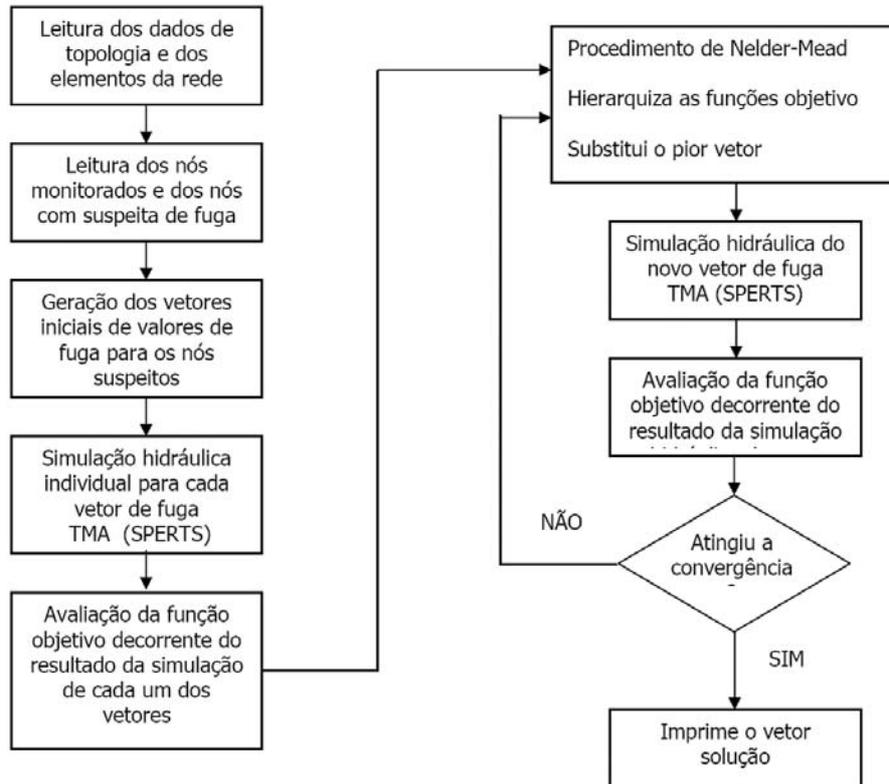


Figura 1 - Acoplamento do TMA com Nelder-Mead para detecção de fugas

rugosidades conhecidas e uma boa base cadastral, a companhia possuir informações atualizadas e um elevado grau de organização, a pesquisa esbarrou em alguns limites, dificultando uma análise mais detalhada do modelo proposto. A principal dificuldade encontrada foi em relação ao pequeno número de aparelhos de coleta e armazenamento de dados disponíveis, impossibilitando a instalação de um maior número de estações de monitoramento, realidade comum à maioria das companhias de saneamento.

Para a configuração do modelo foram desenvolvidas diversas etapas, de modo a se obter ao final a representação mais adequada possível da rede de água existente no local e suas várias características físicas e de escoamento.

### Topologia da rede

A rede de distribuição foi desenhada inicialmente no software *EPANET* sobre a planta digitalizada do setor, incluindo os trechos de rede e nós e criando um reservatório de nível variável junto do ponto de monitoramento da entrada do setor. Como nível deste reservatório, foi atribuída a pressão medida no local. O *EPANET* atribui

automaticamente a numeração dos trechos e nós e considera para o coeficiente de rugosidade, extensão e diâmetro do trecho como os padrões de entrada pré-estabelecidos (*default*), que devem ser alterados depois. As demandas nodais e as cotas topográficas são atribuídas a cada nó. A topologia resultante deste tratamento, e empregada na modelagem está apresentada na Figura 2.

