

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ

LUÍS ANTÔNIO ZANETTE

**IDENTIFICAÇÃO DE DANOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO
DE GÁS NATURAL BASEADA EM ANÁLISE DE SINAIS DE
VIBRAÇÕES**

CURITIBA

2015

LUÍS ANTÔNIO ZANETTE

**IDENTIFICAÇÃO DE DANOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO
DE GÁS NATURAL BASEADA EM ANÁLISE DE SINAIS DE
VIBRAÇÕES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Escola Politécnica, da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Nilson Barbieri

CURITIBA

2015

Dados da Catalogação na Publicação
Pontifícia Universidade Católica do Paraná
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/PUCPR
Biblioteca Central

Z28i
2015

Zanette, Luís Antônio

Identificação de danos em redes de distribuição de gás natural baseada em análise de sinais de vibrações / Luís Antônio Zanette ; orientador, Nilson Barbieri. – 2015.

116 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2015

Bibliografia: f. 107-116

1. Engenharia mecânica. 2. Vibração. 3. Wavelets (Matemática). 4. Gás - Distribuição. 5. Gás natural. I. Barbieri, Nilson. II. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD 20. ed. – 620.1

LUIS ANTONIO ZANETTE

**IDENTIFICAÇÃO DE DANOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE GÁS NATURAL
BASEADA EM ANÁLISE DE SINAIS DE VIBRAÇÕES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Escola Politécnica, da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

COMISSÃO EXAMINADORA

Presidente: Prof. Dr. Nilson Barbieri (Orientador)
Pontifícia Universidade Católica do Paraná

Prof. Dr. Julio César de Almeida
Universidade Federal do Paraná

Prof. Dr. Key Fonseca de Lima
Pontifícia Universidade Católica do Paraná

Curitiba, 31 de agosto de 2015

Dedico este trabalho ao meu filho
Matheus Felipe e à minha esposa
Bruna.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus primeiramente, por todas as oportunidades recebidas em minha vida e pela perseverança, muito importante durante a realização deste curso.

A minha esposa, amiga e companheira, Bruna pelo apoio, incentivo e compreensão durante a realização deste curso. Agradeço também ao meu filho Matheus Felipe, por ser minha maior motivação e inspiração atualmente.

Aos meus pais Valdemar e Olga, e às minhas irmãs Luciana e Maria Albertina, que sempre me incentivaram a estudar e me apoiaram em todas as etapas de minha vida.

À PUC-PR, em especial aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, pela grande contribuição em minha formação acadêmica.

Aos colegas de curso, pelo companheirismo e auxílio mútuo durante os estudos.

Ao professor Dr. Nilson Barbieri por ter aceitado o desafio de orientar o presente tema, bem como ter prestado todo o suporte e ajuda necessária para realização deste trabalho.

Ao professor, Gerente e amigo Dr. Julio César de Almeida pelo incentivo para realização deste Mestrado e reivindicação junto a empresa para obtenção do suporte financeiro para realização do Curso, bem como aos ensinamentos e discussões durante todas as etapas desta jornada.

A Companhia Paranaense de Gás – COMPAGAS, pelo suporte financeiro e técnico, bem como a todos os colegas de trabalho que contribuíram direta ou indiretamente no desenvolvimento deste trabalho.

Ao LACTEC, em especial ao Eng. Carlo Giuseppe Fillipin e ao técnico Leonardo Sirino que disponibilizaram as instalações físicas e prestaram todo o apoio técnico necessário para realização das práticas experimentais deste trabalho.

Por fim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

*“A persistência é o menor caminho
do êxito”*

(Charles Chaplin)

RESUMO

O crescimento no consumo de Gás Natural gera demanda na expansão das redes de distribuição. Esta ampliação na malha dutoviária implica na necessidade de realizar monitoramento periódico destas tubulações, principalmente nas mais antigas, com intuito de detectar possíveis falhas, e desta maneira prevenir a ocorrência de vazamentos e eventuais acidentes. Nesta pesquisa, uma metodologia para detecção de danos em tubulações com base na análise de sinais de vibração, é proposta. Para tal, testes foram implementados em uma rede experimental, contemplando uma amostra de referência (sem defeitos) e outras com defeitos. Sinais de pressão e aceleração foram captados, utilizando transdutores de pressão e acelerômetros dispostos ao longo da rede. Para identificação dos referidos danos, aplicou-se algumas técnicas de análise de sinais, dentre as quais destaca-se: método de *wavelet*, *bispectrum*, curtose e matemática morfológica. Os resultados obtidos, permitiram concluir que através da utilização de sensores de aceleração, com uma faixa de frequência adequada, conjuntamente às técnicas de curtose e matemática morfológica é possível identificar a existência de defeitos em tubulações, atestando que a referida metodologia é uma ferramenta potencial para tal finalidade.

Palavras-chave: tubulação de gás, identificação de danos, *bispectrum*, *wavelet* e matemática morfológica.

ABSTRACT

The growing of natural gas market generates demand for expansion of distribution pipelines network. This expansion in the pipeline network implies the need to do the periodic monitoring of these pipes, in order to detect possible faults, mainly in the older networks, and this way prevent the occurrence of leaks and eventual accidents. On this research, a methodology to detect damage in pipes based on vibration signals analysis is proposed. Thus, tests were performed in an experimental pipeline network, in the good condition and with defects, being obtained pressure and vibration signals, using pressure transducers and accelerometers disposed along the line. To identify the referred damages, it was applied some signals analysis techniques, such as: *wavelet* method, the bispectrum, kurtosis and mathematical morphology. The results obtained allowed conclude that by using acceleration sensors, with an adequate range, together with the kurtosis and mathematical morphology is possible to identify the existence of damage in pipeline, attesting that this methodology is a potential tool for this finality.

Keywords: gas pipeline, damage identification, bispectrum, *wavelet*, mathematical morphology.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Estatística de causas de falhas em gasodutos europeus	8
Figura 2.2 – Rasgo superficial.....	10
Figura 2.3 – Ranhura.....	10
Figura 2.4 – Trincas superficiais	11
Figura 2.5 – Mossa causada por ação de terceiros	13
Figura 2.6 – Defeitos mecânicos e por corrosão em tubulações.....	14
Figura 2.7 – Ferramenta de inspeção em linha.....	16
Figura 2.8 – Equipamento de ondas guiadas.....	19
Figura 2.9 – Inspeção de dutos pelo método de Memória Magnética	21
Figura 3.1 – Representação gráfica de algumas funções <i>wavelet</i> mãe: (a) Daubechies <i>wavelet</i> (dB6), (b) sombrero <i>wavelet</i> , (c) Gaussiana <i>wavelet</i> (d) Morlet <i>wavelet</i>	31
Figura 3.2 – Representação esquemática da estrutura piramidal da Análise <i>Wavelet</i> Multi-resolução	34
Figura 3.3 – Decomposição pelo pacote de <i>wavelet</i>	35
Figura 3.4 – Sinais produzidos por diversos operadores morfológicos: (a) sinal original; (b) sinal após erosão; (c) sinal após dilatação; (d) sinal após fechamento ; e (e) sinal após abertura	43
Figura 5.1 – Trecho da tubulação aérea	51
Figura 5.2 – Detalhe da válvula no final da rede.....	52
Figura 5.3 – Detalhe da fixação das amostras de tubos	52
Figura 5.4 – Vaso de acumulação instalado	53
Figura 5.5 – Croqui esquemático da rede experimental	54
Figura 5.6 – Posicionamento dos sensores – medidas em mm.....	54
Figura 5.7 – Detalhe da instalação do transdutor de pressão.....	56
Figura 5.8 – Detalhe da fixação dos acelerômetros	58
Figura 5.9 – Detalhe do defeito tipo mocha introduzido na segunda amostra	59
Figura 5.10 – Detalhe do furo realizado na amostra de nº 4	59
Figura 5.11 – Posição linearizada dos defeitos	60

Figura 5.12 – Sistema de aquisição da <i>National Instruments</i> utilizado nos ensaios.....	61
Figura 5.13 – Dados de pressão para o ensaio estacionário para a amostra de referência (rede íntegra)	63
Figura 5.14 – Dados de pressão para o ensaio estacionário para amostra com defeito tipo moossa.....	64
Figura 5.15 – Dados de pressão para o ensaio estacionário para amostra com defeito tipo corrosão interna.....	64
Figura 5.16 – Dados de pressão para o ensaio estacionário para amostra com furo (vazamento)	65
Figura 5.17 – Dados de aceleração no domínio do tempo para o ensaio estacionário para amostra de referência	66
Figura 5.18 – Dados de aceleração no domínio do tempo para o ensaio estacionário para amostra com defeito tipo moossa.....	66
Figura 5.19 – Dados de aceleração no domínio do tempo para o ensaio estacionário para amostra com defeito tipo corrosão interna	67
Figura 5.20 – Dados de aceleração no domínio do tempo para o ensaio estacionário para amostra com furo (vazamento).....	67
Figura 5.21 – Sinais de aceleração medidos pelo acelerômetro de número 3 para as quatro amostras	68
Figura 5.22 – Sinais de aceleração registrados pelo acelerômetro de número 4 para as quatro amostras.....	69
Figura 5.23 – Dados de pressão para o ensaio transiente para amostra de referência	70
Figura 5.24 – Dados de pressão para o ensaio transiente para amostra com defeito tipo moossa.....	71
Figura 5.25 – Dados de pressão para o ensaio transiente para amostra com defeito tipo corrosão interna.....	71
Figura 5.26 – Dados de pressão para o ensaio transiente para amostra com furo (vazamento)	72

Figura 5.27 – Dados de aceleração no domínio do tempo para o ensaio transiente para amostra de referência.....	73
Figura 5.28 – Dados de aceleração no domínio do tempo para o ensaio transiente para amostra com defeito tipo “mossa”	73
Figura 5.29 – Dados de aceleração no domínio do tempo para o ensaio transiente para amostra com defeito tipo “corrosão interna”	74
Figura 5.30 – Dados de aceleração no domínio do tempo para o ensaio transiente para amostra com furo (vazamento).....	74
Figura 6.1 – Curvas de <i>Bispectrum</i> para sinais de pressão (TP1) – ensaio transiente	77
Figura 6.2 – Curvas de <i>Bispectrum</i> para sinais de pressão (TP2) – ensaio transiente	78
Figura 6.3 – Curvas de <i>Bispectrum</i> para sinais de pressão (TP3) – ensaio transiente	79
Figura 6.4 – Curvas de <i>Bispectrum</i> para sinais de pressão (TP1) – ensaio estacionário.....	80
Figura 6.5 – Curvas de <i>Bispectrum</i> para sinais de pressão (TP2) – ensaio estacionário....	81
Figura 6.6 – Curvas de <i>Bispectrum</i> para sinais de pressão (TP3) – ensaio estacionário.....	82
Figura 6.7 – Curvas da análise do <i>Power Spectrum</i> para os sinais de pressão – ensaio estacionário.....	83
Figura 6.8 – Curvas da análise do <i>Power Spectrum</i> para os sinais de pressão – ensaio transiente.....	84
Figura 6.9 – Curvas de <i>Bispectrum</i> para sinais de aceleração (AC1) – ensaio transiente... ..	85
Figura 6.10 – Curvas de <i>Bispectrum</i> para sinais de aceleração (AC2) – ensaio transiente	86
Figura 6.11 – Curvas de <i>Bispectrum</i> para sinais de aceleração (AC3) – ensaio transiente	87

Figura 6.12 – Curvas de <i>Bispectrum</i> para sinais de aceleração (AC4) – ensaio transiente	88
Figura 6.13 – Curvas de <i>Bispectrum</i> para sinais de aceleração (AC1) – ensaio estacionário	89
Figura 6.14 – Curvas de <i>Bispectrum</i> para sinais de aceleração (AC2) – ensaio estacionário	90
Figura 6.15 – Curvas de <i>Bispectrum</i> para sinais de aceleração (AC3) – ensaio estacionário	91
Figura 6.16 – Curvas de <i>Bispectrum</i> para sinais de aceleração (AC4) – ensaio estacionário	92
Figura 6.17 – Curvas da análise do <i>Power Spectrum</i> para os sinais de aceleração – ensaio estacionário	94
Figura 6.18 – Curvas da análise do <i>Power Spectrum</i> para os sinais de aceleração – ensaio transiente	95
Figura 6.19 – Curvas do parâmetro relativo do <i>Bispectrum</i> para os sinais de aceleração referente ao teste estacionário	96
Figura 5.20 – Curvas do parâmetro relativo do <i>Bispectrum</i> para os sinais de aceleração referente ao ensaio transiente	97
Figura 6.21 – Curvas do parâmetro relativo da curtose para os sinais de aceleração referente ao ensaio estacionário	98
Figura 6.22 – Curvas do parâmetro relativo da curtose para os sinais de aceleração referente ao ensaio transiente	99
Figura 6.23 – Curvas do índice de energia relativa para os sinais de aceleração para o ensaio estacionário	100
Figura 6.24 – Curvas do índice de energia relativa para os sinais de aceleração para o ensaio transitório	101
Figura 6.25 – Curvas do coeficiente de correlação para os sinais de aceleração para o ensaio estacionário	102
Figura 6.26 – Curvas do coeficiente de correlação para os sinais de aceleração para os testes no regime transitório	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Frequência de acidentes – Redes de Distribuição (EUA) no período de 2011 a 2013.....	6
Tabela 2.2 – Prejuízos dos acidentes nos EUA – Redes de Distribuição – período de 2011 a 2013.....	7
Tabela 2.3 – Estatísticas de incidentes – Redes de transmissão na Europa no período de 2009 a 2013.....	8
Tabela 3.1 – Propriedades dos operadores básicos de morfologia matemática.....	44
Tabela 5.1 – Especificação técnica do vaso de acumulação utilizado.....	53
Tabela 5.2 – Especificação técnica dos transdutores de pressão utilizados... ..	55
Tabela 5.3 – Especificação técnica dos acelerômetros utilizados.....	57

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

1-D	Unidimensional
ABEGAS	Associação Brasileira de Distribuidoras de Gás Canalizado
AC1	Acelerômetro nº 1
AC2	Acelerômetro nº 2
AC3	Acelerômetro nº 3
AC4	Acelerômetro nº 4
DOT	Departamento de Transporte (<i>Department of Transportation</i>)
EGIG	Grupo de Dados de Incidentes em Gasodutos Europeus (<i>European Gaspipeline Incidents Group</i>)
EMAT	Transdutor Acústico Eletro-magnético (<i>Eletromagnetic and Acoustic Transducer</i>)
END	Ensaio Não Destrutivo
ES	Elemento Estruturante Plano
FFT	Transformada Rápida de Fourier (<i>Fast Fourier Transform</i>)
HHT	Transformada de Hilbert-Huang (<i>Hilbert-Huang Transform</i>)
ICP	Circuito Piezelétrico Integrado (<i>Integrated Circuit Piezoelectric</i>)
ILI	Inspeção em Linha (<i>In Line Inspection</i>)
LACTEC	Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
LEME	Laboratório de Emissões e Mecânica
MM	Fator Multi-escala
MMM	Método de Memória Magnética
MFL	Fuga de Fluxo Magnético (<i>Magnetic Flux Leakage</i>)
NI	<i>National Instruments</i>
OPS	Escritório de Segurança de Dutos (<i>Office of Pipeline Safety</i>)
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
STFT	Transformada de Fourier de Curto Período (<i>Short time Fourier Transform</i>)
TP1	Transdutor de Pressão nº 1
TP2	Transdutor de Pressão nº 2
TP3	Transdutor de Pressão nº 3

WPECRS Taxas Médias de Alteração da Energia do Pacote de *Wavelet*

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Parâmetro de escala
$a_{j,k}$	Coeficiente de aproximação
b	Parâmetro de translação
B_{rel}	Parâmetro relativo do <i>Bispectrum</i>
$b_x(k,l)$	<i>Bispectrum</i>
$C_{j,k}$	Transformada de <i>Wavelet</i> discreta
$c_{j,k}^i$	Coeficientes pacote <i>wavelet</i>
$d_{j,k}$	Coeficiente de detalhamento
$E\{\cdot\}$	Esperança matemática
E_{f_j}	Componente de Energia do pacote <i>wavelet</i>
f	Frequência do sinal, Hz
$f_j(t)$	Componente decomposta da <i>wavelet</i>
$f_j^i(t)$	Componente do sinal do pacote de <i>wavelet</i>
$g(k)$	Filtros associado com a função <i>wavelet</i> mãe
$h(k)$	Filtros associado com a função de escalonamento
$IndBa$	Parâmetro do <i>bispectrum</i> para o sistema sem dano
$IndB_b$	Parâmetro do <i>bispectrum</i> para o sistema com dano
m_n	Momento dos sinais
P	Espectro principal
$P(\omega)$	<i>Power Spectrum</i>
W_f	Coeficiente <i>Wavelet</i> calculado
X_k	Componente de onda complexado espectro de Fourier em função da frequência ω_k
X_l	Componente de onda complexado espectro de Fourier em função da frequência ω_l

$X(\omega)$	Transformada de Fourier
ψ^*	Função de transformação ou <i>wavelet</i> mãe
$\psi(n)$	Função <i>Wavelet</i>
$\phi_{j,k}$	Função de escalonamento
$\psi_{j,k}$	Função base de <i>wavelet</i>
$\psi_{j,k}^i(t)$	Função pacote <i>wavelet</i>
ΔE_{f_j}	Índice de Variação de energia do pacote <i>wavelet</i>
$(\Delta E_{f_j})_d$	Componente de energia para estrutura com dano
$(\Delta E_{f_j})_g$	Componente de energia para estrutura íntegra
γ_4	Curtose
γ_{4rel}	Curtose relativa
γ_4^d	Curtose do sistema com dano
γ_4^g	Curtose do sistema íntegro
ρ	Coefficiente de correlação
$\emptyset$	Diâmetro
$\ominus$	Operador erosão
$\oplus$	Operador dilatação
$\circ$	Operador abertura
$\bullet$	Operador fechamento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS	2
1.1.1	Objetivo Geral.....	2
1.2.2	Objetivos Específicos	2
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	3
2	INTEGRIDADE DE DUTOS	5
2.1	FALHAS EM DUTOS	5
2.2	ESTATÍSTICAS DE FALHAS	5
2.2.1	Estatísticas do Departamento de Transportes dos EUA	5
2.2.2	Estatísticas do EGIG (Grupo de dados de incidentes em gasodutos europeus).....	6
2.3	DEFEITOS EM TUBULAÇÕES.....	8
2.3.1	Danos Mecânicos	9
2.3.1.1	Mossa.....	11
2.3.2	Defeitos de Corrosão	13
2.4	MONITORAMENTO E INSPEÇÃO DE GASODUTOS E REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE GÁS	15
2.4.1	Inspeção em Linha	15
2.4.1.1	Fuga de Fluxo Magnético (MFL)	16
2.4.1.2	Ultrassom	17
2.4.1.3	Requisito para utilização da Inspeção em Linha (ILI).....	18
2.4.2	Ondas Guiadas	18
2.4.3	Método de Memória Magnética (MMM).....	20
2.4.4	Emissão Acústica.....	21
2.5	MÉTODO DE DIAGNÓSTICO POR VIBRAÇÕES	23
3	TÉCNICAS DE ANÁLISE DE SINAIS	27
3.1	TEORIA <i>WAVELET</i>	27
3.1.1	Transformada de <i>Wavelet</i> contínua e discreta	29
3.1.2	Análise <i>Wavelet</i> Multi-resolução.....	31

3.1.3	Análise Pacote <i>Wavelet</i>	34
3.1.3.1	Energia do Pacote <i>Wavelet</i>	36
3.2	TEORIA <i>BISPECTRUM</i>	37
3.2.1	Função Densidade De Probabilidade	38
3.2.2	Curtose	40
3.3	MATEMÁTICA MORFOLÓGICA	41
3.3.1	Morfologia Matemática Multiescalar	44
3.4	ANÁLISE <i>POWER SPECTRUM</i>	45
4	METODOLOGIA	47
5	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	50
5.1	O APARATO EXPERIMENTAL	50
5.1.1	Sensores	54
5.1.1.1	Transdutores de Pressão	55
5.1.1.2	Acelerômetros	56
5.1.2	Amostras de tubos	58
5.1.3	Sistema de aquisição de dados	60
5.2	PROGRAMA EXPERIMENTAL	62
5.2.1	Testes Regime Estacionário	62
5.2.1.1	Dados experimentais	62
5.2.1.1.1	Dados de pressão	63
5.2.1.1.2	Dados de aceleração	65
5.2.2	Testes Regime Transiente	69
5.2.2.1	Dados experimentais	70
5.2.2.1.1	Dados de pressão	70
5.2.2.1.2	Dados de aceleração	72
6	RESULTADOS	76
6.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	76
6.2	<i>BISPECTRUM</i>	76
6.3	CURTOSE	98
6.4	TRANSFORMADA DE <i>WAVELET</i>	99
6.5	MORFOLOGIA MATEMÁTICA	101

7.	CONCLUSÕES	103
7.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	104
	REFERÊNCIAS.....	106

1 INTRODUÇÃO

O consumo de Gás Natural tem aumentado significativamente nos últimos anos, perfazendo um volume total comercializado no Brasil pelas companhias distribuidoras de Gás Natural em fevereiro de 2015 de aproximadamente 80,6 milhões m³/dia, correspondendo um aumento aproximado de 169%, comparado com o volume distribuído em 2003, de acordo com levantamento realizado pela Associação Brasileira de Distribuidoras de Gás Canalizado (ABEGAS). Tal crescimento gera uma demanda na expansão da rede de distribuição de Gás Natural brasileira, que atualmente totaliza uma extensão aproximada de 28,4 mil quilômetros.

Esta expansão contínua implica em uma maior preocupação com manutenção e principalmente monitoramento destas tubulações, especialmente as mais antigas, com intuito de identificar possíveis falhas e evitar a ocorrência de eventuais vazamentos e acidentes (ZANETTE *et al.*, 2015).

A ocorrência destas falhas, além de implicarem em grandes riscos a comunidade e também ao meio-ambiente, em caso de eventuais vazamentos e explosões, podem gerar grandes prejuízos econômicos. Estudos do Departamento de transporte do Governo americano, mostraram que em 2013 os prejuízos com falhas em redes de distribuição de Gás Natural superaram 1,8 bilhões de dólares.

Neste contexto, a fim de minimizar estas perdas, as empresas estão investindo cada vez mais na manutenção preventiva e no monitoramento de suas redes.

Os métodos de inspeção de tubulações normalmente utilizados, compreendem tanto técnicas destrutivas quanto não-destrutivas. As primeiras consistem no isolamento de um trecho da tubulação, bem como a pressurização e acompanhamento para verificar a ocorrência de vazamentos, no qual implicam na interrupção da operação normal do duto, sendo normalmente empregado no comissionamento de uma linha nova. Dessa forma, para tubulações em serviço normalmente opta-se por ensaios não-destrutivos (UMEADI & JONES, 2008).

Os métodos não-destrutivos comumente empregados em tubulações são: Fuga de Fluxo Magnético (MFL), Ondas-Guiadas, Método da Memória Magnética

(MMM), emissão acústica e método de diagnóstico por vibrações (ZANETTE *et al.*, 2015).

Nos últimos anos, muitas pesquisas têm focado no estudo desta última técnica, principalmente por ser um método não-destrutivo em tempo real capaz de identificar, controlar e caracterizar os defeitos, desde sua iniciação até os estágios mais críticos (UMEADI, 2010).

Além disso, por causa da natureza global da resposta mecânica das estruturas, técnicas de identificação de danos baseados em análise de sinais vibratórios têm ganhado importância. Essas características podem ser representadas em termos de parâmetros modais (massa, rigidez) ou estruturais (frequências, amortecimentos ou modos de vibrar associados a cada frequência). Assim, um dano em uma estrutura resulta em mudanças em suas propriedades dinâmicas (SILVA, 2013).

Os principais métodos baseados em sinais de vibração são: *Power Spectrum*, métodos estatísticos, análise *wavelet* e análise morfológica. Em relação aos métodos estatísticos, destaca-se: o *bispectrum*, uma ferramenta estatística de terceira-ordem e a curtose, um momento de quarta-ordem, que auxiliam na identificação de falhas em componentes mecânicos (BARBIERI & BARBIERI, 2013).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do presente trabalho é propor de uma metodologia para identificação de danos em redes de distribuição de Gás Natural com base em análise de sinais de vibrações, utilizando uma abordagem teórico-experimental.

1.2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos têm-se:

- Realização de testes em uma rede experimental, utilizando uma amostra de referência (sem defeitos) e outras com defeitos, obtendo sinais de pressão e aceleração do sistema, utilizando transdutores de pressão e acelerômetros;
- Processamento dos dados experimentais (pressão e aceleração) utilizando as seguintes técnicas de análise de sinais: *bispectrum*, transformada de *wavelet*, curtose e matemática morfológica;
- Comparação entre os resultados obtidos através dos sinais de pressão e de aceleração;
- Comparação dos resultados obtidos através da utilização das diferentes técnicas de análise de sinais; e
- Análise da eficiência das técnicas de análise de sinais de vibração empregadas na identificação de danos em tubulações.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O Capítulo 2 apresenta algumas informações e estatísticas de alguns órgãos internacionais sobre falhas em dutos, bem como uma breve descrição e conceituação dos principais tipos de defeitos encontrados em tubulações, além de uma revisão dos principais métodos de inspeção e monitoramento de redes de transmissão e distribuição de Gás Natural, com destaque para o método de diagnóstico por vibrações.

O Capítulo 3 aborda os conceitos das técnicas de análise de sinais que foram utilizadas no presente estudo para processamento os dados experimentais. O presente capítulo detalha as seguintes técnicas: *bispectrum*, curtose, transformada de *wavelet*, matemática morfológica e *power spectrum*.

O Capítulo 4 apresenta a metodologia desenvolvida para realização das práticas experimentais.

Na seqüência, o Capítulo 5 detalha os procedimentos experimentais realizados, contemplando a descrição do aparato experimental e do programa de ensaio, bem como a apresentação dos principais dados obtidos no domínio do tempo.

O Capítulo 6 apresenta os resultados obtidos utilizando as técnicas de tratamento de sinais detalhadas no Capítulo 3. O presente capítulo também contempla a discussão, comparação e interpretação de tais resultados.

E finalmente o Capítulo 7, apresenta as conclusões do trabalho, baseada nos resultados obtidos, além de abordar propostas para futuros trabalhos.

2 INTEGRIDADE DE DUTOS

2.1 FALHAS EM DUTOS

Segundo Muhlbauer (2004) as falhas em dutos são caracterizadas quando uma quantidade significativa do produto vaza de um modo não intencional do interior do duto. Assim, aos menos que o produto transportado seja altamente tóxico, eventuais vazamentos de pequena monta em flanges e outros equipamentos, não são considerados para o presente propósito.

Falhas ocorrem quando as paredes dos dutos não suportam as pressões do sistema. A redução da resistência da parede do duto pode ocorrer devido à perda de material por corrosão; danos mecânicos, como sulcos ou moissas, causados por impacto de escavadeiras ou excesso de carga de veículos; perfurações na parede do duto causadas por equipamentos rotativos, como perfuratrizes, para instalação de postes de energia elétrica, telefone, drenos sub-horizontais; e equipamentos para furação direcional, que são utilizados para instalação de tubulações pelo Método Não Destrutivo (OLIVEIRA, 2005).

A maior causa de falhas em dutos ao redor do mundo são interferência externa e corrosão, combinados com as diferentes idades das redes existentes e as condições climáticas nos quais as tubulações são submetidas (UMEADI, 2010).

2.2 ESTATÍSTICAS DE FALHAS

2.2.1 Estatísticas do Departamento de Transportes dos EUA

Os referidos dados foram obtidos junto ao Departamento de Transporte do Governo Americano (DOT-EUA), no qual possui uma seção destinada ao controle específico do transporte dutoviário, chamada de *Office of Pipeline Safety* - OPS. Este órgão possui um dos mais antigos bancos de dados sobre incidentes e acidentes envolvendo dutos, com registros a partir do ano de 1970.

A Tabela 2.1 apresenta a frequência de acidentes por tipo de causa, para os anos de 2011 a 2013, referente a falhas em redes de distribuição de Gás Natural.

Tabela 2.1 - Frequência de acidentes – Redes de Distribuição (EUA) de Gás Natural no período de 2011 a 2013.

Causa da Falha	2013 (%)	2012 (%)	2011 (%)
Corrosão	1,1	3,3	3,4
Ação de Terceiros	33,6	20,0	25,8
Naturais (movimentação de terra, enchentes, ventos)	4,7	6,7	9,2
Falha mecânica	12,1	12,2	10,8
Danos de força externa (incêndio, explosão, falhas elétricas, etc)	30,8	42,2	28,3
Operação incorreta	3,7	7,8	6,7
Todas outras causas	14,0	7,8	15,8

Fonte: US DOT Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, 2014

A Tabela 2.2 apresenta os prejuízos financeiros correlatos aos acidentes com a rede de Distribuição de Gás Natural nos EUA, no período de 2011 a 2013.

2.2.2 Estatísticas do EGIG (Grupo de dados de incidentes em gasodutos europeus)

Em 1982 seis empresas operadoras do sistema de transmissão de gás europeu tomaram a iniciativa de criar um banco de dados de incidentes ocorridos nas redes de responsabilidades das mesmas. Esta cooperação foi formalizada pela criação

do EGIG (Grupo de dados de incidentes em gasodutos europeus). O objetivo desta iniciativa foi fornecer uma base ampla para o cálculo da segurança de gasodutos na Europa, provendo um panorama confiável das frequências e probabilidades de incidentes. Atualmente o referido grupo é formado por dezessete companhias.

O banco de dados do EGIG possui informações de incidentes desde 1970, e o número de incidentes acumulados registrados no período de 1970 a 2013 foi de 1.309, em uma extensão total de rede de aproximadamente de 143.700 km.

Tabela 2.2 - Prejuízos dos acidentes nos EUA – Redes de Distribuição de Gás Natural – período de 2011 a 2013.

Causa da Falha	2013 (US\$ x 1.000)	2012 (US\$ x 1.000)	2011 (US\$ x 1.000)
Corrosão	65	232	51
Ação de Terceiros	6.525	8.095	4.025
Naturais (movimentação de terra, enchentes, ventos)	1.980	2.760	1.847
Falha mecânica	1.980	2.208	3.578
Danos de força externa (incêndio, explosão, falhas elétricas, etc)	4.491	5.320	6.078
Operação incorreta	450	4.944	1.954
Todas outras causas	2.909	1.899	4.315

Fonte: US DOT Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, 2014

A tabela 2.3 apresenta a estatística anual de incidentes nestes gasodutos no período de 2009 a 2013.

Tabela 2.3 – Estatísticas de incidentes – Redes de transmissão de Gás Natural na Europa no período de 2009 a 2013.

	2009	2010	2011	2012	2013
Número de Incidentes	29	21	20	22	18

Fonte: EGIG, 2015

A Figura 2.1 apresenta um resumo estatístico das causas de falhas em gasodutos de transmissão operados pelo EGIG no referido período.

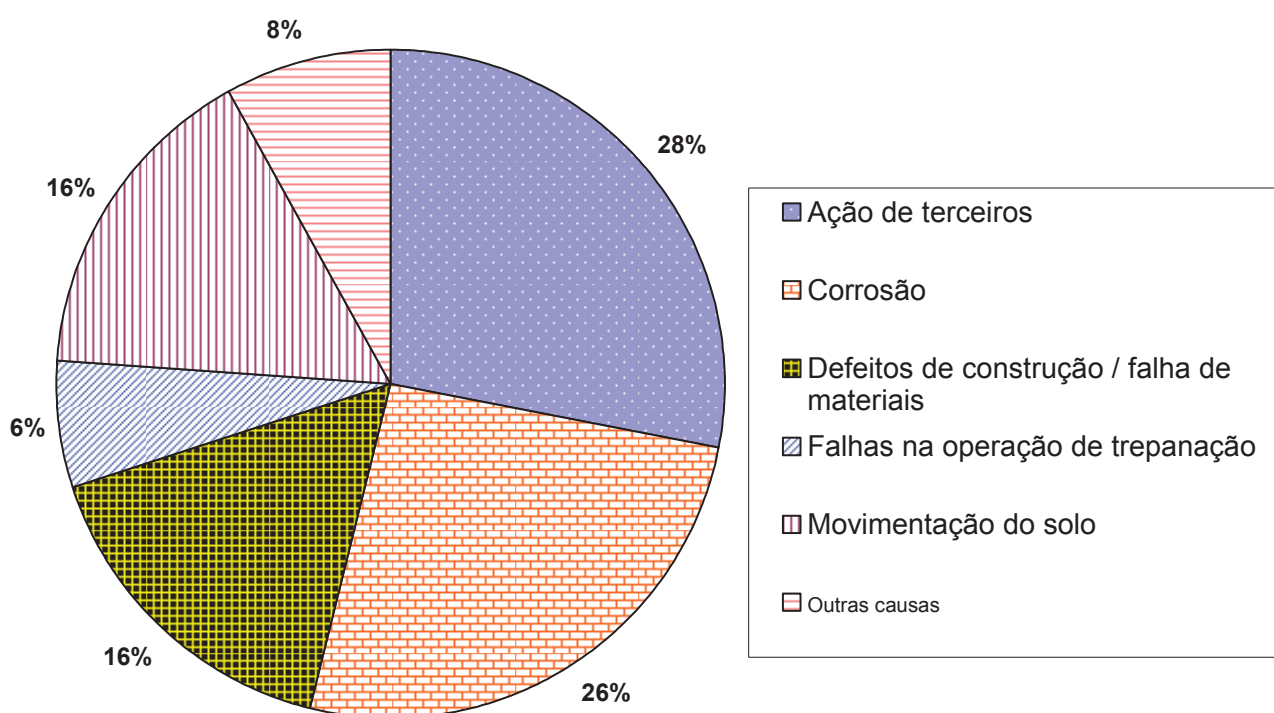


Figura 2.1 – Estatística de causas de falhas em gasodutos europeus (fonte: EGIG, 2015).

2.3 DEFEITOS EM TUBULAÇÕES

Um defeito é uma descontinuidade ou irregularidade tanto do material quanto geométrica, no qual é detectada por inspeção de acordo com o requerimento de vários códigos, normas e padrões. Assim, existem vários limites para rejeição de

defeitos. Um defeito é considerado não aceitável quando sua magnitude for suficiente para garantir a reprovação baseado nas normas ou métodos para avaliação do dano (MMS, 2000).

Os principais defeitos encontrados em dutos podem ser agrupados em três categorias de acordo com suas causas: defeitos de corrosão, danos mecânicos e defeitos de soldagem.

Para o presente trabalho, será dado um enfoque maior as duas primeiras classes, visto que os defeitos de soldagem referem-se a problemas que ocorrem normalmente durante a construção e montagem da tubulação.

2.3.1 Danos Mecânicos

Os danos mecânicos podem ser divididos em (SOUZA, 2008):

- Rasgos superficiais (“*Gouge*”): Imperfeição na superfície causada pela remoção de material ou deslocamento de material provocando a redução de espessura da parede do tubo. A Figura 2.2 apresenta uma imagem de tal defeito;
- Ranhuras (“*Groove*”): Uma ranhura pode causar concentração de tensões, em um determinado ponto da superfície do duto, podendo ser considerado um defeito. A Figura 2.3 apresenta uma imagem do referido dano;
- Trincas superficiais: Trincas geradas na superfície do duto, conforme mostrada na Figura 2.4; e
- Mossas (“*Dent*”).



Figura 2.2 – Rasgo superficial (fonte: Pipeline OZ, 2015).



Figura 2.3 – Ranhuras (fonte: Pipeline OZ, 2015).



Figura 2.4 – Trincas superficiais (fonte: MOGHADAM *et al.*, 2015).

Como as mossas são defeitos de grande relevância em dutos, podendo inclusive comprometer a operação de uma tubulação, será apresentado mais detalhes sobre este assunto a seguir.

2.3.1.1 Mossa

O termo *mossa* descreve uma deformação permanente da seção circular do duto causada por agentes externos (FREITAS, 2009). A *mossa* pode ainda ser definida como uma depressão causada pelo contato de um corpo estranho (conhecido como *identador*) contra o tubo, resultando em uma deformação plástica na parede do duto (COSHAM *et al.*, 2012).

