SIMONE RODRIGUES LIMA

**ANÁLISE TEMPO-FREQUÊNCIA DE ONDAS ACÚSTICAS EM
ESCOAMENTOS MONOFÁSICOS**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Térmica e Fluidos

Orientador: Prof. Tit. Paulo Seleglim Júnior

São Carlos

2010

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): Licenciado SIMONE RODRIGUES LIMA.

Dissertação defendida e julgada em 22/12/2010 perante a Comissão Julgadora:

_____
Prof. Titular **PAULO SELEGHIM JUNIOR - (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

_____
Prof. Dr. **GHERHARDT RIBATSKI**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

_____
Prof. Dr. **PAULO ROBERTO BARBOSA**
(Instituto Federal de São Paulo/IFSP)

Aprovado

_____
Prof. Associado **JONAS DE CARVALHO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica

_____
Prof. Associado **PAULO CÉSAR LIMA SEGANTINE**
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC
Prof. Titular Denis Vinicius Coury
Suplente do Presidente da CPG-EESC-USP

DEDICATÓRIA

“Aos meus pais, Osmar e Fátima, e aos meus irmãos Eduardo e Leonardo com muito amor, carinho e gratidão.”

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais Osmar e Fátima pelo zelo, dedicação, amor e apoio em todos os momentos da minha vida.

Aos meus irmãos Eduardo, ainda que estando mais distante sempre demonstrou seu carinho, incentivo e esteve sempre pronto para ajudar no que fosse preciso, e ao Leonardo grande companheiro durante estes anos aqui em São Carlos.

Ao Prof. Paulo Seleglim Júnior, pela orientação e apoio durante este trabalho.

Agradeço também com muito carinho a todos os meus amigos pelo companheirismo e ajuda em todos os momentos da realização deste trabalho.

À CAPES, pelo suporte financeiro.

Por fim, agradeço a todos que de alguma maneira contribuíram para realização deste trabalho.

“Aprenda como se você fosse viver para sempre. Viva como se você fosse morrer amanhã.”

Mahatma Gandhi

RESUMO

LIMA, S. R. Análise tempo-frequência de ondas acústicas em escoamentos monofásicos. 2010. 124 f. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

A presente dissertação tem como objetivo principal estudar a propagação acústica em escoamentos monofásicos. Para tal, são analisados sinais transientes de pressão fornecidos por sensores instalados em posições conhecidas na linha de teste, através do estudo de técnicas de análise de sinais, a fim de investigar se as variações do conteúdo espectral dos sinais são influenciadas pela ocorrência de vazamentos no duto. A análise dos sinais foi realizada nos planos temporal, frequencial, tempo-frequência e estatístico. Os resultados experimentais foram obtidos no oleoduto piloto do NETeF – Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos da USP – Universidade de São Paulo, com uma seção de testes com 1500 metros e diâmetro de 51,2 mm, com escoamento monofásico de água. Os resultados obtidos através da análise tempo-frequência mostraram-se satisfatórios, sendo esta técnica capaz de identificar a composição espectral instantânea de um sinal, ou seja, foi eficiente na identificação de picos de amplitude da frequência ao longo do eixo temporal. Além disso, a análise probabilística, através do desvio-padrão do sinal também mostrou-se eficiente exibindo uma disparidade significativa entre os sinais com e sem vazamento.

Palavras-chave: Análise tempo-frequência. Detecção de vazamento. Escoamento monofásico. Escoamento em dutos.

ABSTRACT

LIMA, S. R. **Time-frequency analysis of acoustic waves in single-phase flow**. 2010. 124 f. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

The present dissertation reports on the study of the acoustic propagation in single-phase flow. It analyzes the transient signals provided by pressure sensors in known locations in the test line through the study of signal analysis techniques to investigate if the variations in spectral content of the signals are influenced by the occurrence of leaks in the pipe. The analysis of signals was performed in the time, frequency, time-frequency and statistical plans. The experimental results were obtained in a 1500 meter-long and 51.2 millimeter-diameter pilot pipeline at the Center of Thermal Engineering and Fluids, with single-phase flow of water. The results obtained by time-frequency analysis were satisfactory, allowing identifying the spectral composition of an instantaneous signal, i.e., the analysis was effective in identifying the frequency amplitude peaks along the time axis. Moreover, probabilistic analysis using the standard deviation of the signal was also efficient, displaying a significant disparity between the signals with and without leakage.

Keywords: Time-frequency analysis. Leak detection. Single-phase flow. Pipe flow.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Foto do Oleoduto Piloto Trifásico do NETeF/USP.	39
Figura 3.2 - Representação Esquemática do Oleoduto Piloto Trifásico do NETeF/USP.	40
Figura 3.3 - Tela do <i>software</i> em LabVIEW® que é executado em um computador do tipo PC.	41
Figura 3.4 - Temporizações programáveis do <i>software</i> para execução automática dos experimentos.	42
Figura 3.5 - Sinal Experimental de Simulação de Vazamento.	46
Figura 3.6 - Componente AC dos Sinais Experimentais de Simulação de Vazamento da Figura 3.5.	47
Figura 3.7 - Detalhes nos Sinais de Abertura de Válvula das Simulações de Vazamento da Figura 3.6.	48
Figura 3.8 - Transformada de Fourier para o Sinal de Vazamento (Abertura de Válvula) Exemplificado na Figura 3.7.	48
Figura 4.1 - Sinal experimental de simulação sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V0 - P4).	64
Figura 4.2 - Envelope do sinal experimental de simulação sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V0 - P4).	64
Figura 4.3 - Sinal experimental de simulação sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V0 - P4).	65
Figura 4.4 - Envelope do sinal experimental de simulação sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V0 - P4).	65
Figura 4.5 - Sinal experimental de simulação sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V0 - P4).	66
Figura 4.6 - Envelope do sinal experimental de simulação sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V0 - P4).	66
Figura 4.7 - Transformada de Fourier do sinal no tempo (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V0 - P4).	67
Figura 4.8 - Transformada de Fourier do sinal no tempo (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V0 - P4).	67
Figura 4.9 - Transformada de Fourier do sinal no tempo (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V0 - P4).	68

Figura 4.10 - Visualização tridimensional da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V0 - P4).	68
Figura 4.11 - Visualização tridimensional da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V0 - P4).	69
Figura 4.12 - Visualização tridimensional da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V0 - P4).	69
Figura 4.13 - Visualização da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V0 - P4).	70
Figura 4.14 - Visualização da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V0 - P4).	70
Figura 4.15 - Visualização da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V0 - P4).	70
Figura 4.16 - Sinal experimental de simulação com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V2 - P4).	71
Figura 4.17 - Envelope do sinal experimental de simulação com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V2 - P4).	72
Figura 4.18 - Sinal experimental de simulação com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V2 - P4).	72
Figura 4.19 - Envelope do sinal experimental de simulação com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V2 - P4).	73
Figura 4.20 - Sinal experimental de simulação com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V2 - P4).	73
Figura 4.21 - Envelope do sinal experimental de simulação com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V2 - P4).	74
Figura 4.22 - Transformada de Fourier do sinal com vazamento no tempo (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V2 - P4).	74
Figura 4.23 - Transformada de Fourier do sinal com vazamento no tempo (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V2 - P4).	75
Figura 4.24 - Transformada de Fourier do sinal com vazamento no tempo (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V2 - P4).	75
Figura 4.25 - Visualização tridimensional da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V2 - P4).	76

Figura 4.26 - Visualização tridimensional da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V2 - P4).	76
Figura 4.27 - Visualização tridimensional da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V2 - P4).	77
Figura 4.28 - Visualização da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V2 - P4)....	77
Figura 4.29 - Visualização da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V2 - P4)....	78
Figura 4.30 - Visualização da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V2 - P4)....	78
Figura 4.31 - Média dos sinais $s(t)$ com vazamento e sem vazamento para os experimentos na frequência do inversor de bomba em 30 Hz.	79
Figura 4.32 - Média dos sinais $s(t)$ com vazamento e sem vazamento para os experimentos na frequência do inversor de bomba em 40 Hz.	79
Figura 4.33 - Média dos sinais $s(t)$ com vazamento e sem vazamento para os experimentos na frequência do inversor de bomba em 50 Hz.	80
Figura 4.34 - Desvio padrão dos sinais $s(t)$ com vazamento e sem vazamento para frequência do inversor de bomba em 30 Hz.	80
Figura 4.35 - Desvio padrão dos sinais $s(t)$ com vazamento e sem vazamento para frequência do inversor de bomba em 40 Hz.	81
Figura 4.36 - Desvio padrão dos sinais $s(t)$ com vazamento e sem vazamento para frequência do inversor de bomba em 50 Hz.	81
Figura 4.37 - Energia total dos sinais com vazamento e sem vazamento para frequência do inversor de bomba em 30 Hz.	82
Figura 4.38 - Energia total dos sinais com vazamento e sem vazamento para frequência do inversor de bomba em 40 Hz.	82
Figura 4.39 - Energia total dos sinais com vazamento e sem vazamento para frequência do inversor de bomba em 50 Hz.	83
Figura Ap.1- Sinal experimental de simulação sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V0 - P4).	91
Figura Ap.2 - Envelope do sinal experimental de simulação sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V0 - P4).	91

Figura Ap.3 - Sinal experimental de simulação sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V0 – P8).....	92
Figura Ap.4 - Envelope do sinal experimental de simulação sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V0 – P8).....	92
Figura Ap.5 - Sinal experimental de simulação sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V0 - P4).....	93
Figura Ap.6 - Envelope do sinal experimental de simulação sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V0 – P4).....	93
Figura Ap.7 - Sinal experimental de simulação sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V0 - P4).....	94
Figura Ap.8 - Envelope do sinal experimental de simulação sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V0 – P8).....	94
Figura Ap.9 - Sinal experimental de simulação sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V0 - P4).....	95
Figura Ap.10 - Envelope do sinal experimental de simulação sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V0 - P4).	95
Figura Ap.11 - Sinal experimental de simulação sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V0 – P8).	96
Figura Ap.12 - Envelope do sinal experimental de simulação sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V0 – P8).....	96
Figura Ap.13 - Transformada de Fourier do sinal no tempo (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V0 - P4).....	97
Figura Ap.14 - Transformada de Fourier do sinal no tempo (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V0 – P8).....	97
Figura Ap.15 - Transformada de Fourier do sinal no tempo (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V0 - P4).....	98
Figura Ap.16 - Transformada de Fourier do sinal no tempo (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V0 – P8).....	98
Figura Ap.17 - Transformada de Fourier do sinal no tempo (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V0 - P4).....	98
Figura Ap.18 - Transformada de Fourier do sinal no tempo (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V0 – P8).....	99
Figura Ap.19 - Visualização tridimensional da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V0 - P4).	99

Figura Ap.20 - Visualização tridimensional da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V0 – P8).	100
Figura Ap.21 - Visualização tridimensional da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V0 – P4).	100
Figura Ap..22 - Visualização tridimensional da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V0 – P8).	101
Figura Ap..23 - Visualização tridimensional da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V0 – P4).	101
Figura Ap..24 - Visualização tridimensional da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V0 – P8).	102
Figura Ap..25 - Visualização da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V0 – P4).	102
Figura Ap..26 - Visualização da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V0 – P8).	102
Figura Ap.27 - Visualização da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V0 – P4).	103
Figura Ap.28 - Visualização da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V0 – P8).	103
Figura Ap.29 - Visualização da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V0 – P4).	103
Figura Ap.30 - Visualização da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V0 – P8).	104
Figura Ap.31 - Sinal experimental de simulação com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V13 - P4).	104
Figura Ap.32 - Envelope do sinal experimental de simulação com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V13 - P4).	105
Figura Ap.33 - Sinal experimental de simulação com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V13 – P8).	105

Figura Ap.34 - Envelope do sinal experimental de simulação com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V13 – P8).....	106
Figura Ap.35 - Sinal experimental de simulação com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V13 - P4).....	106
Figura Ap.36 - Envelope do sinal experimental de simulação com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V13 - P4).	107
Figura Ap.37 - Sinal experimental de simulação com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V13 – P8).	107
Figura Ap.38 - Envelope do sinal experimental de simulação com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V13 – P8).....	107
Figura Ap.39 - Sinal experimental de simulação com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V13 - P4).....	108
Figura Ap.40 - Envelope do sinal experimental de simulação com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V13 - P4).	108
Figura Ap.41 - Sinal experimental de simulação com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V13 – P8).	108
Figura Ap.42 - Envelope do sinal experimental de simulação com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V13 – P8).....	109
Figura Ap.43 - Transformada de Fourier do sinal no tempo (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V13 - P4).....	109
Figura Ap.44 - Transformada de Fourier do sinal no tempo (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V13 – P8).	110
Figura Ap.45 - Transformada de Fourier do sinal no tempo (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V13 - P4).....	110
Figura Ap.46 - Transformada de Fourier do sinal no tempo (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V13 – P8).	111
Figura Ap.47 - Transformada de Fourier do sinal no tempo (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V13 - P4).....	111
Figura Ap.48 - Transformada de Fourier do sinal no tempo (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V13 – P8).	111
Figura Ap.49 - Visualização tridimensional da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V13 - P4).	112
Figura Ap.50 - Visualização tridimensional da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V13 – P8).	112

