

APLICAÇÃO DE UM MODELO PARA DETECÇÃO DE FUGAS ESTUDO DE CASO

Carlos César Gumier¹ Prof. Dr. Edevar Luvizotto Junior¹

Resumen – Este trabalho apresenta, sob diversos aspectos, as perdas de água que ocorrem nas redes de distribuição dos sistemas de abastecimento e os mecanismos de controle disponíveis. Dentre os objetivos se destaca a proposição do modelo matemático-computacional como uma nova ferramenta de localização de fugas. O modelo proposto foi desenvolvido através do acoplamento de um simulador hidráulico baseado no *time marching approach* – TMA com o algoritmo otimizador de Nelder-Mead. O trabalho visa ampliar os resultados obtidos nas investigações desenvolvidas em LUVIZOTTO (1998) e OCAMPOS (2003) aplicando o modelo na pré-localização de fuga em uma rede de distribuição de água da cidade de Jundiaí-SP, utilizando os recursos disponibilizados pela companhia de água, propondo uma metodologia de aplicação do modelo para tais condições.

Abstract – This work presents, under diverse aspects, the water losses that occur in the distribution networks of the water supply systems and the available mechanisms of control. Amongst the objectives, it detaches the proposal of 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 work aims to extend the results obtained by LUVIZOTTO (1998) and OCAMPOS (2003), by applying the model to a real water distribution network, using the data provided by the water company and suggesting a methodology for application of the model for such conditions. The model was applied to a real water distribution network, in the city of Jundiaí, Brazil.

Palabras Clave: perda de água, detecção de fuga, modelo matemático de simulação-otimização, Nelder-Mead.

Keywords: water loss, leak detection, computational model, Nelder-Mead

¹ Universidade Estadual de Campinas – Departamento de Recursos Hídricos – Caixa Postal 6021 – CEP 13.083-852 – Campinas/SP (Brasil) - Tel. 19 3788 2354 e-mail: edevar@fec.unicamp.br ; cgumier@yahoo.com.br

1. 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. Dentre as propostas apresentadas no relatório *Water Resources Management Policy Paper* (ONU, 1993), elaborado pelo Banco Mundial, está 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.

No Brasil os índices de perdas de água em sistemas de abastecimento urbanos variam bastante entre as companhias de saneamento, entretanto todos eles apontam para a necessidade de redução de valores, alguns significativamente altos, conforme mostrado na Tabela 1.

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

Região	Índice de Perda Geral
	%
Norte	57,6
Nordeste	45,5
Sudeste	38,8
Sul	37,3
Centro-Oeste	34,0
BRASIL	40,5

Fonte: SNIS (2002)

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 significa 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 observado com certo critério. Este indicador retrata as perdas do ponto de vista financeiro e comercial, sendo fortemente influenciado pelo consumo 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 água.

2. PROGRAMAS DE REDUÇÃO DE PERDA DE ÁGUA

O combate à perda de água nos sistemas de abastecimento é bastante complexo, 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, via de regra, 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, novas ferramentas que auxiliem os gestores dos programas de redução de perdas e agilizem suas tomadas de decisão são fundamentais. 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.

O controle ativo dos vazamentos está associado à realização periódica de campanhas de inspeção das redes, chamadas de “varredura” por literalmente varrer toda a extensão de tubulações e conexões das redes existentes com equipamentos de detecção acústica. Mesmo com a evolução dos aparelhos de detecção e o surgimento de novos equipamentos, as campanhas de pesquisa são planejadas e executadas praticamente da mesma forma como foi introduzida no Brasil, na década de 1970.

Hoje, 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 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 e detecção da fuga. (HEPERTZ, 2003)

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 de levantamento das regiões suspeitas de conter fugas. A busca destas regiões pode ser realizada de duas diferentes maneiras: com equipamentos acústicos 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 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 levantamento da área para busca de trechos suspeitos, ou mesmo nas

fases seguintes de localização das fugas, necessitando para tanto apenas do aperfeiçoamento dos modelos existentes.

