UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA POLITÉCNICA

MICHELE ROBERTA PEDROSO DOS SANTOS MONTEIRO

Estudo do método de resposta em freqüência para localizar e quantificar vazamentos através do monitoramento de pressões e vazões em adutoras de água tratada

São Paulo

2006

MICHELE ROBERTA PEDROSO DOS SANTOS MONTEIRO

Estudo do método de resposta em freqüência para localizar e quantificar vazamentos através do monitoramento de pressões e vazões em adutoras de água tratada

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Engenharia Hidráulica
Orientador: Prof. Dr. Podalyro Amaral de Souza

São Paulo

2006

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 27 de outubro de 2006.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Monteiro, Michele Roberta Pedroso dos Santos
Estudo do método de resposta em freqüência para localizar e quantificar vazamentos através do monitoramento de pressões e vazões em adutoras de água tratada / M.R.P. dos S. Monteiro.
-- ed.rev. -- São Paulo, 2006.
77 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária.

1. Vazamentos de água (Detecção) 2. Resposta em freqüência 3. Adutoras I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária II. t.

Às professoras da Escola Simonini:

Massumi, Léucia e Sandra Gomes.

AGRADECIMENTOS

O mais profundo agradecimento ao meu orientador, e agora também amigo, Podalyro, pelas inúmeras horas dedicadas à minha pessoa.

Ao amigos Luis Fernando, Robson Fontes e Jairo Tardelli, pelo fornecimento de parte da bibliografia deste trabalho.

Aos amigos do CTH, em especial Claudino e Pedro Accorsi, por me receberem de braços abertos no período em que me dediquei exclusivamente ao Mestrado.

Ao amigo Pedro Alves, que me encorajou a ingressar no programa de Mestrado.

E, finalmente, ao meu querido esposo, Sandro, pela compreensão e incentivo ao longo desse conturbado período.

RESUMO

Neste trabalho são apresentados diversos métodos de localização de vazamentos, desde as técnicas e equipamentos mais elementares, como a inspeção visual e o geofone mecânico, até o uso dos sofisticados armazenadores de ruídos e de modelação computacional.

Algumas dessas técnicas são amplamente difundidas e largamente utilizadas pelas empresas de saneamento, outras porém, constituem-se em ótimas promessas para o aperfeiçoamento do controle das perdas físicas nos sistemas de abastecimento.

É dada ênfase na utilização do diagrama de resposta em freqüência para localizar e quantificar vazamentos, com especial aplicação às adutoras de água tratada. A técnica de utilização da resposta em freqüência desenvolvida por Lee et al. (2005) é esmiuçada, inclusive acerca do impacto que um vazamento impõe ao diagrama de resposta em freqüência.

São abordadas as formas de obtenção do referido diagrama, tanto do ponto de vista do modelo matemático e computacional, quanto dos ensaios de campo necessários.

ABSTRACT

This work presents some methods for leak location, from de most elementary techniques and equipments, as visual inspection and mechanical geophone, until using sophisticated noise data-logger and computational modeling.

Some of these techniques are very well issued and largely used by water companies, but others play excellent promises for the improvement of leak control in systems of water supply.

The pattern of the frequency response diagram is used for leak location and quantification, with special application in drinking water pipelines. The frequency response technique developed by Lee et al. (2005) is studied in details, including the impact produced by the leak on the frequency response diagram.

The ways to obtain the frequency response diagram, by using mathematical and computational models or necessary field data survey, are also discussed.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de vazamentos 17

Figura 2 - Vazamento localizado por inspeção visual 23

Figura 3 - Interferências relacionadas aos métodos acústicos 24

Figura 4 – Partes do geofone eletrônico 25

Figura 5 - Princípio da correlação do ruído do vazamento 26

Figura 6 - Utilização do equipamento correlacionador 27

Figura 7 - Utilização dos armazenadores de ruídos 28

Figura 8 - Técnica de injeção de gás 30

Figura 9 - Imagem típica de área delaminada 31

Figura 10 - Radar de subsolo 32

Figura 11 - DRF do exemplo 8.2 de Chaudhry (1987, p. 244) 41

Figura 12 - DRF obtido através do programa do Apêndice A 41

Figura 13 - Sistema modelado por Mpesha (1999) para um único vazamento 42

Figura 14 – Diagrama de Resposta em Freqüência obtido por Mpesha (1999) 45

Figura 15 – Diagrama de Resposta em Freqüência obtido por Lee et al. (2004) 46

Figura 16 - DRF obtido através do programa do apêndice B 47

Figura 17 - Sistema modelado por Lee (2005) para um único vazamento 51

Figura 18 - Impacto de um vazamento no DRF (Lee et al., 2005) 51

Figura 19 - Impacto do tamanho do vazamento na resposta em freqüência dos três primeiros picos das harmônicas 52

Figura 20 - Impacto da posição do vazamento na resposta em freqüência dos três primeiros picos das harmônicas 53

Figura 21 - Comparação entre os resultados com e sem atrito não permanente para o caso de um sistema de tubulação sem vazamentos 58

Figura 22 - Procedimento para análise de sistemas complexos 60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Causas de vazamentos 18

Tabela 2 - Classificação dos picos e posição do vazamento correspondente 54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABENDE	Associação Brasileira de Ensaios Não-Destrutivos
BNH	Banco Nacional da Habitação (atual BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento)
DRF	Diagrama de Resposta em Freqüência
FFT	Fast Fourier Transform (ou Transformada Rápida de Fourier)
MC	Método das Características
MMT	Método da Matriz de Transferência
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
RTV	Sistema Reservatório – tubo – válvula
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SCADA	Supervisory Control and Data Aquisition
SCE	Shuffled Complex Evolution
SEADE	Fundação Sistema Nacional de Análise de Dados

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo Descrição e respectivo dimensional

L := distância [L];

TD := *time delay* [T];

V := velocidade [$L.T^{-1}$];

I := posição do vazamento [L];

H(ω) := função resposta em freqüência do sistema linear;

Y(ω) := transformada de Fourier do sinal de saída;

X (ω) := transformada de Fourier do sinal de entrada;

ω := freqüência angular [T^{-1}];

q := vazão[$L^3.T^{-1}$];

h := carga [L];

$n+1$:= nó de jusante [-];

μ := função propagação [$\mu = (1/a)\sqrt{-\omega^2 + igA\omega R}$] [L^{-1}];

a := celeridade de onda [$L.T^{-1}$];

i := número imaginário [$\sqrt{-1}$];

g := gravidade [$L.T^{-2}$];

A := área [L^2];

R := termo de resistência ao atrito [$R=(fQ_0)/(2gDA^2)$ para escoamento turbulento e $R=(32\nu)/(gD^2A)$ para escoamento laminar] [$T.L^{-3}$];

f := fator de atrito [-];

Q_0 := vazão média no tubo [$L^3.T^{-1}$];

D := diâmetro do tubo [L];

ν := viscosidade cinemática [$L^2.T^{-1}$];

l := comprimento do tubo [L];

Zc := impedância característica [$Zc=(\mu a^2)/(i\omega gA)$] [$T.L^{-2}$];

n := nó de montante [-];

ΔH_{V0} := perda de carga na válvula [L];

Q_{V0} := vazão permanente na válvula [$L^3.T^{-1}$];

$\Delta\tau$:= variação de abertura da válvula [-];

τ_0 := coeficiente de abertura da válvula [-];

Q_{L0} := vazão permanente perdida (vazamento) [$L^3.T^{-1}$];

H_{L0} := carga permanente no vazamento [L];

h_r := carga adimensionalizada (relativa) [-];

q_r := vazão adimensionalizada (relativa) [-];

ω_r := freqüência relativa [$\omega_r=\omega/\omega_{th}$] [$T^{-1}$];

ω_{th} := freqüência fundamental do tubo [$\omega_{th}=\pi a/2l$] [T^{-1}];

L_i := comprimento do trecho de tubo até o vazamento [L];

a_i := celeridade de onda no trecho de tubo L_i [$L.T^{-1}$];

$\Delta\omega_i$:= diferença em freqüência relativa entre os picos primários e secundários de amplitude da pressão [-];

q_{0lk} := vazão média perdida (vazamento) [$L^3.T^{-1}$];

q_r := vazão adimensionalizada [$q_r=Q(\omega)/Q_0$];

h_b := carga na válvula [L];

x_L^* := posição adimensionalizada do vazamento [$x_L^*=x_L/l$];

x_L := posição do vazamento medida a partir do contorno a montante [L];

m := número do pico [-];

ω_{signal} := sinal original da freqüência [T^{-1}];

ω'_{signal} := sinal distorcido da freqüência [T^{-1}];

ω_{nq} := freqüência de Nyquist [T^{-1}];

ϕ_{signal} := fase original do sinal [-];

ϕ'_{signal} := fase distorcida do sinal [-];

C_d := coeficiente de descarga [-];

A_L := área do orifício do vazamento [L^2];

$h_{\omega r_n}$:= resposta do correspondente pico harmônico [L];

E := valor da função objetivo [L^2];

h_j^m := amplitude medida da resposta no domínio da freqüência, para a freqüência j [L];

h_j := amplitude calculada da resposta no domínio da freqüência, para a freqüência j [L];

M := número de pontos medidos [-];

$SF(\omega)$:= fator de proporcionalidade (*scaling factor* em inglês) [-];

$h_s(\omega)$:= resposta para o caso de atrito permanente [L];

$h_{U+S}(\omega)$:= resposta para a combinação entre atrito permanente e não-permanente [L];

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 16

2. OBJETIVO 20

3. JUSTIFICATIVA 21

4. EQUIPAMENTOS E MÉTODOS PARA LOCALIZAR VAZAMENTOS 22

4.1. INSPEÇÃO VISUAL 22

4.2. TÉCNICAS ACÚSTICAS 23

4.2.1. Geofone eletrônico 25

4.2.2. Correlacionador de ruídos 25

4.2.3. Armazenadores de ruídos 27

4.3. MÉTODOS NÃO-ACÚSTICOS 29

4.3.1. Injeção de gás 29

4.3.2. Termografia 31

4.3.3. Radar de subsolo 31

4.4. TÉCNICAS BASEADAS EM MODELOS MATEMÁTICOS 32

5. O USO DA RESPOSTA EM FREQÜÊNCIA PARA LOCALIZAR E QUANTIFICAR VAZAMENTOS 34

5.1. Matriz de Transferência X Método das Características 35

5.1.1. As Matrizes de Transferência 37

5.2. O modelo obtido por Mpesha (1999, 2001, 2002) 42

5.3. O modelo obtido por Lee et al. (2004, 2005) 46

5.3.1. Impacto do atrito não-permanente 57

5.3.2. Aplicação em sistemas complexos 59

6. CONCLUSÕES 61

LISTA DE REFERÊNCIAS 63

APÊNDICE A – Modelo computacional para obtenção do DRF obtido por Chaudhry (1987, p.244) 67

APÊNDICE B – Modelo computacional para obtenção do DRF com vazamento unitário 69

ANEXO A – Shuffled Complex Evolution Algorithm (Duan et al., 1993) 72

1. INTRODUÇÃO

Um dos grandes desafios deste milênio é a questão do suprimento de água potável bem como o tratamento dos esgotos: como dotar de saneamento básico um número cada vez maior de pessoas, tendo uma disponibilidade hídrica cada vez menor? – principalmente no que se refere aos grandes centros urbanos, a exemplo da Região Metropolitana de São Paulo – RMSP.

Segundo dados da Fundação SEADE (2000) a RMSP agrega uma população de 18.290.389 habitantes, dos quais 78% possuem suas necessidades de saneamento básico – no que se refere a água e esgoto – supridas pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – SABESP, que atravessou recentemente problemas de baixo nível nos reservatórios de água bruta chegando a decretar no último trimestre de 2003 o rodízio de abastecimento no Sistema Alto Cotia, atingindo uma população de 440.000 habitantes. Como forma alternativa ao desabastecimento, a SABESP implantou no período de março a setembro de 2004 um sistema de bônus para incentivar a uma redução de consumo em torno de 20%.

É claro que a diminuição do consumo per capita não se constitui, por si só, como a solução do problema, é também através da melhoria da eficiência dos processos que será possível atenuar a escassez de recursos hídricos, o que obrigatoriamente passa pelo desenvolvimento e aplicação de novas tecnologias para o setor.

Com este enfoque a SABESP firmou convênio com o BNH no ano de 1977 visando a implantação de um Projeto-Piloto para Controle de Perdas (Meiches, 1984), embrião para que fossem criadas, em 1996, as Divisões de Controle de Perdas.

As perdas em um sistema de distribuição de água são comumente classificadas em duas categorias:

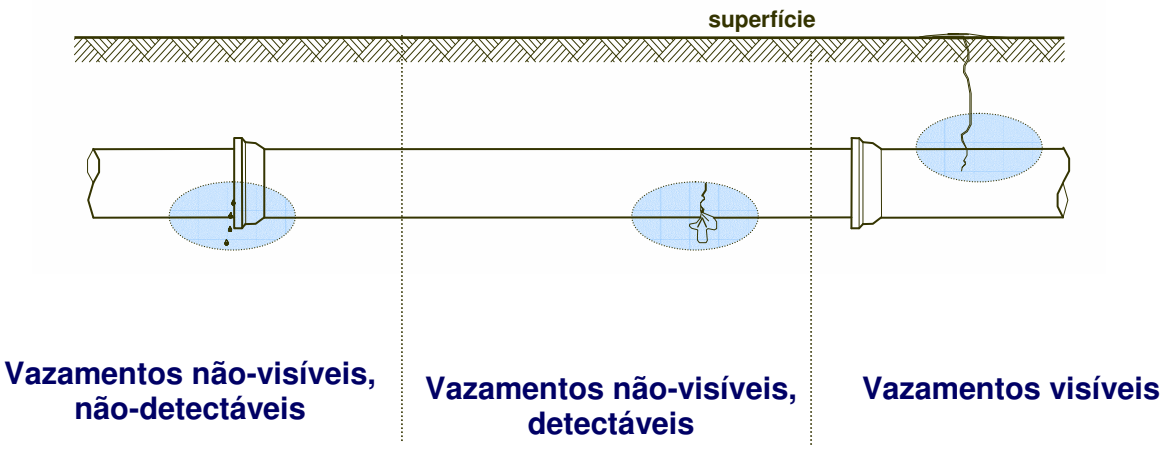
- **Perda aparente** (ou perda não física): corresponde ao volume de água consumido, mas não contabilizado pela companhia de saneamento, decorrente de falhas no sistema comercial, tais como: erros de medição, fraudes ou ligações clandestinas.

- **Perda real** (ou perda física): trata-se do volume realmente perdido antes de chegar ao consumidor, são exemplos: extravasamentos em reservatórios e vazamentos nas redes de adução e distribuição.

Os vazamentos por sua vez, são caracterizados de duas maneiras:

- **Visíveis**: são aqueles que afloram à superfície, sendo facilmente identificados.

- **Não-visíveis**: como o próprio nome já diz, são aqueles que não podem ser localizados por simples observação, necessitando de técnicas mais sofisticadas para sua detecção, que serão objeto de estudo neste trabalho.



Fonte: SABESP

Figura 1 - Tipos de vazamentos

Visíveis ou não, os vazamentos são decorrentes de (Thorton, 2002):

- Instalação e mão-de-obra inapropriadas
- Má qualidade dos materiais empregados
- Manipulação inadequada dos materiais antes da instalação
- Fechamento incorreto de vala
- Transitórios
- Flutuações de pressão
- Pressões excessivas
- Corrosão
- Vibração e sobrecargas devido ao tráfego
- Condições ambientais, tais como o frio
- Falta de manutenções programadas

Sapporo[1] (1994 apud Tardelli Filho, 2004) lista um leque maior de causas, conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Causas de vazamentos (continua)

	Causas Internas	**Causas Externas**
Bombas	• Desgaste das gaxetas • Ajustes inadequados nos registros, válvulas e juntas • Pressões elevadas	

[1] WATERWORKS BUREAU OF THE SAPPORO MUNICIPAL GOVERNMENT. **Water Leak Prevention.** Sapporo, 1994.