Figura Ap.51 - Visualização tridimensional da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V13 - P4).	113
Figura Ap.52 - Visualização tridimensional da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V13 – P8).	113
Figura Ap.53 - Visualização tridimensional da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V13 - P4).	114
Figura Ap.54 - Visualização tridimensional da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V13 – P8).	114
Figura Ap.55 - Visualização da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V13 - P4).	115
Figura Ap.56 - Visualização da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V13 – P8).	115
Figura Ap.57 - Visualização da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V13 - P4).	115
Figura Ap.58 - Visualização da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V13 – P8).	116
Figura Ap.59 - Visualização da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V13 - P4).	116
Figura Ap.60 - Visualização da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V13 – P8).	116
Figura An.1 - Arquitetura da Aplicação do CompactRIO. (Figura adaptada de NATIONAL INSTRUMENTS INC., 2008).	117
Figura An.2 - Topologia de Conexão do Sistema CompactRIO(Figura adaptada de NATIONAL INSTRUMENTS INC., 2008).	118
Figura An.3 - Diagrama de Blocos do <i>software</i> em LabVIEW® que é executado em um computador do tipo PC.	119
Figura An.4 - Tela do <i>software</i> em LabVIEW® que é executado em um computador do tipo PC.	120

Figura An.5 - Diagrama de Blocos do <i>software</i> em LabVIEW® que é executado no controlador de tempo real (NI cRIO 9014).....	121
Figura An.6 - Tela do <i>software</i> em LabVIEW® que é executado no controlador de tempo real (NI cRIO 9014).	122
Figura An.7 - Diagrama de Blocos do <i>software</i> em LabVIEW® que é executado em FPGA (NI cRIO 9114).....	123
Figura An.8 - Tela do <i>software</i> em LabVIEW® que é executado em FPGA (NI cRIO 9114).	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Posições Relativas dos Transdutores à Bomba de Água.....	43
Tabela 2 - Posições Relativas das Válvulas Solenóides (Vazamentos).....	44
Tabela 3 - Relação entre Simulação de Vazamento e Aquisição de Sinal.....	45

LISTA DE SIGLAS

<i>ASCII</i>	American Standard Code for Information Interchange
<i>CAN</i>	Controller Area Network
<i>cRIO</i>	Compact RIO
<i>EESC</i>	Escola de Engenharia de São Carlos
<i>FPGA</i>	Field Programmable Gate Array
<i>HZ</i>	Hertz
<i>I / O</i>	Input and Output
<i>NETeF</i>	Núcleo de Engenharia de Térmica e Fluidos
<i>NI</i>	National Instruments ®
<i>PAC</i>	Programmable Automation Controller
<i>PC</i>	Personal Computer
<i>SCADA</i>	Supervisory Control and Data Acquisition
<i>USP</i>	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

a	amplitude constante do sinal senoidal
$a(t)$	amplitude de um sinal em função do tempo
$A(t)$	amplitude de um sinal na forma complexa variando no tempo
$A[t]$	sinal analítico correspondente ao sinal $s(t)$
E	energia do sinal
$E(\tau)$	energia total de $\sum (\tau)$
f_{MAX}	máxima frequência contida em um sinal
f_{SMIN}	frequência de Nyquist
f_s	frequência de amostragem
$F(t)$	função temporal
F_{min}	frequência mínima
F_{max}	frequência máxima
$G(\omega)$	função frequencial
$h(t)$	função janela
$H[s(t)]$	transformada de Hilbert do sinal $s(t)$
$\dot{m}_e$	vazão mássica a montante
m_p	inventário do duto (massa contida no duto)
$\dot{m}_s$	vazão mássica a jusante
$P_{SP}(t, \omega)$	densidade de energia espectral em torno do tempo t
$\bar{s}$	média de um sinal $s(t)$
$s(t)$	sinal em função do tempo
$s(\tau)$	sinal em torno do tempo τ
s_j	parte imaginária do sinal na forma complexa
s_r	parte real de um sinal na forma complexa
$s_t(\tau)$	sinal modificado em torno do tempo t

$s_t(\omega)$	transformada de Fourier do sinal em torno do tempo t
$S(\omega)$	transformada de Fourier do sinal $s(t)$
t	tempo
T	tempo
$\hat{t}$	tempo
$T_{\min}$	tempo mínimo
$T_{\max}$	tempo máximo
$v(t)$	fase de um sinal em função do tempo
$x(n)$	transformada inversa de Fourier
$X(k)$	transformada discreta de Fourier
$z(t)$	sinal complexo
α	constante da função gaussiana
$\delta(x)$	delta de Dirac
σ	desvio padrão do sinal
σ_ω	desvio padrão das frequências
τ	tempo que varia dentro da função janela
ϕ	fase de um sinal
ω	frequência
ω_0	frequência de um sinal
$\omega_i(t)$ ou $\phi'(t)$	frequência instantânea de um sinal
$\bar{\omega}$	frequência média
$\Delta_t(\tau)$	tempo central
$\Delta_\omega(\tau)$	frequência central
$\Delta_{t\omega}(\tau)$	momento misto
$\sum(\tau)$	intervalo de deslizamento centralizado em τ com T de duração

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	29
1.1 Objetivos	30
1.2 Organização do Texto	30
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	31
2.1 Métodos de Detecção de Vazamentos em Dutos	31
2.2 Análise de Sinais	36
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA	39
3.1 Circuito Experimental	39
3.1.1 <i>Oleoduto Piloto</i>	39
3.1.2 <i>Instrumentação e Comando do Oleoduto Piloto</i>	39
3.2 Aquisição de Dados Experimentais	41
3.2.1 <i>Sistema de Controle e Aquisição de Dados</i>	45
3.2.2 <i>Pré-processamento do Sinal Adquirido</i>	45
3.3 Análise de Sinais	49
3.3.1 <i>Descrição Temporal do Sinal</i>	49
3.3.2 <i>Densidade de Energia e Energia Total de um Sinal</i>	50
3.3.3 <i>Descrição Espectral do Sinal</i>	51
3.3.4 <i>Densidade de Energia Espectral e Energia Total</i>	53
3.3.5 <i>O Sinal Complexo</i>	54
3.3.6 <i>O Sinal Analítico</i>	55
3.3.7 <i>Classificação dos Sinais</i>	57
3.3.8 <i>A Análise Tempo-Frequência</i>	57
3.3.9 <i>Por que o espectro varia?</i>	58
3.3.10 <i>A Transformada de Fourier a Curto Tempo</i>	58
3.3.11 <i>Momentos Estatísticos utilizados para a Análise dos Sinais</i>	60
3.4 Software Matlab	61

CAPÍTULO 4 -	RESULTADOS.....	63
4.1	Análise dos sinais experimentais sem vazamento.....	63
4.2	Análise dos sinais com vazamento.....	71
4.3	Análise Estatística dos Sinais.....	78
4.4	Análise dos Resultados	83
CAPÍTULO 5 -	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	85
REFERÊNCIAS -	.....	87
APÊNDICE A -	RESULTADOS DA ANÁLISE TEMPO-FREQUÊNCIA.....	91
A.1	Análise dos sinais sem vazamento	91
A.2	Análise dos sinais com vazamento.....	104
ANEXO A -	SISTEMA DE CONTROLE E AQUISIÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS.....	117
A.1	Descrição do Sistema de Aquisição e Controle de Dados	117

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

O transporte de fluidos através de malhas dutoviárias é considerado o meio mais seguro e econômico quando comparado com o transporte rodoviário, ferroviário e marítimo, principalmente para longas distâncias. Para uma operação eficiente e segura da malha, é necessário conhecer as características dinâmicas do escoamento em situações de transientes operacionais como o alinhamento de válvulas, paradas e partidas de bombas etc. Esta necessidade fica clara face ao número expressivo de acidentes que têm ocorrido com conseqüências econômicas e ambientais.

Segundo Papadakis *et.al* (1999), as principais causas de acidentes em oleodutos e gasodutos estão ligadas a falhas operacionais, corrosão, movimentação do solo, fenômenos naturais e ações externas não intencionais ou não autorizadas (ligações clandestinas, por exemplo).

Fenômenos intrínsecos também podem ser extremamente prejudiciais à integridade estrutural da tubulação, sejam eles gerados por uma operação inadequada ou naturalmente devido a uma característica específica do sistema. Por exemplo, o surgimento de golfadas de líquido em gasodutos pode se dar em função de sua operação a pressões e temperaturas indevidas por falha operacional, ou ainda, devido a uma característica geométrica da linha que favoreça a acumulação de condensado até o bloqueio da tubulação com conseqüente ejeção do pistão de líquido. Em ambos os casos é possível detectar a formação do pistão e o surgimento de uma golfada através das ondas de pressão associadas ao transiente fluidodinâmico. Estas ondas se propagam na velocidade do som e, portanto, chegam com bastante antecedência às extremidades da tubulação e podem ser usadas para desencadear ações preventivas ou paliativas. A condição para isso é a capacidade de diagnosticar o surgimento da golfada o que, por sua vez, implica em compreender os mecanismos de geração de propagação acústica associadas a ela.

De um ponto de vista científico, uma melhor compreensão destes fenômenos dinâmicos em escoamentos, permitindo a proposição de modelos mecanicistas mais precisos e abrangentes entre outras contribuições importantes, deve partir do estudo e caracterização da propagação das ondas acústicas causados por esse tipo de transiente operacional.

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é estudar a propagação acústica em escoamentos monofásicos, isto é, analisar os sinais transientes de pressão fornecidos por sensores instalados em posições conhecidas na linha de teste, através do estudo de técnicas de análise de sinais, a fim de investigar se as variações do conteúdo espectral dos sinais são influenciadas pela ocorrência de vazamentos no duto. Para tal são abordados métodos temporais (sinais filtrados no tempo e seu envelope – transformada de Hilbert), frequenciais (transformada de Fourier), tempo-frequência (transformada de Gabor) e estatísticos (média desvio-padrão e energia). Os sinais foram obtidos através de sensores instalados em posições conhecidas na linha de teste do oleoduto piloto do NETeF.

1.2 Organização do Texto

O presente trabalho está organizado da seguinte forma:

Capítulo 2: Revisão bibliográfica dos temas envolvidos neste trabalho, tais como: métodos de detecção de vazamentos em dutos e aplicações de técnicas de análise de sinais.

Capítulo 3: Apresentação da metodologia utilizada para realização do trabalho, bem como: descrição do circuito experimental do oleoduto piloto do laboratório do Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos (NETeF) – da Universidade de São Paulo (USP) em São Carlos, utilizado para aquisição dos sinais e formulação matemática da análise de sinais.

Capítulo 4: Apresentação e discussão dos resultados obtidos através do algoritmo das rotinas de análise dos sinais e análise estatística desenvolvidas no software Matlab.

Capítulo 5: Apresentação das conclusões da pesquisa desenvolvida e perspectivas para continuidade deste trabalho.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica dos assuntos abordados neste trabalho, tais como: métodos de detecção de vazamentos em dutos e análise de sinais.

2.1 Métodos de Detecção de Vazamentos em Dutos

Motivos como fadiga, falhas de solda, corrosão e até mesmo variações repentinas de pressão podem interferir na estrutura dos dutos e ocasionar vazamentos. Independente do tamanho que tenha esta ruptura, o vazamento de qualquer produto químico ou de petróleo e seus derivados ocasionam um grave prejuízo ambiental e econômico. Deste modo, a operação adequada e segura de redes de tubulações requer um monitoramento permanente das condições operacionais da rede, de modo que na ocorrência de vazamentos estes possam ser identificados e localizados o mais rápido possível. São dois os tipos de vazamentos que ocorrem em redes de tubulações:

- Vazamento por “ruptura”: é o tipo de vazamento que menos ocorre, mas é muito perigoso devido à grande quantidade de produto derramado, podendo causar grandes prejuízos ambientais. Entretanto, estas rupturas são facilmente detectadas por serem acompanhadas de elevadas quedas de pressão e diferenças volumétricas (BAGHDADI, 1988).
- Vazamentos de pequenas proporções (< 5 litros/ h): são vazamentos mais difíceis de serem detectados, portanto são igualmente perigosos porque podem provocar grandes perdas de produto até serem detectados. Podem ser ocasionados por corrosão, erosão, fadiga do material, falhas em soldas ou juntas (BAGHDADI, 1988).

Diversos métodos de detecção de vazamentos em dutos têm sido estudados, assim, de uma maneira geral, estes métodos podem ser divididos em três categorias: observacionais, baseados em *hardwares* e baseados em *softwares* (ZHANG, 1997; KHOMAIRI, 2008).

Os métodos observacionais são as formas mais simples de detecção de vazamentos, pois essencialmente executam a inspeção ao longo do duto de maneira visual, ou seja, utilizando câmeras, veículos ou aeronaves, o que torna este método dependente da ação humana e aplicável a dutos de pequena extensão e com acesso favorável.