3. 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 sequência 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 (LUVIZOTTO, 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 seguem a mesma essência: Minimização dos erros entre as cargas (e/ou vazões) monitoradas H^* e as cargas (e/ou vazões) obtidas durante os cálculos H , minimizando a função objetivo x^2 , conforme a equação:

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

onde N é o número de pontos monitorados e σ 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 bastante em moda na atualidade são os algoritmos genéticos, entretanto a técnica de busca baseada no procedimento de Nelder-Mead se mostra mais rápida e bastante “robusta” para solução do problema conforme apresentado em (LUVIZOTTO *et al*, 2000) e (LUVIZOTTO e OCAMPOS, 2002).

O acoplamento dos dois módulos – simulação e otimização – é feito de forma direta sem maiores interferências nos códigos padrão individuais de cada modelo, conforme mostrado na Figura 1. São acrescentadas apenas uma rotina de leitura de dados de monitoramento e de fugas a serem avaliadas, uma rotina com a função objetivo e uma rotina de interface que faz a chamada do simulador para cada opção de vetor de valores de fugas nodais.

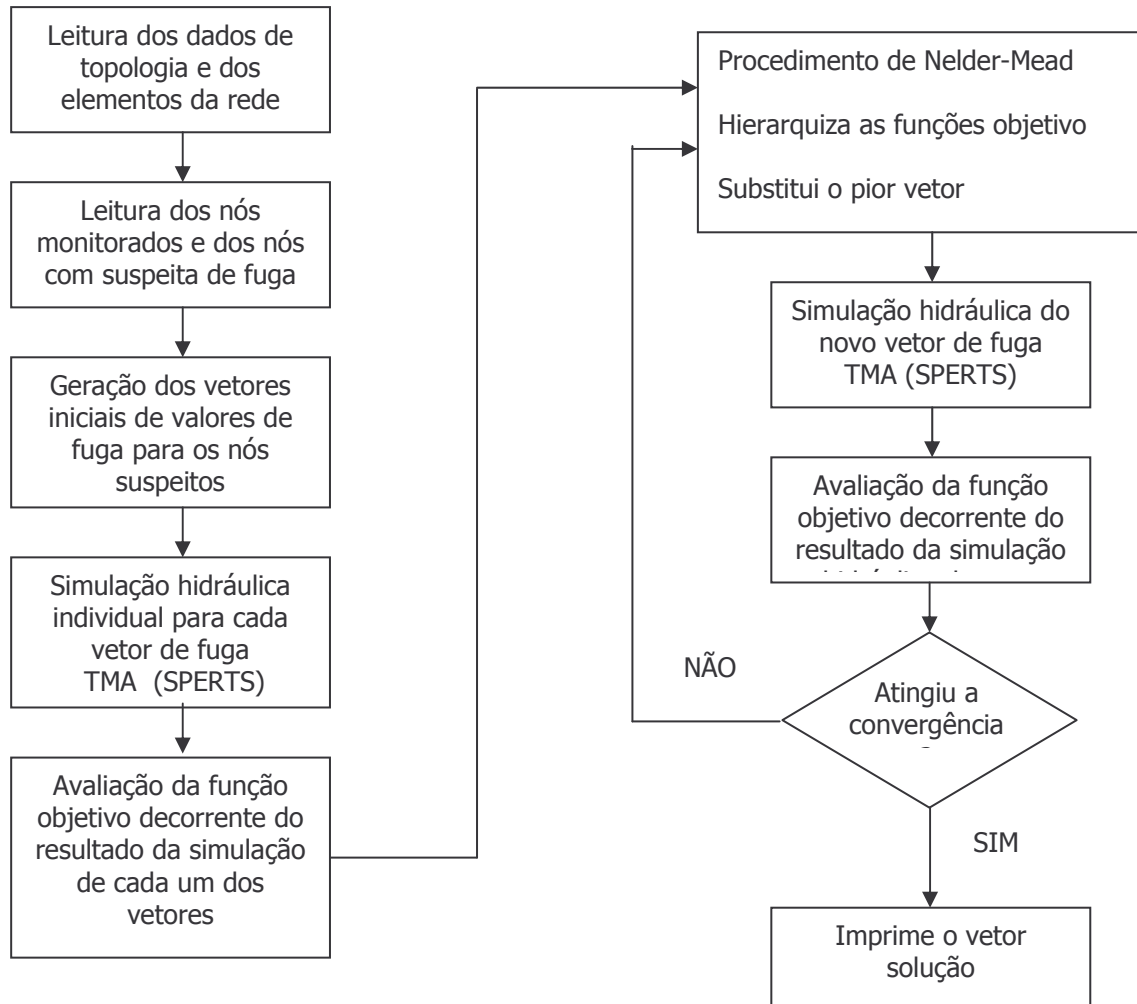


Figura 1: Acoplamento do TMA com Nelder-Mead para detecção de fugas

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 $H_i = f(q_f)$.