De acordo com a norma ASME B31.8 (2003), a moessa é expressa em termos quantitativos como “o espaço mais profundo da mesma e o prolongamento do contorno original do duto, em qualquer direção”.

As moessas podem ser classificadas em:

- a) Moessas Lisas: são aquelas que não apresentam arranhões, entalhes ou outros concentradores de tensão. Moessas identadas por rochas são tipicamente dessa classe;
- b) Moessas de recuperação elástica: aquelas que possuem uma tendência a recuperar sua seção original circular;
- c) Moessas confinadas: denominada desta forma pela capacidade de retornar a sua geometria original através da pressão interna, porém o solo que envolve o duto impede que tal situação ocorra. Moessas identadas por rocha são normalmente enquadradas nessa categoria (GROSSL, 2013); e
- d) Moessas não-confinadas: são aquelas que sofrem deformação permanente, logo depois do carregamento ser retirado, não possuindo capacidade de retornar a configuração original. As moessas causadas por equipamentos de escavação mecânica e perfuração direcional normalmente são enquadradas nesta classe.

As moessas causam o amassamento da tubulação compreendendo na geração de uma concentração de tensão em torno da região afetada. Além disso, dependendo do grau de tal dano, pode ocorrer a alteração no fluxo do fluido interno, aumentando a turbulência e implicando em problemas em equipamentos da malha dutoviária (GROSSL, 2013).

A Figura 2.5 apresenta a fotografia de um trecho de tubulação que apresenta uma moessa causada por ação de terceiros.

2.3.2 Defeitos de Corrosão

Segundo Gentil (2011), a corrosão é a deterioração dos materiais, especialmente metálicos, pela ação eletroquímica ou química do meio. Essa deterioração pode ou não estar associada a esforços mecânicos.

A corrosão de dutos de transporte e distribuição de combustível pode causar grandes impactos ao meio ambiente e a segurança da população. O ataque ao material da tubulação (normalmente aço carbono) pode ocorrer tanto por corrosão externa, ou seja pela ação do meio externo (solo, atmosfera, meio salino) quanto interna pela umidade presente no fluido conduzido (GROSSL, 2013). Em redes de distribuição de Gás Natural, essa última situação normalmente não ocorre, visto que a umidade presente em tal hidrocarboneto é baixíssima.



Figura 2.5 – Mossa causada por ação de terceiros (fonte: O autor, 2015).

Os principais defeitos de corrosão são (SOUZA, 2008):

- Corrosão Generalizada ou Uniforme: consiste na perda uniforme da espessura da parede do duto ao longo de uma extensa área;

- Corrosão por Pite: corrosão localizada, que possui grande profundidade e diminui consideravelmente a espessura de parede e a capacidade do duto;
- Corrosão sob tensão: ocorre quando um material está em contato com um meio corrosivo específico e é submetido a tensões trativas (aplicadas ou residuais). Neste tipo de corrosão formam-se trincas no material, sendo a perda de espessura normalmente desprezível. A propagação da trinca é normalmente lenta, até atingir a dimensão crítica para uma ruptura brusca; e
- Fissuração por Hidrogênio: ocorre quando o hidrogênio migra para o interior do material e acumula-se em falhas existentes, provocando trincas a baixo níveis de tensão.

A Figura 2.6 ilustra alguns defeitos de corrosão e mecânicos comumente encontrados em tubulações.

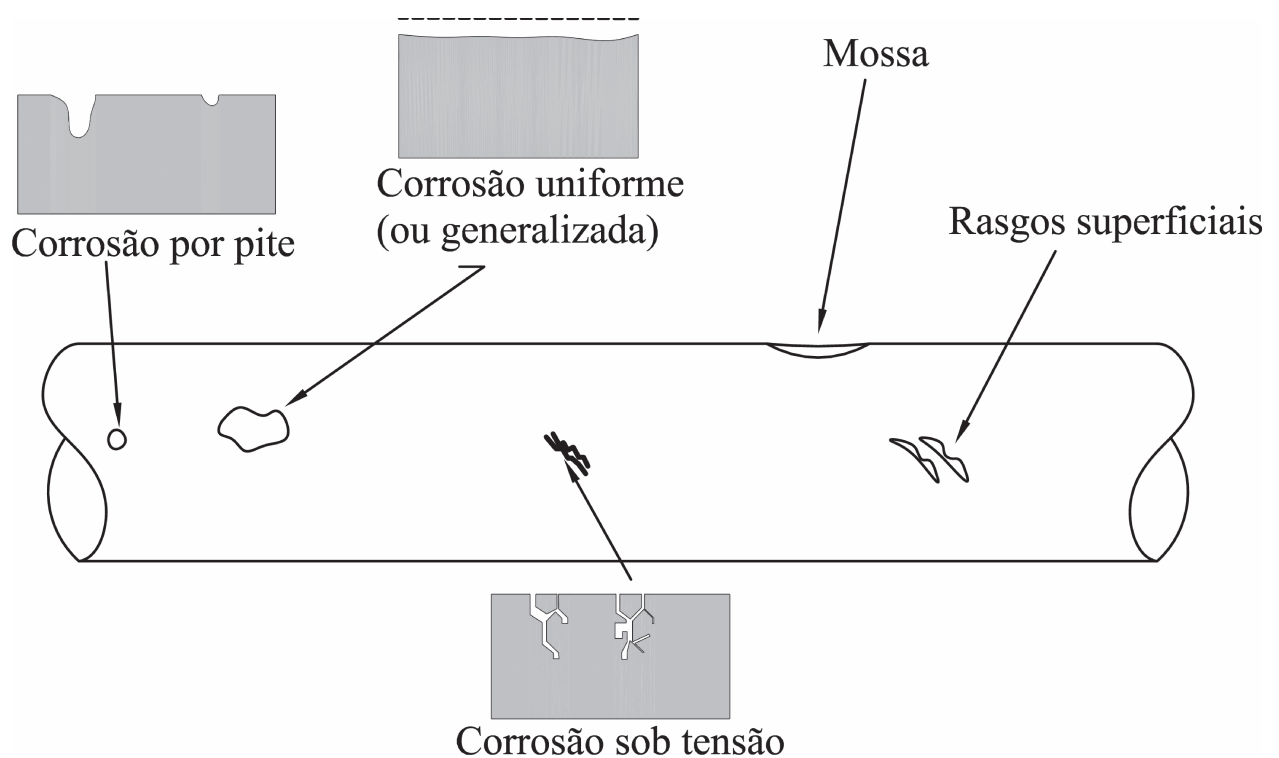


Figura 2.6 – Defeitos mecânicos e por corrosão em tubulações (fonte: Adaptado de SOUZA, 2008).

2.4 MONITORAMENTO E INSPEÇÃO DE GASODUTOS E REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE GÁS

A fim de reduzir os prejuízos financeiros, bem como ambientais e humanos, estes incalculáveis, decorrente de falhas em dutos, as empresas responsáveis pela operação e manutenção destes têm investido largamente no monitoramento e inspeção dos mesmos, a fim de evitar a ocorrência de acidentes e também ampliar a vida útil dessas estruturas.

Na sequência são apresentadas algumas técnicas utilizadas para o monitoramento e inspeção de gasodutos e redes de Distribuição de Gás Natural.

2.4.1 Inspeção em Linha

A utilização de ferramentas de inspeção em linha (ILI) é atualmente um procedimento padrão em relação a manutenção de dutos com elevada pressão (RIETH-HORST *et al.*, 2012).

Tal inspeção é realizada utilizando equipamentos de inspeção interna das tubulações, frequentemente também referidos como “*pigs*” inteligentes (BELLER *et al.*, 2015).

Estas ferramentas são inseridas na tubulação e são propelidas através da linha pelo próprio fluido conduzido, e finalmente recuperados novamente. São normalmente autônomos, ou seja constituídos por sistemas automatizados e com deslocamento livre, isto é, não são conectados por cabos ou qualquer outro tipo de ligação externa (BELLER *et al.*, 2015). A Figura 2.7 apresenta um exemplo de tal equipamento.

Há uma variedade grande de ferramentas de ILI disponíveis no mercado. Essas ferramentas possuem diferentes capacidades de inspeção e utilizam diferentes tecnologias de medição. Assim, com respeito aos aspectos de inspeção, as referidas ferramentas podem ser divididas em (KOPP *et al.*, 2013):

- medição de perda de espessura da parede do tubo;
- detecção de trincas;
- medição da geometria da tubulação;

- detecção de vazamentos; e
- mapeamento da rede (Sistema de Navegação Inercial).

A identificação de destes tipos de danos pode ser realizada, através das seguintes técnicas: Fuga de Fluxo Magnético (MFL), ultrassom e corrente induzida (HILVERT & BEUKER, 2015).

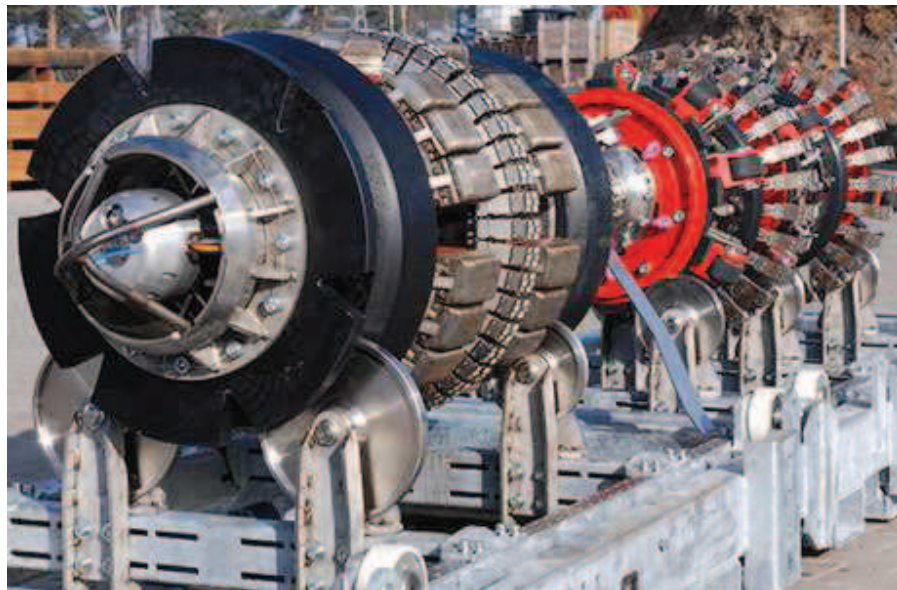


Figura 2.7 – Ferramenta de inspeção em linha (fonte: ROSEN, 2015).

2.4.1.1 Fuga de Fluxo Magnético (MFL)

A tecnologia de Fuga de Fluxo Magnético (MFL) foi a primeira técnica a ser desenvolvida, na década de 60, para avaliação de corrosão e perda de espessura em tubulações. Através desse método, a medição da perda de espessura é realizada de maneira indireta, através da medição da fuga do fluxo magnético causada pela baixa condutividade, quando a parede se torna mais fina pela corrosão ou perda de metal (BARRIOS *et al.*, 2015).

Esta técnica consiste na indução de um campo magnético na parede do duto e a respectiva medição por sensores de efeito Hall. Assim, o fluxo magnético é uniforme se não há falhas na parede do tubo. Se há defeitos no duto, tais como

corrosão ou perda de metal, ocorre a distorção no referido fluxo, e esta distorção ou fuga é medida pelos sensores e é proporcional a perda de espessura. No entanto, se o pite de corrosão não é profundo ou largo suficientemente, há o risco de não ser detectado através desta tecnologia (BARRIOS *et al.*, 2015).

O campo magnético pode ser gerado nas seguintes direções: axial, circunferencial e oblíquo (espiral). Inicialmente, utilizavam-se sensores simples, por exemplo, somente na direção axial, porém verificou-se limitações para identificação de danos, inerentes a cada tipo de tecnologia. Assim, para melhorar a eficiência na detecção, dimensionamento e classificação dos defeitos, tem-se utilizado ferramentas que incorporam sensores que geram campos magnéticos em múltiplos níveis e em variadas direções (LOPES, 2013).

2.4.1.2 Ultrassom

Diferentemente da tecnologia MFL, a ultrassônica permite a medição de forma direta da espessura de parede do duto, com elevada precisão (BARRIOS *et al.*, 2015).

Esta técnica consiste na emissão de um pulso ultrassônico através de transdutores específicos, no qual é inicialmente refletido pela parede interna da tubulação. Parte desse sinal será refletido e o restante entrará na parede e será refletido para a superfície externa do duto. Os componentes eletrônicos da ferramenta irão medir o tempo do deslocamento da onda. Como a velocidade do som no fluido e na superfície do tubo é conhecida e constante, o referido tempo irá definir o valor da distância entre o sensor e a parede da tubulação e conseqüentemente a espessura correspondente. Qualquer alteração na leitura dessa distância irá claramente identificar perda de material. Além disso, ultrassom pode detectar e quantificar defeitos internos, tais como laminações ou inclusões (RIETH-HORST *et al.*, 2012).

Como há necessidade de um acoplante líquido entre o sensor e a parede do tubo, somente pode ser utilizada em tubulações que transportam líquidos (RIETH-HORST *et al.*, 2012).

No entanto, tal limitação pode ser superada utilizando uma metodologia para induzir sinal ultrassônico diretamente na parede do tubo a ser inspecionada, através da utilização do Transdutor Acústico Eletro-magnético (EMAT) (RIETH-HORST *et al.*, 2012). Esta tecnologia permite a geração de ondas horizontais ultrassônicas de cisalhamento na parede do tubo por qualquer um dos dois fenômenos físicos, resultando em correntes alternadas em um campo magnético estático (HILVERT & BEUKER, 2015).

2.4.1.3 Requisito para utilização da Inspeção em Linha (ILI)

Para utilização da Inspeção em Linha (ILI), a tubulação deve ser pigável.

Os termos pigável e não-pigável são amplamente utilizados na indústria, apesar de não serem claramente definidos. No entanto, em geral pode ser dito que uma rede é pigável quando pode ser inspecionada utilizando uma ferramenta com deslocamento livre, sem a necessidade de realizar alterações significativas tanto no equipamento de inspeção quanto na tubulação. Por outro lado, uma rede é considerada não-pigável quando tal situação não se aplica. No entanto, atualmente esses termos são um pouco ilusórios e deverão ser redefinidos (BELLER *et al.*, 2015).

Considerando as definições supracitadas, grande parte da rede de Distribuição de Gás Natural implantada no Brasil é não-pigável, sendo necessário assim utilizar outras técnicas de inspeção para efetuar o monitoramento destas tubulações.

2.4.2 Ondas Guiadas

Segundo Demma *et al.* (2011), a técnica de ondas guiadas é um método relativamente novo que tem sido usado com sucesso na indústria de petróleo e gás para inspeção de dutos não-pigáveis. O referido método, permite detectar e localizar a corrosão externa ou interna.

Ondas guiadas de ultrassom avaliam a condição de tubulações metálicas, para redução de espessura, por meio da utilização de um sinal ultrassônico que percorre longas distâncias e é refletido com a ocorrência de uma descontinuidade. Um

anel é fixado ao redor do duto e a inspeção é realizada em até 60 m para cada direção (MOREIRA, 2012).

É empregado em geral em longos comprimentos de dutos, e tubos isolados. Este ensaio localiza áreas com redução de espessura e fornece um índice de gravidade dos danos. Os resultados são utilizados para avaliar a condição da tubulação, e assim programar inspeções complementares ou reparos dos trechos danificados (SCHUBERT *et al.*, 2011).

A técnica de ondas guiadas, sobretudo é indicada para avaliações globais em tubulações com a finalidade de determinar a natureza, forma e localização de perdas de espessura em tubulações aéreas e isoladas. A Figura 2.8 apresenta uma imagem do equipamento que utiliza esta técnica.



Figura 2.8 – Equipamento de ondas guiadas (fonte: PASA, 2015).

De posse das indicações de defeitos e mapeamentos destes locais nas tubulações é necessária a inspeção complementar por ultrassom para medir as espessuras existentes e assim comprovar o grau de danificação do duto.

As principais vantagens desta técnica são:

- a) capacidade de inspecionar volume integral da tubulação;
- b) promover a varredura do trecho a ser inspecionado em curto espaço de tempo;
- c) inspecionar a linha em operação; e
- d) custos reduzidos

As principais limitações são:

- a) impossibilidade de medir a espessura remanescente na posição do defeito;
- b) como utilizam baixa frequência, indicações são normalmente detectadas quando apresentam variação de seção transversal maior ou igual a 3%; e
- c) locais ruidosos dificultam a análise.

2.4.3 Método de Memória Magnética (MMM)

O Método de Memória Magnética (MMM) permite inspecionar qualquer duto metálico ferromagnético enterrado, submerso ou aéreo, sem necessidade de equipar o duto com ramificações ou outras instalações requeridas para inspeção com “pigs”, por exemplo (MOREIRA, 2012).

Os dados são gravados por um magnetômetro portátil enquanto o operador caminha por cima do local onde está o duto. Não é necessário alterar a operação normal do duto, ou seja, realizar a limpeza, a purga ou retirada do fluido da linha. (MACHADO, 2014).

Os dados são processados por um software, sendo que após esta etapa é possível definir a posição das anomalias com precisão de $\pm 1,5$ m (MOREIRA, 2012).

Para aquisição dos dados, o operador caminha com o magnetômetro sobre o caminhamento do duto e o instrumento registra as flutuações do fluxo magnético no duto, saltos de tensão e mudança de polaridade em três vértices do campo, gravando as anomalias do metal em “magnetogramas”, no qual os dados são posteriormente interpretados para serem convertidos em um indicador geral de periculosidade das anomalias detectadas. A posição dos defeitos é definida com o auxílio de um GPS (MACHADO, 2014).

O método pode identificar anomalias internas e externas, tais como (MOREIRA, 2012):

- a) trincas em qualquer posição (fissuras, rachaduras, corrosão por tensão);
- b) defeitos em soldas (poro, fissuras, falta de fusão, falta de penetração, erro de posicionamento, tensão residual na zona afetada pelo calor);
- c) perda de espessura, corrosão por pite, corrosão interna e externa de qualquer tipo.

As principais características desta técnica são (MOREIRA, 2012):

- a) extensão mínima de defeitos detectados: >1 mm;
- b) profundidade de defeitos detectáveis: $>5\%$ da espessura da parede;
- c) velocidade de levantamento de informações: 2m/segundo; e
- d) erro de posicionamento de anomalias: 2%.

E as limitações são:

- a) Temperatura de operação -50°C até 63°C ;
- b) Diâmetro do duto: 4" até 56"; e
- c) Distância limite entre o magnetômetro e o duto: 15 vezes o diâmetro do duto (distância entre o operador e o duto).

A Figura 2.9 mostra o processo de inspeção de dutos utilizando tal técnica.



Figura 2.9 – Inspeção de dutos pelo método de Memória Magnética (fonte: MORKEN, 2015).

2.4.4 Emissão Acústica

O método de emissão acústica é uma técnica que permite rápida avaliação de dano ao metal. Isso é possível, pois o mesmo detecta fontes com energia correspondente a movimentação de grupos individuais. Com a análise dos sinais de emissão acústica, causado pelo processo de desorganização, torna-se possível avaliar o grau de mobilidade desse deslocamento, que especifica o grau de fragilização do metal. (BIGUS *et al.*, 2012).

Para detecção de vazamentos, que é a principal aplicação desta técnica para inspeção de tubulações, utiliza-se o conceito de onda de tensão decorrente da

liberação da energia local dentro do material, tais como aquelas causadas por impactos, propagação de trincas e o escoamento de fluido através de espaços confinados. Estas ondas são propagadas através da parede do duto e registradas por sensores acústicos instalados em tal estrutura. Os efeitos de propagação do sinal dependem do material do duto, do fluido transportado e também de algumas condições de operação, tais como temperatura e pressão interna do fluido (FAERMAN *et al.*, 2014).

A energia da emissão acústica é parcialmente refletida e transmitida quando encontra uma fronteira entre a parede do tubo e o fluido contido no mesmo. A energia resultante, entre as parcelas refletidas e transmitidas das ondas, depende do ângulo de incidência e da impedância relativa do material. Assim, se dois materiais são bem adaptados em relação à impedância acústica, uma grande parcela de energia poderá ser transmitida (OZEVIM & HARDING, 2012).

Quando ocorre um vazamento ou ruptura, o balanço de pressão da tubulação é interrompido, vaza fluido do duto e ondas acústicas são geradas pela fricção com a parede do tubo. Entretanto, o sinal acústico se propaga ao longo do fluido a montante e jusante do ponto de ruptura. A componente de alta frequência do sinal atenua-se rapidamente, enquanto que a componente de baixa frequência pode se propagar por longas distâncias. Assim, sensores acústicos instalados nas extremidades da tubulação podem captar essas ondas e determinar a existência ou não de vazamento. Assim, tal sistema de detecção de vazamento pode calcular e verificar a posição da ruptura baseado na velocidade de propagação do som e o tempo de chegada do sinal acústico a dois sensores acústicos adjacentes. Quando uma linha está em boas condições, os sinais acústicos medidos são tratados como ruído de fundo. Uma vez que um vazamento ocorre, tanto os sinais acústicos com o ruído de fundo são captados pelos sensores e comparados com o perfil de assinatura de sinais de vazamentos do sistema de aquisição. Ao mesmo tempo o referido sistema poderá emitir alarmes de ruptura e o local da falha poderá ser identificado (MENG *et al.*, 2011).

Há três tipos principais de sinais acústicos, sinais de vazamento, ruído de fundo e sinais perturbadores. Ruídos de fundo referem-se, sobretudo a interferências eletromagnéticas do meio e do sistema de aquisição, que são inevitáveis, mas podem

ser reduzidas através da utilização de técnicas de filtragem, tais quais transformadas de Fourier, transformadas de *Wavelet*, etc. Sinais perturbadores correspondem a partida e parada de compressores, acionamento de válvulas, etc. Algumas características desses sinais, são similares aos sinais de vazamento e podem indicar um falso alarme de ruptura. (MENG *et al.*, 2011).

Ferramentas de inspeção para detecção de vazamento com base em Emissão Acústica tornaram-se uma técnica comum para identificar vazamento em tubulações antes que a falha possa acarretar em um grande problema ou até mesmo uma ruptura da linha (GARCIA *et al.*, 2014).

Por ser um método que permite a rápida identificação do vazamento, alta sensibilidade, localização precisa do vazamento e baixo percentual de alarmes falsos, é que tem se desenvolvido várias pesquisas referente a este assunto, especialmente no reconhecimento do sinal acústico.

2.5 MÉTODO DE DIAGNÓSTICO POR VIBRAÇÕES

O método de monitoramento por vibrações é uma técnica de ensaio não destrutivo (END) em tempo real apta a identificar, controlar e caracterizar as mudanças no sinal de vibração emitidas pelo crescimento de um defeito, desde seu início até os estágios mais críticos (ASTM, 1998). Essa metodologia tem sido utilizada com sucesso tanto em estruturas metálicas quanto constituídas de materiais compósitos (POLLOCK, 1989).

A técnica de monitoramento por vibrações é versátil, pois permite a inspeção de estruturas grandes e complexas, com a utilização de poucos sensores e sem a necessidade de acessar o interior da estrutura. No entanto, há uma grande necessidade por tecnologias que identifiquem trincas, corrosão ou outros defeitos que possam comprometer a performance da instalação (UMEADI & JONES, 2003).

Neste contexto, Murigendrappa *et al.* (2004), obtiveram bons resultados na identificação de trincas em tubos pressurizados, através do modelamento de uma viga com seção circular em vibração livre, representando tal defeito como uma mola

rotacional e detectando o mesmo através da medição da frequência natural de tais tubos.

Cheraghi *et al.* (2005) propuseram uma metodologia de monitoramento da integridade estrutural de tubulações baseada na resposta de vibração da mesma utilizando sensores piezoelétricos. Realizou-se uma análise numérica por Elementos finitos para simular o comportamento da tubulação íntegra, bem como com vários tamanhos de defeitos. Para avaliar a resposta dinâmica do duto, utilizou-se Transformada rápida de Fourier, Transformada de *Wavelet* e Transformada do Pacote de *Wavelet*, no qual estas últimas se mostraram mais eficientes na identificação dos danos na tubulação avaliada.

Zhu *et al.* (2007), apresentaram um modelo estatístico de elementos finitos para identificação de danos em dutos subaquáticos via medição de vibração. Ensaios de laboratório de um modelo de duto em escala foram realizados para validar este método.

Umeadi (2010) avaliou a habilidade e efetividade de elementos piezoelétricos na detecção de defeitos em dutos a fim de prever mudanças na performance através de dados obtidos experimentalmente em laboratório usando uma bancada de testes. Técnicas de detecção baseadas em vibração e emissão acústica foram utilizadas para avaliar defeitos em oleodutos em aço carbono, no qual foram validadas utilizando atenuação e análise de forma de onda. O tamanho do defeito e sua respectiva progressão (características principais dos defeitos) foram monitorados, medidos e identificados através da análise de espectro de múltiplos sinais combinados com um número de bandas de frequência. Os resultados experimentais e a análise teórica confirmaram a capacidade desta técnica em detectar e distinguir a diferença entre diferentes modos de falha. Rezaei & Taheri (2010) utilizaram a transformada de Hilbert-Huang (HHT), como uma técnica de análise de séries no tempo, combinado com monitoramento de sinais de vibração no intuito de identificar falhas em dutos com soldas circunferenciais. Na metodologia proposta, certos sensores tais quais piezocerâmicos e vibrômetros a laser foram aplicados para monitorar a tubulação próxima a região de solda. Os dados de vibração coletados foram então, decompostos

utilizando métodos específicos e processados por HHT para identificar trincas e outros defeitos na região da solda.

Peng *et al.* (2012) estudaram a viabilidade da utilização de técnicas de monitoramento por vibrações para identificação de dano em dutos submarinos. Assim, efetuou-se análise numérica e experimental (através de um modelo em escala) dessas estruturas, no qual utilizou-se os índices WPECRS (taxas médias de alteração da energia do pacote de *Wavelet*) para avaliar e localizar danos de vão-livre.

Abushanab (2013) propôs um estudo experimental-numérico com base nos modos de ressonância com objetivo de detectar e avaliar a severidade de falhas em uma tubulação. Inicialmente um modelo utilizando a técnica de Elementos Finitos foi desenvolvido para determinar o modo de ressonância de um tubo em aço carbono íntegro e uma série de experimentos foram realizados para validar o modelo numérico proposto. Consequentemente, os efeitos que as falhas introduzidas ao sistema causaram nos modos de ressonância foram determinados utilizando o referido modelo. Algumas técnicas usuais de análise de sinais de vibrações foram aplicadas para detectar e avaliar a severidade de tais falhas. As amplitudes e frequências dos sinais de vibrações foram medidas e comparadas.

Razi & Taheri (2014) propuseram uma metodologia para detecção de danos nos cordões de solda de dutos submarinos com base na análise de sinais de vibrações, através de simulações numéricas e verificações experimentais. Utilizou-se duas formas para excitação do sistema: (i) uma força impulsiva; (ii) usando transdutores piezoelétricos como um atuador para propagar ondas no tubo. A referida metodologia adotou um modelo empírico de decomposição, no qual processou os dados de vibrações para estabelecer índices de danos com base em energia.

Navarro *et al.* (2015) realizaram uma abordagem para classificação de vazamentos em tubulações, validada experimentalmente utilizando uma seção de um tubo em aço carbono com falhas de diferentes tamanhos e localizações. A estrutura ensaiada foi instrumentada com sensores e vibrações piezoelétricos instalados em diversos locais ao longo da superfície do duto, a fim de induzir ondas guiadas e registrar o comportamento do sistema. Índices estatísticos de correlação dos sinais

piezoelétricos foram obtidos por meio da análise do componente principal com objetivo de distinguir diferentes cenários de vazamento.

Rizwan & Paul (2015) propuseram uma metodologia para detecção de vazamentos em tubulações de gás através de técnicas de monitoramento de vibrações. Neste estudo utilizou-se acelerômetros para medir a vibração induzida pelo fluxo na superfície do tubo para determinar a variação na pressão do fluido causada pela ruptura e a respectiva localização do dano. Estudos experimentais e observações mostraram que alterações bruscas na pressão do sistema é sempre acompanhada por uma mudança abrupta na aceleração na superfície do tubo nos locais correspondentes ao longo do mesmo.

3 TÉCNICAS DE ANÁLISE DE SINAIS

O presente capítulo apresenta um descritivo dos métodos de análise de sinais utilizados para tratamento dos dados experimentais. Dentre as técnicas empregadas destaca-se: Transformada de *Wavelet*, *Bispectrum* e Matemática Morfológica.

3.1 TEORIA WAVELET

A maioria das técnicas atuais de monitoramento das condições das estruturas depende de quantificar os parâmetros dinâmicos e analisar tais dados no domínio da frequência, através de análise modal. Análises modais a partir de algoritmos de detecção de danos dependem dos sinais emitidos por sensores alocados ao longo da estrutura de interesse e da utilização de modelos estruturais precisos, para determinação dos modos de vibrar (TAHA *et al.*, 2006).

A análise modal é realizada no domínio da frequência, sendo normalmente aplicada a Transformada rápida de Fourier (FFT). Esta técnica é utilizada para decompor uma sequência no domínio do tempo em um conjunto de funções base no domínio da frequência. A FFT utiliza funções harmônicas complexas, no qual possuem suporte infinito e são eficientes para analisar sinais estacionários, ou seja, cuja frequência não varia no tempo, no entanto não são apropriadas para descrever sinais transientes, isto é, os que apresentam variação da frequência ao longo do tempo (SILVA, 2013). Tal situação ocorre, pois sua transformação é resultado de um somatório (ou integração contínua no domínio do tempo) sobre o comprimento integral do sinal. Isto significa que a decomposição do sinal não pode indicar o momento da ocorrência de um sinal transitório. Assim, a Transformada de Fourier pode proporcionar uma boa resolução da frequência, mas sem resolução temporal (TAHA *et al.*, 2006).

Dessa forma, sistemas de monitoramento da condição estrutural com base na Transformada discreta de Fourier podem reconhecer a ocorrência de danos se forem baseados na análise dos picos de frequência. Para tal situação, somente as informações da frequência teriam utilidade, sendo que todas as demais informações no

tempo seriam perdidas. Portanto, somente com uma análise temporal, poder-se-ia verificar o valor destas informações dos sinais vibratório no tempo das estruturas (SILVA, 2013).

Face ao exposto, uma alternativa, seria utilizar a Transformada de Fourier de curto período (STFT), que utiliza uma função janela que é multiplicada pelo sinal de entrada antes de calcular a FFT (TAHA *et al.*, 2006).

Quando baixas frequências são observadas em um sinal é necessária uma longa observação no tempo. Ao contrário, quando altas frequências são observadas, somente uma curta observação no tempo é necessária. O princípio da incerteza de Heisenberg, da física quântica, estabelece que não é possível obter a informação exata da frequência de um sinal e o instante/local exato no tempo/espço onde esta frequência ocorreu. O que podemos saber é o intervalo de tempo os quais certas bandas de frequência existem. Com isso, não é possível obter alta resolução em tempo e frequência simultaneamente. Em outras palavras, um sinal não pode ser representado como um ponto no espaço tempo-frequência. (SANCHES, 2001).

Pelo fato de uma janela simples ser usada para todas as frequências na STFT, a resolução da análise é a mesma em todas as localizações do plano tempo-frequência (SANCHES, 2001). Assim, apesar de STFT realizar a representação tempo-frequência do sinal, há uma maior inconveniência em sua utilização no monitoramento de estruturas, pois a largura da referida janela é fixa (TAHA *et al.*, 2006).

Um eficiente algoritmo de processamento digital de sinais, capaz de analisar sinais contínuos e transientes, deve fornecer múltiplas resoluções no domínio do tempo e da frequência (TAHA *et al.*, 2006).

A transformada de *wavelet* é uma técnica que representa o avanço na evolução dos algoritmos de processamento digital de sinais, uma vez que é baseada na variação do tamanho da janela, isto é, é possível utilizar intervalos de tempo longos (janelas largas) para baixas frequências e intervalos de tempos curtos (janelas estreitas) para altas frequências (TAHA *et al.*, 2006).

A análise *wavelet* tem atraído enorme atenção dos pesquisadores em virtude da sua habilidade em analisar sinais não-estacionários tais como sinais de danos em estruturas. Assim, a transformada de *wavelet* pode ser implementada

satisfatoriamente para identificação de mudanças ocorridas no sinal principal, como resultado da detecção de danos.

3.1.1 Transformada de *Wavelet* contínua e discreta

A transformada de *wavelet* contínua de uma função é definida por Newland (1993) como:

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (3.1)$$

onde W_f é o coeficiente *wavelet* calculado, no qual pode ser utilizado para recompor a função original $f(t)$; b é o parâmetro de translação; a é o parâmetro de escala; ψ^* é a função de transformação, também chamada de *wavelet* mãe.

A transformada de *wavelet* discreta para uma sequência discreta no tempo é dada por (KHANAM *et al.*, 2014).

$$C_{j,k} = 2^{(-j/2)} \sum_n x(n) \psi(2^{-j}n - k) \quad (3.2)$$

onde $\psi(n)$ é a função *wavelet* e $2^{(-j/2)}$, $\psi(2^{-j}n - k)$ são versões da função base $\psi(n)$ com aplicação do escalonamento e deslocamento, baseado nos valores de j (coeficiente de escala) e k (coeficiente de deslocamento), sendo comumente escrito como $\psi_{j,k}(n)$. O termo *wavelet* significa pequena onda. A pequenez refere-se a condição em que esta função (janela) possui um comprimento finito (suporte compacto). A onda se refere a condição oscilatória desta função. O termo mãe indica que funções com diferentes regiões de suporte que são utilizadas no processo de transformação são derivadas de uma função principal, ou a *wavelet* mãe. (TAHA *et al.*, 2006)

Todas as funções *wavelet* utilizadas em uma dada transformação são derivadas de uma determinada função *wavelet* mãe através de translação (deslocamento) e escalonamento (dilatação ou compressão) (SARKER *et al.*, 2015). Em outras palavras, a *wavelet* mãe é um protótipo para formação de outras funções janela (TAHA *et al.*, 2006).

A função *wavelet* mãe utilizada para gerar a função base é selecionada com base em algumas características desejadas associadas a uma determinada função. O parâmetro de translação b está relacionado com a localização da função *wavelet*, ou seja com a mesma é deslocada através do sinal, no qual corresponde a informação temporal na transformada de *wavelet*. Já o parâmetro de escala a é análogo ao módulo do inverso da frequência. Assim tal parâmetro pode expandir ou comprimir o sinal. Grandes escalas podem ser utilizadas em baixas frequências para ampliar o sinal e fornecer detalhes que estavam escondidos no sinal original. Por outro lado, pequenas escalas podem ser aplicadas em altas frequências para comprimir o sinal e fornecer uma informação global acerca do mesmo. (CHERAGHI *et al.*, 2005).

Há um número considerável de funções *wavelets* mãe que podem ser usadas na transformada de *wavelet*. As famílias mais comumente utilizadas são: Haar, Daubechies, Coiflet1, Symlet2, Meyer, Morlet e Sombreiro. Estas famílias representam várias formas (SRIDHAR *et al.*, 2014).

Uma representação gráfica de algumas funções *wavelet* mãe são apresentadas na Figura 3.1.

Em virtude das *wavelets* mãe produzirem todas as funções *wavelet* utilizadas através da translação e escalonamento, isto determina as características da transformada de *wavelet* resultante. Dessa forma, os detalhes da aplicação particular devem ser levados em consideração e a função *wavelet* mãe apropriada para tal situação deve ser escolhida para que a transformada de *wavelet* seja efetiva. (VÁÑA, 2014).

