

Guilherme Ranzolin Piazzetta

**AVALIAÇÃO DE ESTANQUEIDADE EM VASOS DE PRESSÃO DE
PEQUENO PORTE COM TÉCNICAS ACÚSTICAS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Rodolfo César Costa Flesch, Dr.
Coorientador: Antonio Luiz Schalata Pacheco, Dr.

Florianópolis

2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Piazzetta, Guilherme Ranzolin

Avaliação de estanqueidade em vasos de pressão de
pequeno porte com técnicas acústicas / Guilherme
Ranzolin Piazzetta ; orientador, Rodolfo César
Costa Flesch, coorientador, Antonio Luiz Schalata
Pacheco, 2017.

192 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Avaliação de
estanqueidade. 3. Ensaios não destrutivos. 4.
Acústica. 5. Vasos de pressão. I. Flesch, Rodolfo
César Costa. II. Pacheco, Antonio Luiz Schalata.
III. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV.
Título.

Guilherme Ranzolin Piazzetta

**AVALIAÇÃO DE ESTANQUEIDADE EM VASOS DE PRESSÃO DE
PEQUENO PORTE COM TÉCNICAS ACÚSTICAS**

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 14 de setembro de 2017.

Prof. Jonny Carlos da Silva, Dr.
Coordenador do Curso
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Rodolfo César Costa Flesch, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Banca Examinadora:

Antonio Luiz Schalata Pacheco, Dr. (Presidente da banca)
Coorientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Arcanjo Lenzi, Ph.D.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Jefferson Luiz Brum Marques, Ph.D.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos meus queridos pais, Thaís e Ivanor, que nunca mediram esforços para que eu pudesse ter uma educação de qualidade.

AGRADECIMENTOS

Ao Pai Celestial pelas oportunidades que tem me proporcionado ao longo de minha caminhada.

À minha mãe Thaís e ao meu pai Ivanor, meus primeiros mestres, pelo amor e por todo o incentivo ao estudo desde os meus primeiros anos.

Ao meu irmão Gustavo pelo companheirismo, carinho e amizade.

À Paula, minha companheira de todas as horas, com quem divido dificuldades e compartilho vitórias diariamente, pelo amor e pela companhia durante mais essa etapa.

Ao meu orientador Rodolfo e ao meu coorientador Pacheco, exemplos de profissionais e de pessoas, pela amizade, dedicação e suporte.

Aos professores membros da banca, Arcanjo, Jefferson e Tiago, pela atenção dedicada ao trabalho e pelas contribuições sugeridas.

À Embraco pela parceria formada, facilitando a realização de experimentos e obtenção de resultados.

Ao professor Carlos Alberto Flesch, pela dedicação e experiência compartilhada nas disciplinas, e ao professor Arcanjo Lenzi, pela atenção e pelos conhecimentos compartilhados dentro e fora da sala de aula.

Ao colega Ahryman Nascimento pela amizade, pelos conhecimentos compartilhados e por atuar como um facilitador dos trabalhos experimentais.

A toda equipe do Labmetro pela amizade e também pelas críticas e discussões promovidas.

À Universidade Federal de Santa Catarina, minha casa em quase um terço de minha vida, por, mais uma vez, proporcionar-me um ensino de qualidade.

Ao Posmec pela estrutura e pelo corpo docente extremamente qualificado, e à Capes pelo auxílio durante a pós-graduação.

“Não se gerencia o que não se mede, não se mede o que não se define, não se define o que não se entende, e não há sucesso no que não se gerencia.”

(William Edwards Deming)

RESUMO

O requisito de estanqueidade em vasos de pressão é essencial para uma operação adequada, uma vez que vazamentos representam perda de eficiência, riscos ambientais e de saúde. Dentre os ensaios não destrutivos aplicados na produção desses equipamentos, a avaliação de estanqueidade é importante parte do controle de qualidade para identificação de possíveis defeitos. Neste trabalho, técnicas foram revisadas na literatura e aplicadas para identificar descontinuidades passantes na região do cordão de solda em vasos de pressão de pequeno porte. Como estudo de caso, quatro vasos de pressão foram avaliados em ambientes de laboratório e de fábrica. Três desses vasos possuem defeitos reais com diferentes taxas de vazamentos e o quarto foi empregado como referência de estanqueidade. O objetivo do estudo foi avaliar comparativamente três técnicas baseadas no método acústico: de ultrassom com ensaios no ar; de emissão acústica aplicada no ar e em meio líquido; de ultrassom em água (hidrofone). As respostas obtidas nos ensaios foram analisadas nos domínios do tempo e da frequência, a fim de identificar sinais gerados pelos vazamentos. A análise dos resultados revelou que, dentre as técnicas avaliadas, a que emprega o hidrofone obteve o melhor nível de detecção de vazamentos tanto em fábrica (para uma taxa de vazamentos na ordem de $0,124 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$) quanto em laboratório (na ordem de $0,018 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$).

Palavras-chave: Avaliação de estanqueidade. Ensaios não destrutivos. Acústica. Vasos de pressão.

ABSTRACT

The requirement for tightness in pressure vessels is essential for proper operation, since leaks represent loss of efficiency, and environmental and health risks. Among the non-destructive tests performed during the manufacturing of such equipments, the leak test is an important part of the quality control to identify possible tightness defects. In this work, techniques were reviewed in literature and applied for identification of through-wall discontinuities in the region of the weld bead of small pressure vessels. As a case study, four pressure vessels were tested in both laboratory and manufacturing environments. Three of those vessels have real manufacturing defects with different leak rates, and the fourth one was used as a reference of tightness. The objective was to comparatively evaluate three techniques based on the acoustic method: ultrasound applied in air; acoustic emission applied in air and in liquid medium; ultrasound applied in water (hydrophone). In order to identify the signals generated by the leaks, the results obtained in the tests were evaluated in time and frequency domains. The analysis of the results showed that, among the techniques evaluated, the one using the hydrophone obtained the best level of leak detection for both factory (for a leak rate of $0.124 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$) and laboratory (for a leak rate of $0.018 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$) environments.

Keywords: Tightness test. Nondestructive evaluation. Acoustics. Pressure vessels.

LISTA DE FIGURAS

2.1	Determinação da taxa de vazamento pelo método da bolha por imersão.	49
2.2	Curvas de pressão em ensaios de estanqueidade para objeto estanque e com vazamento.	52
2.3	Técnica passiva: turbulência causada pelo escoamento através de uma descontinuidade gerando sinal ultrassônico.	55
2.4	Técnica passiva: hidrofone posicionado próximo ao vaso de pressão pressurizado e imerso para detecção de bolhas que indicam vazamento.	56
2.5	Perfil de pulso acústico de uma única bolha.	58
2.6	Vazamento de fluido com medição por transdutor de emissões acústicas (EA).	60
2.7	Três estratégias para ensaios de estanqueidade com variações do meio de ensaio e do acoplamento do transdutor.	62
2.8	Técnica ativa: sinal ultrassônico inserido internamente ao objeto em ensaio é conduzido até o receptor externo.	63
3.1	Etapas da compressão do fluido refrigerante.	67
3.2	Esquema dos experimentos propostos.	68
3.3	Ilustração da base empregada para experimentos com ultrassom no ar.	70
3.4	Experimento empregando a técnica US passiva.	72
3.5	Circuito oscilador para acionamento do transmissor US.	73
3.6	Abertura de orifício para introdução de emissor US na técnica ativa.	73
3.7	Experimentos empregando a técnica passiva de emissões acústicas.	76
3.8	Sinal no tempo para medições de vazamento com hidrofone em água para banda de (2,5 a 5,0) kHz.	79
3.9	Experimento empregando a técnica passiva com hidrofone.	80
3.10	Resposta em frequência dos transdutores ultrassônicos Murata.	81
3.11	Resposta em frequência dos transdutores de emissões acústicas Vallen Systeme.	84
3.12	Sistema de medição de EA.	85
3.13	Gráficos de resposta do hidrofone D/140/H.	86
3.14	Fluxograma simplificado do software desenvolvido para análise de dados.	90

4.1	Diagrama de caixas das medições da técnica US passiva para o compressor #1. Descontinuidade alinhada à posição 10.	97
4.2	Diagrama de caixas das medições da técnica US passiva para compressor #1 com menor resolução (5°) em torno da descontinuidade (alinhada à posição 10).	100
4.3	Diagrama de caixas das medições da técnica US passiva para o compressor #2. Descontinuidade alinhada à posição 10.	100
4.4	Diagrama de caixas das medições da técnica US passiva para o compressor #3. Descontinuidade alinhada à posição 10.	101
4.5	Diagrama de caixas das medições da técnica US ativa. Descontinuidade alinhada à posição 1.	102
4.6	Respostas em frequência do transdutor VS75-V com acoplamento no compressor no ar.	106
4.7	Respostas em frequência do transdutor VS900-M com acoplamento no compressor no ar.	106
4.8	Respostas em frequência do transdutor VS75-V com acoplamento no compressor no ar em fábrica.	108
4.9	Respostas no tempo do transdutor VS75-V com acoplamento no compressor no ar em fábrica.	109
4.10	Respostas em frequência do transdutor VS900-M com acoplamento no compressor no ar em fábrica.	109
4.11	Respostas em frequência do transdutor VS75-V com acoplamento no compressor parcialmente imerso em água.	110
4.12	Respostas no tempo do transdutor VS75-V com acoplamento no compressor parcialmente imerso em água.	111
4.13	Respostas no tempo do transdutor VS75-V para os compressores #0 e #3, com acoplamento no compressor parcialmente imerso em água.	111
4.14	Respostas em frequência do transdutor VS900-M com acoplamento no compressor parcialmente imerso em água.	112
4.15	Respostas no tempo do transdutor VS900-M com acoplamento no compressor parcialmente imerso em água.	113
4.16	Vazamento do compressor #2 em diferentes meios.	114
4.17	Vazamento do compressor #3 em diferentes meios.	115
4.18	Respostas em frequência do transdutor VS75-V com acoplamento no compressor parcialmente imerso em etanol.	115

4.19 Respostas no tempo do transdutor VS75-V com acoplamento no compressor parcialmente imerso em etanol.	116
4.20 Respostas em frequência do transdutor VS900-M com acoplamento no compressor parcialmente imerso em etanol.	116
4.21 Respostas no tempo do transdutor VS900-M com acoplamento no compressor parcialmente imerso em etanol.	117
4.22 Respostas em frequência do transdutor VS75-V com acoplamento no compressor parcialmente imerso em água em fábrica.	118
4.23 Respostas no tempo do transdutor VS75-V com acoplamento no compressor parcialmente imerso em água em fábrica.	118
4.24 Respostas em frequência do transdutor VS900-M com acoplamento no compressor parcialmente imerso em água em fábrica.	119
4.25 Respostas no tempo do transdutor VS900-M com acoplamento no compressor parcialmente imerso em água em fábrica.	120
4.26 Respostas em frequência do transdutor VS75-V com acoplamento no tanque com compressor parcialmente imerso em água.	121
4.27 Respostas no tempo do transdutor VS75-V com acoplamento no tanque com compressor parcialmente imerso em água.	121
4.28 Respostas em frequência do transdutor VS900-M com acoplamento no tanque com compressor parcialmente imerso em água.	122
4.29 Respostas no tempo do transdutor VS900-M com acoplamento no tanque com compressor parcialmente imerso em água.	122
4.30 Respostas em frequência do transdutor VS75-V com acoplamento no tanque com compressor parcialmente imerso em etanol.	123
4.31 Respostas no tempo do transdutor VS75-V com acoplamento no tanque com compressor parcialmente imerso em etanol.	124
4.32 Respostas em frequência do transdutor VS900-M com acoplamento no tanque com compressor parcialmente imerso em etanol.	124

4.33	Respostas no tempo do transdutor VS900-M com acoplamento no tanque com compressor parcialmente imerso em etanol.	125
4.34	Respostas em frequência do transdutor VS75-V com acoplamento no tanque com compressor parcialmente imerso em água em fábrica.	126
4.35	Respostas no tempo do transdutor VS75-V com acoplamento no tanque com compressor parcialmente imerso em água em fábrica.	126
4.36	Respostas em frequência do transdutor VS900-M com acoplamento no tanque com compressor parcialmente imerso em água em fábrica.	127
4.37	Respostas no tempo do transdutor VS900-M com acoplamento no tanque com compressor parcialmente imerso em água em fábrica.	127
4.38	Respostas em frequência do hidrofone.	129
4.39	Respostas no tempo do hidrofone.	130
4.40	Respostas no tempo do hidrofone para os compressores #0 e #3.	130
4.41	Respostas em frequência do hidrofone em fábrica.	131
4.42	Respostas no tempo do hidrofone em fábrica.	131
4.43	Primeiros modos da decomposição empírica para o compressor #2 – laboratório.	133
4.44	Primeiros modos da decomposição empírica para o compressor #2 – fábrica.	134
4.45	Segundo e terceiro modos da decomposição empírica para o compressor #3 – laboratório.	135
4.46	Segundo e terceiro modos da decomposição empírica para o compressor #3 – fábrica.	136
A.1	Diferentes técnicas de ensaio de estanqueidade com hélio.	156
A.2	Uso de termografia infravermelha em ensaio de estanqueidade de vaso de pressão.	157
A.3	Diagrama de um sistema <i>schlieren</i> simples com uma fonte luminosa.	158
A.4	Foto de vazamento de gás liquefeito de petróleo (indicado na figura como LPG, do inglês <i>Liquefied Petroleum Gas</i>).	159
B.1	Exemplos de diferentes amostragens de um mesmo sinal.	166
B.2	Algoritmo do método CEEMDAN.	170
B.3	Sinais utilizados para análise com método CEEMDAN.	172

B.4	Quatro modos da decomposição do sinal original pelo método CEEMDAN.	173
C.1	Ciclo de refrigeração por compressão de vapor.	176
E.1	Modos 1, 2, 3, 4 e 5 – compressor #2 – laboratório. . . .	179
E.2	Modos 6, 7, 8, 9 e 10 – compressor #2 – laboratório. . .	180
E.3	Modos 11, 12, 13, 14 e 15 – compressor #2 – laboratório.	181
E.4	Modos 1, 2, 3, 4 e 5 – compressor #2 – fábrica.	182
E.5	Modos 6, 7, 8, 9 e 10 – compressor #2 – fábrica.	183
E.6	Modos 11, 12, 13, 14 e 15 – compressor #2 – fábrica. . .	184
E.7	Modo 16 – compressor #2 – fábrica.	185
E.8	Modos 1, 2, 3, 4 e 5 – compressor #3 – laboratório. . . .	186
E.9	Modos 6, 7, 8, 9 e 10 – compressor #3 – laboratório. . .	187
E.10	Modos 11, 12, 13, 14 e 15 – compressor #3 – laboratório.	188
E.11	Modos 1, 2, 3, 4 e 5 – compressor #3 – fábrica.	189
E.12	Modos 6, 7, 8, 9 e 10 – compressor #3 – fábrica.	190
E.13	Modos 11, 12, 13, 14 e 15 – compressor #3 – fábrica. . .	191
E.14	Modo 16 – compressor #3 – fábrica.	192

LISTA DE TABELAS

3.1	Queda de pressão nos compressores durante 10 min para cálculo de taxas de vazamento.	92
3.2	Taxas de vazamento calculadas para os compressores (relativas ao He).	93
4.1	Resultados do teste de Tukey com nível de confiança de 95% para os compressores #1 e #0 (Referência) – técnica US passiva.	99
4.2	Resultados do teste de Tukey com nível de confiança de 95% para o compressor defeituoso (técnica US ativa). . .	103
D.1	Resultados do teste de Tukey com nível de confiança de 95% para o compressor #2 (técnica US passiva).	177
D.2	Resultados do teste de Tukey com nível de confiança de 95% para o compressor #3 (técnica US passiva).	178

LISTA DE QUADROS

2.1	Comparação de diferentes taxas de vazamento. . . .	48
3.1	Características dos transdutores de ultrassom Murata MA40S4R e MA40S4S.	82
3.2	Especificações técnicas dos transdutores AE.	84
3.3	Características do hidrofone Neptune Sonar modelo D/140/H.	87
3.4	Características da placa de aquisição de dados modelo National Instruments modelo USB-6361. . .	87
3.5	Fontes de erros e incertezas para o dispositivo de aquisição de dados NI USB-6361	88
4.1	Comparativo dos resultados da aplicação das técnicas acústicas propostas quanto à identificação dos compressores avaliados.	137
A.1	Metodologia para escolha de ensaio para avaliação de estanqueidade.	161

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADC	Conversor analógico-digital (do inglês <i>Analog-to-Digital Converter</i>)
ANOVA	Análise de variância (do inglês <i>ANalysis Of VARIance</i>)
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BPVC	Código de caldeiras e vasos de pressão (do inglês <i>Boiler and Pressure Vessel Code</i>)
CC	Corrente Contínua
CEEMD	<i>Complementary Ensemble Empirical Mode Decomposition</i>
CEN	<i>European Comittee for Standardization</i>
EA	Emissões Acústicas
EEMD	Decomposição Empírica Conjunta de Modos (do inglês <i>Ensemble Empirical Mode Decomposition</i>)
EMD	Decomposição empírica de modos (EMD, do inglês <i>Empirical Mode Decomposition</i>)
END	Ensaaios Não Destrutivos
FFT	Transformada rápida de Fourier (do inglês <i>Fast Fourier Transform</i>)
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
He	Hélio
IMF	Função de modo intrínseco (do inglês <i>Intrinsic Mode Functions</i>)
LPG	<i>Liquefied Petroleum Gas</i>
NADA	Análise de dados assistida por ruído (do inglês <i>Noise-Assisted Data Analysis</i>)
NMAB	<i>National Materials Advisory Board</i>
PED	Diretiva para equipamentos de pressão (do inglês <i>Pressure Equipment Directive</i>)
RMS	Raiz média quadrática (do inglês <i>Root-Mean-Square</i>)
SI	Sistema internacional de unidades (do francês <i>Le Système International d'Unités</i>)
SONAR	Navegação e determinação da distância pelo som (do inglês <i>Sound Navigation and Ranging</i>)
TDOA	Diferença dos tempos de chegada (do inglês <i>Time Difference Of Arrival</i>)
TI	Termografia Infravermelha
US	Ultrassônico(s)
VIM	Vocabulário Internacional de Metrologia

LISTA DE SÍMBOLOS

α	nível de significância
γ	coeficiente de expansão adiabática
d	diâmetro médio da discontinuidade
f	frequência
k	coeficiente de proporcionalidade
L	comprimento do caminho da vazão
m_1	massa de gás no interior do vaso no início do ensaio
m_2	massa de gás no interior do vaso no fim do ensaio
m_i	massa em um instante i
M	massa molar
n	número de mols
P_{amb}	pressão ambiente
P_∞	pressão absoluta do líquido
P	pressão
P_1	pressão no interior do vaso no início do ensaio
P_2	pressão no interior do vaso no fim do ensaio
P_i	pressão do gás em um instante i
P_j	pressão do gás a jusante
P_m	pressão do gás a montante
Q	taxa de vazamento
R	constante universal dos gases
R_0	raio da bolha
r	raio do furo
Re	número de Reynolds
R_s	constante específica do gás
ρ	densidade do líquido
σ	desvio padrão
t	tempo
T_1	temperatura do gás no interior do vaso no início do ensaio
T_2	temperatura do gás no interior do vaso no fim do ensaio
T_i	temperatura do gás em um instante i
μ	viscosidade do fluido
v	velocidade de jato do vazamento
V	volume do vaso

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	33
1.1	Contextualização	34
1.2	Motivação	35
1.3	Objetivos	37
1.3.1	Objetivo geral	37
1.3.2	Objetivos específicos	37
1.4	Estrutura do documento	37
2	REVISÃO DA LITERATURA	41
2.1	Ensaio não destrutivo	41
2.1.1	Controle de qualidade na linha de manufatura de vasos de pressão	42
2.1.2	Taxas de vazamentos	44
2.2	Métodos de avaliação de estanqueidade	47
2.2.1	Método da bolha	48
2.2.2	Método da variação de pressão	50
2.2.3	Método acústico para ensaios de estanqueidade	52
2.2.3.1	Ensaio ultrassônicos - técnica passiva	53
2.2.3.2	Ensaio ultrassônicos - técnica passiva com hidrofone	56
2.2.3.3	Ensaio ultrassônicos - técnica passiva de emissões acústicas	58
2.2.3.4	Ensaio ultrassônicos - técnica ativa .	61
2.3	Considerações	63
3	DESENVOLVIMENTO	65
3.1	Caracterização do estudo de caso	65
3.2	Planejamento e metodologia de ensaios	67
3.2.1	Experimentos com ultrassom no ar	69
3.2.2	Experimentos com emissões acústicas	73
3.2.3	Experimentos com hidrofone	77
3.3	Aparato experimental	79
3.3.1	Transdutores	80
3.3.1.1	Transdutores ultrassônicos	81
3.3.1.2	Transdutores de emissões acústicas .	82
3.3.1.3	Hidrofone	85
3.3.2	Dispositivo de aquisição de dados	86
3.3.3	Software	89
3.4	Compressores para ensaio	90
3.5	Considerações	93

4	RESULTADOS	95
4.1	Ultrassom no ar	95
4.1.1	Técnica passiva	96
4.1.2	Técnica ativa	100
4.1.3	Discussão acerca dos resultados	102
4.2	Emissões acústicas	104
4.2.1	Acoplamento no compressor no ar	105
4.2.1.1	Ensaio realizado em laboratório	105
4.2.1.2	Ensaio realizado em fábrica	107
4.2.2	Acoplamento no compressor parcialmente imerso	109
4.2.2.1	Ensaio realizado em laboratório com água	110
4.2.2.2	Ensaio realizado em laboratório com etanol	113
4.2.2.3	Ensaio realizado em fábrica com água	117
4.2.3	Acoplamento na parede do tanque	119
4.2.3.1	Ensaio realizado em laboratório com água	120
4.2.3.2	Ensaio realizado em laboratório com etanol	122
4.2.3.3	Ensaio realizado em fábrica com água	125
4.2.4	Discussão acerca dos resultados	127
4.3	Hidrofone	128
4.3.1	Ensaio realizado em laboratório	129
4.3.2	Ensaio realizado em fábrica	130
4.3.3	Processamento digital dos sinais	131
4.3.4	Discussão acerca dos resultados	134
4.4	Considerações	136
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	141
5.1	Conclusões	141
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	143
	Referências	145
	Apêndice A Outros métodos de avaliação de estanqueidade	153
A.1	Método de detecção de gases halógenos	153
A.2	Método de detecção de hélio	154
A.3	Método da termografia infravermelha	155
A.4	Método <i>schlieren</i>	157
A.5	Escolha de métodos e técnicas para ensaio	159

Apêndice B	Processamento e análise de sinais	163
B.1	Amostragem de sinais	164
B.2	Decomposição empírica de modos (EMD)	167
Apêndice C	Princípio de funcionamento do sistema de refrigeração	175
Apêndice D	Testes de Tukey dos compressores #2 e #3	177
Apêndice E	Modos decompostos com o método CEEMDAN	179
E.1	Modos – compressor #2 em laboratório	179
E.2	Modos – compressor #2 em fábrica	182
E.3	Modos – compressor #3 em laboratório	186
E.4	Modos – compressor #3 em fábrica	189

1 INTRODUÇÃO

Uma preocupação encontrada em processos que envolvem transporte ou armazenamento de fluidos é associada ao risco de vazamentos. Tal preocupação é justificada pelas consequências severas que podem resultar de um vazamento, sejam elas de caráter financeiro, de saúde ou ecológico. Para evitar tais situações, esforços têm sido dispendidos na busca de técnicas confiáveis que permitam a identificação e, em algumas situações, a localização de vazamentos (MURVAY; SILEA, 2012; KANES et al., 2016).