Já os métodos baseados em *hardwares*, utilizam diferentes dispositivos para detecção e localização de vazamentos. Entre estes dispositivos têm-se detectores de gás, sensores térmicos de infravermelho, sensores acústicos e detectores de pressão negativa, sendo que estes dois últimos são os mais utilizados.

Quando se tem um vazamento abrupto no duto, gera-se um transiente hidráulico, ou seja, ocorre uma propagação em forma de onda ao longo da tubulação. Diante disso, os métodos acústicos de detecção de vazamento captam esses sinais gerados pelo transiente hidráulico através de sensores acústicos, ou de sensores de pressão de resposta rápida, isto é, respostas em frequências superiores a 1KHz. No entanto, o sinal atenua-se, ou seja, sua amplitude reduz progressivamente ao se propagar pelo duto, assim, para que se tenha uma maior eficiência na detecção dos vazamentos, é preciso que os sensores estejam instalados o mais perto uns dos outros possível.

Como o transiente hidráulico pode ocorrer não somente por um vazamento no duto, mas também pelas operações normais de funcionamento da tubulação, é necessário o uso de técnicas de processamento do sinal, para que se possa identificar o que é um sinal de vazamento e o que é um sinal da tubulação operando normalmente (MACLEOD *et al.* 1991). Se for possível obter o tempo exato da detecção do sinal nos diversos sensores instalados ao longo do duto, então será possível estimar a localização do vazamento.

O método de detecção de vazamento através de ondas de pressão negativa baseia-se no fato de que no instante em que o vazamento surge há uma queda de pressão brusca no local do vazamento, originando uma onda de pressão negativa que se propaga no fluido à velocidade do som no sentido montante e jusante do vazamento, até que seja estabelecido um novo estado estacionário. Estas ondas propagam-se por longas distâncias proporcionando uma detecção rápida, no entanto, é preciso uma filtragem cuidadosa do sinal, pois uma onda de pressão também pode ocorrer devido a fechamento de válvulas, parada e partida de bombas, e outros procedimentos normais da operação. O sistema de detecção mostra um bom desempenho, detectando vazamentos de até 5% da vazão de líquido. A localização do vazamento é obtida com

razoável precisão através da instalação de transdutores de pressão nas extremidades das seções e ao longo da tubulação conhecendo-se as distâncias entre os mesmos, e da velocidade da onda de pressão quando ocorre o vazamento (WIKE, 1986; BLACK, 1992; SILVA *et al.*, 1996; LI; SUN, 2009).

Por fim, os métodos de detecção baseados em *softwares* são sistemas geralmente mais caros do que outros métodos de detecção, além de requererem uma grande capacidade de processamento, o que torna a aplicação em dutos pequeno pouco viável. Geralmente, um sistema de controle e aquisição de dados (*Supervisory Control and Data Acquisition* - SCADA) é usado para adquirir dados de pressão, temperatura, vazão, densidade entre outros. Os dados adquiridos são então analisados para detectar e localizar possíveis vazamentos no duto.

Alguns dos métodos baseados em *software* são: balanço de massa ou volume compensado, análise do transiente fluidodinâmico, análise inversa de transientes, análise da transformada *wavelet*, métodos estatísticos e modelagem matemática em tempo real.

O método de balanço de massa basicamente aplica a equação de balanço de massa, e considera que um vazamento pode ocorrer quando o erro no cálculo do inventário ultrapassar um limite pré-estabelecido (usualmente 2% da vazão do duto). O erro ε do balanço de massa é calculado pela Equação (2.1):

$$\left| \dot{m}_e - \dot{m}_s - \frac{dm_p}{dt} \right| \geq \varepsilon \quad (2.1)$$

Onde $\dot{m}_e$ e $\dot{m}_s$ são os fluxos de massa na entrada e saída do duto e $\frac{dm_p}{dt}$ descreve a variação do inventário do duto (*line pack*). Esta variação do inventário ocorre devido à variação de pressão e temperatura nas direções radial e longitudinal do duto, o que dificulta a modelagem da densidade do líquido. A utilização deste método para o transporte de líquidos se apresenta eficiente quanto à detecção do vazamento, pois é possível quantificar o volume vazado, porém sua principal desvantagem é a imprecisão na localização do vazamento (SANDBERG, 1989; STOUFFS; GIOT, 1993).

Quanto ao método de análise do transiente fluidodinâmico, sua metodologia fundamenta-se no conceito de que a ocorrência de vazamentos em dutos produz um sinal

transiente amortecido. Segundo Wang *et al.* (2002) o transiente pode ser analisado através de suas componentes harmônicas, ou seja, em termos de uma série de Fourier. O tamanho e a localização do vazamento podem ser determinados analiticamente, através do estudo da taxa de amortecimento dos termos de cada componente da série de Fourier, uma vez que foi constatado que na ocorrência de vazamento a taxa de amortecimento de cada frequência harmônica do sinal é diferente. Esta constatação está diretamente relacionada ao padrão de indução de vazamento observado na função de resposta em frequência (COVAS; RAMOS; ALMEIDA, 2005; FERRANTE; BRUNONE, 2004; LEE *et al.*, 2005 a,b).

A análise inversa de transientes, o estado do sistema (pressão, vazão, etc.) é conhecido ou medido, mas alguns parâmetros como rugosidade, vazamento e outros, não são conhecidos. Assim, o vazamento na tubulação pode ser tratado como um problema inverso em que sua modelagem é feita em função da pressão e vazão do escoamento, e onde a área do possível orifício de vazamento no duto pode ser usada como variável desconhecida do problema. A área é calculada através da minimização entre a variável de processo medida e o valor ideal calculado. Esta minimização pode ser efetuada através de diversos métodos numéricos. Pudar e Liggett (1992); Liggett e Chen (1994) utilizaram o algoritmo de Levenberg-Marquardt em seus trabalhos. Algoritmos genéticos também são usados para modelagens de problemas inversos de detecção de vazamentos como apresentado em Wu e Sage (2006).

Transientes em dutos têm sido utilizados para detecção de vazamentos, através do método de resposta ao impulso, que é usado para resolver diretamente as equações governantes de transientes de fluxo em dutos pressurizados, através da análise do domínio da frequência. Esta análise é feita pelo cálculo do espectro das frequências obtidas através de sensores de pressão piezométricos instalados em uma das extremidades do duto. O espectro é composto por dois termos: um relacionado com as características do sistema e o outro relacionado às características do impulso. Segundo Ferrante e Brunone (2003a), a solução derivada do sinal de pressão no domínio da frequência permite uma interpretação dos dados coletados em um sistema único de dutos, e oferece conclusões sobre suas informações de estado. Assim, Ferrante e Brunone (2003b) afirmam que a localização do vazamento é possível através da ocorrência de descontinuidade no tempo, que pode ser atribuída a reflexão do sinal de vazamento por meio das ondas de pressão.

O método estatístico de detecção de vazamentos em tubulações não usa modelos matemáticos para calcular o fluxo e a pressão na tubulação, mas detecta as mudanças na relação entre o fluxo e a pressão usando dados de medidas disponíveis. Ele calcula a probabilidade do vazamento, avisando o tamanho do vazamento e sua localização aproximada, baseada em medidas de fluxo e pressão. A taxa de alarmes falsos é muito baixa e as variações geradas por mudanças operacionais são registradas assegurando que o alarme de vazamento ocorra quando houver um padrão único de mudanças no fluxo e na pressão, suas características providenciam ao sistema uma capacidade de aprendizado *on-line* adaptando-se às mudanças na tubulação e nos instrumentos de medida (ZHANG, 2001). Já Wang *et.al* (1993) propuseram um método de detecção baseado em um modelo autorregressivo.

Quanto ao método de modelagem matemática em tempo real, embora existam diferentes formulações, a essência da maioria dos sistemas de modelagem é a mesma: solução de equações da conservação de massa, quantidade de movimento e energia. Estas equações não representam um sistema fechado e devem ser suplementadas por uma equação de estado e formulação do fator de fricção. Métodos numéricos são usados para resolver este grupo de equações não lineares, o resultado é uma ferramenta preditiva conhecida como modelo de tempo real, ou *on-line* (BLACK 1992). O modelo estima variáveis intermediárias ao longo da tubulação através de um conjunto limitado de medições reais da tubulação como pressão a montante e fluxo ajusante, que são usados como condições de contorno. As discrepâncias entre as variáveis intermediárias calculadas pelo modelo e medições reais são usadas para indicar vazamentos. (WIKE 1986).

Recentemente tem se usado Redes Neurais Artificiais em métodos de detecção e localização de vazamentos, destaque para o trabalho de Belsito *et.al* (1998), que desenvolveram um sistema de detecção e localização de vazamentos em tubulações transportando gás liquefeito baseada em redes neurais artificiais. A rede foi treinada com dados simulados e testada levando em consideração os sinais de ruídos existentes na tubulação. No sistema em estudo foram detectados vazamentos de 1% do fluxo de entrada e a localização de vazamentos maiores (5%, 10%) foi feita com alta confiabilidade mesmo na presença de ruídos.

2.2 Análise de Sinais

As técnicas de análise tempo-frequência e tempo-escala (wavelets) foram aplicadas com êxito a um grande número de problemas tecnológicos e científicos. Exemplos destas aplicações podem ser vistos no estudo da turbulência, como apresentado no trabalho de Liandra *et.al* (1990), na área médica também é possível ver aplicações da análise de sinais para a análise de eletrocardiogramas como em Senhadji *et.al* (1992). Outra aplicação notável da análise tempo-frequência foi ao estudo de sinais estocásticos como em Pitton, (2000).

Já no estudo de escoamentos também é possível observar grande aplicação das análises de tempo-frequência e tempo-escala, principalmente no estudo de escoamentos multifásicos. Hervieu e Leducq, em 1991, concluíram que a transformada de Wavelet era capaz de caracterizar diferentes configurações de escoamento em tubo vertical. Seleglim *et.al* (1998) caracterizaram em tempo-frequência diferentes regimes de escoamento bifásico ar-água horizontal. Para isto, uma série de ensaios foi realizada num circuito experimental capaz de reproduzir de forma controlada e estável os principais regimes de escoamentos horizontais. Os resultados revelaram que a transformada de Gabor é hábil em revelar a configuração do escoamento e também detalhes mais refinados de alguns tipos de escoamentos.

Delprat *et.al* (1999) mostraram como explorar informações espectrais e espaciais para se obter uma identificação de regimes de escoamento. O trabalho concentrou-se em quatro regimes de escoamento: estratificado ondulado, estratificado rugoso, intermitente e de bolhas. A representação espaço frequência pode ser caracterizada por um conjunto de três parâmetros escalares, quantificando respectivamente a localização no espaço, em frequência e a forma do conteúdo espectral. Plotando a posição de cada experimento em um espaço tridimensional definido para este conjunto de parâmetros, observou-se que os pontos estavam agrupados em quatro aglomerados correspondendo a quatro regimes de escoamento investigados. Além disso, as regiões limite desses aglomerados não se sobrepuseram. Isto mostrou que os parâmetros foram capazes de classificar corretamente os padrões de escoamento bifásico.

Já Klein (1999) abordou o problema de caracterização dos diferentes regimes de escoamento vertical associados a um fluido bifásico ar-água. Dois tipos de escoamento bifásico vertical gás-líquido foram caracterizados através de sinais de condutividade elétrica e sua representação no plano tempo-frequência. Para tanto, uma série de ensaios foram conduzidos em um circuito experimental, e uma sonda capacitiva, foi especialmente

desenvolvida. Igualmente foram implantados algoritmos de aquisição e análise, destinados ao cálculo da transformada de Gabor, associados aos sinais de condutividade fornecidos pela sonda. Os resultados mostraram com clareza como a fenomenologia se traduz no plano tempo-frequência.

Para o estudo de um escoamento em tubo espiral, Takei *et.al* (2000), caracterizaram a distribuição tempo-frequência das velocidades axiais turbulentas, decompostas em níveis de baixas e altas frequências através da transformada discreta de Wavelet e suas auto-correlações. Dentre os resultados obtidos, num escoamento espiral os níveis de flutuações foram extremamente baixos quando comparados a escoamentos tipicamente turbulentos e tiveram uma periodicidade para algumas wavelets para os pontos centrais do escoamento, e outras para pontos próximos da parede do tubo, não acontecendo esta tendência para outros escoamentos turbulentos. A análise tempo-frequência foi muito útil para analisar a estabilidade dos movimentos do escoamento espiral.

Um procedimento para monitoramento de vazamentos severos em dutos baseado na transformada Wavelet foi proposto por Al-Shidhani *et.al* (2003), no qual o método detecta singularidades da pressão refletidas em ondas. O método foi validado através simulações de ondas de pressão em redes de tubulações. As ondas de pressão foram simuladas no domínio do tempo com bases técnicas da modelagem das linhas de transmissão.