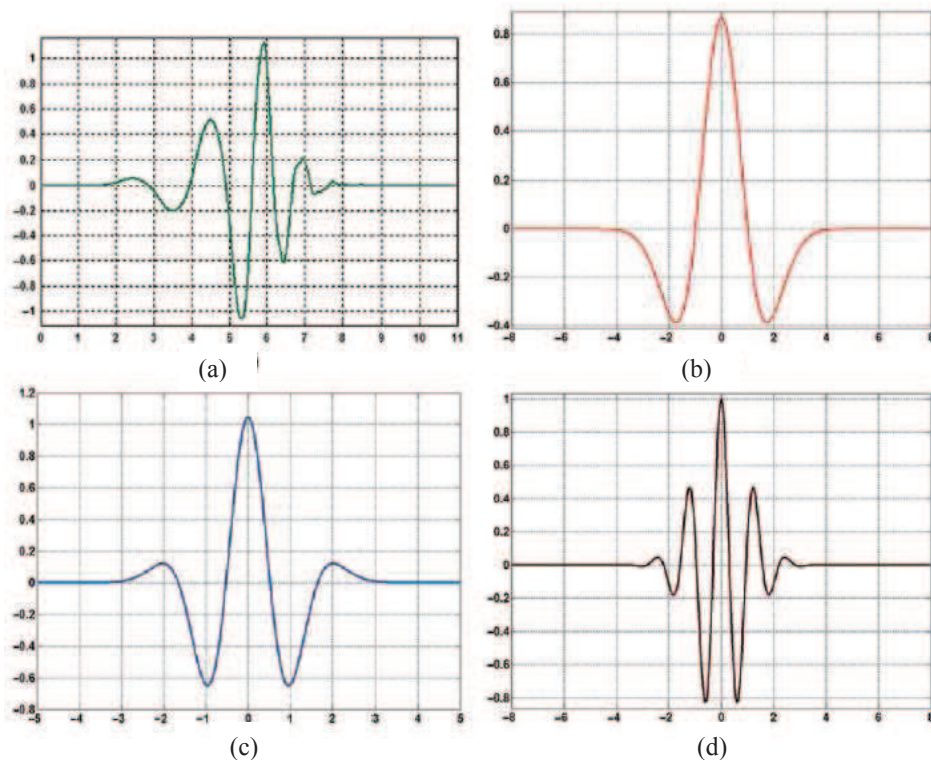


Figura 3.1 – Representação gráfica de algumas funções *wavelet* mãe: (a) Daubechies *wavelet* (dB6), (b) sombrero *wavelet*, (c) Gaussiana *wavelet* (d) Morlet *wavelet* (fonte: TAHA *et al.*, 2006).

3.1.2 Análise *Wavelet* Multi-resolução

A análise *wavelet* multi-resolução é uma propriedade significativa para aproximação em vários níveis de problemas de engenharia. Esta técnica permite decompor os sinais em várias escalas de resolução e utilizando diferentes funções *wavelet* base. Assim, para componentes do sinal em baixa frequência utiliza-se uma escala grosseira, obtendo somente as principais características do sinal. Já para componentes do sinal em alta frequência, deve-se aplicar uma resolução fina, a fim de obter os detalhes do sinal (RAVANFAR *et al.*, 2015).

Escalonar uma *wavelet* significa resumidamente, alongar ou comprimi-la no domínio do tempo. Assim, quanto menor a escala mais comprimida a *wavelet* será, enquanto que maior a escala, mais alongada a *wavelet* será (MALLAT, 1999).

Dessa forma, a análise *wavelet* multi-resolução, decompõe o sinal em vários níveis de resolução: dados com resolução baixa (aproximações) contêm

informações referentes a componentes de baixa frequência e dados com alta resolução (detalhes) possui informações correspondentes a componentes de alta frequência (TAHA et al, 2006).

Considerando j e k os índices de escalonamento e translação, respectivamente, cada valor de j corresponde a um diferente nível de resolução do sinal.

A análise *wavelet* multi-resolução para um sinal digital $x(n)$ pode ser descrita como segue (RAVANFAR et al., 2015). Para um sinal digital $x(n)$, o coeficiente de aproximação $a_{j,k}$ na resolução j -ésima pode ser obtido:

$$a_{j,k} = 2^{(-j/2)} \sum_n x(n) \phi(2^{-j}n - k) \quad (3.3)$$

onde ϕ é chamada função de escalonamento. As referidas funções são similares as funções *wavelet*, exceto por possuírem somente valores positivos. As mesmas foram desenvolvidas para suavizar o sinal de entrada, de maneira semelhante a um filtro *passa baixa* que rejeitam componentes de alta frequência de um sinal (MALLAT, 1999).

O sinal aproximado x_j no nível de resolução j -ésimo, pode ser obtido:

$$x_j = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_{j,k} \phi_{j,k} \quad (3.4)$$

O coeficiente de detalhamento $d_{j,k}$ no nível de resolução j -ésimo e o detalhe do sinal $g_j(n)$ são então calculados por:

$$d_{j,k} = 2^{(-j/2)} \sum_n x(n) \psi(2^{-j}n - k) \quad (3.5)$$

$$g_j(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_{j,k} \cdot \psi_{j,k} \quad (3.6)$$

onde $\psi_{j,k}$ é a função base de *wavelet*.

O sinal original pode ser reconstituído utilizando um número infinito de detalhes obtidos depois da decomposição do sinal em níveis infinitos de resolução, conforme a equação (3.7) (MALLAT, 1999; RAVANFAR *et al.*, 2015).

$$x(n) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} g_j(n) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_{j,k} \psi_{j,k}(n) \quad (3.7)$$

A equação acima implica a quebra do sinal em um número infinito de detalhes, no qual é impraticável. Alternativamente, a análise pode ser interrompida no nível de resolução M-ésimo e o sinal pode ser reconstituído utilizando aproximações de M-ésima ordem e todos os detalhes a partir do primeiro nível até o M-ésimo (TAHA *et al.*, 2006). A equação (3.8) apresenta este procedimento.

$$x(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_{M,j} \cdot \phi_{M,k}(n) + \sum_{j=1}^M \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_{j,k} \cdot \psi_{j,k}(n) \quad (3.8)$$

O primeiro termo representa a aproximação no nível M e o segundo os detalhes desde o nível 1 até o M. Portanto a análise multi-resolução constrói uma estrutura piramidal que requer uma aplicação iterativa de funções de escalonamento e *wavelet*, respectivamente (TAHA *et al.*, 2006).

Uma representação esquemática da referida estrutura piramidal referente a análise *wavelet* multi-resolução é apresentada na Figura 3.2.

No referido esquema, mostra-se sinal original sendo decomposto em oito níveis de aproximações e detalhes. O sinal original é fracionado em um componente de baixa frequência (A_1) e um componente de baixa frequência (D_1). Cada sucessiva aproximação é então decomposto em um componente de aproximação e outro de detalhe, por exemplo, $A_1 = A_2 + D_2$, $A_2 = A_3 + D_3$, e assim por diante (SAWICKI *et al.*, 2009).

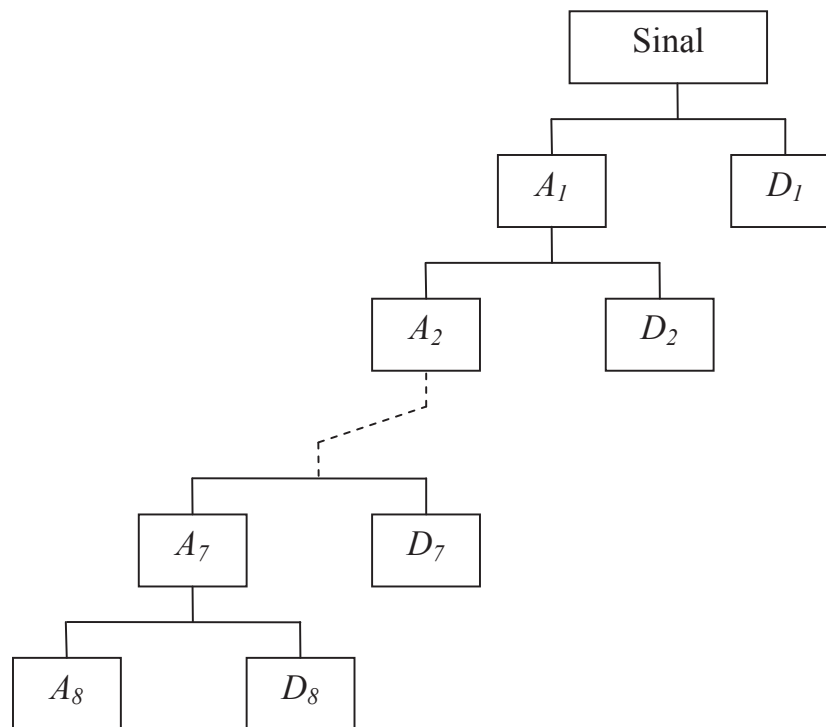


Figura 3.2 – Representação esquemática da estrutura piramidal da Análise *Wavelet* Multi-resolução (fonte: Adaptado de SAWICKI *et al.*, 2009).

3.1.3 Análise Pacote *Wavelet*

A transformada do pacote *wavelet*, assim como análise *wavelet* multi-resolução, é uma técnica para decompor um sinal em sucessivos componentes de baixa e alta frequência. No entanto, este difere da técnica multi-resolução não somente em relação a aproximação em um dado nível decomposto, mas também pelos detalhes. Isso resulta em uma base mais larga e flexível na análise dos dados monitorados (DENG *et al.*, 2014).

Os pacotes *wavelet* são um conjunto de funções *wavelet* combinadas linearmente. Os referidos pacotes herdam as propriedades de suas respectivas funções *wavelet*, tais como ortonormalidade e localização tempo-frequência (PENG *et al.*, 2012).

A Figura 3.3 apresenta um diagrama binário de um sinal no domínio do tempo $f(t)$ até o terceiro nível de decomposição pelo pacote de *wavelet*.

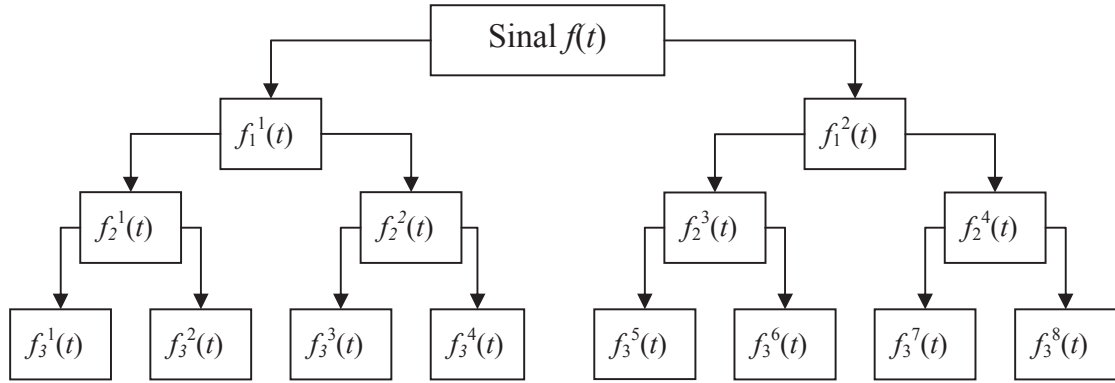


Figura 3.3 – Decomposição pelo pacote de *wavelet* (fonte: Adaptado de Peng *et al.*, 2012).

Após a decomposição do j -ésimo nível, o sinal original $f(t)$ pode ser reconstituído pelo somatório de 2^j componentes, conforme (RAVANFAR *et al.*, 2015):

$$f(t) = \sum_{i=1}^{2^j} f_j^i(t) \quad (3.9)$$

onde $f_j^i(t)$ é a componente do sinal do pacote de *wavelet* que pode ser expressada como uma combinação linear das funções do pacote *wavelet*:

$$f_j^i(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_{j,k}^i \psi_{j,k}^i(t) \quad (3.10)$$

onde i , j e k são números inteiros que representam os parâmetros de modulação, escala e translação, respectivamente (PENG *et al.*, 2012). Já, $c_{j,k}^i$ e $\psi_{j,k}^i(t)$ são definidos como coeficientes pacote *wavelet* e função pacote *wavelet*, respectivamente. O referido coeficiente, pode ser obtido por (RAVANFAR *et al.*, 2015):

$$c_{j,k}^i = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{j,k}^i(t) dt \quad (3.11)$$

A função pacote *wavelet* é definida como:

$$\psi_{j,k}^i = 2^{j/2} \psi^i(2^j t - k), i = 1, 2, 3, \dots \quad (3.12)$$

onde as *wavelets* $\psi^i(t)$ são obtidas pelas relações recursivas apresentadas nas equações 3.13 e 3.14.

$$\psi^{2i}(t) = \sqrt{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k) \psi^i(2t - k) \quad (3.13)$$

$$\psi^{2i+1}(t) = \sqrt{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} g(k) \psi^i(2t - k) \quad (3.14)$$

onde $h(k)$ e $g(k)$ são filtros associados com a função de escalonamento e a função *wavelet* mãe.

3.1.3.1 Energia do Pacote *Wavelet*

Alguns estudos têm mostrado que a componente de energia do pacote *wavelet* são parâmetros que podem ser utilizados para determinar características específicas de um sinal (WICKS, 2014).

O índice de energia do pacote *wavelet* é usado para determinar as posições iniciais dos danos (TAHA *et al.*, 2006).

Han *et al.* (2005) obtiveram sucesso na aplicação do índice de energia do pacote *wavelet* para identificação e localização de danos em uma viga simplesmente apoiada.

A componente de energia E_{f_j} no nível j é inicialmente definido como:

$$E_{f_j} = \int_{-\infty}^{+\infty} f^2(t) dt = \sum_{m=1}^{2^j} \sum_{n=1}^{2^j} \int_{-\infty}^{+\infty} f_j^m(t) f_j^n(t) dt \quad (3.15)$$

onde $f_j^m(t)$ e $f_j^n(t)$ são componentes decompostas da *wavelet*. A energia total do sinal pode ser expressa como o somatório das energias das componentes do pacote *wavelet* quando a função *wavelet* mãe é ortogonal (PENG et al, 2012):

$$E_{f_j} = \sum_{i=1}^{2^j} E_{f_j^i} = \int_{-\infty}^{+\infty} f_j^{i2}(t) dt \quad (3.16)$$

onde f_j^i é o i-ésimo nível da componente do sinal decomposta ao j-ésimo nível pela função de *wavelet* e transladada no domínio do tempo (WICKS, 2014).

O índice da variação da energia do pacote *wavelet* é utilizado para indicar a localização do dano estrutural (WICKS, 2014). A variação da energia do pacote *wavelet* ΔE_{f_j} no nível j é definida por:

$$\Delta E_{f_j} = \sum_{i=1}^{2^j} \frac{\left| (\Delta E_{f_j})_d - (\Delta E_{f_j})_g \right|}{(\Delta E_{f_j})_g} \quad (3.17)$$

onde $(\Delta E_{f_j})_g$ é a componente da energia E_{f_j} no nível j para a estrutura íntegra e $(\Delta E_{f_j})_d$ é a componente da energia E_{f_j} no nível j para a estrutura com dano.

3.2 TEORIA BISPECTRUM

Uma não linearidade quadrática relaciona três componentes de onda de tal forma que (BARBIERI & BARBIERI, 2013):

$$X_m = \sum_{m=k+l} A_{k,l} X_k X_l + \varepsilon \quad (3.18)$$

onde X_k e X_l são as componentes complexas do espectro de Fourier em função das frequências ω_k e ω_l , com fase θ_k e θ_l , respectivamente. $A_{k,l}$ refere-se ao coeficiente de acoplamento e é dependente das propriedades da não linearidade do sistema. O termo ε denota qualquer erro associado a este modelo. Neste sistema X_k e X_l irão interagir para criar uma terceira variável X_m , onde $\omega_m = \omega_k \pm \omega_l$ e $\theta_m = \theta_k \pm \theta_l$.

O *bispectrum* de uma série temporal discreta $x(n)$ é definido como:

$$b_x(k, l) = X_m X_l X_m^* \quad (3.19)$$

no qual X_m^* refere-se ao conjugado complexo de X_m . Isto pode ser claramente visto como o *bispectrum* é levado em conta pela combinação entre duas frequências. Se ω_k , ω_l e ω_{k+l} são independentes, cada um terá uma fase aleatória independente. (BARBIERI *et. al*, 2015).

Além disso, o *bispectrum* é uma ferramenta estatística de grande importância no estudo de vibrações não-lineares, onde a relação entre as três componentes espectrais estão em questão, bem como a geração de modos de ressonância combinados ou acoplamento do modo quadrático (BARBIERI & BARBIERI, 2013).

O *bispectrum*, o espectro de terceira ordem, pode ser visto como a decomposição do terceiro momento estatístico (assimetria), de um sinal no domínio da frequência, bem como ser capaz de detectar não-simetrias e não-linearidades.

3.2.1 Função Densidade De Probabilidade

A distribuição da probabilidade de uma variável aleatória X , é definida por:

$$F(x) = P(X < x) \quad (3.20)$$

A função de densidade de probabilidade é a derivada da mesma, assim

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} \quad (3.21)$$

A operação esperança matemática, cuja resultante é o valor esperado para a função $g(x)$, é definido como:

$$E\{g(x)\} = \int_{-\infty}^{\infty} g(x)f(x)dx \quad (3.22)$$

Em muitos casos, a função de densidade de probabilidade pode ser decomposta em momentos constituintes ou cumulantes. Se uma alteração na condição causa uma mudança na função de densidade de probabilidade do sinal, então os momentos e cumulantes também poderão mudar. Os momentos são estatísticas de uma variável aleatória capazes de representar seu comportamento probabilístico (SILVA, 2013).

Os momentos dos sinais podem ser definidos matematicamente como:

$$m_n = E\{x^n\} \quad (3.23)$$

onde, $E\{\cdot\}$ pode ser estimado.

O primeiro momento m_1 é a média, assumida sendo nula. O segundo momento m_2 é potência do sinal ou variância, no qual mede a distribuição dos dados em torno da média. O terceiro momento, m_3 refere-se a assimetria da função de densidade de probabilidade. Para distribuições simétricas, tal qual a uma distribuição Gaussiana, $m_3 = 0$. O quarto momento relacionado a média, m_4 está relacionado com o grau de achatamento próximo a seu centro (COLLIS *et al.*, 1998).

Os cumulantes podem ser considerados como momentos em que a dependência dos momentos de baixa ordem foi removida. Matematicamente são

definidos como os coeficientes da expansão da série de Taylor do logaritmo natural da função característica (COLLIS *et al.*, 1998):

A seguir são apresentados os primeiros quatro cumulantes de um processo de média nula em termos de seus momentos

$$c_1 = m_1; \quad c_2 = m_2; \quad c_3 = m_3; \quad c_4 = m_4 - 3m_2^2 \quad (3.24)$$

Nota-se que os cumulantes até terceira ordem são iguais aos momentos. É somente a partir da quarta ordem que a distinção entre momentos e cumulantes é significativa. Assim, quando considera-se o espectro de terceira ordem, não há necessidade da preocupação se momentos ou cumulantes são mais apropriados. No entanto, a partir da quarta ordem, tal distinção é necessária (SILVA, 2013).

3.2.2 Curtose

O atributo estatístico mais comumente utilizado no monitoramento dos sinais é o valor médio quadrado (momento de segunda ordem) do sinal (BARBIERI *et al.*, 2015)

$$m_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(i)^2 \quad (3.25)$$

A segunda característica comumente utilizada é a curtose, que fornece uma indicação das amostras que desviam da média por um pequeno valor comparado a aqueles que desviam por um grande número. O momento de quarta ordem pode ser normalizado pelo de segunda ordem (BARBIERI & BARBIERI, 2013):

$$\gamma_4 = \frac{m_4}{m_2^2} \quad (3.26)$$

Para uma distribuição Gaussiana, cuja média é nula, o valor de curtose, corresponde a 3. (BARBIERI *et al.*, 2015).

O valor dessa grandeza superior a 3 indica que a função de densidade de probabilidade é mais afunilada em torno de seu centro do que a distribuição Gaussiana, e é chamada de leptocúrtica. Já, para os valores de curtose menor que 3, a referida função é mais achatada que a distribuição Gaussiana, e é denominada platicúrtica (SILVA, 2013).

Estas ferramentas estatísticas são úteis para detectar uma falha incipiente, enquanto que o *bispectrum* pode ser utilizado para sistemas de estado uniforme (BARBIERI & BARBIERI, 2013).

3.3 MATEMÁTICA MORFOLÓGICA

O estudo morfológico concentra-se na estrutura geométrica de elementos. Embora, o desenvolvimento de trabalhos relacionados à morfologia digital seja bastante recente, haja vista a necessidade da utilização da computação para desenvolvimento dos mesmos, o seu embasamento matemático está estruturado na teoria dos conjuntos, tema amplamente estudado há muito tempo.

Serra (1982) introduziu o princípio da morfologia matemática como um método de processamento de imagens binárias. O conceito básico de processamento de sinal morfológico consiste na modificação do formato do sinal através da sua interação com outro objeto chamado de elemento estruturante (NIKOLAOU & ANTONIADIS, 2002).

Apesar de ter sido concebida originalmente como um conjunto de ferramentas matemáticas para o tratamento e análise de imagens, a morfologia matemática tem sido amplamente utilizada em sinais unidimensionais no domínio do tempo (ZHANG *et al.*, 2008).

A matemática morfológica é uma ferramenta eficiente no processamento de sinais não lineares que tem sido usada para o tratamento do sinal tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência (CHEN *et al.*, 2014).

O sinal de vibração tratado, como o do presente trabalho, é um sinal discreto 1-D, cujas transformações morfológicas para este tipo de sinal são detalhadas nos próximos parágrafos (RAJ & MURALI, 2013).

Sendo $f(n)$ o sinal original 1-D, no qual é uma função discreta sobre um domínio $F=(0; 1; 2;...; N-1)$ e $g(n)$ é o ES (Elemento estruturante plano), que é uma função discreta de um domínio $G=(0, 1, 2, ..., M-1)$, assim dois operadores morfológicos básicos, a erosão e dilatação, podem ser definidos como:

$$(f \ominus g)(n)=\min[f(n + m) - g(m)], \quad m \in 0, 1, 2, ..., M-1 \quad (3.27)$$

$$(f \oplus g)(n)=\max[f(n + m) - g(m)], \quad m \in 0, 1, 2, ..., M-1 \quad (3.28)$$

onde $\ominus$ refere-se ao operador erosão e $\oplus$ indica o operador dilatação.

Baseado nos referidos operadores (erosão e dilatação), pode-se definir outros dois operadores morfológicos, a abertura e o fechamento, no qual podem ser claramente definidos por:

$$(f \circ g) (n)=(f \ominus g \oplus g) (n) \quad (3.29)$$

$$(f \bullet g) (n)=(f \oplus g \ominus g) (n) \quad (3.30)$$

no qual $\circ$ representa o operador abertura e $\bullet$ o operador fechamento.

Estes quatro operadores podem ser utilizados para extrair características morfológicas de um sinal, mas diferentes operadores ajustam distintas características morfológicas (BARBIERI et al., 2015).

Cada uma das quatro operações básicas apresenta uma característica básica quanto ao seu efeito sobre o sinal tratado. Em termos gerais, pode-se afirmar que a operação de erosão tende a reduzir picos positivos e suavizar os negativos. A operação de dilatação pode, por sua vez, fazer o oposto, ou seja, suavizar picos positivos e reduzir picos negativos. As funções de abertura e fechamento podem reduzir picos positivos e negativos, respectivamente. (CHEN et al., 2014).

Figura 3.4 – Sinais produzidos por diversos operadores morfológicos: (a) sinal original; (b) sinal após erosão; (c) sinal após dilatação; (d) sinal após fechamento; e (e) sinal após abertura (fonte: Adaptado de ZHANG *et al.*, 2008).

A Figura 3.4(a), apresenta um sinal original simulado, enquanto que as Figuras 3.4(b) – 3.4(e) mostram os efeitos dos operadores morfológicos básicos nas características impulsivas deste sinal, resumidos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Propriedades dos operadores básicos de morfologia matemática.

Operador morfológico	Impulso Negativo	Impulso Positivo
Erosão	Atenua	Reduz
Dilatação	Reduz	Atenua
Abertura	Preserva	Reduz
Fechamento	Reduz	Preserva

Fonte: CHEN *et al.*, 2014

Segundo Dong *et al.* (2011), pode-se concluir que as operações de abertura e fechamento podem ser utilizadas na detecção de pulsos negativos e positivos, respectivamente, ou seja, são operações interessantes para a análise de sinais de vibração com características impulsivas.

3.3.1 Morfologia Matemática Multiescalar

A morfologia matemática multiescalar refere-se à análise tradicional de morfologia matemática utilizando-se diversos elementos estruturantes de escalar diferentes. Nesse tipo de análise, as regras para definição do elemento estruturante e a variação sofrida a cada iteração devem ser definidas previamente (CHEN *et al.*, 2014).

As funções de abertura e fechamento multiescalar, podem ser definidas, respectivamente, pelas equações (3.31) e (3.32).

$$f \circ g_n = (f \ominus g_n) \oplus g_n \quad (3.31)$$

$$f \circ g_n = (f \oplus g_n) \ominus g_n \quad (3.32)$$

onde n é um número inteiro que define a escala e g_n define o elemento estruturante na escala n (BARBIERI *et al.*, 2015).

O fator multi-escala MM refere-se a análise morfológica com elementos estruturantes a escalas distintas. A escala de elemento estruturante, especialmente para escala de tamanho, é importante para a análise morfológica de sinais 1-D. Os operadores morfológicos multi-escala também possuem operadores de abertura e fechamento. O coeficiente de correlação de dois espectros principais pode ser expresso por:

$$\rho = \frac{Cov[P_1, P_2]}{\sqrt{Var[P_1]Var[P_2]}} \quad (3.33)$$

onde, P_1 e P_2 , representam dois espectros principais, e ρ o respectivo coeficiente de correlação no qual mede a similaridades de dois sinais (com e sem defeitos) (BARBIERI *et al.*, 2015).

3.4 ANÁLISE POWER SPECTRUM

Sendo $X(\omega)$ a Transformada de Fourier de um sinal e definida como:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (3.34)$$

e $X^*(\omega)$ o complexo conjugado correspondente.

O *Power Spectrum* é definido como o quadrado da amplitude da Transformada de Fourier de um sinal (LIANG *et al.*, 2013), podendo ser escrito como:

$$P(\omega) = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \right|^2 = X(\omega) \cdot X^*(\omega) \quad (3.35)$$

e

$$\omega = 2\pi f \quad (3.36)$$

sendo que f é a frequência do sinal em Hz.

Assim, através desta técnica é possível verificar em quais frequências há maior concentração da energia do sinal.

4 METODOLOGIA

A abordagem da presente pesquisa é experimental e foi desenvolvida considerando a proposta do trabalho que é o desenvolvimento de uma metodologia para identificação de danos em redes de Distribuição de Gás Natural com base na análise de sinais de vibrações.

Para tal, na preparação do procedimento experimental, executou-se as seguintes atividades:

1. inicialmente efetuou-se a instalação dos sensores de pressão e de aceleração na rede experimental, conforme descrito na seção 5.1.1;
2. em seguida fixou-se a amostra de referência na rede experimental, através da utilização de parafusos tipo estojo;
3. sequencialmente, realizou-se a excitação da tubulação, batendo-se na mesma com um martelo, a fim de verificar se os acelerômetros instalados estavam captando as alterações nos níveis de vibração do sistema;
4. em seguida realizou-se a pressurização da rede e comparou-se a pressão indicada no manômetro do tipo *Bourdon* instalado no vaso de acumulação com as pressões medidas nos transdutores de pressão correspondentes, a fim de verificar se estes estavam funcionando adequadamente; e
5. após garantir que os sensores estavam operando normalmente, testou-se a rotina de aquisição de dados, no qual foram implementadas através do software *LABVIEW*.

Posteriormente a realização destes procedimentos preliminares, iniciou-se efetivamente os ensaios propostos. Foram efetuados dois conjuntos de ensaios, sendo o primeiro considerando o regime estacionário e o segundo correspondente ao regime transiente.

4.1 ENSAIO REGIME ESTACIONÁRIO

A realização desse conjunto de testes teve como intuito a calibração do experimento, bem como simular a situação de uma linha para um consumidor exclusivo, com variações da pressão somente em função da perda de carga e das características operacionais do sistema. Para efetivação destes testes procedeu-se da seguinte forma:

1. realizou-se a abertura parcial da válvula de bloqueio (cerca de 15% da vazão plena) presente no final da rede, correspondendo a uma vazão nominal de aproximadamente $90 \text{ m}^3/\text{h}$, a fim de proceder o escoamento do fluido;
2. em seguida, foi iniciado o registro dos dados de pressão e aceleração do sistema;
3. manteve-se tal registro por um período total de aproximadamente 60 segundos; e
4. finalmente interrompeu-se o fluxo de ar ao bloquear completamente a referida válvula;

Em seguida realizou-se a substituição da amostra de referência primeiramente pelo carretel com defeito tipo moessa e repetiu-se as etapas anteriores. Posteriormente, realizou-se a troca pela amostra com defeito tipo corrosão e finalmente para a amostra com vazamento (furo), realizando os mesmos procedimentos citados.

4.2 ENSAIO REGIME TRANSIENTE

Após a conclusão dos ensaios estacionários, realizaram-se os ensaios correspondentes ao regime transiente, no qual compreenderam os seguintes passos:

1. realizou-se a pressurização da rede;
2. iniciou-se o registro dos dados de pressão e aceleração do sistema;
3. após cerca de 30 segundos, efetuou-se a abertura parcial da válvula de bloqueio (cerca de 15% da vazão plena) presente no final da rede, a fim de proceder o

escoamento do fluido, correspondendo a uma vazão nominal de aproximadamente 90 m³/h;

4. manteve-se a referida válvula aberta por aproximadamente 90 segundos;
5. em seguida efetivou-se o fechamento total da respectiva válvula, a fim de recuperar parcialmente a pressão do sistema; e
6. após o fechamento da mesma, manteve-se o registro dos dados de pressão e aceleração por mais 20 segundos, perfazendo um tempo total de teste de 140 segundos.

O procedimento de substituição dos carretéis seguiu o descritivo apresentado para os testes em regime estacionário.

5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O presente capítulo detalha o procedimento experimental realizado, bem como o programa de ensaio e os resultados obtidos. Para tal utilizou-se a rede experimental existente nas dependências internas do LACTEC localizado nas proximidades do Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná - UFPR, em Curitiba-PR, construída por Almeida *et al.* (2014), realizando algumas modificações.

O programa de testes foi dividido em duas etapas, sendo que a primeira consistiu em realizar ensaios na tubulação íntegra (sem defeitos), a fim de definir a referência do sistema, e a segunda em medir os efeitos dos danos. Esta última, foi dividida em três sub-etapas, simulando três defeitos distintos no sistema (mossa, corrosão interna e vazamento).

Os dados de pressão e aceleração do sistema foram registrados por transdutores de pressão e acelerômetros respectivamente e transferidos para um computador com dados de interface de aquisição com base no software *LABVIEW*.

5.1 O APARATO EXPERIMENTAL

A referida rede foi construída em tubulação de aço carbono API 5L Gr. L245 soldada, com diâmetro nominal de duas polegadas, espessura de parede de 3,9 mm e extensão original aproximada de 140 m.

Para o presente trabalho seccionou-se a rede original, permanecendo assim um comprimento útil de aproximadamente 39 m. Optou-se por utilizar a referida rede em aço carbono, visto que a maior parte das redes de distribuição de gás existentes são desse material.

A tubulação em questão apresenta um trecho inicial enterrado e o restante aéreo, em função do espaço físico disponível. No trecho aparente, houve ainda a previsão de um sistema de fixação da tubulação em suportes específicos adequadamente espaçados, visando minimizar eventuais problemas oriundos de vibrações localizadas (ALMEIDA, 2013). No final da mesma existe uma válvula esfera,

pela qual provocou-se o escoamento do fluido, sendo a excitação do sistema nos testes realizados. As Figuras 5.1 e 5.2 apresentam fotos do trecho aéreo da tubulação e da válvula no final da rede, respectivamente.



Figura 5.1 – Trecho da tubulação aérea, com destaque em amarelo do carretel de testes.
(fonte: O Autor, 2015).

No terço final da rede, foram soldados dois flanges, a fim de efetuar a instalação de amostras de tubo, com diferentes características de falha. A figura 5.3 ilustra tal situação.

Por questões de segurança, o fluido de teste utilizado foi ar, no qual a alimentação foi realizada pelo sistema de ar comprimido do LACTEC, com pressão nominal de 7 bar. A pressão de teste adotada também está associada ao fato da malha de distribuição de Gás Natural para os segmentos industrial e GNV (Gás Natural Veicular) da **COMPAGAS**, empresa responsável pelo fornecimento de Gás Natural canalizado no Paraná, operar normalmente com esta pressão.

A fim de reduzir os efeitos da variação de pressão do sistema de ar comprimido, foi instalado um vaso de acumulação na entrada da tubulação experimental, conforme mostra a Figura 5.4.



Figura 5.2 – Detalhe da válvula no final da rede (fonte: O Autor, 2015).



Figura 5.3 – Detalhe da fixação das amostras de tubos (fonte: O Autor, 2015).



Figura 5.4 – Vaso de acumulação instalado (fonte: O Autor, 2015).

A Tabela 5.1 apresenta as especificações técnicas do vaso de acumulação utilizado.

Tabela 5.1 – Especificação técnica do vaso de acumulação utilizado.

Parâmetros	Dimensões
Diâmetro interno	598 mm
Espessura de parede	3,40 mm
Espessura dos tampos	4,13 mm
Altura	750 mm
Volume hidráulico	0,2 m ³

Fonte: O Autor, 2015.

A Figura 5.5 apresenta uma representação esquemática da rede experimental utilizada.

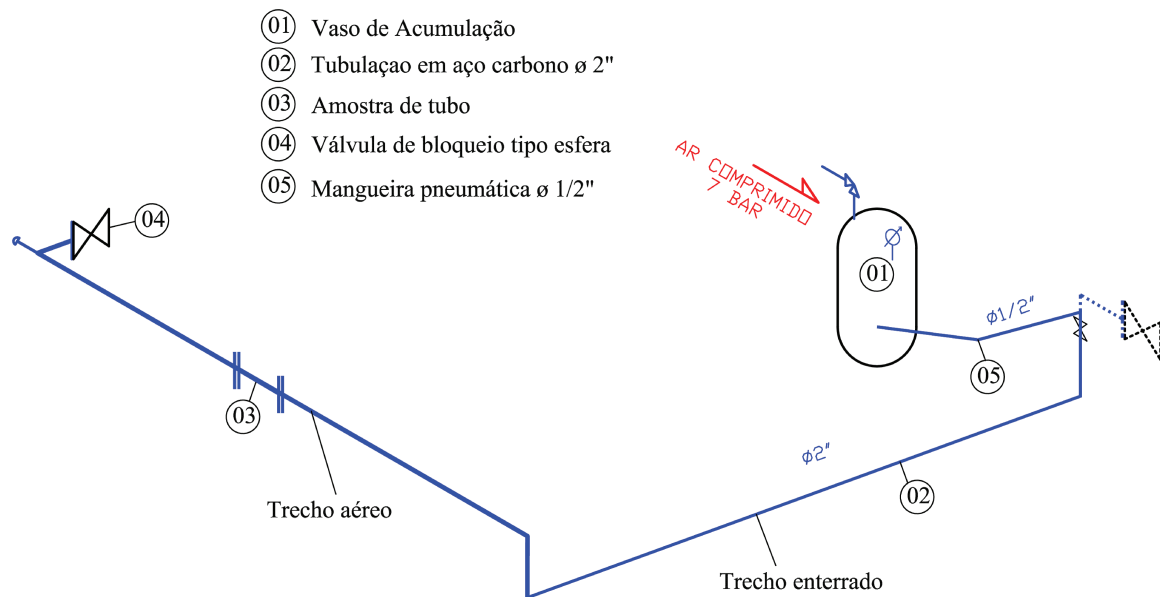


Figura 5.5 – Croqui esquemático da rede experimental (fonte: O Autor, 2015).

5.1.1 Sensores

Durante os ensaios, foram utilizados dois tipos de sensores. Para monitoramento da pressão, utilizaram-se transdutores de pressão do tipo piezelétrico. Já para medição dos sinais de aceleração, foram usados acelerômetros do tipo ICP. Tais sensores foram posicionados conforme é mostrado na Figura 5.6.