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 $(q_{f1}^i, \dots, q_{fn}^i)$. Para todas estas situações é avaliada a função objetivo em relação aos N nós monitorados.

Com base nestas “sementes” 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 gerado 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 um dos vetores, 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.

4. CALIBRAÇÃO DO MODELO

(LUVIZOTTO, 1998) relata que, sob o ponto de vista da aplicação em sistemas de abastecimento de água, os métodos inversos para detecção de fugas tem a mesma proposição dos métodos de calibração de rede, pois em princípio a idéia é a mesma e se aplica tanto ao ajuste da rugosidade de uma determinada tubulação quanto à determinação da posição e valor de uma fuga.

O modelo de calibração utilizado segue o mesmo princípio do modelo de detecção de fugas proposto, ou seja, acopla o modelo elástico com o otimizador de Nelder-Mead, resultando em um método de busca direto que não utiliza derivadas em sua busca de otimização da função objetivo. (PIZZO, 2004).

Na maioria dos modelos o grau de incerteza está associado, mais notadamente, aos coeficientes de rugosidade e as demandas a serem atribuídas a cada nó, por isso são geralmente as variáveis de ajuste durante o processo de calibração do modelo da rede. Desta forma, para a adequada calibração de um modelo, é fundamental que as fugas existentes no setor investigado sejam reduzidas ao mínimo possível, de maneira a não interferir no processo de ajuste das demais variáveis (rugosidade e demandas nodais). Para tanto, antes da realização dos levantamentos em campo dos dados de vazão e pressão, uma campanha de pesquisa acústica para detecção de fugas, bem como o reparo das mesmas, deve ser empreendida.

(PIZZO, 2004) apresenta um método de construção da matriz de sensibilidade para escolha dos pontos de monitoramento das cargas de maneira a gerar uma matriz de sensibilidade que relaciona o valor da carga ao da rugosidade, permitindo o cálculo analítico das derivadas. Arbitrando a variação unitária C como sendo um incremento de 10 unidades no seu valor, sendo verificadas as diferenças de carga no nó obtidas com o C real e o C alterado, gerando um dH/dC . Esta matriz, entretanto, poderá indicar como melhores pontos de monitoramento locais diferentes dos indicados como pontos mais sensíveis à presença de fugas.

a) Macro-calibração

A macro-calibração do modelo consiste em uma fase de detecção e correção de erros mais grosseiros. Quando na macro-calibração se verifica um desequilíbrio supostamente excessivo (por exemplo trinta por cento) entre os valores obtidos na modelagem e os medidos em campo, de um (ou mais) parâmetro do modelo, a causa da diferença provavelmente se estende além dos erros de estimativa para cada rugosidade de tubo e demanda nodal. São muitas as causas possíveis para tais diferenças: válvulas fechadas ou parcialmente fechadas, curvas de bombas inadequadas, dados de medição com erros, incorreção de diâmetros e

comprimentos de tubos; geometria errada da rede, delimitação incorreta de zonas de pressão etc.

O objetivo principal desta etapa é adequar o máximo possível o modelo de simulação com a realidade física da rede, de maneira que os resultados gerados no modelo estejam em relativa concordância com os dados observados em campo.

As diferenças entre os resultados da aplicação do modelo e as observadas em campo podem ser causadas por diversos fatores (ORMSBEE e LINGIREDY, 1997) *apud* (PIZZO, 2004):

- erros na modelação dos parâmetros (valores de rugosidade de tubulações e distribuição de demandas nodais);
- geometria incorreta da rede (tubos conectados a nós errados);
- definição incorreta dos limites das zonas de pressão;
- dados incorretos da rede (diâmetro dos tubos, comprimentos, etc.);
- erros nas condições de contorno (ou seja, incorreções nos dados de válvulas reguladoras de pressão, nível de água dos reservatórios, curvas de bombas, etc.)
- erros em registros da operação do sistema (por exemplo, bombas partindo e parando em períodos incorretos);
- erros nos equipamentos de medição;
- erros de leitura nos instrumentos.