Tabela 1 - Causas de vazamentos (continuação)

	Causas Internas	Causas Externas
Reservatórios	• Má qualidade dos materiais • Má execução da obra • Envelhecimento dos materiais	
Tubulações	**Material** • Má qualidade dos materiais • Corrosão • Envelhecimento **Execução** • Projeto inadequado • Assentamento inadequado • Encaixes inadequados • Corrosão **Operação** • Golpe de Aríete • Pressão alta • Qualidade da água (corrosão interna)	**Ambiente** • Carga de tráfego • Agressividade do solo (corrosão externa) • Poluição do solo **Desastres naturais** • Movimentos de terra • Deslizamentos • Movimentos sísmicos

Os equipamentos e métodos disponíveis para a localização de vazamentos não-visíveis têm sofrido desenvolvimentos contínuos que serão objeto de estudo neste trabalho, porém será dado maior enfoque aos métodos baseados na resposta em freqüência, em especial o proposto por Lee (2004, 2005).

2. OBJETIVO

Apresentação dos métodos de localização de vazamentos, com enfoque na utilização do método de resposta em freqüência para localizar e quantificar vazamentos através de uma excitação controlada e do monitoramento de pressão/vazão em adutoras de água tratada, para o caso de escoamento oscilatório com características médias permanentes.

3. JUSTIFICATIVA

O presente trabalho justifica-se devido à grande quantidade de água perdida nas adutoras que abastecem a RMSP. Apesar do índice de perda da produção estar na faixa de 1,64% (SABESP, 2004), isso representa 1,04 m³/s dos 63,6 m³/s produzidos, 90.118.656 (noventa milhões!) de litros perdidos diariamente. Se considerarmos um consumo de 200 L/(hab.dia) poderiam ser abastecidos em torno de 450.000 habitantes, pouco mais que duas vezes a população da cidade de São Carlos no interior do estado de São Paulo – segundo dados da Fundação SEADE (2000) São Carlos possui atualmente 203.326 habitantes.

Além do aspecto quantitativo, está a questão de segurança operacional, pois um vazamento de adutora pode gerar um grande sinistro, denigrindo a imagem da empresa e ocasionando transtornos aos clientes, além da possibilidade de ocorrer fatalidades.

A essas questões somam-se a diminuição da oferta de água bruta para tratamento, a iminência de pagamento pela utilização desse recurso hídrico e a possibilidade de contaminação das redes em caso da decretação do sistema de rodízio, pois uma vez despressurizada e contendo fissuras em sua estrutura, essa fica à mercê de aqüíferos freáticos contaminados.

4. EQUIPAMENTOS E MÉTODOS PARA LOCALIZAR VAZAMENTOS

Apesar da detecção de vazamentos estar evoluindo para tecnologias sofisticadas, muitos dos equipamentos e métodos já utilizados por várias décadas continuam tendo sua importância.

Cada técnica existente torna-se parte de um *kit* de ferramentas, não se constituindo na única solução para os problemas com vazamentos. Qualquer que seja a técnica utilizada, é preciso que haja confiança no procedimento a ser executado e na capacidade do equipamento em encontrar e apontar o vazamento com precisão (Thorton, 2002).

Além da confiabilidade, Liou e Tian (1995) apontam outros dois atributos para se medir a eficiência de um método em localizar um vazamento incipiente: tempo de resposta e grandeza do menor vazamento detectável.

4.1. INSPEÇÃO VISUAL

A forma mais elementar de localização de vazamentos é a inspeção visual, que consiste em percorrer a extensão das tubulações procurando por indícios de vazamentos, seja pelo afloramento da água, por manchas no asfalto ou – em regiões muito secas – surgimento de vegetação suspeita ou limo.

Segundo Black (1992) as desvantagens desse método são claras, exceto em circunstâncias específicas, oferecendo pouca ou nenhuma promessa de localização de vazamentos incipientes e mínima segurança em termos de confiança.

Figura 2 - Vazamento localizado por inspeção visual

4.2. TÉCNICAS ACÚSTICAS

O som do vazamento é composto por diversos sons diferentes, tais como o som da circulação do líquido com as partículas do solo, o som do impacto do fluxo de água com o solo que envolve a tubulação, o som da fricção das partículas de água com as paredes do tubo e, finalmente, o som da vibração produzida no tubo. A este conjunto de sons denomina-se genericamente de "ruído de vazamento" (ABENDE, 2003).

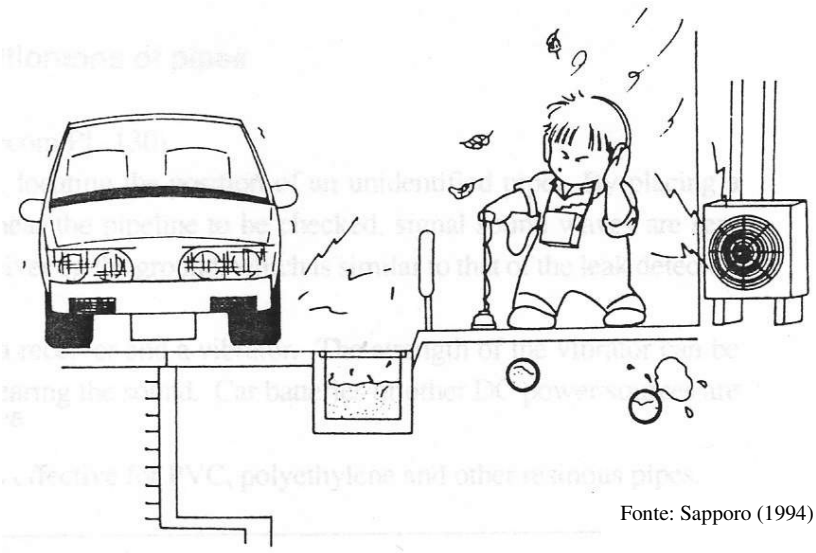
A intensidade do ruído de vazamento varia conforme o tipo de material de que é composto o tubo (ferro fundido, PVC etc.), o diâmetro do tubo, a espessura da parede do tubo, a pressão da água, a configuração da abertura etc.. Este fato causa, portanto, diferenças significativas entre um ruído de vazamento e outro (ABENDE, 2003).

A esses fatores somam-se as características do solo e sons do ambiente: tráfego, linhas de gás, proximidade com transformadores de energia elétrica ou sistemas de bombeamento, etc...

Hunaidi (1999) enfatiza que esses métodos são satisfatórios quando aplicados a tubulações metálicas, entretanto, em relação aos tubos plásticos existem divergências quanto a sua

eficácia. Os efeitos dos problemas normalmente associados com a localização de vazamentos através de métodos acústicos tornam-se maximizados para esse tipo de material. Os problemas incluem:

- Sinais de interferência oriundos do tráfego pesado de veículos e pedestres, o próprio fluxo de água nas tubulações e sons de vazamentos adjacentes;
- Atenuação do sinal ao longo do tubo e no solo; e
- Sensibilidade insuficiente (da amplitude da freqüência de medição ou do equipamento de escuta).



Fonte: Sapporo (1994)

Figura 3 - Interferências relacionadas aos métodos acústicos

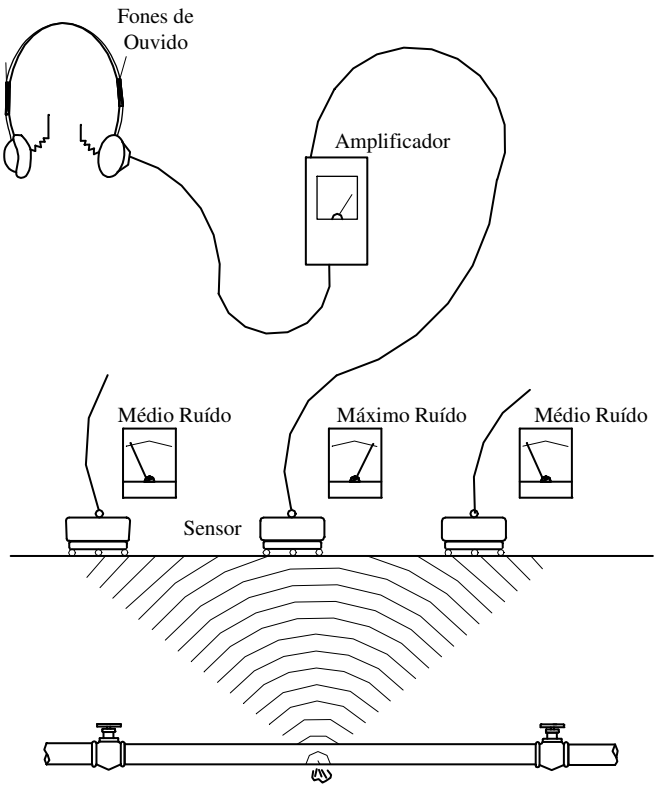
Diminuem-se as limitações desse método quando são utilizados equipamentos atualizados tecnologicamente, bem como mão-de-obra capacitada. As habilidades do operador em distinguir os vários sons e aplicar os filtros necessários é de fundamental importância para o sucesso do método; muitas vezes esse *know-how* só é conseguido após anos de prática.

A seguir são apresentados os equipamentos mais utilizados em pesquisas acústicas para a localização de vazamentos de acordo com as definições preconizadas pela ABENDE (2003):

4.2.1. Geofone eletrônico

Este instrumento é um detector eletrônico acústico de vazamentos, constituído de amplificador, sensores de ruídos e fones de ouvido. Tem a função de captar as vibrações provenientes do movimento da água fora do tubo, especialmente de seu impacto contra o solo e do ruído característico da circulação de água com as partículas do solo (ABENDE, 2003).

Existe também o geofone mecânico, que utiliza o princípio da estetoscopia na detecção de vazamentos. É composto de duas sapatas (sensores mecânicos), guias de onda e auriculares. É menos sensível que o geofone eletrônico (ABENDE, 2003).



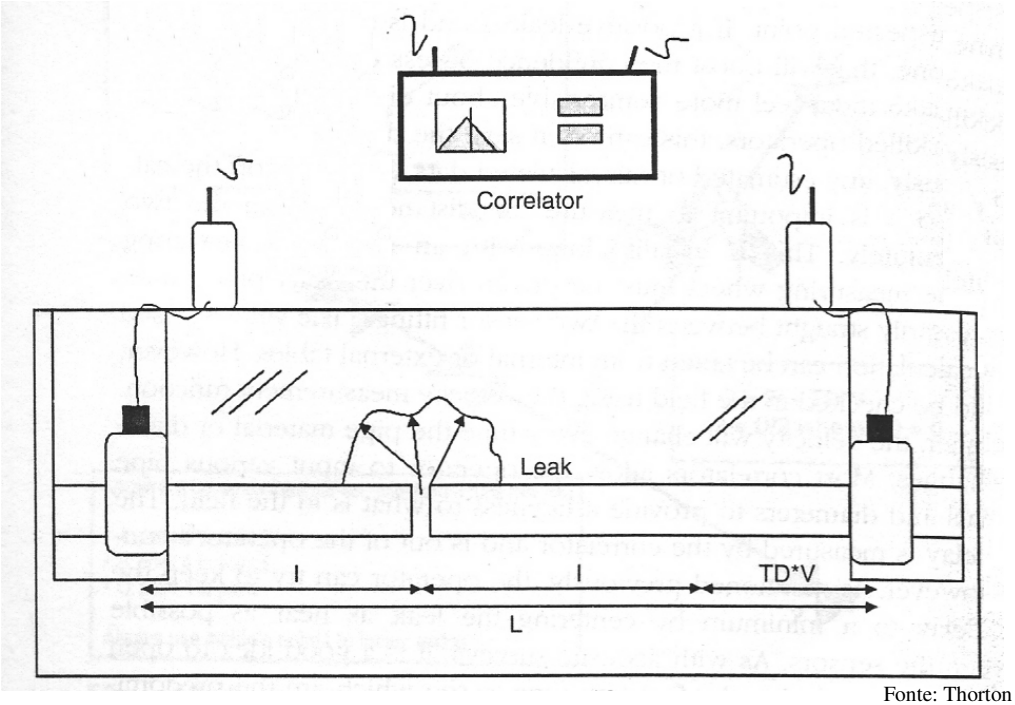
Fonte: SAPPORO/JAPÃO – 1994
(ABENDE, 2003)

Figura 4 – Partes do geofone eletrônico

4.2.2. Correlacionador de ruídos

Este equipamento é constituído por sensores de ruídos, com respectivos pré-amplificadores, que transmitem, através de ondas de rádio ou por cabos, informações para o equipamento correlacionador. A partir da posição dos sensores, instalados em dois pontos predeterminados de um trecho de tubulação, o equipamento correlacionador pode determinar a posição de um

vazamento, a partir da análise da diferença de tempo que o som característico do vazamento necessita para atingir um e outro sensor (ABENDE, 2003).



Fonte: Thorton (2002)

Figura 5 - Princípio da correlação do ruído do vazamento

Thorton (2002) descreve o princípio de cálculo a partir da seguinte fórmula $L = TD \times V + 2I$, que rearranjada permite a obtenção do ponto de vazamento:

$$I = \frac{L - (TDxV)}{2} \qquad ...(1)$$

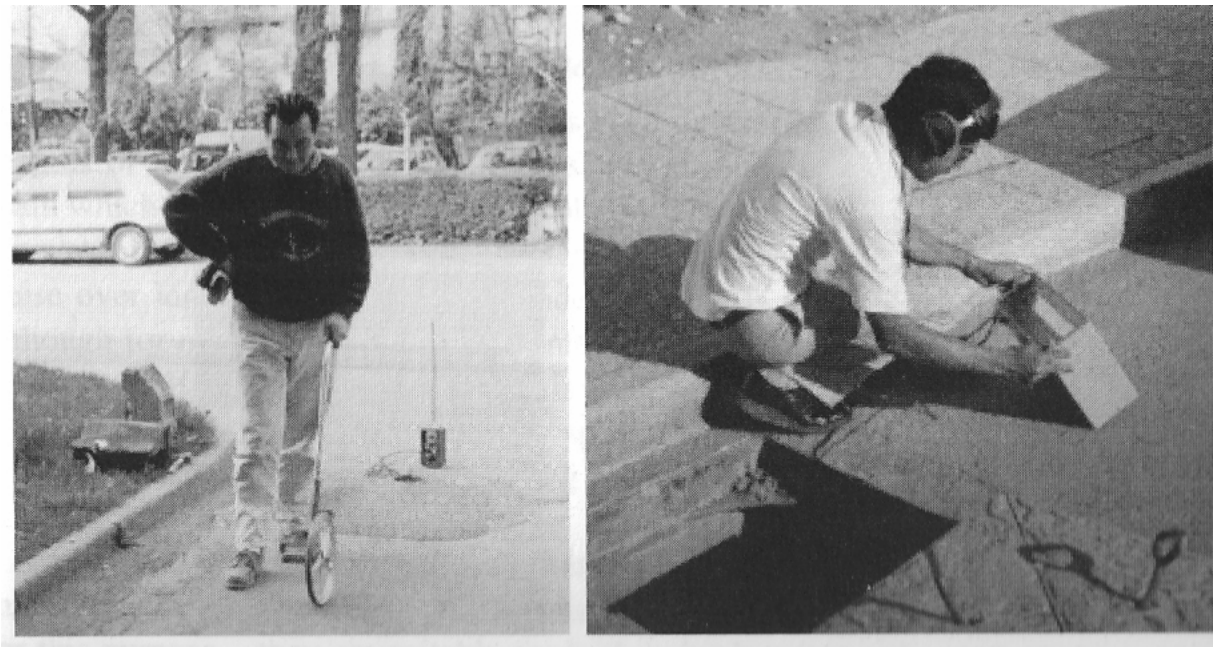
onde:

L := distância entre os sensores;

TD := *time delay*, tempo necessário para que o sinal alcance o mais distante sensor após ter passado pelo primeiro;

V := velocidade com que o ruído do vazamento viaja pela parede do tubo (calculada pelo correlacionador ou estimada pelo operador); e

I := posição do vazamento relativa a um dos sensores.