Mann (1968) foi um dos primeiros a sistematizar os conhecimentos na área de avaliação de estanqueidade ao publicar um levantamento comparativo de métodos para detecção e localização de vazamentos. Motivado pelo requisito de estanqueidade em diversas aplicações, seu trabalho avalia desde técnicas mais simples, como a de variação de pressão e a da bolha com imersão, até técnicas mais complexas, como a do uso de espectrômetro de massa, de gases radioativos e de sinais acústicos associados ao vazamento.

Recentemente, Murvay e Silea (2012) compararam, de forma mais completa e abrangente, diversas técnicas aplicáveis à identificação e localização de vazamentos de gás em dutos de transporte. No trabalho desses autores, os métodos são classificados a partir de sua natureza, isto é: métodos baseados em hardware, que usam dispositivos especiais para identificação dos vazamentos; métodos baseados em software, que têm como princípio de identificação de vazamentos algoritmos associados a medições simples, como de pressão e temperatura; métodos não técnicos, que dependem apenas dos sentidos humanos ou de animais. A análise comparativa do desempenho de cada método levou em consideração: custo, velocidade de detecção, facilidade de uso e adaptação, estimativa do tamanho da taxa de vazamento e de sua localização. Ao apresentarem vantagens e desvantagens de cada técnica, concluíram que uma tendência seria o emprego de um sistema híbrido, que combinasse técnicas, hardware e software, de forma a cobrir limitações encontradas em técnicas isoladas.

Trabalhos que fazem o levantamento comparativo de métodos conhecidos, como os de Mann (1968) e Murvay e Silea (2012), podem servir de base para o planejamento de experimentos de avaliação de estanqueidade. Ainda assim, não se observa na literatura uma técnica universal adotada em todos os casos, isto é, diferentes técnicas podem ser adequadas para diferentes aplicações quando são levados em consideração o objeto em avaliação e os requisitos de ensaio. Este trabalho tem como alvo de estudo a

avaliação de estanqueidade em uma aplicação específica – vasos de pressão de pequeno porte – cuja apresentação é feita na seção 1.1, juntamente com a contextualização do presente trabalho.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O projeto de vasos de pressão é balizado por padronizações internacionais, como por exemplo a Diretiva para Equipamentos de Pressão (PED, do inglês *Pressure Equipment Directive*) 2014/68/EU da União Europeia (EU, 2014) e o Código para Caldeiras e Vasos de Pressão (BPVC, do inglês *Boiler and Pressure Vessel Code*) da Associação Americana de Engenheiros Mecânicos – ASME, do inglês *American Society of Mechanical Engineers* – (ASME, 2015). O código da ASME (2015) é o mais utilizado no Brasil, abordando projeto, fabricação, materiais envolvidos, recomendações operacionais, ensaios e controle de qualidade e testes (PEREIRA FILHO, 2004).

O BPVC da ASME (2015, p. 1, tradução nossa) define vasos de pressão como “recipientes para retenção de fluidos, gasosos ou líquidos, sob pressão interna ou externa”. Telles (1996, p. 1), por sua vez, afirma que “o nome vaso de pressão designa genericamente todos os recipientes estanques, de qualquer tipo, dimensão, formato ou finalidade, capazes de conter um fluido pressurizado”. De uma forma mais simples, Harvey (1985, p. 1, tradução nossa) define vasos de pressão apenas como “recipientes à prova de vazamentos”.

Quanto a suas funções, vasos de pressão podem ser designados para armazenamento, processamento ou acumulação intermediária de fluidos. Dada a abrangência de uso desses equipamentos, é possível listar diversas aplicações. Na área industrial, aparecem, por exemplo, como: reservatórios de ar comprimido, tanques de armazenamento de gases, dutos e trocadores de calor. Para todos os casos, existe sempre um invólucro estanque, externo e contínuo, que é denominado como parede de pressão do vaso, ou seja, o elemento que faz a contenção do fluido (TELLES, 1996; HARVEY, 1985).

Ainda que, em sua grande maioria, os vasos de pressão sejam projetados e construídos de maneira individualizada, existem casos nos quais são o produto final de uma linha de produção em série (TELLES, 1996). Nesses casos, um requisito do controle de qualidade é a identificação de defeitos anteriormente à entrega ao cliente final, a fim de reduzir custos e evitar problemas que envolvem o mal desempenho do sistema e riscos às pessoas e ao meio-ambiente (MARCHIÓ, 2014).

Dentre os possíveis defeitos encontrados na manufatura, a presença de descontinuidades passantes resultando em vazamentos de fluido são representativas por comprometerem uma característica básica do vaso de pressão, a sua estanqueidade (RAO, 1997). A norma brasileira para detecção de vazamentos, NBR 15571:2013 (ABNT, 2013b), adota os termos ‘defeito passante’ ou ‘descontinuidade passante’ para caracterizar o caminho pelo qual o fluido atravessa quando existe um vazamento no objeto em ensaio. No contexto deste trabalho, a expressão descontinuidade passante é empregada para referenciar defeitos que resultam vazamentos.

Dentre as razões mais comuns para inspecionar equipamentos quanto a sua estanqueidade estão: reduzir o desperdício de materiais e energia; garantir que o sistema apresente confiabilidade para operação durante seu tempo de vida; evitar contaminações ambientais por vazamentos quando substâncias poluentes são armazenadas (WOOD, 1992). Na indústria de manufatura, ensaios não destrutivos atuam como forma de garantia da qualidade e estão relacionados aos esforços que o fabricante dedica ao processo para aumentar a confiança do consumidor em seu produto (JACKSON; SHERLOCK, 1998; RAO, 1997).

1.2 MOTIVAÇÃO

Métodos e técnicas de avaliação de estanqueidade de equipamentos são assuntos recorrentes em artigos científicos, relatórios técnicos e projetos de pesquisa há décadas (MURVAY; SILEA, 2012). A necessidade de encontrar pequenos vazamentos em sistemas a vácuo motivou Nier et al. (1947) a aplicarem experimentalmente o espectrômetro de massa para identificação de vazamentos usando o hélio como gás de ensaio. Esse método se mostrou vantajoso em relação aos normalmente utilizados na época, como o método de variação de pressão ou de formação de bolhas, nos quesitos: tempo de ensaio, contaminação do sistema em ensaio e fechamento momentâneo do vazamento devido ao fluido de ensaio.

Pesquisas recentes mostram que ainda existem motivações para que algumas barreiras de conhecimentos nessa área sejam ultrapassadas. Exemplos disso são as publicações de Tian et al. (2016), que fazem um estudo de detecção em tempo real de vazamentos de amônia em tubulações utilizando medições de pressão e vazão do fluido, e de Ostapkowicz (2016), que também aborda a identificação de vazamentos em tubulações propondo algoritmos

para análise do ponto de inflexão da pressão e do gradiente causados pelo vazamento. Chraim, Erol e Pister (2016) propõem em seu trabalho identificar vazamentos de gás em ambiente industrial com a instalação de uma rede de dispositivos de monitoramento sem fio. Yu e Li (2017) investigam experimentalmente as emissões acústicas causadas por um vazamento em conexões de tubos galvanizados e Tao et al. (2015), por sua vez, introduzem uma técnica de localização de vazamentos em vasos de pressão utilizando o princípio ultrassônico de identificação de vazamentos e um algoritmo de correlação para localização da fonte sonora.

Quando se trata especificamente de avaliações de estanqueidade empregando o método acústico, não há consenso na literatura sobre a técnica de ensaio mais adequada, uma vez que particularidades são encontradas em diferentes aplicações. Por exemplo, Matas (2010) aborda ensaios de estanqueidade em tubos de pressão de amortecedores automotivos utilizando transdutores de emissões acústicas. O trabalho de Moon et al. (2009) apresenta um estudo de caso no qual uma técnica ultrassônica ativa e outra passiva são empregadas para avaliar a estanqueidade de um tanque de combustível da indústria automotiva. Tao et al. (2015) propõem a localização de vazamentos a partir do sinal acústico gerado pelo escoamento de gás de um vaso pressurizado utilizando-se um arranjo de transdutores ultrassônicos e processamento do sinal com algoritmo de análise da diferença dos tempos de chegada (TDOA, do inglês *Time Difference Of Arrival*). Hunaidi e Chu (1999) empregaram um acelerômetro e um hidrofone para identificação e localização de vazamentos em tubos plásticos de sistema de distribuição de água e, como resultado, concluíram que a frequência do sinal estava relacionada ao tipo e à taxa de vazamento, pressão do fluido e estação do ano na qual as medições foram feitas. Um último exemplo ilustra uma aplicação diferente das citadas anteriormente. LAÏNE et al. (1998) usaram hidrofones para monitorar acusticamente a integridade de membranas utilizadas na remoção de bactérias e cistos da água e, experimentalmente, identificaram que danos na fibra durante a filtração resultam em um aumento no nível acústico medido.

Ainda que os trabalhos citados anteriormente empreguem métodos distintos em diferentes aplicações, uma característica comum a todos é que cada estudo experimental é aplicado a um problema específico e significativo em seu respectivo campo, muitas vezes motivado por uma demanda industrial. O presente trabalho também tem como motivação suprir dificuldades encontradas

pela indústria. Neste caso específico, busca-se estudar métodos de avaliação de estanqueidade de vasos de pressão de pequeno porte para que prejuízos econômicos, ambientais ou de saúde decorrentes de vazamentos possam ser minimizados ou evitados.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Explorar experimentalmente técnicas acústicas da literatura para avaliação de estanqueidade aplicadas na identificação de descontinuidades passantes na região do cordão de solda em vasos de pressão de pequeno porte (de volume interno na ordem de $3,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$).

1.3.2 Objetivos específicos

- revisar a literatura para identificar o estado da arte em métodos para avaliação de estanqueidade, dando ênfase a técnicas do método acústico;
- selecionar e caracterizar vasos com diferentes defeitos reais de produção, que tornem possível e representativa a análise comparativa das técnicas selecionadas;
- planejar e implementar bancadas de ensaios para realização de experimentos, atendendo aos requisitos de cada técnica selecionada;
- realizar experimentos em ambiente de laboratório e fábrica, aplicando as técnicas selecionadas aos vasos de pressão de pequeno porte caracterizados, caso abordado neste trabalho;
- analisar criticamente os resultados dos experimentos para concluir a respeito da aplicabilidade e das limitações das técnicas de avaliação de estanqueidade, em laboratório e em fábrica.

1.4 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

O capítulo 2 apresenta os resultados de uma revisão da literatura para ensaios não destrutivos com foco em métodos de ensaios de estanqueidade usados no controle da qualidade de produção de vasos de pressão. O capítulo é dividido de forma a apresentar, inicialmente, conceitos de ensaios não destrutivos aplicados a vasos de pressão e de taxa de vazamento. Em seguida, faz a revisão de

diferentes métodos de ensaio para avaliação de estanqueidade, trazendo princípios de medição e aplicações encontradas da literatura.

O capítulo 3 aborda o estudo de caso usado para comparação de técnicas de avaliação de estanqueidade. São propostos três grupos de experimentos que fazem uso de técnicas acústicas aplicadas à identificação de vazamentos em vasos de pressão de pequeno porte. Também apresenta os materiais empregados nas medições, os quais compõem o sistema de medição, e os detalhes dos softwares empregados para análise dos sinais medidos. Compressores herméticos de refrigeração foram empregados como objetos de estudo neste trabalho, porém as técnicas e suas metodologias foram pensadas para vasos de pressão de pequeno volume de forma geral. Adicionalmente, descrevem-se os procedimentos de medição para caracterização da taxa de vazamento de cada um dos compressores empregados nos ensaios de estanqueidade.

O capítulo 4 mostra e compara os resultados obtidos para cada nível de vazamento ao se aplicar cada uma das técnicas propostas. Para cada técnica, são comparados os resultados das medições em laboratório e em ambiente de fábrica, onde a perturbação decorrente de interferências vibro-acústicas e eletromagnéticas do ambiente é significativa. Os resultados também exploram possíveis variações de posicionamento dos transdutores na medição e do meio a que os compressores são submetidos, a fim de avaliar o comportamento do vazamento quanto ao sinal acústico gerado. Os resultados são apresentados no domínio da frequência e no domínio do tempo, de acordo com particularidades encontradas em cada técnica.

O capítulo 5 traz as considerações finais gerais do trabalho. Nele é avaliado o alcance dos objetivos propostos face aos principais resultados obtidos. Também são sugeridas propostas de trabalhos futuros com o objetivo de complementar o estudo realizado neste trabalho.

Os apêndices apresentados na parte final do documento trazem informações complementares ao que é exposto nos capítulos do documento. O apêndice A apresenta outros métodos de avaliação de estanqueidade aplicáveis a vasos de pressão, que não foram empregados no desenvolvimento do presente trabalho. O apêndice B aborda conceitos de processamento e análise de sinais. O apêndice C faz uma breve revisão sobre sistemas de refrigeração por compressão de vapor, com destaque para seus principais elementos e para o funcionamento do ciclo de refrigeração. O apêndice D mostra resultados de análises estatísticas empregadas na comparação de resulta-

dos obtidos nos ensaios com transdutores ultrassônicos. O apêndice E apresenta todos os modos obtidos a partir da decomposição empírica de modos (EMD, do inglês *Empirical Mode Decomposition*) para os dados medidos nos compressores em ensaio, tanto para medições em laboratório quanto em fábrica.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo consiste em uma revisão da literatura que apresenta os fundamentos teóricos relacionados ao trabalho e ao estado da arte em ensaios não destrutivos para avaliação de estanqueidade. A seção 2.1 apresenta as principais definições e conceitos associados a ensaios não destrutivos, sempre que possível direcionando-os para o estudo de ensaios de estanqueidade. A seção 2.2 aborda princípios e aplicações práticas de métodos para identificação e localização de vazamentos (outros métodos são apresentados no apêndice A, página 153). Esta seção também apresenta técnicas para ensaios de estanqueidade que utilizam o método acústico, as quais servem de base sobre a qual é desenvolvido o trabalho experimental.

2.1 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Ensaio Não Destrutivo (END) são definidos por Trimm (2012, p. 2, tradução nossa) como “métodos usados para testar uma peça, material ou sistema sem prejudicar sua futura usabilidade”. Por outro lado, denominam-se ensaios destrutivos aqueles em que podem ocorrer a destruição ou modificação mecânica do corpo de prova, impossibilitando seu uso posterior, como, por exemplo, em avaliações de fadiga, dureza e resistência mecânica (HELLIER, 2001).

O princípio básico dos END é determinar a qualidade ou integridade de um sistema, peça ou material, mantendo-o operacional. Para isso, faz-se uso de um fenômeno físico, tipicamente referenciado na literatura como parâmetro de interrogação, que interage e é influenciado por certas características do objeto em avaliação, tipicamente referenciadas como parâmetros interrogados (SHULL, 2002).

No contexto de END, a palavra ‘método’ é utilizada para um grupo de técnicas de ensaio que compartilham um fenômeno físico. Por sua vez, a palavra ‘técnica’ denota uma forma como o método é adaptado à aplicação. Os END compreendem uma grande gama de técnicas que utilizam certos métodos para avaliar as condições do objeto em ensaio (TRIMM, 2012).

Existem ainda outros termos utilizados para referir-se às práticas de avaliação e inspeção de forma não destrutiva. Os termos mais comumente empregados são ‘avaliação não destrutiva’, ‘exame não destrutivo’, ‘inspeção não destrutiva’ e ‘ensaio não destrutivo’. Esse último é o mais encontrado na literatura e é amplamente empregado no presente trabalho (SHULL, 2002).

Existem certos conceitos referentes aos END que são muitas vezes mal entendidos. Um deles é que esses ensaios asseguram, de certa forma, que uma peça ou sistema funcionará adequadamente após a avaliação. Isso não é necessariamente verdade, pois todo método de ensaio apresenta certas limitações. Em muitos casos, mais de um método é utilizado em cada ensaio para que essas limitações sejam superadas. Ao adotar técnicas de ensaio é essencial que as suas limitações sejam previamente conhecidas. Outro equívoco envolve o pressuposto de que uma peça aprovada em ensaio não destrutivo seguindo requisitos de códigos ou normas não pode apresentar defeitos futuros. Códigos e normas definem níveis de aceitação e rejeição para descontinuidades, mas não garantem que todas as peças com descontinuidades aceitáveis não apresentarão problemas quando em operação. Isso traz à tona a necessidade de algum tipo de monitoramento ou avaliação da peça ou sistema em serviço (HELLIER, 2001).

Quando e quanto inspecionar também são questões bastante particulares de cada situação e organização, pois dependem de recursos econômicos e questões regulamentares. Como a quantidade exata de peças defeituosas é desconhecida, geralmente são usados métodos estatísticos para que se chegue a um número representativo de peças a serem inspecionadas. Em casos nos quais uma falha pode comprometer não apenas a operacionalidade dos equipamentos, mas também envolver riscos ambientais e de segurança, como por exemplo em reatores nucleares, é comum que requisitos regulamentares exijam inspeção completa (SHULL, 2002).

2.1.1 Controle de qualidade na linha de manufatura de vasos de pressão

Nas indústrias de manufatura, ensaios não destrutivos estão intimamente ligados aos processos produtivos especialmente para: assegurar a integridade e a confiabilidade dos produtos; evitar falhas e prevenir acidentes; aumentar a lucratividade; assegurar a satisfação do cliente, mantendo a reputação do fabricante; auxiliar no projeto de produto; manter o processo de produção sob controle; reduzir custos de manufatura; certificar que os equipamentos de manufatura estejam operacionais (JACKSON; SHERLOCK, 1998).

Segundo Hellier (2001), END são efetivamente usados para:

- inspeção de matéria-prima antes do processamento;

- avaliação de peças e produtos durante o processamento, como forma de controle de processo;
- inspeção de produtos finalizados;
- avaliação de produtos (e estruturas) após colocadas em serviço (*in loco*).

Embora END não possam garantir que falhas deixarão de existir, eles possuem papel significativo para minimizar sua ocorrência. Outras variáveis, como um projeto inadequado e o uso impróprio, são fatores que podem contribuir para uma eventual falha, mesmo se as avaliações corretas forem aplicadas (HELLIER, 2001).