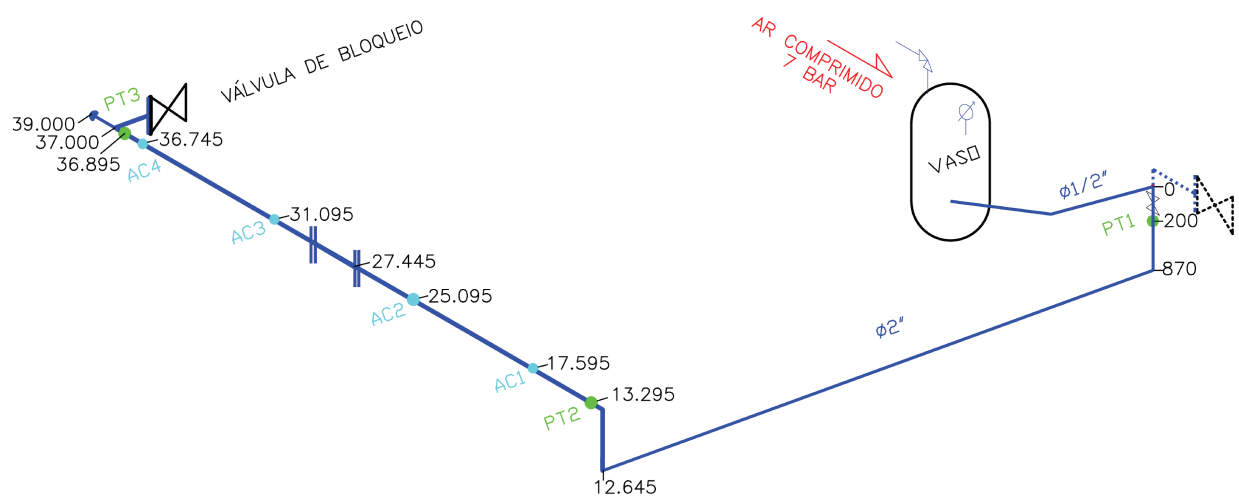


Figura 5.6 – Posicionamento dos sensores – medidas em mm. (fonte: O autor, 2015).

Na sequência são detalhadas as especificações técnicas dos referidos sensores.

5.1.1.1 Transdutores de Pressão

Para registro da pressão durante os ensaios propostos, utilizou-se um arranjo de três transdutores de pressão do tipo piezelétrico, da marca TER-PRESS, modelo TP ST-18 com escala de medição de 0-40 bar, cujas principais características estão detalhas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Especificação técnica dos transdutores de pressão utilizados.

Parâmetros	Valores
Diâmetro	1/2 polegada
Faixa de medição	0-40 bar
Precisão	0,25% fundo de escala
Sensibilidade	0,27 mA/bar
Resolução	< 0,01% fundo de escala
Sinal de saída	4 a 20 mA

Fonte: ALMEIDA, 2013.

Tais dispositivos realizam a medição de pressão mediante as deformações sofridas em seus cristais, com sua respectiva conversão em sinal elétrico. A quantidade elétrica produzida é proporcional à pressão aplicada, caracterizando uma relação linear entre os parâmetros envolvidos (ALMEIDA, 2013).

Os transdutores foram instalados ao longo da rede experimental em pontos determinados, sendo o primeiro próximo a entrada de ar comprimido (TP 1), o segundo na transição entre o trecho aéreo e enterrado (TP2) e o último junto a válvula no final da rede (TP3), conforme ilustrado na Figura 5.6.

Para instalação dos referidos sensores, foi efetuado um furo na tubulação e soldada uma luva roscada Ø1/2" BSP, conforme apresentado na Figura 4.7.



Figura 5.7 – Detalhe da instalação do transdutor de pressão (fonte: O autor, 2015).

A transmissão dos sinais gerados pelos transdutores até a placa de leitura correspondente foi realizada utilizando sinais que variam de 4 a 20 mA. Essa faixa corresponde a um padrão industrial de medição, garantindo a integridade do sinal transmitido mesmo para elevadas distâncias, dado o fato da corrente elétrica manter-se constante e proporcional à variável medida, ou mais especificamente, a pressão. (ALMEIDA, 2013).

Os elementos de transmissão utilizados correspondem a cabos coaxiais do tipo RG-58/50Ω.

5.1.1.2 Acelerômetros

Para medição dos sinais de acelerações do sistema, utilizou-se quatro acelerômetros do tipo ICP (*Integrated Circuit Piezoelectric Sensor*) da marca PCB PIEZOTRONICS, cujas principais características estão apresentadas na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Especificação técnica dos acelerômetros utilizados.

Item	Modelo	Nº Série	Range frequência (Hz)	Sensibilidade (mV/g)
AC1	333B50	23311	0,5 – 3.000	1.062
AC2	352C03	44859	0,5 – 10.000	10,08
AC3	352C03	45758	0,5 – 10.000	9,89
AC4	338C04	4808	0,5 – 10.000	100,2

Fonte: O Autor, 2015.

Estes sensores possuem um microprocessador integrado que amplifica o sinal de tensão, ou seja, converte o sinal de carga de alta impedância, que é gerado pelo elemento piezelétrico em um sinal de tensão de baixa impedância que pode ser prontamente transmitido através de cabos ordinários de duas vias, ou cabos coaxiais, para uma fonte e analisador de sinais correspondentes. Dessa, maneira não há necessidade de utilizar um amplificador de carga externo, e pode-se utilizar um cabo de baixo custo (DOEBELIN, 1990).

Tais dispositivos foram instalados ao longo da linha, em posições específicas, sendo dois sensores alocados a montante do trecho de interesse (AC 1 e 2) e os demais (AC 3 e 4) posicionados a jusante do mesmo, conforme apresentado na Figura 4.6.

Tais sensores foram instalados utilizando adesivo de cianoacrilato de baixa viscosidade e cura rápida. Nos pontos de fixação dos acelerômetros, foi removido o revestimento em polietileno da tubulação, visto que o mesmo apresentou um elevado fator de amortecimento, conforme testes preliminares realizados. Os sensores utilizados apresentavam base plana, no entanto foram utilizadas bases com diâmetros pequenos comparado ao diâmetro do tubo, a fim de garantir que toda a face dos mesmos permanecessem em contato com a superfície do tubo, evitando assim erros na medição. A Figura 5.8 apresenta detalhes da fixação dos referidos sensores.



Figura 5.8 – Detalhe da fixação dos acelerômetros (fonte: O Autor, 2015).

A comunicação entre os sensores de vibração e o sistema de aquisição dos dados foi realizada através de cabos coaxiais.

5.1.2 Amostras de tubos

Durante a realização dos ensaios, foram consideradas quatro amostras de tubos (“carretéis”), com aproximadamente 1 m de comprimento. A primeira trata-se de um trecho íntegro, ou seja sem defeitos, que foi utilizado como parâmetro de referência do sistema.

Nas demais amostras, introduziram-se alguns defeitos, que são os mais comuns de ocorrerem em redes de Distribuição de Gás Natural.

No carretel nº 2, foi realizada uma deformação plástica no tubo, através do aquecimento e martelamento do mesmo, a fim de simular uma moessa, conforme pode-se observar na Figura 5.9



Figura 5.9 – Detalhe do defeito tipo mocha introduzido na segunda amostra (fonte: O Autor, 2015).

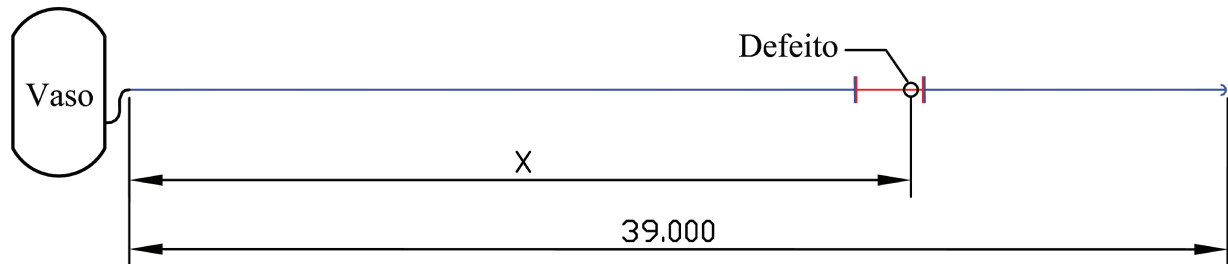
Na amostra nº 3, efetivou-se a redução da espessura da tubulação, através de uma lima rotativa, a fim de simular os efeitos de uma corrosão interna no duto. Assim obteve-se uma espessura mínima de cerca de 2,5 mm.

Na última amostra, executou-se um furo de Ø1,6 mm, a fim de introduzir uma falha que representa um vazamento na rede, conforme pode-se observar na Figura 5.10.



Figura 5.10 – Detalhe do furo realizado na amostra de nº 4 (fonte: O Autor, 2015).

A Figura 5.11 apresenta um croqui esquemático com a posição linearizada de cada um dos defeitos introduzidos na rede, utilizando como referência inicial ponto de injeção de ar comprimido na rede.



Carretel	Tipo de Defeito	X (mm)
1	Mossa	28.315
2	Corrosão interna	28.325
3	Vazamento	28.165

Figura 5.11 – Posição linearizada dos defeitos (fonte: O Autor, 2015).

5.1.3 Sistema de aquisição de dados

Utilizou-se sistema de aquisição da *National Instruments*, composto por: um módulo *CompactDAQ* com oito slots (modelo NI CDAQ-9188), com comunicação via *Ethernet*, uma placa de aquisição com quatro canais (modelo NI 9234) utilizada para leitura dos sinais de tensão dos acelerômetros e outra placa também com quatro canais (modelo NI 9203) para leitura dos sinais de corrente dos transdutores de pressão. Para alimentação dos sensores de pressão, utilizou-se uma fonte de alimentação com tensão de 10 V CA.

Tais dispositivos de hardware são compatíveis com o software *LABVIEW*, no qual as rotinas de aquisição de dados foram implementadas. A aquisição dos dados foi realizada com base no referido software, considerando sete canais de medição, sendo que três ficaram vinculados aos sensores de pressão e os outros quatro aos acelerômetros.

A Figura 5.12 ilustra uma foto do sistema de aquisição utilizado.



Figura 5.12 – Sistema de aquisição da *National Instruments* utilizado nos ensaios (fonte: O Autor, 2015).

Para os dados de pressão utilizou-se uma taxa de aquisição de 4.000 Hz.

Para medição dos sinais de aceleração aplicou-se uma taxa de aquisição de 20.000 Hz, visto que em testes preliminares verificou-se que o sistema apresentava frequências naturais na ordem de 9.500 Hz, e segundo o Teorema de Nyquist, a taxa de amostragem deve ser superior ao dobro da maior frequência de interesse.

Foi aplicado um filtro digital de segunda ordem do tipo *Butterworth*, com frequência de passa alta de 10 Hz, visto que, de acordo com Singh *et al.* (2012), considerando a relação entre frequência e tempo de resposta, tais filtros apresentam uma amplitude razoavelmente boa e comportamento transiente, sendo a melhor escolha para filtragem de sinais de vibrações.

5.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Realizaram-se dois conjuntos de ensaios distintos, com premissas pré-definidas, com as quatro amostras de tubos detalhadas anteriormente. Os descritivos destes testes, bem como os resultados preliminares obtidos estão descritos na sequência.

5.2.1 Testes Regime Estacionário

A realização desse conjunto de testes teve como intuito a calibração do experimento, bem como simular a situação de uma linha para um consumidor exclusivo, com variações da pressão somente em função da perda de carga e das características operacionais do sistema.

Dessa forma, manteve-se a rede pressurizada com aproximadamente 7 bar, em seguida realizou a abertura parcial da válvula (cerca de 15% da vazão plena) existente no final da mesma, correspondendo a uma vazão nominal de aproximadamente 90 m³/h, e após a estabilização da pressão iniciou-se a aquisição dos dados de pressão e aceleração do sistema, no qual efetivou-se durante um determinado período de tempo. O procedimento supracitado foi realizado inicialmente para a amostra de referência e repetido para as outras três que apresentavam defeitos.

Durante tais ensaios, não efetuou-se a abertura total da referida válvula, visto que os compressores do sistema de ar comprimido utilizado não conseguiam suprir a vazão total necessária nesta situação.

5.2.1.1 Dados experimentais

Nesta seção, são apresentados os registros de pressão e aceleração ao longo do tempo, aqusitados para as quatro amostras, durante o conjunto de testes no regime estacionário.

5.2.1.1.1 Dados de pressão

As Figuras 5.13 a 5.16 apresentam o registro da pressão do sistema durante todo o período de ensaio, medidos pelos três transdutores de pressão instalados. O canal 1 refere-se ao sensor instalado na alimentação do sistema (TP1), já o canal 2 ao transdutor alocado na transição entre o trecho aéreo e enterrado (TP2) e o canal 3 correspondente ao sensor posicionado próximo a válvula no final da rede (TP3).

A Figura 5.13 mostra o gráfico de pressão do sistema ao longo do tempo, para os ensaios em regime estacionário realizada para a amostra de referência (sem defeito).

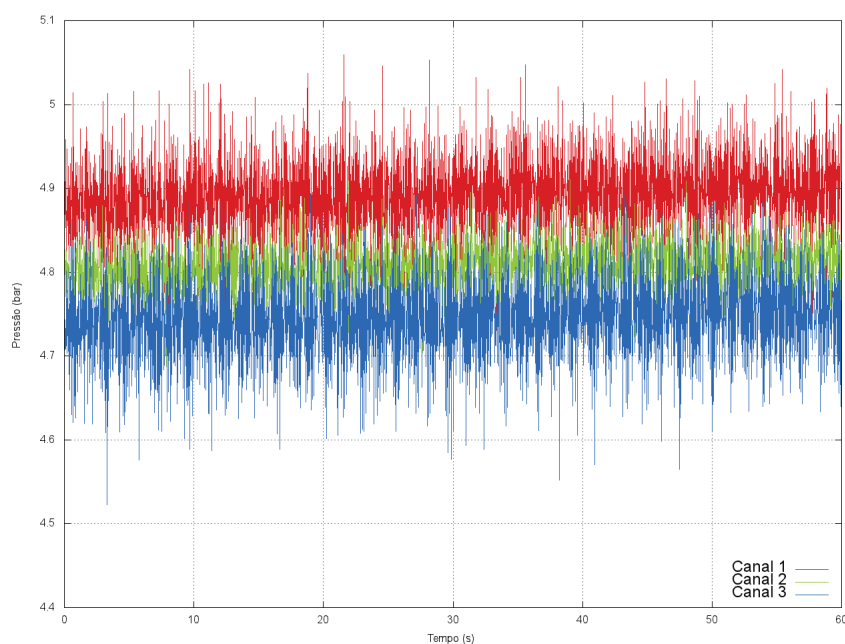


Figura 5.13 – Dados de pressão para o ensaio estacionário para a amostra de referência (rede íntegra) (fonte: O autor, 2015).

Já as Figuras 5.14, 5.15 e 5.16 apresentam o perfil de pressão do sistema para os ensaios realizados com as amostras com danos.

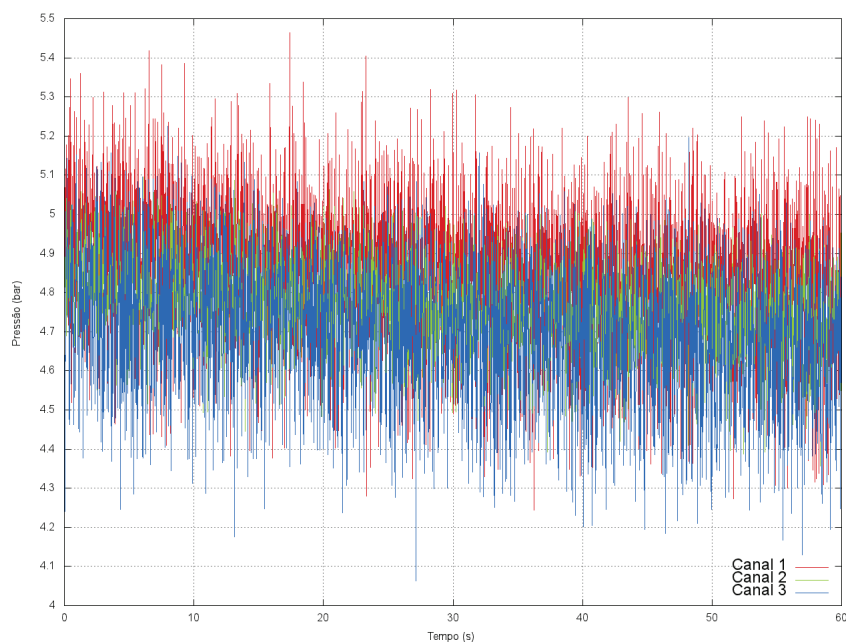


Figura 5.14 – Dados de pressão para o ensaio estacionário para amostra com defeito tipo *mossa* (fonte: O autor, 2015).

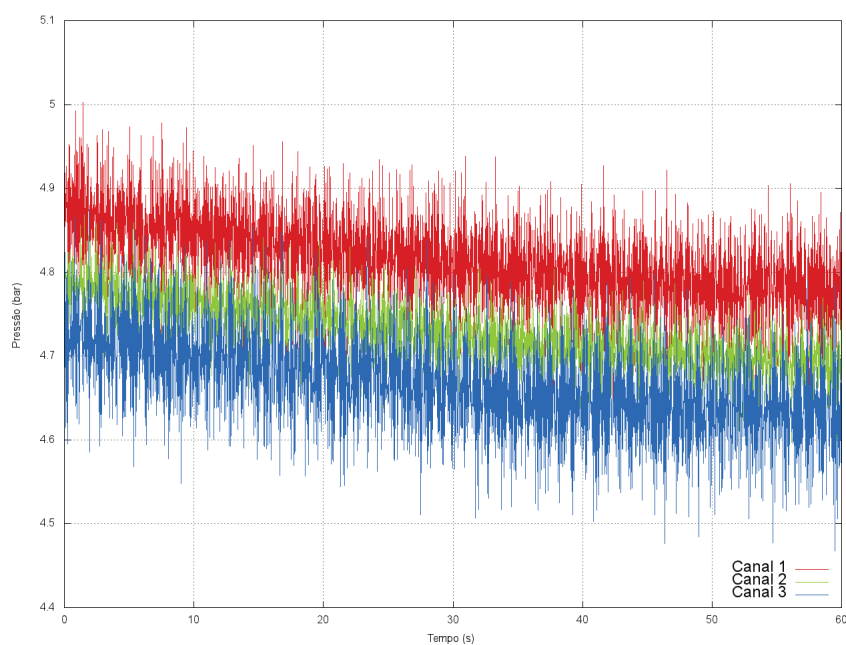


Figura 5.15 – Dados de pressão para o ensaio estacionário para amostra com defeito tipo *corrosão interna* (fonte: O autor, 2015).

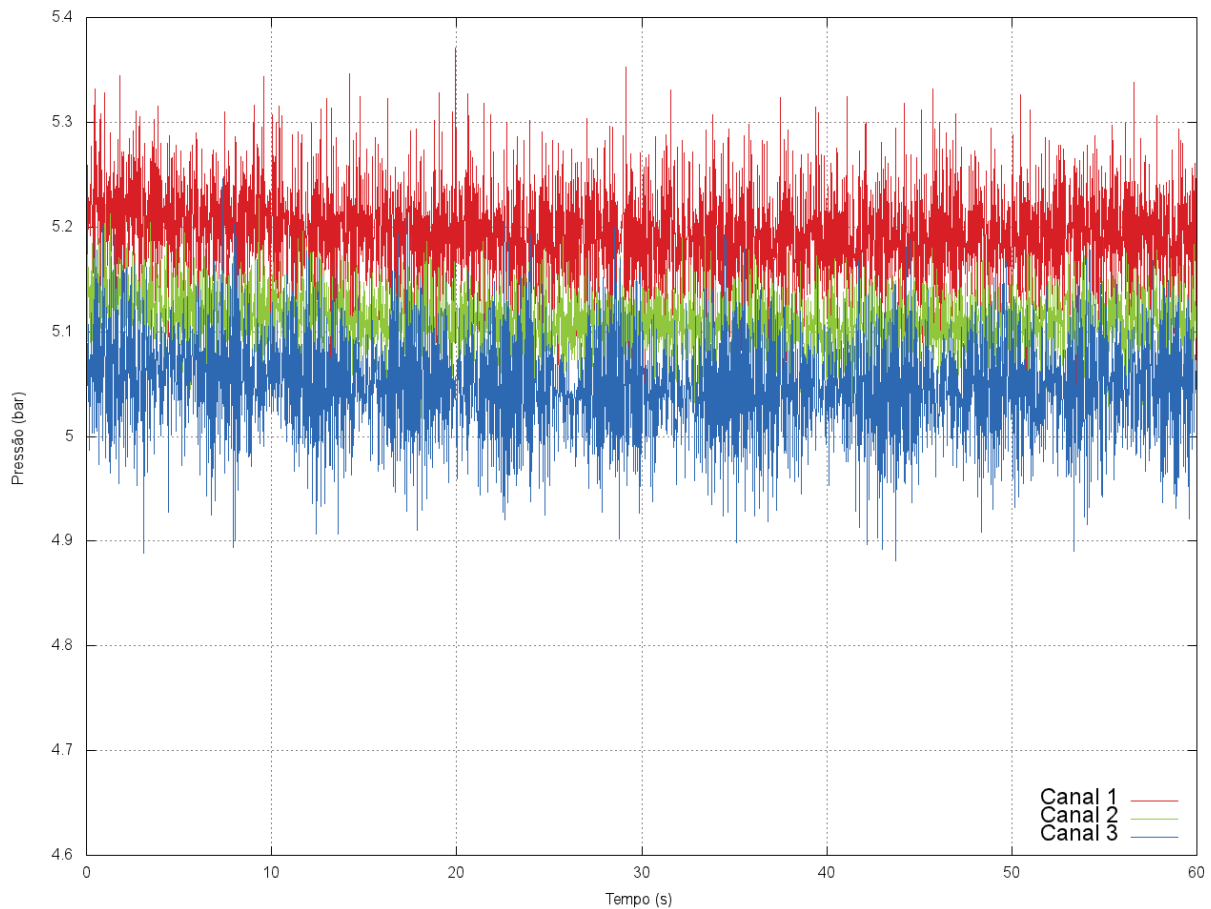


Figura 5.16 – Dados de pressão para o ensaio estacionário para amostra com furo (vazamento) (fonte: O autor, 2015).

Analisando as Figuras 5.13 a 5.16, observa-se que a pressão manteve praticamente constante durante todo o ensaio, havendo uma pequena redução nos valores medidos pelo sensor 3, em relação aos dois primeiros, no qual refere-se a perda de carga da tubulação.

5.2.1.1.2 Dados de aceleração

As Figuras 5.17 a 5.20 apresentam os sinais de aceleração no domínio do tempo obtidos durante os ensaios estacionários.

A Figura 5.17 apresenta os dados medidos, pelos quatro acelerômetros instalados, para a amostra de referência.

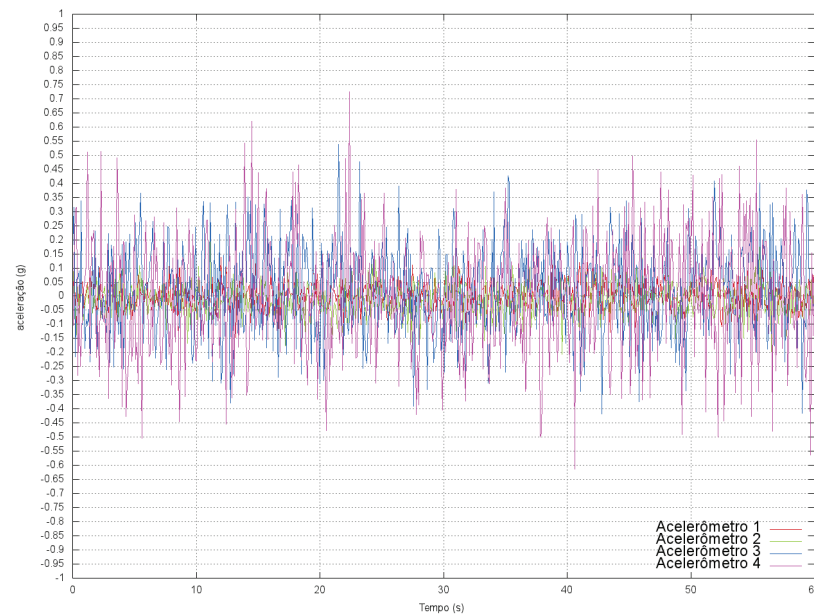


Figura 5.17 – Dados de aceleração no domínio do tempo para o ensaio estacionário para amostra de referência (fonte: O autor, 2015).

As Figuras 5.18 a 5.20 apresentam os dados de aceleração no tempo para as amostras com defeito.

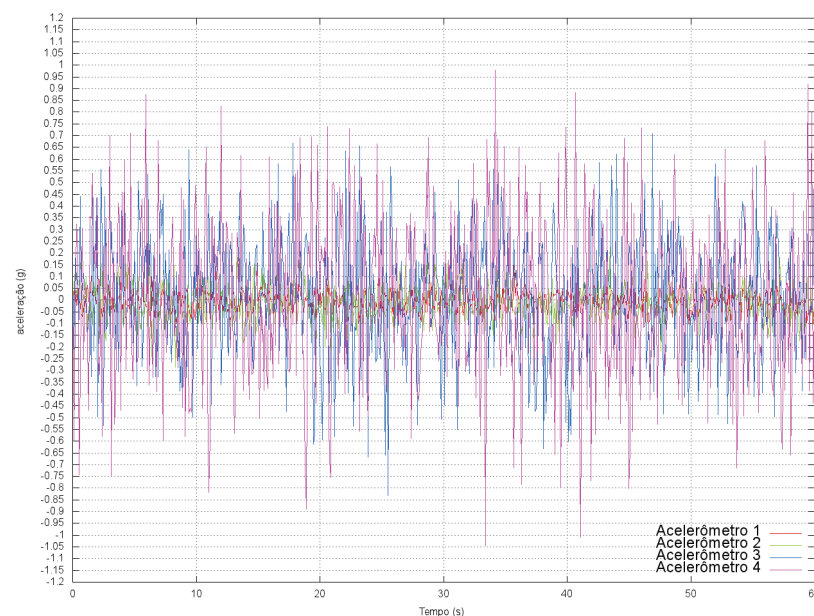


Figura 5.18 – Dados de aceleração no domínio do tempo para o ensaio estacionário para amostra com defeito tipo moessa (fonte: O autor, 2015).

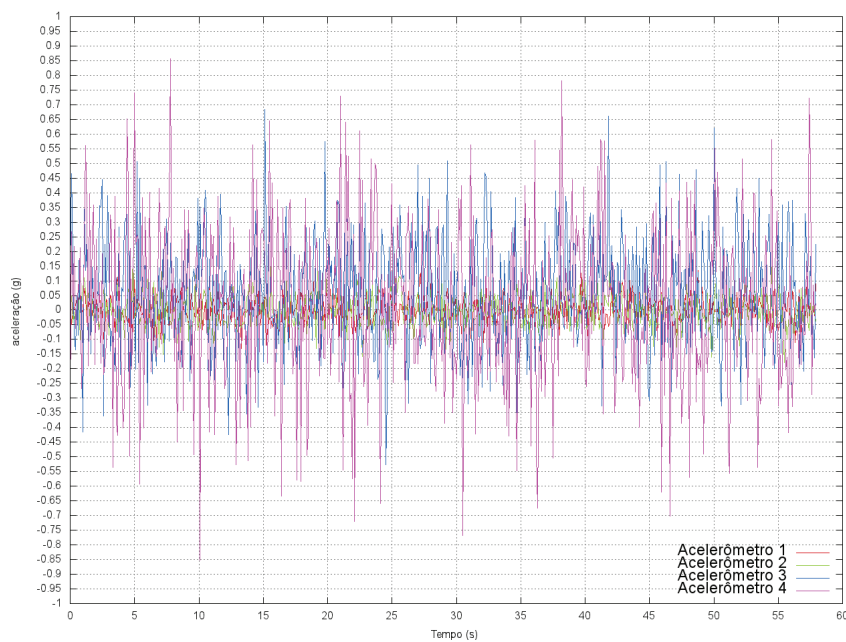


Figura 5.19 – Dados de aceleração no domínio do tempo para o ensaio estacionário para amostra com defeito tipo corrosão interna (fonte: O autor, 2015).

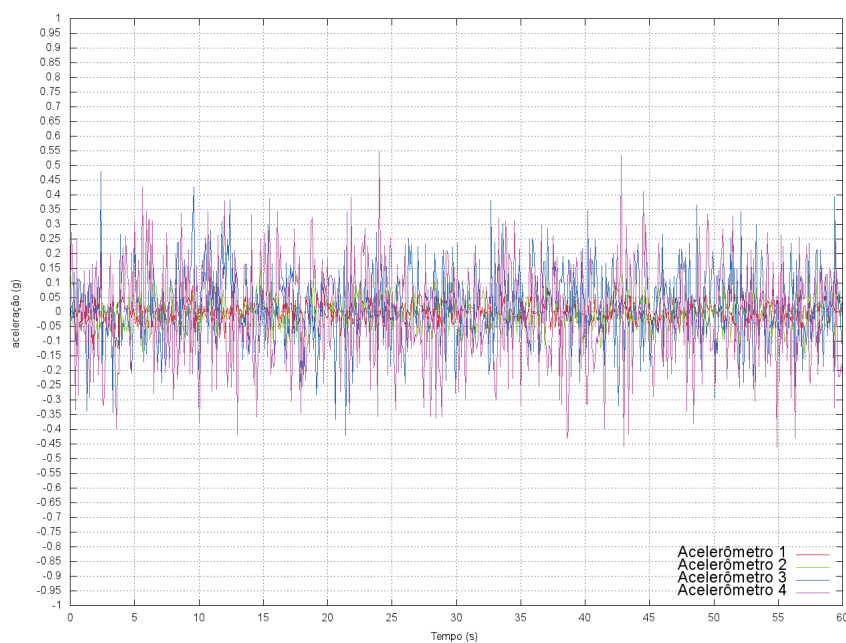


Figura 5.20 – Dados de aceleração no domínio do tempo para o ensaio estacionário para amostra com furo (vazamento) (fonte: O autor, 2015).

Analisando a Figura 5.18, observa-se que os sensores de número 04 e 03, apresentam as maiores amplitudes, respectivamente. Isto se deve, sobretudo por estes estarem mais próximos da válvula de final de linha, registrando assim maiores níveis de aceleração, em razão destes pontos apresentarem maiores níveis de vibração por conta do fluxo de ar.

Para as amostras danificadas, verifica-se que as maiores amplitudes também foram medidas pelos sensores alocados a jusante do carretel. Pode-se observar ainda, que as acelerações registradas para as amostras com defeito são maiores que para a amostra íntegra, conforme pode-se notar de maneira mais clara através das Figuras 5.21 e 5.22.

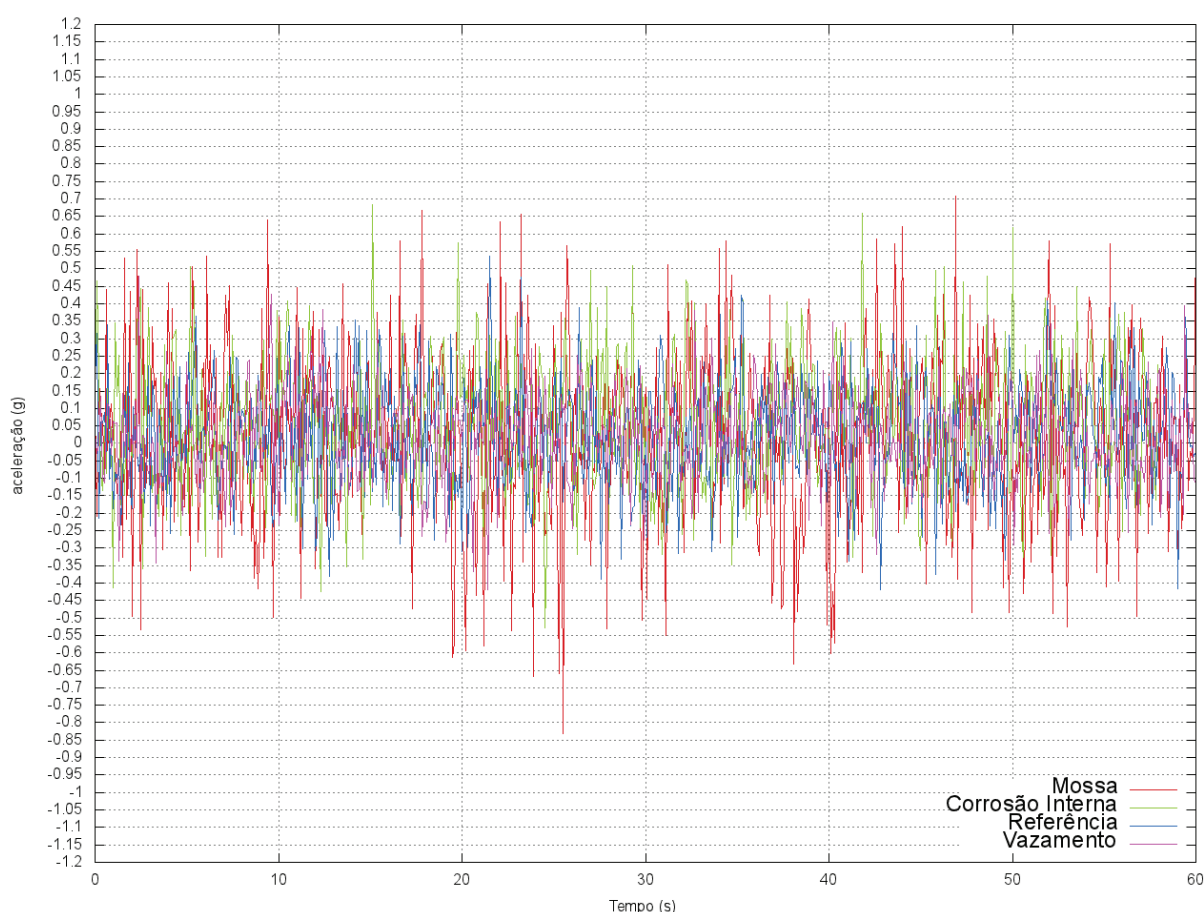


Figura 5.21 – Sinais de aceleração medidos pelo acelerômetro de número 3 para as quatro amostras (fonte: O autor, 2015).

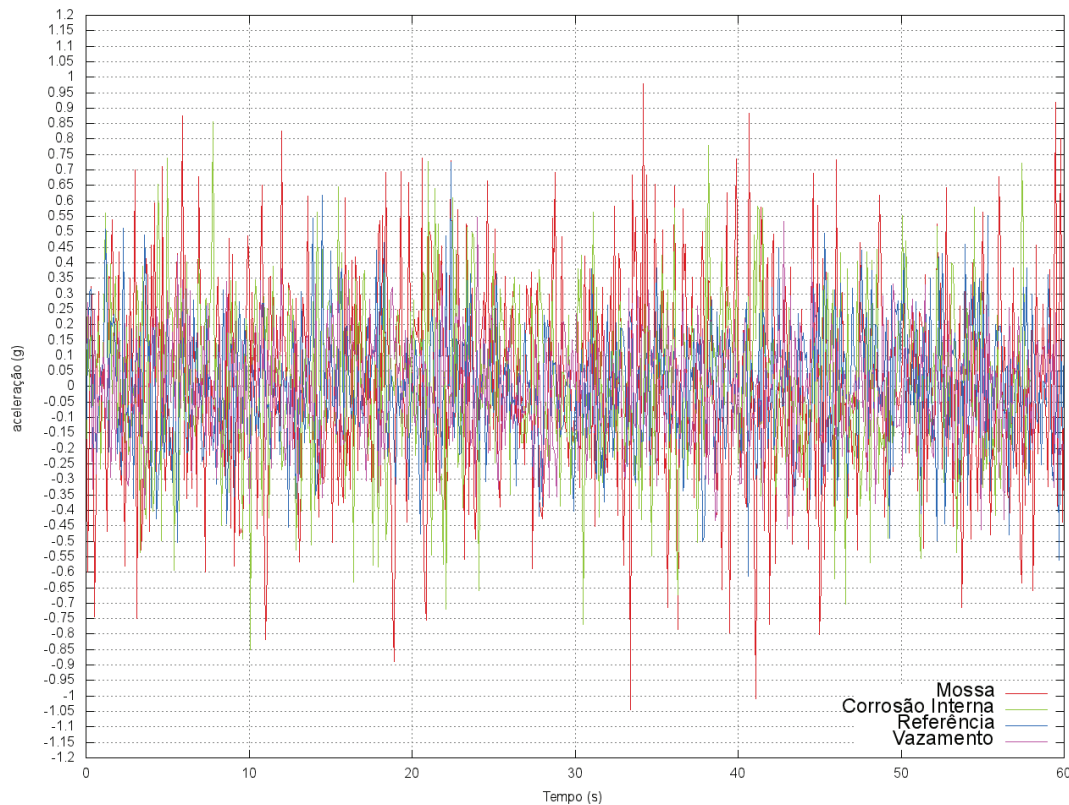


Figura 5.22 – Sinais de aceleração registrados pelo acelerômetro de número 4 para as quatro amostras (fonte: O autor, 2015).