Selli, em 2004, desenvolveu um procedimento baseado na aquisição de sinais de pressão flutuante e na sua subsequente decomposição em coeficientes tempo-frequência associados à transformada de Gabor, seguido por uma análise através de um modelo neural previamente treinado. Foram gerados diferentes regimes de escoamento horizontal gás-líquido no circuito experimental do laboratório do Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos (NETeF) – da Universidade de São Paulo (USP) em São Carlos – SP. Os regimes de escoamento intermitente e estratificado ondulado foram identificados com grande acerto, e isto pode ser atribuído a análise tempo-frequência. Porém acertos menores foram obtidos para escoamento anular, já que este regime não foi corretamente explorado devido às limitações na máxima vazão de gás fornecida pelo compressor.

Ferrante *et.al* (2007) realizaram testes de transientes em sistemas de dutos pressurizados, afim de obter através dos sinais de pressão todo o comportamento do escoamento, incluindo as anomalias como vazamentos, pois qualquer irregularidade origina

ondas refletidas, que por sua vez criam descontinuidades na medição do sinal. Para este estudo também foi aplicada a transformada Wavelet para melhorar a eficácia da localização do vazamento.

Wu *et.al* (2008), fizeram uso da transformada de Fourier a curto tempo (*STFT* do inglês *short-time Fourier transform*), que é uma análise tempo-frequência e a transformada Wavelet, que é uma análise tempo-escala-frequência, o que permite maior precisão e detalhes para o estudo de um sinal de emissão acústica com forte ruído que se propaga ao longo de um duto. Após a comparação do uso das duas técnicas ao mesmo sinal, foi possível constatar que a transformada Wavelet, em particular a do tipo Morlet, foi mais eficiente na detecção de características do sinal, devido sua alta precisão e capacidade de aprimoramento em mudanças abruptas.

Recentemente, Kim e Lee (2009) utilizaram a técnica tempo-frequência para localizar vazamentos em tubulações subterrâneas de distribuição de gás, envolvendo o uso da correlação cruzada de dois sinais acústicos medidos em ambos os lados do vazamento. Esta técnica foi utilizada para identificar as características das ondas acústicas através da análise da frequência de corte em um duto circular. Foi constatado que este método revela informações úteis para identificar a posição de vazamento na prática em um sistema de tubulação.

CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA

3.1 Circuito Experimental

Neste trabalho, todos os testes experimentais foram realizados no oleoduto piloto do laboratório do Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos (NETeF) – da Universidade de São Paulo (USP) em São Carlos, Brasil. Serão descritos nesta seção o oleoduto piloto, o sistema de instrumentação e aquisição de dados.

3.1.1 Oleoduto Piloto

O oleoduto piloto trifásico (Figura 3.1) opera com misturas gás-líquido-líquido e possui seções de teste construídas em aço galvanizado com 50,8 mm de diâmetro e comprimento útil de 1512 metros. Um sistema de tanques instalados à jusante das seções de testes é responsável pela separação primária ar-líquido e, subseqüentemente, pela separação líquido-líquido.

Figura 3.1 - Foto do Oleoduto Piloto Trifásico do NETeF/USP.

3.1.2 Instrumentação e Comando do Oleoduto Piloto

Bombas centrífugas controladas por inversores de frequência de 15kW (YASKAWA CIMR-P5U2011) recirculam as fases líquidas (Figura 3.2). Um compressor do tipo parafuso de 50kW assegura o suprimento de ar, cujo controle é feito através de 3 posicionadores

pneumáticos de válvulas (SMAR FY301) acoplados a válvulas de controle (VALTEK P-15) instaladas em paralelo. Esta arquitetura foi adotada para permitir maiores variações de escala nas estratégias de controle de vazão.

Figura 3.2 - Representação Esquemática do Oleoduto Piloto Trifásico do NETeF/USP.

Quanto à instrumentação do oleoduto, tanto a montante quanto a jusante, estão instalados sensores e transmissores de vazão do tipo eletromagnético (ROSEMOUNT EMERSON 570TM) com fundo de escala de 23,76 m³/h (396 l/min). A instrumentação também inclui transdutores de pressão de resposta rápida (WIKA A10) para medida da perda de carga e aquisição do sinal acústico do escoamento, com fundo de escala de 16 bar.

Os elementos primários de atuação (inversores de frequência e posicionadores pneumáticos de válvulas) são acionados a partir de estações de transferência automático/manual (SMAR AM01P), que permitem o acionamento em modo manual através de seu painel frontal ou em modo automático. O equipamento retransmite proporcionalmente em escala de 4 a 20 mA o sinal de entrada, podendo ser em escala de 0 a 5V ou de 4 a 20 mA, proveniente do módulo Transdutor Atuador *Controller Area Network* (CAN) (ESEL TCAN002) com saída de 4-20 mA.

A descrição mais detalhada do sistema de controle e aquisição de dados desenvolvido por Aguiar (2010) será apresentada no Anexo A deste trabalho.

3.2 Aquisição de Dados Experimentais

Para aquisição e armazenamento dos dados experimentais foram implementados 3 programas em *software* LabVIEW®. O primeiro executa em um computador do tipo PC (Figura 3.3), para interface com o usuário, onde são configurados os parâmetros dos ensaios. O segundo executa no controlador de tempo real (NI cRIO 9014), realizando o filtro dos dados do tipo *Butterworth* passa baixa e armazenamento dos dados em dispositivos de alta capacidade do tipo *PenDrive*. Por fim, o terceiro executa no FPGA (NI 9114), realizando a aquisição e controle dos dados a uma taxa de 100 Hz.

Figura 3.3 - Tela do *software* em LabVIEW® que é executado em um computador do tipo PC.

Para execução dos testes foi utilizado um escoamento monofásico de água, sendo que o *software* para execução automática dos testes realiza ciclicamente as seguintes operações:

- define a frequência da bomba de água;
- define a válvula solenóide que simula um vazamento;
- aguarda o tempo de estabilização do sistema (10 segundos);
- inicia o armazenamento de dados (9 transdutores de pressão (ver Tabela 1)) no *PenDrive* em arquivos ASCII separados por tabulação;
- aguarda tempo para abertura da válvula solenóide (60 segundos);
- abre a válvula solenóide pré-definida;
- aguarda tempo para fechamento da válvula solenóide (60 segundos);
- fecha a válvula solenóide;
- finaliza ensaio e aquisição de sinais.

Mais detalhes das temporizações programáveis do *software* para execução automática dos testes são ilustrados na Figura 3.4. A disposição dos transdutores de pressão e dos medidores de vazão descritos na Tabela 1 e as válvulas solenóides descritas na Tabela 2, podem ser visualizadas na Figura 3.2.

Figura 3.4 - Temporizações programáveis do *software* para execução automática dos experimentos.

Tabela 1 - Posições Relativas dos Transdutores à Bomba de Água.

Sensores	Posição Relativa (metros)
FMI – Medidor de Vazão da Entrada	15
P1 – Transdutor de Pressão 1	143
P2 – Transdutor de Pressão 2	263
P3 – Transdutor de Pressão 3	387
P4 – Transdutor de Pressão 4	508
P5 – Transdutor de Pressão 5	632
P6 – Transdutor de Pressão 6	878
P7 – Transdutor de Pressão 7	1000
P8 – Transdutor de Pressão 8	1123
P9 – Transdutor de Pressão 9	1243
P10 – Transdutor de Pressão 10	1367
FMO- Medidor de Vazão da Saída	1492

Foram arbitradas 3 frequências (30, 40 e 50 Hz) de bomba. Devido a manutenções no oleoduto piloto, apenas 10 das 22 válvulas de simulação de vazamento estão operantes (V2, V4, V6, V8, V10, V13, V15, V17, V19 e V21). Ainda, o sensor de pressão P1 também está inoperante. Assim, constituiu um total de 30 ciclos de testes experimentais, sendo cada ciclo com duração de 180 segundos, totalizando a aquisição de 270 sinais de simulação de vazamento. A vazão média de cada experimento para as frequências de bomba de 30, 40 e 50 Hz são respectivamente, 73.7, 100.4 e 125.4 l/min. A abertura das válvulas utilizadas para simulação de vazamento foram calibradas para fornecer uma vazão aproximada de 7 litros por minuto com o inversor de frequência da bomba à 30Hz.

Tabela 2 - Posições Relativas das Válvulas Solenóides (Vazamentos).

Válvulas	Posição Relativa (metros)
V1 – Válvula Solenóide 1	100
V2 – Válvula Solenóide 2	142
V3 – Válvula Solenóide 3	185
V4 – Válvula Solenóide 4	266
V5 – Válvula Solenóide 5	344
V6 – Válvula Solenóide 6	387
V7 – Válvula Solenóide 7	430
V8 – Válvula Solenóide 8	511
V9 – Válvula Solenóide 9	589
V10 – Válvula Solenóide 10	631
V11 – Válvula Solenóide 11	674
V12 – Válvula Solenóide 12	835
V13 – Válvula Solenóide 13	878
V14 – Válvula Solenóide 144	921
V15 – Válvula Solenóide 15	1002
V16 – Válvula Solenóide 16	1080
V17 – Válvula Solenóide 17	1122
V18 – Válvula Solenóide 18	1165
V19 – Válvula Solenóide 19	1246
V20 – Válvula Solenóide 20	1324
V21 – Válvula Solenóide 21	1366
V22 – Válvula Solenóide 22	1410

Como o ponto de aquisição de pressão e simulação de vazamento é o mesmo para os sensores P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9 e P10, e respectivamente para as válvulas V4, V6, V8, V10, V13, V15, V17, V19 e V21, esses sinais de pressão nos testes coincidentes foram desconsiderados na análise. A Tabela 3 explicita a matriz de sinais aquisitados para cada frequência da bomba (30, 40 e 50 Hz), sendo que as colunas em destaque exibem os sensores que aquisitam dados para cada simulação de vazamento.

Tabela 3 - Relação entre Simulação de Vazamento e Aquisição de Sinal.

Sensor \ Válvula	V2	V4	V6	V8	V10	V13	V15	V17	V19	V21
P2										
P3										
P4										
P5										
P6										
P7										
P8										
P9										
P10										

3.1.3 Sistema de Controle e Aquisição de Dados

O Sistema de controle e aquisição de dados está detalhado no Anexo A. Sucintamente, utiliza-se um PAC da *National Instruments*® composto por um controlador de tempo real, um FPGA e módulos de I/Os. A lógica do programa do PAC controla a frequência do inversor controlador da bomba de água e também aciona a válvula solenóide que simula o vazamento em posições pré-determinadas – detalhadas na Figura 3.2. O PAC realiza a aquisição de sinais de 10 transdutores de pressão a taxa de 100 Hz, armazenando os dados em um dispositivo do tipo *PenDrive*. Na lógica do programa, é possível executar experimentos com diferentes frequências de aquisição, frequências do inversor de frequência, posições de vazamentos.

3.1.4 Pré-processamento do Sinal Adquirido

Um exemplo de sinal obtido experimentalmente de uma simulação de vazamento está disposto na Figura 3.5. Os sinais experimentais são compostos por 2 componentes: 1) Componente DC, que expressa o valor em regime permanente; 2) Componente AC, que expressa o sinal transiente.

A diferença de cotas altimétricas nos sensores de pressão e a perda de carga do escoamento acarretam em uma diferença na pressão estática em cada sensor instalado no oleoduto piloto (ver Figura 3.2). Assim, é extraído a componente DC do sinal através do filtro de Fourier passa-alta.

O filtro de Fourier passa-alta consiste em realizar a transformada de Fourier do sinal, isto é, decompor o sinal em termos de senos e cossenos de diferentes frequências características, e então zerar a componente de frequência zero, ou seja, a componente DC (COHEN L., 1995). Para um sinal discreto, utiliza-se a transformada de Fourier discreta, que está expressa na Equação (3.1). Para se obter o sinal filtrado realiza-se a transformada inversa de Fourier, dada pela Equação (3.2).

$$X(k) = \sum_{n=1}^N x(n) e^{-j2\pi(k-1)(n-1)/N}; 1 \leq k \leq N \quad (3.1)$$

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X(k) e^{j2\pi(k-1)(n-1)/N}; 1 \leq k \leq N \quad (3.2)$$

Figura 3.5 - Sinal Experimental de Simulação de Vazamento.

Figura 3.6 - Componente AC dos Sinais Experimentais de Simulação de Vazamento da Figura 3.5.

Analisando o gráfico da Figura 3.5, pode-se destacar 5 etapas no experimento de simulação de vazamento:

- i. Entre os instantes 0 à 6000 centésimos de segundo: Aguarda abertura de válvula que simula vazamento;
- ii. Instante 6000 centésimos de segundo: Instante da abertura da válvula que simula vazamento;
- iii. Entre os instantes 6000 à 12000 centésimos de segundo: Acomodação do sinal de vazamento;
- iv. Instante 12000 centésimos de segundo: Instante do fechamento da válvula que simula vazamento;
- v. Entre os instantes 12000 à 18000 centésimos de segundo: Acomodação do sinal de fechamento de vazamento.

Para realizar uma análise específica para extrair características dos sinais de vazamentos, focaremos a análise nos 1500 centésimos de segundos a partir do instante de abertura da válvula que simula o vazamento. Assim, a Figura 3.7 exibe os sinais de vazamento dos experimentos exemplificados na Figura 3.6.