O comitê de avaliações não destrutivas do Conselho Consultivo Nacional de Materiais (NMAB, do inglês *National Materials Advisory Board*) dos EUA classificou as técnicas de ensaio em seis categorias principais, a partir dos métodos associados: visual; radiação; eletromagnético; vibração mecânica; térmico e químico. Cada método pode ser caracterizado em termos de cinco fatores principais (TRIMM, 2012):

- fonte de energia ou meio utilizado para avaliar o objeto (ex.: raios X, ondas ultrassônicas ou radiação térmica);
- natureza dos sinais e fenômenos resultantes da interação com o objeto (ex.: atenuação de raios X ou reflexão das ondas ultrassônicas);
- formas de detecção ou sensoramento dos sinais resultantes (ex.: cristal piezelétrico ou bobina de indução);
- meios de indicação e registro dos sinais (ex.: medidor de deflexão, osciloscópio ou radiografia);
- base para interpretação dos resultados (ex.: indicação direta ou indireta, quantitativa ou qualitativa).

O objetivo de todos os métodos de END é fornecer informações a respeito de parâmetros de peças ou materiais em análise. Esses parâmetros podem ser, por exemplo: de descontinuidades; estruturais; dimensionais e metrológicos; de propriedades físicas ou mecânicas; de resposta dinâmica (TRIMM, 2012). Cada método se diferencia de outro por: princípios relativos ao fenômeno físico subjacente; sua aplicação em determinados materiais, peças e indústrias; vantagens de uso (custos, dificuldade técnica, riscos etc.); e limitações (HELLIER, 2001).

Para o caso da fabricação de vasos de pressão, as técnicas de ensaios não destrutivos são normalmente utilizadas para fornecer meios de verificar falhas em soldas, chapas, peças fundidas e forja-

das, antes, durante e após a manufatura. Várias seções do Código de Caldeiras e Vasos de Pressão (BPVC) referem-se também a métodos de ensaios não destrutivos para detecção de descontinuidades internas e externas em peças fabricadas. A subseção A da seção V do Código descreve os métodos a serem usados e inclui alguns não citados por Trimm (2012) e por Hellier (2001). O BPVC menciona exames radiográficos, ultrassônicos, por líquido penetrante, por partícula magnética, por correntes parasitas (*eddy current*), visual, por emissões acústicas e ensaios de estanqueidade (ELLENBERGER, 2004). Nos casos em que é importante garantir a estanqueidade do vaso a um nível aceitável, a escolha do método de ensaio depende do seu nível de detecção de vazamentos e da taxa de vazamentos permitida para cada aplicação (RAO, 1997). Mais detalhes sobre a seleção de métodos adequados para ensaios de vazamentos são expostos na seção A.5 do apêndice A, na página 159.

2.1.2 Taxas de vazamentos

O termo ‘vazamento’ faz menção à perda de fluido por descontinuidades do material. Nesse contexto, a expressão ‘taxa de vazamento’ é adotada para se referir à vazão de fluido que escoou pela descontinuidade passante que causa o vazamento (BIRAM; BURROWS, 1964; JACKSON; SHERLOCK, 1998).

A taxa de vazamento é definida como a quantidade de gás (massa) que atravessa uma dada descontinuidade em um determinado intervalo de tempo. A quantidade de gás, por sua vez, é descrita pelo produto entre a pressão e o volume e é frequentemente definida para valores padrão de pressão e temperatura, tipicamente a pressão atmosférica ao nível do mar (101,3 kPa) e uma temperatura de 0 °C. A definição de quantidade de gás pode ser entendida fazendo uso da lei dos gases ideais ($PV = nRT$), onde: P é a pressão do gás, V o volume do gás, n é a quantidade de substância do gás (em mols), R é a constante universal dos gases e T é a temperatura absoluta do gás. A partir dessa lei é possível notar que o produto entre a pressão e o volume é diretamente proporcional à quantidade de gás ($PV \propto n$) contida no vaso de pressão (ou em qualquer recipiente fechado), dado que a temperatura é assumida constante. Correções do efeito provocado pela temperatura são necessárias se ela mudar significativamente durante o ensaio de vazamento. Assim, a unidade SI para a taxa de vazamento de gás é pascal metro cúbico por segundo ($\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$) (JACKSON; SHERLOCK, 1998; PAYÃO; SCHMIDT; SCHRÖDER, 2000).

Um modelo comum, conhecido como equação de Hagen Poiseuille e representado pela equação (2.1), considera as dimensões geométricas da descontinuidade e as propriedades físicas do fluido para descrever o vazamento através de um pequeno furo (PREGELJ; MOZETIC, 1999; PAYÃO; SCHMIDT; SCHRÖDER, 2000; SUTERA; SKALAK, 1993). Apesar de a unidade de medida para a taxa de vazamento no SI ser o pascal metro cúbico por segundo ($\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$), é comum encontrar diversas referências que usam a unidade milibar litro por segundo ($\text{mbar}\cdot\text{l}/\text{s}$). A relação entre essas duas unidades é: $1 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s} = 10 \text{ mbar}\cdot\text{l}/\text{s}$.

$$Q = \frac{\pi r^4}{16L\mu} (P_1^2 - P_2^2), \quad (2.1)$$

em que:

Q é a taxa de vazamento [$\text{mbar}\cdot\text{l}/\text{s}$];

r é o raio do furo [m];

L é o comprimento do caminho da vazão [m];

P_1 é a pressão no interior do vaso no início do ensaio [bar];

P_2 é a pressão no interior do vaso no fim do ensaio [bar];

μ é a viscosidade do fluido.

Em geral, sistemas fechados que contêm gases respondem a vazamentos com uma variação em sua pressão interna. Essa variação pode também ser usada para se determinar a taxa de vazamento correspondente. Para isso, é necessário que outras variáveis do sistema, além da variação de pressão, sejam conhecidas e que o gás pressurizado no interior do sistema obedeça à lei dos gases ideais (JACKSON; SHERLOCK, 1998).

Quando o volume do vaso de pressão é constante, a massa de gás em seu interior em certo instante de tempo i pode ser descrita pela equação (2.2) (JACKSON; SHERLOCK, 1998).

$$m_i = \frac{P_i V}{R_s T_i}, \quad (2.2)$$

em que:

- m_i é a massa de gás no interior do vaso em um instante i [kg];
- P_i é a pressão do gás no interior do vaso no instante i [bar];
- V é o volume do vaso [l];
- R_s é a constante específica do gás dada pelo quociente entre a constante universal dos gases e a massa molar do gás de ensaio (R/M);
- T_i é a temperatura do gás no interior do vaso no instante i [bar].

Se dois instantes são considerados como início ($i = 1$) e fim ($i = 2$) de um ensaio, a diferença entre m_1 e m_2 expressa a perda de massa causada pelo vazamento de gás durante o período, e pode ser representada pela equação (2.3):

$$m_1 - m_2 = \left(\frac{P_1}{T_1} - \frac{P_2}{T_2} \right) \frac{V}{R_s}, \quad (2.3)$$

em que:

- m_1 é a massa de gás no interior do vaso no início do ensaio [kg];
- m_2 é a massa de gás no interior do vaso no fim do ensaio [kg];
- P_1 é a pressão no interior do vaso no início do ensaio [bar];
- P_2 é a pressão no interior do vaso no fim do ensaio [bar];
- V é o volume do vaso [l];
- R_s é a constante específica do gás dada pelo quociente entre a constante universal dos gases e a massa molar do gás de ensaio (R/M);
- T_1 é a temperatura do gás no interior do vaso no início do ensaio [bar];
- T_2 é a temperatura do gás no interior do vaso no fim do ensaio [bar].

A mudança na quantidade de gás (massa) dentro do sistema fechado (no contexto do trabalho, vaso de pressão) durante o período de ensaio (para um gás específico e sem ocorrer variação na temperatura) define a taxa de vazamento proporcionada pela descontinuidade nesse sistema. Desse modo, a taxa de vazamento, Q , pode ser expressa como função do volume do vaso e da variação de pressão, como mostrado na equação (2.4), considerando-se a pres-

são atmosférica também constante durante o ensaio.

$$Q = \frac{\Delta m R_s T}{\Delta t} = \frac{\Delta P V}{\Delta t}, \quad (2.4)$$

em que:

Q é a taxa de vazamento [mbar·l/s];

ΔP é a variação de pressão [mbar];

V é o volume do vaso [l];

Δt é o tempo de ensaio [s].

Para um dado orifício em um vaso de pressão, ou sistema qualquer, a ser testado, as taxas de vazamento são diferentes para cada fluido utilizado. Por essa razão, é importante que o fluido empregado no ensaio seja sempre indicado. Geralmente, os vazamentos são expressos como uma taxa equivalente de gás hélio, uma vez que ele tem baixa viscosidade e massa molar relativa (JACKSON; SHERLOCK, 1998; PREGELJ; MOZETIC, 1999).

O quadro 2.1 permite uma visão geral sobre as relações entre diferentes taxas de vazamento, diâmetros de descontinuidades e quantidade de fluido que passa por elas. Esses valores são apresentados de forma a representar as características típicas de vários vazamentos.

2.2 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE ESTANQUEIDADE

Muitos métodos têm sido usados para detectar e medir vazamentos. Os ouvidos humanos são ‘bons sensores’ quando vazamentos com ordem de 10^{-2} Pa·m³/s ou maiores estão presentes. A formação de bolhas pode ser detectada pelos olhos humanos quando objetos com taxas de vazamento superiores a 10^{-5} Pa·m³/s são submersos em água. Quando há vazamentos menores ou as condições não são adequadas (alto nível de interferência de fundo, peças que não são impermeáveis, instalações subterrâneas, geometria complexa etc.), sua identificação requer métodos mais sofisticados (MIX, 2005; ASTM, 2011).

Dentre os vários métodos de ensaio, Rao (1997) cita três que são tipicamente utilizados na indústria para controle de qualidade em vasos de pressão: o método da bolha com pressurização, o método de detecção de gases halógenos e o de detecção de gás hélio. As seções seguintes (2.2.1 a 2.2.3) são destinadas a abordar o método da bolha e outros também empregados na indústria e citados no *Nondestructive Testing Handbook* por Jackson e Sherlock (1998).

Os métodos de detecção de gases halógenos e de detecção de gás hélio são apresentados, respectivamente, nas seções A.1 (página 153) e A.2 (página 154) do apêndice A.

Quadro 2.1: Comparação de diferentes taxas de vazamento.

Taxa de vazamento [mbar·l/s]	Diâmetro da descontinuidade	Vazamento através de uma descontinuidade ($\Delta P = 1 \text{ bar}$)
10^0	0,1 mm	Torneira pingando água
10^{-2}		Estanque para água
10^{-3}	30 μm (diâmetro de um fio de cabelo, aproximadamente)	
10^{-6}		Aproximadamente 1 cm^3 de perda de hélio em 12 dias
10^{-8}	Diâmetro capilar de 0,4 μm (para uma espessura de parede de 2 mm), isto é, uma relação entre diâmetro e comprimento de 1/5000	Aproximadamente 3 ml de perda de hélio em 1 ano
10^{-10}		‘Tecnicamente estanque’
10^{-11}		Aproximadamente 1 cm^3 de perda de hélio em 3 mil anos

Valores relativos ao hélio

Fonte: adaptado de Payão, Schmidt e Schröder (2000).

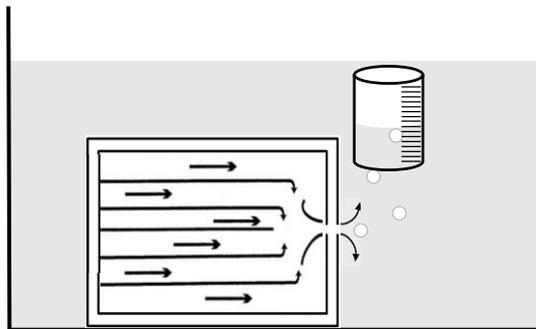
2.2.1 Método da bolha

O método da bolha tem como objetivo principal tornar visível o desprendimento de bolhas de uma descontinuidade passante na superfície do objeto em ensaio, possibilitando a identificação do local do vazamento. Para criar essa condição, inicialmente é estabelecido um diferencial de pressão na superfície a ser testada utilizando

gás (normalmente ar ou nitrogênio). Um líquido de teste, tipicamente água, é então colocado em contato com o lado de menor pressão da superfície. Caso haja um vazamento, poderão ser vistas bolhas desprendendo-se da superfície do objeto em teste (JACKSON; SHERLOCK, 1998; PAYÃO; SCHMIDT; SCHRÖDER, 2000).

Normalmente o método é empregado para se fazer uma análise qualitativa da estanqueidade do objeto em ensaio, isto é, se existe o vazamento e sua localização. Porém, também é possível determinar a taxa de vazamento por meio das bolhas resultantes. Um exemplo disso é a medição com o auxílio de uma proveta graduada, posicionada de maneira a capturar as bolhas resultantes do vazamento, conforme ilustrado na figura 2.1 (PAYÃO; SCHMIDT; SCHRÖDER, 2000).

Figura 2.1: Determinação da taxa de vazamento pelo método da bolha por imersão.



Fonte: adaptado de Payão, Schmidt e Schröder (2000).

Segundo Payão, Schmidt e Schröder (2000), o cálculo para conversão do volume de gás na proveta em taxa de vazamento do gás é dada pela equação (2.5).

$$Q = \frac{P_{amb}\Delta V}{\Delta t}, \quad (2.5)$$

em que:

- Q é a taxa de vazamento [mbar·l/s];
- P_{amb} é a pressão ambiente [mbar];
- ΔV é a variação de volume [l];
- Δt é o tempo de ensaio [s].

O processo de formação das bolhas que resultam da vazão de gás através de uma descontinuidade depende não só das condições de pressão, mas também das propriedades físicas do líquido e do gás usados no ensaio. Sendo assim, a sensibilidade do método pode ser aumentada significativamente ao se alterar essas variáveis. Ao se substituir a água por um líquido de tensão superficial mais baixa, tal como metanol ou etanol, com a mesma pressão aplicada é possível a formação de uma bolha em uma descontinuidade de diâmetro três vezes menor do que com água. Além disso, a utilização de um líquido com tensão superficial mais baixa torna possível a identificação de taxas de vazamentos até cem vezes menores do que o limite detectável quando as bolhas são formadas em água. A frequência de formação das bolhas também pode aumentar com líquidos de baixa tensão superficial e com gases de baixa viscosidade e pequeno peso molecular. Adicionalmente, o aumento do diferencial de pressão também provoca efeito semelhante (BIRAM; BURROWS, 1964).

Existem ainda outras técnicas do método da bolha que não necessitam da imersão total do objeto em ensaio. Por exemplo, a técnica de bolha com solução formadora de espuma, na qual tal solução é colocada na superfície a ser testada, possibilitando a formação de bolhas e indicação de vazamentos (PAYÃO; SCHMIDT; SCHRÖDER, 2000).

O método da bolha possui vantagens que ainda o tornam muito utilizado. Ele proporciona rápida identificação e localização do vazamento com custo baixo e a partir de processo simples. Permite inspecionar sistemas ou partes de objetos mesmo que eles possuam vazamentos em conexões e válvulas. Adicionalmente, o nível de especialização do operador pode ser baixo se comparado ao requerido por outros métodos (JACKSON; SHERLOCK, 1998).

2.2.2 Método da variação de pressão

O método da variação de pressão é muito empregado por ser relativamente simples e por utilizar poucos equipamentos e instrumentos (PAYÃO; SCHMIDT; SCHRÖDER, 2000). Segundo Mix (2005), pode ser feito com pressurização positiva do objeto em ensaio ou então impondo uma pressão menor que a atmosférica (ensaio com retenção de vácuo). Outras duas vantagens de seu uso são: na maioria dos casos é possível utilizar transdutores de pressão que já estejam instalados nos objetos a serem avaliados; não há necessidade de empregar nenhum gás marcador. Por outro lado, o tempo de ensaio

pode ser longo, se comparado ao de outros métodos e a localização do vazamento não pode ser feita sem uma outra técnica auxiliar (JACKSON; SHERLOCK, 1998).

O ensaio com variação de pressão permite medir a taxa de vazamento integral do objeto em ensaio e o requisito básico é que o objeto seja um sistema fechado e não deformável para ser submetido a um diferencial de pressão. O gás utilizado precisa ser não-condensável e inerte (ASTM, 2013).

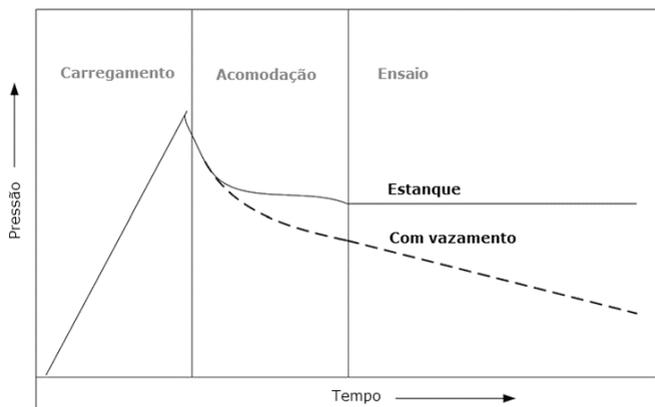
O ensaio mais simples consiste em medir a pressão no objeto em dois momentos distintos, possibilitando obter a taxa de vazamento integral a partir da diferença entre os dois valores de pressão medidos, do intervalo de tempo entre as medições e do volume interno do objeto, conforme a equação (2.4) da seção 2.1.2 (página 47). Caso haja variação da temperatura durante o período de ensaio, essa variação deve ser levada em consideração no equacionamento, para que seja feita a correção em relação à taxa de vazamento (PAYÃO; SCHMIDT; SCHRÖDER, 2000).

O gráfico da figura 2.2 resulta de um ensaio de avaliação da estanqueidade por variação da pressão. A primeira parte do gráfico caracteriza a etapa de carregamento do objeto com gás de ensaio. Na segunda parte, caracterizada como acomodação, ocorre uma queda de pressão mesmo em objetos estanques (caso exista um vazamento, a queda é acentuada). A queda natural da pressão interna do objeto em ensaio é devida a uma série de fatores, como: a geometria do objeto em ensaio; o tipo de gás utilizado; equilíbrio de temperatura. Dependendo das condições de ensaio, a acomodação da pressão pode requerer minutos ou horas. A terceira parte do gráfico refere-se efetivamente ao ensaio, cuja queda de pressão observada indica vazamento no objeto (ASTM, 2013).

A dificuldade em conhecer o volume de objetos com geometrias complexas e a variação da temperatura durante os ensaios são as duas principais fontes de erros associadas a ensaios de estanqueidade por variação de pressão. Um artifício empregado para corrigir o efeito de fontes de erro nesse ensaio é utilizar um outro volume de referência e verificar a diferença entre a variação de pressão do objeto em teste e o objeto de referência (JACKSON; SHERLOCK, 1998).

Em seu trabalho, Tian et al. (2016) estudam a variação de pressão e vazão em um duto no qual flui amônia pressurizada a fim de identificar vazamentos. Para tal, é proposto um indicador calculado com base no comportamento da pressão do fluido que, quando comparado com um valor limite preestabelecido, indica a presença de vazamentos. Para validar a técnica, são realizadas experiências

Figura 2.2: Curvas de pressão em ensaios de estanqueidade para objeto estanque e com vazamento.



Fonte: adaptado de ASTM (2013).

com diferentes posições e com taxas de vazamentos distintas em dutos de amônia e fluido refrigerante R22.

Em outro trabalho recente, Ostapkowicz (2016) propõe algoritmos para avaliação de estanqueidade em dutos de transmissão de líquidos, baseados em fenômenos de pressão característicos. Os algoritmos são testados experimentalmente em laboratório com dutos de água com diferentes vazamentos.

2.2.3 Método acústico para ensaios de estanqueidade

O uso de sistemas de medição baseados em princípios sonoros é bastante abrangente e difundido. Podem ser encontradas técnicas que usam ondas sonoras em aplicações diversas, como na medicina moderna e na análise de estruturas em engenharia civil (WELLS et al., 1997; COLOMBO; MAIN; FORDE, 2003). A identificação e localização de discontinuidades passantes, a necessidade de não contaminação dos objetos em ensaio, os tempos de ensaio relativamente pequenos – próprio das indústrias com elevado volume de produção – e a possibilidade de processamento e interpretação simples dos dados são alguns requisitos comuns em ensaios de estanqueidade. Tais exigências podem tornar atrativas as técnicas baseadas no método acústico frente a outros métodos para END comumente utilizados,

tais como os apresentados anteriormente nas seções 2.2.1 e 2.2.2 (MOON et al., 2009).