### Levantamento de dados em campo

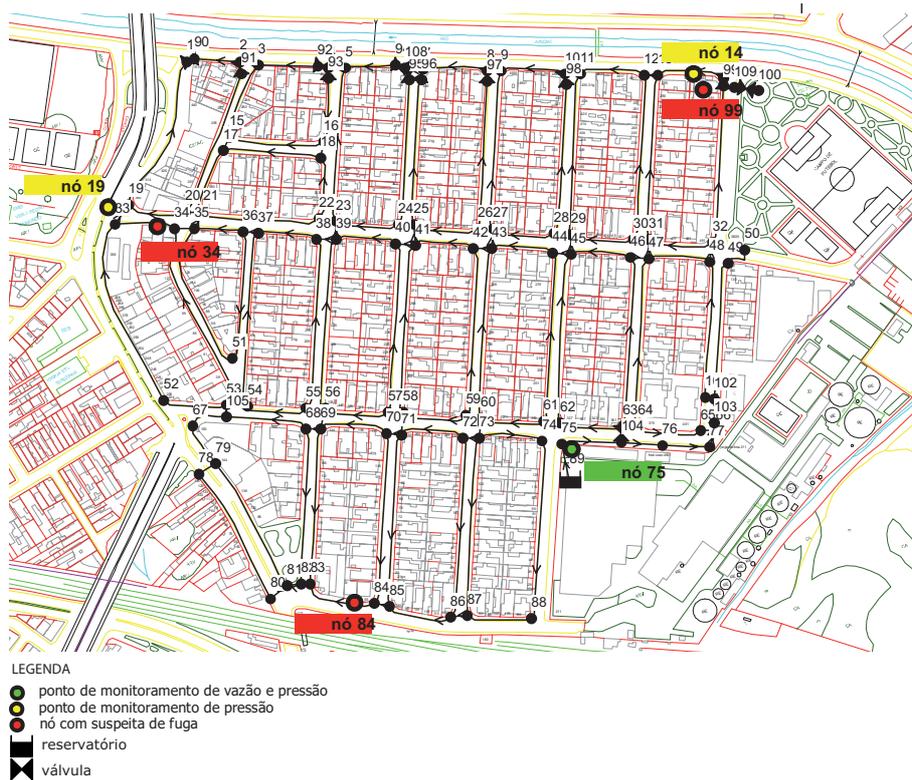
O levantamento de dados de campo coletou, as medidas de vazão e pressão no nó 75 e as medidas de pressão nos nós 14 e 19, durante um período de sete dias, em um intervalo de tempo de 15 minutos, entre os dias 21/08/2004 e 27/08/2004. Os valores de vazão e pressão utilizados nas operações de calibração da rede e localização das fugas estão apresentadas na Tabela 2.

A coleta de vazão e pressão foi realizada na entrada do setor (nó 76) pois neste local está instalado o macromedidor do setor, sendo acoplado apenas um armazenador de dados. Esta medição gerou uma curva de modulação da demanda geral do setor, utilizada posteriormente para definir as

demandas atribuídas aos nós ao longo do dia e principalmente no horário de simulação da fuga (3h). A coleta dos dados de pressão na rede foi realizada nos cavaletes residenciais (nó 14 e nó 19). No nó 75 (entrada do setor) a medida de pressão foi tomada na própria rede. A diferença topográfica existente entre o terreno e o cavalete foi considerada na simulação hidráulica.