Antes de passar à micro-calibração é útil realizar a análise de sensibilidade do modelo, a fim de auxiliar na identificação da provável fonte de erros deste. Isto pode ser conseguido variando os parâmetros do modelo em diferentes faixas e então medindo os efeitos associados.

b) Micro-calibração

A micro-calibração é realizada depois que os resultados do modelo e as observações de campo estiverem em relativa concordância. Os parâmetros a serem ajustados durante esta fase final mais refinada da calibração são a rugosidade dos tubos e as demandas nodais.

ORTIZ et al (s.d.) *apud* (PIZZO, 2004) cita que o grau de precisão do modelo é comumente definido em termos das pressões ou cargas nos nós monitorados, e depende principalmente da precisão na formulação dos dados de entrada e da dedicação e investimento que o usuário do modelo está disposto a aplicar para alcançar um adequado ajuste.

Estimar até que grau o ajuste é considerado razoável não é tarefa fácil, já que diversos fatores são envolvidos, como:

- Qualidade dos dados de pressões e cotas utilizados;
- Quantidade de recursos econômicos disponíveis para efetuar as medições em campo e trabalho de escritório, para ajustar o modelo.

Como critério de avaliação da precisão dos dados obtidos na simulação WALSKI (1983) *apud* (PIZZO, 2004) propõe uma diferença média de 1,5 m entre a pressão medida e a pressão calculada, com um valor máximo de 5,0 m para um bom grupo de dados de entrada. Entretanto WALSKI (1986) e BHAVE (1988) *apud* (PIZZO, 2004) aponta como preferível estabelecer um critério de avaliação através das relações entre os valores de pressão e carga previstos pelo modelo e os observados (medidos) em campo, junto aos nós que estão sendo

monitorados e nos locais onde a perda de carga tenha sido medida. Esse critério de “relação” independe das unidades utilizadas e da natureza do gradiente hidráulico, seja este plano ou com forte declividade. Uma tolerância de $\pm 3,0\%$ nas pressões ou perdas de carga, para diferentes condições de operação, é considerado um valor aceitável.

5. ESTUDO DE CASO

A análise do modelo computacional de localização de fugas foi realizada no setor Vila Liberdade do sistema de abastecimento da cidade de Jundiaí-SP, com os equipamentos disponíveis no Departamento de Água e Esgoto, de modo a tentar reproduzir, o mais próximo possível da realidade, as condições e recursos disponíveis nas companhias de água.

O município de Jundiaí 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 Vila Liberdade foi escolhido por ter seus limites bem definidos e, principalmente, possuir uma rede recém substituída, com cadastro digitalizado e com informações confiáveis e também apresentar um índice de perdas bastante pequeno, da ordem de 7,56% ou 75 l/dia.ligação no ano de 2003 e de 5,29% ou 40 l/dia.ligação nos cinco primeiros meses de 2004. Valores bastante baixos se comparados a índices de perdas geral do município, indicadores nacionais ou mesmo internacionais. Os 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 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.

5.1 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 computacional está apresentada na Figura 2.

5.2 Levantamento de dados em campo

O levantamento de dados de campo coletou, durante um período de sete dias, as variáveis de estado pressão e vazão em um ponto da rede de distribuição, e pressão em outros dois pontos, durante um período de sete dias.