As técnicas de ensaio de estanqueidade utilizando o método acústico podem ser divididas em duas classes, técnicas passivas e ativas, de acordo com a natureza do sinal acústico empregado para a avaliação do vazamento (JACKSON; SHERLOCK, 1998). As seções 2.2.3.1 a 2.2.3.3 abordam técnicas passivas para ensaios de estanqueidade e a seção 2.2.3.4 apresenta a técnica ultrassônica ativa.

2.2.3.1 Ensaios ultrassônicos - técnica passiva

Ondas sonoras audíveis pelos seres humanos apresentam frequências que variam dentro da faixa de (20 a 20000) Hz. Acima disso, elas tornam-se imperceptíveis e são caracterizadas como ultrassônicas (US). Os primeiros experimentos utilizando ultrassom foram feitos na primeira metade do século XIX e a partir de então o seu uso como método para ensaios não destrutivos vem sendo difundido (SZILARD, 1982). A principal razão para a investigação do uso do som em frequências maiores que as audíveis se dá pelo fato de que o espectro ultrassônico, em muitos casos, despreza grande parte das interferências e ruídos de fundo, que se revelam em baixas frequências (MOON et al., 2009).

Muitos dos conceitos e técnicas dos testes US de baixa frequência podem ser remetidos ao desenvolvimento do SONAR (navegação e determinação da distância pelo som, do inglês, *SOund NAVigation and Ranging*). Em 1826, o físico suíço Jean-Daniel Colladon fez a primeira demonstração conhecida da velocidade de propagação do som na água, usando um sino subaquático. Outros físicos continuaram a investigar os fundamentos físicos das ondas sonoras nos meados daquele século, incluindo transmissão, propagação e refração. Outro importante ganho no âmbito dos ensaios US ocorreu em 1928, quando o cientista soviético Sergei Sokolov mostrou que as falhas no metal poderiam ser detectadas ao se monitorar a energia US transmitida pelo material. Essa ideia foi usada para criar dispositivos de detecção de falhas em metais durante a década de 1940. Nas décadas de 1950 e 1960, impulsionados pelos avanços anteriores, os END baseados em técnicas de ultrassom apareceram e foram utilizados principalmente para a detecção de defeitos de peças e componentes, permitindo sua substituição antes da ocorrência de falhas. A adoção de instrumentação moderna e recursos computacionais resultou na aplicação de ensaios US em diferentes segmentos industriais (KU-

ENZI; KNAPP-KLEINSORGE, 2007).

A ASTM (2016, p.34, tradução nossa) – do inglês *American Society for Testing and Materials* – define ‘ensaios ultrassônicos’ como:

Um método não destrutivo de examinar materiais introduzindo vibrações mecânicas com uma frequência maior do que 20 kHz (ondas ultrassônicas) por dentro, através ou sobre a superfície do objeto que está sendo examinado e determinando os atributos do material a partir dos efeitos nas ondas ultrassônicas.

Vazamentos em sistemas a vácuo ou pressurizados podem ser detectados por meio da energia sônica gerada no vórtice que acompanha o escoamento de fluido que vaza pela descontinuidade. O único requisito para essa detecção é que o sinal sonoro deva ser de intensidade suficiente para ser distinguido dos ruídos de fundo (MOHAMMAD; ABDULHAMEED; KAHM, 2007).

Quando a pressão dentro de um recipiente é maior que a pressão externa e existe uma descontinuidade passante, pode ocorrer o vazamento de fluido. Quando o tamanho da descontinuidade é pequeno e o número de Reynolds¹ (Re) é alto ($Re \geq 4000$), a vazão de saída de gás que passa através da descontinuidade para o lado de baixa pressão gera turbulência que produz som com determinada frequência. A formação de escoamento turbulento é um pré-requisito para a detecção de vazamento com a técnica de ultrassom passiva (RIENSTRA; HIRSCHBERG, 1999; TAO et al., 2015). Uma menor taxa de vazamento é geralmente associada a um sinal sonoro de maior frequência (RONGXIN; WEIDAN, 2013).

A equação (2.6) relaciona a frequência gerada pela turbulência com a velocidade de jato no orifício de vazamento, o diâmetro da descontinuidade e o número de Strouhal², denotado como coeficiente proporcional k (WANG; ZHAO; WANG, 2015; RONGXIN; WEIDAN, 2013).

$$f = k \frac{v}{d}, \quad (2.6)$$

¹O número de Reynolds é um parâmetro adimensional pelo qual o estado de um escoamento pode ser determinado. Um número baixo implica um escoamento laminar e um número alto implica um escoamento turbulento (WHITE, 2010).

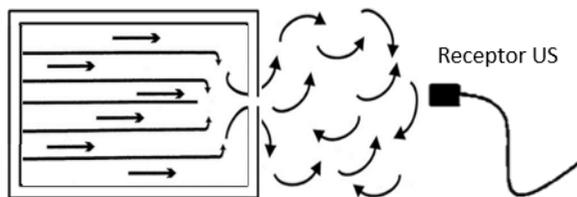
²O número de Strouhal é também um parâmetro adimensional que descreve condições de um escoamento oscilatório (WHITE, 2010).

em que:

- f é a frequência [Hz];
- v é a velocidade de jato do vazamento [m/s^2];
- d é o diâmetro médio da discontinuidade [m];
- k é o coeficiente de proporcionalidade, normalmente assumindo valores no intervalo $0,012 \leq k \leq 0,020$.

O sinal ultrassônico gerado pelo fluido em escoamento turbulento apresenta suas principais componentes com frequências dentro do intervalo de (30 a 50) kHz (COLOMBO; MAIN; FORDE, 2003). Duas técnicas distintas podem ser incluídas na classe das técnicas ultrassônicas passivas: a de detecção do sinal ultrassônico transmitido pelo ar a partir do objeto em ensaio, como é ilustrado na figura 2.3; a detecção de sinais ultrassônicos por contato direto com a superfície do objeto em ensaio (JACKSON; SHERLOCK, 1998), abordada na seção 2.2.3.3, dedicada à técnica de detecção de vazamento com transdutores de emissões acústicas.

Figura 2.3: Técnica passiva: turbulência causada pelo escoamento através de uma discontinuidade gerando sinal ultrassônico.



Fonte: adaptado de Jackson e Sherlock (1998).

Moon et al. (2009) apresentaram um estudo de caso em que descrevem e comparam experimentos para detecção de vazamentos em vasos de pressão, utilizando técnicas ultrassônicas ativas e passivas. O objeto alvo do ensaio foi um tanque de combustível produzido para a indústria automobilística. O principal objetivo dos experimentos que empregavam a técnica passiva era identificar vazamentos ao se alinhar o transdutor US à descontinuidade por onde o gás pressurizado escapava gerando um escoamento turbulento. Os resultados mostrados confirmaram a viabilidade da técnica, uma vez que foi possível identificar um aumento da pressão sonora em faixas de frequência que vão de aproximadamente (30 a 80) kHz.

O ensaio foi feito em um tanque pressurizado apresentando vazamento resultante de descontinuidade com diâmetro de $20\ \mu\text{m}$.

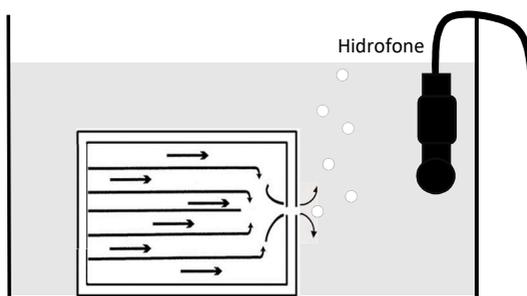
Uma vantagem da técnica passiva, que é destacada por Moon et al. (2009), é a possibilidade de identificação de vazamentos de maneira quase que instantânea, desde que o vaso tenha sido suficientemente pressurizado. Em contrapartida, uma limitação dessa técnica é a necessidade de pressurização do sistema a ser testado para geração do escoamento turbulento e, por sua vez, dos sinais sonoros. Logo, não pode ser utilizada para testar sistemas que contenham gases tóxicos ou explosivos (ASTM, 2011).

2.2.3.2 Ensaios ultrassônicos - técnica passiva com hidrofone

Hidrofones são transdutores com revestimento impermeável para que sua face de trabalho seja exposta ao meio líquido, uma vez que são utilizados para medições acústicas tipicamente em água e com operação em frequências que chegam até a ordem de megahertz (BOYD; VARLEY, 2001).

A técnica passiva utilizando hidrofone faz uso de dois métodos para a identificação do vazamento, o método da bolha combinado com o método acústico. O vaso pressurizado que apresenta uma descontinuidade passante, ao ser imerso, libera bolhas de gás no líquido. O método acústico então é empregado visando a identificação dessas bolhas, conforme ilustrado na figura 2.4.

Figura 2.4: Técnica passiva: hidrofone posicionado próximo ao vaso de pressão pressurizado e imerso para detecção de bolhas que indicam vazamento.



Fonte: autor.

Ainda que não se tenha certeza sobre o exato mecanismo de geração de emissões acústicas na formação das bolhas, imagina-se

que o sinal acústico associado seja devido à compressão do gás na bolha. Essa compressão pode ser causada pelo recuo do ‘pescoço’³ da bolha no momento do desprendimento do volume de gás para sua formação ou na deformação da bolha durante o seu movimento (MANASSEH et al., 2001).

A produção de emissões acústicas por bolhas foi detalhada primeiramente por Minnaert (1933), mostrando que sob condições adiabáticas a frequência do sinal acústico é diretamente relacionada ao tamanho da bolha, de acordo com a equação (2.7), também conhecida como frequência de Minnaert.

$$f = \sqrt{\frac{3\gamma P_\infty}{(2\pi)^2 \rho}} \frac{1}{R_0}, \quad (2.7)$$

em que:

- f é a frequência [Hz];
- γ é o coeficiente de expansão adiabática;
- P_∞ é a pressão absoluta do líquido [Pa];
- ρ é a densidade do líquido [kg/m^3];
- R_0 é o raio da bolha [m].

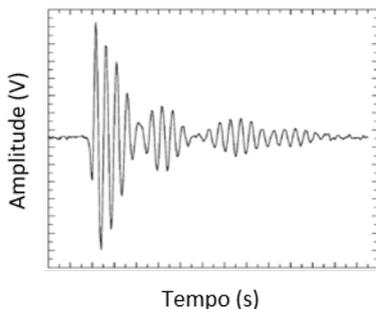
Segundo Manasseh et al. (2001), considerando-se que P_∞ seja aproximadamente constante, que o líquido de ensaio seja água e que a profundidade em que o objeto em ensaio esteja não seja muito grande, pode-se aproximar por 3 o fator que multiplica a razão $1/R_0$. Assim, para bolhas com raio de 1 mm o sinal acústico emitido seria de aproximadamente 3 kHz. Boyd e Varley (2001) mostraram que a amplitude do pulso sonoro causado pelo sinal acústico das bolhas apresenta forte relação com a distância entre o transdutor e a fonte de formação das bolhas.

Em seu estudo, Manasseh et al. (2001) colocaram um hidrofone em um tanque com um bocal de ar para produção de bolhas de diferentes tamanhos. Também utilizaram uma câmera para monitoramento ótico e comparação dos tamanhos das bolhas formadas. A partir de testes, foi observado que a presença do hidrofone não altera a dinâmica e nem as emissões acústicas das bolhas. A análise dos dados foi feita utilizando-se um filtro passa-banda com frequências de corte de (600 e 3000) Hz. Foi observado que a frequência básica do pulso acústico muda com o tempo devido a fatores não lineares e sua amplitude decai exponencialmente, como é pos-

³O ‘pescoço’ da bolha é o ponto mais estreito de seu perfil, onde ocorre o desprendimento da porção de gás (LEIGHTON, 1994).

sível verificar na figura 2.5. Também foi verificado que a frequência do primeiro período pode ser utilizada para cálculo do volume da bolha, fazendo uso da equação (2.7). Assim, considerar o volume das bolhas em conjunto com a frequência de formação possibilita estimar a vazão de ar pelo bocal. À medida em que a taxa de formação das bolhas aumenta, seu tamanho também fica maior e sua forma mais distorcida. Nesse caso, bolhas formadas em sequência começam a afetar umas às outras e, com isso, a relação de raio a partir da frequência de formação não é mais válida (MANASSEH et al., 2001).

Figura 2.5: Perfil de pulso acústico de uma única bolha.



Fonte: adaptado de Manasseh et al. (2001).

2.2.3.3 Ensaios ultrassônicos - técnica passiva de emissões acústicas

Os primeiros testes baseados em emissões acústicas (EA) datam de aproximadamente 6500 a.C., quando artesãos, buscando a maior qualidade de seus produtos feitos de argila, procuravam escutar os ruídos gerados pelas fissuras dos vasos enquanto esfriavam. Essas EA indicavam que o objeto em questão apresentava um defeito em sua estrutura (MILLER, 1987).

Pela definição formal da ASTM (2016, p. 3, tradução nossa), EA compreendem “a classe de fenômenos nos quais uma tensão transitória ou ondas de deslocamento são geradas pela liberação rápida de energia a partir de fontes localizadas dentro de um material”. Essa definição engloba tanto o processo de geração da onda como a própria definição da onda.

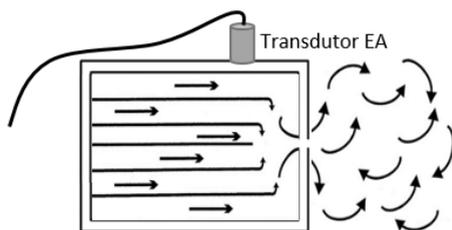
As fontes de EA incluem diferentes mecanismos de deformação e fratura. Terremotos, crescimento de falhas em metais, fraturas em fibras e outros materiais compósitos, deslocamentos e deslizamentos são alguns exemplos de ondas de energia liberadas em forma de EA. Existem ainda outros mecanismos englobados por essa definição, que são detectáveis com equipamentos destinados a identificar EA. Dentre eles está o vazamento de fluidos, que muitas vezes é chamado de 'fonte secundária' para distingui-lo das fontes clássicas (MILLER, 1987).

A técnica passiva é baseada na identificação do sinal vibroacústico gerado pela vazão de fluido pela descontinuidade, permitindo a identificação e localização de vazamentos em um sistema pressurizado. É possível perceber que a técnica de ensaio passiva com ultrassom é bastante similar em seu princípio de medição à técnica de EA e, pela definição, poderia ser classificada como uma técnica de detecção de EA. Porém, na literatura e na grande maioria das soluções comerciais, classificam-se como técnicas de EA aquelas que empregam transdutores acoplados na superfície de medição ou em contato por meio de acopladores, uma vez que EA podem ser vistas como vibrações de amplitudes muito pequenas (da ordem de nanômetros) e com frequências muito altas (GAUTSCHI, 2002; ASTM, 2012).

A figura 2.6 ilustra um arranjo para avaliação de estanqueidade com um transdutor de EA. Uma medição bem sucedida com o método depende de algumas variáveis, tais como: a distância do vazamento (fonte sonora) até o transdutor; a atenuação que o material de teste proporciona; o tipo de fluido vazante; as interferências externas; a condição do escoamento no orifício (número de Reynolds), que depende da pressão diferencial, tamanho do orifício e tipo de fluido (ANASTASOPOULOS; KOUROUSIS; BOLLAS, 2009).

A identificação e localização do vazamento é feita pelo transdutor de EA, que detecta a vibração gerada pelo escoamento na estrutura a que está acoplado. O sinal é transformado em um sinal elétrico e então quantificado quanto à sua amplitude (usando a raiz média quadrática do sinal, por exemplo). Para localização são usualmente empregados dois ou mais transdutores, para que a partir das variações de amplitude (e atenuação) dos sinais medidos se possa inferir a respeito da posição do vazamento. Outra forma de localização de fontes de EA é a partir do atraso do sinal de um transdutor em relação ao de outro. Conhecendo-se parâmetros do sistema, como velocidade do som e atenuação no meio em ensaio, técnicas de análise de fase dos sinais detectados pelos transdutores

Figura 2.6: Vazamento de fluido com medição por transdutor de emissões acústicas (EA).



Fonte: adaptado de Anastasopoulos, Kourousis e Bollas (2009).

podem ser empregadas (MILLER, 1987; ANASTASOPOULOS; KOUROUSIS; BOLLAS, 2009).

A técnica de ensaio de vazamento com EA é bastante usada na área nuclear no monitoramento do circuito primário de reatores nucleares de água pressurizada e também em alguns casos da indústria química (PAYÃO; SCHMIDT; SCHRÖDER, 2000).

Em uma aplicação prática de identificação e localização de vazamentos com EA emitidas continuamente, Ozevin e Harding (2012) apresentaram um algoritmo que levava em consideração características geométricas da estrutura em análise (rede de dutos) com a defasagem do sinal entre os transdutores e com a atenuação da amplitude do sinal para definir as coordenadas do vazamento (fonte das EA).

Husin, Addali e Mba (2011) investigaram experimentalmente as EA da formação, do movimento e do estouro de bolhas em água. No experimento foram utilizados três transdutores de EA posicionados ao longo de uma coluna de acrílico com água e um bocal para formação das bolhas instalado dentro da coluna na parte inferior. As frequências de operação dos transdutores cobriam faixas de (100 a 750) kHz. O sinal dos transdutores foi pré-amplificado com um ganho de 60 dB e amostrado com frequência de 2 MHz. A partir dos dados obtidos, verificaram que a técnica foi capaz de identificar EA da formação e do estouro de bolhas, porém não foram observados indicativos de EA provenientes da oscilação da bolha em seu movimento. Também foi estabelecido que a amplitude, duração, energia e tempo de subida do sinal de EA são diretamente proporcionais ao tamanho da bolha. Os autores verificaram adicionalmente que o sinal de EA do estouro de bolhas na superfície do líquido aumenta se

a viscosidade do líquido aumentar. Esse estudo de Husin, Addali e Mba (2011) exemplifica uma combinação bem sucedida do método acústico com o método da bolha em imersão para criação de uma condição específica na qual um vazamento pode ser mais facilmente caracterizado de forma automática.

Matas (2010) apresentou um estudo de viabilidade de aplicação de medição de EA em tubos de amortecedores, visando a substituição do método de ensaio com bolha em imersão, tipicamente empregado na produção desses equipamentos. Ele fez uso de técnicas passivas com transdutores de EA, realizando experimentos que avaliaram os sinais de vazamento dos tubos pressurizados em três estratégias distintas, conforme ilustrado na figura 2.7. Os ensaios foram realizados nos seguintes meios: no ar (figura 2.7a); em água, com medição dos sinais no próprio tanque no qual o tubo do amortecedor foi imerso (figura 2.7b); em água, com acoplamento direto do transdutor no tubo (figura 2.7c). Ainda que as avaliações com o transdutor em ar não tenham sido conclusivas, os resultados obtidos nos ensaios em água mostraram-se promissores (MATAS, 2010).

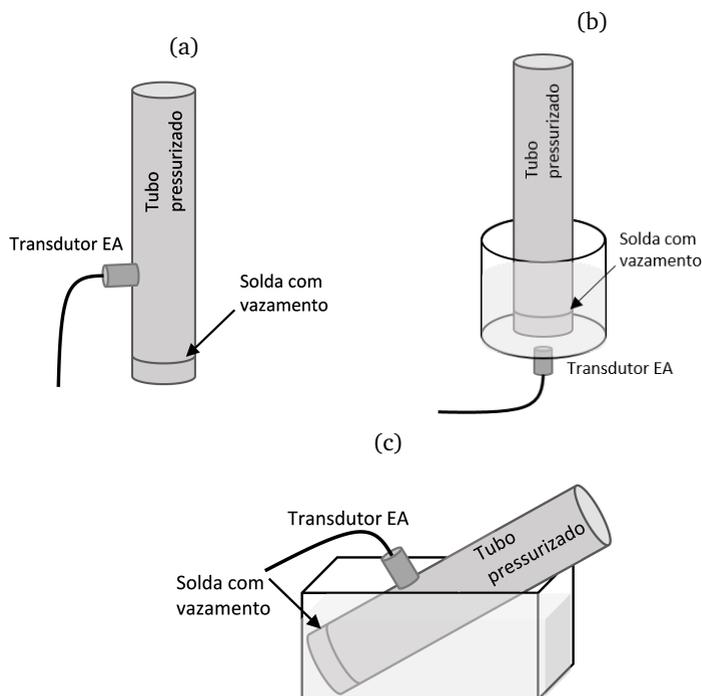
2.2.3.4 Ensaios ultrassônicos - técnica ativa

De acordo com Jackson e Sherlock (1998, p. 462, tradução nossa), na técnica ativa de ensaios de estanqueidade com ultrassom, "o som de uma fonte artificial diferente do escoamento turbulento é injetado no fluido contido no objeto em teste". Este procedimento é normalmente utilizado quando não é possível ou desejável pressurizar o sistema a ser ensaiado.

Em um ensaio ultrassônico ativo de estanqueidade, o sinal sonoro é transmitido pelo fluido contido no objeto em ensaio através da descontinuidade até um receptor ultrassônico. O sentido da transmissão pode ser de dentro para fora, como representado na figura 2.8, ou então de fora para dentro (JACKSON; SHERLOCK, 1998).