### Consumos nodais

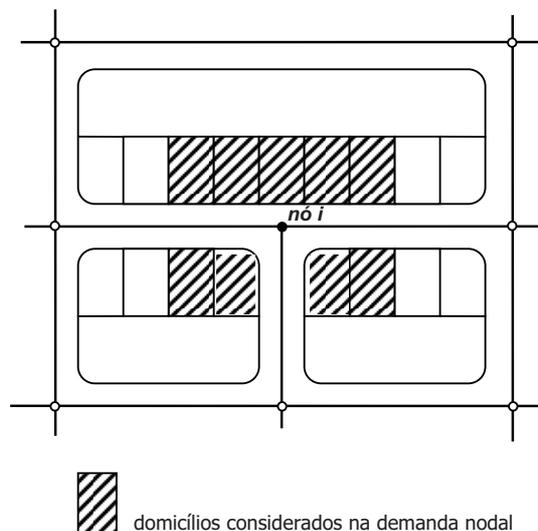
As demandas de consumo dos nós foram determinadas a partir de levantamento mensal dos consumos em cada economia do setor, através das leituras dos micromedidores (hidrômetros), fornecidos pelo setor comercial da companhia de água. As demandas do setor são eminentemente residenciais, sendo distribuídas conforme critério de distribuição apresentado no método. A cada nó da rede foram atribuídos os consumos das ligações existentes na área de influência. A área de influência é a metade da extensão do trecho ligado ao nó, como mostrado na Figura 3. O consumo relativo é o consumo do nó no instante requerido, obtido a partir dos valores médios levantados, conforme Equação 2.



**Figura 2 - Rede de distribuição de água do setor Vila Liberdade, com pontos de monitoramento e nós com suspeita de fuga**

Tabela 2 - Principais medidas de campo obtidas nos pontos de monitoramento

Nó	Vazão 21/08/03 – 3h (L/s)	Pressão	
		Medição SEM a vazão da fuga criada 21/08/04 – 3h (m.c.a.)	Medição COM vazão da fuga criada 24/08/04 – 3h (m.c.a.)
75	1,33	33.70	30.20
14	-	37.25	33.20
19	-	31.78	27.60



**Figura 3 - Consumos domiciliares considerados na demanda do nó i**

$$\text{Consumo Relativo}_{(i)} = \frac{\text{Consumo mensal do Nó}_i}{\text{n}^{\circ} \text{ de segundos do mês}} \times \frac{Q_i}{Q_m} \quad (2)$$

na qual o Consumo Relativo no instante  $i$  é dado em L/s, o Consumo Mensal do nó em litros,  $Q_i$  é a vazão obtida no instante  $i$  e  $Q_m$  é a vazão média diária, ambas obtidas na curva de demanda da macro-medição.

## Calibração da rede

Uma primeira verificação dos parâmetros estabelecidos para a simulação da rede foi realizada no *EPANET* onde, logo em princípio, observaram-se alguns valores de entrada incorretos. Esse primeiro ajuste permitiu o processamento da rede, sendo os erros mais grosseiros corrigidos. Os valores de carga obtidos nos pontos monitorados quando comparados com os obtidos a partir da simulação hidráulica não apresentassem grandes diferenças, quando comparados com o critério estabelecido por Walski (1986) e Bhave (1988) *apud* Pizzo (2004).

Embora os valores simulados e os monitorados não apresentassem grandes divergências, foram realizadas tentativas de melhorar o modelo, com o intuito de reduzir ao máximo a possibilidade de influência na localização correta das fugas. Para tanto, foi utilizado o modelo de calibração apresentado em Pizzo (2004), construído a partir dos mesmos princípios do modelo de detecção e denominado CALIBRADOR.

## Simulação de uma fuga e estimativa de sua vazão

A simulação de uma fuga em campo foi realizada a partir da abertura de uma válvula de descarga existente na rede e localizada junto ao nó 100. A operação de abertura da válvula foi realizada durante a madrugada (3h), para que o vazamento criado não fosse mascarado pelo consumo.