5.2.2 Testes Regime Transiente

Nesta etapa, simulou-se variação considerável na pressão do sistema, com o objetivo de reproduzir o comportamento de uma rede de distribuição.

Inicialmente a rede foi pressurizada com aproximadamente 7 bar. Após um período de aproximadamente 30 segundos, efetuou-se a abertura parcial (aproximadamente 15% da vazão plena) da válvula, correspondendo a uma vazão nominal de aproximadamente 90 m³/h, durante cerca de 90 segundos e por fim fechou-se a referida válvula, mantendo-se o registro da pressão por mais 20 segundos, a fim de recuperar um pouco a pressão do sistema, perfazendo um tempo total de 140 segundos. O procedimento supracitado foi realizado inicialmente para a amostra de referência e repetido para as outras três que apresentavam defeitos.

5.2.2.1 Dados experimentais

Nesta seção, são apresentados os dados de pressão e aceleração medidos para as quatro amostras, durante os ensaios transitórios.

5.2.2.1.1 Dados de pressão

As Figuras 5.23 a 5.26, apresentam o registro da pressão do sistema durante todo o período de ensaio, medidos pelos três transdutores de pressão instalados.

A Figura 5.23 mostra o gráfico de pressão do sistema ao longo do tempo, para a segunda bateria de testes realizada para a amostra de referência (sem defeito).

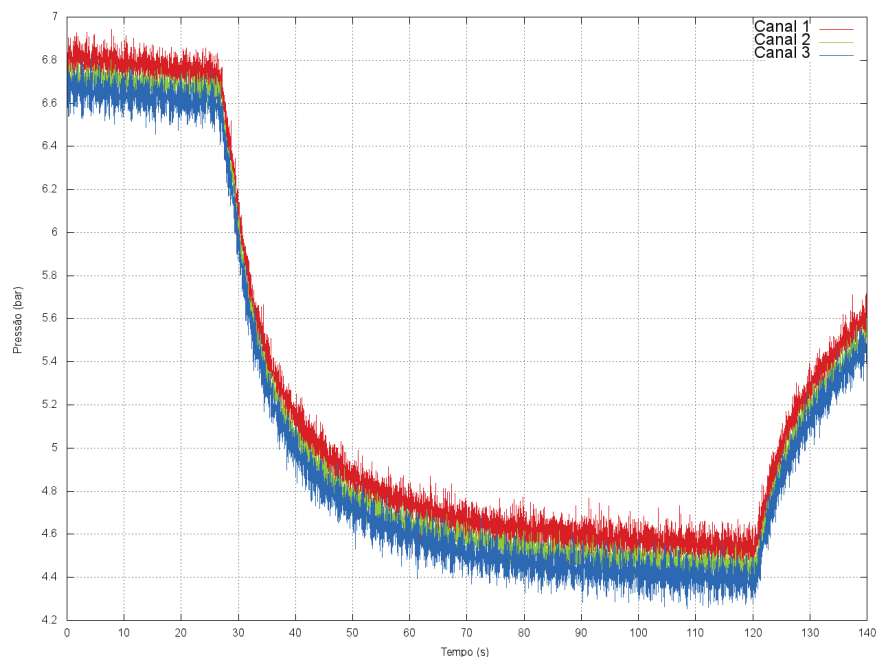


Figura 5.23 – Dados de pressão para o ensaio transitiente para amostra de referência (fonte: O autor, 2015).

As Figuras 5.24 a 5.26 apresentam os perfis de pressão para a referida sequência de testes, para as amostras com danos.

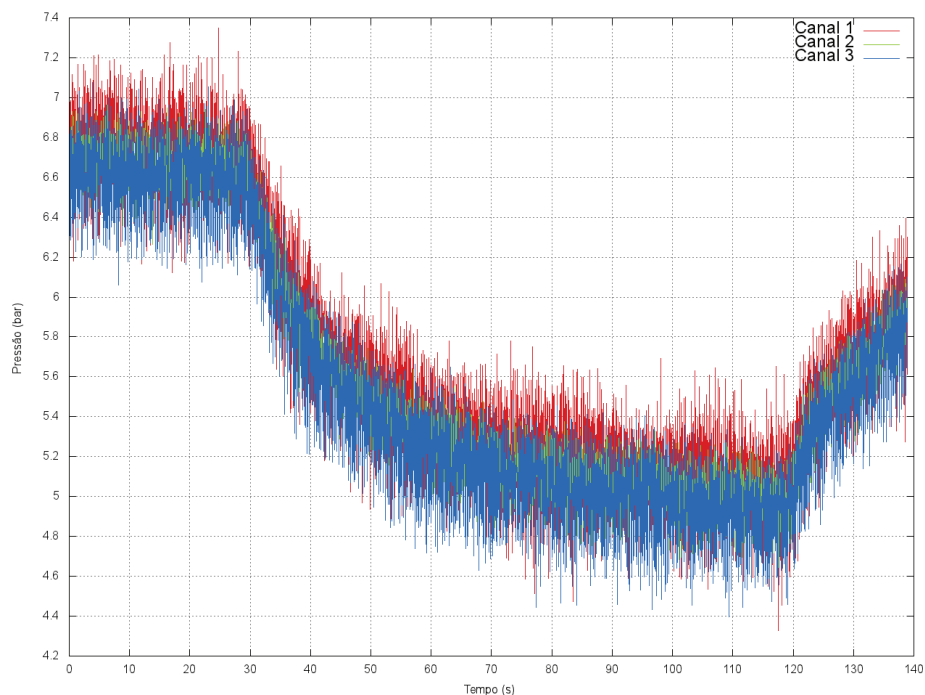


Figura 5.24 – Dados de pressão para o ensaio transiente para amostra com defeito tipo moessa (fonte: O autor, 2015).

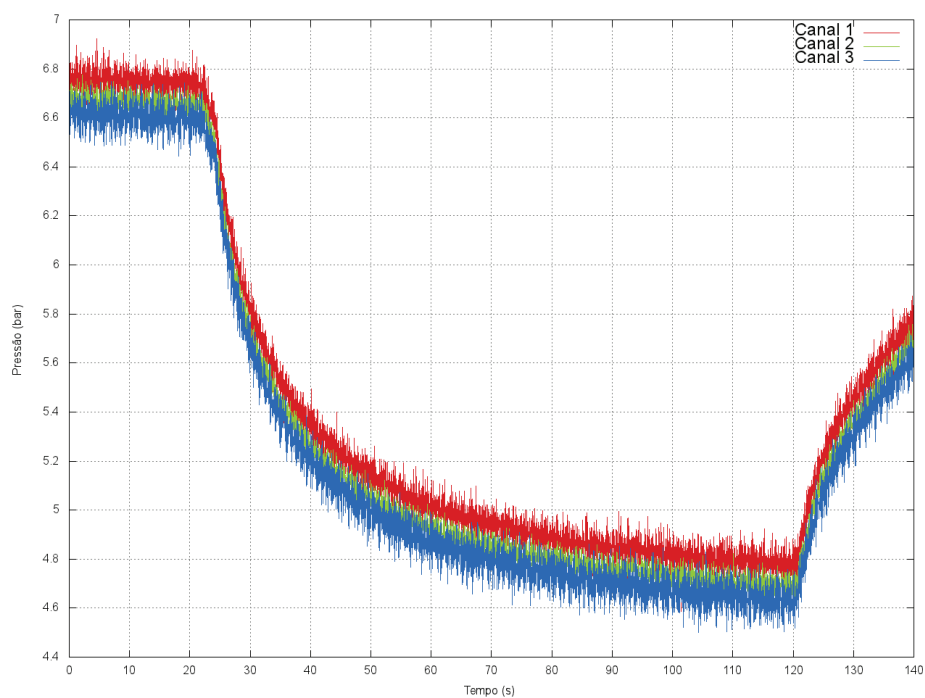


Figura 5.25 – Dados de pressão para o ensaio transiente para amostra com defeito tipo corrosão interna (fonte: O autor, 2015).

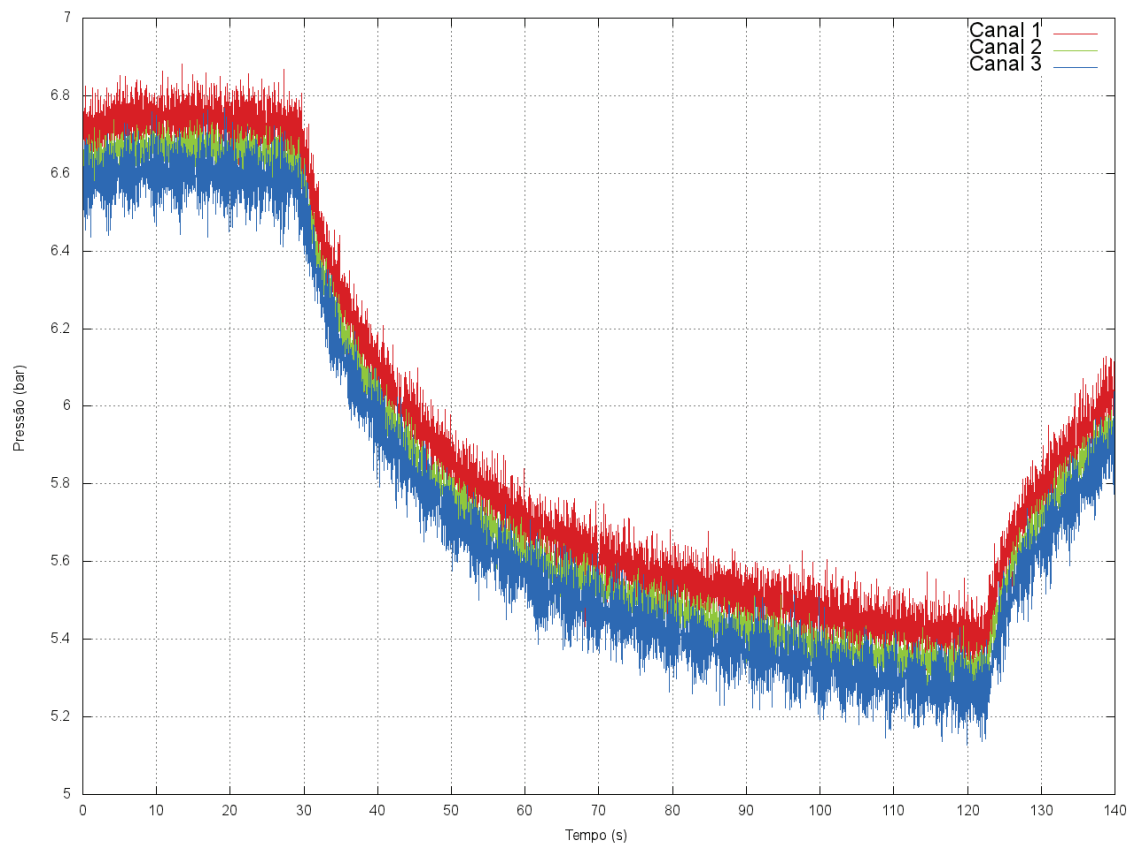


Figura 5.26 – Dados de pressão para o ensaio transiente para amostra com furo (vazamento)
(fonte: O autor, 2015).

5.2.2.1.2 Dados de aceleração

As Figuras 5.27 a 5.30 apresentam os sinais de aceleração no domínio do tempo obtidos durante os ensaios no regime transitório.

A Figura 5.27 apresenta os dados medidos, pelos quatro acelerômetros instalados, para a amostra de referência

As Figuras 5.28 a 5.30 apresentam os dados de aceleração no tempo para as amostras com defeito.

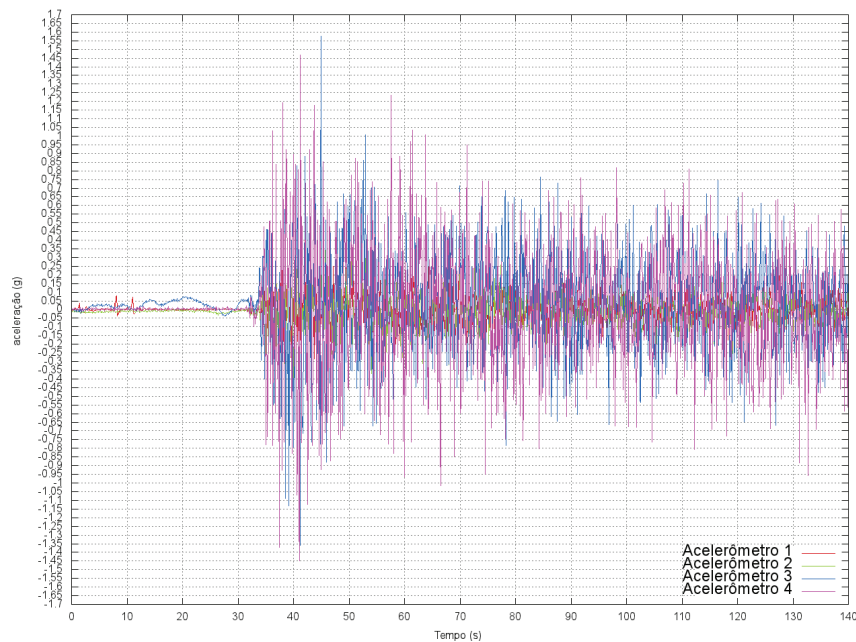


Figura 5.27 – Dados de aceleração no domínio do tempo para o ensaio transiente para amostra de referência (fonte: O autor, 2015).

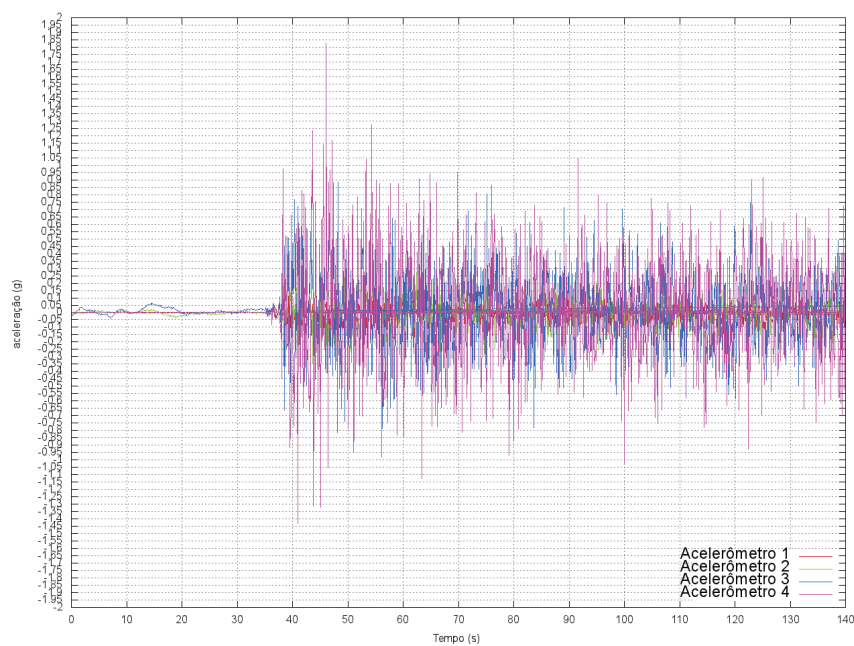


Figura 5.28 – Dados de aceleração no domínio do tempo para o ensaio transiente para amostra com defeito tipo moessa (fonte: O autor, 2015).



Figura 5.29 – Dados de aceleração no domínio do tempo para o ensaio transiente para amostra com defeito tipo corrosão interna (fonte: O autor, 2015).

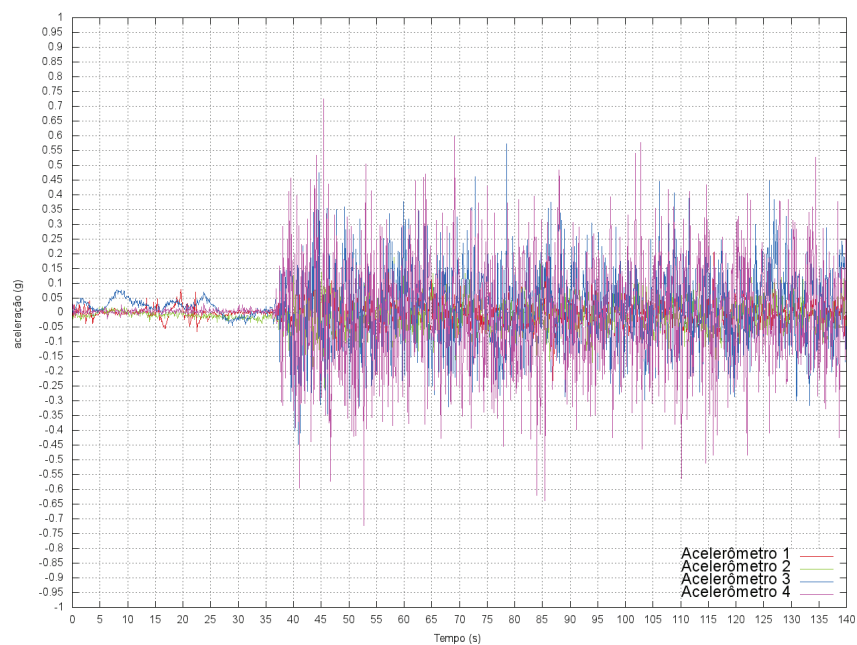


Figura 5.30 – Dados de aceleração no domínio do tempo para o ensaio transiente para amostra com furo (vazamento) (fonte: O autor, 2015).

Analisando as Figuras 5.27 a 5.30, observa-se que para o período inicial dos testes, em que a válvula permaneceu fechada, as amplitudes medidas são bem baixas, no qual devem estar relacionadas ao ruído externo, conforme descrito na seção 6.1.

Para a amostra de referência (Figura 5.27), nota-se que as maiores acelerações foram medidas pelos acelerômetros 03 e 04. Tal situação se deve, por estes sensores estarem posicionados mais próximos da válvula de final de linha, registrando maiores níveis de vibração, em razão do fluxo de ar.

Já, para as amostras danificadas (Figuras 5.28 a 5.30), verifica-se que as maiores amplitudes também foram registradas pelos sensores alocados à jusante dos defeitos. Observa-se ainda, que o defeito tipo moessa apresentou as maiores amplitudes, seguido pelos defeitos tipo corrosão interna e vazamento (furo), respectivamente.

6 RESULTADOS

Os dados experimentais obtidos no domínio do tempo e apresentados na seção 5.2 foram amplamente processados. Para tal utilizou-se algumas técnicas, dentre as quais se destaca: Método da Transformada de *Wavelet*, Método do *Bispectrum*, Curtose e Matemática Morfológica.

6.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Em relação a prática experimental é necessário fazer algumas considerações em relação a importantes aspectos dos ensaios, os quais podem influenciar os resultados:

1. RUÍDO EXTERNO: Em virtude da rede experimental estar localizada próximo a uma via com fluxo intenso de veículos, foi adicionado ao sistema um ruído externo promovido pela movimentação dos mesmos. No entanto, tal situação não teve influência nas medições realizadas, visto que esteve presente em todos os ensaios, tanto para a amostra de referência quanto para as danificadas.

2. ACIONAMENTO DA VÁLVULA: Em virtude do acionamento da válvula de bloqueio no final da linha ter sido realizado manualmente, não foi possível obter exatamente mesmo perfil de pressão para todas as amostras ensaiadas, ocorrendo pequenas variações nos sinais medidos.

6.2 BISPECTRUM

Em um primeiro momento analisou-se os sinais no domínio da frequência e concluiu-se uma grande complexidade no mesmo. Assim, utilizou-se o *Bispectrum* para identificar as alterações nos sinais.

Primeiramente aplicou-se tal técnica para tratar os sinais de pressão. A Figura 6.1 (a) mostra o sinal de pressão para a amostra sem defeitos. Já, as Figuras 6.1

(b), 6.1 (c) e 6.1 (d) mostram os sinais de pressão para os carretéis com defeitos do tipo moossa, corrosão e furo (vazamento), respectivamente. Essas figuras referem-se ao sinal de pressão medido pelo transdutor de pressão nº 1 (TP1) para o transiente.

As Figuras 6.2 (a), 6.2 (b), 6.2 (c) e 5.2 (d) mostram os mesmos sinais que as figuras anteriores, também para o teste transiente, medidos pelo sensor nº 2 (TP2).

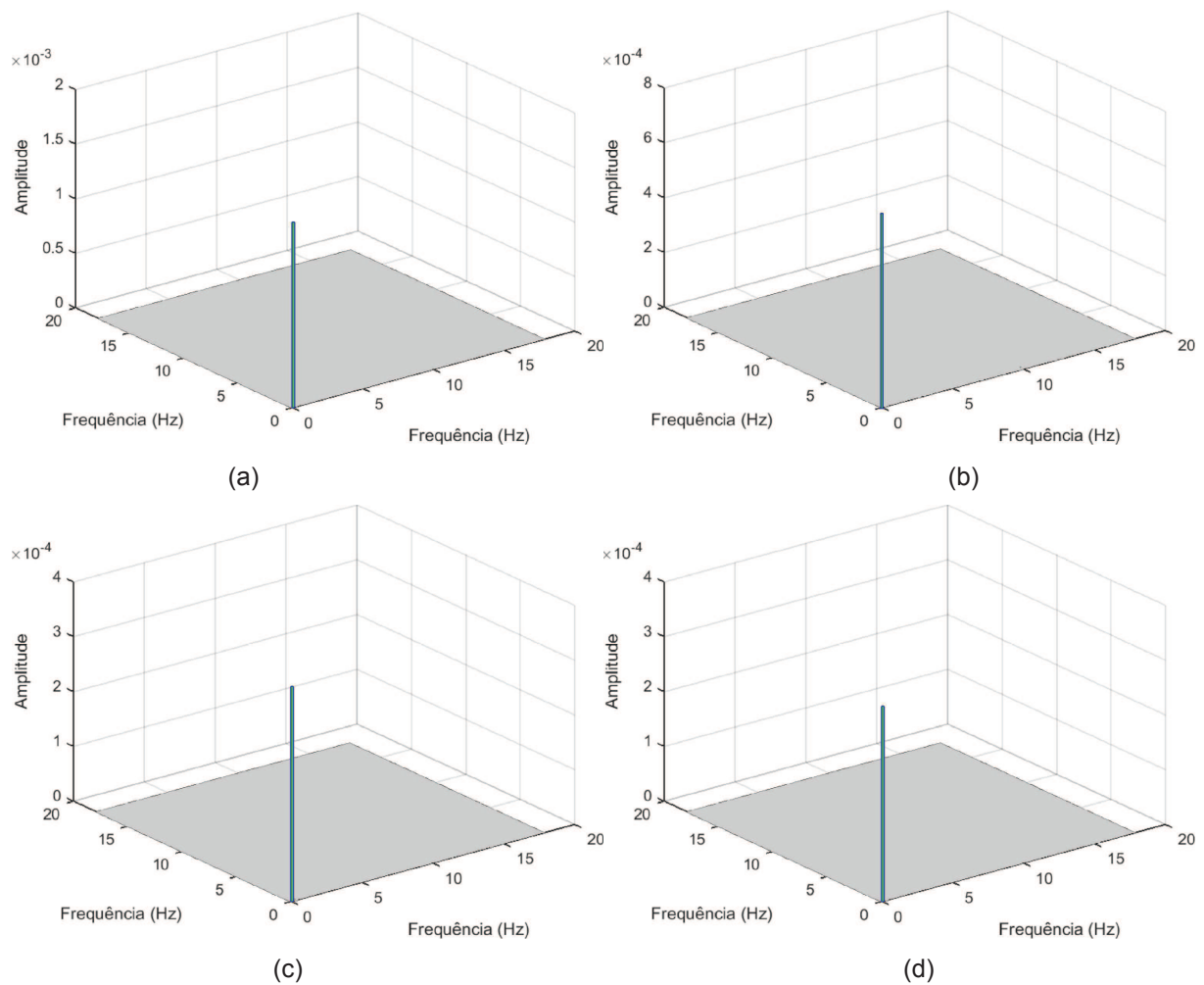


Figura 6.1 – Curvas de *Bispectrum* para sinais de pressão (TP1) – ensaio transiente (fonte: O Autor, 2015).

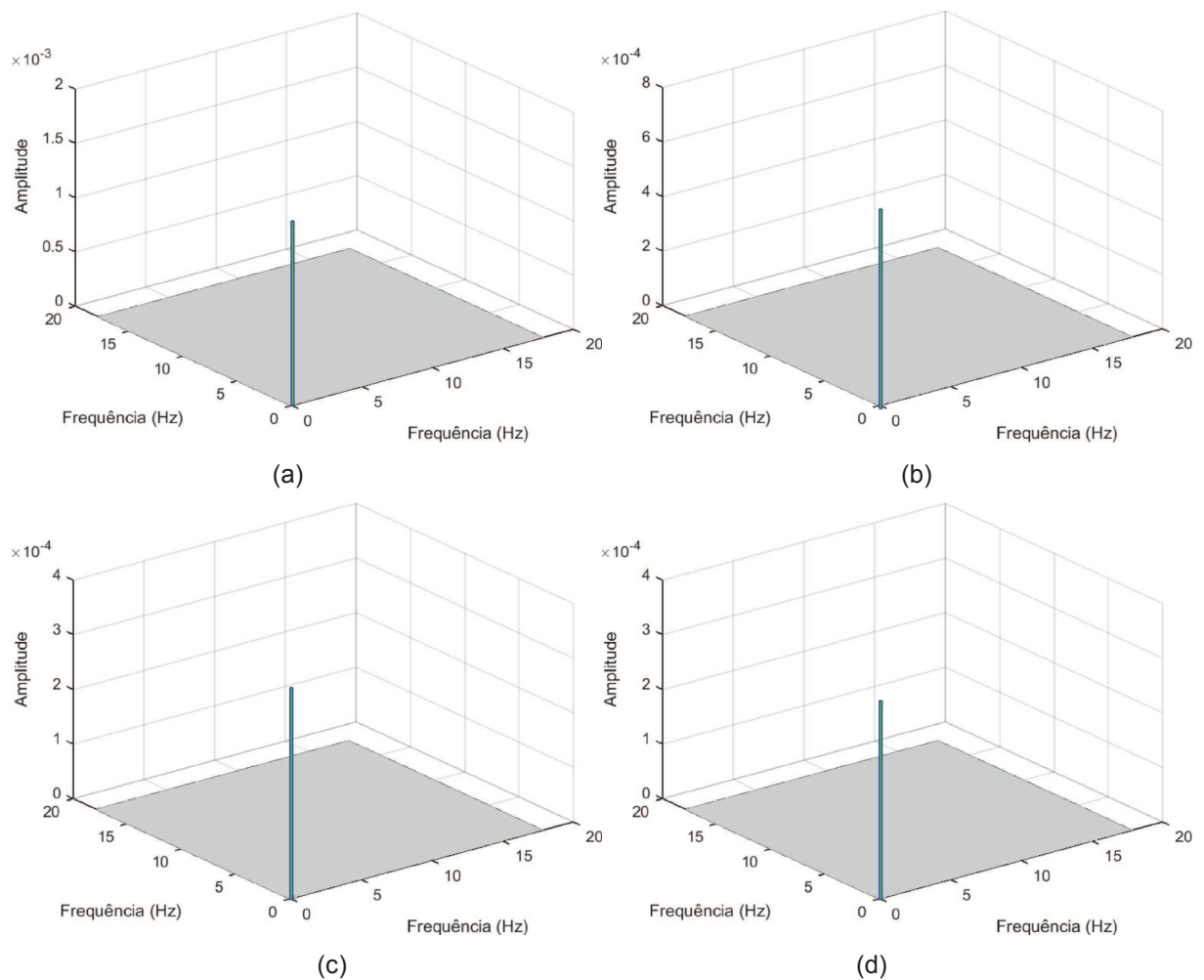


Figura 6.2 – Curvas de *Bispectrum* para sinais de pressão (TP2) – ensaio transiente (fonte: O Autor, 2015).

As Figuras 6.3 (a), 6.3 (b), 6.3 (c) e 6.3 (d) mostram os mesmos sinais que as figuras anteriores, também para o ensaio transiente, medidos pelo transdutor n° 3 (TP3).

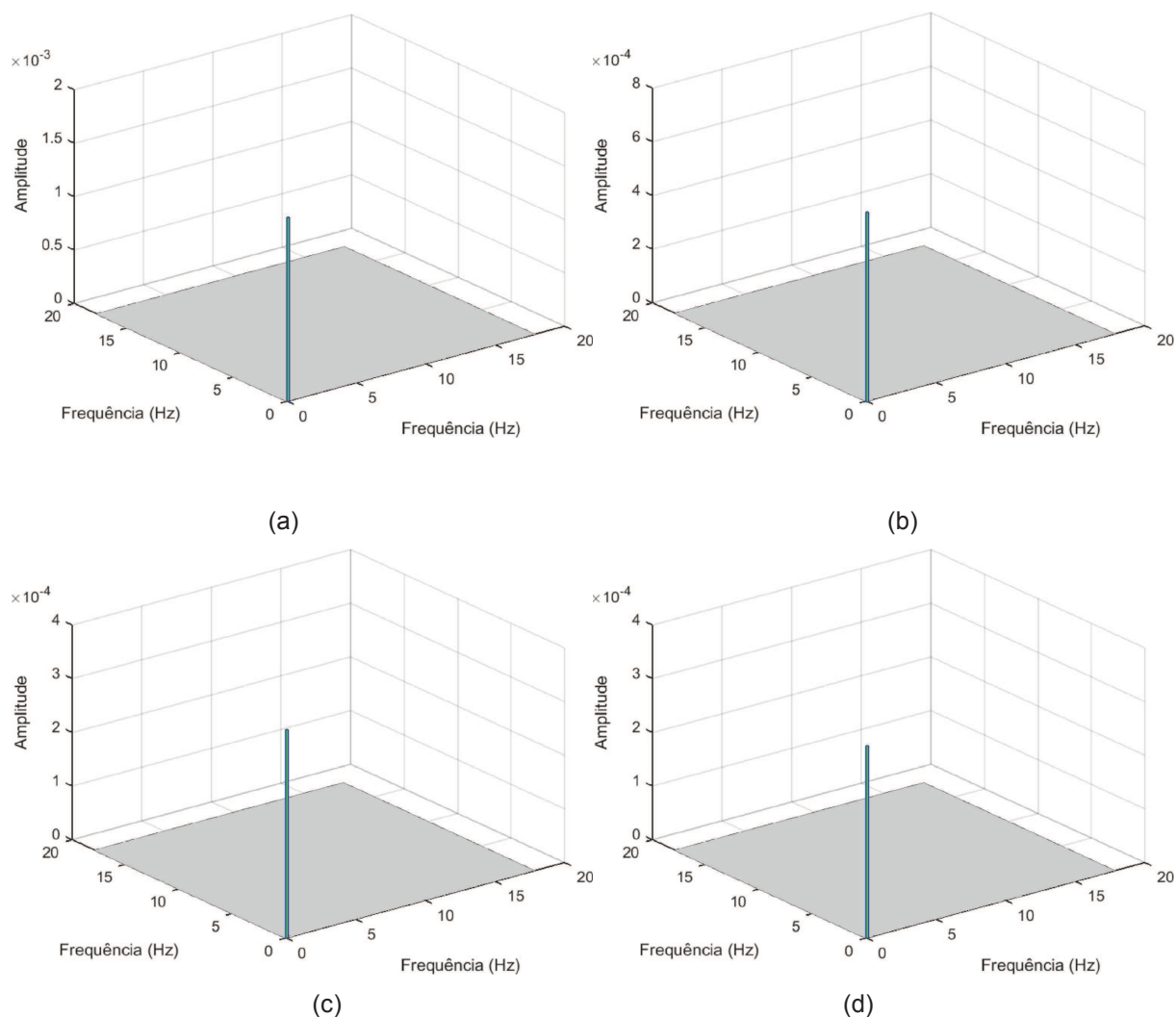


Figura 6.3 – Curvas de *Bispectrum* para sinais de pressão (TP3) – ensaio transiente (fonte: O Autor, 2015).

Observando as Figuras 6.1 a 6.3 verifica-se claramente que ocorreram alterações no sinal somente na frequência inicial (0 Hz). Além disso, ao comparar as curvas do *bispectrum*, para os sinais obtidos pelos três sensores, da amostra de referência com as demais amostras danificadas, nota-se mudanças somente na amplitude do sinal, não havendo diferença entre as curvas. Dessa forma, é difícil obter alguma conclusão com base somente nesta análise.

A seguir serão apresentadas as curvas do *bispectrum* para os sinais de pressão para o ensaio estacionário. A Figura 6.4 (a) mostra o sinal de pressão para a

amostra sem defeitos. Já, a Figura 6.4 (b) mostra o sinal para a amostra com defeito tipo moossa, a 6.4 (c) mostra o sinal para a terceira amostra (corrosão) e a 6.4 (d) o sinal para o quarto carretel (furado) Essas figuras referem-se ao sinal de pressão medido pelo transdutor de pressão nº 1 (TP1).

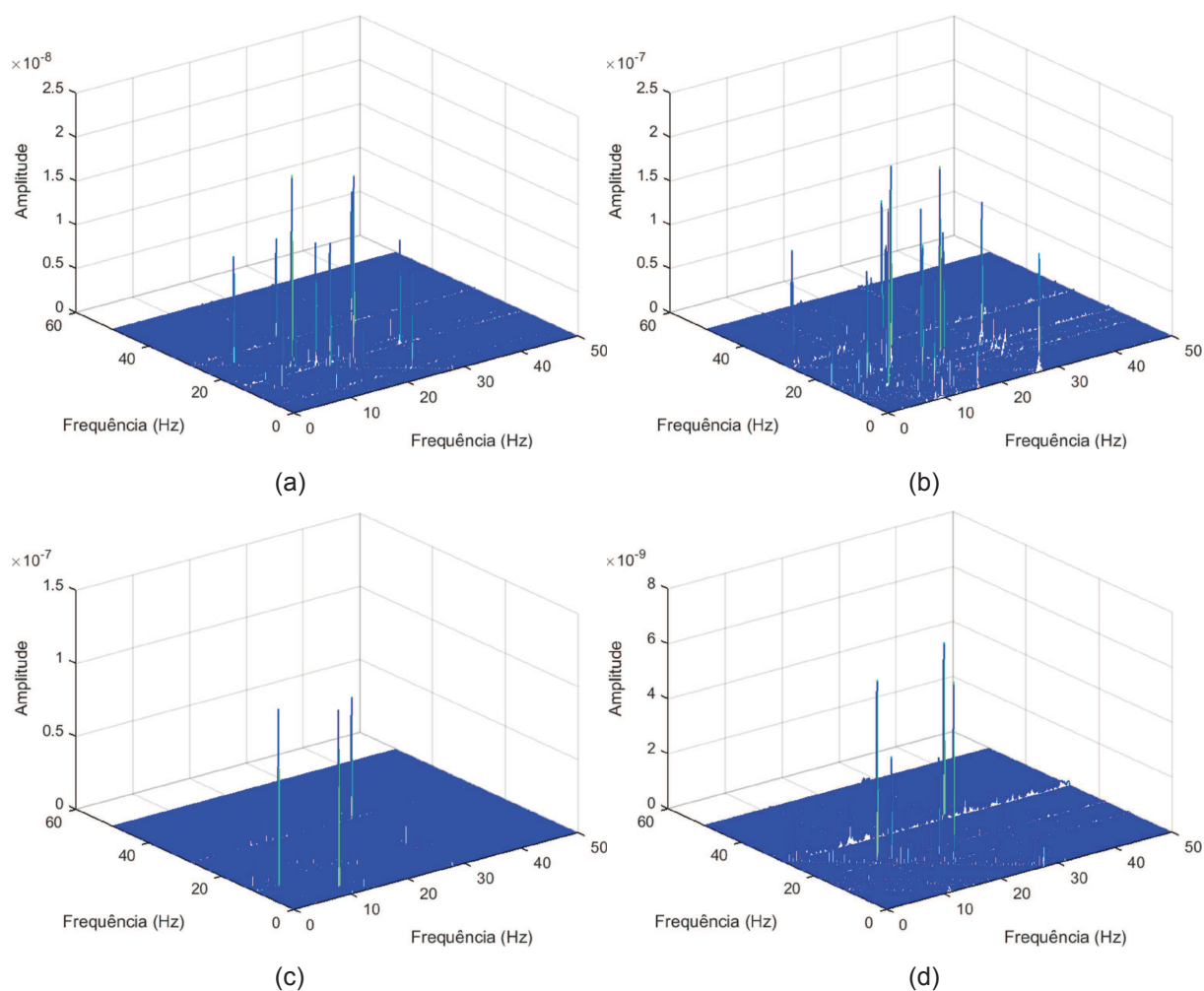


Figura 6.4 – Curvas de *Bispectrum* para sinais de pressão (TP1) – ensaio estacionário (fonte: O Autor, 2015).