Fonte: Farley e Trow (2003)

Thorton (2002) também enfatiza que nenhum tipo de equipamento pode fazer tudo sozinho. Aconselha, principalmente aos operadores menos experientes, que após localizar um possível vazamento com o correlacionador, seja utilizado o geofone sobre o ponto suspeito.

4.2.3. Armazenadores de ruídos

Esses equipamentos geralmente são posicionados em locais estratégicos dentro de zonas permanentes ou temporárias, que já tenham sido identificadas como áreas com grande potencial de vazamentos.

Os armazenadores ou *loggers* de ruídos, tal como na pesquisa de vazamentos tradicional, baseiam-se na captação de ruídos, registrando dois parâmetros distintos (SABESP, 2003):

- Intensidade: parâmetro que indica o pico do ruído de vazamento, ou seja, se aquele ruído apresentar um som de grande intensidade, pode ser caracterizado como um ponto de vazamento suspeito;

- Dispersão: parâmetro que indica a amplitude do ruído na rede, ou seja, a capacidade que o som tem de se espalhar a partir de um ponto de vazamento suspeito, sendo que valores de baixa dispersão associados a valores de alta intensidade indicam grande proximidade do vazamento.

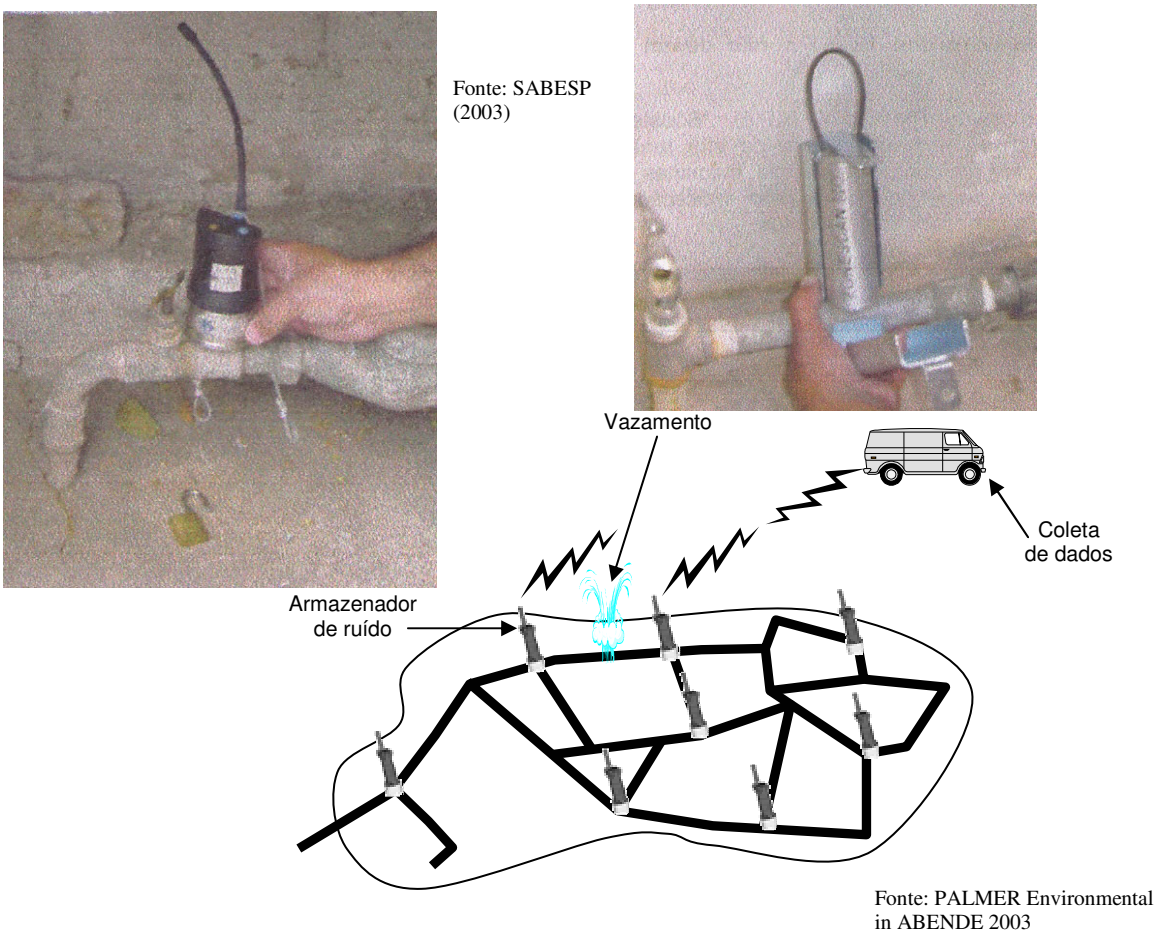


Figura 7 - Utilização dos armazenadores de ruídos

Após a análise destes parâmetros o equipamento armazenará as informações que serão transmitidas à unidade receptora, através de sinais de rádio, identificando no *display*, ou por aviso sonoro, a existência de vazamento ou não no trecho pesquisado. Alguns equipamentos permitem a visualização dos dados diretamente na tela da unidade receptora, porém essas informações serão descarregadas em computadores ou *laptops* para geração de planilha e gráficos (SABESP, 2003).

Avanços mais recentes dessa tecnologia permitem aos armazenadores se correlacionar entre si, além de possibilitar ao operador ouvir o ruído do vazamento através de fones de ouvido ou, ainda, efetuar remotamente mudanças em seus parâmetros.

4.3. MÉTODOS NÃO-ACÚSTICOS

Alternativamente, existem métodos e equipamentos desenvolvidos para outras finalidades que podem ser adaptados aos sistemas de distribuição de água, são exemplos: método de injeção de gás, fotografia em infra-vermelho (ou termografia) e radar de subsolo. Entretanto, segundo Hunaidi (1999) o uso desses métodos não-acústicos pelas empresas de abastecimento é muito limitado, não sendo muito bem estabelecida a sua eficácia.

4.3.1. Injeção de gás

Esse método envolve a introdução de gases atóxicos, insolúveis em água e mais leves que o ar dentro dos sistemas de tubulação de água (normalmente através dos hidrantes de coluna). Os gases injetados escapam pelos vazamentos e, sendo mais leves que o ar, acabam permeando o solo e o pavimento. Detectores de gás altamente sensíveis são empregados diretamente sobre o tubo para localizar essas fugas. A injeção de gás é amplamente utilizada pela indústria de telecomunicações para testar cabos pressurizados de telefonia (Hunaidi, 1999).

Segundo Farley e Trow (2003), os gases mais comumente utilizados são o hexafluoreto de enxofre (SF_6), hidrogênio industrial (95% nitrogênio, 5% hidrogênio) e o hélio. A grande desvantagem do SF_6 é a necessidade de se abrir pequenas valas no solo em intervalos de um metro em toda a extensão da tubulação, de forma que o gás possa ser detectado. Em contrapartida, a percolação dos outros dois gases (hidrogênio e hélio) ocorre de forma mais rápida, dispensando a abertura de valas.

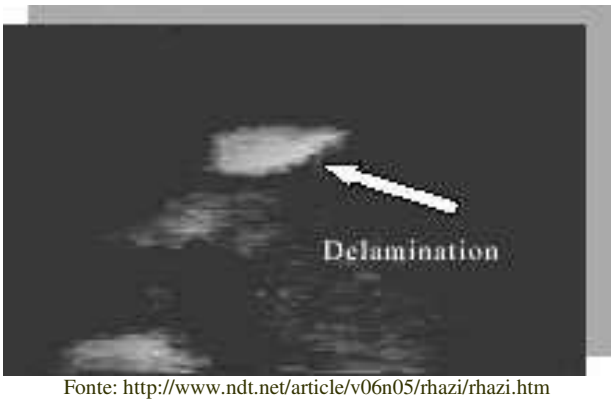
Fonte: Farley e Trow, 2003

Figura 8 - Técnica de injeção de gás

A utilização do hélio, por sua vez, requer uma quantidade menor de gás, não havendo a necessidade de misturá-lo com nitrogênio para torná-lo seguro. Tal como o hidrogênio, é aplicável às tubulações de menor diâmetro não sendo recomendável para adutoras devido à necessidade de grande quantidade de gás (Farley e Trow, 2003).

4.3.2. Termografia

Segundo (Hunaidi, 1999) o princípio por trás do uso da termografia para a detecção de vazamento é que a água vazando a partir de uma tubulação enterrada altera as características térmicas do solo adjacente, sendo mais eficiente a dissipação de calor nesse trecho em relação ao solo seco no entorno. *Scanners* infravermelhos podem ser usados para detectar anomalias sobre a tubulação, que podem ser indicativas de vazamentos de água. Esses equipamentos podem ser portáteis ou adaptados em veículos. A termografia está sendo utilizada com sucesso para localizar áreas delaminadas nas plataformas de concreto em pontes de rodovias.



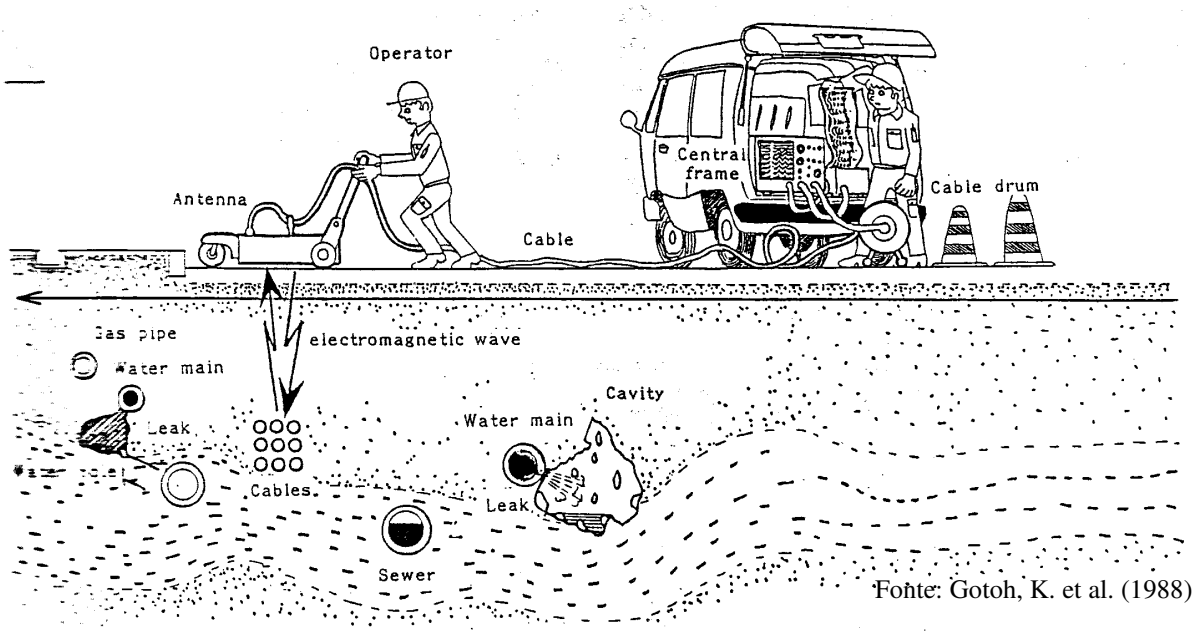
Fonte: http://www.ndt.net/article/v06n05/rhazi/rhazi.htm

Figura 9 - Imagem típica de área delaminada

4.3.3. Radar de subsolo

Um pequeno pulso de onda eletromagnética é transmitido ao solo usando uma antena transmissora de radar. Quando um pulso do radar encontra uma interface entre dois materiais, é parcialmente refletido até a superfície onde é captado por uma antena receptora. A reflexão parcial das ondas eletromagnéticas na interface entre dois materiais, ou qualquer anormalidade, é devida ao contraste de propriedades dielétricas. A defasagem de tempo entre transmissão e reflexão das ondas eletromagnéticas é então utilizada para determinar a

profundidade da superfície de reflexão. Através da transmissão de pulsos de radar em posições de superfície regular, isto é, executando uma varredura, podem ser determinados o tamanho e a profundidade dos objetos enterrados (Hunaidi, 1999).



Fonte: Gotoh, K. et al. (1988)

Figura 10 - Radar de subsolo

Esse método pode ser utilizado para detectar vazamentos de duas formas (Hunaidi, 1999):

- Identificando as cavidades do solo criadas pelo fluxo turbulento do vazamento de água; e
- Identificando os segmentos de tubo que aparecem mais profundos do que o esperado em virtude do aumento do dielétrico constante no solo adjacente saturado pelo vazamento de água.

4.4. TÉCNICAS BASEADAS EM MODELOS MATEMÁTICOS

A ampla utilização dos chamados Sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Aquisition) pelas companhias de saneamento para o monitoramento dos sistemas de abastecimento de água, disponibilizou uma grande quantidade de dados históricos das redes, tornando possível o desenvolvimento de modelos capazes de detectar e até localizar

vazamentos.

Black (1992) considera que o desenvolvimento e implementação de um bom sistema baseado em modelos não é um exercício trivial, e, além de uma boa ferramenta de simulação, outros fatores são cruciais para a performance desse tipo de sistema, tais como: seleção das condições de contorno, precisão do instrumento de coleta de dados e periodicidade das medições.

Segundo Liou e Tian (1995) a detecção através de simulações de transitórios feitas em tempo real requer dados precisos de vazão e pressão, porém freqüentemente ocorrem incertezas e erros de medição nos trabalhos de campo. A utilização de dados que contenham erros incidentais fatalmente resultará em alarmes falsos.

No próximo capítulo serão abordadas duas técnicas baseadas em modelos matemáticos que utilizam a análise de fenômenos transitórios, no domínio da freqüência, como forma de detectar e localizar vazamentos.

5. O USO DA RESPOSTA EM FREQÜÊNCIA PARA LOCALIZAR E QUANTIFICAR VAZAMENTOS

A idéia por trás desse método é de que se os transitórios que ocorrem nos sistemas de tubulações são afetados pelas características desses, sejam elas: vazamentos, obstruções, mudanças de diâmetro, registros parcialmente fechados, consumos não autorizados, etc...; o caminho inverso pode ser feito, localizando essas peculiaridades através das alterações que elas provocam na resposta desse sistema a um transitório controlado.

A primeira tentativa em se estabelecer um modelo matemático que localizasse e quantificasse vazamentos através da análise, no domínio da freqüência, da resposta do sistema de abastecimento a uma excitação controlada foi feita por Mpesha (1999, 2001, 2002), porém seus estudos geraram diversos questionamentos, uma vez que os diagramas por ele obtidos não são reproduzíveis com as informações constantes nos trabalhos publicados.

O intuito da proposta está em se gerar uma excitação controlada através da oscilação da abertura de uma válvula, gerando um pequeno transitório, coletar a resposta do sistema de abastecimento a essa excitação (dados de vazão e pressão), converter essas informações para o domínio da freqüência, criar um Diagrama de Resposta em Freqüência (DRF) com esses dados e, através da discrepância dos picos de ressonância, obter a localização do vazamento e conseqüente quantificação do mesmo.