Por falta de medidores disponíveis no Departamento de Água e Esgoto de Jundiá, não foi possível realizar a medição destas vazões, o que, de modo geral, não interfere no processo, tendo em vista que nas fugas realmente existentes não se conhece sua magnitude (vazão). Entretanto, seria interessante saber, pelo menos de maneira estimada, seu valor, o que se mostrou fundamental no

Tabela 3 - Cargas nos nós 14 e 19

Nós	Carga monitorada (23/8 - 3h) H*	Carga calculada H	Diferença	Erro admissível <sup>(1)</sup>
Nó 14	737,76	738,99	-0,17%	
Nó 19	739,00	738,99	0%	± 3%

<sup>(1)</sup> segundo Walski (1986) e Bhave (1988)

desenvolvimento posterior do trabalho, como será relatado. Para realização desta estimativa foi empregado o software *EPANET*, simulando o comportamento da rede para uma demanda temporal no nó 100 (válvula de descarga) variando de 0 a 10 L/s e posteriormente de 0 a 5 L/s. A Figura 4 mostra o gráfico obtido do intervalo de variação e a vazão de descarga obtida. O valor estimado da vazão da fuga simulada foi de aproximadamente 3,5 L/s.

## Localização da fuga

A localização da fuga é realizada com o modelo *MUFFLED DETECTION*, cuja tela de entrada de dados é mostrada na Figura 5. Após criar a topologia da rede, ou simplesmente importá-la do *EPANET* é possível realizar a simulação da rede em regime permanente obtendo, como resultado, as cargas nos nós e vazões nos trechos de rede. Na tela são introduzidos os dados dos nós e suas respectivas cargas monitoradas. Em seguida, são inseridos os nós com suspeitas de fuga e atribuída uma respectiva vazão inicial aleatória (semente). O processamento destas informações produz como resposta a localização da região com maior probabilidade de localização de fuga(s).

Para avaliar os erros nas medições, será admitida uma variação de ± 0,50 m (cinquenta centímetros) em relação à carga obtida a partir dos valores medidos em campo, criando uma faixa de análise de desempenho do modelo. Desta forma o modelo é avaliado dentro da faixa de tolerância citada em 4.4.

A varredura da faixa de análise é feita fixando a leitura medida de um dos nós monitorados para, em seguida, variar a medida do(s) outro(s) nó(s) em escalas de 0,10 m, percorrendo toda a faixa de ± 0,50 m. Desta forma, cria-se um conjunto de pontos que serão adotados como parâmetro de entrada no modelo.

## Testes realizados

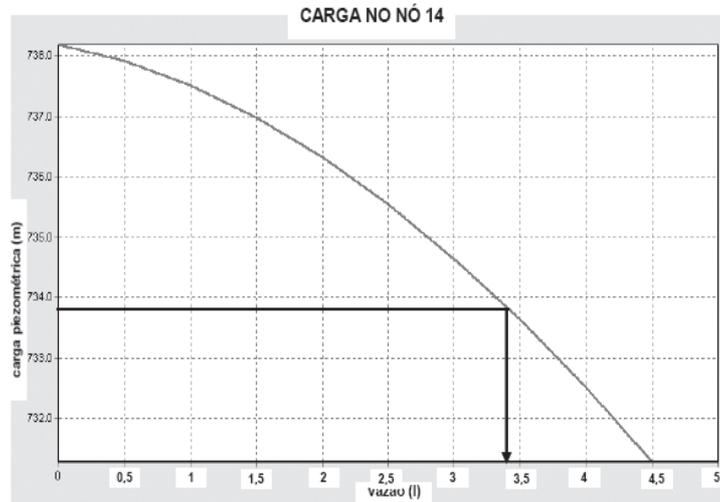
Para avaliação do desempenho do modelo de simulação-deteção foram realizados três testes de com diferentes cargas monitoradas. No TESTE 1 o modelo foi processado com as pressões obtidas nas estações de monitoramento nos instantes em que a descarga da rede estava fechada, ou seja, sem a presença da fuga simulada na rede. O objetivo do TESTE 2 foi localizar o(s) ponto(s) suspeito(s) de fuga a partir da atribuição de vazões fictícias em pontos aleatórios da rede. Neste teste foram atribuídas vazões de fuga iniciais fictícias (sementes) de 10 L/s no nó 84, 30 L/s no nó 99 e 20 L/s no nó 34. A carga piezométrica adotada para os nós monitorados 14 e 19 foi de 733,90 m.c.a. e 734,39 m.c.a., respectivamente. Estas cargas foram obtidas nas estações de monitoramento durante o período em que a descarga da rede permaneceu aberta, simulando uma vazão de fuga. O TESTE 3 propõe uma nova série de simulações onde o valor utilizado como carga monitorada no nó 19 será a carga obtida na simulação hidráulica do regime permanente e a carga monitorada do nó 14 será o resultado obtido na estação de monitoramento.