As Figuras 6.5 (a), 6.5 (b), 6.5 (c) e 6.5 (d) mostram os mesmos sinais que as figuras anteriores, também para o conjunto de testes estacionário, medidos pelo sensor nº 2 (TP2).

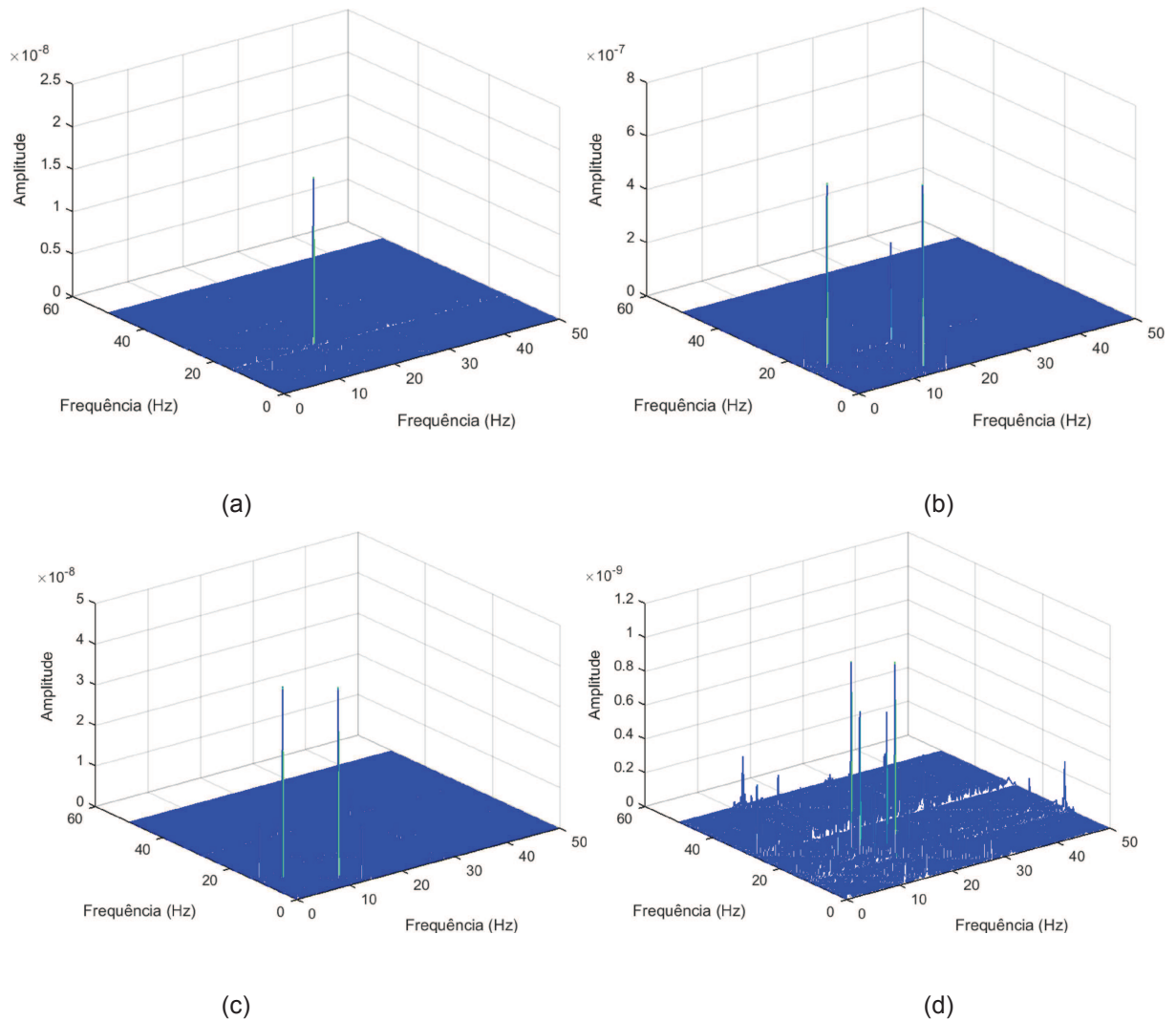


Figura 6.5 – Curvas de *Bispectrum* para sinais de pressão (TP2) – ensaio estacionário (fonte: O Autor, 2015).

As Figuras 6.6 (a), 6.6 (b), 6.6 (c) e 6.6 (d) mostram as curvas do *bispectrum*, também para o ensaio estacionário, medidos pelo transdutor de pressão nº 3 (TP3).

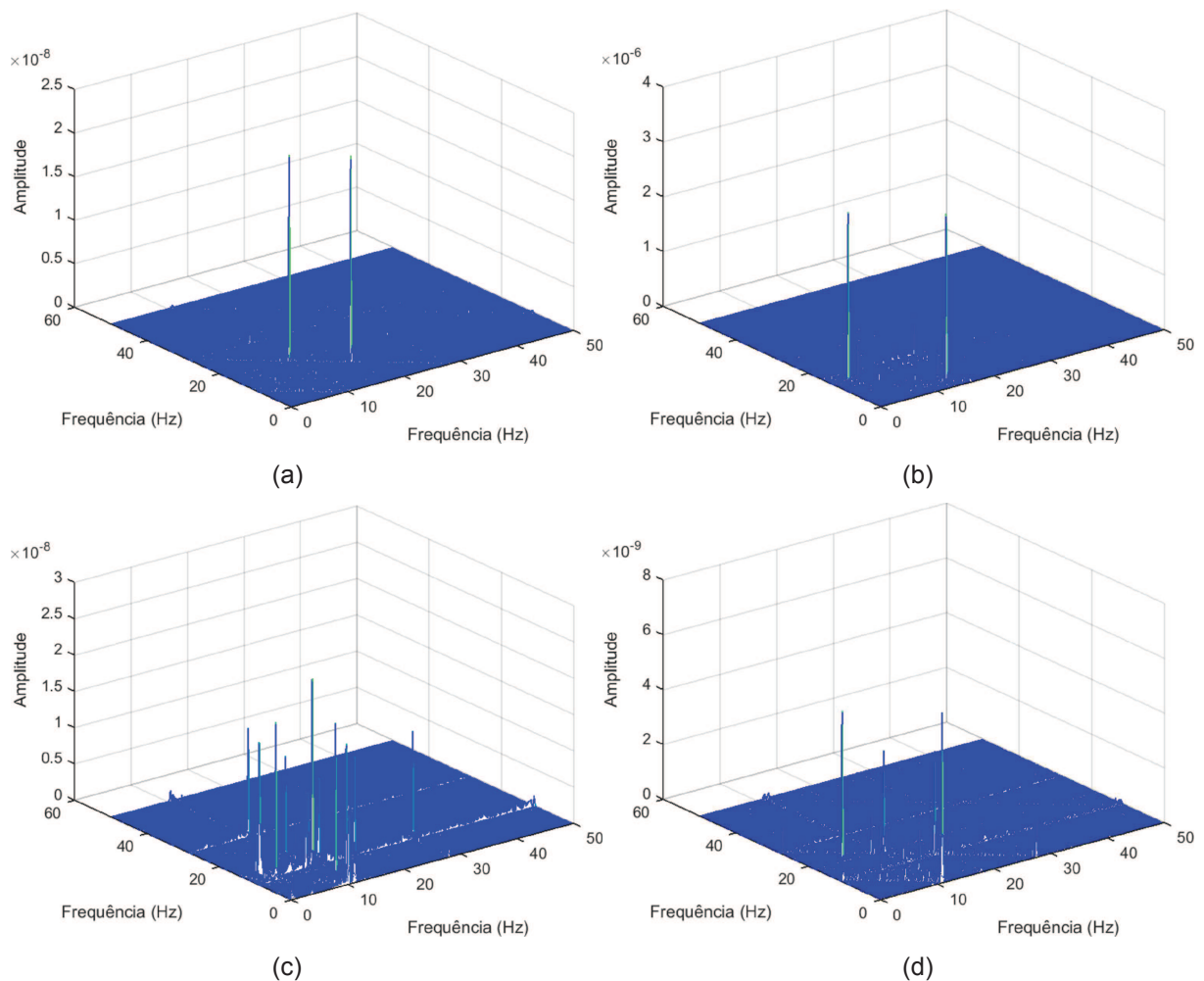


Figura 6.6 – Curvas de *Bispectrum* para sinais de pressão (TP3) – ensaio transiente (fonte: O Autor, 2015).

Analisando as curvas do *bispectrum* para os sinais de pressão referente ao ensaio estacionário (Figuras 6.3 a 6.6), é possível verificar a excitação de outras frequências, além da inicial (0 Hz). Nota-se ainda, que houve alteração nos sinais aquisitados pelos três sensores, diferentemente do que ocorreu para o ensaio transiente. Porém, tais variações não podem ser consideradas significativas. No entanto, com base somente na análise desses sinais de pressão não é possível obter nenhuma conclusão sólida.

Os transdutores de pressão, como os utilizados nos ensaios, medem sinais de baixa frequência. Tal situação pode ser comprovada pela observação das

Figuras 6.7 e 6.8, no qual apresentam a análise do *Power Spectrum* dos sinais de pressão, para os ensaios estacionário e transitório, respectivamente, contemplando ainda as amostras de referência (a), e com defeitos tipo moossa (b), corrosão interna (c) e vazamento (d).

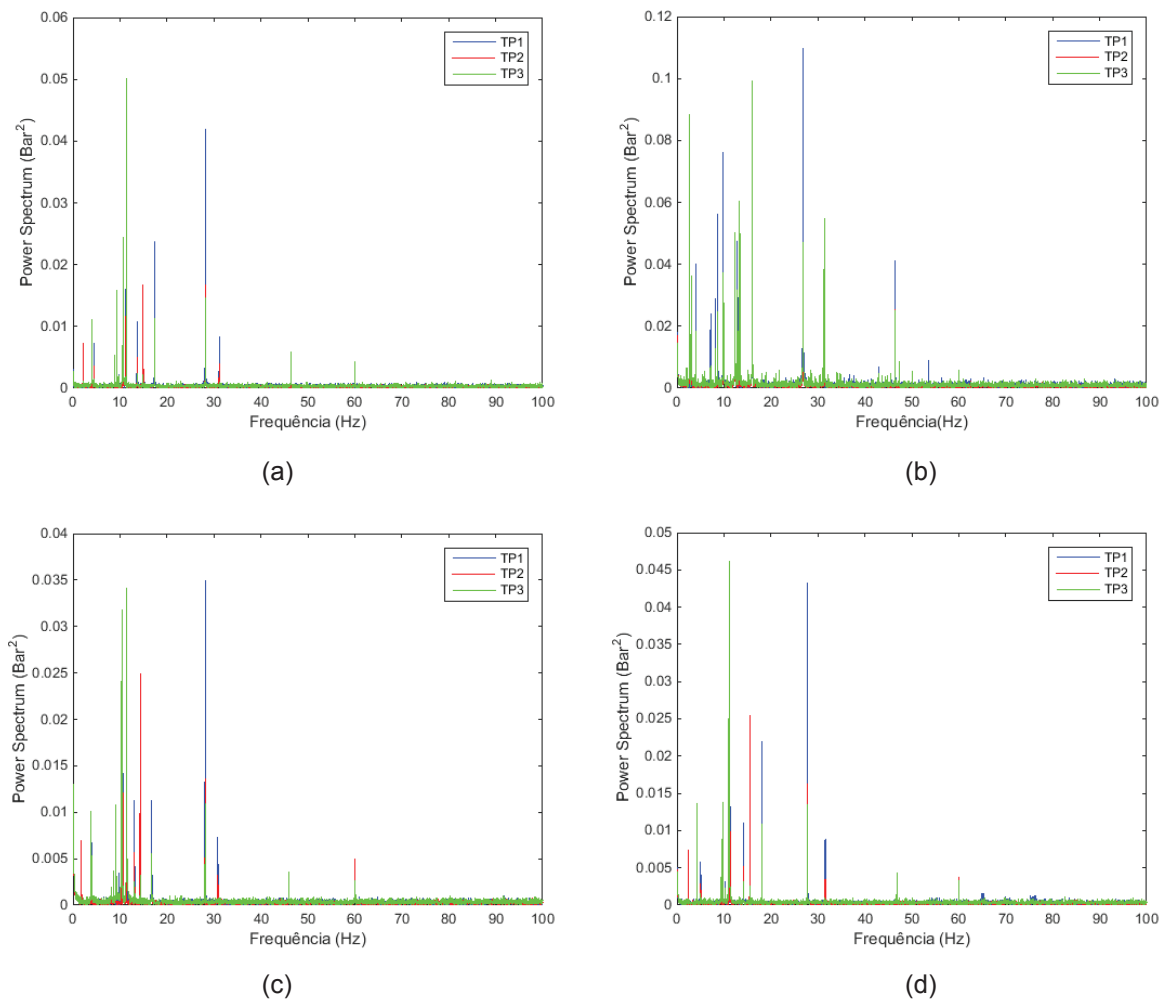


Figura 6.7 – Curvas da análise do *Power Spectrum* para os sinais de pressão – ensaio estacionário (fonte: O Autor, 2015).

Analisando a Figura 6.7 (a-d) nota-se que as variações na energia do sinal de pressão para o testes estacionário ocorreram em algumas frequências específicas, até aproximadamente 60 Hz, sendo que nas frequências superiores a este valor não

observou-se variações no *Power Spectrum*, tanto para a amostra de referência quanto para as danificadas. Nota-se ainda, que os maiores valores do *Power Spectrum* foram observados para a amostra com defeito tipo moosa.

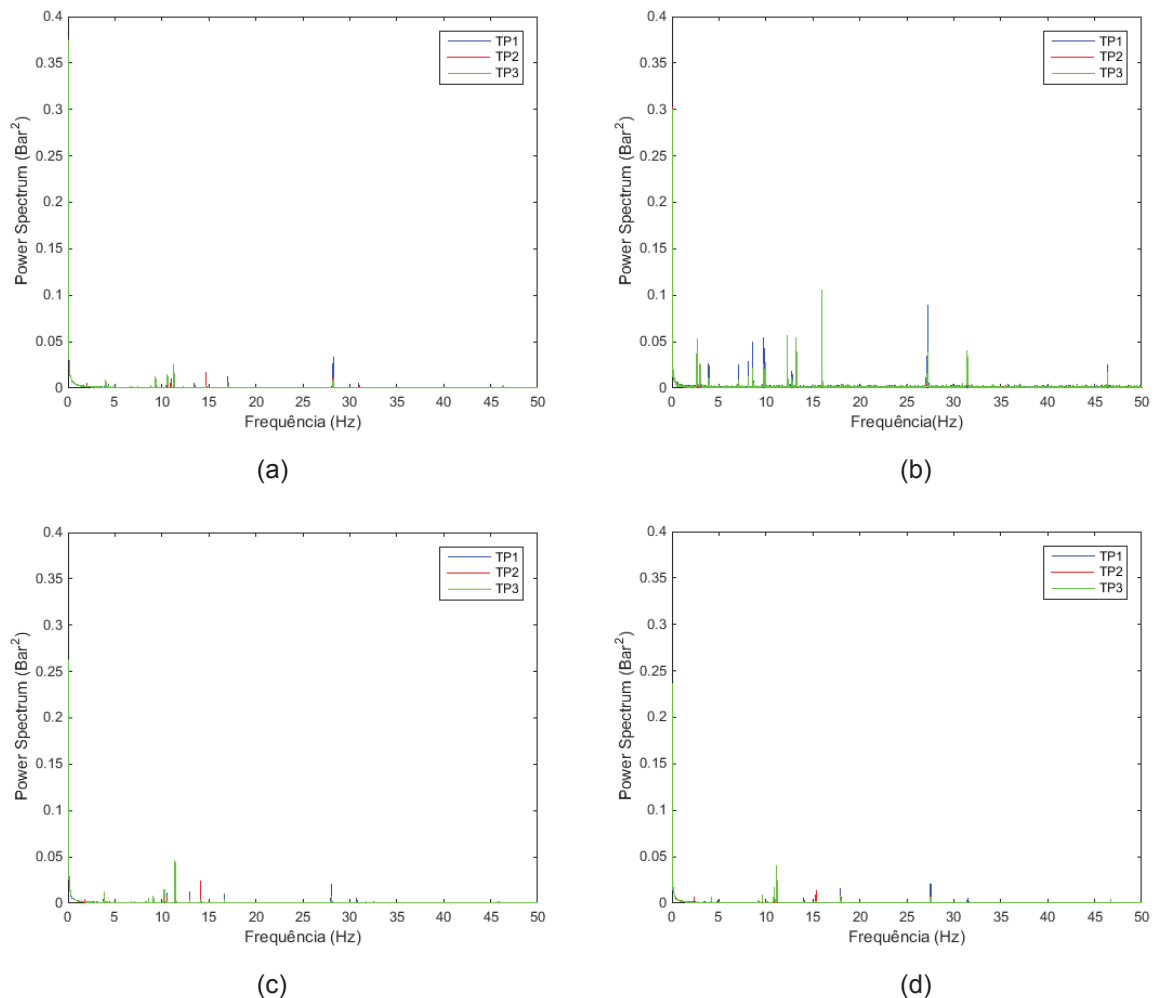


Figura 6.8 – Curvas da análise do *Power Spectrum* para os sinais de pressão – ensaio transiente (fonte: O Autor, 2015).

Analisando a Figura 6.8 (a-d), verifica-se que para o ensaio transiente as alterações no *Power Spectrum* ocorreram em algumas frequências específicas até cerca de 30 Hz. Acima desse valor, não observou-se variações em tal parâmetro, tanto para a rede íntegra quanto para as amostras que apresentavam defeitos. Nota-se ainda, que os valores do *Power Spectrum* para o ensaio transiente são inferiores aos

observados no teste transiente. Além do mais, assim como no ensaio estacionário, os maiores valores apresentaram-se para a amostra com defeito tipo mosca.

Na sequência foi aplicada a técnica do *Bispectrum* para os sinais de aceleração, obtidos pelos quatro acelerômetros nos dois conjuntos de testes realizados.

Dessa maneira, a Figura 6.9 (a) mostra o sinal de aceleração para a amostra sem defeitos. Já, as Figuras 6.9 (b), 6.9 (c) e 6.9 (d) mostram os sinais de aceleração para os carretéis com defeitos do tipo mosca, corrosão e furo (vazamento), respectivamente. Essas figuras referem-se ao sinal de aceleração medido pelo acelerômetro nº 1 (AC1) para o ensaio transiente.

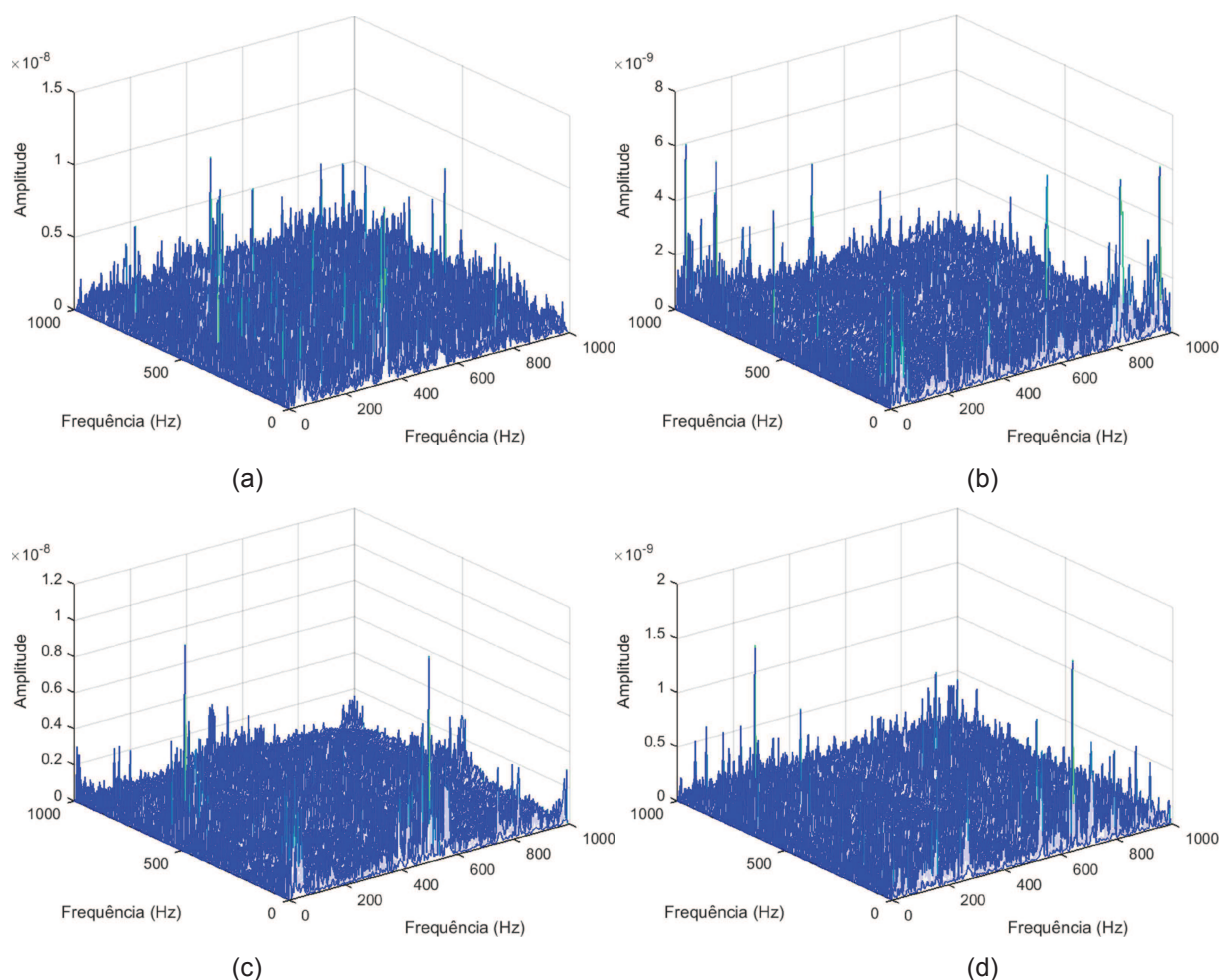


Figura 6.9 – Curvas de *Bispectrum* para sinais de aceleração (AC1) – ensaio transiente (fonte: O Autor, 2015).

Analisando as Figuras 6.9 (a-d), nota-se diferenças significativas nas curvas do *Bispectrum* da amostra de referência (íntegra) para as amostras com defeitos, considerando diversos aspectos, tais como: amplitude, frequência e formato da curva.

As Figuras 6.10 (a)-(d), mostram os sinais de aceleração, para o ensaio transiente, para as amostras de referência, com defeito tipo moossa, com defeito tipo corrosão interna e com defeito tipo vazamento (furo), respectivamente, medidos pelo acelerômetro nº 2 (AC2).

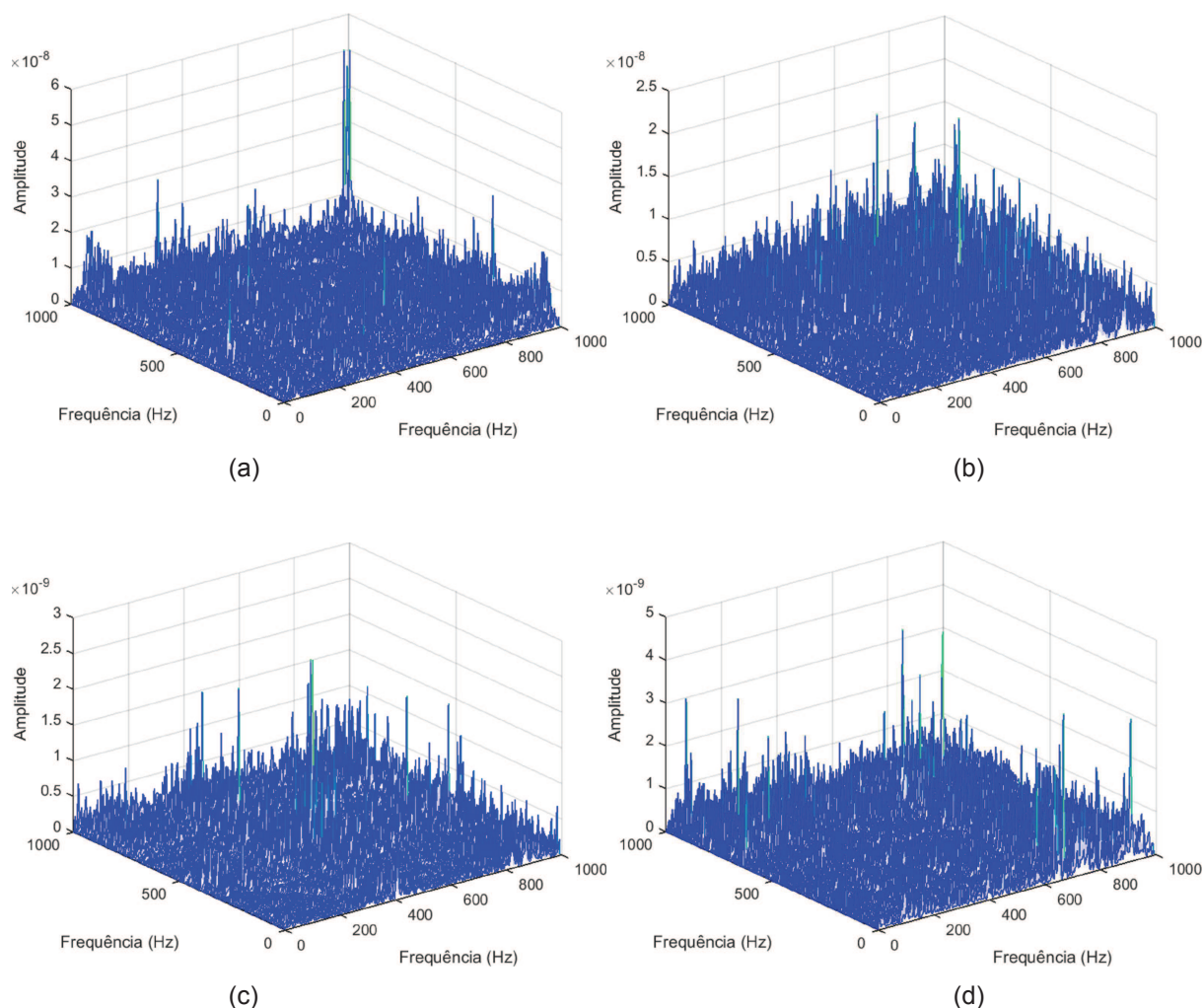


Figura 6.10 – Curvas de *Bispectrum* para sinais de aceleração (AC2) – ensaio transiente (fonte: O Autor, 2015).

Observando as Figuras 6.10 (a-d), verifica-se também grandes diferenças entre as curvas do *Bispectrum*, considerando as quatro amostras ensaiadas, levando em consideração os mesmos parâmetros analisados anteriormente.

As Figuras 6.11 (a)-(d), mostram os sinais de aceleração, para o ensaio transiente, medidos pelo sensor nº 3 (AC3), para as amostras de referência, com defeito tipo moossa, com defeito tipo corrosão interna e com defeito tipo vazamento (furo), respectivamente.

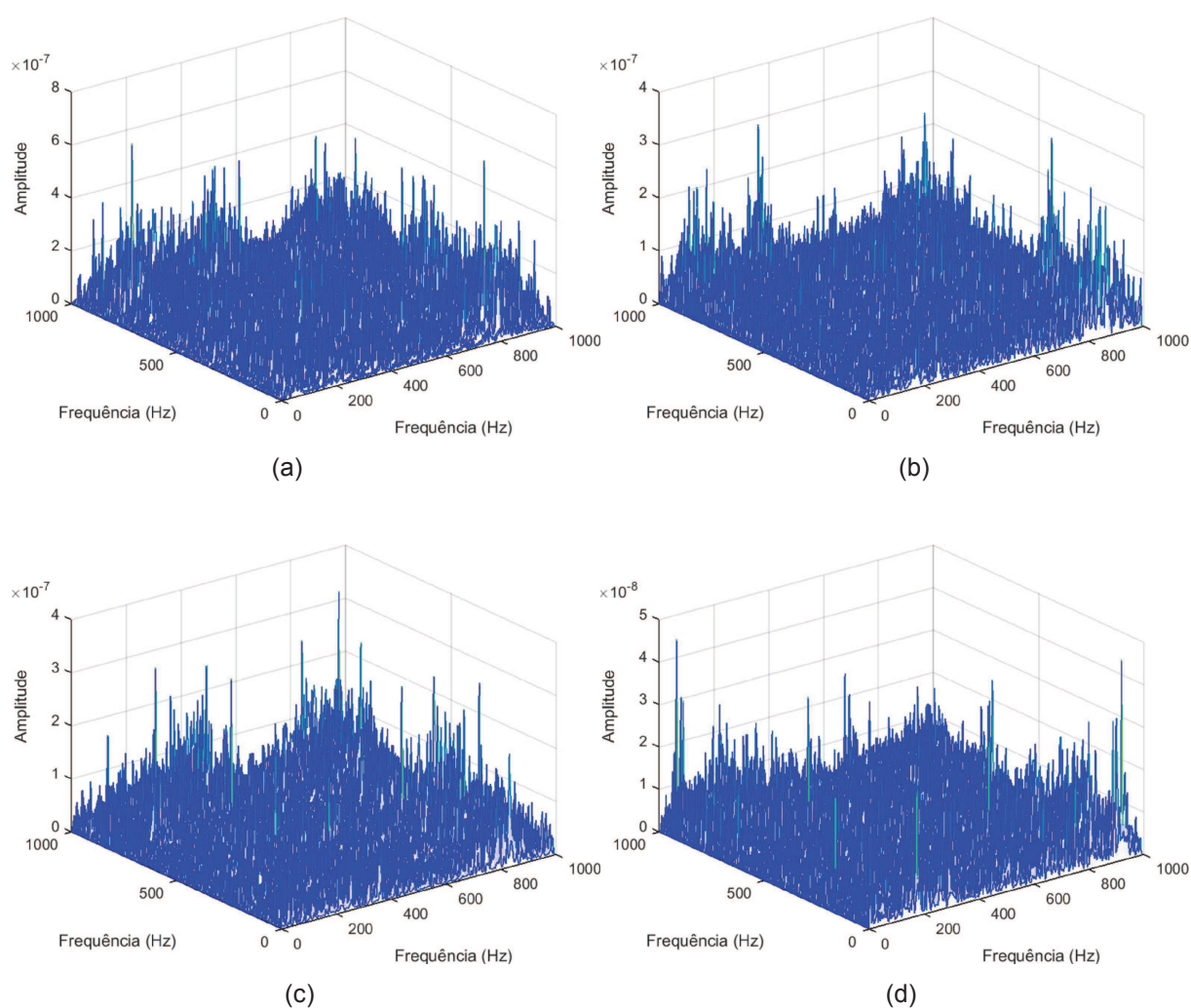


Figura 6.11 – Curvas de *Bispectrum* para sinais de aceleração (AC3) – ensaio transiente (fonte: O Autor, 2015).

Analisando as Figuras 6.11 (a-d), nota-se também diferenças significativas entre as curvas do *Bispectrum*, referente as quatro amostras testadas, considerando os mesmos parâmetros analisados anteriormente.

As Figuras 6.12 (a)-(d), mostram os sinais de aceleração, para o ensaio transiente, medidos pelo sensor nº 4 (AC4), para as amostras de referência, com defeito tipo moossa, com defeito tipo corrosão interna e com defeito tipo vazamento (furo), respectivamente.

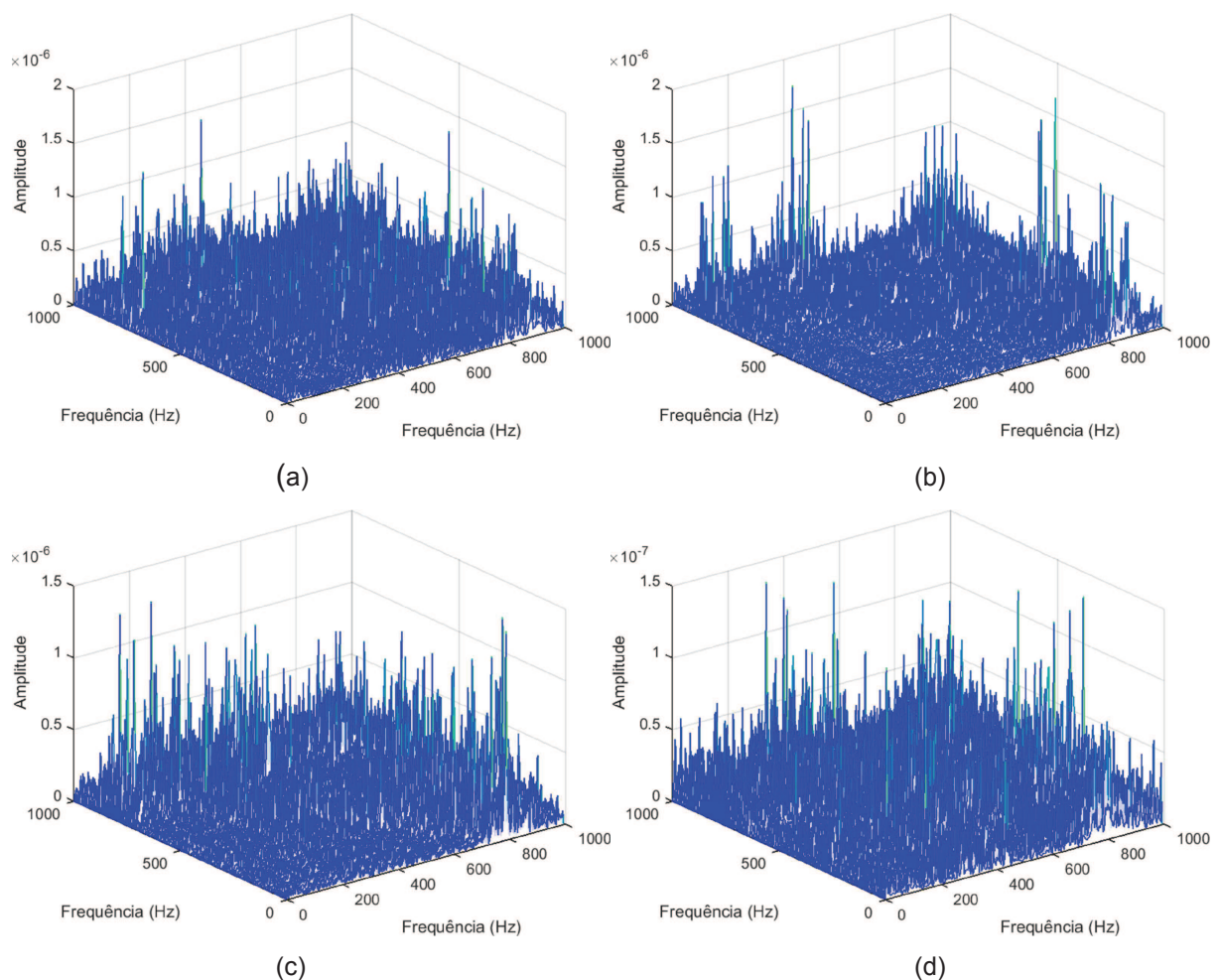


Figura 6.12 – Curvas de *Bispectrum* para sinais de aceleração (AC4) – ensaio transiente
(Fonte: O Autor, 2015).