Em um trabalho no qual compararam técnicas ultrassônicas ativa e passiva para detecção de vazamentos, Moon et al. (2009) fizeram uso de uma configuração de ensaio ativa para duas inspeções: a primeira, do selo da porta de um veículo; a segunda, de um tanque de água. No primeiro caso, as descontinuidades avaliadas apresentavam ao menos 1 mm de diâmetro, tamanho que possibilitou a identificação plena do vazamento com a técnica. Ao inspecionar o tanque de água, verificaram um vazamento com diâmetro de aproximadamente 350 μm , o qual consideraram relativamente grande, de

Figura 2.7: Três estratégias para ensaios de estanqueidade com variações do meio de ensaio e do acoplamento do transdutor.

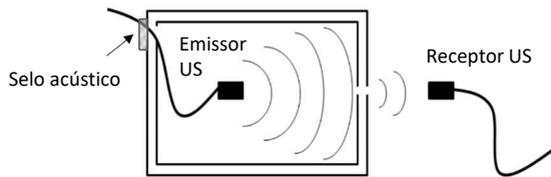


- Legenda:
- a) Transdutor acoplado diretamente ao tubo pressurizado.
 - b) Transdutor acoplado ao tanque com tubo pressurizado imerso em água.
 - c) Transdutor acoplado ao tubo pressurizado imerso em água.

Fonte: adaptado de Matas (2010).

forma que pudesse ser identificado visualmente. Para esse caso, também obtiveram êxito na identificação do vazamento com a técnica ativa. Porém, ao fazer ensaios com vazamentos menores (com aproximadamente $40\ \mu\text{m}$ de diâmetro) a técnica não identificou nenhum sinal acústico. Moon et al. (2009) concluíram que a vantagem no emprego da técnica ativa se dá pelo fato de que o ensaio pode identificar a presença de vazamentos e suas localizações de maneira rápida (principalmente se a varredura com os receptores US for feita de forma automatizada) e sem a necessidade de pressurização. Porém, a técnica mostrou-se limitada quando testada em vazamentos

Figura 2.8: Técnica ativa: sinal ultrassônico inserido internamente ao objeto em ensaio é conduzido até o receptor externo.



Fonte: autor.

pequenos (com diâmetro menor que $350 \mu\text{m}$).

2.3 CONSIDERAÇÕES

Ensaio não destrutivo são aplicáveis à manufatura de vasos de pressão principalmente nas etapas de controle de qualidade, na qual estão intimamente ligados à confiabilidade do que é produzido e à redução do custo de retrabalho. Objetos que trabalham pressurizados ou armazenando fluidos, como é o caso dos vasos de pressão, possuem como requisito básico o atendimento a determinado nível de estanqueidade, cuja avaliação pode ser feita por meio de diferentes métodos.

Os métodos e técnicas abordados apresentam vantagens e limitações importantes que devem ser bem compreendidas para que, ao serem empregados, supram os requisitos de identificação, localização ou medição de vazamentos no nível esperado. Existem casos nos quais diferentes técnicas podem ser empregadas para avaliação de estanqueidade, exigindo assim que sejam considerados outros fatores tais como o custo, o tempo de ensaio e o conhecimento necessário do operador. É possível, ainda, que mais de um método ou de uma técnica sejam combinados para que uma situação específica de vazamento possa ser avaliada, como no caso das técnicas acústicas que avaliam objetos pressurizados imersos em líquido.

Uma vez que um vazamento nulo é impraticável, um importante indicador de estanqueidade é a taxa de vazamento. Seu procedimento de cálculo apresentado no capítulo é empregado como guia na caracterização dos vazamentos analisados no estudo de caso de forma a definir um elemento quantitativo para comparação entre

diferentes vazamentos.

O capítulo 3 apresenta o planejamento para avaliação de estanqueidade em vasos de pressão de pequeno porte. No estudo de caso, são empregados compressores herméticos com defeitos reais oriundos de uma linha de produção. Esses compressores são caracterizados quanto a suas taxas de vazamento a fim de estudar limites de detecção das técnicas acústicas. A metodologia para os experimentos é baseada na literatura, levando-se em consideração os trabalhos recentes que representam o estado da arte em avaliação de estanqueidade.

3 DESENVOLVIMENTO

Este capítulo apresenta as etapas de planejamento e desenvolvimento do trabalho experimental, no qual técnicas acústicas para identificação de vazamentos em vasos de pressão são aplicadas a compressores herméticos, os quais se destacam dentro do grande grupo de vasos de pressão devido à sua participação expressiva no mercado. Segundo dados coletados em 2015 e 2016 nos Estados Unidos, quase 100% das casas daquele país possuem pelo menos um refrigerador, e dessas, mais de um terço possuem dois ou mais equipamentos (EIA, 2015). Uma vez que refrigeradores domésticos (assim como os condicionadores de ar), em sua grande maioria, utilizam compressores herméticos alternativos (JABARDO; STOECKER, 2002), é evidente a importância desses vasos de pressão nas aplicações cotidianas. Em relação às falhas encontradas em sistemas de refrigeração, a carga deficitária de gás refrigerante decorrente de vazamentos é citada na literatura como uma das cinco falhas mecânicas mais comumente encontradas em sistemas de refrigeração (STOUPPE; LAU, 1989).

A seção 3.1 caracteriza o estudo de caso usado nos experimentos propostos. A seção 3.2 apresenta metodologias de ensaios com cada técnica fundamentada anteriormente, no capítulo de revisão da literatura, visando a identificação e avaliação de vazamentos. A seção 3.4 relata a caracterização dos compressores herméticos defeituosos que são empregados nos ensaios quanto a suas respectivas taxas de vazamento.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO DE CASO

O estudo comparativo de técnicas que empregam sinais sonoros para identificação de vazamentos é realizado tomando como base um caso específico de vasos de pressão, compressores herméticos de refrigeração para aplicação residencial. O termo ‘hermético’ faz referência a vasos de pressão selados, de modo que o motor e o conjunto mecânico responsável pela compressão do fluido refrigerante são montados no interior de um invólucro metálico selado, no qual, idealmente, não ocorre a penetração ou o vazamento de fluidos. Esses compressores são particularmente úteis por dispensarem o uso de elementos de vedação para impedir o vazamento de fluido refrigerante para o ambiente, de maneira a minimizar os riscos de contaminação ambiental e pessoal (ROSSETO, 2014).

Podem-se destacar três importantes razões pelas quais fabri-

cantes visam identificar e corrigir vazamentos de fluido refrigerante em compressores herméticos. A primeira questão é relativa à segurança e à saúde dos usuários do sistema, que podem ser afetadas dependendo do tipo do fluido refrigerante usado. A segunda questão é ambiental, pois a emissão de determinados gases pode contribuir para a destruição da camada de ozônio. A terceira questão é relativa ao funcionamento do sistema de refrigeração, uma vez que compressores operando com nível de fluido abaixo do recomendado apresentam rendimento seriamente comprometido, consumo elevado e vida útil reduzida (GOMES, 2015).

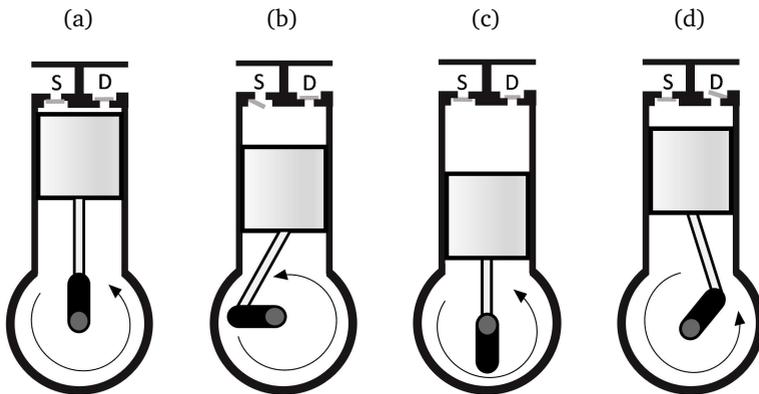
Compressores possuem papel fundamental em um sistema de refrigeração. Sua função é produzir desequilíbrios de pressão para que as mudanças de fase do fluido refrigerante ocorram e também para que o fluido se desloque dentro do circuito, o que permite trocas de calor no evaporador e no condensador (JABARDO; STOECKER, 2002). Mais detalhes do princípio de funcionamento de sistemas de refrigeração são abordados no apêndice C (página 175).

Compressores alternativos apresentam funcionamento baseado no movimento alternado de um pistão no interior de um cilindro. Para que se movimente, o pistão é acionado por um motor elétrico, que pode ser linear ou rotativo. No caso de motores rotativos, o movimento rotacional é convertido em movimento linear por um conjunto biela-manivela. O movimento do pistão no interior do cilindro associado a válvulas de sucção e de descarga que funcionam de forma sincronizada permite a compressão do fluido refrigerante.

A figura 3.1 apresenta o movimento do pistão internamente ao cilindro e a sequência de abertura e fechamento das válvulas de sucção e de descarga. A figura 3.1a ilustra o pistão em seu curso máximo, chamado de ponto morto superior. Conforme o eixo de manivela começa a girar em sentido anti-horário, o pistão desce e a pressão no cilindro é reduzida a um valor menor que o da pressão na câmara de sucção (S), de forma a abrir a válvula de sucção, como representado na figura 3.1b. O volume de fluido máximo dentro do cilindro é alcançado quando o pistão atinge o seu curso mínimo, chamado de ponto morto inferior e ilustrado na figura 3.1c. Após esse momento, o movimento rotacional do eixo de manivela prossegue e o pistão inicia seu movimento ascendente, fazendo com que o volume seja reduzido e o fluido refrigerante seja comprimido. Na figura 3.1d, a pressão interna do cilindro aumenta e, ao atingir um valor maior que o da pressão na câmara de descarga (D), a válvula de descarga é aberta fazendo com que o fluido seja expulso do cilindro. Após atingir novamente o ponto morto superior o ciclo reinicia.

Para prevenir que o pistão colida com a sede das válvulas em sua etapa de compressão, um pequeno volume permanece livre dentro do cilindro mesmo quando o pistão se encontra em seu curso máximo. Esse espaço é chamado de volume morto do cilindro e faz com que nem todo o fluido em alta pressão seja descarregado através da válvula de descarga ao fim da etapa de compressão (DOSSAT, 2004).

Figura 3.1: Etapas da compressão do fluido refrigerante.



- Legenda: a) Pistão no ponto morto superior.
b) Válvula de sucção aberta.
c) Pistão no ponto morto inferior.
d) Válvula de descarga aberta.

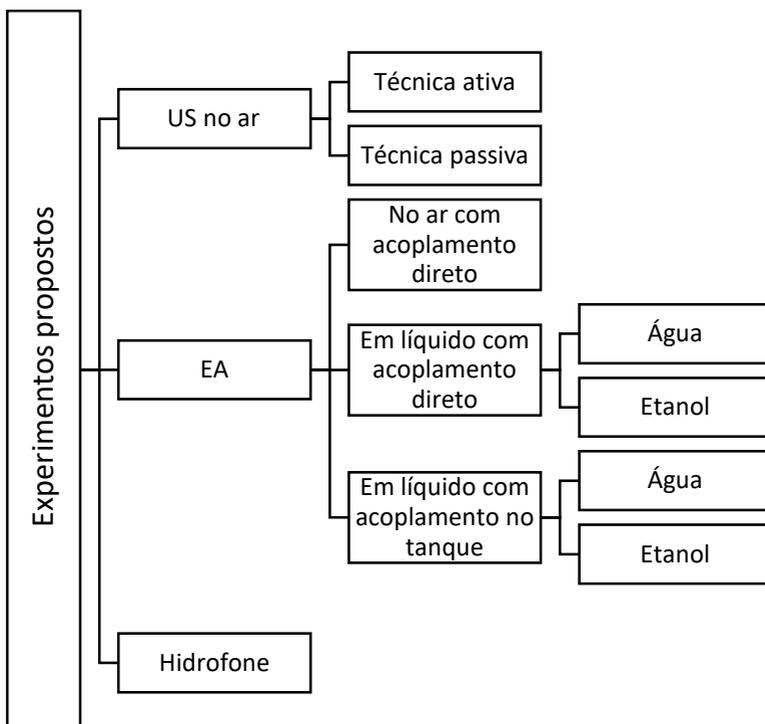
Fonte: adaptado de Dossat (2004).

3.2 PLANEJAMENTO E METODOLOGIA DE ENSAIOS

No contexto deste trabalho, os experimentos foram realizados aplicando-se as técnicas acústicas revisadas no capítulo 2. A apresentação da metodologia de cada experimento é definida a partir da técnica e do meio de ensaio. Os experimentos com ultrassom realizados sem um meio de ensaio especial (no ar atmosférico) empregam as técnicas ultrassônicas passiva e ativa. Os experimentos com emissões acústicas (EA) são realizados tanto em meio gasoso (ar atmosférico) quanto em meio líquido (água ou etanol, combinado com o método da bolha por imersão). Os experimentos com

hidrofone também combinam, necessariamente, o método acústico com o método da bolha, por empregarem um transdutor ultrasônico (US) em meio líquido. A figura 3.2 apresenta de forma esquemática as técnicas aplicadas nos experimentos propostos e suas variações. Ainda que todas as técnicas compartilhem o mesmo objetivo, que é a identificação da presença de vazamentos no corpo do compressor hermético em ensaio, cada uma apresenta peculiaridades, vantagens e limitações, que são abordadas na apresentação dos resultados.

Figura 3.2: Esquema dos experimentos propostos.



Fonte: autor.

O invólucro metálico selado dos compressores herméticos de refrigeração também pode ser chamado de carcaça ou de corpo, e é composto por duas calotas metálicas que são unidas por um cordão de solda. A solda deve garantir que a carcaça do compressor en-

volva hermeticamente os seus componentes internos. Tipicamente, o acesso ao interior de um compressor é feito por meio de três dutos distintos, chamados de tubos passadores. Um dos tubos está direcionado para a válvula de sucção (passador de sucção), outro está conectado à saída da válvula de descarga (passador de descarga) e o terceiro está conectado ao volume interno da carcaça (passador de processo). Também há um ponto de conexão elétrica para alimentação do motor elétrico interno.

Defeitos de estanqueidade em compressores estão geralmente localizados no cordão de solda que une as duas calotas, devido a falhas no processo de soldagem. O fato de as juntas soldadas serem regiões propícias a vazamentos é confirmado na literatura. Matas (2010) afirma que durante o processo de fabricação de amortecedores, vazamentos podem ocorrer devido a defeitos no processo de soldagem das peças. Por sua vez, Tušek, Bajcer e Kampuš (2004) abordam o controle de qualidade de vasos pressurizados usados como tanques para armazenamento de água quente. Segundo os autores, defeitos que resultam em vazamentos ocorrem em sua maioria nas junções entre soldas longitudinais e circunferenciais e também no contato entre o início e o fim de uma solda circunferencial.

Segundo a NBR 15404:2013 (ABNT, 2013a), norma brasileira sobre detecção e localização de vazamentos empregando transdutores de emissões acústicas, a identificação de um vazamento está baseada na detecção do sinal gerado pelo escoamento turbulento (contínuo) proveniente do próprio vazamento, cuja detecção é feita empregando-se um transdutor de pressão sonora. A avaliação do sinal pode ser feita por meio da amplitude da média quadrática (RMS, do inglês *Root Mean Square*) ou da média aritmética, por exemplo. Nos experimentos deste trabalho emprega-se a tensão RMS do sinal medido como indicador comparativo.

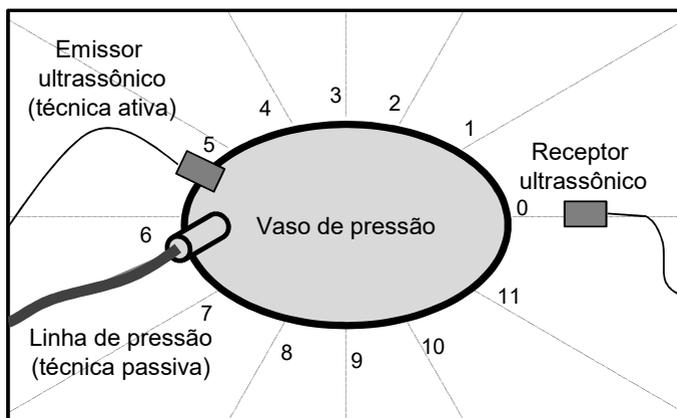
3.2.1 Experimentos com ultrassom no ar

No âmbito deste trabalho, a denominação ultrassom no ar é atribuída aos experimentos que empregam transdutores ultrassônicos que usam o ar atmosférico como acoplamento acústico. Tanto a técnica ativa quanto a passiva compartilham essa característica, fazendo com que ambos os procedimentos de ensaio sejam bastante similares. A grande diferença entre elas é que o emissor US é empregado apenas na técnica ativa. No outro caso, o compressor é pressurizado.

Em uma situação real, não se sabe a posição do vazamento

na superfície do compressor, então as técnicas empregadas na localização desses defeitos devem prever alguma forma de varredura em toda a extensão do objeto em ensaio. Essa varredura é feita manualmente nos experimentos do presente trabalho. Como referencial para os ensaios ultrassônicos, utiliza-se uma base com semirretas com origem em um ponto comum. A base, representada pela figura 3.3, possui originalmente 12 linhas, cada uma separada da próxima por 30° . Com o compressor mantido no centro da base, as medições são feitas posicionando-se o receptor US em cada uma das linhas a uma distância de aproximadamente 10 mm da superfície inspecionada.

Figura 3.3: Ilustração da base empregada para experimentos com ultrassom no ar.



Fonte: autor.

Ainda que toda a superfície do compressor possa apresentar vazamentos, sabe-se que esses são encontrados majoritariamente na região do cordão de solda. Além disso, todos os compressores defeituosos disponíveis que foram empregados nos experimentos apresentam vazamento nessa região, a qual situa-se a uma altura de aproximadamente 10 cm da base. Por essa razão, em cada uma das doze posições o receptor US é mantido fixo a uma altura que coincide com a altura do cordão de solda que une as duas calotas do corpo do compressor.

As técnicas passivas requerem a pressurização do vaso em en-

saio para que seja criada uma condição de escoamento turbulento no vazamento e, conseqüentemente, um sinal sonoro. O gás de ensaio é inserido no compressor através do tubo passador de processo, fluindo livremente até o interior do corpo, onde ficam os outros componentes, como motor, cilindro e pistão. Os outros dois passadores são vedados para que o gás não escape por eles e apenas ocorra vazamento no caso de o compressor apresentar um defeito. Para todos os experimentos deste trabalho que empregam técnicas passivas em laboratório, é usado o nitrogênio como gás de ensaio e a pressão máxima é limitada em 20 bar (2 MPa).

Os ensaios com ultrassom no ar são conduzidos de acordo com o procedimento a seguir. A partir do arranjo apresentado na figura 3.4a, primeiramente, é realizada a pressurização do compressor até a pressão limite. Em seguida, o receptor US é posicionado na posição 0 para início da aquisição de 30 mil pontos com taxa de 150 kHz (resultando em um tempo de aquisição de 200 ms), conforme mostrado na figura 3.4b. Em cada um dos 12 pontos (ilustrados pela figura 3.3) é realizada uma série de 10 medições, para que a média reduza o efeito de erro das parcelas aleatórias das medições (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008). A partir dos resultados é gerado um mapa que relaciona cada posição com o nível de tensão RMS registrado pelo transdutor.

A técnica ativa, por sua vez, dispensa a pressurização do vaso e faz uso de uma fonte ativa de ultrassom. Nesse caso, é utilizado um emissor US de mesma frequência de ressonância que a do receptor (aproximadamente 40 kHz). A partir de ensaios preliminares, observou-se que manter o emissor externo ao corpo do compressor (apenas direcionado para seu interior, alinhado com o passador de processo) torna a técnica inviável devido a perdas de sinal sonoro. Por essa razão, o emissor US deve ser colocado no interior do volume a ser ensaiado.

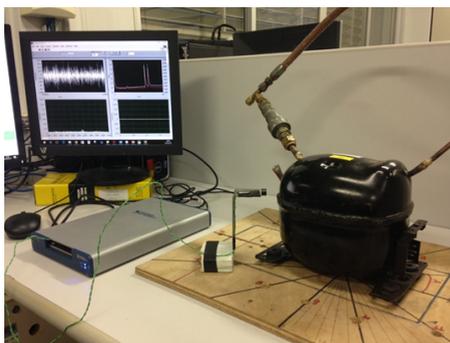
Para acionamento do emissor US é empregado o circuito mostrado na figura 3.5, sugerido no manual de aplicação do fabricante. O circuito implementa um oscilador de tensão baseado em portas lógicas inversoras, encapsuladas no circuito integrado de modelo 4049B alimentado com 12 V, que gera um sinal de onda quadrada de 17 V (pico a pico) e frequência de 40 kHz (ajustada por meio do potenciômetro). Uma vez que o emissor é acionado e posicionado internamente ao compressor em ensaio, inicia-se o ciclo de varredura com o receptor partindo da posição 0. Todos os demais passos se dão exatamente como descrito anteriormente para a técnica passiva.