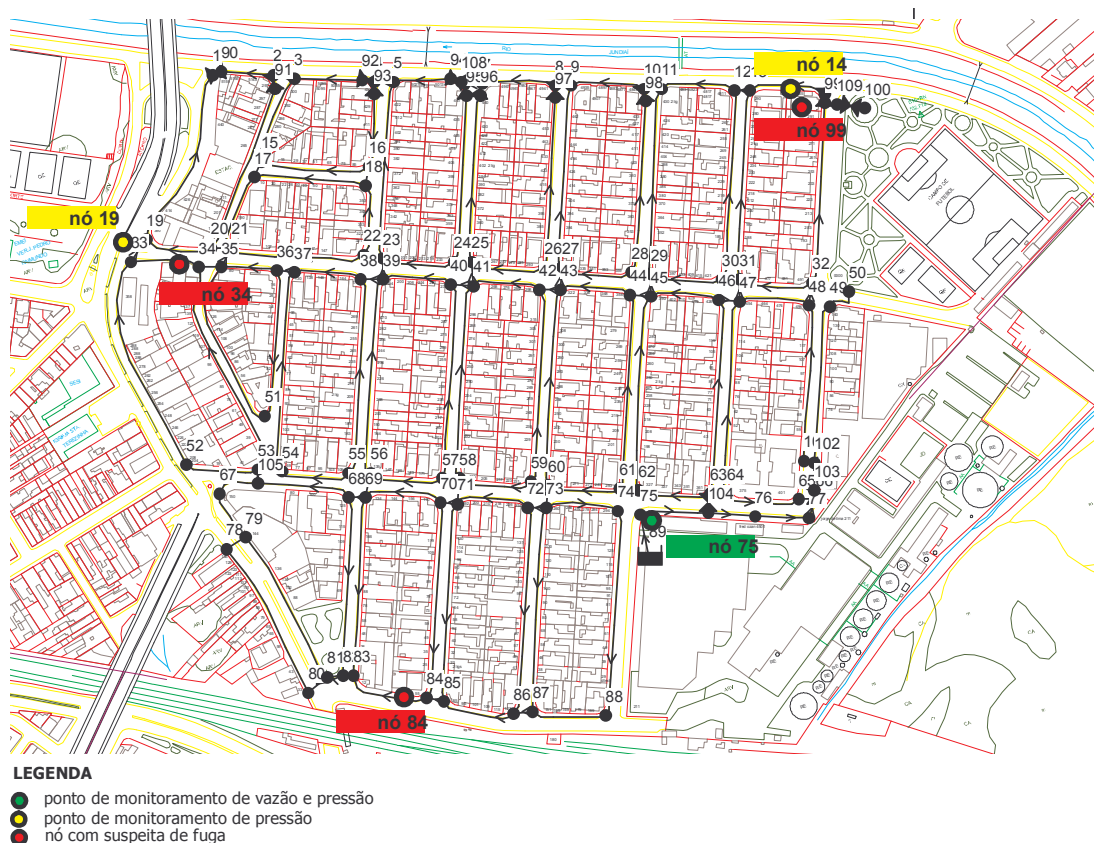


Figura 2: Rede de distribuição de água do setor Vila Liberdade, com pontos de monitoramento e nós com suspeita de fuga

A coleta de vazão e pressão foi realizada na entrada do setor. 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. A coleta dos dados de pressão na rede foi realizada nos cavaletes residenciais com exceção do nó de monitoramento da entrada do setor em que a medida foi tomada na própria rede. A diferença topográfica existente entre o terreno e o cavalete foi considerada na simulação hidráulica. As principais medidas coletadas em campo, utilizados nas operações de calibração da rede e localização das fugas estão apresentadas na Tabela 2.

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 (mH ₂ O)	medição COM vazão da fuga criada 24/08/04 – 3h (mH ₂ O)
75	1,33	33.70	30.20
14	-	37.25	33.20
19	-	31.78	27.60

5.3 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 micro-medidores (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 expressão 2.

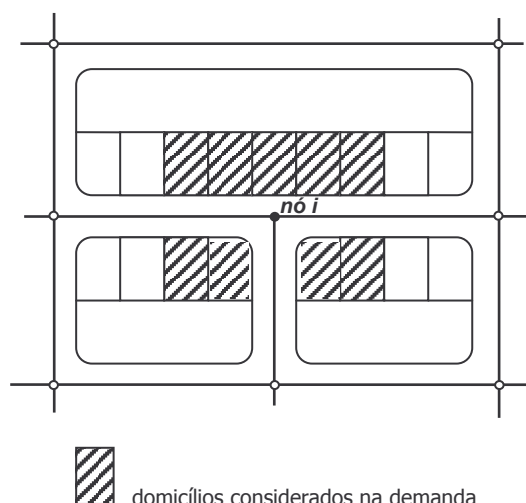


Figura 3: Consumos domiciliares considerados na demanda do nó i

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

onde 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.

5.4 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 como mostra a Tabela 3 a partir do critério estabelecido por WALSKI (1986) e BHAVE (1988) *apud* PIZZO (2004).