Analisando as Figuras 6.12 (a-d), também nota-se observa-se grandes entre as curvas do *Bispectrum*, referente as quatro amostras testadas, considerando os mesmos aspectos analisados anteriormente.

As Figuras 6.13 (a)-(d) mostram os sinais de aceleração medidos pelo acelerômetro nº 1 (AC1) considerando o ensaio estacionário, para as amostras íntegra, com defeito tipo moossa, corrosão interna e vazamento (furo), respectivamente.

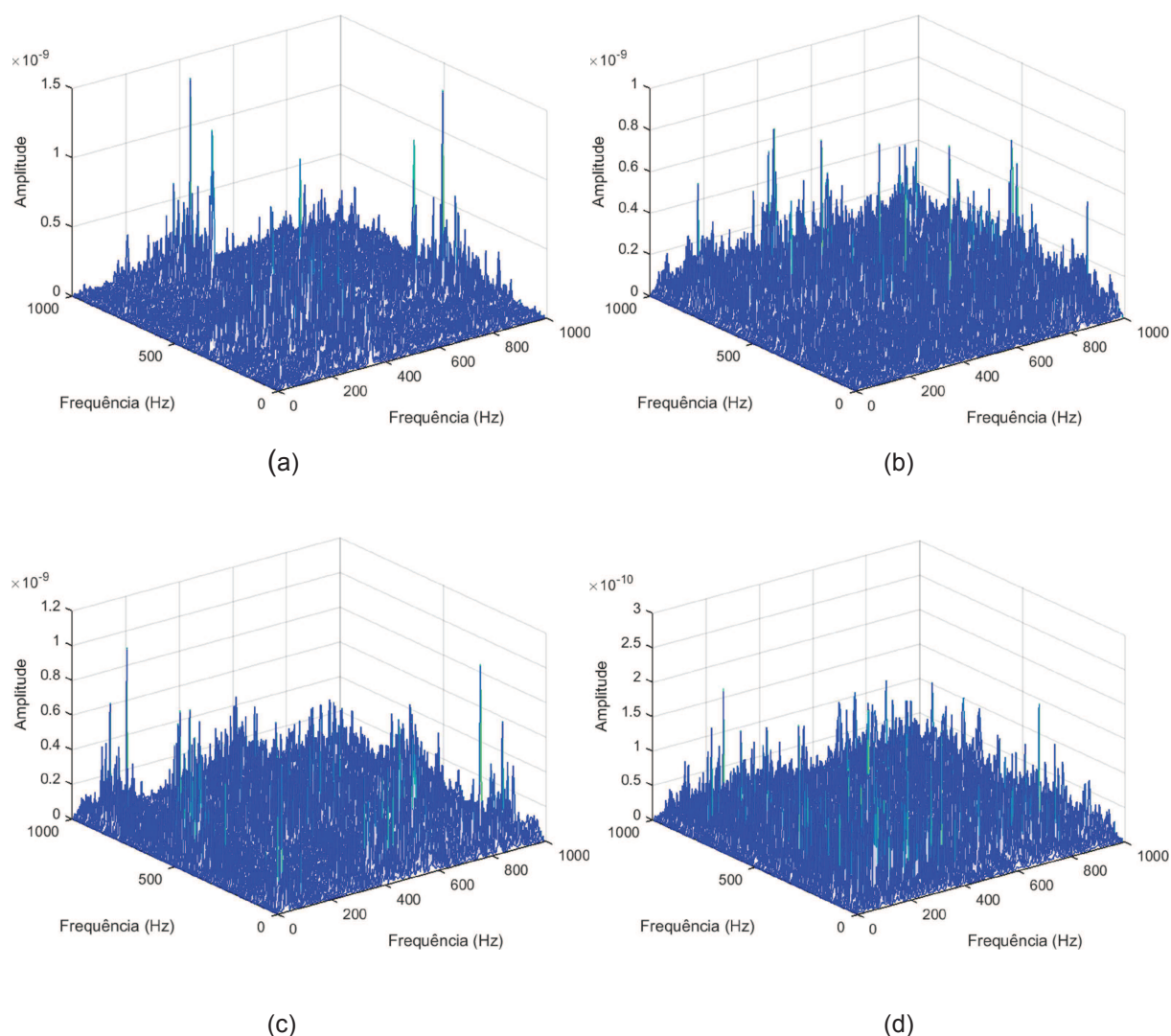


Figura 6.13 – Curvas de *Bispectrum* para sinais de aceleração (AC1) – ensaio estacionário (fonte: O Autor, 2015).

Analisando as Figuras 6.13 (a-d), nota-se diferenças significativas nas curvas do *Bispectrum* da amostra de referência (íntegra) para as amostras com defeitos, considerando aspectos como: amplitude, frequência e formato da curva.

As Figuras 6.14 (a)-(d) apresentam os sinais de aceleração medidos pelo sensor de aceleração nº 2 (AC2), correspondente ao ensaio estacionário, para as amostras de referência, com defeito tipo moossa, corrosão interna e vazamento (furo), respectivamente.

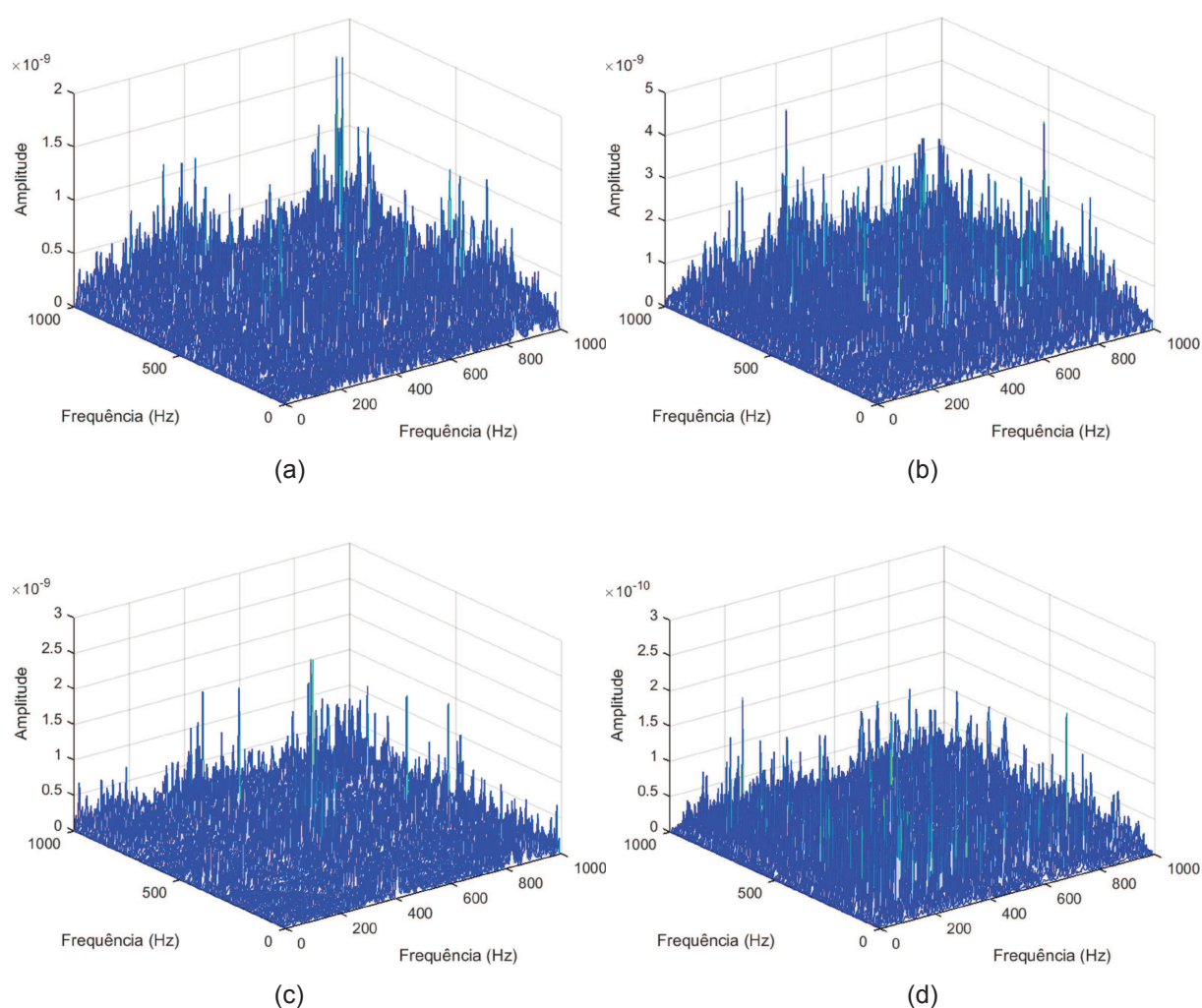


Figura 6.14 – Curvas de *Bispectrum* para sinais de aceleração (AC2) – ensaio estacionário (fonte: O Autor, 2015).

Observando as Figuras 6.14 (a-d), também verifica-se diferenças significativas nas curvas do *Bispectrum* da amostra de referência (íntegra) para as amostras com defeitos, considerando os mesmos parâmetros analisados anteriormente.

As Figuras 6.15 (a)-(d) apresentam os sinais de aceleração, correspondente ao ensaio estacionário, para as amostras de referência, com defeito tipo moossa, corrosão interna e vazamento (furo), respectivamente, medidos pelo sensor de aceleração nº 3 (AC3)

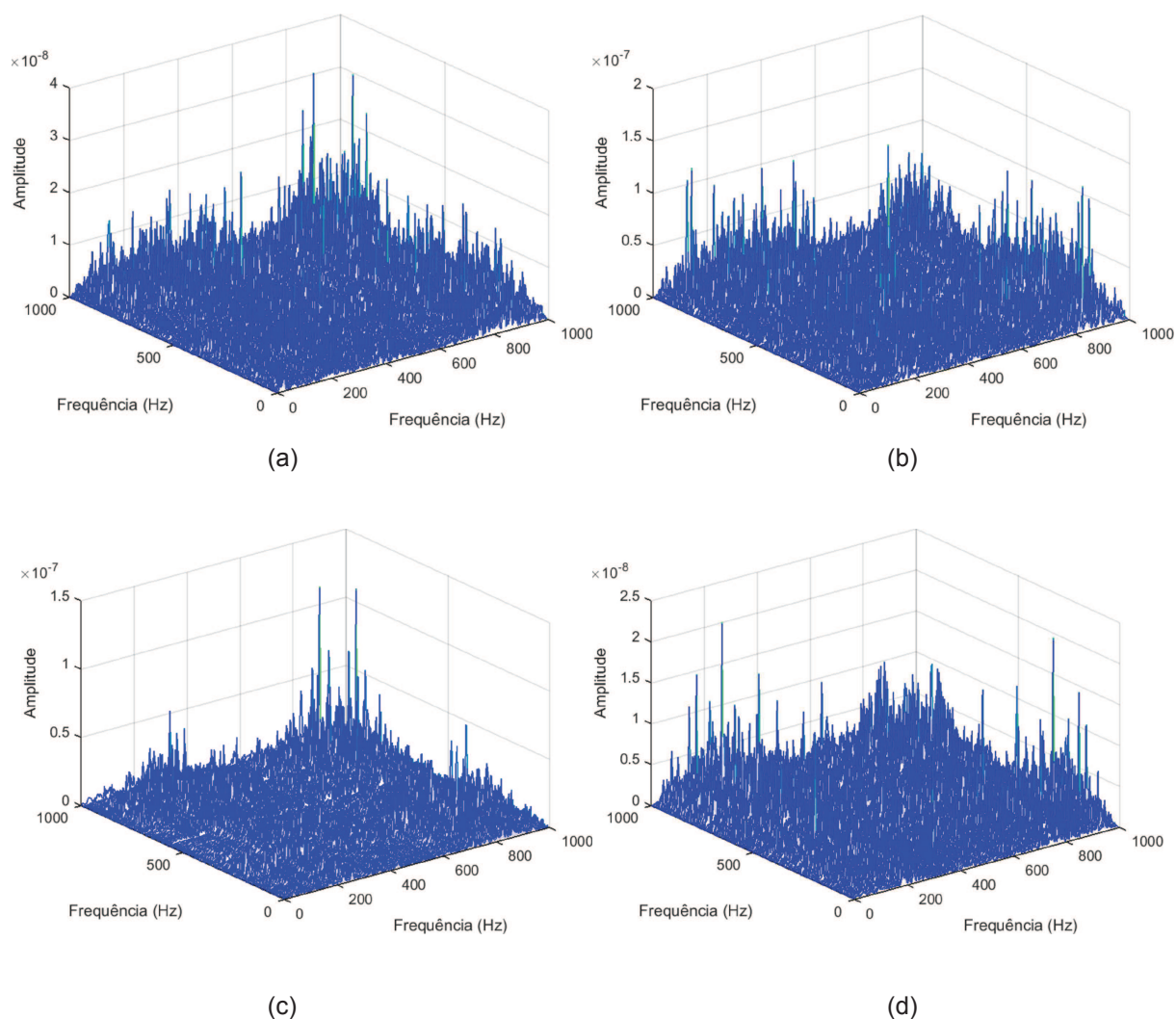


Figura 6.15 – Curvas de *Bispectrum* para sinais de aceleração (AC3) – ensaio estacionário (fonte: O Autor, 2015).

Observando as Figuras 6.15 (a-d), também nota-se grandes diferenças nas curvas do *Bispectrum* da amostra de referência (íntegra) para as amostras com defeitos, considerando os mesmos aspectos analisados anteriormente.

As Figuras 6.16 (a)-(d), mostram os sinais de aceleração, para o ensaio transiente, medidos pelo sensor nº 4 (AC4), para as amostras de referência, com defeito tipo moossa, com defeito tipo corrosão interna e com defeito tipo vazamento (furo), respectivamente.

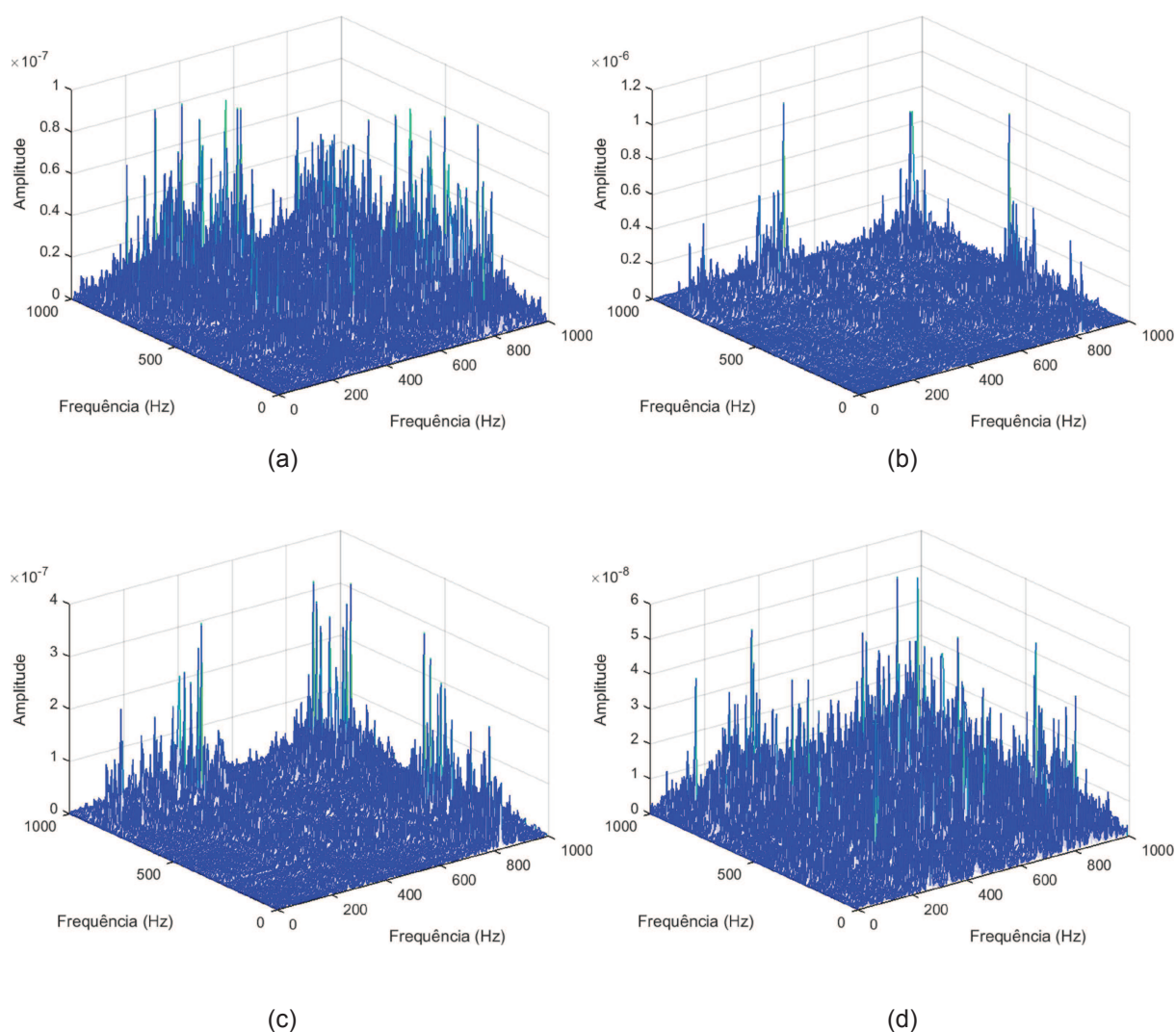


Figura 6.16 – Curvas de *Bispectrum* para sinais de aceleração (AC4) – ensaio estacionário (fonte: O autor, 2015).

Na análise das Figuras 6.16 (a-d), assim como nas demais, também nota-se diferenças significativas nas curvas do *Bispectrum* da amostra de referência para as que apresentavam defeitos.

Dessa forma, ao observar as Figuras 6.9 a 6.16, no qual referem-se aos sinais de aceleração, verifica-se que tanto para o ensaio estacionário quanto transiente, as variações nas curvas do *Bispectrum* foram bem maiores do que para os sinais de pressão, em todos os aspectos analisados.

Tal situação ocorreu, pois os acelerômetros utilizados registram uma faixa de frequência maior que os transdutores de pressão, que medem apenas sinais em baixa frequência, razão pela qual os resultados do *Bispectrum* para os sinais de aceleração foram mais satisfatórios que para os sinais de pressão.

Conjuntamente ao *Bispectrum*, realizou-se também a análise do *Power Spectrum* para os sinais de aceleração, conforme pode ser observado nas Figuras 6.17 e 6.18, no qual referem-se aos ensaios estacionário e transiente, respectivamente, contemplando ainda as amostras de referência (a), e com defeitos tipo moossa (b), corrosão interna (c) e vazamento (d).

Analisando as Figuras 6.17 (a-d) nota-se que as variações na energia do sinal de aceleração para o testes estacionário ocorreram em todas as frequências no intervalo considerado (até 1.000 Hz). Certas frequências específicas apresentaram os maiores valores do *Power Spectrum*, mostrando que estas que apresentam concentração da energia do sinal. Nota-se ainda, que para a amostra com defeito tipo moossa que foi observado o valor máximo desse parâmetro.

Para os ensaios transientes - Figuras 6.18 (a-d), verifica-se que as variações na energia do sinal de aceleração também ocorreram em todas as frequências no intervalo considerado (até 1.000 Hz), sendo que em determinadas frequências específicas observou-se os maiores valores do *Power Spectrum*. Nota-se ainda, que ao analisar somente os gráficos das amostras danificadas, a amostra com defeito tipo moossa apresentou o valor máximo do *Power Spectrum*. No entanto, em termos absolutos, o pico do referido parâmetro foi observado na amostra de referência, ou seja íntegra.

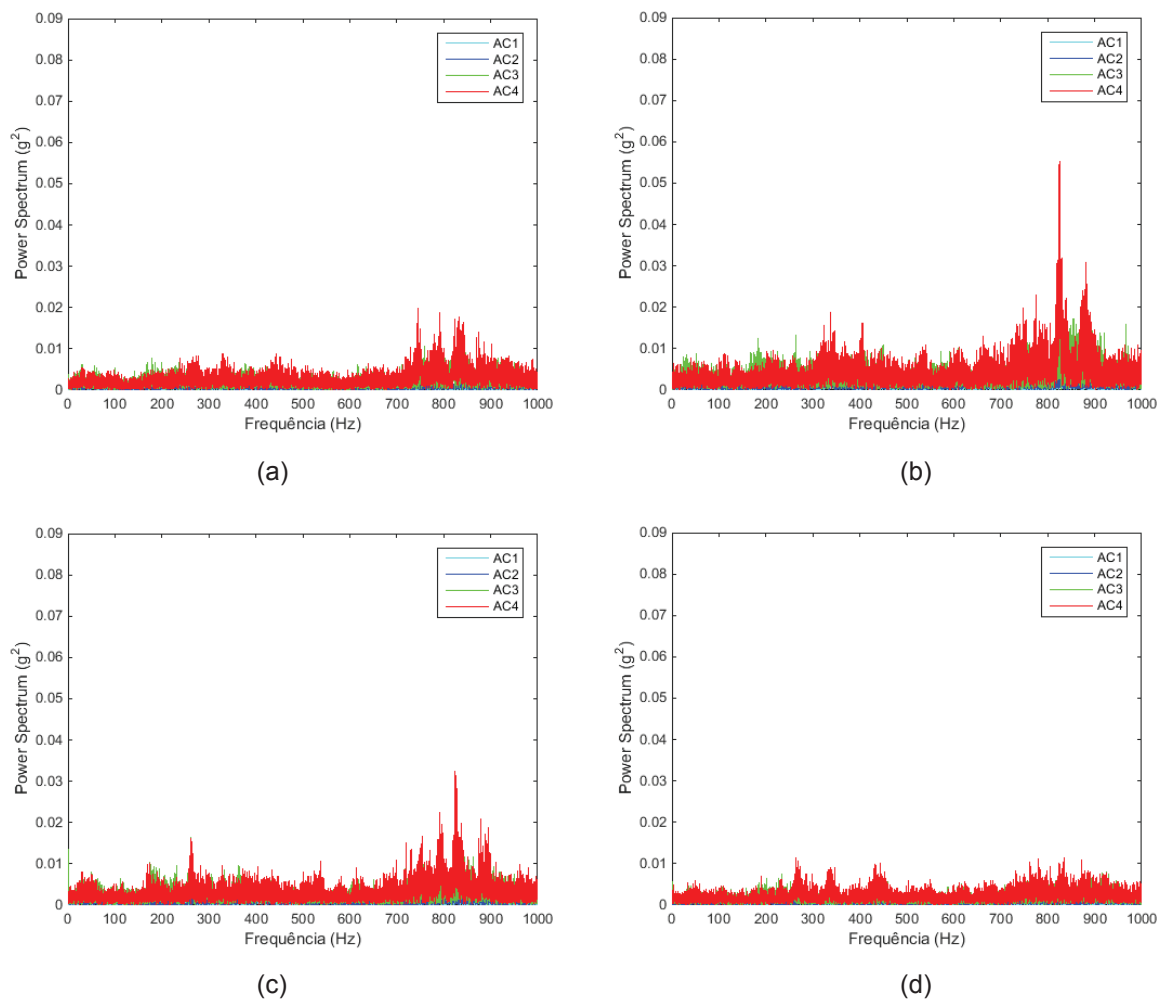


Figura 6.17 – Curvas da análise do *Power Spectrum* para os sinais de aceleração – ensaio estacionário (fonte: O Autor, 2015).

Com base na análise das curvas do *Bispectrum* conjuntamente as curvas do *Power Spectrum* para os dois tipos de sinais medidos, é possível concluir que tanto o sistema quanto os defeitos considerados, tais como moessa, corrosão e furos, são caracterizados em altas frequências, razão pela qual não foram identificados pelos sensores de pressão, conforme observado.

Face ao exposto, verifica-se que a utilização dos sinais de aceleração é mais apropriada para a proposta do presente trabalho, razão pela qual serão tratados de maneira mais detalhada sequencialmente.

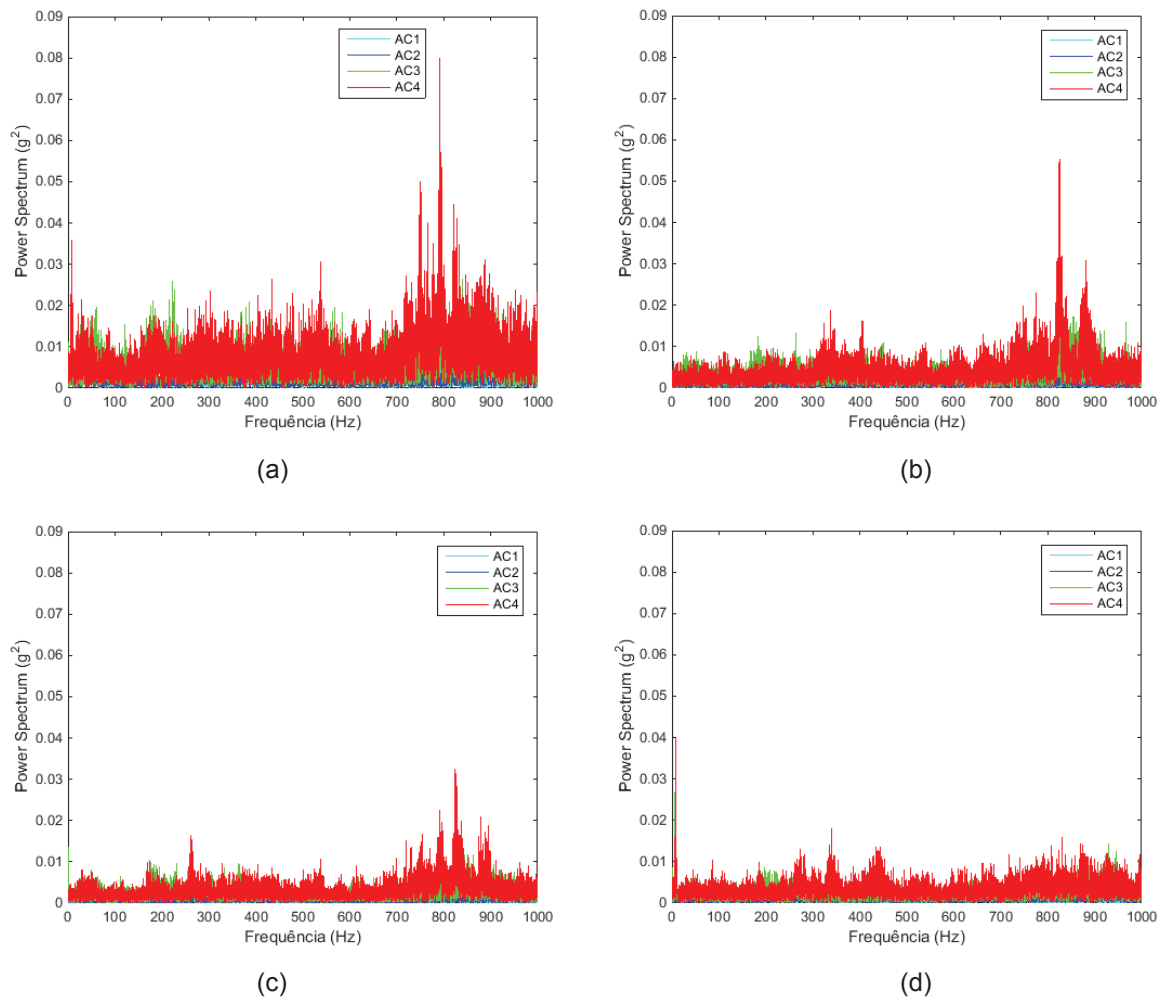


Figura 6.18 – Curvas da análise do *Power Spectrum* para os sinais de aceleração – ensaio transiente (fonte: O Autor, 2015).

Analizando as Figuras 6.9 a 6.16, nota-se visualmente que existem diferenças entre as curvas da amostra íntegra e das defeituosas, sendo porém bastante difícil a quantificação destas diferenças.

Considerando que os sinais de aceleração se mostraram mais interessantes para a proposta do presente trabalho, utilizou-se um parâmetro relativo contendo a soma de todos os valores do *Bispectrum* (BARBIERI & BARBIERI, 2013) definido pela equação 3.8.

$$\ln dB = \sum_{i=1}^n b(k,l) \quad (6.1)$$

$$Brel = \frac{|\ln dB_b - \ln dB_a|}{|\ln dB_a|} \quad (6.2)$$

onde $\ln dB$ é o parâmetro relativo do *Bispectrum*, $b(k,l)$ é o *Bispectrum*, $\ln dB_b$ é o parâmetro do *Bispectrum* para o sistema com dano e $\ln dB_a$ é o parâmetro do *Bispectrum* para o sistema sem dano.

Os valores do parâmetro relativo do *Bispectrum* para os três tipos de danos introduzidos nas amostras ensaiadas, são apresentados nas Figuras 6.19 e 6.20, no qual referem-se aos ensaios estacionário e transiente, respectivamente.

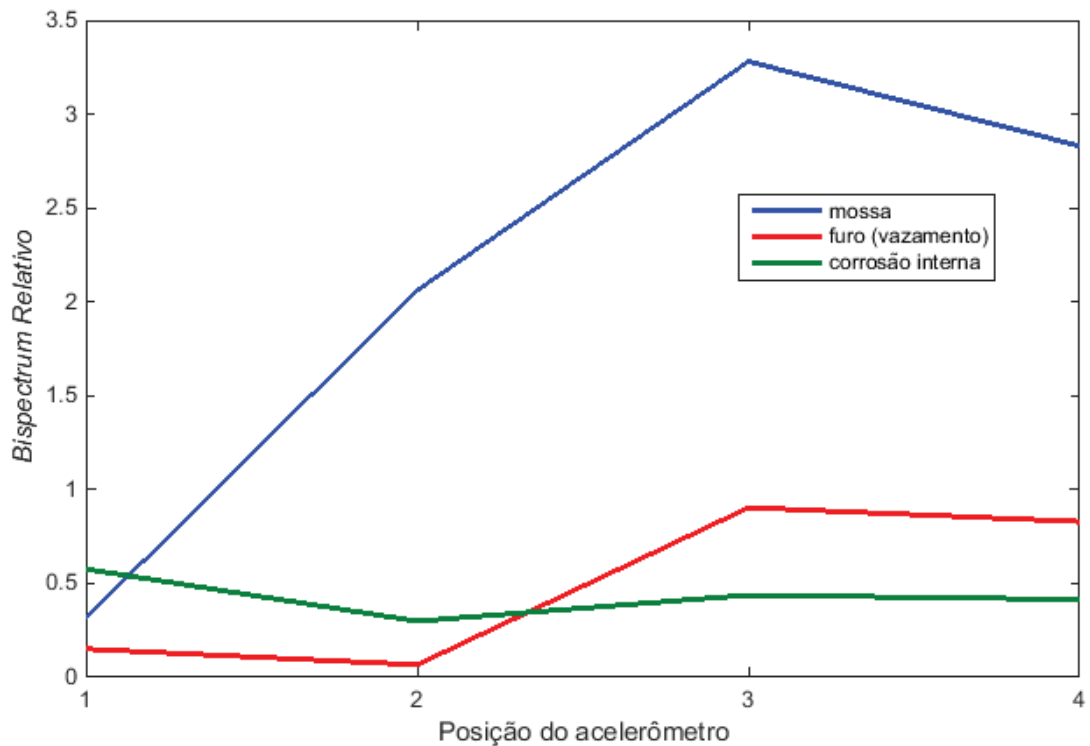


Figura 6.19 – Curvas do parâmetro relativo do *Bispectrum* para os sinais de aceleração referente ao teste estacionário (fonte: O Autor, 2015).

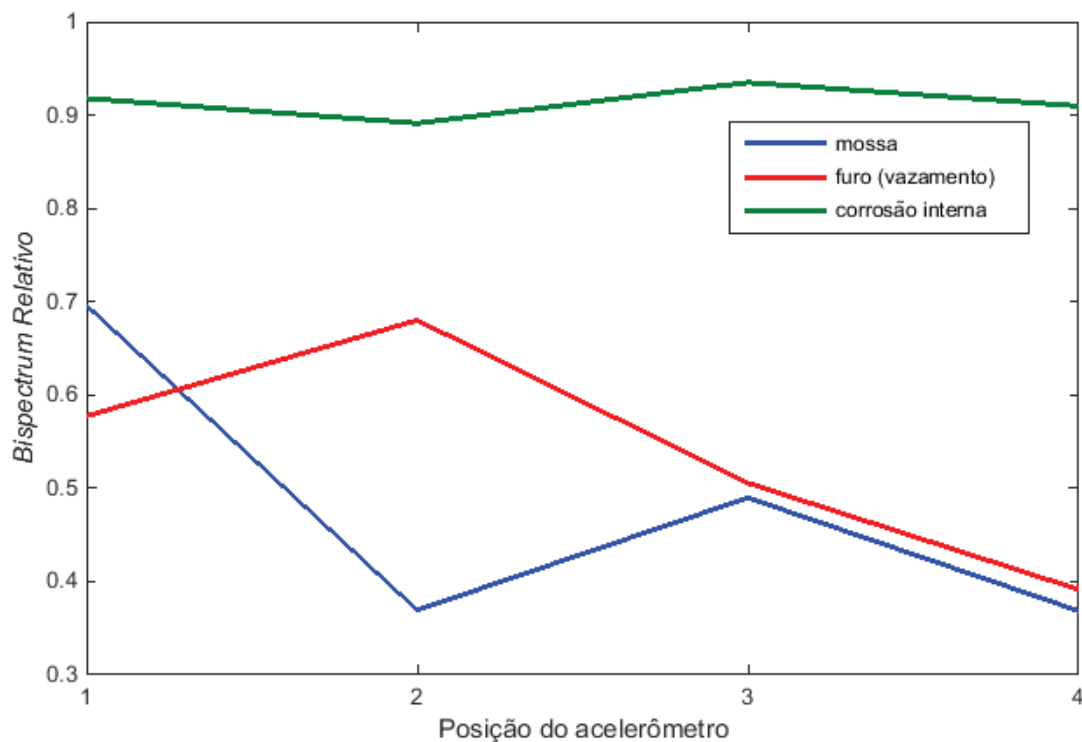


Figura 6.20 – Curvas do parâmetro relativo do *Bispectrum* para os sinais de aceleração referente ao ensaio transiente (fonte: O Autor, 2015).

Analisando a Figura 6.19, no qual refere-se ao ensaio estacionário, nota-se que os maiores valores do *Bispectrum* relativo estão relacionados ao acelerômetro nº 1 para o defeito tipo corrosão interna, e ao sensor nº 3 para os demais tipos de defeito. Já para ensaio transitório (Figura 6.20), nota-se que para cada tipo de defeito os picos do *bispectrum* foram captados por um acelerômetro diferente, não apresentando um comportamento definido.

Em ambas situações, os resultados encontrados foram diferentes do esperado, uma vez que se esperava que as maiores variações no *Bispectrum* fossem registradas pelo terceiro acelerômetro, posicionado mais próximo dos defeitos. Tal fato ocorreu, provavelmente visto que o *Bispectrum* apresenta melhores resultados para sistemas de estado uniforme (BARBIERI & BARBIERI, 2013).

6.3 CURTOSE

Outra ferramenta útil para detectar falhas incipientes é a curtose. Dessa forma, pode-se definir outro parâmetro relativo baseado no mesmo, conforme é mostrado na equação 6.3.

$$\gamma_{4rel} = \frac{|\gamma_4 d - \gamma_4 g|}{|\gamma_4 g|} \quad (6.3)$$

onde $\gamma_4 d$ é a curtose do sistema com dano e $\gamma_4 g$ é a curtose do sistema íntegro.

Assim, as Figuras 5.21 e 5.22 apresentam as curvas da curtose relativo para os testes estacionário e transiente, respectivamente .