Figura 3.4: Experimento empregando a técnica US passiva.

(a) Transdutor acoplado no tanque com o compressor parcialmente imerso.



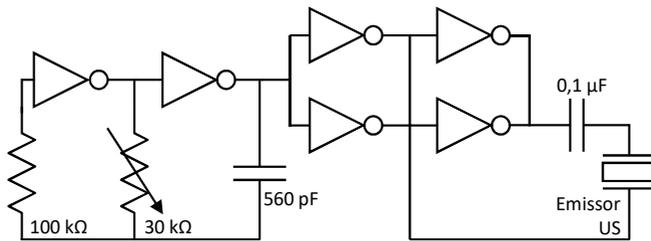
(b) Medição com o transdutor posicionado na posição 7.



Fonte: autor.

O diâmetro interno do tubo passador de processo no compressor utilizado é de aproximadamente 4 mm, por essa razão encontrou-se a necessidade de fazer uma abertura no corpo do vaso de pressão para que o emissor US (de aproximadamente 10 mm) fosse inserido. Ainda que esse processo torne o ensaio destrutivo e inviabilize sua aplicação em uma linha de produção, a prática é válida para fins exploratórios e no contexto deste trabalho, cujo objetivo é o estudo comparativo das técnicas. A figura 3.6 apresenta em 'a' o orifício de aproximadamente 10 mm, em 'b' a inserção do emissor US no orifício e em 'c' o acabamento com isolamento acústico. O material isolante é empregado para que o sinal ultrassônico proveniente do orifício aberto não exerça influência na medição.

Figura 3.5: Circuito oscilador para acionamento do transmissor US.



Fonte: adaptado de Murata (2010).

Figura 3.6: Abertura de orifício para introdução de emissor US na técnica ativa.

(a) Orifício aberto na carcaça.

(b) Transdutor posicionado no orifício.

(c) Montagem final com isolamento acústico.



Fonte: autor.

3.2.2 Experimentos com emissões acústicas

Os experimentos com transdutores de Emissões Acústicas (EA) podem ser classificados como ensaios passivos, por identificarem sinais vibro-acústicos provenientes do fluxo de gás pela descontinuidade passante. Diferentemente dos transdutores US, em que o acoplamento acústico é feito pelo ar, os transdutores de EA necessitam de contato direto com a superfície do objeto em ensaio.

O guia padrão E650/E650M da ASTM, para montagem de transdutores de emissões acústicas (EA) piezelétricos (ASTM, 2007), fornece diretrizes para a preparação e instalação de transdutores de EA em superfícies para ensaios. No documento é apresentado um método para assegurar contato adequado entre transdutor e superfície, objetivando garantir melhor desempenho nas medições. Normalmente, a fixação é feita por colagem ou por compressão.

Para os experimentos propostos neste trabalho, é empregada a fixação por compressão. Dessa forma, o transdutor é mantido fixo na estrutura por um outro dispositivo que exerce determinada força. Esses mecanismos de fixação normalmente envolvem ímãs, molas, fitas elásticas ou parafusos (ASTM, 2007). Para fixação dos transdutores de EA na superfície metálica dos compressores foram utilizados elementos magnéticos com molas.

O acoplamento do transdutor assegura a transmissão de ondas acústicas da estrutura para o sensor através de um meio apropriado. Em relação aos métodos de acoplamento, podem ser usadas peças mecânicas como guias para as ondas acústicas, acoplamento sólido, como cimento ou cola, ou acoplamento com fluidos, como água ou graxa de silicone (MILLER, 1987). Nos experimentos do presente trabalho foi utilizada graxa de silicone para o acoplamento entre os transdutores de EA e a superfície dos compressores em ensaio.

Para uma medição mais efetiva, recomenda-se que a superfície da estrutura em ensaio seja limpa e preparada mecanicamente, removendo pontos de oxidação, pintura e outras componentes que possam interferir em um contato direto do objeto em ensaio com o transdutor (ASTM, 2007). Nos experimentos com EA, as superfícies para ensaio foram preparadas com um método abrasivo para remoção de oxidação e de tinta presentes no corpo dos compressores. Em seguida, a superfície foi limpa com água.

Emissões acústicas podem ser entendidas como vibrações de frequências muito altas, de até alguns megahertz (GAUTSCHI, 2002). Diferentemente da técnica passiva abordada anteriormente, que faz uso de um transdutor US com frequência de aproximadamente 40 kHz, a maior parte do monitoramento de emissões acústicas é efetuado utilizando bandas de frequência superiores a 100 kHz. Sua operação em frequências elevadas é vantajosa em situações nas quais existe forte influência do ambiente ruidoso nas medições, uma vez que a maioria das interferências acústicas apresentam menor amplitude em altas frequências (MILLER, 1987).

Como forma de estudo dos diferentes resultados que podem

ser obtidos com a técnica de emissões acústicas, são propostos experimentos em ar, com acoplamento direto do transdutor no corpo, e também com o compressor parcialmente imerso em meio líquido, sempre a uma profundidade suficiente para cobrir totalmente a descontinuidade. Para essa segunda situação, são feitas medições tanto com contato direto no corpo do compressor quanto com acoplamento do transdutor na parede do tanque no qual o compressor pressurizado é imerso. Portanto, podem-se dividir os ensaios de EA em três grupos a partir do acoplamento do transdutor e do meio a que o vaso de pressão em ensaio é submetido. A figura 3.7 mostra cada um desses três grupos.

O primeiro conjunto de experimentos é realizado com o contato direto do transdutor na parte superior do compressor. Após pressurizado até a pressão limite de ensaio, o compressor é posicionado em um local estável para as medições, como ilustrado pela figura 3.7a. Para os ensaios em que os transdutores são colocados em contato direto ao corpo do compressor, o local escolhido para a fixação é a região com a menor curvatura (para uma maior área de contato) e de maior altura (para ficar fora da água nos casos em que ocorre a imersão parcial do compressor). A necessidade do transdutor permanecer fora da água decorre da indisponibilidade de acesso a transdutores desse tipo para uso submerso.

Os experimentos com o compressor parcialmente imerso em meio líquido foram conduzidos da mesma forma descrita anteriormente. A grande diferença é que, nesses casos, o compressor pressurizado foi colocado em um tanque para imersão a uma profundidade que cubra o vazamento, conforme mostrado na figura 3.7b para o ensaio com acoplamento direto no corpo e na figura 3.7c para acoplamento no tanque. Inicialmente, água foi utilizada como líquido para imersão dos compressores, por já ser amplamente empregado na indústria nos ensaios com o método da bolha por imersão. Um estudo mais elaborado da combinação dos métodos de bolha e acústico prevê o uso de um líquido com menor tensão superficial, a fim de verificar se tal mudança provoca diferença significativa na capacidade de o método detectar pequenos vazamentos.

O terceiro grupo de experimentos apresenta uma mudança em relação ao posicionamento e fixação do transdutor de EA. Nesse caso, deseja-se avaliar os sinais vibro-acústicos transmitidos pelo líquido até as paredes do tanque no qual o compressor pressurizado está inserido, conforme se pode observar na figura 3.7c. Da mesma forma como nos outros dois grupos, foi utilizada graxa de silicone como fluido acoplador e para a fixação na parede do tanque plástico

Figura 3.7: Experimentos empregando a técnica passiva de emissões acústicas.

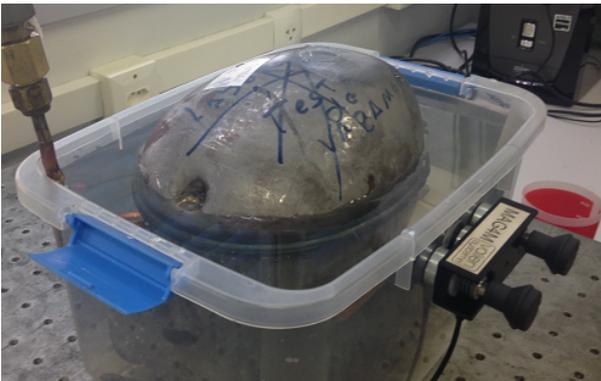
(a) Transdutor acoplado no corpo do compressor no ar.



(b) Transdutor acoplado no corpo do compressor parcialmente imerso.



(c) Transdutor acoplado no tanque com o compressor parcialmente imerso.



Fonte: autor.

foi utilizado o mesmo dispositivo magnético, mas dessa vez com ímãs posicionados internamente ao tanque, em lado oposto ao do transdutor.

Para os experimentos foram empregados dois transdutores de EA distintos. A principal razão para o uso de transdutores diferentes é a característica dinâmica de cada um. Enquanto o modelo VS75-V apresenta resposta para frequências menores, cobrindo valores de (30 a 120) kHz, o modelo VS900-M responde a uma faixa de frequências que parte de 100 kHz e vai até 900 kHz. Os transdutores usados e os periféricos que compõem o sistema de medição são apresentados com mais detalhes na seção 3.3 (página 79).

Ao se buscar entender e conhecer os fenômenos acústicos gerados pelo vazamento no vaso de pressão, é preciso verificar sinais que apresentem diferentes componentes de frequência. Isso é feito como forma de explorar a existência de respostas que possam ser relacionadas à estanqueidade do objeto em ensaio. Por essa razão, foram selecionados transdutores que, juntos, cobrem uma vasta faixa de frequências. Para uma análise adequada dos sinais, também é necessário fazer uso de uma taxa de amostragem que possibilite a correta identificação de componentes de frequências mais altas – nesse caso de até 900 kHz. Levando-se em consideração o teorema da amostragem (abordado na seção B.1 do apêndice B, página 164) e a disponibilidade de equipamentos em laboratório, é utilizado um sistema de aquisição que possibilita uma taxa de amostragem maior que duas vezes a maior componente de frequência de interesse (900 Hz).

As medições dos sinais de EA foram feitas em tensão RMS. Uma vez coletados os dados provenientes dos diferentes experimentos propostos, os resultados foram analisados em frequência e também no domínio do tempo. É importante que cada caso seja analisado criticamente, pois, ainda que vazamentos em regime permanente sejam revelados por emissões acústicas contínuas (EWGAE, 1984), a formação das bolhas resultante da imersão de um compressor pode ser vista como um evento discreto.

3.2.3 Experimentos com hidrofone

Apenas a técnica que envolve pressurização do objeto em ensaio foi avaliada nos experimentos que empregam o hidrofone como instrumento de medição devido à indisponibilidade de um emissor US adequado para uso em água. Além disso, a aplicação da técnica ativa se mostra pouco viável: a introdução de água no compressor é

prejudicial aos componentes internos; e o emprego de óleo é pouco prático, pois geraria a necessidade de introdução e retirada de óleo a cada unidade avaliada, sendo que o tipo de óleo deve ser específico para cada modelo de compressor.

Essencialmente, a técnica acústica passiva com hidrofone é aplicada combinada ao método da bolha por imersão, uma vez que o hidrofone é um transdutor US usado para medições submersas.

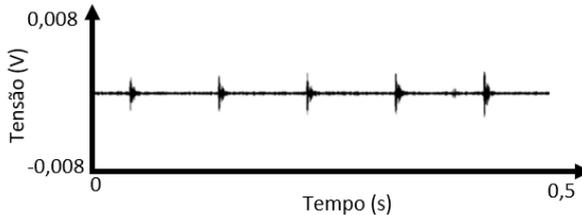
O tanque em que os compressores são imersos nos experimentos com hidrofone possui dimensões maiores que as do tanque empregado nos experimentos com EA. Nesse caso, tanto o objeto em ensaio quanto o transdutor devem ser totalmente submersos. A figura 3.8 mostra resultados de ensaios preliminares, indicando que a amplitude do sinal medido tem uma forte correlação com a distância entre o transdutor e o local onde se formam as bolhas, informação previamente encontrada na literatura (BOYD; VARLEY, 2001). A figura 3.8a apresenta graficamente o sinal de tensão no tempo para uma medição de vazamento com o hidrofone posicionado a aproximadamente 15 cm da origem das bolhas. A figura 3.8b apresenta outro gráfico das mesmas condições de ensaio, mas com o hidrofone aproximadamente 5 cm distante do vazamento.

Os resultados obtidos a partir das medições com o hidrofone são analisados nos domínios da frequência e do tempo. Segundo Manasseh et al. (2001), a frequência do sinal acústico das bolhas de aproximadamente 1 mm de raio situa-se em uma faixa próxima a 3 kHz. Isso possibilita que um filtro passa-banda seja utilizado para análise do sinal de interesse inserido na resposta do hidrofone. Ainda assim, como é observado que o sinal gerado pelos vazamentos apresenta características bastante particulares no domínio do tempo, é empregada a decomposição empírica de modos (EMD). Por ser um método adaptativo e orientado por dados que extrai modos oscilatórios presentes nos sinais, a EMD é capaz de lidar com possíveis comportamentos não lineares e não estacionários encontrados nos sinais de vazamento, sobretudo nas medições em ambiente de fábrica (HUANG et al., 1998). O estudo dessa ferramenta relativamente nova é realizado para verificação de sua aplicabilidade e comparação dos seus resultados com os obtidos pela filtragem do sinal. Mais detalhes da EMD são apresentados na seção B.2 do apêndice B, na página 167.

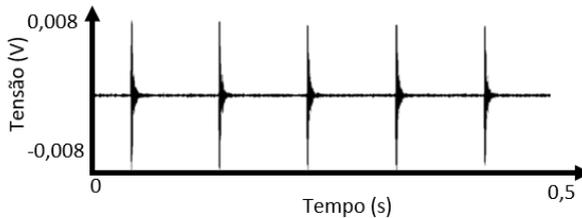
A figura 3.9 apresenta o arranjo de ensaio empregado nos experimentos em laboratório. No caso mostrado, o hidrofone está fixado lateralmente ao vaso de pressão em ensaio. Na prática, o vazamento pode ocorrer em qualquer ponto do corpo (sendo mais

Figura 3.8: Sinal no tempo para medições de vazamento com hidrofone em água para banda de (2,5 a 5,0) kHz.

(a) Distância entre hidrofone e vazamento de aproximadamente 15 cm.



(b) Distância entre hidrofone e vazamento de aproximadamente 5 cm.



Fonte: autor.

provável ao longo do cordão de solda) e por isso uma forma de varredura da superfície é mais adequada. No contexto do trabalho, os experimentos são conduzidos de forma a posicionar o hidrofone do mesmo lado do vazamento, com o objetivo de avaliar comparativamente o sinal gerado por diferentes taxas de vazamento.

3.3 APARATO EXPERIMENTAL

Segundo o INMETRO (2012, p. 34), no Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM), sistema de medição é definido como:

Conjunto dum ou mais instrumentos de medição e frequentemente outros dispositivos, compreendendo, se necessário, reagentes e insumos, montado e adaptado para fornecer informações destinadas à obtenção dos valores medidos, dentro de intervalos especificados para grandezas de naturezas especificadas.

Figura 3.9: Experimento empregando a técnica passiva com hidrofone.



Fonte: autor.

Albertazzi e Sousa (2008) afirmam que sistemas de medição são geralmente compostos por módulos funcionais que podem ou não ser integrados e, tipicamente, apresentam três módulos bem definidos: o transdutor, a unidade de tratamento de sinais e o dispositivo mostrador ou registrador. Para identificação dos sinais acústicos que caracterizam o vazamento a ser estudado, são empregados sistemas de medição que se diferem majoritariamente em seu elemento sensor. O aparato experimental utilizado e os detalhes dos softwares empregados para análise dos sinais são apresentados na sequência.

3.3.1 Transdutores

Pode-se identificar uma característica comum aos elementos sensores de todos os transdutores envolvidos nos experimentos propostos nas seções 3.2.1 a 3.2.3: tanto os transdutores ultrassônicos quanto o hidrofone e os transdutores de emissões acústicas têm como base materiais piezelétricos.

Transdutores piezelétricos são comumente empregados como transdutores ultrassônicos, de força, de pressão ou de vibração. Ao sofrer uma deformação mecânica, o material gera uma polarização das cargas e, por sua vez, uma diferença de potencial entre suas faces. Efetivamente, materiais piezelétricos se comportam como

uma fonte de carga elétrica cuja intensidade é proporcional à deformação. O efeito também ocorre no sentido inverso da conversão, ou seja, o material sofre uma deformação ao ser submetido a uma tensão elétrica. A sensibilidade desse tipo de transdutor é tipicamente informada como a carga gerada por unidade da grandeza medida (GAUTSCHI, 2002).

Após certo período de tempo, as cargas internas tendem a desaparecer ao serem dissipadas pela resistência do próprio elemento, de forma que a diferença de potencial torne-se nula. Assim sendo, transdutores piezelétricos são excelentes medidores de grandezas dinâmicas, porém normalmente não são usados quando o mensurando é estático ou varia muito lentamente. Tipicamente, um transdutor piezelétrico se comporta como um sistema passa-faixas, limitando sua resposta a uma faixa de frequências (GAUTSCHI, 2002).

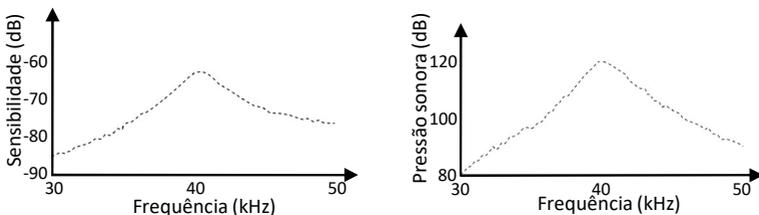
3.3.1.1 Transdutores ultrassônicos

Para os ensaios aplicando as técnicas ultrassônicas (US) ativa e passiva no ar, foram utilizados dois transdutores da fabricante Murata. O modelo MA40S4R funciona como receptor e o modelo MA40S4S como emissor. Ambos têm modelo construtivo definido como estrutura aberta e possuem frequência de ressonância em aproximadamente 40 kHz. As suas curvas de resposta em frequência são mostradas na figura 3.10. Os valores em escala logarítmica são obtidos empregando-se valores de referência de $20 \mu\text{Pa} = 0 \text{ dB}$ para o emissor e $10 \text{ V/Pa} = 0 \text{ dB}$ para a sensibilidade de referência do receptor (MURATA, 2010).

Figura 3.10: Resposta em frequência dos transdutores ultrassônicos Murata.

(a) Receptor modelo MA40S4R.

(b) Emissor modelo MA40S4S.



Fonte: adaptado de Murata (2010).

Alguns outros dados técnicos extraídos do manual são mostrados no quadro 3.1. Pode-se destacar a indicação de uso pareado (emissor e receptor) e com frequência de operação de 40 kHz. O emissor possui pressão sonora nominal indicada de (120 ± 3) dB, para o valor de referência $0 \text{ dB} = 20 \mu\text{Pa}$. O receptor tem a indicação de (-63 ± 3) dB como sensibilidade nominal, com valor de referência $0 \text{ dB} = 10 \text{ V/Pa}$. As dimensões são comuns aos dois transdutores, com 9,9 mm de diâmetro e altura de 7,1 mm (MURATA, 2010).

Quadro 3.1: Características dos transdutores de ultrassom Murata MA40S4R e MA40S4S.

Construção	Estrutura aberta
Método de uso	Emissor + receptor
Frequência Nominal [kHz]	40
Sensibilidade [dB]	-63 ± 3
Pressão Sonora [dB]	120 ± 3
Diretividade [°]	80
Capacitância [pF]	$2550 \pm 20\%$
Temperatura de operação [°C]	-40 a $+85$
Dimensão [mm]	9,9 (diâmetro) \times 7,1 (altura)
Massa [g]	0,7
Máx. tensão de entrada	Onda quadrada: 40 kHz, 20 V (pico-a-pico)

Fonte: adaptado de Murata (2010).

A fabricante Murata (2010) também sugere circuitos eletrônicos para condicionamento dos sinais emitidos e recebidos. O circuito oscilador (figura 3.5, página 73) para geração do sinal de onda quadrada de frequência 40 kHz que alimenta o emissor é utilizado no trabalho para os ensaios com a técnica US ativa. A aquisição é feita conectando-se o receptor diretamente ao sistema de aquisição de dados. Para análise dos dados na frequência de interesse, é empregado um filtro digital passa-bandas.