A resposta em freqüência do sistema pode ser obtida através de dois métodos:

- Método da Matriz de Transferência (MMT): a análise dos transitórios é feita diretamente no domínio da freqüência.

- Método das Características (MC): a análise dos transitórios hidráulicos é feita no domínio do tempo e posteriormente convertida para o domínio da freqüência através da Transformada Rápida de Fourier.

5.1. Matriz de Transferência X Método das Características

O Método das Características é um comprovado método de análise de transitórios que pode reproduzir resultados próximos aos dados experimentais através do uso de um apropriado modelo de atrito não-permanente. Entretanto, o tempo computacional necessário para a determinação do DRF pode ser grande. A grade de discretização tempo-espaço também limita o número de freqüências que podem ser representadas dentro do modelo (Lee, 2004).

Como uma alternativa ao método de características para a análise da resposta de freqüência, as equações diferenciais parciais de continuidade e quantidade de movimento são linearizadas, e as variáveis de carga e vazão são adotadas oscilando em torno do seu valor médio. Devido à magnitude de perturbação da válvula geradora do transitório ser pequena, podem ser alcançadas aproximações entre modelo do MC não-linear e as equações linearizadas. A solução das equações lineares resultantes é arranjada na forma de matrizes a fim de relacionar as respostas no domínio da freqüência das cargas e vazões de montante e jusante (Lee, 2004).

Esse último modelo matemático denominado de Método da Matriz de Transferência foi introduzido por Chaudhry (1987) na análise de sistemas com fluxos oscilatórios permanentes e na determinação da resposta em freqüência de sistemas hidráulicos.

Vários trabalhos anteriores demonstram que a resposta em freqüência obtida tanto pelo MC quanto pelo MMT são idênticas, porém para ensaios práticos a utilização do Método das

Características se demonstra mais apropriada, uma vez que os dados de vazão e pressão são coletados em função do tempo. Apesar do Método da Matriz de Transferência ser mais atraente do ponto de vista de programação do modelo computacional, obter a resposta do sistema diretamente em termos da freqüência pode ser um tanto trabalhoso.

Para Palhares (2005) a técnica de resposta em freqüência exige um grande número de medidas, requerendo sempre a intervenção de um operador para manipular os arquivos de dados, a fim de separar a parte transitória da parte permanente da resposta, em cada freqüência pesquisada.

Segundo Lee (2005) a técnica proposta por Chaudhry (1987) de se varrer o sistema a diferentes freqüências, além de tomar um longo tempo, pode trazer danos estruturais à tubulação.

Nessa técnica, o sistema é seqüencialmente excitado por uma perturbação senoidal de uma válvula a diferentes freqüências. A resposta para cada freqüência de entrada é então plotada em função da razão entre entrada e saída. O problema dessa abordagem é que o tempo requerido para se varrer cada freqüência é longo, pois para cada freqüência pesquisada é necessário aguardar que o sistema entre em regime oscilatório com padrão estável. Além disso, a excitação de uma tubulação em freqüências de ressonância traz riscos potenciais de danos ao sistema. Também é necessária a instalação de equipamentos capazes de gerar uma variação de pressão suave e controlada (por exemplo: bombas, turbinas, válvulas motorizadas, etc...) (Lee, 2005).

Uma alternativa mais atrativa seria considerar cada transitório injetado na tubulação como uma combinação das freqüências individuais e aplicar a equação 2 para a derivação da função de resposta em freqüência. Essa abordagem permite que a função de resposta em freqüência

seja inteira e eficientemente extraída a partir de um único teste de qualquer perfil (dado suficiente intervalo de entrada). Essa abordagem também aumenta a flexibilidade no processo de extração (Lee, 2005).

$$H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} \qquad ...(2)$$

onde:

H(ω) := função resposta em freqüência do sistema linear;

Y(ω) := transformada de Fourier do sinal de saída;

X (ω) := transformada de Fourier do sinal de entrada;

Em virtude do foco deste trabalho ser a resposta em freqüência do sistema, sem a aplicação em ensaios práticos, será utilizado o Método da Matriz de Transferência para a obtenção do Diagrama de Resposta em Freqüência.

5.1.1. As Matrizes de Transferência

Para a determinação do Diagrama de Resposta em Freqüência pelo presente método, faz-se necessário o conhecimento das matrizes de transferência para cada elemento do sistema. Segundo Chaudhry (1987) existem três tipos de matrizes de transferência:

- Matriz de transferência campo, ou matriz campo: relativa aos vetores-estado nas duas seções adjacentes de um tubo.
- Matriz de transferência ponto, ou matriz ponto: relativa a qualquer descontinuidade, tais como existência de reduções e válvulas.

- Matriz de transferência total: obtida através da multiplicação de todas as matrizes ponto e campo do sistema.

Lee (2005) observa que cada matriz de transferência determina a oscilação da carga e vazão a jusante através de informações dos elementos a montante. Essas matrizes de transferência podem ser combinadas através de multiplicação a fim de formar uma matriz de transferência total que englobe todo o sistema de tubulação. A multiplicação se inicia no último elemento a jusante e prossegue até atingir o último elemento à montante.

As matrizes de transferência derivadas por Chaudhry (1987) que serão utilizadas neste trabalho são:

- Matriz campo para um segmento de tubo:

$$\begin{Bmatrix} q \\ h \end{Bmatrix}^{n+1} = \begin{bmatrix} \cosh \mu \cdot l & -\dfrac{1}{Zc} \sinh \mu \cdot l \\ -Z_c \sinh \mu \cdot l & \cosh \mu \cdot l \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q \\ h \end{Bmatrix}^{n} \qquad ...(3)$$

onde:

q := vazão[m^3/s];

h := carga [m];

$n+1$:= nó de jusante [-];

μ := função propagação [rad/m]: [$\mu = 1/a\sqrt{-\omega^2 + igA\omega R}$];

a := celeridade de onda [m/s];

ω := freqüência angular [rad/s];

i := número imaginário [$\sqrt{-1}$];

g := gravidade[m/s^2];

A := área [m^2];

R := termo de resistência ao atrito [s/m^3]: [R=(fQ$_0$)/(2gDA^2) para escoamento turbulento e R=(32ν)/(gD^{2}A) para escoamento laminar];

f := fator de atrito [-];

Q_0 := vazão média no tubo [m^3/s];

D := diâmetro do tubo [m];

ν := viscosidade cinemática [m^2/s];

l := comprimento do tubo [m];

Zc := impedância característica [s/m^2]: [$Zc=(\mu a^2)/(i\omega gA)$];

n := nó de montante [-];

- Matriz ponto para uma válvula oscilatória:

$$\begin{Bmatrix} q \\ h \end{Bmatrix}^{n+1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\dfrac{2\Delta H_{V0}}{Q_{V0}} & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q \\ h \end{Bmatrix}^{n} + \begin{bmatrix} 0 \\ \dfrac{2\Delta H_{V0}\Delta\tau}{\tau_0} \end{bmatrix} \qquad ...(4)$$

onde:

q := vazão[m^3/s];

h := carga [m];

$n+1$:= nó de jusante [-];

ΔH_{V0} :=perda de carga na válvula [m];

Q_{V0} :=vazão permanente na válvula [m^3/s];

$\Delta\tau$:=variação de abertura da válvula [-];

τ_0 :=coeficiente de abertura da válvula [-];

n := nó de montante [-];

Já para a modelação do vazamento, será utilizada a matriz ponto obtida por Lee et al. (2004) através da linearização da equação do orifício:

$$\begin{Bmatrix} q \\ h \end{Bmatrix}^{n+1} = \begin{bmatrix} 1 & -\dfrac{Q_{L0}}{2H_{L0}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q \\ h \end{Bmatrix}^{n} \qquad ...(5)$$

onde:

q := vazão[m^3/s];

h := carga [m];

$n+1$:= nó de jusante [-];

Q_{L0} := vazão permanente perdida (vazamento) [m^3/s];

H_{L0} := carga permanente no vazamento [m];

n := nó de montante [-];

Para compreender a dinâmica de criação de um Diagrama de Resposta em Freqüência, foi desenvolvido um programa em MatLab afim de reproduzir o exemplo 8.2 de Chaudhry (1987, p. 244). Na Figura 11 está o diagrama do referido exemplo e na Figura 12 está o diagrama obtido através do programa criado, cujo arquivo fonte consta do Apêndice A deste trabalho.

Como pode ser observado no modelo computacional, não há a necessidade de inúmeras iterações para se obter o DRF através do Método da Matriz de Transferência.

A seguir serão exploradas as técnicas idealizadas por Mpesha (1999, 2001, 2002) e Lee et al. (2004, 2005) que utilizam esse tipo de Diagrama de Resposta em Freqüência para localizar vazamentos.

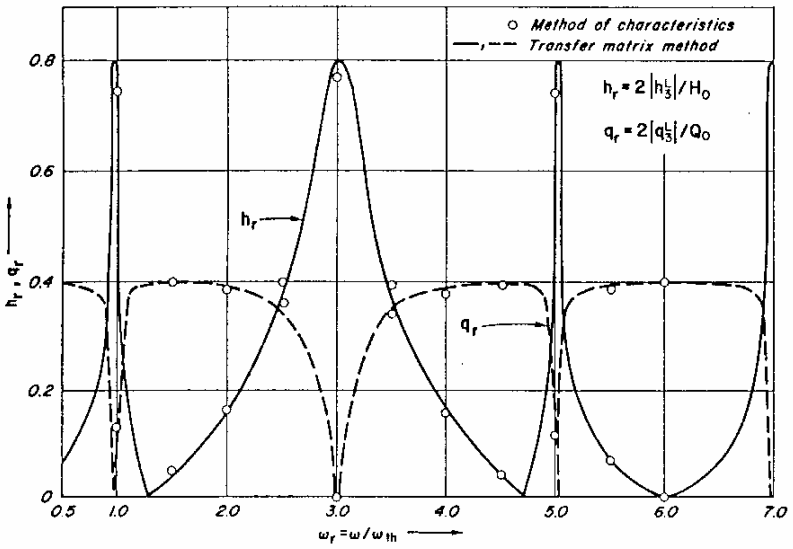


Figura 11 - DRF do exemplo 8.2 de Chaudhry (1987, p. 244)

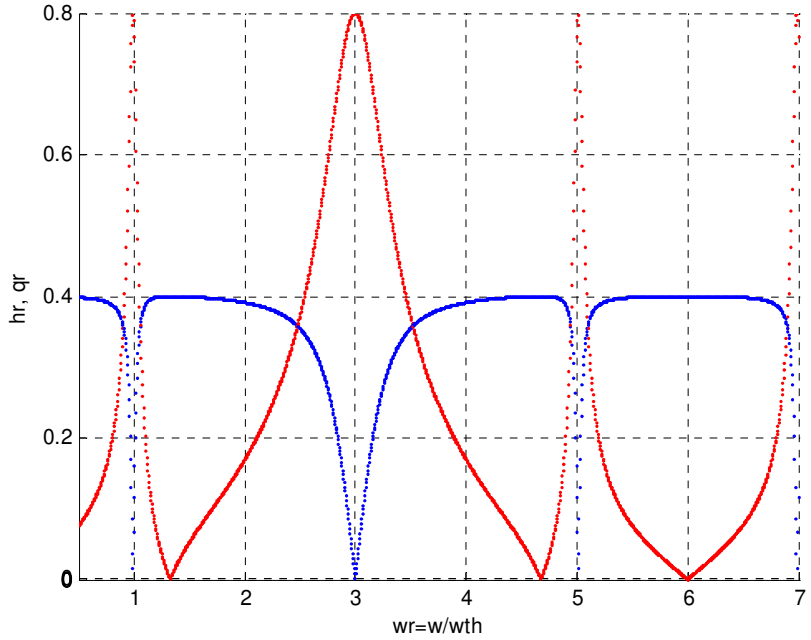
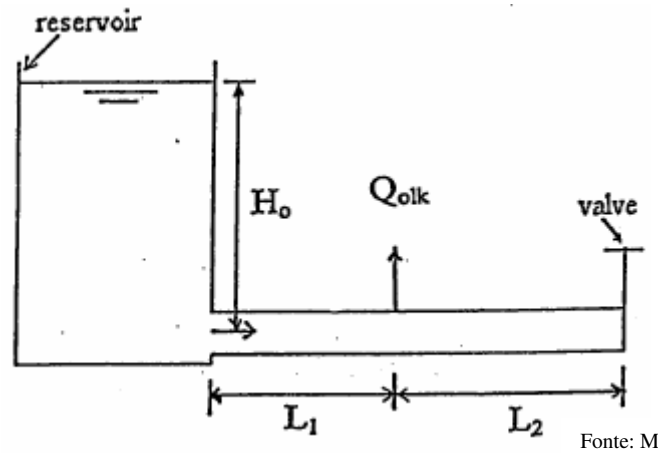


Figura 12 - DRF obtido através do programa do Apêndice A

5.2. O modelo obtido por Mpesha (1999, 2001, 2002)

Mpesha (1999, 2001, 2002) desenvolveu duas abordagens diferentes. Na primeira abordagem, um fluxo oscilatório estável, produzido pelo abrir/fechar periódico de uma válvula situada a jusante e no final da tubulação, é analisado no domínio da freqüência pelo método da matriz de transferência. Na segunda abordagem, o fluxo transitório produzido pelo abrir/fechar gradual não-periódico da válvula é analisado no domínio do tempo pelo método das características e os resultados são transformados para o domínio da freqüência pela Transformada Rápida de Fourier.



Fonte: Mpesha (1999)

Figura 13 - Sistema modelado por Mpesha (1999) para um único vazamento

Um Diagrama de Resposta em Freqüência (DRF) é preparado em ambas as abordagens (Figura 14). Para um sistema com vazamentos, esse diagrama apresenta picos adicionais de amplitude da pressão ressonante (aqui denominados de picos secundários de amplitude da pressão) que são menores que os picos de amplitude da pressão ressonante para o sistema se não houver vazamentos (aqui denominados de picos primários de amplitude).

A localização do vazamento é determinada pelas freqüências dos picos primários e

secundários de amplitude da pressão e a vazão perdida é determinada pelas amplitudes máximas e mínimas de vazão, através das seguintes equações empíricas:

$$L_i = \frac{a_i}{3/4\,\Delta\omega_{r_i}} \qquad ...(6)$$

e

$$q_{0lk} = \frac{1}{2} Q_0 (q_{r_{máx}} - q_{r_{mín}}) \qquad ...(7)$$

onde:

L_i := comprimento do trecho de tubo até o vazamento [m];

a_i := celeridade de onda no trecho de tubo L_i [m/s];

$\Delta\omega_i$:= diferença em freqüência relativa entre os picos primários e secundários de amplitude da pressão [-];

q_{0lk} := vazão média perdida (vazamento) [m^3/s];

Q_0 := vazão média no tubo [m^3/s];

q_r := vazão adimensionalizada [$q_r = Q(\omega)/Q_0$];

Como comentado anteriormente, esse trabalho gerou diversos questionamentos, segundo Lee (2003), os diagramas apresentados por Mpesha diferem daqueles presentes em trabalhos anteriores, tais como Chaudhry (1987). A resposta em freqüência para um sistema de tubo simples (RTV) apresenta picos de ressonância localizados na 1ª, 7ª, 13ª,..., harmônicas. Do conhecimento clássico da teoria de ondas, um tubo simples com condições de contorno assimétricas deveria possuir picos de ressonância em todas as harmônicas ímpares, isto é, 1ª, 3ª, 5ª, ..., harmônicas. O desvio das freqüências de ressonância das harmônicas ímpares para um sistema de tubos pode ocorrer nos casos onde há diferenças nas impedâncias entre os segmentos de tubos (por exemplo, diâmetros diferentes, tubos em série...). Entretanto o

sistema apresentado no trabalho de Mpesha (2002) não possui elementos de impedância que justifique a grandeza do deslocamento.