Figura 3.7 - Detalhes nos Sinais de Abertura de Válvula das Simulações de Vazamento da Figura 3.6.

A Figura 3.8 apresenta uma análise do espectro de frequências, através do módulo da transformada de Fourier para o sinal vazamento (abertura de válvula) exemplificado na Figura 3.7. Descrições abrangentes sobre análise no espaço tempo-frequência serão apresentadas na seção 3.3 deste trabalho.

Figura 3.8 - Transformada de Fourier para o Sinal de Vazamento (Abertura de Válvula) Exemplificado na Figura 3.7.

Analisando a transformada de Fourier para os sinais de vazamento, conclui-se que as frequências características destes vazamentos tipicamente são inferiores a 10Hz . De acordo com o critério da amostragem de Nyquist (LÜKE H., 1999) a taxa mínima de amostragem de

um sinal (f_{SMIN}) – frequência de Nyquist – é tal que a relação entre a máxima frequência do sinal (f_{MAX}) e (f_{SMIN}) seja superior a 2. Em termos matemáticos temos que:

$$f_{SMIN} \geq 2f_{MAX} \quad (3.3)$$

Logo, para $f_{MAX} = 10Hz$, temos uma frequência de Nyquist $f_{SMIN} = 20Hz$. Os experimentos foram realizados a frequência de amostragem $f_s = 100Hz$, assim tem uma frequência de amostragem 10 vezes à frequência máxima, satisfazendo o critério de Nyquist.

3.3 Análise de Sinais

Os sinais de pressão provenientes de transdutores de pressão instalados ao longo do duto experimental foram analisados de acordo com os fundamentos de Análise de Sinais.

A Análise de Sinais é o estudo e a caracterização das propriedades básicas dos sinais e foi historicamente desenvolvida em paralelo à descoberta dos sinais fundamentais da natureza, como campo elétrico, onda sonora e corrente elétrica. Um sinal é geralmente uma função dependente de diversas variáveis, estas normalmente representando espaço e tempo. O campo elétrico, por exemplo, varia tanto em função do tempo como do espaço (COHEN, 1995).

O tempo é uma variável fundamental, porém, algumas vezes é mais vantajoso estudar o sinal em uma representação diferente da temporal, ou seja, no plano das frequências, pois além do tempo a frequência é a mais importante variável de representação. Sua representação matemática foi feita por Fourier, cuja principal motivação era resolver a equação que governa o comportamento do calor. Assim, o sinal pode ser analisado de três maneiras diferentes: em função do tempo; no plano das frequências e no plano tempo-frequência, como serão descritas nesta seção.

3.1.5 Descrição Temporal do Sinal

Um sinal normalmente é denotado por $s(t)$. Em princípio um sinal pode ter qualquer forma funcional representando sinais reais como, por exemplo, ondas de som e corrente

elétrica. O mais simples sinal variando no tempo é o cosenoidal, com amplitude a e frequência ω_0 constantes, representado como:

$$s(t) = a \cos(\omega_0 t) \quad (3.4)$$

Dizer que um sinal tem amplitude constante não significa que seu valor seja constante, mas que a máxima e a mínima das oscilações são constantes. De forma generalizada, um sinal cosenoidal pode ser escrito como:

$$s(t) = a(t) \cos(v(t)) \quad (3.5)$$

onde a amplitude $a(t)$ e a fase $v(t)$ são agora funções do tempo. Também é vantajoso escrever um sinal na forma complexa, ou seja:

$$s(t) = A(t)e^{j\varphi(t)} = s_r + js_j \quad (3.6)$$

Como encontrar a amplitude, a fase e como definir um sinal complexo a partir de um sinal real, serão abordados na seção 3.3.5.

3.1.6 Densidade de Energia e Energia Total de um Sinal

A energia ou intensidade de um sinal geralmente é dada por $|s(t)|^2$. Em um pequeno intervalo de tempo Δt consome-se a quantidade $|s(t)|^2 \Delta t$ de energia para produzir o sinal nesse intervalo de tempo. Dessa forma, $|s(t)|^2$ é a energia por unidade de tempo, ou a densidade de energia ou ainda a potência instantânea do sinal (COHEN, 1995).

A energia total E de um sinal é obtida pela integração da densidade sobre todo o tempo, ou seja:

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} |s(t)|^2 dt \quad (3.7)$$

Considerando $|s(t)|^2$ como a densidade de energia temporal de um sinal $s(t)$, então o tempo médio (ou baricentro) $\langle t \rangle$ pode ser definido como:

$$\langle t \rangle = \frac{1}{E} \int_{-\infty}^{+\infty} t |s(t)|^2 dt \quad (3.8)$$

As razões para se definir um tempo médio (ou baricentro) são as seguintes:

- Através do tempo médio é possível obter uma caracterização aproximada da densidade de energia temporal do sinal;
- É possível também obter uma indicação de onde a energia está concentrada.

Muitas medidas podem ser usadas para averiguar se a densidade está concentrada em torno do tempo médio, dentre elas a mais comum é o desvio padrão σ_t , que é dado por:

$$\sigma_t^2 = \frac{1}{E} \int_{-\infty}^{+\infty} (t - \langle t \rangle)^2 |s(t)|^2 dt \quad (3.9)$$

O desvio padrão é um indicador da duração do sinal. Se o desvio padrão σ_t é pequeno, então grande parte do sinal se encontra concentrado em torno do tempo médio e passará rapidamente, o que indica curta duração. De forma contrária temos um sinal de longa duração. Existem sinais que apresentam desvio padrão infinito, mesmo tendo energia finita. Isso indica que o sinal é muito duradouro (COHEN, 1995).

3.1.7 *Descrição Espectral do Sinal*

A análise espectral ou frequencial tornou-se extremamente rica com o estabelecimento de suas bases teóricas após o trabalho de Fourier. Isto se consolidou com a invenção do espectroscópio e com a descoberta de que, através da análise espectral da luz, pode-se determinar a natureza da matéria; que átomos e moléculas podem ser caracterizados pelo espectro de frequência de luz que emitem ou absorvem energia (COHEN, 1995).

Bunsen e Kirchhoff tornaram a análise espectral uma grande descoberta devido às suas contribuições deixadas seis anos após Fourier ter apresentado suas idéias. Em suas descobertas, observaram que o espectro de luz pode ser usado para reconhecimento, detecção e classificação das substâncias.

Segundo Cohen (1995), existem quatro principais razões para a análise frequencial ou análise espectral de um sinal.

- Analisando as frequências de um sinal, é possível descobrir características de sua fonte;
- A propagação de ondas através de um meio depende geralmente da frequência. A propagação de um sinal através de um meio é bastante complicada, mas o efeito básico é que ondas de diferentes frequências podem propagar-se com diferentes velocidades. Para se estudar a propagação como função da frequência dependente do meio, decompõe-se o sinal em diferentes componentes frequenciais, analisa-se cada componente separadamente e então reconstrói o sinal para se obter a forma de onda resultante;
- A decomposição espectral em geral simplifica a análise do sinal;
- A decomposição, ou análise de Fourier é uma poderosa ferramenta matemática para a solução de equações diferenciais ordinárias e parciais.

Na decomposição de Fourier o sinal é expandido em termos de senos de diferentes frequências. Assim, para um sinal $s(t)$ a expansão é da seguinte forma (COHEN, 1995).

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (3.10)$$

O sinal é constituído pela adição (superposição linear) de sinais simples, $e^{j\omega t}$, cada um caracterizado pela frequência ω e contribuindo com uma quantidade relativa indicada pelo coeficiente $S(\omega)$, que é obtido a partir do sinal através da equação (COHEN, 1995).

$$S(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) e^{-j\omega t} dt \quad (3.11)$$

$S(\omega)$ é chamado espectro de $s(t)$ ou transformada de Fourier de $s(t)$.

Assim, como $S(\omega)$ e $s(t)$ estão diretamente relacionados, pode-se dizer que o espectro representa o sinal no domínio da frequência (COHEN, 1995).

A transformada de Fourier identifica e distingue as ondas senoidais de diferentes frequências (e suas respectivas amplitudes) que se combinam para formar o sinal (BRIGHAM, 1988). Matematicamente essa relação é dada pela Equação (3.11).

Portanto a transformada de Fourier é uma representação no domínio da frequência de uma função temporal (sinal).

3.1.8 Densidade de Energia Espectral e Energia Total

Analogamente ao sinal no domínio do tempo, pode-se considerar $|S(\omega)|^2$ como sendo a densidade de energia por unidade de frequência. Do mesmo modo, $|S(\omega)|^2 \Delta\omega$ é a fração de energia no intervalo frequencial $\Delta\omega$ na frequência ω .

A energia total do sinal é independente do método usado para calculá-la. Por essa razão, tem-se (COHEN, 1995):

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} |s(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{+\infty} |S(\omega)|^2 d\omega \quad (3.12)$$

Essa identidade é conhecida como Teorema de Parseval ou Teorema de Rayleigh.

Analogamente a caracterização do sinal no tempo, se $|S(\omega)|^2$ representa a densidade espectral de energia, é possível caracterizar o sinal na frequência, ou seja, pode-se calcular a frequência média $\langle\omega\rangle$ e seu desvio padrão σ_ω através das Equações (3.13) e (3.14) respectivamente.

$$\langle\omega\rangle = \frac{1}{E} \int_{-\infty}^{+\infty} \omega |S(\omega)|^2 d\omega \quad (3.13)$$

$$\sigma_\omega^2 = \frac{1}{E} \int_{-\infty}^{+\infty} (\omega - \langle\omega\rangle)^2 |S(\omega)|^2 d\omega \quad (3.14)$$

A média de qualquer função espectral $g(\omega)$ é dada pela Equação (3.15):

$$\langle g(\omega) \rangle = \frac{1}{E} \int_{-\infty}^{+\infty} g(\omega) |S(\omega)|^2 d\omega \quad (3.15)$$

A densidade de energia espectral $|S(\omega)|^2$ representa as frequências que existiram durante o sinal. No entanto, ela não fornece nenhuma indicação de quando tais frequências ocorreram.

3.1.9 O Sinal Complexo

Os sinais na natureza são reais. No entanto, é vantajoso definir um sinal complexo que corresponda a um sinal real. Um dos motivos para se definir um sinal na forma complexa é que ele permite definir a fase, de onde se obtém a frequência instantânea.

Considere um sinal complexo $z(t)$ cuja parte real, $s_r(t)$, é o próprio sinal físico.

$$z(t) = s_r + js_i = A(t)e^{j\varphi(t)} \quad (3.16)$$

Considerando a parte imaginária, $s_i(t)$, é possível definir a amplitude e a fase pelas fórmulas (COHEN, 1995):

$$A(t) = \sqrt{s_r^2 + s_i^2} \quad (3.17)$$

$$\varphi(t) = \arctan\left(\frac{s_r}{s_i}\right) \quad (3.18)$$

A partir das Equações (3.17) e (3.18), determina-se a frequência instantânea através da Equação (3.19) (COHEN, 1995):

$$\omega_i(t) = \varphi'(t) = \frac{(s_i' s_r - s_r' s_i)}{A^2} \quad (3.19)$$

O problema é então determinar a parte imaginária. Historicamente há dois métodos: o método quadrático e o método do sinal analítico.

Antes de ser introduzido o sinal analítico, a idéia principal para formar um sinal na forma complexa era escrevê-lo na forma $s(t) = A(t)\cos(\varphi(t))$, e transformá-lo para

$s(t) = A(t)e^{j\varphi(t)}$. O problema é que a primeira forma oferece uma infinidade de equações diferentes. Este procedimento é chamado de método quadrático.

O procedimento do sinal analítico, inventado por Gabor, resulta num sinal complexo cujo espectro é idêntico ao do sinal nas frequências positivas, e zero nas frequências negativas.