Tabela 3: Cargas nos nós 14 e 19

Nós	Carga Monitorada (23/8 - 5h) H^*	Carga Calculada H	Diferença	Erro admissível segundo WALSKI (1986) e BHAVE (1988)
-----	--	------------------------	-----------	---

Nó 14	737,76	738,99	-0,17%	± 3%
Nó 19	739,00	738,99	0%	

5.5 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, durante a madrugada (3h) para que o vazamento criado não fosse mascarado pelo consumo. A válvula está localizada junto ao nó 100.

Por falta de medidores disponíveis no departamento de água de Jundiaí, 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 bastante interessante saber, pelo menos de maneira estimada, seu valor, o que se mostrou fundamental no 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.



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

5.6 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 mais ou menos 0,5 metro 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 5.6 (b), ou seja, $\pm 1,5$ m e $\pm 3\%$.

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 $\pm 0,50$ m. Desta forma, cria-se um conjunto de pontos que serão adotados como parâmetro de entrada no modelo.

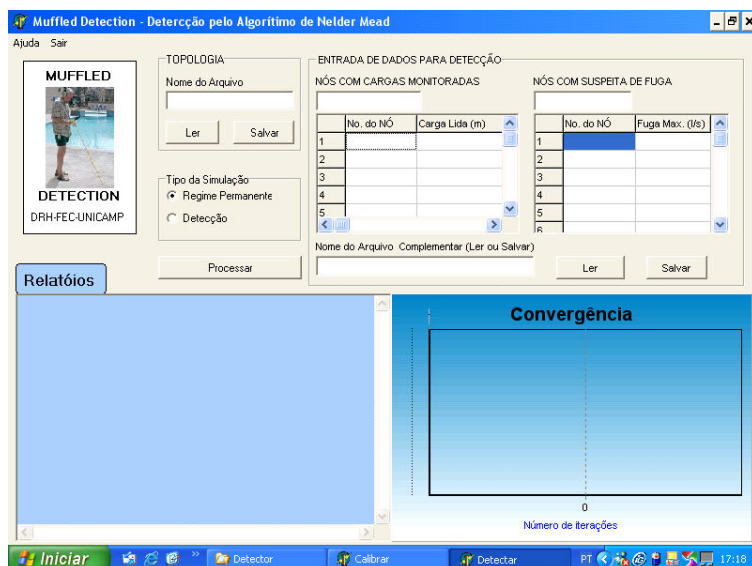


Figura 5: Tela de entrada do modelo de detecção MUFFLED DETECTION

5.7 Testes realizados

Para avaliação do desempenho do modelo de simulação-detecção 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 permaneceu fechada, ou seja, sem a presença da fuga criada 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 adotada para os nós monitorados 14 e 19 foi de 733,90 mH₂O e 734,39 mH₂O, 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 apontados como suspeitos de fuga e os valores adotados como “sementes” permanecem os mesmos utilizados desde o TESTE 1.

5.8 Resultados obtidos

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

A partir das cargas verificadas nos nós 14 e 19 de 737,95 mH₂O e 738,48 mH₂O, respectivamente, foi realizada a verificação dos resultados produzidos pelo modelo proposto

variando as cargas no intervalo de análise de $\pm 0,50$ m em escala de 0,10 m. Os resultados obtidos no modelo são apresentados na Figura 6.

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.

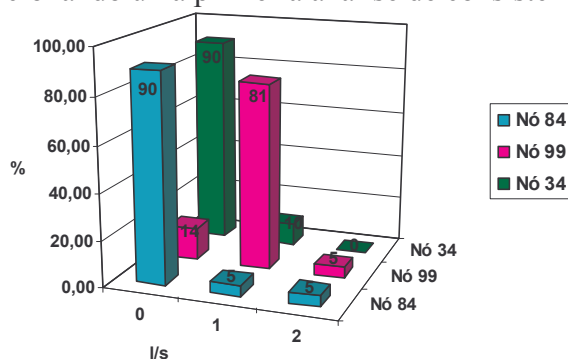


Figura 6: Análise de frequência dos resultados do TESTE 1

b) TESTE 2 : Localização de fugas com cargas monitorados 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 Figura 7, e principalmente mostraram vazões de fuga em todos os nós lançados como suspeitos e em todas as combinações de carga verificadas. 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 12l/s aproximadamente.