Além do exposto, o trabalho apresentado por Mpesha propõe que a presença de um vazamento no sistema de tubulação resultaria na formação de picos de ressonância adicionais no diagrama de resposta em freqüência. O que não foi comprovado em trabalhos posteriores, tais como Lee (2003, 2004) e Palhares (2005), inviabilizando a utilização do método, uma vez que o mesmo se baseia exatamente na análise desses picos adicionais.

Palhares (2005) afirma ainda, que não houve observância das cautelas que devem ser tomadas ao se analisar a resposta de um sistema não linear, modificada para o domínio da freqüência pela Transformada Rápida de Fourier (FFT), principalmente se não for bem especificado o tipo de perturbação imposta ao sistema.

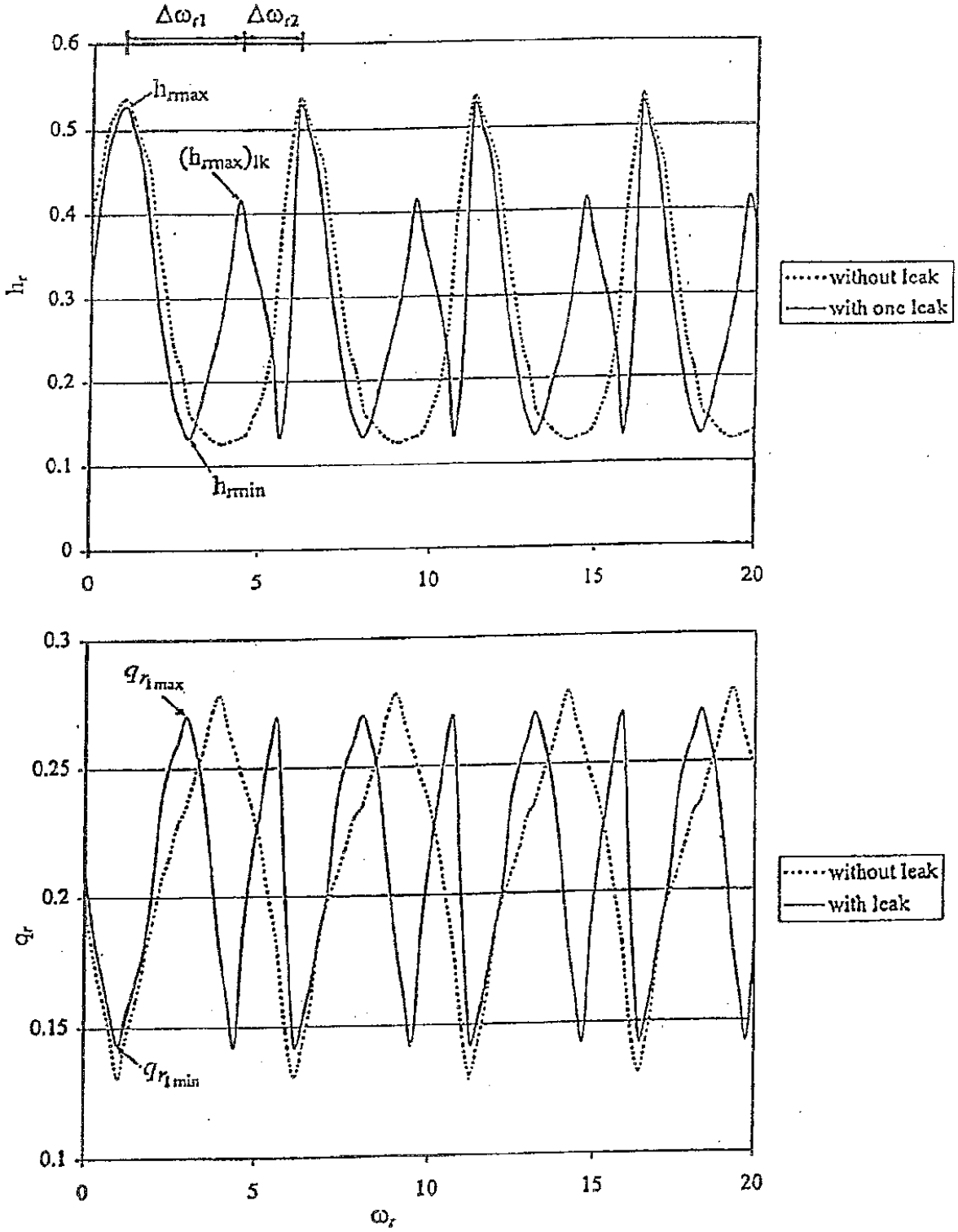


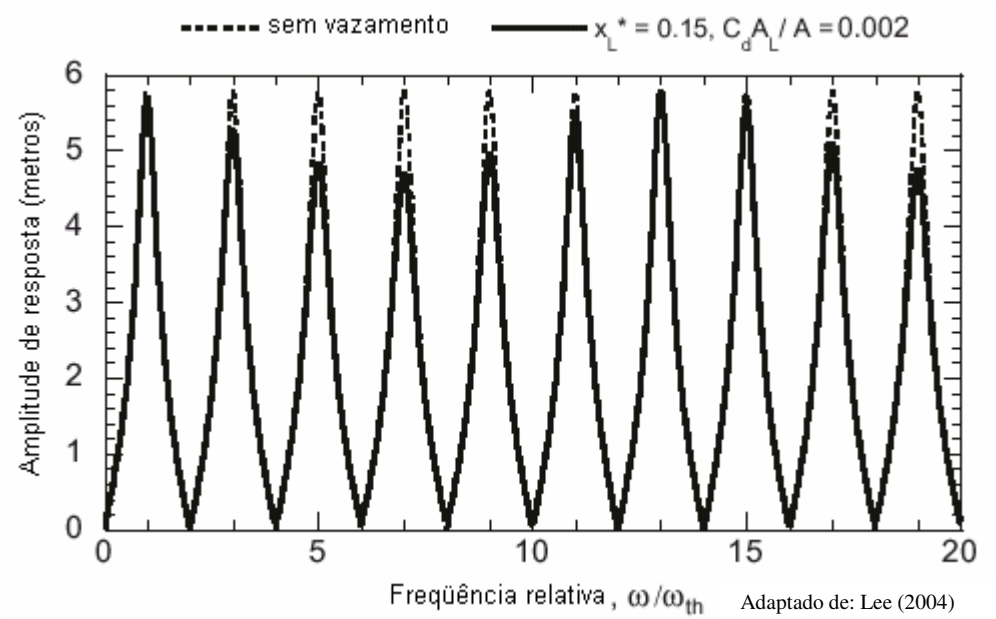
Figura 14 – Diagrama de Resposta em Freqüência obtido por Mpesha (1999)

5.3. O modelo obtido por Lee et al. (2004, 2005)

Conforme observado por Lee et. al. (2005), e confirmado através da Figura 15 e 16, o DRF para um sistema sem vazamentos produz um diagrama com picos de ressonância de mesma amplitude e harmônicas também espaçadas igualmente. O impacto nesse diagrama da existência de um único vazamento é dependente da freqüência e resulta em um amortecimento desigual dos picos das harmônicas ao longo do eixo da freqüência.

Essa constatação também aparece em outros trabalhos, tais como Wang et al. (2002) e Palhares (2005), o que reforça os questionamentos a respeito dos diagramas obtidos por Mpesha (1999).

Segundo Lee et. al. (2005) esse padrão de amortecimento imposto ao DRF pela existência do vazamento fornece informações importantes sobre o mesmo, através das quais é possível localizar o vazamento por um método baseado na classificação dos picos de ressonância por ordem de grandeza.



Adaptado de: Lee (2004)

Figura 15 – Diagrama de Resposta em Freqüência obtido por Lee et al. (2004)

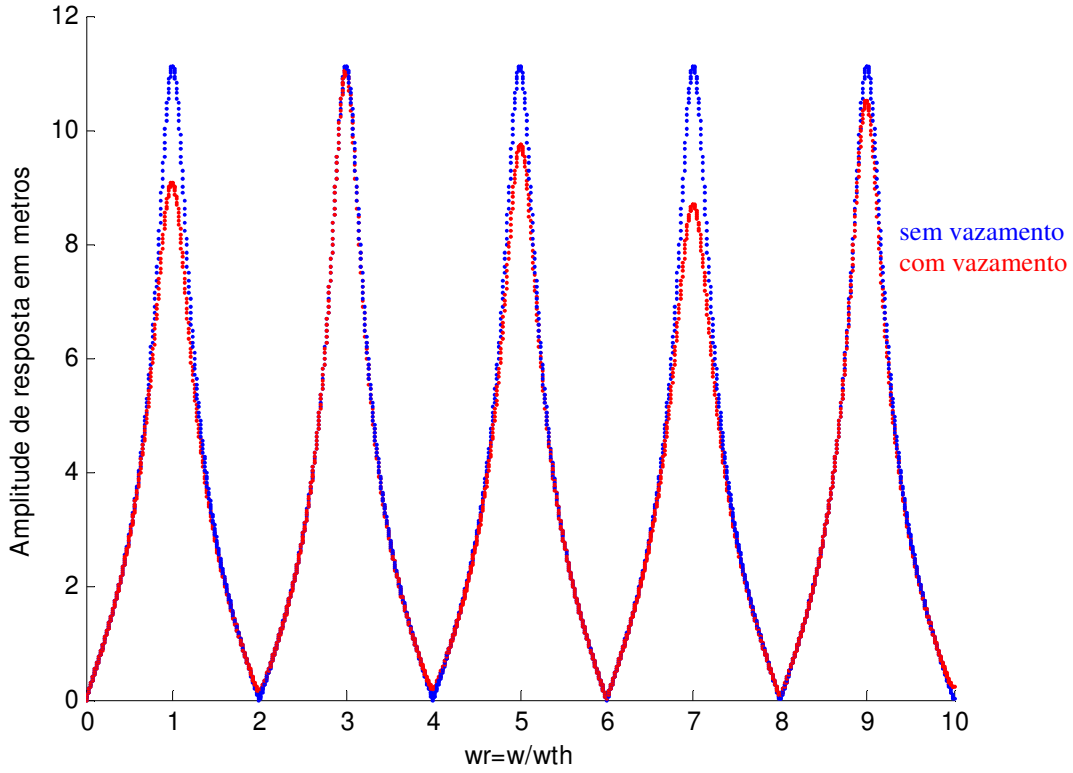


Figura 16 - DRF obtido através do programa do apêndice B

Esse método intitulado *Resonance Peak-Sequencing Method* permite a localização do vazamento entre uma região do conduto, através do ajuste de um *ranking* e a entrada em uma tabela de referência.

Para entender a operação desse método é necessária a análise do impacto que a existência de um vazamento impõe ao DRF. Partindo da primeira abordagem proposta por Mpesha, na qual é utilizado o Método da Matriz de Transferência para se conseguir a resposta em freqüência, Lee et al. (2004) obteve uma solução analítica (equação 8) que descreve tal impacto:

$$|h_b| = \frac{1}{\frac{\tau_0}{2\Delta H_{V0}\Delta\tau}\left(1+\frac{2\Delta H_{V0}}{Q_{V0}}\left(\frac{Q_{L0}}{4H_{L0}}\left(1+\cos\left(2\pi\cdot x_L^*\cdot m-\pi\left(1+x_L^*\right)\right)\right)\right)\right)} \qquad ...(8)$$

onde:

h_b := carga na válvula [m];

τ_0 := coeficiente de abertura da válvula [-];

ΔH_{V0} := perda de carga na válvula [m];

$\Delta\tau$:= variação de abertura da válvula [-];

Q_{V0} := vazão permanente na válvula [m^3/s];

Q_{L0} := vazão permanente perdida (vazamento) [m^3/s];

H_{L0} := carga permanente no vazamento [m];

x_L^* := posição adimensionalizada do vazamento [x_L^*=x_L/L];

x_L := posição do vazamento medida a partir do contorno a montante [m];

m := número do pico [-];

A interpretação física dessa aproximação é similar a negligenciar todas as reflexões de grande ordem do vazamento (por exemplo, aquelas geradas por reflexões múltiplas fora do vazamento).

A forma da equação 8 indica que as amplitudes das freqüências de ressonância do DRF, no caso do tubo vazando, varia como uma forma senoidal invertida.

O maior componente do padrão na equação 8 possui freqüência em termos do número do pico de ressonância, m; de x_L^*; uma fase de $\pi(1+x_L^*)$ e a grandeza de $(Q_{L0}\cdot\tau_0)/(4\cdot\Delta\tau\cdot Q_{V0}\cdot H_{L0})$.

A análise do padrão pode, portanto, fornecer informações relativas à posição e ao tamanho do vazamento. Entretanto, é necessário ter precaução antes de se aplicar diretamente a equação 8, pois a mesma é válida somente em cada freqüência de ressonância e ocorre no denominador

da equação 8.

O padrão senoidal teórico imposto pelo vazamento está então agindo nas amplitudes dos picos invertidos e amostrado com uma freqüência 1/m ≤ 1, dando um limite de Nyquist de 1/m ≤ 0,5.

Como o valor de x_L^* irá variar entre 0 e 1, isso implica que para x_L^* >0,5, o padrão imposto sofrerá distorções e o padrão de freqüência original se manifestará ele próprio como uma nova freqüência que é observável dentro do intervalo admitido x_L^* =[0;0,5]. Este processo é comumente conhecido como *"aliasing"* e a nova freqüência distorcida será obtida por

$$\omega'_{signal} = 2\omega_{nq} - \omega_{signal} \qquad ...(9)$$

onde ω'_{signal} e ω_{signal} são o sinal distorcido e o original da freqüência, respectivamente, e ω_{nq} é a freqüência Nyquist, igual à metade da freqüência de amostragem. Para sinais onde $\omega_{signal} < 2\omega_{nq}$, a fase do sinal original sofre uma reversão:

$$\phi'_{signal} = - \phi_{signal} \qquad ...(10)$$

onde ϕ'_{signal} e ϕ_{signal} são a fase distorcida e a original do sinal, respectivamente.

Da equação 8, a freqüência observada no padrão de amortecimento do vazamento também é a posição adimensionalizada do vazamento. Como o padrão induzido do vazamento é amostrado em cada pico de ressonância, a freqüência de amostragem é dada por 1/m ≤ 1 e a freqüência Nyquist é 1/m ≤ 0,5.

Para vazamentos posicionados além do ponto central da tubulação, o padrão do vazamento induzido sempre sofrerá o processo de *"aliasing"*.

A influência da *"aliasing"* sobre o padrão de vazamento induzido no DRF é que para cada padrão de vazamento induzido há duas freqüências possíveis – e conseqüentemente duas localizações de vazamentos – situadas em posições simétricas na tubulação, como dado pela equação 9.

Uma posição do vazamento com a freqüência abaixo da freqüência Nyquist, estando localizada na metade a montante do tubo, e a outra acima da freqüência Nyquist, correspondente à metade a jusante do tubo.

A fase do sinal observada pode ser usada para determinar se o sinal do vazamento imposto originalmente sofreu processo de *"aliasing"*.

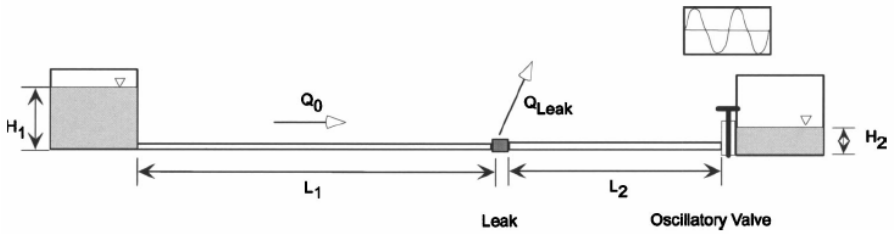
Da equação 8 a fase de um sinal com $\omega_{signal} < \omega_{nq}$ é $\pi(1+x_L^*)$ e está localizado entre $-\pi < \phi < -\pi/2$. Para um sinal com *"aliasing"*, a fase se torna $-\pi(1+x_L^*)$ no intervalo de $0 < \phi < \pi$.