3.1.10 O Sinal Analítico

Se o sinal real $s(t)$ tem o espectro $S(\omega)$, então o sinal complexo $z(t)$, cujo espectro é composto somente das frequências positivas de $S(\omega)$, é dado pela transformada inversa de $S(\omega)$, onde a integração é feita somente na parte positiva das frequências (COHEN, 1995):

$$z(t) = 2 \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{+\infty} S(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (3.20)$$

O fator 2 é inserido para que a parte real do sinal analítico, $z(t)$, seja o próprio $s(t)$; caso contrário ela seria apenas $\frac{1}{2}$ de $s(t)$. A forma explícita de $z(t)$ em termos de $s(t)$ é obtida da seguinte forma:

$$S(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) e^{-j\omega t} dt \quad (3.21)$$

Substituindo a Equação (3.21), ou seja, $S(\omega)$ na Equação (3.20) tem-se que:

$$z(t) = 2 \frac{1}{2\pi} \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} s(\hat{t}) e^{-j\omega \hat{t}} e^{j\omega t} d\hat{t} d\omega = \frac{1}{\pi} \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} s(\hat{t}) e^{j\omega(t-\hat{t})} d\hat{t} d\omega \quad (3.22)$$

Sabendo que $\int_0^{+\infty} e^{j\omega x} d\omega = \pi\delta(x) + \frac{j}{x}$ onde $\delta(x)$ é a função delta de Dirac, definida como (BRIGHAM, 1988):

$$\delta(t - \hat{t}) = 0, \text{ se } t \neq \hat{t} \quad (3.23)$$

$$\delta(t - \hat{t}) = \infty, \text{ se } t = \hat{t} \quad (3.24)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t - \hat{t}) dt = 1 \quad (3.25)$$

Da Equação (3.22), encontra-se:

$$z(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} s(\hat{t}) \left[\pi \delta(t - \hat{t}) + \frac{j}{(t - \hat{t})} \right] d\hat{t} \quad (3.26)$$

Resolvendo a Equação (3.26), chega-se a (COHEN, 1995):

$$A[s] = z(t) = s(t) + \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{s(\hat{t})}{(t - \hat{t})} d\hat{t} \quad (3.27)$$

Usa-se a notação $A[s]$ para denotar o sinal analítico correspondente ao sinal s . A razão para o nome analítico é que funções complexas desse tipo satisfazem as condições de Cauchy-Riemann para a diferenciação e, por esse motivo, são chamadas tradicionalmente de funções analíticas.

A segunda parte da Equação (3.27), que compreende a parte imaginária, é a transformada de Hilbert do sinal, normalmente denotada por $H[s(t)]$. Assim (COHEN, 1995):

$$H[s(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{s(\hat{t})}{(t - \hat{t})} d\hat{t} \quad (3.28)$$

A transformada de Hilbert é uma eficiente técnica que pode ser usada para as seguintes funções (ALLAN, MILLIS, 2004):

- Encontrar o envelope de um sinal;
- Encontrar a fase instantânea de um sinal;
- Encontrar a frequência instantânea de um sinal;
- Suprimir uma das bandas laterais a fim de criar uma banda lateral única, ou seja, fazer a modulação de um sinal.

3.1.11 Classificação dos Sinais

Devido à diversidade de sinais existentes, a classificação dos sinais é feita de modo amplo. Se um sinal não varia em algum sentido objetivo, diz-se que ele é estacionário; caso contrário ele é considerado não estacionário. Se um sinal é de curta duração, ele é geralmente chamado de transiente.

Se um sinal é explicitamente conhecido, diz-se que se tem um sinal determinístico. Frequentemente os sinais são governados por eventos aleatórios, possibilitando a decomposição em vários sinais. Nesse caso o sinal é dito aleatório ou estocástico.

O conteúdo espectral é usado algumas vezes para classificar os sinais. Sinais cujo espectro se concentra em uma faixa frequencial relativamente pequena são chamados de banda limitada; caso contrário são chamados de banda larga.

3.1.12 A Análise Tempo-Frequência

A análise tempo-frequência originou-se há aproximadamente cinquenta anos e recentemente tem tido um maior desenvolvimento no estabelecimento de seus princípios básicos e nas aplicações práticas. É importante ressaltar que este campo está evoluindo muito rapidamente, devido à introdução de novas idéias.

O sinal (domínio do tempo) e o seu espectro (domínio da frequência) algumas vezes não são suficientes sozinhos para descrever fisicamente o que está acontecendo. A partir do espectro, sabe-se quais frequências estavam presentes no sinal, mas não se sabe quando elas existiram. Por este motivo é que surge a necessidade de se fazer a análise tempo-frequência do sinal.

O objetivo básico da análise tempo-frequência é entender e analisar situações onde a composição frequencial de um sinal está mudando no tempo, ou seja, descobrir uma função que descreva a densidade de energia de um sinal simultaneamente no tempo e na frequência, e que possa ser usada e manipulada da mesma maneira como qualquer densidade. De posse de tal função (ou distribuição), pode-se saber qual a fração de energia existente em uma determinada faixa temporal e frequencial, e calcular a densidade de frequências em um tempo particular, e momentos global e local entre outros.

3.1.13 Por que o espectro varia?

Há diversas causas para a variação do espectro no tempo. Segundo Cohen (1995), existem dois principais motivos para ocorrência dessa variação, são eles:

A produção de frequências particulares depende de parâmetros físicos que podem variar no tempo. Por exemplo, uma corda com o comprimento e a tensão constantes produz uma frequência particular se perturbada. Se o comprimento e a tensão da corda variam com o tempo, diferentes frequências serão produzidas no tempo porque a corda vibrará aleatoriamente.

A propagação de ondas em um meio está geralmente ligada à frequência, e da mesma forma, o meio atua sobre a frequência.

3.1.14 A Transformada de Fourier a Curto Tempo

A transformada de Fourier a curto tempo é o método mais usado para estudar sinais não estacionários. Suponha o seguinte caso: gravou-se uma hora de determinada música onde no início da gravação sabe-se que houve violinos e no final tambores. Utilizando a análise de Fourier durante toda a gravação (1 hora), a energia espectral mostra picos nas frequências correspondentes aos violinos e tambores, ou seja, ela comprova que houve violinos e tambores durante toda a música, no entanto, não indica quando elas ocorreram. O mais indicado a se fazer é “quebrar” o sinal gravado, ou seja, separá-lo (no caso a música) em segmentos de cinco minutos e então analisar espectralmente (transformada de Fourier) cada segmento. A análise de cada segmento determinará em quais intervalos de tempo ocorreram às frequências características dos violinos e dos tambores. Desejando-se uma melhor localização temporal dessas frequências, pode-se reduzir o intervalo de cinco minutos para, por exemplo, um minuto. Essa é a idéia básica da transformada de Fourier a curto tempo: particionar o sinal em pequenos intervalos de tempo, a fim de determinar quais frequências existem em cada intervalo e desse modo ter uma noção de como o espectro varia no tempo.

É importante saber que os intervalos de tempo não podem ser muito curtos. Isso porque, se a janela de análise for muito estreita, o espectro torna-se sem significado e não mostra nenhuma relação com o espectro total.

A análise de sinais no domínio da frequência, baseada apenas nas transformadas de Fourier, nem sempre consegue descrever completamente o que está acontecendo, pois esta mostra as frequências existentes para a duração total do sinal e não aquelas existentes em uma janela de tempo particular. Se o sinal é do tipo periódico durante todo o tempo, a análise do espectro em frequência é suficiente para uma boa descrição do seu comportamento. Porém, quando o sinal é composto por várias formas de ondas e seu espectro ocorre em determinadas faixas de tempo, se faz necessário obter a sua representação conjunta tempo-frequência.

Para se avaliar as propriedades do sinal para um tempo t , dá-se ênfase ao sinal naquele momento e o oculta em outros tempos. Isso é feito multiplicando o sinal por uma função janela $h(t)$ a fim de se produzir um sinal modificado do tipo (COHEN, 1995):

$$s_t(\tau) = s(\tau)h(\tau - t) \quad (3.29)$$

O sinal modificado $s_t(\tau)$ é uma função de dois tempos: o tempo fixado t (tempo de análise) e o tempo corrente τ . A função janela h (também chamada de função analisante) é a função escolhida para levar o sinal de forma inalterada em torno de t e de forma oculta para os tempos distantes do tempo de análise.

O termo janela vem da idéia de olhar somente uma parte do sinal, da mesma forma que quando se olha através de uma janela real vê-se somente uma porção relativamente pequena do cenário.

Desde que o sinal modificado enfatize o sinal em torno do tempo t , a transformada de Fourier refletirá a distribuição de frequências em torno daquele tempo (COHEN, 1995):

$$S_t(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j\omega\tau} s_t(\tau) d\tau \quad (3.30)$$

$$S_t(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j\omega\tau} s(\tau)h(\tau - t) d\tau \quad (3.31)$$

A densidade de energia espectral no tempo t é então:

$$P_{SP}(t, \omega) = |S_t(\omega)|^2 = \left| \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j\omega\tau} s(\tau)h(\tau - t) d\tau \right|^2 \quad (3.32)$$

Para cada tempo t diferente, consegue-se um espectro diferente e a totalidade desses espectros é a distribuição tempo-frequência $P_{sp}(t, \omega)$. Essa distribuição normalmente é denominada espectrograma.

Transformada de Fourier a curto tempo, transformada de Gabor, transformada de Wavelet e distribuição de Wigner-Ville são formas de se construir a função $P_{sp}(t, \omega)$. O que distingue cada forma é a função analisante h utilizada. A transformada de Gabor (utilizada nesse trabalho para construir o plano tempo-frequência), por exemplo, usa a função gaussiana (distribuição normal) como função analisante $h(\tau - t) = e^{-\alpha(\tau - t)^2}$.

3.1.15 Momentos Estatísticos utilizados para a Análise dos Sinais

Os sinais de pressão provenientes dos transdutores de pressão foram analisados nos planos: temporal $s(t)$, frequencial $S(\omega)$ e tempo-frequência $P_{sp}(t, \omega)$. A função conjunta tempo-frequência foi obtida através da transformada de Gabor. Funções estatísticas, como média e desvio padrão da distribuição temporal dos sinais foram utilizadas na análise dos sinais.

A média do sinal $s(t)$ com N valores $(s_1, \dots, s_n)$ é dada pela Equação (3.33):

$$\bar{s} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i \quad (3.33)$$

A média (conhecida como primeiro momento) estima o valor central da distribuição temporal do sinal $s(t)$.

O desvio padrão da distribuição $s(t)$ é dado pela equação (3.34):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (s_i - \bar{s})^2} \quad (3.34)$$

O desvio padrão (conhecido como segundo momento) caracteriza a largura ou desvio da distribuição em torno da média.

3.4 Software Matlab

O MATLAB (*MAtrix LABoratory*) é um *software* interativo de alta performance voltado para o cálculo numérico, integrando análise numérica, cálculo com matrizes, processamento de sinais e construção de gráficos em ambiente de fácil utilização.

Atualmente o MATLAB dispõe de uma biblioteca bastante abrangente de funções matemáticas, geração de gráficos e manipulação de dados que auxiliam muito o trabalho do programador. E ainda possui uma vasta coleção de bibliotecas, denominadas *toolboxes*, para áreas específicas como: equações diferenciais, estatística, processamento de imagens, processamento de sinais e finanças.

Assim, para a análise tempo-frequência e estatística dos dados deste trabalho, foram desenvolvidas rotinas no *software* MATLAB.

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos pela análise nos planos: temporal $s(t)$, frequencial $S(\omega)$, tempo-frequência $P_{sp}(t, \omega)$ e estatística dos sinais capturados e processados conforme descrito na seção 3.2.2.

Quanto à análise tempo-frequência a função conjunta foi obtida através da transformada de Gabor. Para análise estatística, foram avaliados os momentos estatísticos, tais como: média e desvio-padrão.

Para este trabalho foi adotada a seguinte nomenclatura para os ensaios realizados: $V_x - P_y$, onde x indica a válvula em que foi realizado o vazamento – caso $x = 0$, não há vazamento – e y indica o sensor de pressão em que foi captado o sinal.

4.1 Análise dos sinais experimentais sem vazamento

- *Análise Temporal*

As Figuras 4.1, 4.3 e 4.5 representam sinais experimentais sem vazamento, para as frequências de bomba de 30, 40 e 50Hz, respectivamente, após processamento. Já as Figuras 4.2, 4.4 e 4.6 representam os sinais experimentais sem vazamento e seus envelopes, para as respectivas frequências de bomba de 30, 40 e 50Hz.

Figura 4.1 - Sinal experimental de simulação sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V0 - P4).

Figura 4.2 - Envelope do sinal experimental de simulação sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V0 - P4).

Figura 4.3 - Sinal experimental de simulação sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V0 - P4).

Figura 4.4 - Envelope do sinal experimental de simulação sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V0 - P4).

Figura 4.5 - Sinal experimental de simulação sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V0 - P4).

Figura 4.6 - Envelope do sinal experimental de simulação sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V0 - P4).

- *Análise Frequencial*

As Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 representam a transformada de Fourier dos sinais experimentais sem vazamento, para as frequências de bomba de 30, 40 e 50Hz, respectivamente, após processamento.

Figura 4.7 - Transformada de Fourier do sinal no tempo (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V0 - P4).

Figura 4.8 - Transformada de Fourier do sinal no tempo (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V0 - P4).

Figura 4.9 - Transformada de Fourier do sinal no tempo (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V0 - P4).

- *Análise Tempo-Frequência*

As Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 apresentam a representação tridimensional da transformada de Gabor no plano tempo frequência dos sinais sem vazamento, para as frequências de bomba de 30, 40 e 50Hz, respectivamente, após processamento.

Figura 4.10 - Visualização tridimensional da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V0 - P4).

Figura 4.11 - Visualização tridimensional da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V0 - P4).

Figura 4.12 - Visualização tridimensional da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V0 - P4).

As Figuras 4.13, 4.14 e 4.15 apresentam a transformada de Gabor no plano tempo frequência dos sinais sem vazamento, para as frequências de bomba de 30, 40 e 50Hz, respectivamente, após processamento.

Figura 4.13 - Visualização da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V0 - P4).