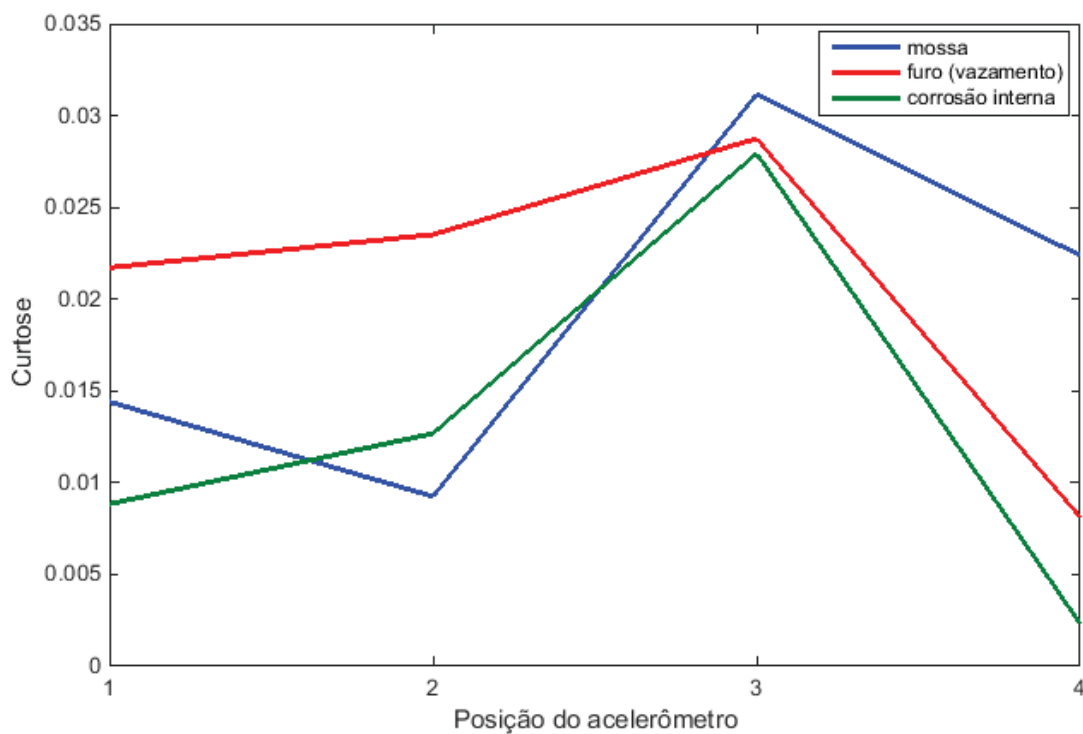
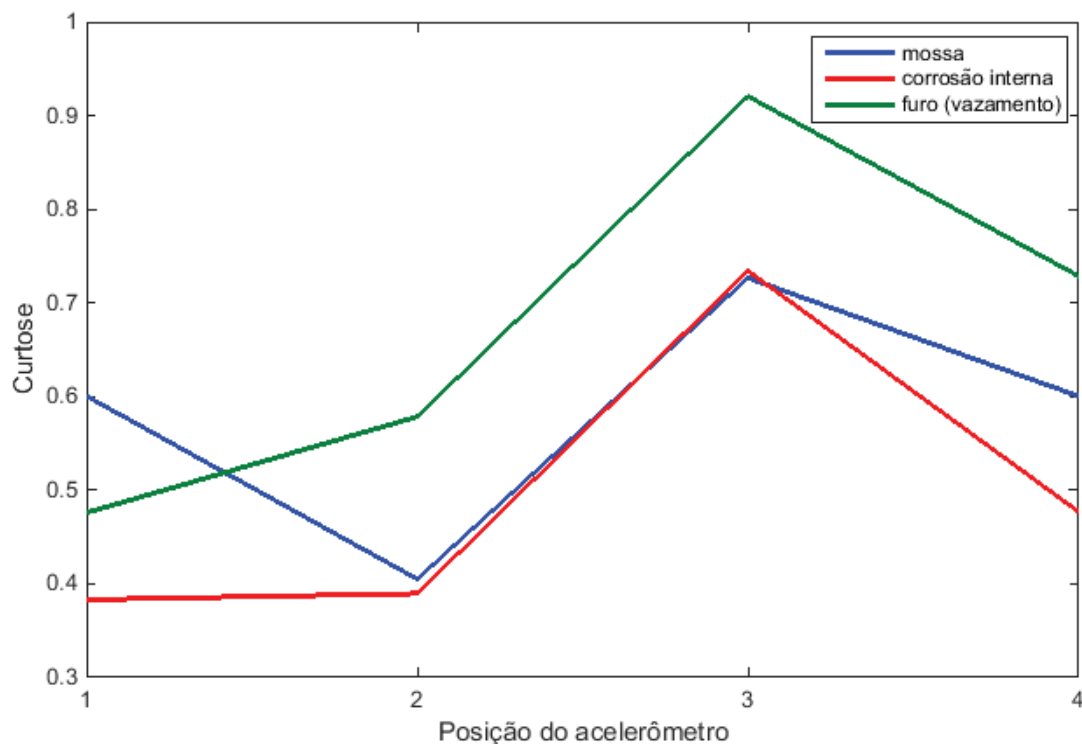


Figura 6.21 – Curvas do parâmetro relativo da curtose para os sinais de aceleração referente ao ensaio estacionário (fonte: O Autor, 2015).



Figuras 6.22 – Curvas do parâmetro relativo da curtose para os sinais de aceleração referente ao ensaio transiente (fonte: O Autor, 2015).

Neste caso, para os dois conjuntos de testes, as maiores variações no parâmetro da curtose, foram encontradas na posição do acelerômetro nº 3, no qual encontrava-se mais próxima dos defeitos, como era esperado.

6.4 TRANSFORMADA DE WAVELET

O parâmetro baseado na energia do sinal da transformada de *wavelet*, também foi utilizado. As Figuras 6.23 e 6.24 apresentam o índice de energia relativa obtidos através da transformada de *wavelet* para os ensaios estacionário e transitório, respectivamente. Utilizou-se a função *wavelet* mãe do tipo *Daubechie*.

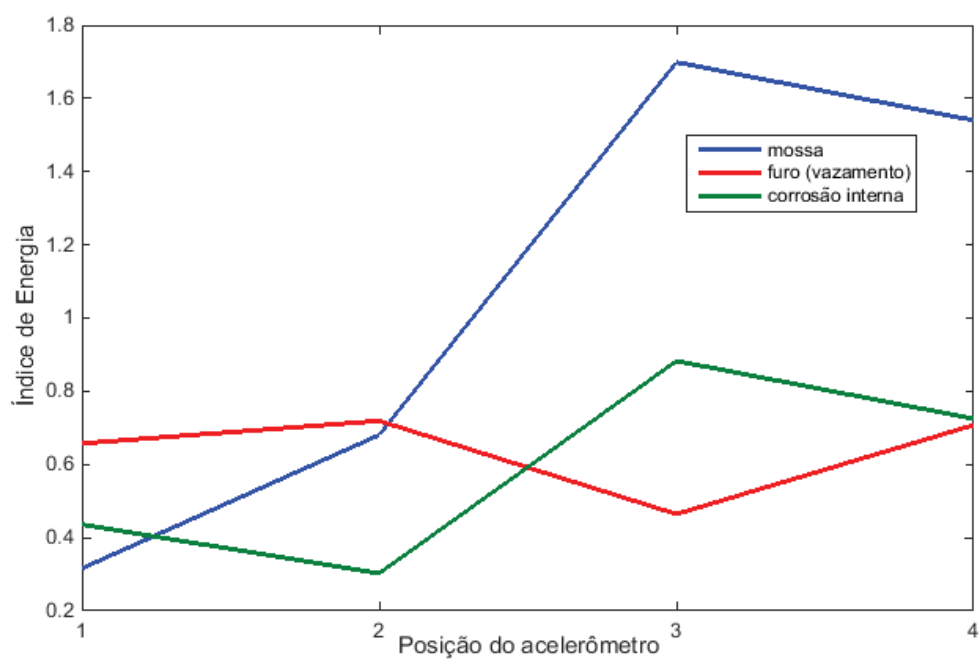


Figura 6.23 – Curvas do índice de energia relativa para os sinais de aceleração para o ensaio estacionário (Fonte: O Autor, 2015).

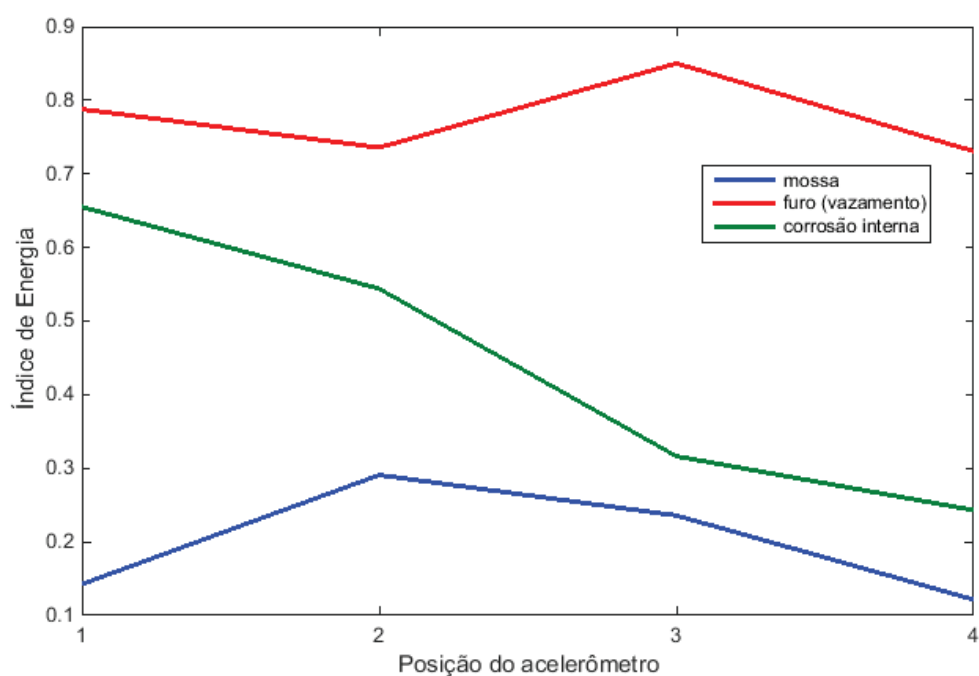


Figura 6.24 – Curvas do índice de energia relativa para os sinais de aceleração para o ensaio transitório (fonte: O Autor, 2015).

Observando a Figura 6.23, correspondente ao teste estacionário, é possível verificar que as maiores variações da energia ocorrem nas posições do acelerômetro 2 (defeito de vazamento) e do acelerômetro 3 (defeito de moessa e corrosão interna).

Já para o ensaio transitório, conforme Figura 6.24, nota-se que as maiores variações de energia foram captadas pelos acelerômetros 1, 2 e 3.

Assim, para o ensaio estacionário, considerando as amostras com defeitos do tipo moessa e corrosão interna os resultados obtidos por esta técnica foram satisfatórios, visto que os picos de energia foram observados no sensor localizados mais próximo dos defeitos. Já para amostra com furo (vazamento), os valores máximos da energia correspondem ao sensor AC1, no qual está distante dos danos.

Para o conjunto de testes transiente, para cada tipo de defeito, os valores máximos da energia correspondem a um acelerômetro distinto, não sendo possível estabelecer uma correlação específica.

6.5 MORFOLOGIA MATEMÁTICA

As Figuras 6.25 e 6.26 apresentam as curvas do coeficiente de correlação, calculados através da Equação 3.21, para os sinais de aceleração dos ensaios estacionário e transiente, respectivamente.

Ao contrário das técnicas anteriores, para este método os menores valores para o índice de correlação indicam os danos no sistema.

Analisando as referidas figuras, nota-se que para ambos conjuntos de testes, os valores mínimos nos parâmetros do coeficiente de correlação foram encontrados na posição do acelerômetro 3, no qual encontrava-se mais próximo do defeito, conforme esperado.

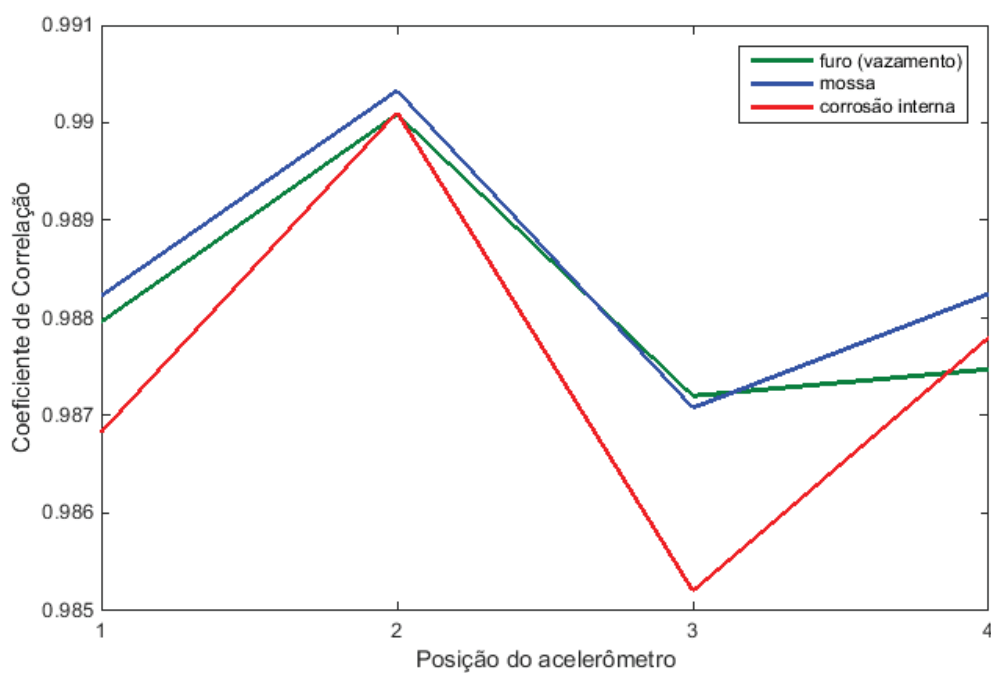


Figura 6.25 – Curvas do coeficiente de correlação para os sinais de aceleração para o ensaio estacionário (fonte: O Autor, 2015).

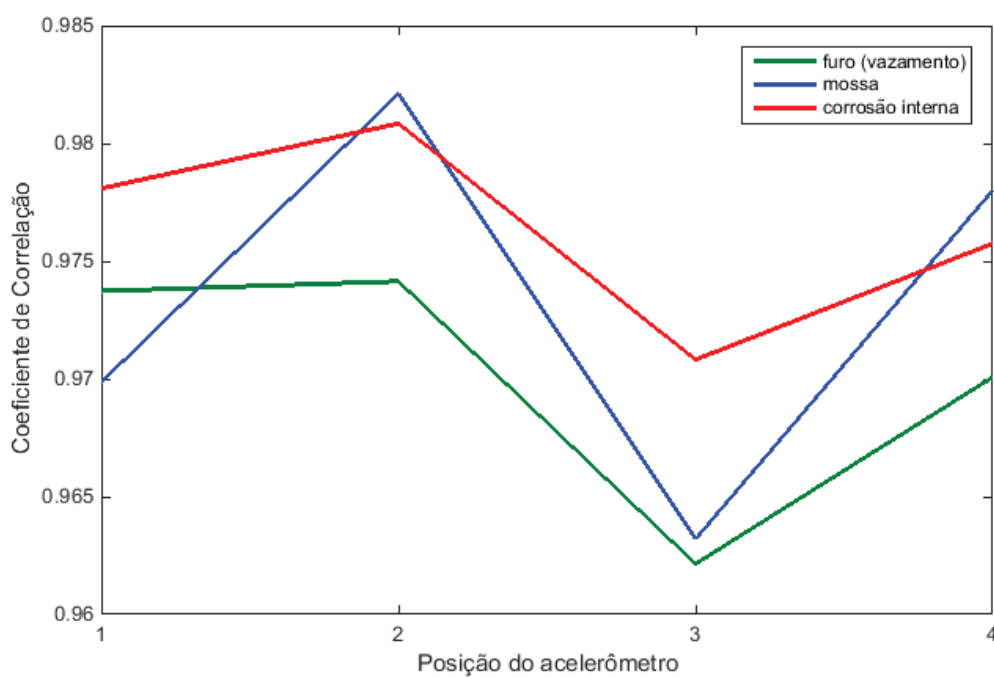


Figura 6.26 – Curvas do coeficiente de correlação para os sinais de aceleração para os testes no regime transitório (fonte: O Autor, 2015).

7. CONCLUSÕES

Nesta dissertação, amostras de tubulação com diferentes tipos de defeitos foram examinadas. Utilizou-se transdutores de pressão e acelerômetros para realizar a medição dos sinais correspondentes. Algumas técnicas de análise de sinais, tais quais: *bispectrum*, transformada de *wavelet*, curtose e matemática morfológica foram aplicadas para identificar os danos.

Analisando os resultados obtidos é possível concluir que sensores de pressão não são apropriados para detectar defeitos similares aos estudados neste trabalho (mossa, corrosão, vazamento), considerando a metodologia proposta, uma vez que estes são caracterizados em altas frequências e estes tipos de sensores captam somente baixas frequências. Acelerômetros, porém, se mostraram mais eficientes para esta aplicação, uma vez que abrangem uma faixa maior de frequências.

Comparando as técnicas de processamento de sinais, verificou-se que os resultados obtidos pela curtose e matemática morfológica foram melhores que os encontrados pelos métodos *bispectrum* e transformada de *wavelet*, tanto para o ensaio estacionário quanto para o transiente. Para as duas primeiras técnicas, os melhores valores foram constatados nos sinais obtidos pelo terceiro acelerômetro, no qual está localizado mais próximo dos defeitos, como esperado.

Pode-se observar também que para os ensaios estacionários o defeito tipo moossa apresentou os maiores valores para o *bispectrum*, curtose e índice de energia relativa, comparando com os outros defeitos.

Destaca-se ainda, que as referidas análises foram efetuadas com base nos resultados obtidos nas práticas experimentais, no qual foram realizados sob as condições específicas detalhadas na seção 6.1.

Face ao exposto, conclui-se que é possível identificar a presença de danos em tubulações, bem como obter uma localização aproximada dos defeitos, utilizando sensores de aceleração com faixa de frequência adequada conjuntamente a utilização das técnicas de análise de sinais, curtose e matemática morfológica, visto que

os procedimentos experimentais executados simularam condições reais de operação e também ambientais.

O presente trabalho não avaliou a referida metodologia quanto a capacidade de quantificar a severidade dos danos, sendo uma proposta para trabalhos futuros.

Quanto a posição exata do defeito, esta não é possível determinar utilizando somente os métodos empregados, sendo assim necessário aplicar outras técnicas específicas de inspeção.

Em relação a determinação da posição do dano, ao reduzir a distância entre os acelerômetros, utilizando um número maior de sensores na linha, é possível ter uma boa estimativa do local onde encontra-se o defeito.

Finalmente conclui-se que a metodologia proposta, através a da utilização de acelerômetros conjuntamente as técnicas de Curtose e Matemática Morfológica, é uma ferramenta potencial para detecção de defeitos tubulações de gás, especialmente para aplicação no monitoramento de redes não-pigáveis, tanto aéreas quanto enterradas.

7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sequência do estudo desenvolvido neste trabalho, sugere-se:

- Realizar estudos complementares variando a severidade do dano, a fim de verificar a eficiência da metodologia proposta, utilizando acelerômetros e as técnicas de Curtose e Matemática Morfológica, no que refere-se a este requisito;
- Para detecção de defeitos em redes enterradas, verificar o efeito do solo no que refere-se ao amortecimento do sinal de vibração;
- Determinar o número de ótimo de acelerômetros a serem utilizados, bem como a tolerância da posição do defeito;
- Aplicar a referida metodologia, considerando a utilização de acelerômetros e das técnicas de Curtose e Matemática Morfológica, para identificação de defeitos em tubulações em PEAD (Polietileno de Alta densidade), uma vez que

estão sendo amplamente empregados na construção de redes de distribuição de Gás Natural; e

- Desenvolvimento de modelo matemático e de modelo numérico para ser implementado conjuntamente as técnicas de análise de sinais para determinar a posição exata dos danos.

REFERÊNCIAS

ABEGAS – Associação Brasileira das Empresas de Gás. Estatísticas. Disponível em <www.abegas.org.br/Site/?p=45266>. Acesso em: 15 março de 2015.

ABUSHANAB, W. S. **Inexpensive pipelines health evaluation techniques based on resonance determination, numerical simulation and experimental testing.** Engineering, 5, p. 337-343, 2013.

ALMEIDA, J. C. **Estudo Numérico e Experimental de Escoamentos Transitórios em Redes de Distribuição de Gás Natural.** 215 p. Tese. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2013.

ALMEIDA, J. C; VELÁSQUEZ, J. A.; BARBIERI, R. **Development and Experimental Validation of a Computational Model for the Analysis of Transient Events in a Natural Gas Distribution Network.** The Canadian Journal of Chemical Engineering 92 (10), p. 1176-1782, 2014.

ASME 31.8. **Gas transmission and distribution piping systems**, 2003.

ASTM E 569-97. **Standard practice for acoustic emission monitoring of structures during controlled Stimulation**, 1998.

BARBIERI, N., BARBIERI, R. **Study of Damage in Beams with Different Boundary Conditions.** World Academy of Science, Engineering and Technology, vol. 7, p. 115-121, 2013.

BARBIERI, N.; MARTINS, B. M.; BARBIERI, G. S. **Quality Control of Automotive Gearbox Based on Vibration Signal Analysis.** International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering, vol. 9, nº 6, p. 881-886, 2015.

BARRIOS, H.; VERGARA, C.; PAEZ, D.; GAMARRA, A.; PEÑA, D.; GONZÁLEZ, O.; VALDES, M. **Ultrasonic metal loss In-Line Inspection with pitting resolution of oleoducto de Colômbia, results compared to previous MFL.** Em: Rio Pipeline Conference and Exposition 2015, Rio de Janeiro, Brasil: Brazilian Petroleum, Gas, and Biofuels Institute - IBP, set. 2015.

BELLER, M.; SABIDO, C.; SCHALLER, D.; STEINVOORTE, S.; VAGES, S.; ZIMMERMANN, K. **Specialty solutions for the inspection of challenging pipelines.** Em: Rio Pipeline Conference and Exposition 2015, Rio de Janeiro, Brasil: Brazilian Petroleum, Gas, and Biofuels Institute - IBP, set. 2015.

BIGUS, G. A; BYSTROVA, N. A; GALKIN, D. I.; TRAVKIN, A. A. **Potencial of the acoustic emission method for estimating production pipeline metal damage.** *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 47 p. 788-789, 2012.

CHEN, Z.; GAO, N.; SUN, W.; CHEN, Q.; YAN, F. ZHANG, X., IFTIKHAR, M.; LIU, S.; REN, Z. **A Signal Based Triangular Structuring Element for Mathematical Morphological Analysis and Its Application in Rolling Element Bearing Fault Diagnosis.** Hindawi Publishing Corporation Shock and Vibration vol. 14, p. 1-16, 2014.

CHERAGHI, N.; ZOU, G. P.; TAHERI, F. **Piezoelectric-based degradation assessment of a pipe using fourier and wavelet analysis.** *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 20, p. 369-382, 2005.

COLLIS, W. B.; WHITE, P. R.; HAMMOND, J. K. **Higher-order spectra: the bispectrum and trispectrum.** *Mechanical Systems and Signal Processing* 12 (3), p. 375-394, 1998.

COSHAM, A.; HOPKINS, P.; LEIS, B. **Crack-like defects in pipelines: The relevance of pipeline-specific methods and standards**. Em: 9º International Pipeline Conference, Calgary, Canadá: International Petroleum Technology Institute, Pipeline Division. Set., 2012.

DEMMA, A.; ALLEYNE, D.; LEDESMA, V.N.; PEREZ, R.C. **Detection of corrosion in oil and gas pipelines using Guided Waves**. The European Corrosion Congress (EUROCORR), 2011.

DENG, W.; ZHAO, H.; ZOU, L.; YANG, X.; LIU, F.; CHEN, H. **A vibration signal process method based on wavelet packet and approximate entropy**. Journal of Process Mechanical Engineering, 0 (0), p. 1-11, 2014.

DOEBELIN, E. O. **Measurement Systems: Application and Design**. 4ª ed. Nova Iorque: EUA, McGraw-Hill, 1990.

DONG, Y.; LIAO, M.; ZHANG, X.; WANG, F. **Faults diagnosis of rolling element bearings based on modified morphological method**. Journal of Process Control 22, p. 436-449, 2011.

EGIG. **9th Report of European Gas Pipeline Incident Data Group (period 1970 – 2013)**. Disponível em: <<http://www.egig.eu/uploads/bestanden/ba6dfd62-4044-4a4d-933c-07bf56b82383>>. Acesso em 15 Abril de 2015.

FAERMAN, V. A.; CHEREMNOV, A. G.; AVRAMCHUK, V. V.; LUNEVA, E. E. **Prospects of frequency-time correlation analysis for detecting pipeline leaks by Acoustic Emission Method**. Em: XVII International Scientific Symposium in Honor of Academician M. A. Usov. IOP Publishing IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 21, 2014.

FREITAS, J. C. **Avaliação de integridade de dutos com mossas de topologia complexa com base em deformação equivalente**. 2009. 151 p. Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina. Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial.

GARCIA, R.; WRIGGLESWORTH, M.; ROSS, T. **New generation autonomous inline acoustic leak detection tool**. Em: Pipeline Technology Conference 2014, Berlin, Alemanha: Euro Institute for Information and Technology Transfer in Environmental Protection, mai. 2014.

GENTIL, V. **Corrosão**. 5ª Ed. Rio de Janeiro. Editora LTC, 2011.

GROSSL, G. **Avaliação do efeito de mossas em dutos de petróleo causadas pelo contato de identadores**. 2013. 120 p. Dissertação. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2013.

HAN, J.; REN, W.; SUN, Z. **Wavelet packet based damage identification of beam structures**. *International Journal of Solids and Structures* 42, p.6610-6627, 2005.

HILVERT, M.; BEUKER, T. **Assessment of SCC in natural gas transmission pipelines by EMAT ILI data**. Em: Rio Pipeline Conference and Exposition 2015, Rio de Janeiro, Brasil: Brazilian Petroleum, Gas, and Biofuels Institute - IBP, set. 2015.

KHANAM, S.; TANDON, N.; DUTT, J. K. **Fault size estimation in the outer race of ball bearing using discrete wavelet transform of the vibration signal**. Em: 2º International Conference on innovations in Automation and Mechatronics Engineering (ICIAME 2014). *Procedia Technology* 14, p. 12-19, 2014.

KOPP, G.; JÄGER, C.; WILLEMS, H. **On the application of statistical methods in inline inspection – An overview**. Em: Pipeline Technology Conference 2013, Berlin, Alemanha: Euro Institute for Information and Technology Transfer in Environmental Protection, mai. 2013.

LIANG; BO; IWNICK S.; ZHAO, Y. **Application of power spectrum, cepstrum, higher order spectrum and neural network analyses for induction motor fault diagnosis**. Mechanical Systems and Signal Processing 39 (1-2), p. 342-360, 2013.

LOPES, A. **Mechanical damage assessment using multiple data sets In line Inspection**. Em: Pipeline Technology Conference 2013, Berlin, Alemanha: Euro Institute for Information and Technology Transfer in Environmental Protection, mai. 2013.

MACHADO, L. D. **Inspeção por método de memória magnética em gasodutos da Bahiagás**. Em: Rio Oil & Gas Expo and Conference 2014, Rio de Janeiro, Brasil: Instituto Brasileiro de Petróleo – IBP, set. 2014.

MALLAT, S. **A wavelet tour of signal processing**. 2^a Ed. Londres: Inglaterra. Academic Press, 1999.

MENG, L.; YUXING, L.; WUCHANG, W., JUNTAO, F. **Experimental study on leak detection and location for gas pipeline based on acoustic method**. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 25. p. 90-102, 2012.

MOGHADAM, R. D.; SALARYAN, P.; BAGHERZADE, M. **Failure analysis of a steam condensate pipeline in 2nd refinery of south pars gas complex**. International Journal of Chemical and Biochemical Sciences vol. 7 , p. 47-51, 2015.

MMS. **Appraisal and development of pipeline defect assessment methodologies**. Minerals Management Service Contract n. 1435-01-CT-99-50001, Final Report, 172 p. Washington, 2002.

MOREIRA, A. P. E. **Gestão tecnológica do monitoramento da corrosão interna de dutos**. 95 p. Dissertação. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola de Química, 2012.

MORKEN BRASIL. **Método de Memória Magnética – MMM**. Disponível em: <<http://www.morkenbrasil.com.br/?page=igp>>. Acessado em 25 de junho de 2015.

MUHLBAUER, W.K.. **Pipeline Risk Management Manual**. 3 ed. USA: Gulf Professional Publishing, 392 p., 2004.

MURIGENDRAPPA, S.M.; MAITI, S.K., SRIRANGARAJAN, H.R. **Experimental and theoretical study on crack detection in pipes filled with fluid**. Journal of Sound and Vibration vol. 270 (4) p. 1013-1032, 2004.

NAVARRO, J. C; RUIZ, M.; PEREZ, O.; VILLAMIZAR, R.; MUJICA L. **Pipe leaks classification by using a data-driven approach based on features from cross-correlated piezo-vibration signals**. Em: 11º International Conference on damage Assessment of Structures (DAMAS 2015). IOP Publishing Journal of Physics: Conference Series 628, 2015.

NIKOLAOU N.G., ANTONIADIS, I.A.. **Rolling element bearing fault diagnosis using wavelet packets**. Ndt & E International 35.3, p. 197-205, 2002.

OLIVEIRA, H. R. **Gerenciamento da integridade de dutos: proposta de abordagem aos riscos geotécnicos em gasodutos de transmissão**. 155 p. Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina. Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2005.

OPS-DOT. **Estatísticas de acidentes em dutos no Estados Unidos da América**. Disponível em <<http://www.ops.dot.gov>>. Acesso em: 27 dezembro de 2014.

OZEVIN, D.; HARDING, J. **Novel leak localization in pressurized pipeline networks using acoustic emission and geometric connectivity**. International Journal of Pressure Vessels and Piping vol. 92 , p. 62-69, 2012.

PENG, X.; HAO, H.; LI, Z. **Application of wavelet packet transform in subsea pipeline bedding condition assessment**. Engineering Structures, vol. 39, p. 50-65, 2012.

PENG, X.; HAO, H.; LI, Z.; FAN, K. **Experimental study on subsea pipeline bedding condition assessment using wavelet packet transform**. Engineering Structures 48, p. 176-192, 2012.

PIPELINE OZ. Disponível em < <https://pipelinesoz.wordpress.com/2012/06/11/b-factor-and-penetration-resistance> >. Acesso em: 25 setembro de 2015.

PHYSICAL ACOUSTICS SOUTH AMERICA –PASA. **Inspeção de tubos com ondas guiadas de ultrassom**. Disponível em: < http://www.pasa.com.br/site/tubulacoes_gul.asp >. Acessado em 25 de junho de 2015.

POLLOCK, A. A. **Acoustic emission inspection**. Metals Handbook, 9ª Edição, vol. 17. ASM International, p. 278-294, 1989.

RAJ, A. S.; MURALI, N. **Early Classification of bearing fault using morphological operators and fuzzy inference**. IEEE Transactions on Industrial Electronics vol. 60 (2), 2013.

RAVANFAR, S. A.; RAZAK, H. A.; ISMAIL, Z.; MONAJEMI, H. **An improved method of parameter identification and damage detection in beam structures under flexural vibration using wavelet multi-resolution analysis**. Sensors, 15, p. 22750-22755, 2015.

RAZI, P; TAHERI F. **A vibration-based strategy for health monitoring of offshore pipelines girth-welds**. *Sensors*, 14, p. 17174-17191, 2014.

REZAEI, D.; TAHERI, F. **Health monitoring of pipeline girth weld using empirical mode decomposition**. *Smart Materials and Structures*, vol. 19 n° 5, 2010.

RIETH-HOERST, M.; BELLER, M.; BARBIAN, A. **High resolution ultrasonic in-line inspection: Special configurations and the added value they offer**. Em: Pipeline Technology Conference 2012, Berlin, Alemanha: Euro Institute for Information and Technology Transfer in Environmental Protection, mai. 2012.

RIZWAN, M.; PAUL, I. D. **Leak detection in Pipeline System based on flow induced vibration methodology in pipeline**. *International Journal of Science and Research*, vol. 4 (4), p. 3326-3330, 2015.

ROSEN. **Modular Inspection Technology**. Disponível em: <<http://www.rosen-group.com/global/solutions/services/service/modular-inspection-technology.html>>. Acessado em: 25 de junho de 2015.

SANCHES, I. J. **Compressão sem perdas de projeções de tomografia computadorizada usando a transformada de wavelet**. 136 p. Dissertação. Universidade Federal do Paraná. Pós-Graduação em Informática. 2001.

SARKER, L.; XIANG, Y.; ZHU, X. Q.; ZHANG, Y. Y. **Damage Detection of Circular Cylindrical Shells by Ritz Method and Wavelet Analysis**. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 14 (1), p. 62-74, 2015.

SAWICKI, J. T.; SEN, K. A., LITAK G. **Multiresolution wavelet analysis of dynamics of a cracked rotor**. *International Journal of Rotating Machinery*, p. 1-8, 2009.

SCHUBERT, H.; IDE, E.H.K.; GERBOVIC, H.; LUZ, R.; SHIOM, R.K. **A Realidade Prática Do Ensaio Por Ondas Guiadas No Brasil**. 11^a COTEQ, Porto de Galinhas, PE, 2011.

SERRA, J.. **Image analysis and Mathematical Morphology**. New York: Academic Press. 1982.

SINGH, H.; MANGAL S.; SINHA, B. K.; CHAKRABORTY, B. **Study for Selection of Optimal Filtering Method for Vibration Signals**. International Journal of Computer Applications, p. 21-24, 2012.

SILVA, H. A. T. **Uma metodologia para análise de danos macroscópicos em vigas**. 120 p. Dissertação. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2013.

SOUZA, A. H. T. **Ferramentas computacionais para análise de dutos com defeitos de corrosão**. 70 p. Dissertação. Universidade Federal de Pernambuco. Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2008.

SRIDHAR, S.; KUMAR, P. R.; PRADESH, A.; RAMANAIAH, K. V.. **Wavelet transform techniques for image compression – An evaluation**. International Journal Image, Graphics and Signal Processing, 2, p. 54-67, 2014.

TAHA, M. M. R.; NOURELDIN, A.; LUCERO, J. L.; BACCA, T. J. **Wavelet transform for structural health monitoring: A compendium of uses and features**. Structural Health Monitoring, vol. 5 (3), p. 267-295, 2006.

UMEADI, B.; JONES, K. G. **From condition to performance assessment of built components**. Em COBRA 2003 and Building Research Conference, Londres, Inglaterra: RICS Foundation, set. 2003.

UMEADI, B. B. N.; JONES K. G. **The development of an intelligent sensor for the monitoring of pipeline system integrity**. Em: SPE Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition 2008, Moscou, Rússia: Society of Petroleum Engineers, out. 2008.

UMEADI, B. B. N. **An Investigation into the Potential of Advanced Sensor Technology to Support the Maintenance of Pipeline Distributions Systems**. 219 p. Ph.D thesis, Londres, Inglaterra: University of Greenwich, 2010.

VÁÑA, Z.. **Discrete Wavelet Transform in Linear System Identification**. 122 p. Tese. Czech Technical University in Prague, 2014.

WICKS, A.; **Structural Health Monitoring**, volume 5. Editora Springer. Nova Iorque, 2014.

ZANETTE, L. A.; BARBIERI, N.; ALMEIDA, J. C. **Fault detection in natural gas distribution pipeline network based on vibration signal analysis**. Em: Rio Pipeline Conference & Exposition 2015, Rio de Janeiro, Brasil: Instituto Brasileiro de Petróleo – IBP, 2015.

ZHANG, L.; XU, J. ; YANG, J. ; YANG D. ; WANG, D. **Multiscale morphology analysis and its application to fault diagnosis**. Mechanical Systems and Signal Processing 22, p. 597-610, 2008.

ZHU, X. Q.; HAO, H.; PENG, X. L. **Dynamic assessment of underwater pipeline systems using statistical model updating**. International Journal of Structure Stability Dynamic vol. 8 (2), p. 271-297, 2008.