Os nós adotados aleatoriamente como suspeitos de fuga (nós 34, 84, 99), bem como os valores iniciais de vazão adotados (sementes), permaneceram inalterados nos três testes realizados.

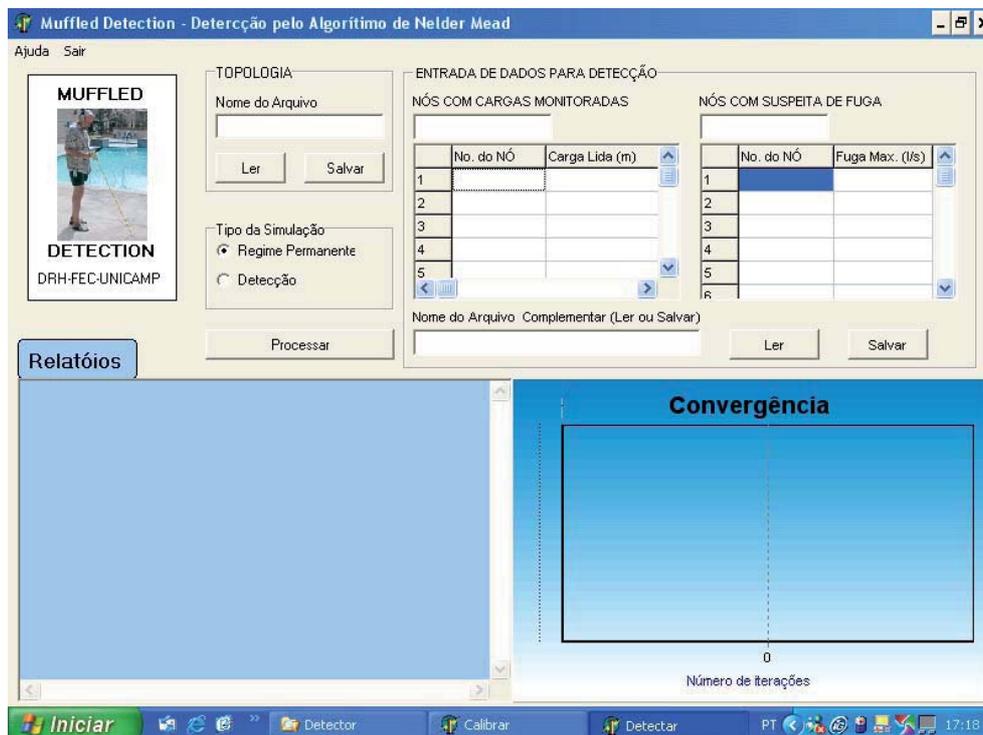
## Resultados obtidos

### a) TESTE 1: Verificação da rede sem a fuga criada em campo

A partir das cargas piezométricas verificadas nos nós 14 e 19 de 737,95 m.c.a. e 738,48 m.c.a., respectivamente, foi realizada a verificação dos resultados produzidos pelo modelo proposto variando as cargas no intervalo de análise de ± 0,50 m em escala de 0,10 m. Os resultados obtidos no modelo são apresentados na Tabela 4.