As propriedades do padrão de vazamento induzido são as seguintes:

- A freqüência do padrão de amortecimento do vazamento induzido é x_L^* ou $(1-x_L^*)$.
- A fase do padrão de amortecimento do vazamento induzido é $\pm\pi(1+x_L^*)$ é está localizado no terceiro quadrante do círculo unitário quando o vazamento está na metade a montante do tubo e no primeiro quadrante quando o vazamento está localizado na metade a jusante.
- A grandeza do padrão do vazamento induzido é $(Q_{L0}\cdot\tau_0)/(4\cdot\Delta\tau\cdot Q_{V0}\cdot H_{L0})$, dada na equação 8 como o coeficiente da função cosseno do vazamento gerado.

Um exemplo prático do impacto que a existência de um vazamento impõe ao DRF é apresentado na Figura 18, que contém o DRF do sistema apresentado na Figura 17 com

variação dos parâmetros do vazamento. O DRF é extraído do sistema de tubulação na válvula oscilatória a jusante.



Fonte: Lee (2005)

Figura 17 - Sistema modelado por Lee (2005) para um único vazamento

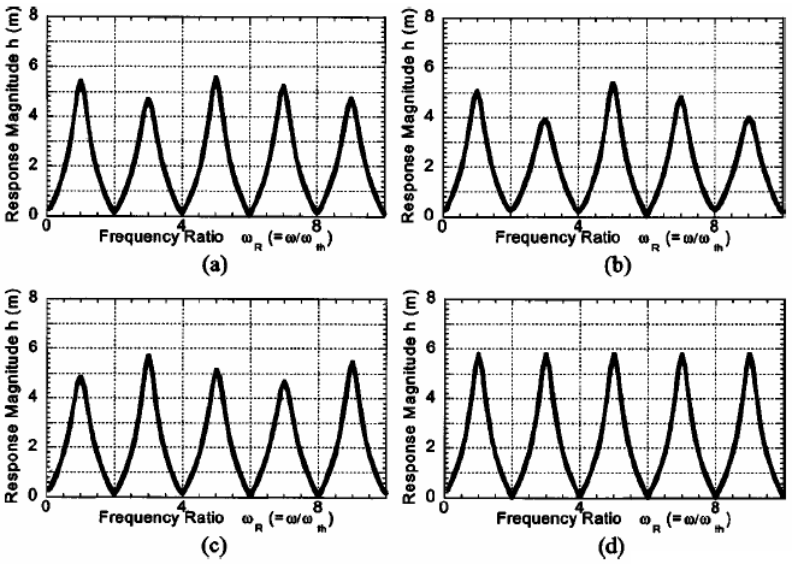
Quatro situações são apresentadas:

(a) vazamento na posição 700m com C_dA_L 0,00014m^2;

(b) vazamento na posição 700m com C_dA_L 0,00028m^2 ;

(c) vazamento na posição 1.400m com C_dA_L 0,00014m^2;

(d) sem vazamento.



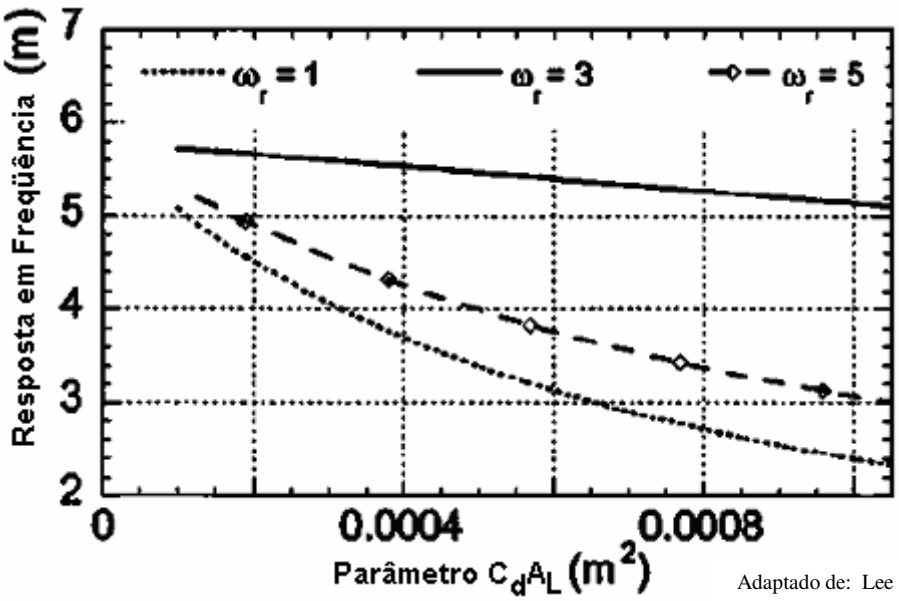
Fonte: Lee (2005)

Figura 18 - Impacto de um vazamento no DRF (Lee et al., 2005)

Através da classificação dos picos de ressonância da Figura 18 por ordem decrescente de

amplitude é possível sintetizar o perfil do DRF. No item (a) a classificação seguiria os picos 3, 1, 4, 5 e 2, para o vazamento posicionado a 700 m com C_dA_L 0,00014m^2; para o item (b) onde o tamanho do vazamento dobra para 0,00028m^2, porém a posição do mesmo permanece inalterada, a classificação dos picos continua sendo a mesma 3, 1, 4, 5 e 2, apenas com um leve amortecimento na amplitude dos picos. Já, no item (c) quando é mantido o tamanho do vazamento em 0,00014m^2, porém com o dobro da distância, 1400m, a classificação dos picos é totalmente alterada para 2, 5, 3, 1 e 4.

O impacto dos parâmetros do vazamento no padrão dos picos de ressonância é melhor explicitado através das figuras 19 e 20. Essas figuras mostram a variação da grandeza de resposta dos três primeiros picos de ressonância ($\omega r = \omega/\omega_{th}$ = 1, 3 ,5), medida na válvula oscilatória da Figura 17, em função do tamanho do vazamento e de sua localização, respectivamente.

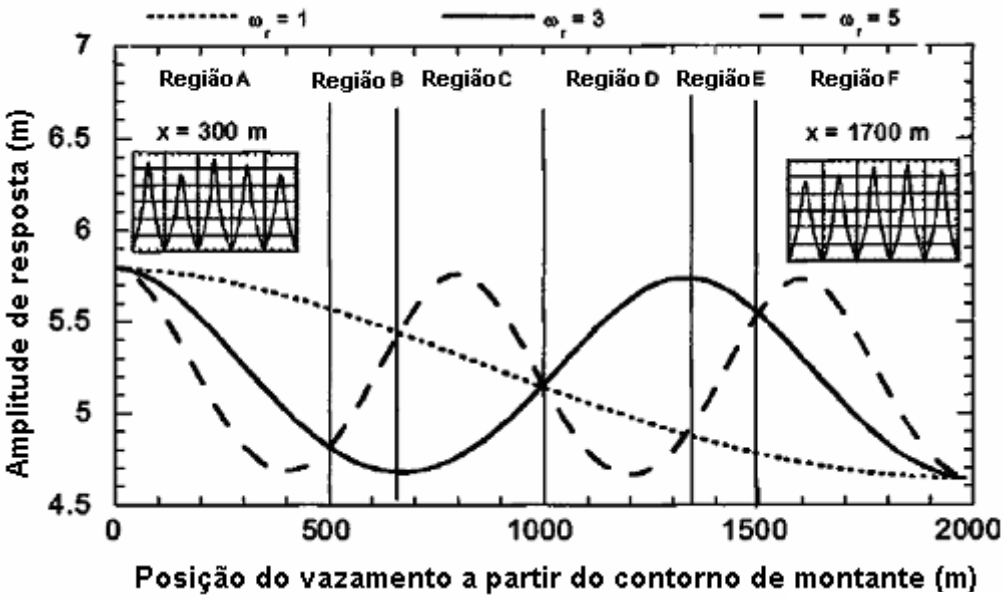


Adaptado de: Lee (2005)

Figura 19 - Impacto do tamanho do vazamento na resposta em freqüência dos três primeiros picos das harmônicas

Na Figura 19 assume-se que o vazamento está fixado na posição 1400m e, através da variação do parâmetro C_dA_L obtém-se um gráfico que indica que a resposta em freqüência e o tamanho do vazamento são grandezas inversamente proporcionais. Quanto maior for o vazamento, menor será a amplitude dos picos de ressonância. Enquanto o grau de decréscimo da resposta varia levemente entre os picos de ressonância, a ordem dos picos, classificados em termos de grandeza, permanece a mesma, não sendo influenciada pelo tamanho do vazamento.

Já na Figura 20, onde o valor de C_dA_L é fixado em 0,00014 m^2 e varia-se a localização do vazamento, é possível observar o impacto que a posição do vazamento impõe à resposta do sistema, alterando significativamente a amplitude dos picos. Como pode ser observado na referida figura, as respostas dos picos de ressonância cruzam entre si em cinco posições ao longo da tubulação, dividindo o sistema em seis seções.



Adaptado de: Lee (2005)

Figura 20 - Impacto da posição do vazamento na resposta em freqüência dos três primeiros picos das harmônicas

Segundo Lee (2005), a intersecção de quaisquer duas curvas indica exatamente a posição do vazamento. Entre cada ponto de intersecção está uma região onde os picos de ressonância,

quando classificados em ordem de grandeza, são arranjados em uma seqüência particular. Essa seqüência permanece constante para cada região e representa um perfil correspondente no DRF. Os perfis do DRF medidos na válvula a jusante para o caso de vazamentos localizados em duas posições diferentes na tubulação estão inseridos na Figura 20.

Quando um vazamento está presente em determinada região da tubulação, o perfil do DRF resulta em uma codificação seqüencial para aquela determinada região. O perfil de um DRF medido pode, portanto, ser usado como uma forma de localização de vazamentos para um sistema de tubulação simples.

A Tabela 2 mostra um resumo dessas seqüências para os três primeiros picos das harmônicas, através da qual é possível localizar um vazamento em determinada seção da tubulação. Os pontos de intersecção que aparecem na Figura 20, também constam da Tabela 2 e correspondem exatamente à localização do vazamento.

Tabela 2 - Classificação dos picos e posição do vazamento correspondente

Classificação dos picos		**Trecho de localização do vazamento (% do tubo a partir do contorno de montante)**
$h^*_{\omega r1} > h^*_{\omega r3} > h^*_{\omega r5}$	(Região A)	0-25%
$h^*_{\omega r1} > (h^*_{\omega r3} = h^*_{\omega r5})$		25%
$h^*_{\omega r1} > h^*_{\omega r5} > h^*_{\omega r3}$	(Região B)	25-33%
$(h^*_{\omega r5} = h^*_{\omega r1}) > h^*_{\omega r3}$		33%
$h^*_{\omega r5} > h^*_{\omega r1} > h^*_{\omega r3}$	(Região C)	33-50%
$h^*_{\omega r5} = h^*_{\omega r1} = h^*_{\omega r3}$		50% (ou 0 ou 100%)
$h^*_{\omega r3} > h^*_{\omega r1} > h^*_{\omega r5}$	(Região D)	50-66%
$h^*_{\omega r3} > (h^*_{\omega r5} = h^*_{\omega r1})$		66%
$h^*_{\omega r3} > h^*_{\omega r5} > h^*_{\omega r1}$	(Região E)	66-75%
$(h^*_{\omega r5} = h^*_{\omega r3}) > h^*_{\omega r1}$		75%
$h^*_{\omega r5} > h^*_{\omega r3} > h^*_{\omega r1}$	(Região F)	75 a 100%

Adaptado de: Lee (2005)

Para demonstrar como essa codificação seqüencial pode ser usada para localizar um

vazamento em um sistema RTV, assume-se que um DRF medido na válvula de jusante tenha a seqüência [$h_{\omega r3}$ (Pico 2) > $h_{\omega r5}$ (Pico 3) > $h_{\omega r1}$ (Pico 1)] quando os três primeiros picos de ressonância são classificados em ordem crescente de grandeza. A partir da Tabela 2, a classificação indica que o vazamento está localizado no intervalo entre 66-75% do comprimento total do tubo a partir de contorno superior.

Lee (2005) ainda afirma que tabelas similares podem ser geradas para um número maior de picos, o que resultaria num ajuste fino da precisão do método. Por exemplo, a utilização dos seis primeiros picos das harmônicas resultaria na divisão do tubo em 32 partes.

Segundo Lee (2005), a geração de tal codificação pode ser executada automaticamente através da seguinte equação:

$$h_{\omega_m} = \cos\left(\frac{(2m-1)\pi x_L}{l}\right) \qquad ...(11)$$

onde:

$h_{\omega r_n}$:= resposta do correspondente pico harmônico;

m := número do pico [-];

x_L := posição do vazamento medida a partir do contorno a montante [m];

l := comprimento do tubo [m];

As intersecções de diferentes curvas de resposta, além das amplitudes relativas dos picos em cada ponto de intersecção, podem ser determinadas através da equação 11. Isso permite a formação de um código para cada posição do vazamento ou região na tubulação.

Segundo o próprio Lee (2005), o método por ele desenvolvido é melhor utilizado quando em

conjunto com o método de ressonância inversa, afim de limitar a extensão do espaço de busca usado no processo de calibração inversa.

A técnica de ressonância inversa é similar ao método de transitório inverso proposto por Liggett e Chen (1994), consistindo em minimizar o somatório das diferenças quadradas entre valor medido e valor modelado das funções de resposta em freqüência, através da variação do tamanho (C_dA_L) e da posição do vazamento (x_L) dentro do modelo da matriz de transferência. O parâmetro C_dA_L altera a vazão perdida dentro da matriz de transferência do vazamento (equação 5) e a posição do vazamento é modificada pelo comprimento das seções do tubo, l , entre o vazamento e o contorno do sistema (equação 3). A função objetivo é obtida através do critério dos mínimos quadrados:

$$E = \sum_{j=1}^{M} \left[h_j^m - h_j \right]^2 \qquad ...(14)$$

onde:

E := valor da função objetivo [m^2];

h_j^m := amplitude medida da resposta no domínio da freqüência, para a freqüência j [m];

h_j := amplitude calculada da resposta no domínio da freqüência, para a freqüência j [m];

M := número de pontos medidos [-];

O algoritmo de minimização usado por Lee et al. (2005), foi o SCE (shuffled complex evolution) criado por Duan et al. (1993) – vide anexo A. O algoritmo SCE executa uma busca global baseada no método simplex e não necessita de informações do gradiente local. Os parâmetros de entrada para o algoritmo foram: número de complexos= número de parâmetros ajustados =2, erro de tolerância = $1x10^{-12}$, tamanho do vazamento (C_dA_L) variando de 0,0 a 0,005, e posição do vazamento variando de 0,0 até o comprimento total da tubulação.

Lee (2005) tem a opinião de que a combinação dessas duas técnicas, a classificação seqüencial dos picos e a ressonância inversa, resulta num eficiente método de localização de vazamentos para um sistema de tubulação simples.