3.3.1.2 Transdutores de emissões acústicas

Emissões acústicas são normalmente monitoradas em um intervalo de 20 kHz a 5 MHz. A fabricante dos transdutores de emissões acústicas utilizados, Vallen Systeme (2015), classifica aplicações gerais da técnica em três faixas de frequência. As faixas de 20 kHz a 100 kHz, mais baixas, são usadas quando grandes

objetos são monitorados. São exemplos de ensaios que usualmente se enquadram nessa faixa de frequências: o monitoramento da integridade de estruturas de concreto; a detecção de vazamentos em dutos; o rastreamento de corrosão em tanques. As faixas de 100 kHz a 400 kHz são mais comumente utilizadas em testes de integridade de materiais compósitos, estruturas metálicas e vasos de pressão, por exemplo. A faixa de frequências mais altas (acima de 400 kHz) é geralmente empregada para uma menor gama de aplicações, entre as quais se destaca o uso para ensaio de objetos pequenos em ambientes muito ruidosos.

Os transdutores disponíveis no mercado são de dois tipos: ressonantes ou de banda larga. Os primeiros apresentam maior sensibilidade em uma frequência determinada. São normalmente utilizados em aplicações nas quais não se tem interesse na frequência do fenômeno acústico, mas em outros fatores, como: a amplitude; o tempo de chegada; a energia. Já os transdutores de banda larga com curva de resposta plana são utilizados quando existe mais de uma frequência de interesse em um sinal ou quando não se sabe ao certo quais componentes de frequência estão presentes no fenômeno acústico a ser explorado (VALLEN SYSTEME, 2015). Esse último caso é o contexto do presente trabalho, portanto, foram utilizados dois transdutores com banda larga para que o vazamento pudesse ser caracterizado quanto às suas componentes de frequência.

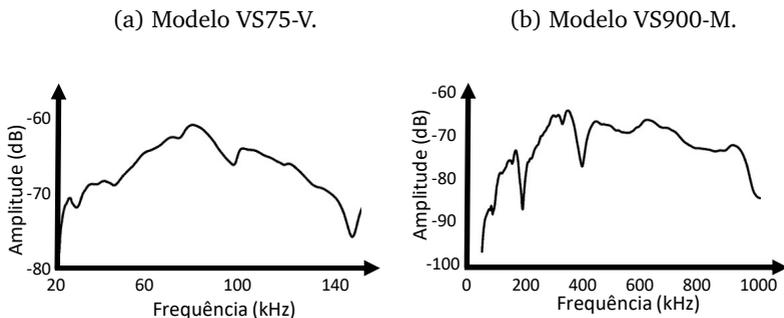
Os dois transdutores empregados nos experimentos são dos modelos VS75-V e VS900-M, cuja resposta em frequência é apresentada na figura 3.11. Nos gráficos, a amplitude é dada em uma escala logarítmica de pressão sonora com referência de $1 \text{ V}/\mu\text{bar}$. O primeiro apresenta frequências de resposta no intervalo de (30 a 120) kHz, com pico em 75 kHz, como mostrado na figura 3.11a. O segundo opera em frequências mais altas, entre (100 e 900) kHz, com pico em 350 kHz, como visto na figura 3.11b.

O quadro 3.2 traz detalhes técnicos e construtivos dos transdutores empregados nos experimentos. Merecem destaque as faixas de resposta em frequência complementares, selecionadas para que se possa analisar bandas de frequências que partem de 30 kHz e vão até 900 kHz.

O sistema de medição de EA compreende não apenas o transdutor, mas também periféricos para suprimento de energia, condicionamento do sinal, aquisição e amostragem dos dados, sua apresentação e registro. A figura 3.12 ilustra os blocos utilizados e suas conexões.

Os transdutores produzem em sua saída um sinal de corrente

Figura 3.11: Resposta em frequência dos transdutores de emissões acústicas Vallen Systeme.



Fonte: adaptado de Vallen Systeme (2015).

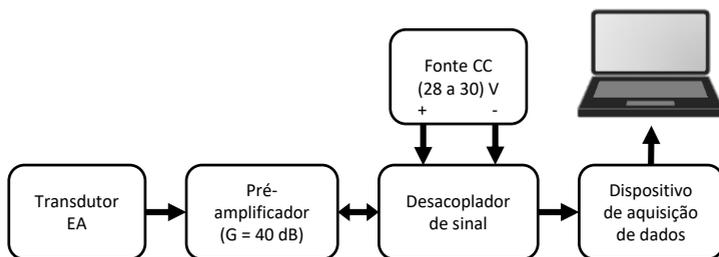
Quadro 3.2: Especificações técnicas dos transdutores AE.

Especificações	VS75-V	VS900-M
Banda de frequência [kHz]	30 a 120	100 a 900
Capacitância [pF]	140	540
Temperatura de operação [°C]	-5 a +85	-50 a +100
Dimensão [mm]	20,3 × 37,0	20,3 × 14,3
Revestimento	Aço inox.	Aço inox.
Grau de proteção	IP40	IP40
Conector	microdot	microdot

Fonte: adaptado de Vallen Systeme (2015).

alternada com alta impedância e pequena amplitude, inadequado para transmissão com cabos longos e muito pequeno para entrada direta em muitos equipamentos de aquisição de dados. Nesse contexto, o pré-amplificador é empregado no sistema de medição, ligado diretamente à saída do transdutor, amplificando o sinal para uma faixa mais adequada e impondo uma baixa impedância de saída, características desejáveis para o sinal de entrada do dispositivo de aquisição de dados (VALLEN SYSTEME, 2017b). Nos experimentos com EA, o pré-amplificador utilizado é o Vallen System AEP5, com ganho configurado para 40 dB. Ainda que exista a disponibilidade de transdutores encapsulados junto ao pré-amplificador (pré-amplificador integral), para o desenvolvimento do trabalho optou-se por soluções independentes, para que os transdutores pudessem compartilhar os mesmos periféricos.

Figura 3.12: Sistema de medição de EA.



Fonte: adaptado de Vallen Systeme (2016).

A alimentação do pré-amplificador com tensão contínua (CC) é feita por meio do mesmo cabo coaxial empregado na transmissão de dados de medição. O circuito responsável por adicionar essa tensão CC e também fazer a remoção da componente contínua para envio dos sinais de EA amplificados até o dispositivo de aquisição de dados é chamado de desacoplador de sinal. Esse módulo possui uma entrada de alimentação CC de (28 a 30) V, uma conexão com o pré-amplificador e outra com o sistema de aquisição de dados (VALLEN SYSTEME, 2017a).

O dispositivo de aquisição de dados que é utilizado no trabalho e o software para visualização, análise e registro dos dados não são específicos para aplicações de EA ou proprietários do mesmo fornecedor dos transdutores. O software foi desenvolvido pelo autor especialmente para os experimentos de estudo. Mais detalhes e especificações técnicas desses dois subsistemas são apresentados nas seções 3.3.2 e 3.3.3.

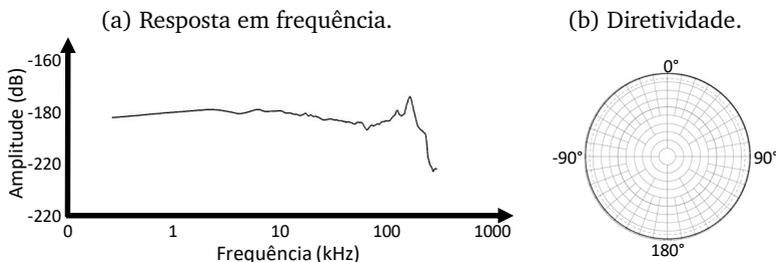
3.3.1.3 Hidrofone

O transdutor empregado nos experimentos é um hidrofone do modelo D/140/H, fornecido pela empresa Neptune Sonar. Construído para uso submerso, o instrumento é revestido com poliuretano e por possuir um amplificador integrado – encapsulado juntamente com o elemento sensor – permite que o sinal da medição seja transmitido por um cabo de até 500 m. O cabo único que liga o transdutor à unidade de aquisição de dados apresenta em seu interior 4 fios, dos quais um par é dedicado à alimentação com tensão

contínua de 24 V e o outro par (trançado) é usado para medição diferencial. Seu pré-amplificador pode ser configurado (em fábrica) para ganhos de (20, 30 ou 40) dB. A unidade empregada nos ensaios trabalha com um ganho predefinido de 40 dB (NEPTUNE SONAR, 2016).

O hidrofone empregado apresenta resposta em frequência e diretividade de acordo com os gráficos mostrados na figura 3.13, com faixa de operação entre (0,01 e 190,00) kHz e frequência de ressonância de 150 kHz. A figura 3.13a traz o gráfico disponibilizado pelo fabricante com referência de $1 \text{ V}/\mu\text{Pa}$ (para um transdutor com ganho configurado de 20 dB). Outra importante característica do instrumento é sua diretividade: por apresentar uma mesma resposta independente do ângulo de incidência do sinal ultrassônico, conforme visto na figura 3.13b (para frequência de 150 kHz e 5 dB por divisão), o hidrofone é dito omnidirecional (NEPTUNE SONAR, 2016).

Figura 3.13: Gráficos de resposta do hidrofone D/140/H.



Fonte: adaptado de Neptune Sonar (2016).

Algumas outras informações pertinentes à operação do hidrofone são apresentadas no quadro 3.3, das quais se destaca a profundidade e a temperatura de operação, indicando um projeto para uso oceânico, comum em atividades de monitoramento de mamíferos marinhos, por exemplo (NEPTUNE SONAR, 2016).

3.3.2 Dispositivo de aquisição de dados

O sinal contínuo amplificado proveniente do transdutor deve ser amostrado para que possa ser analisado e registrado computacionalmente. Para isso, é feito uso de uma placa de aquisição de dados de modelo USB-6353, da fabricante National Instruments.

Quadro 3.3: Características do hidrofone Neptune Sonar modelo D/140/H.

Frequência de operação [kHz]	0,01 a 190
Diretividade	Omnidirecional ± 2 dB até 180 kHz
Profundidade de operação [m]	1500
Temperatura de operação [°C]	-5 a +40
Dimensões [mm]	28 (diâmetro) \times 105 (altura)
Alimentação nominal [V]	24
Impedância de saída [Ω]	100

Fonte: adaptado de Neptune Sonar (2016).

O hardware atua como uma interface entre o computador e os sinais de interesse, digitalizando-os para que sejam interpretados. Os três componentes principais de um dispositivo de aquisição de dados são: os circuitos eletrônicos de condicionamento de sinais, que podem incluir as etapas de amplificação, atenuação, filtragem e isolamento e existem para colocar o sinal em um formato adequado para discretização; o conversor analógico-digital (ADC, do inglês *Analog-to-Digital Converter*), que fornece a representação digital de um sinal analógico; o barramento do computador, que atua como interface de comunicação entre o dispositivo e o computador (NI, 2017). Algumas especificações técnicas da placa de aquisição empregada, parte dos sistemas de medição usados nos experimentos relatados neste documento, são apresentadas no quadro 3.4.

Quadro 3.4: Características da placa de aquisição de dados modelo National Instruments modelo USB-6361.

Interface	USB 2.0
Alimentação [V]	11 a 30
Entradas/Saídas digitais	24
Saídas analógicas	2
Entradas analógicas	16
Taxa de amostragem [MHz]	2 (1 canal); 1 (multicanal)
Impedância de entrada	>10 G Ω em paralelo com 100 pF (ligada); 820 Ω (desligada)
Intervalo de medição [V]	$\pm 0,1$ a $\pm 10,0$
Resolução ADC	16 bits

Fonte: adaptado de National Instruments (2014).

No quadro 3.5, adaptado de National Instruments (2014), é

apresentada a incerteza absoluta para o intervalo de medição de $(-100$ a $+100)$ mV, a partir de informações relativas às incertezas de ganho, offset, ruído, não linearidade e deriva térmica para as entradas analógicas. As incertezas de ganho são originadas das não idealidades do amplificador e de seus componentes eletrônicos.

Quadro 3.5: Fontes de erros e incertezas para o dispositivo de aquisição de dados NI USB-6361

Intervalo de medição nominal [V]	$\pm 0,1$
Erro de ganho residual [ppm da leitura]	108
Coef. de deriva térmica do ganho [ppm/°C]	13
Coef. de deriva térmica da referência [ppm do intervalo de medição/°C]	1
Coef. de deriva térmica do zero [ppm da faixa nominal/°C]	90
Erro no zero [ppm da faixa nominal]	45
Erro de não linearidade integral [ppm da faixa nominal]	60
Ruído aleatório, σ [μV]	17
Incerteza absoluta do intervalo de medição [μV]	33

Fonte: adaptado de National Instruments (2014).

A incerteza absoluta para o final do intervalo nominal é uma nomenclatura adotada pelo fabricante para representar um valor combinado das fontes de erros e incertezas do intervalo. Para o intervalo de $\pm 0,1$ V, chegou-se ao valor de 33μ V considerando-se uma variação na temperatura de calibração externa de 10 °C e interna de 1 °C, 10000 pontos de leitura e fator de convergência de 3σ (nível de confiança de 99%). O cálculo é feito somando-se as parcelas de erro de ganho, erro de offset e incerteza expandida do ruído, conforme mostrado na equação (3.1):

$$I_A = V_L \cdot E_G + I_M \cdot E_O + I_R, \quad (3.1)$$

sendo:

$$E_G = E_{GR} + C_{DTG} \cdot \Delta T_I + C_{DTR} \cdot \Delta T_E;$$

$$E_O = E_Z + C_{DTZ} \cdot \Delta T_I + I_{NL};$$

$$I_R = (3R_A)/\sqrt{10000};$$

em que:

I_A	é a incerteza absoluta do intervalo de medição;
V_L	é o valor da leitura;
E_G	é o erro de ganho;
I_M	é o intervalo de medição nominal;
E_O	é o erro de offset;
I_R	é a incerteza expandida do ruído;
I_{GR}	é o erro de ganho residual;
C_{DTG}	é o coef. de deriva térmica do ganho;
C_{DTR}	é o coef. de deriva térmica da referência;
C_{DTZ}	é o coef. de deriva térmica do zero;
E_Z	é o erro no zero;
I_{NL}	é o erro de não linearidade integral;
R_A	é o ruído aleatório;
ΔT_E	é a variação na temperatura de calibração externa;
ΔT_I	é a variação na temperatura de calibração interna.

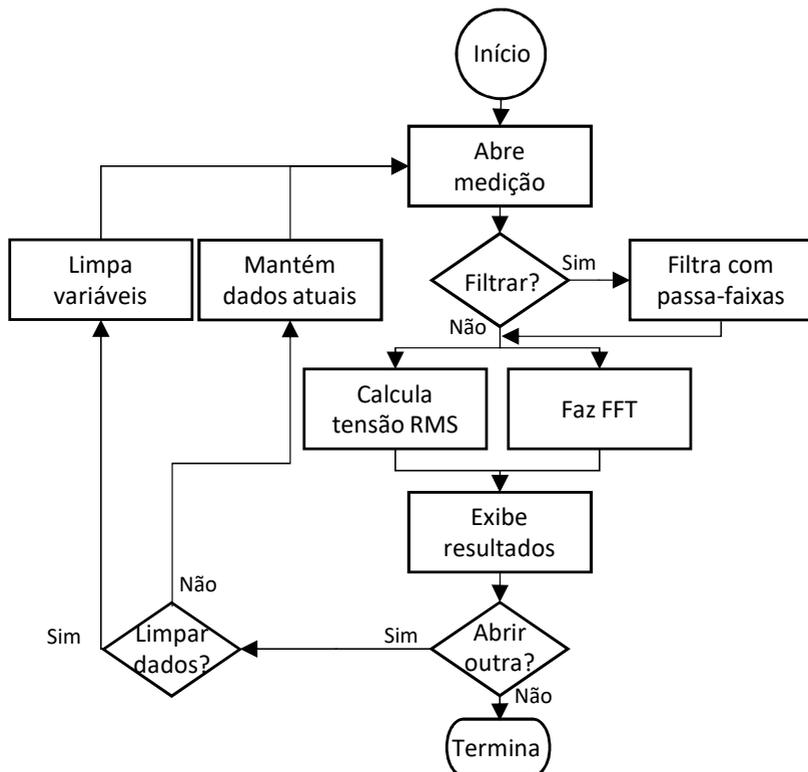
3.3.3 Software

São empregados softwares específicos para processamento e análise dos dados obtidos nos ensaios. As análises estatísticas são feitas utilizando-se o Minitab. O método otimizado para decomposição empírica de modos é feito por meio do software MATLAB. O ambiente de programação gráfica Labview, da National Instruments é empregado para aquisição dos dados medidos, processamento e registro.

Duas aplicações principais foram desenvolvidas pelo autor com a linguagem gráfica do Labview e são aplicadas em todos os experimentos. Uma delas é empregada para aquisição dos dados e registro em arquivo. A outra, é utilizada para processamento e análise dos sinais medidos. A figura 3.14 apresenta um fluxograma simplificado do funcionamento do software desenvolvido para processamento dos dados dos transdutores. Basicamente, a aplicação permite que sejam abertos dados dos ensaios salvos em disco e, a partir deles, sejam feitas análises gráficas e quantitativas a partir dos resultados da filtragem do sinal com filtro passa-faixas digital configurável, cálculo da tensão RMS do sinal e da transformada rápida de Fourier (FFT). Os resultados são mostrados em forma de gráficos dos sinais no domínio do tempo e da frequência, bem como o nível de tensão quadrática obtido. Para comparação entre ensaios, o software possibilita que dados de diferentes medições sejam re-

presentados em um mesmo gráfico.

Figura 3.14: Fluxograma simplificado do software desenvolvido para análise de dados.



Fonte: autor.

3.4 COMPRESSORES PARA ENSAIO

O presente trabalho não possui como objetivo a quantificação da taxa de vazamento dos vasos de pressão em ensaio com a aplicação das técnicas acústicas, porém é importante conhecer a ordem de grandeza dos vazamentos estudados para que as limitações de cada técnica sejam exploradas.

Para que os experimentos que exigem a pressurização dos objetos em ensaio fossem conduzidos de forma representativa, foram

usados vasos de pressão com defeitos reais que representam fielmente os que são comumente encontrados nas linhas de produção, segundo representantes da empresa parceira. Assim, os resultados obtidos a partir dos ensaios que envolvem técnicas acústicas passivas são sempre apresentados para as quatro taxas de vazamento avaliadas (incluindo um compressor considerado estanque), permitindo a comparação das técnicas quanto aos limites de detecção de vazamentos.

Todos os quatro compressores para ensaios são da mesma família de modelos e foram preparados para pressurização (com passadores de sucção e de descarga vedados e conectores de pressão no passador de processo). Um dos compressores não apresenta vazamento e é usado como referência (peça aprovada pelo controle de qualidade). Os outros três apresentam defeitos no cordão de solda que une as calotas, mais precisamente na emenda, porém com níveis distintos de vazamentos, que serão caracterizados na sequência.

Para caracterização da taxa de vazamento de cada um dos três compressores usados nos ensaios de estanqueidade, foi conduzido um ensaio de queda de pressão seguindo o procedimento descrito na revisão da literatura (seção 2.1.2, página 44). O procedimento consistiu em pressurizar cada compressor separadamente com aproximadamente 20 bar de gás nitrogênio e então monitorar a pressão interna.

A equação (2.4), apresentada na revisão da literatura, pode ser utilizada para estimar as taxas de vazamento dos compressores. Uma pequena modificação foi empregada e a versão modificada é mostrada na equação (3.2). A inclusão do termo ΔP_{ref} se dá para que eventuais erros devidos, por exemplo, a acomodação do gás ou a vazamentos no sistema de pressurização sejam compensados. Ainda que em uma situação ideal isso não seja necessário, na prática, essa compensação é recomendada (CICINNATI TEST SYSTEMS, 2004).

$$Q = \frac{(\Delta P - \Delta P_{ref})V}{\Delta t} \quad (3.2)$$

em que:

- Q é a taxa de vazamento [mbar·l/s];
 ΔP é a variação de pressão medida [mbar];
 ΔP_{ref} é a variação da pressão medida no compressor estanque [mbar];
 V é o volume do vaso [l];
 Δt é o tempo de ensaio [s].

Os valores para determinação da taxa de vazamento com a equação (3.2) foram obtidos experimentalmente para cada compressor. O volume interno livre⁴ dos compressores foi estimado como sendo 1,85 l. Durante um intervalo de tempo de 10 min a pressão interna de cada um dos três compressores defeituosos bem como a do compressor estanque é monitorada e registrada. Os ensaios são realizados em laboratório, sob as mesmas condições de temperatura e pressão atmosférica.

A tabela 3.1 lista os valores obtidos experimentalmente e usados para o cálculo das taxas de vazamento dos compressores defeituosos. Como forma de referenciar os compressores entre si, foi atribuído um número a cada um. O compressor #0 é o compressor de referência e sua estanqueidade foi comprovada pelo método da bolha por imersão. As designações foram atribuídas considerando a taxa de vazamento apresentada pelos compressores, sendo o compressor #1 o com a maior taxa e o compressor #3 o com a menor taxa.

Tabela 3.1: Queda de pressão nos compressores durante 10 min para cálculo de taxas de vazamento.

Compressor	ΔP [mbar]
#0	666*
#1	5070
#2	1116
#3	731

*Valor de referência (ΔP_{ref}) usado nos cálculos.