**Figura 4 - Variação da carga no nó 14 e vazão de fuga simulada para intervalo entre 0 e 5 L/s**



**Figura 5 - Tela de entrada do modelo de detecção MUFFLED DETECTION**

Tabela 4 - Valores obtidos no TESTE 1 para localização de fuga

Nós monitorados		Nós com suspeita de fuga			ε Resíduo
Nó 14 H (m)	Nó 19 H (m)	Nó 84 (10 L/s)	Nó 99 (30 L/s)	Nó 34 (20 L/s)	
737.95	737.98	2	1	1	0
737.95	738.08	1	1	1	0
737.95	738.18	0	1	0	0
737.95	738.28	0	1	0	0.0013
737.95	738.38	0	1	0	0.5390
737.95	738.48	0	1	0	0
737.95	738.58	0	1	0	0
737.95	738.68	0	1	0	0
737.95	738.78	0	1	0	0.2860
737.95	738.88	0	1	0	0.4026
737.95	738.98	0	1	0	0.5390
737.45	738.48	0	2	0	0.0723
737.55	738.48	0	1	0	0.0691
737.65	738.48	0	1	0	0.0658
737.75	738.48	0	1	0	0.0625
737.85	738.48	0	1	0	0.0591
738.05	738.48	0	1	0	0.0518
738.15	738.48	0	1	0	0.0474
738.25	738.48	0	0	0	0.0409
738.35	738.48	0	0	0	0.0432
738.45	738.48	0	0	0	0,0655

A análise dos resultados leva à avaliação de uma provável fuga de 1 L/s no nó 99. Entretanto o valor de 1 L/s pode ainda ser interpretado apenas como um erro admissível. Este primeiro teste demonstra que os parâmetros sugeridos para o modelo representam as condições da rede, proporcionando uma primeira análise de consistência do modelo proposto.

#### b) TESTE 2: Localização de fugas com cargas monitoradas nos nós 14 e 19 (com erro de medição)

O processo de verificação dos resultados, como no TESTE 1, também analisou uma faixa de carga de  $\pm 0,5$  m em intervalos de 0,10 m. Os resultados obtidos apresentaram valores de fuga acima do esperado, conforme demonstrado na Tabela 5. Os resultados mostraram vazões de fuga em todos os nós lançados como suspeitos e em todas as combinações de carga verifica-

das. Embora os resultados indicassem desvios nos resultados, quando comparados com a vazão esperada de aproximadamente 3,5 L/s (anteriormente estimada), a somatória das vazões, em todas as combinações de nós e cargas, totalizavam 12 L/s aproximadamente. As análises dos valores de vazão obtidas neste teste indicam que possivelmente os aparelhos registraram um pulso transitório ocorrido, causando inconsistência no registro das cargas nas estações de monitoramento, principalmente em relação à estação instalada no nó 19. Este pulso pode ter gerado incoerência no valor de carga registrada neste nó.

A instalação de um maior número de pontos de monitoramento contribui para análise de consistência dos dados utilizados para detecção, além de melhorar o desempenho do modelo, permitindo que resultados mais exatos sejam gerados. Um artifício para incrementar o número de pontos monitorados é assumir como monitoradas as

cargas obtidas na simulação do regime permanente, porém, serão imprecisões que estarão associadas aos valores resultantes. Desta forma, um novo teste foi proposto com o emprego da carga do nó 19 obtida na simulação hidráulica do regime permanente.

#### c) TESTE 3: Localização de fugas com carga monitorada no nó 14 e carga simulada no nó 19

A carga obtida para o nó 19 na simulação hidráulica do regime permanente e utilizada na detecção de fugas é de 738,07 m.c.a. Os demais parâmetros empregados no modelo são aqueles praticados no TESTE 2, ou seja: fugas iniciais fictícias (sementes) de 10 L/s no nó 84, 30 L/s no nó 99 e 20 L/s no nó 34 e carga do nó monitorado 14 de 733,90 m.c.a.