5.3.1. Impacto do atrito não-permanente

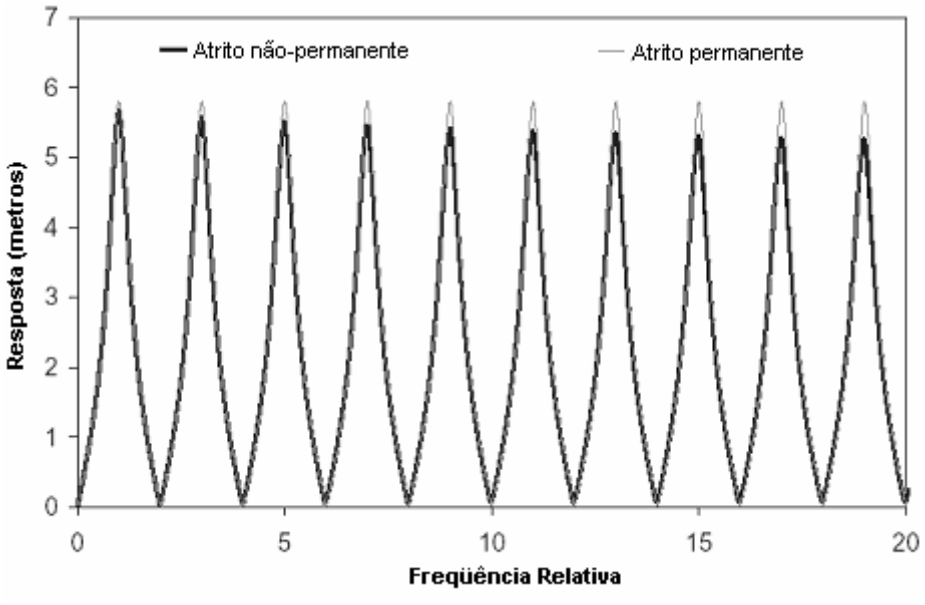
O atrito não-permanente é um fenômeno dependente da freqüência que afeta o comportamento dos sinais transitórios, e é o resultado direto das perdas associado com a mudança abrupta dos perfis de velocidade no fluxo não-permanente (Lee, 2005).

Uma vez que tal efeito é dependente da freqüência, espera-se que provoque alterações no perfil do diagrama de resposta em freqüência. Segundo observações feitas por Lee (2005) essas mudanças ocorrem de forma gradual na amplitude dos picos de ressonância do DRF, causando grande atenuação às altas freqüências.

Esse padrão de amortecimento se diferencia daquele imposto pela presença de vazamentos, pois cria uma tendência suave de amortecimento a todos os picos de ressonância, como pode ser verificado na Figura 21.

O impacto do atrito não-permanente pode ser incorporado em ambos procedimentos de detecção de vazamentos, a classificação seqüencial dos picos e a ressonância inversa, de forma a aumentar sua aplicabilidade a sistemas de tubulações reais.

Para o método de ressonância inversa, o atrito não permanente pode ser incluído no cálculo do DRF usando o modelo matemático para atrito não-permanente derivado por Vitkovský et al. (2003).



Adaptado de: Lee (2004)

Figura 21 - Comparação entre os resultados com e sem atrito não permanente para o caso de um sistema de tubulação sem vazamentos

Já para a técnica de classificação seqüencial de picos, a remoção da distorção imposta pelo atrito não-permanente aos picos de ressonância, pode ser feita por um conjunto de fatores de proporcionalidade derivados numericamente para o caso de um sistema intacto, sem vazamentos. Esses fatores de proporcionalidade são obtidos através da comparação dos resultados entre atrito permanente e não-permanente, através da seguinte equação:

$$SF(\omega) = \frac{h_s(\omega)}{h_{U+S}(\omega)} \qquad ...(15)$$

onde:

$SF(\omega)$:= fator de proporcionalidade (*scaling factor* em inglês) [-];

$h_s(\omega)$:= resposta para o caso de atrito permanente [m];

$h_{U+S}(\omega)$:= resposta para a combinação entre atrito permanente e não-permanente [m];

Esses fatores de proporcionalidade removem a tendência imposta pelo atrito não-permanente aos picos de ressonância do DRF, permitindo que a classificação seqüencial de picos seja

aplicada com maior precisão na localização de vazamentos ao longo de sistemas de tubulações.

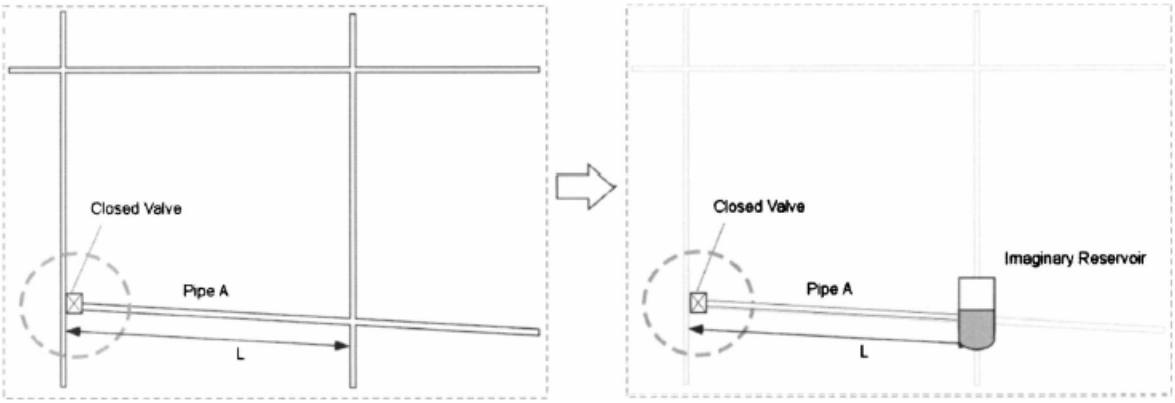
5.3.2. Aplicação em sistemas complexos

Para o caso de sistemas mais complexos, com várias tubulações, a técnica de classificação de picos não apresenta resultados satisfatórios. Segundo Lee (2005) como o DRF para um sistema de redes não é uniforme, a localização de vazamentos através dos picos de ressonância – para o sistema inteiro – torna-se impraticável.

Lee (2005) aconselha que o sistema seja subdividido em segmentos de tubos e que o DRF seja determinado isoladamente para cada trecho. Isso é possível na prática, pois os sistemas de distribuição normalmente possuem válvulas que, em caso de serviços de manutenção, têm a função de isolar trechos de redes. Desta forma, qualquer sistema pode ser subdivido em vários tubos unitários onde o DRF pode ser extraído. Isso pode ser realizado através do fechamento das válvulas em ambas as extremidades do trecho, conseqüentemente isolando esse determinado trecho do restante do sistema, porém o mais indicado seria o fechamento em apenas uma das extremidades, mantendo a rede pressurizada durante todo o teste.

Esse procedimento pode ser exemplificado através da Figura 22, onde o fechamento de uma válvula introduz uma condição de contorno ao tubo "A", e a injeção de uma perturbação adjacente à válvula fechada gera o sinal transitório necessário à análise. Esse transitório poderia ser gerado por uma perturbação controlada de uma válvula lateral de descarga, situada próxima à válvula fechada. Consistindo inicialmente numa pulsação da pressão de entrada, seguida das reflexões da tubulação no intervalo de tempo $2l/a$, e finalmente das reflexões do resto do sistema. Qualquer vazamento nessa seção do tubo irá criar um sinal refletido que retornará à estação de medição no intervalo de tempo $2l/a$ e os dados do transitório,

coletados nesse exato momento, conterão toda a informação a respeito da integridade desse trecho de rede.



Fonte: Lee (2005)

Figura 22 - Procedimento para análise de sistemas complexos

Esse intervalo inicial de dados (t=0 a t=2l/a) pode ser extrapolado para produzir um sinal sintético que oscila no período fundamental da seção do tubo, assumindo-se a hipótese de existência de um reservatório na extremidade posterior do tubo, tal qual aparece na Figura 22. Como o período para uma seção de tubo com condições de contorno assimétricas é 4l/a, os dados coletados originalmente para 2l/a necessitam primeiramente ser estendidos para cobrir todo o período de oscilação. Uma construção aproximada para a segunda metade do período para a reflexão de um reservatório é dada pela inversão dos dados originais da primeira seção 2l/a a fim de produzir o período total. O sinal sintético, consistido de uma série de períodos construídos, é então analisado usando o procedimento já visto em 5.1 e a equação 3 para produzir o DRF da seção do tubo.

6. CONCLUSÕES

Nenhum método de localização de vazamentos é onipotente. É do conhecimento e da utilização de uma gama cada vez maior de técnicas que provêm uma capacidade de localização de vazamentos com maior precisão, num espaço de tempo menor e com mão-de-obra cada vez mais otimizada.

A despeito de todos os avanços tecnológicos nessa área, os métodos mais antigos ainda têm seu espaço garantido no dia-a-dia das companhias de saneamento.

Com relação às técnicas que usam a modelação matemática e computacional para a detecção e localização de vazamentos, há uma série de fatores que influenciam a sua utilização, desde a mão-de-obra qualificada e capacitada, passando pelo conhecimento exato das singularidades existentes no campo, até o uso de equipamentos e técnicas de medição confiáveis. Uma vez que, mesmo que se consiga um modelo que retrate a realidade do sistema de abastecimento, a integridade dos dados obtidos nas medições de campo é de fundamental importância para o sucesso desse método.

A respeito da obtenção do DRF, em termos práticos, a coleta de dados de campo diretamente no domínio da freqüência é um tanto trabalhosa e demorada, sendo mais desejável a utilização de dados no domínio do tempo, tendo a análise de transitórios feita pelo Método das Características e posteriormente transformada para o domínio da freqüência através da Transformada de Fourier. Para trabalhos teóricos, o uso do Método da Matriz de Transferência é mais atraente do ponto de vista de programação do modelo computacional, uma vez que a resposta em freqüência é obtida diretamente, sem iterações.

Apesar de Lee et al. (2005) encontrar uma forma que possibilitaria a aplicação de seu método a sistemas complexos, é improvável que essa técnica seja aplicada na prática, pois demandaria uma enorme mão-de-obra para manobrar inúmeros registros, apenas com a intenção de se obter a análise no domínio da freqüência. Por isso, seu método é mais indicado para redes adutoras, em especial àquelas destituídas de derivações e que contenham um mínimo de singularidades.

Essa técnica é aplicável tanto para as adutoras novas quanto para as já existentes, pois não há necessidade de ensaio prévio para a comparação dos diagramas obtidos (entre rede intacta e a mesma rede com vazamentos), tal como preconizava Mpesha.

Pode-se, inclusive, definir pontos permanentes de acesso à rede visando seu monitoramento, e no caso de adutoras novas, essas instalações físicas poderiam ser previstas em projeto.

O mais plausível seria a junção do método de classificação seqüencial de picos com outra técnica já conhecida, servindo de exemplo o correlacionador de ruídos e a injeção de gás.

LISTA DE REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS – ABENDE. **Detecção de vazamentos não-visíveis – Métodos Acústicos**. Apostila do curso de certificação em ensaio não-destrutivo de estanqueidade - detecção de vazamentos não-visíveis de líquidos sob pressão em tubulações enterradas. 2003. 181 p.

BLACK, P. **A review of pipeline leak detection technology.** Pipeline systems, B. Coulbeck and E. Evans eds., Kluwer Academic, Dordrecht, The Netherlands. 1992. p. 287-297.

CHAUDHRY, M.H. **Applied hydraulic transients.** 2nd Edition, Van Nostrand Reinhold, New York. 1987. 273 p.

_____. **Resonance in pressurized piping systems.** Journal of Hydraulics Div. ASCE, 96(9). 1970. p. 1819-1839.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO - SABESP. **Manual de Operação: Armazenadores de Ruídos.** 2003. 50 p.

_____. **Net-TA: Ficha de Indicador de Desempenho – Índice de Perdas na Adução**. Disponível na Intranet Sabesp: <http://10.7.198.155/indicadores/ind_pfat.asp>. Acesso em 12 de março de 2004.

DUAN, Q.Y.; GUPTA, V.K.; SOROOSHIAN, S. **Shuffled Complex Evolution Approach for Effetive and Efficient Global Minimization**. Journal of Optimization Theory and Applications, Vol. 76, No.3, March 1993, p. 501-521.

FARLEY, M.; TROW, S. **Losses in Water Distribution Networks.** IWA Publishing.

London. 2003.

FUNDAÇÃO SISTEMA ESTADUAL DE ANÁLISE DE DADOS (SEADE). **DEFESP – Demanda Futura por Saneamento no Estado de São Paulo (1996-2020)**. Banco de dados.

GOTOH, K. et al. **Recent techniques in leak detection**. General Report 4 - 17th International Water Supply Congress and Exhibition. AIDE. Rio 12-16 Sept.1988. p. 19.

HUNAIDI, O. et al. **Leak Detection methods for plastic water distribution pipes**. AWWA Research Foundation. 1999. 142 p.

LEE, P.J. et al. **Discussion of "Leak detection in pipe by frequency response method using a step excitation" by W. Mpesha, M.H.Chaudhry and S.L.Gassman, Journal of Hydraulic Research 40 (1) (2002) p. 55-62.** In: Journal of Hydraulic Research, Vol. 41, No.2 (2003), p. 221-223.

_____. **Frequency response coding for the location of leaks in single pipeline systems**. International Conference on Pumps, Electromechanical Devices and Systems Applied to Urban Water Management, IAHR and IHR. 2003.

_____. **Leak location using the pattern of the frequency response diagram in pipelines: a numerical study**. Journal of Sound and Vibration. Elsevier. (Available online at http://www.sciencedirect.com). 2004.

_____. **Frequency domain analysis for detecting pipeline leaks**. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 131, No.7, July 2005, p.596-604.

LIGGETT, J.A.; LI-CHUNG, C. **Inverse transient analysis in pipe networks.** Journal os Hydraulic Engineering, ASCE, 120(8). 1994. p. 934-955.

LIOU, C.P.; TIAN, J. **Leak detection - Transient flow simulation approaches.** Journal of Energy Resources Technology. ASCE, 117(3). 1995. p. 243-248.

MEICHES, L.A.M. **Controle de Perdas em Sistemas de Abastecimento de Água** (Dissertação apresentada à Escola Politécnica da USP para obtenção do título de Mestre em Engenharia). 1984. 249 p.

MPESHA, W. **Leak detection in pipes by frequency response method**. (Dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in the Department of Civil and Environmental Engineering – University of South Carolina). 1999. 85 p.

_____.; GASSMAN, S.L.; CHAUDHRY, M.H. **Leak detection in pipes by frequency response method.** Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 127, No.2, February, 2001, p. 134-147.

_____. **Leak detection in pipes by frequency response method using a step excitation.** Journal of Hydraulic Research, Vol. 40, No.1, 2002, p. 55-62.

PALHARES, J. B. **Método de Detecção de Fugas em Tubulações através do Método de Resposta em Freqüência e Reflexões de Pulsos de Alta Freqüência** (Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Unicamp para obtenção do título de Mestre em Engenharia). 2005. 123 p.

TARDELLI FILHO, J. Controle e Redução de Perdas. In: TSUTIYA, M.T. **Abastecimento de água**. São Paulo. 2004. Cap. 10, p. 457-525.

THORNTON, J. **Water Loss Control Manual**. McGraw-Hill. USA. 2002. 645 p.

VÍTKOVSKÝ, J. et.al. **Frequency-domain transient pipe flow solution including unsteady friction.** International Conference on Pumps, Electromechanical Devices and Systems Applied to Urban Water Management, IAHR and IHR. 2003.

WANG, X.J. et al. **Leak Detection in Pipelines using the Damping of Fluid Transients.** Journal of Hydraulic Engineering. 128(7). 2002. p. 697-711.