Figura 4.14 - Visualização da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V0 - P4).

Figura 4.15 - Visualização da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V0 - P4).

4.2 Análise dos sinais com vazamento

- *Análise Temporal*

As Figuras 4.16, 4.18 e 4.20 representam sinais experimentais com vazamento, para as frequências de bomba de 30, 40 e 50Hz, respectivamente, após processamento. Já as Figuras 4.17, 4.19 e 4.21 representam os sinais experimentais com vazamento e seus envelopes, para as respectivas frequências de bomba de 30, 40 e 50Hz.

Figura 4.16 - Sinal experimental de simulação com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V2 - P4).

Figura 4.17 - Envelope do sinal experimental de simulação com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V2 - P4).

Figura 4.18 - Sinal experimental de simulação com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V2 - P4).

Figura 4.19 - Envelope do sinal experimental de simulação com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V2 - P4).

Figura 4.20 - Sinal experimental de simulação com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V2 - P4).

Figura 4.21 - Envelope do sinal experimental de simulação com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V2 - P4).

- *Análise Frequencial*

As Figuras 4.22, 4.23 e 4.24 representam a transformada de Fourier dos sinais experimentais com vazamento, para as frequências de bomba de 30, 40 e 50Hz, respectivamente, após processamento.

Figura 4.22 - Transformada de Fourier do sinal com vazamento no tempo (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V2 - P4).

Figura 4.23 - Transformada de Fourier do sinal com vazamento no tempo (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V2 - P4).

Figura 4.24 - Transformada de Fourier do sinal com vazamento no tempo (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V2 - P4).

- ***Análise Tempo-Frequência***

As Figuras 4.25, 4.26 e 4.27 apresentam a representação tridimensional da transformada de Gabor no plano tempo frequência dos sinais com vazamento, para as frequências de bomba de 30, 40 e 50Hz, respectivamente, após processamento.

Figura 4.25 - Visualização tridimensional da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V2 - P4).

Figura 4.26 - Visualização tridimensional da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V2 - P4).

Figura 4.27 - Visualização tridimensional da transformada de Gabor no plano tempo-freqüência para o sinal com vazamento (Freqüência do Inversor de Bomba 50 Hz – V2 - P4).

As Figuras 4.28, 4.29 e 4.30 apresentam a transformada de Gabor no plano tempo freqüência dos sinais com vazamento, para as freqüências de bomba de 30, 40 e 50Hz, respectivamente, após processamento.

Figura 4.28 - Visualização da transformada de Gabor no plano tempo-freqüência para o sinal sem vazamento (Freqüência do Inversor de Bomba 30 Hz – V0 - P4).

Figura 4.29 - Visualização da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V2 - P4).

Figura 4.30 - Visualização da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V2 - P4).

4.3 Análise Estatística dos Sinais

As Figuras 4.31, 4.32 e 4.33 apresentam a média dos sinais com e sem vazamento para as respectivas frequências de bomba de 30, 40 e 50Hz.

Figura 4.31 - Média dos sinais $s(t)$ com vazamento e sem vazamento para os experimentos na frequência do inversor de bomba em 30 Hz.

Figura 4.32 - Média dos sinais $s(t)$ com vazamento e sem vazamento para os experimentos na frequência do inversor de bomba em 40 Hz.

Figura 4.33 - Média dos sinais $s(t)$ com vazamento e sem vazamento para os experimentos na frequência do inversor de bomba em 50 Hz.

As Figuras 4.34, 4.35 e 4.36 apresentam o desvio padrão dos sinais com e sem vazamento para as respectivas frequências de bomba de 30, 40 e 50Hz.

Figura 4.34 - Desvio padrão dos sinais $s(t)$ com vazamento e sem vazamento para frequência do inversor de bomba em 30 Hz.

Figura 4.35 - Desvio padrão dos sinais $s(t)$ com vazamento e sem vazamento para frequência do inversor de bomba em 40 Hz.

Figura 4.36 - Desvio padrão dos sinais $s(t)$ com vazamento e sem vazamento para frequência do inversor de bomba em 50 Hz.

Figura 4.37 - Energia total dos sinais com vazamento e sem vazamento para frequência do inversor de bomba em 30 Hz.

Figura 4.38 - Energia total dos sinais com vazamento e sem vazamento para frequência do inversor de bomba em 40 Hz.

Figura 4.39 - Energia total dos sinais com vazamento e sem vazamento para frequência do inversor de bomba em 50 Hz.

4.4 Análise dos Resultados

Os resultados apresentados na análise temporal (Figuras 4.2, 4.4, 4.6, 4.17, 4.19 e 4.21) através do envelope de cada sinal para as frequências dadas não foram satisfatórios para detectar a ocorrência de um vazamento, pois o sinal real, mesmo que tenha sido pré-processado – filtrado – ainda contém ruídos que interferem na análise do envelope do sinal.

Pela análise das Figuras 4.22, 4.23, 4.24, 4.25, 4.26, 4.27, 4.28, 4.29 e 4.30 contrapondo-se com as Figuras 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14 e 4.15 observa-se as seguintes características das transformadas de Fourier e Gabor:

- Sinais sem vazamento (item 4.1): Não observa-se para a transformada de Gabor, durante todo o eixo temporal, a ocorrências de picos na amplitude da transformada para nenhuma frequência característica do sinal, e pela análise da transformada de Fourier observa-se baixos picos de amplitude da transformada em frequências características compreendidas entre 0 e 5 Hz.
- Sinais com vazamento (item 4.2): Através da transformada de Fourier observa-se que as frequências características de vazamento são abaixo de 10 Hz, com ocorrências de grandes picos de amplitude entre 0 e 5 Hz, ou seja, frequências

bem mais altas, o que caracteriza a presença de vazamento. Já através da visualização tridimensional da transformada de Gabor destes sinais foi possível observar a ocorrência localizada de picos na amplitude da transformada ao longo do eixo temporal, ou seja, picos localizados no instante de abertura da válvula (6000 centésimos de segundos) e fechamento da válvula (12000 centésimos de segundos). No plano tempo-frequência também foi possível observar altas concentrações de frequências entre 0 e 5 Hz nestes mesmos instantes.

Na análise estatística, através das figuras 4.31, 4.32 e 4.33 observa-se que a média dos sinais no tempo com e sem vazamento também não pode ser um bom parâmetro para identificação da ocorrência de vazamento, pois as médias das duas situações descritas nos gráficos praticamente não apresentaram discordâncias significativas em todos os experimentos analisados. Já no desvio-padrão (figuras 4.34, 4.35 e 4.36) foi possível observar uma disparidade representativa, isto é, nas três situações apresentadas (frequência do inversor de bomba em 30, 40 e 50 Hz respectivamente) o desvio-padrão dos sinais sem vazamento permaneceu praticamente constante em torno de 0,01 enquanto que para as mesmas três situações com vazamento o desvio-padrão apresentou picos nos diversos experimentos, ou seja, podendo ser um indicativo da ocorrência de oscilações da frequência em decorrência de um vazamento.

Por fim, através das figuras 4.37, 4.38 e 4.39, que representam a energia espectral dos sinais com e sem vazamento, observa-se também que os sinais com vazamento possuem energia total muito maior do que os sinais sem vazamento, o que significa uma concentração de picos de amplitude das frequências nos sinais com vazamento.

Neste capítulo foram apresentados os resultados da análise apenas dos sinais obtidos em um sensor de pressão (no caso P4) e para uma situação de vazamento (no caso V2) e na situação normal, ou seja, sem vazamento (no caso V0). As demais situações estudadas são apresentadas no APÊNDICE A deste trabalho.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Neste trabalho foram analisadas técnicas para classificação dos sinais característicos de vazamento e não vazamento, obtidos através de sensores instalados em posições conhecidas na linha de teste do oleoduto piloto do NETeF. Para tal foram abordados métodos temporais (sinais filtrados no tempo e seu envelope – transformada de Hilbert), frequenciais (transformada de Fourier), tempo-frequência (transformada de Gabor) e estatística (média, desvio-padrão e energia).

De acordo com os dados apresentados no capítulo 4, em especial, no item 4.2 resultados obtidos com a transformada de Gabor dos sinais foram muito satisfatórios, sendo possível a visualização da ocorrência de dois picos da amplitude de frequência no eixo temporal, o que caracteriza exatamente a ocorrência de vazamento e seu término. Também no item 4.3 observa-se a capacidade de identificação de vazamentos através da análise do desvio-padrão.

As perspectivas para trabalhos futuros são: a produção de novos sinais em diferentes situações, tais como partida e parada de bomba e golpes de aríete no escoamento analisando as técnicas aplicadas neste trabalho; e a implementação de algoritmos para classificar os sinais em vazamento e não vazamento, podendo estes algoritmos serem implementados com técnicas de inteligência artificial.

REFERÊNCIAS¹

AGUIAR, F. G. (2010). **Utilização de redes neurais artificiais para detecção de padrões de vazamentos em oleodutos**. São Carlos. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. 2010.

ALLAN, R. L.; MILLS. D. W. (2004). **Signal Analysis: Time, Frequency, Scale and Structure**, IEEE.

AL-SHIDHANI, I., BECK, SBM., STASZEWSKI, WJ. (2003). Leak monitoring in pipeline networks using wavelet analysis. **5th International Conference on Damage Assessment of Structures**, v.254-2, p. 51-58.

BAGHDADI, A.H.A., MANSY, H.A. (1988). A mathematical model for leak location in pipelines. **Applied Mathematical Modelling**, vol.12, n°2.

BELSITO, S., LOMBARDI, P., ANDREUSSI, P., BANERJEE, S. (1998). Leak detection in liquefied gas pipeline by artificial neural networks. **AIChE Journal**, v.44, n°12, p. 2675-2688.

BLACK, P. (1992). A review of pipeline leak detection technology. *Pipeline System*, v.7, **Fluid Mechanics and its Applications**, Dordrecht. Kluwer Academic Publishers.p. 287-298.

BRIGHAM, E. O. (1988). **FFT: the fast Fourier transform and its applications**. New Jersey, Prentice Hall.

COHEN, L. (1995). **Time-frequency analysis**. New Jersey, Prentice-Hall.

COVAS, D., RAMOS, H., ALMEIDA, A.B. (2005). Standing wave difference method for leak detection in pipeline systems. **Journal of Hydraulic Engineering**, New York, v. 131, n°. 12, 1106-1116.

DELPRAT, N; DIASPARRA, B; HERVIEU, E. (1999). **Identification des regimes d'une représentation spatio-fréquentielle**. Comptes Rendus de L'Académie Science. /no prelo/

FERRANTE, M.; BRUNONE, B. (2003a). *Pipe system diagnosis and leak detection by unsteady-state tests 1: Harmonic analysis*. **Advances in Water Resources**, v.26, n° 1, p. 95-105.

FERRANTE M.; BRUNONE B. (2003b). *Pipe system diagnosis and leak detection by unsteady-state tests 2: Wavelet analysis*. **Advances in Water Resources**, v.26, n° 1, p. 107-116.

FERRANTE M.; BRUNONE B. (2004). Pressure waves as a tool for leak detection in closed conduits. **Urban Water Journal**, v.1, n° 2, p. 145-156.

---

¹ De acordo com a Elaboração de teses e dissertações na EESC-USP.

FERRANTE M.; BRUNONE B.; MENICONI S. (2007). Wavelets for the Analysis of Transient Pressure Signals for Leak Detection. **Journal of Hydraulic Engineering**, v.133, n° 11, p. 1274-1282.

HERVIEU, E.; LEDUCQ, D. (1991). The Wavelet transform as a diagnostic tool in two-phase flows: characterization of multiphase flows from wall measurements. **European Two-Phase Flow Group Meeting**, Rome.

KHOMAIRI, A. A. (2008). Leak detection in long pipelines using the least square method. **Journal of Hydraulic Research**, v. 46, n°. 3, p. 392-401.

KIM, MS; LEE. SK. (2009). Detection of leak acoustic signal in buried gas pipe based on the time-frequency analysis. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 22, n°. 6, p. 990-994.

KLEIN, F. L. (1999). **Caracterização tempo-frequência de regimes de escoamento bifásico**. São Carlos. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. 1999.

LATHI, B. P. (1968). **An introduction to random signals and communication theory**. Scranton, International textbook. Co.

LEE, P.J. *et al.* (2005a). Frequency Domain Analysis for Detecting Pipeline Leaks. **Journal of Hydraulic Engineering**, New York, v.131, n°.7, p.596-604, July.

LEE, P.J. *et al.* (2005b). Leak Location Using the Pattern of the Frequency Response Diagram in Pipelines: a Numerical Study. **Journal of Sound and Vibration**, London, v.284, n°. 3-5, p.1051- 1073.

LI Y. B.; SUN L. Y. (2009). Leakage detection and location for long range oil pipeline using negative pressure wave technique. **4th IEEE Conference of Industrial Electronics and Application**, ICIEA 2009, v.1-6.

LIANDRA, J.; MORET-BAILLY, F. (1990). The wavelet transform: some applications to fluid dynamics and turbulence. **European Journal of Mechanics B: Fluids**, v.9, n°.1, p.1-19.