O processo de verificação dos resultados, como nos testes anteriores, analisou uma faixa de carga de  $\pm 0,5$  m

Tabela 5 - Valores obtidos no TESTE 2 para localização de fuga

Nós monitorados		Nós com suspeita de fuga			$\epsilon$
Nó 14	Nó 19	Nó 84	Nó 99	Nó 34	Resíduo
H (m)	H (m)	(10 L/s)	(30 L/s)	(20 L/s)	
733.90	733.89	6	3	4	0
733.90	733.99	6	3	4	0
733.90	734.09	6	3	4	0
733.90	734.19	6	3	4	0
733.90	734.29	5	3	4	0
733.90	734.39	6	3	4	0
733.90	734.49	5	3	4	0
733.90	734.59	5	3	4	0
733.90	734.69	5	3	4	0.2860
733.90	734.79	6	3	3	0.4026
733.90	734.89	6	3	3	0.5390
733.40	734.39	5	3	4	0.0723
733.50	734.39	5	3	4	0.0691
733.60	734.39	5	3	4	0.0658
733.70	734.39	5	3	4	0.0625
733.80	734.39	5	3	4	0.0591
734.00	734.39	7	2	3	0.0518
734.10	734.39	6	3	4	0.0474
734.20	734.39	7	3	3	0.0409
734.30	734.39	5	3	4	0.0432
734.40	734.39	6	3	4	0,0655

em intervalos de 0,10 m. Os resultados obtidos neste teste apontaram, para todas as combinações de carga, sem exceção, uma vazão de 4 L/s no nó 99. Este nó está situado nas imediações do local onde foi criada a fuga em campo, demonstrando que o modelo corresponde às expectativas de localização de regiões com suspeita de fuga. A vazão de fuga de 4 L/s apontada no nó 99 também é bem próxima do valor de 3,5 l/s, estimado inicialmente através da simulação do regime permanente realizada no software *EPANET* a partir de uma curva de modulação de vazões.

O emprego de diferentes combinações de cargas, dentro de uma faixa considerada como erro aceitável, possibilitou uma análise mais detalhada do desempenho do modelo e de seu comportamento, permitindo verificar como eventuais divergências na calibração podem afetar a localização das fugas. Neste teste pode-se observar

que, no limite mínimo de variação de carga do nó 19 (-1,5m) em relação à carga monitorada do nó 14, o nó 34 apresentou uma vazão de fuga de 2 L/s. Esta fuga é irreal, já que a descarga da rede foi aberta próximo ao nó 99. Este resultado reflete como os erros de calibração podem interferir na exatidão dos resultados gerados pelo modelo de detecção.

### CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Os principais parâmetros adotados no modelo – topologia, rugosidade da tubulação e consumos nodais – mostraram-se apropriados, conduzindo aos resultados esperados na detecção da fuga simulada. Embora a adoção dos parâmetros do modelo tenha sido facilitada pelo bom nível de cadastro da rede existente, nem sempre esta é

a realidade verificada nas companhias de água, portanto é fundamental que o modelo seja devidamente calibrado antes que se inicie a simulação para a localização de fugas.

O desenvolvimento de novos métodos, técnicas e ferramentas de localização de fugas é fundamental para a racionalização dos trabalhos, redução de custos e a otimização dos programas de controle de perda, devendo ser amplamente investigados. Neste contexto, os modelos matemáticos de simulação-otimização para localização de fugas se inserem como uma poderosa ferramenta, principalmente no direcionamento das campanhas de investigação de fugas em campo, reduzindo, substancialmente, a área a ser pesquisada com os aparelhos acústicos de detecção (pinpoint).