APÊNDICE A – Modelo computacional para obtenção do DRF obtido por Chaudhry (1987, p.244)

```
%%%%%%%%%%%%%%% DADOS %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Qo=0.314; %m/s
R=0.0;
To=1.0;
Tth=3.0;%s
k=0.2;
Ho=100; %m
ld=200; %m
ad=800; %m
Dd=1.36; %m
l1=500; %m
l2=250; %m
a1=1000; %m/s
a2=1000; %m/s
D1=1.81; %m
D2=1.05; %m
wth=2*pi/Tth;
g=9.8066; %m/s2
%%%%%%%%%%%%%%% CARACT. TRECHOS %%%%%%%%%%%%%%%%
b1=l1/a1;
A1=pi*D1^2/4;
C1=a1/(g*A1);
%%%%%%%%%%%%%
b2=l2/a2;
A2=pi*D2^2/4;
C2=a2/(g*A2);
%%%%%%%%%%%%%
bd=ld/ad;
Ad=pi*Dd^2/4;
Cd=ad/(g*Ad);
%%%%%%%%%%%%%%% CÁLCULO DO DRF %%%%%%%%%%%
for wr=0.5:0.005:7
w=wr*wth;
F1=[cos(b1*w) -j/C1*sin(b1*w);-j*C1*sin(b1*w) cos(b1*w)];
F2=[cos(b2*w) -j/C2*sin(b2*w);-j*C2*sin(b2*w) cos(b2*w)];
Pbde=[1 -j/Cd*sin(bd*w)/cos(bd*w);0 1];
U=F2*(Pbde*F1*[1 0;0 0]);
q1R=-2*Ho*k/(U(2,1)-(2*Ho/Qo*U(1,1)));
q3L=U(1,1)*q1R;
h3L=U(2,1)*q1R;
qr=2*abs(q3L)/Qo;
hr=2*abs(h3L)/Ho;
hold on
plot(wr,qr,'w-',wr,hr,'y-')
hold off
end
```

APÊNDICE B – Modelo computacional para obtenção do DRF com vazamento unitário

```
%
%%%%%%%%%%%%%%% DADOS %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
L1=1400;          % m - comprimento do tubo 1
L2=600;           % m - comprimento do tubo 2
D=0.3;            % m - diametro da tubulacao
H1=50;            % m - carga no reservatorio
H2=20;            % m - carga na valvula
a=1200;           % m/s - celeridade de onda
k=0.1;            % deltaTau (variacao de abertura da valvula)
Qo=0.0153;        % m3/s - vazao inicial
wth=pi*a/(2*(L1+L2));% frequencia fundamental
g=9.8066;         % m/s2 - gravidade
R=0;              % atrito nulo
%
%%%%%%%%%%%%%%%% CARACT. TRECHOS %%%%%%%%%%%%%%%%
b1=L1/a;
b2=L2/a;
A=pi*D^2/4;
C=a/(g*A);
%
%%%%%%%%%%%%%%% CARACT. DA EXCITACAO %%%%%%%%%%%%%
for Av=0.9*A:A;
   To=Av/A;  % abertura relativa da valvula
%
%%%%%%%%%%%%%%% CÁLCULO DO DRF %%%%%%%%%%%%%%%%%%
for wr=0:0.005:10
   w=wr*wth;
   F1=[cos(b1*w) -j/C*sin(b1*w);-j*C*sin(b1*w) cos(b1*w)];
   F2=[cos(b2*w) -j/C*sin(b2*w);-j*C*sin(b2*w) cos(b2*w)];
%
%%%% SEM VAZAMENTO
   Qolk=0; % m3/s
   Plk=[1 -Qolk/(2*H1);0 1];
   U=F2*(Plk*F1);
   U(3,3)=1;
   q1R=-(U(2,3)-(2*H1/Qo*U(1,3))+(2*H1*k/To*U(3,3)))/(U(2,1)-
(2*H1/Qo*U(1,1))+(2*H1*k/To*U(1,3)));
   hL=U(2,1)*q1R;
   hr=abs(hL);
   hold on
   plot(wr,hr,'b')
   hold off
%
%%%% COM VAZAMENTO
   Qolk=0.00437; % m3/s
   Plk=[1 -Qolk/(2*H1);0 1];
   U=F2*(Plk*F1);
   U(3,3)=1;
   q1R=-(U(2,3)-(2*H1/Qo*U(1,3))+(2*H1*k/To*U(3,3)))/(U(2,1)-
```

```
(2*H1/Qo*U(1,1))+(2*H1*k/To*U(1,3)));
    hL=U(2,1)*q1R;
    hr=abs(hL);
    hold on
    plot(wr,hr,'r')
    hold off
end
end
```

ANEXO A – Shuffled Complex Evolution Algorithm (Duan et al., 1993)

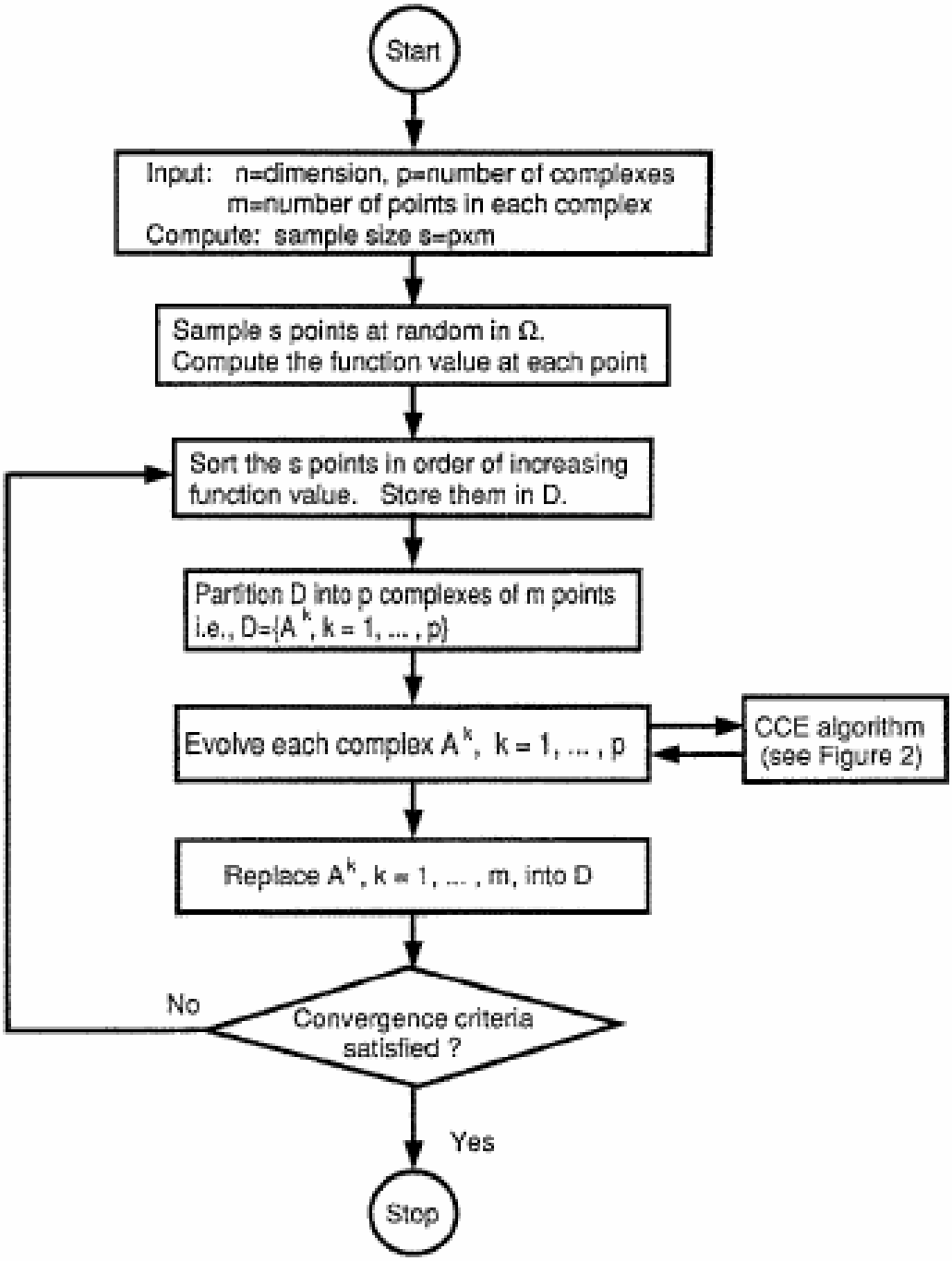


Fig. 1. Flow chart of the shuffled complex evolution (SCE) method.

Step O. Initialize. Select $p \geq 1$ and $m \geq n+1$, where p=number of complexes and m=number of points in each complex. Compute the sample size $s = p \times m$.

Step 1. Generate Sample. Sample s points $x_1, \ldots, x_s$ in the feasible space $\Omega \subset \mathbb{R}^n$. Compute the function value f_i at each point x_i. In the absence of prior information, use a uniform sampling distribution.

Step 2. Rank Points. Sort the s points in order of increasing function value. Store them in an array $D=\{x_i, f_i, i=1, \ldots, s\}$, so that $i=1$ represents the point with the smallest function value.

Step 3. Partition into Complexes. Partition D into p complexes $A^1, \ldots, A^p$, each containing m points, such that: $A^k = \{ x_j^k, f_j^k \mid x_j^k = x_{k+p(j-1)}, f_j^k = f_{k+p(j-1)}, j=1, \ldots, m\}$.

Step 4. Evolve Each Complex. Evolve each complex A^k, $k=1, \ldots, p$ according to the competitive complex evolution (CCE) algorithm outlined separately.

Step 5. Shuffle Complexes. Replace $A^1, \ldots, A^p$ into D, such that $D = \{A^k, k=1, \ldots, p\}$. Sort D in order of increasing function value.

Step 6. Check Convergence. If the convergence criteria are satisfied, stop; otherwise, return to Step 3.

The competitive complex evolution (CCE) algorithm required for the evolution of each complex in Step 4 of the SCE method is presented below and is illustrated in Fig. 2.

Step 0. Initialize. Select q, α, and β, where $2 \leq q \leq m$, $\alpha \geq 1$, and $\beta \geq 1$.

Step 1. Assign Weights. Assign a triangular probability distribution to A^k; i.e.,

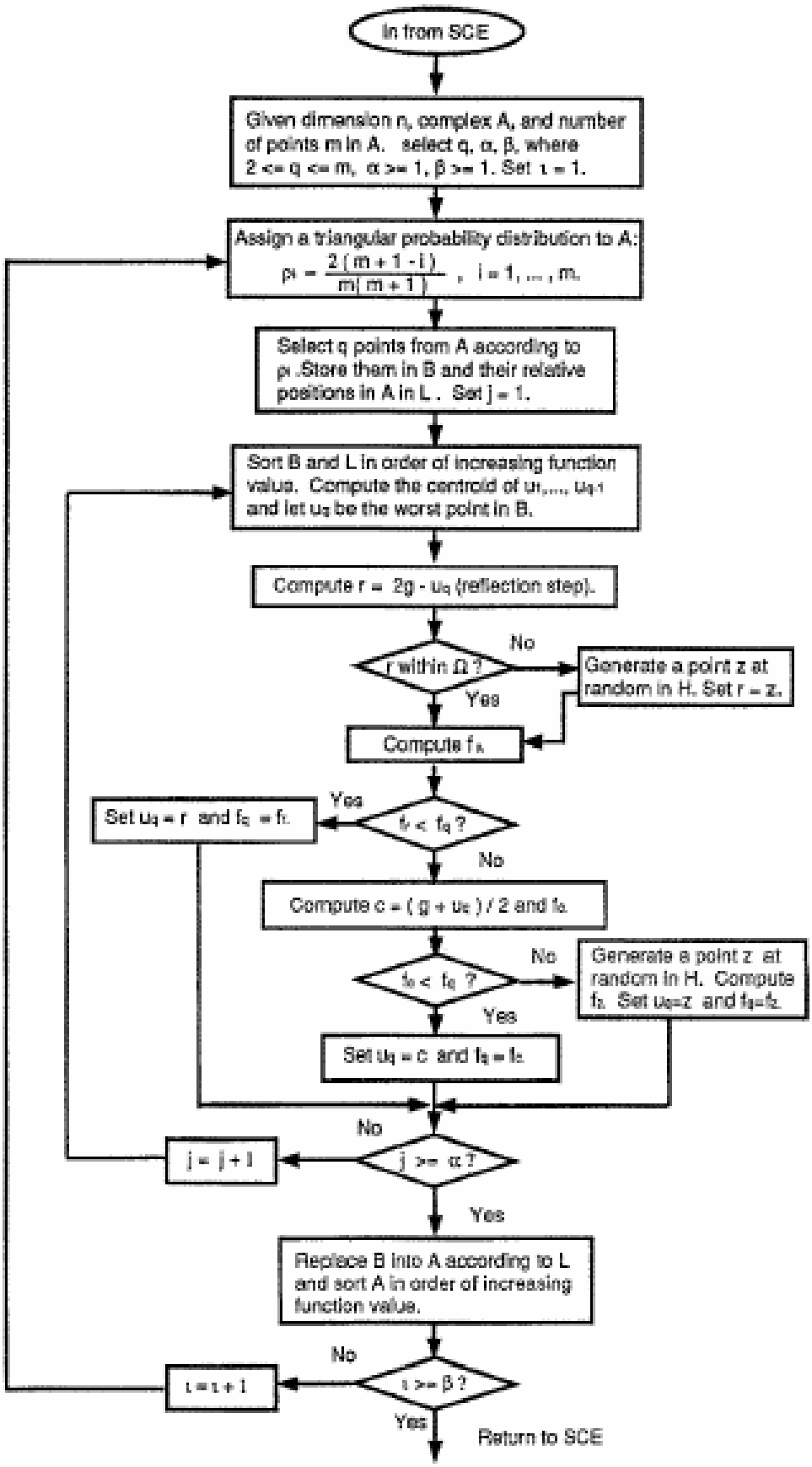


Fig. 2. Flow chart of the competitive complex evolution (CCE) strategy.

$p_i=2(m+1-i)/m(m+1), \qquad i = 1,\ldots, m.$

The point x_1^k has the highest probability, $\rho_1 = 2/m + 1$. The point x_m^k has the lowest probability, $\rho_m=2/m(m + 1)$.

Step 2. Select Parents. Randomly choose q distinct points $u_1, \ldots, u_q$ from A^k according to the probability distribution specified above (the q points define a subcomplex). Store them in array $B = \{u_i, v_i, i = 1, \ldots, q\}$, where v_j is the function value associated with point u_j. Store in L the locations of A^k which are used to construct B.

Step 3. Generate Offspring.

(a) Sort B and L so that the q points are arranged in order of increasing function value. Compute the centroid g using the expression: $g = [1/(q-1)]\sum_{j=1}^{q-1} u_j$

(b) Compute the new point $r= 2g-u_q$ (reflection step).

(c) If r is within Ω, compute the function value f and go to Step (d) ; else, compute the smallest hypercube $H\subset\mathbb{R}^n$ that contains A^k, randomly generate a point z within H, compute f_z, set $r = z$, and set $f_r = f_z$ (mutation step).

(d) If $f_r < f_q$, replace u_q by r, go to Step (f); else, compute $c = (g+u_q)/2$ and f_c (contraction step).

(e) If $f_c< f_q$, replace u_q by c, go to Step (f); else, randomly generate a point z within H and compute f_z (mutation step). Replace u_q by z.

(f) Repeat Steps (a) through (e) α times, where $\alpha \geq 1$ is a user-specified parameter.

Step 4. Replace Parents by Offspring. Replace B into A^k using the original locations stored in L. Sort A^k in order of increasing function value.

Step 5. Iterate. Repeat Steps (1) through (4) β times, where $\beta \geq 1$ is a user-specified parameter which determines how many offspring should be generated (how far each complex should evolve).