LIGGETT J. A., CHEN L.C. (1994). Inverse transient analysis in pipe networks. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 120, n°. 8, p. 934-955.

LUKE D. H. (1999). The origins of the sampling theorem. **IEEE Communications Magazine**, v. 37, n°. 4, p. 106-108.

MACLEOD, I. D. *et al.* (1991). Acoustic Monitoring Techniques for Structural Integrity. **Nuclear Engineering and Design**, Switzerland, v.129 n°.2, p.191- 200.

NATIONAL INSTRUMENTS INC. (2008). CompactRIO and LabVIEW development fundamentals – **Course Manual** . 226p.

PAPADAKIS G. A.; PORTER S.; WETTING J. (1999). EU initiative on the control of major accident hazards arising from pipelines. **Journal of Loss Prevention in The Process Industries**, v. 12, n°. 1, p. 85-90.

- PITTON, J. W. (2000). The statistics of time-frequency analysis. **Journal of the Franklin Institute**, p. 379-388.
- PUDAR, R. S.; LIGGETT, J.A. (1992). Leaks in Pipe Networks. **Journal of Hydraulic Engineering**, New York, v.118, n°.7, p.1031-1046, July.
- SANDBERG, C.; HOLMES, J.; MCCOY, K.; E. KOPPITSH, H. (1989). The application of a continuous leak detection system to pipelines and associated equipment. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 25 n°. 5, p. 906-909.
- SELEGHIM, P. Jr.; HERVIEU, E.; SANTOS, A.M. (1998). Time frequency characterization of two-phase horizontal air-water flow regimes. **Journal of Brazilian Society of Mechanical Sciences**, v. 20 , n°. 1, p. 39-50.
- SELLI, M. F. (2004). On-line identification of horizontal two-phase flow regimes through Gabor transform and neural network processing. **10th Brazilian Congress of Thermal Engineering and Sciences**, Rio de Janeiro.
- SENHADJI, L.; CARRAULT, G.; BELLANGER, J.J. (1992). Wavelet analysis of motion of coherent structures. **Proceedings of the International Conference on “Wavelets and Applications”**, p. 609-614. Toulouse – France, Y. Meyer & S. Roques eds.
- SILVA, R. A.; BUIATTI, C. M.; CRUZ, S. L.; PEREIRA, J. A. F. R. (1996). Pressure wave behaviour and leak detection in pipelines. **Computers and Chemical Engineering**, v. 20, n°. 1 suppl, p. S491-S496.
- STOUFFS, P.; GIOT, M. (1993). Pipeline leak detection based on mass balance: Importance of the packing term. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**. v. 6, n°. 5, p. 307-312.
- TAKEI, M.; OCHI, M.; HORRI, K. ; LI, H.; SATIO, Y. (2000). Discrete wavelets auto-correlation of axial turbulence velocity is spiral single phase flow. **Powder Technology**, v. 26, p. 1184-1193.
- WANG, G.; DONG, D; FANG, C. (1993). Leak detection for transport pipelines based on autoregressive modeling. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**. v. 42, n°. 1, p. 68-71.
- WANG, X. J., LAMBERT, M. F., SIMPSON, A. R., LIGGETT, J. A., VITKOVSKY, J. P. (2002). Leak detection in pipelines using the damping of fluid transients. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 128 n°. 7, p. 697-711.
- WIKE, A. (1986). Liquid pipelines can use many varieties of SCADA-based leak detection systems. **Pipeline & Gas Journal**, v.213 n°. 6, p.16-20.
- WU, R.; LIAO, Z Y.; ZHAO, L. (2008). Wavelets application on acoustic emission signal detection in pipeline. **Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering**, v. 1-4, p. 1156-1159.
- WU Z. Y., SAGE P. (2006). Water loss detection via genetic algorithm optimization-based model calibration. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 136, n°. 1, p. 116-128.

ZHANG, J. (1997). Designing a cost effective and reliable pipeline leak detection system. **Pipe and Pipelines International**. v. 42, n°. 1, p. 20-26.

ZHANG, J. (2001). Statistical pipeline leak detection for all operating conditions. **Pipeline & Gas Journal Online**, Fev. 2001.

APÊNDICE A - RESULTADOS DA ANÁLISE TEMPO-FREQUÊNCIA.

A.1 Análise dos sinais sem vazamento

- *Análise Temporal*

Figura Ap.1- Sinal experimental de simulação sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V0 - P4).

Figura Ap.2 - Envelope do sinal experimental de simulação sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V0 - P4).

Figura Ap.3 - Sinal experimental de simulação sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V0 – P8).

Figura Ap.4 - Envelope do sinal experimental de simulação sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V0 – P8).

Figura Ap.5 - Sinal experimental de simulação sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V0 - P4).

Figura Ap.6 - Envelope do sinal experimental de simulação sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V0 – P4).

Figura Ap.7 - Sinal experimental de simulação sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V0 - P4).

Figura Ap.8 - Envelope do sinal experimental de simulação sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V0 – P8).

Figura Ap.9 - Sinal experimental de simulação sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V0 - P4).

Figura Ap.10 - Envelope do sinal experimental de simulação sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V0 - P4).

Figura Ap.11 - Sinal experimental de simulação sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V0 – P8).

Figura Ap.12 - Envelope do sinal experimental de simulação sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V0 – P8).

- *Análise Frequencial*

Figura Ap.13 - Transformada de Fourier do sinal no tempo (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V0 - P4).

Figura Ap.14 - Transformada de Fourier do sinal no tempo (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V0 – P8).

Figura Ap.15 - Transformada de Fourier do sinal no tempo (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V0 - P4).

Figura Ap.16 - Transformada de Fourier do sinal no tempo (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V0 – P8).

Figura Ap.17 - Transformada de Fourier do sinal no tempo (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V0 - P4).

Figura Ap.18 - Transformada de Fourier do sinal no tempo (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V0 – P8).

- *Análise Tempo-Frequência*

Figura Ap.19 - Visualização tridimensional da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V0 - P4).

Figura Ap.20 - Visualização tridimensional da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V0 – P8).

Figura Ap.21 - Visualização tridimensional da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V0 - P4).

Figura Ap.22 - Visualização tridimensional da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V0 – P8).

Figura Ap.23 - Visualização tridimensional da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V0 - P4).

Figura Ap.24 - Visualização tridimensional da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V0 – P8).

Figura Ap.25 - Visualização da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V0 - P4).

Figura Ap.26 - Visualização da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V0 – P8).

Figura Ap.27 - Visualização da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V0 – P4).

Figura Ap.28 - Visualização da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V0 – P8).

Figura Ap.29 - Visualização da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V0 – P4).

Figura Ap.30 - Visualização da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal sem vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V0 – P8).

A.2 Análise dos sinais com vazamento

- *Análise Temporal*

Figura Ap.31 - Sinal experimental de simulação com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V13 - P4).

Figura Ap.32 - Envelope do sinal experimental de simulação com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V13 - P4).

Figura Ap.33 - Sinal experimental de simulação com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V13 – P8).

Figura Ap.34 - Envelope do sinal experimental de simulação com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V13 – P8).

Figura Ap.35 - Sinal experimental de simulação com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V13 - P4).

Figura Ap.36 - Envelope do sinal experimental de simulação com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V13 - P4).

Figura Ap.37 - Sinal experimental de simulação com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V13 – P8).

Figura Ap.38 - Envelope do sinal experimental de simulação com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V13 – P8).

Figura Ap.39 - Sinal experimental de simulação com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V13 - P4).

Figura Ap.40 - Envelope do sinal experimental de simulação com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V13 - P4).

Figura Ap.41 - Sinal experimental de simulação com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V13 – P8).

Figura Ap.42 - Envelope do sinal experimental de simulação com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V13 – P8).

- **Análise Frequencial**

Figura Ap.43 - Transformada de Fourier do sinal no tempo (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V13 - P4).

Figura Ap.44 - Transformada de Fourier do sinal no tempo (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V13 – P8).

Figura Ap.45 - Transformada de Fourier do sinal no tempo (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V13 - P4).

Figura Ap.46 - Transformada de Fourier do sinal no tempo (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V13 – P8).

Figura Ap.47 - Transformada de Fourier do sinal no tempo (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V13 - P4).

Figura Ap.48 - Transformada de Fourier do sinal no tempo (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V13 – P8).

- *Análise Tempo-Frequência*

Figura Ap.49 - Visualização tridimensional da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V13 - P4).

Figura Ap.50 - Visualização tridimensional da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V13 – P8).

Figura Ap.51 - Visualização tridimensional da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V13 - P4).

Figura Ap.52 - Visualização tridimensional da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V13 – P8).

Figura Ap.53 - Visualização tridimensional da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V13 - P4).

Figura Ap.54 - Visualização tridimensional da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V13 – P8).

Figura Ap.55 - Visualização da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V13 - P4).

Figura Ap.56 - Visualização da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 30 Hz – V13 – P8).

Figura Ap.57 - Visualização da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V13 - P4).

Figura Ap.58 - Visualização da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 40 Hz – V13 – P8).

Figura Ap.59 - Visualização da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V13 - P4).

Figura Ap.60 - Visualização da transformada de Gabor no plano tempo-frequência para o sinal com vazamento (Frequência do Inversor de Bomba 50 Hz – V13 – P8).

ANEXO A - SISTEMA DE CONTROLE E AQUISIÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS.

A.1 Descrição do Sistema de Aquisição e Controle de Dados

O conjunto de sinais a serem lidos pelo sistema de aquisição de dados é composto por 10 transdutores de pressão, 2 transdutores de vazão e 22 válvulas solenóides distribuídas ao longo do duto para simulação de vazamento em posições determinadas. O sistema de controle é composto por 5 transdutores CAN/4-20mA que acionam os 2 inversores de frequência e os 3 posicionadores pneumáticos de válvula, através da estação de transferência automático manual.

O sistema de controle e aquisição de dados é gerenciado por um Controlador de Automação Programável (do inglês *Programmable Automation Controller (PAC)*), que é um *hardware* eletrônico da *National Instruments® (NI)*, denominado *CompactRIO*, sendo este, um sistema de baixo custo, alta performance e confiabilidade. Aplicações para *CompactRIO* utilizam três processadores separados: um computador do tipo PC com sistema operacional Windows, um controlador com sistema operacional em tempo real (do inglês *Real Time Operational System (RTOS)*) e um arranjo de portas programável em campo (do inglês *Field Programmable Gate Array (FPGA)*), tal como exemplificado na Figura An. 01.

Figura An.1 - Arquitetura da Aplicação do CompactRIO. (Figura adaptada de NATIONAL INSTRUMENTS INC., 2008).

O *CompactRIO* é constituído por módulos de entradas e saídas (do inglês *Input and Output Module(I/O)*), um chassi de FPGA e um controlador de tempo real. Os módulos de entrada e saída realizam a comunicação com equipamentos externos – tais como sensores e atuadores – e comunicam diretamente com o chassi de FPGA (Figura Na. 02), podendo ser integrados diversos módulos de entradas analógicas e digitais. O chassi de FPGA permite a implementação de lógicas de controle customizadas em *hardware*, sendo que no chassi há um barramento de transferência de dados. Através do duto de transferência de dados é possível transmitir dados dos módulos I/O para o controlador de tempo real, para análises, pós-processamento, armazenamento do sinal ou comunicação com o computador através da rede Ethernet.

O controlador de tempo real possui processador de ponto flutuante, comunicação Ethernet (com a aplicação em computador do tipo PC), porta serial e relógio em tempo real, para base de tempo em análises e pós-processamento do sinal. Ainda, o controlador de tempo real possui interface para dispositivos de armazenamento de dados de alta capacidade do tipo *PenDrive*.

Figura An.2 - Topologia de Conexão do Sistema CompactRIO(Figura adaptada de NATIONAL INSTRUMENTS INC., 2008).

As Figuras (An. 03, An. 05 e An. 07) representam os diagramas de blocos do *software* em LabVIEW® que é executado em um computador do tipo PC, no controlador de tempo real (NI cRIO 9014) e em FPGA (NI cRIO 9114), respectivamente. As Figuras (An. 04, An. 06 e An. 08) representam as telas do *software* em LabVIEW® que é executado em um computador do tipo PC, no controlador de tempo real (NI cRIO 9014) e em FPGA (NI cRIO 9114), respectivamente.

Figura An.3 - Diagrama de Blocos do *software* em LabVIEW® que é executado em um computador do tipo PC.

Figura An.4 - Tela do *software* em LabVIEW® que é executado em um computador do tipo PC.

Figura An.5 - Diagrama de Blocos do *software* em LabVIEW® que é executado no controlador de tempo real (NI cRIO 9014).

Figura An.6 - Tela do *software* em LabVIEW® que é executado no controlador de tempo real (NI cRIO 9014).

Figura An.7 - Diagrama de Blocos do *software* em LabVIEW® que é executado em FPGA (NI cRIO 9114).

Figura An.8 - Tela do *software* em LabVIEW® que é executado em FPGA (NI cRIO 9114).