No estudo de campo realizado, a despeito do pequeno número de estações de monitoramento da rede o modelo utilizado foi capaz de localizar as

Tabela 6 - Valores obtidos no TESTE 3 para localização de fuga

Nós monitorados		Nós com suspeita de fuga			$\epsilon$ Resíduo
Nó 14 H (m)	Nó 19 H (m)	Nó 84 (10 L/s)	Nó 99 (30 L/s)	Nó 34 (20 L/s)	
733.90	737.57	0	4	2	0
733.90	737.67	1	4	1	0
733.90	737.77	0	4	0	0
733.90	737.87	1	4	0	0
733.90	737.97	0	4	0	0
733.90	738.07	0	4	0	0.0013
733.90	738.17	0	4	0	0.0186
733.90	738.27	0	4	0	0.0557
733.90	738.37	0	4	0	0.1130
733.90	738.47	0	4	0	0.1900
733.90	738.57	0	4	0	0.2872
733.40	738.07	0	4	0	0.0035
733.50	738.07	0	4	0	0.0030
733.60	738.07	0	4	0	0.0005
733.70	738.07	0	4	0	0.0021
733.80	738.07	0	4	0	0.0017
734.00	738.07	0	4	0	0.0010
734.10	738.07	0	4	0	0.0007
734.20	738.07	0	4	0	0.0005
734.30	738.07	0	4	0	0.0003
734.40	738.07	0	4	0	0.0002

fugas criadas na rede. Entretanto ficou claro que, para suprir as deficiências de monitoramento, as estações de monitoramento devem ser corretamente localizadas e o modelo matemático utilizado deve permitir uma análise do regime de escoamento e consequentemente das cargas ao longo do tempo. Desta forma, as alterações nas variáveis do modelo (carga e vazão), ocorridas devido às oscilações no regime de escoamento provocadas pelo surgimento de fugas podem ser prontamente identificadas.

Como o modelo proposto permite a simulação hidráulica no regime transitório, recomenda-se a análise do modelo sob tais condições, além da investigação da quantidade e localização adequada das estações de monitoramento, atribuindo diferentes “pesos” a cada ponto em função da sua capacidade de sensibilização do todo, muito embora, na prática, esta quantidade de pontos esteja limitada aos recursos disponíveis nas companhias de saneamento.

## REFERÊNCIAS

- HERPETZ, P. *Basics of Maintenance*. Encontro Técnico SABESP, São Paulo, 2003.
- LUVIZOTTO JR, E. *Relatório final de programa de pós-doutoramento na Universidade Politécnica de Valência – Espanha*, 1998.
- LUVIZOTTO JR, E.; OCAMPOS, A. *Comparando os métodos Levenberg-Marquardt e Nelder-Mead em modelos de detecção de fugas*. In: SEMINÁRIO HISPANO-BRASILEIRO SOBRE PLANIFICAÇÃO, PROJETO E OPERAÇÃO DE REDES DE ABASTECIMENTO, 2, Valência. Anais... ,2002.
- LUVIZOTTO Jr. E. et al. *Análise de técnica de busca para um modelo de detecção de fugas*. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 19., Córdoba. Anais... p.309-318. 2000.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). *Banco Mundial*. Water Resources Management Policy Paper, 101p. 1993.
- PROGRAMA NACIONAL DE COMBATE AO DESPERDÍCIO DE ÁGUA (PNCDA). Ministério Do Planejamento e Orçamento – Secretaria De Política Urbana. Documentos Técnicos de Apoio. Brasília, 1998.

PIZZO, H. S. *Calibração de modelos de distribuição de água através do acoplamento do TMA com o otimizador de Nelder-Mead*. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos). Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 137 páginas. 2004.

SNIS – SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. Ministério das Cidades. Relatório de Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2002. Brasília, 2004.

### Endereço para correspondência:

**Carlos César Gumier**  
**Universidade Estadual de**  
**Campinas**  
**Departamento de Recursos**  
**Hídricos**  
**Cidade Universitária Zeferino Vaz**  
**Faculdade de Engenharia Civil,**  
**Arquitetura e Urbanismo**  
**Caixa Postal 602 I**  
**13083-852 Campinas – SP - Brasil**  
**Tel: (19) 3521-2354**  
**E-mail: cgumier@yahoo.com.br**  
**edevar@fec.unicamp.br**