As análises dos valores de vazão obtidas neste teste indicam que pode ter havido um pulso transitório ocorrido, causando inconsistência no registro das cargas nos nós monitorados, principalmente em relação à estação de monitoramento instalada no nó 19, gerando incoerência no valor de carga do nó 19 empregado para detecção.

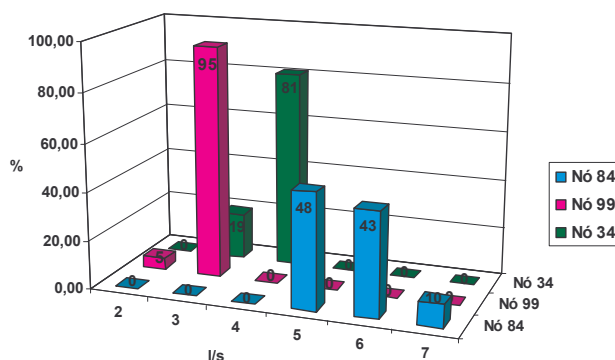


Figura 7: Análise de frequência dos resultados do TESTE 2

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 mH₂O. 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 mH₂O.

O processo de verificação dos resultados, como nos testes anteriores, analisou uma faixa de carga de $\pm 0,5$ m em intervalos de 0,10 m. A Figura 8 apresenta os resultados obtidos nesta simulação. Foi adotado o mesmo procedimento de varredura da faixa de análise executado na simulação anterior.

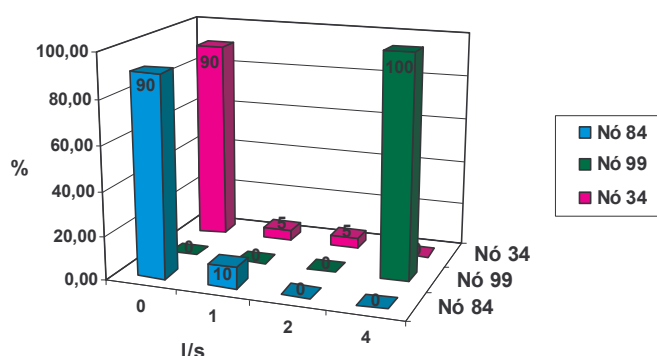


Figura 8: Análise de frequência dos resultados do TESTE 3

O 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 correspondeu 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.

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, de maneira geral, não é esta a realidade verificada nas companhias de água. Desta forma, é fundamental que o modelo seja devidamente calibrado antes que se inicie a simulação para a localização de fugas.

6 CONCLUSÃO

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 matemático de simulação-otimização para localização de fugas, baseados no método inverso, 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 (*pin point*).

O modelo utilizado foi capaz de localizar as fugas criadas artificialmente na rede, embora se dispusesse de apenas duas estações de monitoramento. Entretanto, no estudo de campo realizado, ficou claro que, para suprir as deficiências de monitoramento, devido sobretudo à falta de equipamentos de medição nas companhias de água, o modelo matemático ideal é aquele que permite uma análise do regime ao longo do tempo, variando a carga também ao longo do tempo. Desta forma, as alterações nas variáveis do modelo (carga), ocorridas devido às oscilações no regime de escoamento provocadas pelo surgimento de fugas podem ser prontamente identificadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

HERPETZ, P. *“Basics of Maintenance”*. Workshop 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 HISPÂNICO-

BRASILEIRO SOBRE PLANIFICAÇÃO, PROJETO E OPERAÇÃO DE REDES DE ABASTECIMENTO, 2, 2002, Valência. Anais...

LUVIZOTTO Jr, E; SOLIANI, R.; PIZZO, H. S.; JAQUIÊ, L. “*Análise de técnica de busca para um modelo de detecção de fugas*”. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 19., 2000, Córdoba. Anais... p.309-318

OCAMPOS, A. A. “*Avaliação do método de Nelder-Mead na construção de um modelo de detecção de fuga em sistemas de abastecimento de água*”. 2003. 104p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas UNICAMP, Campinas, 2003.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Banco Mundial. “*Water Resources Management Policy Paper*”, 1993. 101p.

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, 2004. 137 páginas.

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