Fonte: autor.

Aplicando-se os resultados da tabela 3.1 na equação (3.2), obtêm-se as respectivas taxas de vazamento de cada um dos com-

⁴Considera-se como volume interno livre aquele que é ocupado pelo gás de ensaio.

pressores defeituosos. Usualmente, valores de taxa de vazamento são denotados relativos ao gás hélio (He) e, como nos ensaios foi utilizado nitrogênio, faz-se necessária a aplicação de um fator de correção. Nesse caso, os valores calculados devem ser divididos pela constante 1,12 (JACKSON; SHERLOCK, 1998). Finalmente, os valores calculados relativos às taxas de vazamento de He são apresentados na tabela 3.2.

Tabela 3.2: Taxas de vazamento calculadas para os compressores (relativas ao He).

Código	Característica	Taxa de vazamento [mbar·l/s]
#0	Estanque* (referência)	-
#1	Maior vazamento	$1,21 \cdot 10^1$
#2	Vazamento intermediário	$1,24 \cdot 10^0$
#3	Menor vazamento	$1,79 \cdot 10^{-1}$

*Sabe-se que uma taxa de vazamento nula é impraticável, porém considera-se o compressor #0 como referência de estanqueidade por estar de acordo com os requisitos de operação determinados pela empresa parceira. Em laboratório, a condição estanque foi confirmada em avaliações complementares pelo método da bolha, com imersão do compressor pressurizado em líquidos com diferentes tensões superficiais.

Fonte: autor.

3.5 CONSIDERAÇÕES

Ainda que o trabalho tenha um enfoque em ensaios de estanqueidade em vasos de pressão em geral, o estudo de caso experimental considerado emprega compressores herméticos de refrigeração. A metodologia de cada técnica acústica de ensaio de vazamento aplicada ao estudo de caso é explorada de forma a trazer detalhes práticos da experimentação. Alguns desses detalhes e limitações se dão devido a particularidades do aparato experimental utilizado, como é o caso dos transdutores de EA, que não são adequados para uso em imersão, ou então o diâmetro externo do emissor US, que não permite sua introdução no compressor pelo tubo passador. Como já visto anteriormente, todo método ou técnica de ensaio de estanqueidade possui limitações quanto à sua detectabilidade mínima. Para que se possa ter um melhor entendimento

das limitações das técnicas acústicas exploradas e para que os resultados abordados no capítulo 4 possam ser comparados, as taxas de vazamento dos compressores selecionados foram calculadas e apresentadas quantitativamente.

4 RESULTADOS

Os resultados dos experimentos, cuja metodologia foi abordada no capítulo 3, são apresentados na sequência. Sua organização é feita a partir dos mesmos critérios anteriormente utilizados: tipos de transdutores empregados; meios de ensaio (ar, água ou etanol); classe da técnica de ensaio (ativa ou passiva).

As seções deste capítulo apresentam os resultados e as análises dos experimentos que empregam técnicas acústicas que fazem uso de transdutores ultrassônicos no ar (seção 4.1), transdutores de emissões acústicas (seção 4.2) e hidrofone (seção 4.3). Os dados obtidos a partir dos ensaios são processados e analisados com uso de ferramentas computacionais abordadas em cada caso. Ao fim de cada seção, é feita uma discussão dos resultados para destacar a aplicabilidade de cada técnica ao estudo de caso e suas limitações.

4.1 ULTRASSOM NO AR

A análise dos resultados dos experimentos que fazem uso das técnicas ultrassônicas (US) ativa e passiva, empregando o ar como fluido acoplador, é feita comparando-se o sinal acústico proveniente da descontinuidade passante com o sinal medido no compressor de referência. Tanto no caso passivo quanto no ativo, um sinal de maior amplitude detectado em determinada posição tende a indicar que o receptor encontra-se direcionado para a descontinuidade, foco do sinal acústico e, possivelmente, do vazamento.

A avaliação dos resultados obtidos a partir dos experimentos com ultrassom é feita ao se comparar níveis de sinal em cada posição em torno do compressor. Uma vez que os dados estão sujeitos a erros aleatórios, um método estatístico é empregado para tornar a análise objetiva. A análise de variância (ANOVA, do inglês *ANalysis Of Variance*) de um único fator é utilizada para investigar se em alguma das 12 posições a média de sinal ultrassônico de 10 observações é significativamente diferente do valor médio observado nas outras, possivelmente indicando o sinal proveniente do vazamento. Para os resultados obtidos, o efeito combinado dos erros inerentes ao processo são assumidos como variáveis aleatórias distribuídas de forma normal e independente, com média igual a zero e variância constante para todos os níveis dos fatores (MONTGOMERY, 2013).

A fim de verificar se a média do sinal em uma posição é significativamente maior que nas outras, testa-se a hipótese nula (H_0)

de que as médias das 12 posições são estatisticamente iguais, contra a hipótese alternativa (H_1), que afirma que pelo menos um valor médio é estatisticamente diferente dos outros, ou seja,

$$H_0: \mu_0 = \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_{11},$$

$$H_1: \mu_i \neq \mu_j, \text{ para pelo menos um par } (i,j).$$

Caso a hipótese nula seja rejeitada com uma ANOVA, é desejável que seja feita a comparação das médias para todo par $i \neq j$ a fim de identificar quais das 12 posições apresentam médias maiores. Com essa finalidade é empregado o procedimento de teste de Tukey, o qual é usado para construir intervalos de confiança entre as diferenças dos pares de médias, isto é, para encontrar as médias que são significativamente diferentes das outras (MONTGOMERY, 2013).

4.1.1 Técnica passiva

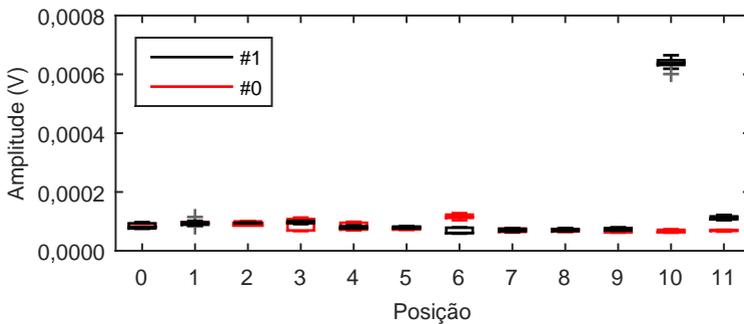
A técnica passiva de ensaio requer que o compressor seja pressurizado durante todo o período em que as medições são realizadas. No estudo de caso, a pressurização é feita em laboratório utilizando o nitrogênio como gás de ensaio. Os experimentos são conduzidos conforme apresentado na seção 3.2.1 (páginas 69 a 73). As medições são realizadas em 12 posições predefinidas ao longo do cordão de solda. Em cada posição, são registradas 10 medições do sinal de tensão RMS proveniente do transdutor.

Os resultados são apresentados de maneira gráfica, a fim de se observar o comportamento da amplitude do sinal em cada posição. Cada gráfico apresenta dois conjuntos de dados, um deles referente ao compressor defeituoso em ensaio (ilustrado na cor preta) e outro conjunto de dados referente ao compressor estanque, utilizado para referência (ilustrado na cor vermelha). A forma de apresentação empregada é o diagrama de caixas, o qual é uma ferramenta que possibilita a representação visual dos dados de cada posição. Os elementos do diagrama contêm as seguintes informações: o valor mínimo, o valor máximo, o quartil inferior (base da caixa), o quartil superior (topo da caixa) e a mediana. Ordenando as medições, o quartil inferior é o valor do elemento 25%, o quartil superior é o valor do elemento 75% e a mediana é o valor do elemento 50% (MONTGOMERY, 2013).

Dos três compressores defeituosos, o compressor #1 é o que apresenta a maior taxa de vazamento, de 12,1 mbar.l/s (1,21 Pa·m³/s). Ao ser colocado sobre a base de ensaios (figura 3.3 da página 70), sua descontinuidade encontra-se aproximadamente

alinhada à posição 10 da base de ensaios (ao se observar por uma vista superior). Essa informação é importante para que se analise de forma correta os resultados mostrados no diagrama de caixas da figura 4.1, o qual apresenta em preto os dados das medições com o compressor #1 e em vermelho os resultados das medições com o compressor #0, de referência.

Figura 4.1: Diagrama de caixas das medições da técnica US passiva para o compressor #1. Descontinuidade alinhada à posição 10.



Fonte: autor.

Na figura 4.1, o pico indica um sinal US de maior amplitude quando o transdutor faz medição alinhado ao vazamento: a posição 10 para o caso do compressor #1. Para confirmar estatisticamente que a média dos valores de tensão RMS relativa às medições da posição 10 é maior que outras, a ANOVA é empregada. Como resultado do teste obtém-se um $P - \text{valor} < 0,001$, rejeitando-se com grande folga a hipótese nula H_0 e concluindo que ao menos uma posição de medição no compressor #1 é significativamente diferente de outra, com um nível de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$). O $P - \text{valor}$ representa o menor nível de significância (α) que levaria à rejeição da hipótese nula H_0 (MONTGOMERY, 2013).

A fim de identificar a média significativamente diferente das demais, é proposta a utilização do teste de Tukey, cujo procedimento pode ser usado para construir intervalos de confiança nas diferenças de todos os pares de médias. Os resultados apresentados em tabelas ajudam na interpretação dos resultados e na validação de suposições estatísticas. Nas tabelas, médias seguidas de mesma

letra, em uma mesma coluna, não apresentam diferenças significantes, ao nível de significância de 5%, pelo teste de Tukey (MONTGOMERY, 2013).

A tabela 4.1 representa o teste de Tukey para os dados obtidos nos ensaios com o compressor #1 juntamente com os dados do compressor #0 (representados pela letra R). A partir do agrupamento de letras é possível observar que o fator 10 não compartilha a letra 'A' com nenhum outro fator, permitindo assim identificá-lo como significativamente diferente dos demais. Isso comprova o destaque observado no diagrama de caixas, podendo-se afirmar que a média dos valores de tensão RMS observada na posição 10, a mais próxima do vazamento, é significativamente maior que todas as demais, com um nível de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$).

O nível de tensão RMS da posição 6 nas medições do compressor #0 (referência) apresenta um nível maior que o das outras posições. Considera-se que esse efeito ocorre devido a um eventual vazamento pelo engate de pressurização no compressor de referência, uma vez que a conexão localiza-se próxima ao ponto 6 de medição.

As linhas da base de ensaios são utilizadas como guias para o posicionamento do transdutor no momento das medições. Essas linhas são originalmente separadas entre si por um ângulo de 30°. A fim de identificar o comportamento do sinal acústico ao passo que o transdutor se aproxima do alinhamento com a descontinuidade do compressor #1, foram criadas linhas adicionais distantes em 5° entre si entre as posições 9 e 11. O resultado dessas novas medições é apresentado na forma de diagrama de caixas na figura 4.2, no qual é possível identificar que o sinal US tende a ter uma maior amplitude quando o receptor é alinhado com o vazamento (posição 10).

Ao se realizar o mesmo procedimento experimental com o compressor #2, obtém-se o diagrama representado pela figura 4.3. Nesse caso, a taxa de vazamento apresentada pelo vaso de pressão (0,124 Pa·m³/s) é cerca de 10 vezes menor que a do compressor #1 e, quando posicionado na base de ensaios, sua descontinuidade também fica aproximadamente alinhada à posição 10. Essa diferença no tamanho da descontinuidade influencia no sinal acústico gerado, de modo que não seja possível diferenciar o sinal da posição com vazamento dos sinais medidos nas demais posições. Diferente do ensaio com o compressor #1, nesse caso o teste de Tukey apresentado no apêndice D (tabela D.1 da página 177) confirma estatisticamente que, com 95% de nível de confiança, não é possível afirmar que a

Tabela 4.1: Resultados do teste de Tukey com nível de confiança de 95% para os compressores #1 e #0 (Referência) – técnica US passiva.

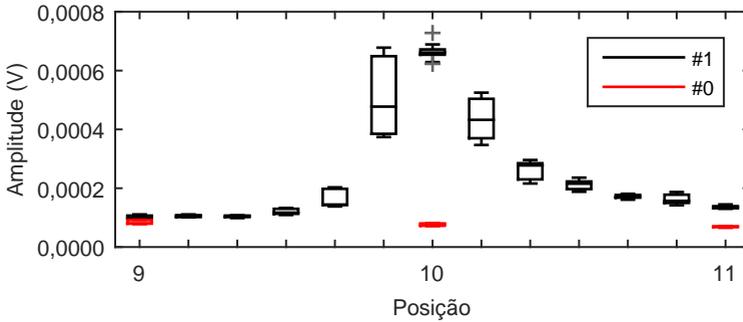
Fator	Nº de amostras	Tensão (V)	Grupos
10	10	$6,37 \cdot 10^{-4}$	A
R6	10	$1,17 \cdot 10^{-4}$	B
11	10	$1,13 \cdot 10^{-4}$	B
3	10	$0,98 \cdot 10^{-4}$	C
2	10	$0,94 \cdot 10^{-4}$	C D
R1	10	$0,94 \cdot 10^{-4}$	C D E
1	10	$0,93 \cdot 10^{-4}$	C D E
R2	10	$0,93 \cdot 10^{-4}$	C D E F
R3	10	$0,89 \cdot 10^{-4}$	C D E F G
R0	10	$0,84 \cdot 10^{-4}$	D E F G H
0	10	$0,83 \cdot 10^{-4}$	D E F G H
R4	10	$0,82 \cdot 10^{-4}$	E F G H I
4	10	$0,80 \cdot 10^{-4}$	F G H I J
5	10	$0,80 \cdot 10^{-4}$	G H I J K
R5	10	$0,77 \cdot 10^{-4}$	G H I J K L
9	10	$0,74 \cdot 10^{-4}$	H I J K L
7	10	$0,72 \cdot 10^{-4}$	H I J K L
8	10	$0,71 \cdot 10^{-4}$	H I J K L
R8	10	$0,70 \cdot 10^{-4}$	I J K L
R11	10	$0,69 \cdot 10^{-4}$	I J K L
R7	10	$0,68 \cdot 10^{-4}$	J K L
6	10	$0,68 \cdot 10^{-4}$	J K L
R9	10	$0,67 \cdot 10^{-4}$	K L
R10	10	$0,66 \cdot 10^{-4}$	L

Fonte: autor.

média da amplitude do sinal medido na posição 10 seja diferente de outras em que, sabidamente, não há vazamento.

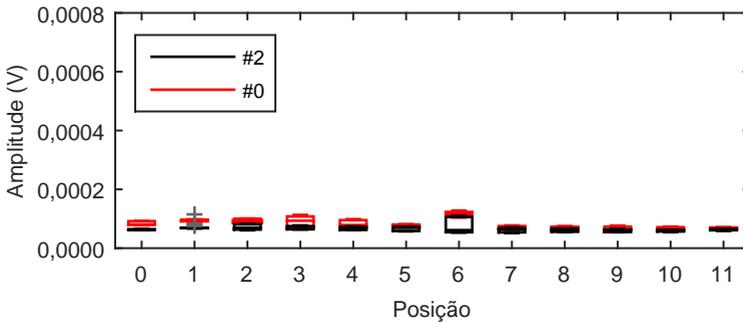
Como esperado, os resultados obtidos nos experimentos com o compressor #3, o qual possui a menor das três taxas de vazamento ($0,018 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$), apresentados na forma de diagrama de caixas na figura 4.4, também não foram conclusivos em destacar a amplitude do sinal US medido na posição do vazamento (orientada para a posição 10). A tabela D.2 do apêndice D (página 178) mostra o resultado para o teste de Tukey aplicado aos dados do ensaio com

Figura 4.2: Diagrama de caixas das medições da técnica US passiva para compressor #1 com menor resolução (5°) em torno da descontinuidade (alinhada à posição 10).



Fonte: autor.

Figura 4.3: Diagrama de caixas das medições da técnica US passiva para o compressor #2. Descontinuidade alinhada à posição 10.



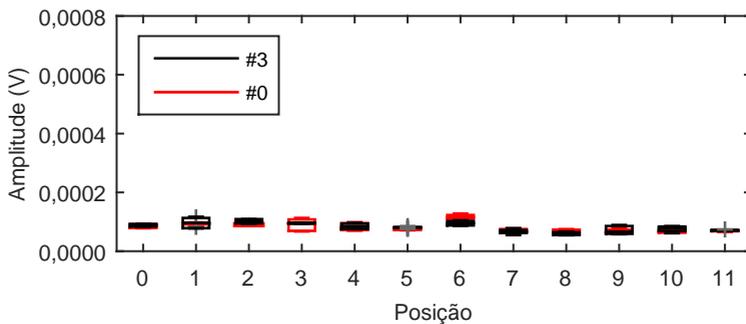
Fonte: autor.

o compressor #3, confirmando estatisticamente (para $\alpha = 0,05$) que a média obtida na posição 10 não se destaca das demais.

4.1.2 Técnica ativa

A técnica US ativa requer que o sinal acústico empregado na indicação e localização de vazamentos seja introduzido no sistema

Figura 4.4: Diagrama de caixas das medições da técnica US passiva para o compressor #3. Descontinuidade alinhada à posição 10.



Fonte: autor.

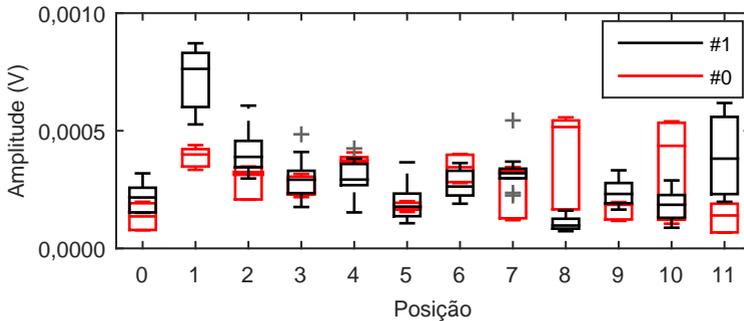
por meio de uma fonte artificial, que no caso de estudo é o emissor US de modelo MA40S4S. Devido à incompatibilidade dimensional entre o transdutor e o duto de acesso ao interior do compressor, questão abordada na seção 3.2.1 (página 69), necessitou-se abrir um orifício de aproximadamente 10 mm no corpo do compressor. Essa alteração estrutural torna o objeto em ensaio inadequado para pressurização, ou seja, inutilizável em todos os experimentos que empregam técnicas passivas. Por essa razão, apenas dois compressores foram usados nos ensaios para avaliação da técnica ativa, um com defeito no cordão de solda e outro originalmente estanque. Ao ser posicionado na base de ensaios, a descontinuidade passante do compressor defeituoso encontra-se aproximadamente alinhada à posição 1 da base de ensaios (ao se observar por uma vista superior).

A ANOVA é empregada mais uma vez para confirmar estatisticamente que a média dos valores de tensão RMS na posição 1 é maior que nas outras. Como resultado, obtém-se $P\text{-valor} < 0,001$ e rejeita-se a hipótese nula H_0 , concluindo-se que as médias apresentam diferenças entre si, com um nível de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$). Ou seja, a distância (angular) entre o transdutor e a descontinuidade passante afeta significativamente o resultado das medições.

A figura 4.5 apresenta o diagrama de caixas referente aos dados medidos em cada uma das 12 posições. Os dados representados em preto são relativos aos ensaios do compressor defeituoso

e os dados em vermelho às medições do compressor de referência. Graficamente, é possível observar que a amplitude média do sinal medido na posição 1 se destaca das demais.

Figura 4.5: Diagrama de caixas das medições da técnica US ativa. Descontinuidade alinhada à posição 1.



Fonte: autor.

Ao se confirmar estatisticamente que a amplitude do sinal medido na posição 1 é maior que as amplitudes dos sinais medidos nas demais posições, confirma-se que a descontinuidade passante avaliada pode ser identificada e localizada pela técnica ativa. Um teste de Tukey foi feito com os resultados de 10 medições em cada posição para o compressor defeituoso e para o compressor de referência. Na tabela 4.2, fatores que não compartilham uma letra na coluna do grupo são estatisticamente diferentes dos demais com um nível de confiança de 95%. Assim, é possível afirmar que a tensão RMS média medida na posição do vazamento (posição 1) é significativamente diferente das demais.

4.1.3 Discussão acerca dos resultados

Analisando os resultados, é possível concluir que ambas as técnicas podem ser usadas para identificar vazamentos em vasos de pressão com taxas na ordem de 12,1 mbar·l/s (1,21 Pa·m³/s). Além disso, o uso de uma base para referência de posições e a sequência de medições forneceram uma estimativa razoável sobre a localização dos vazamentos. Tal estimativa pode ser melhorada se a distância angular entre as linhas de medição for menor. Porém, ao se criar mais pontos de medição, também se aumenta o tempo

Tabela 4.2: Resultados do teste de Tukey com nível de confiança de 95% para o compressor defeituoso (técnica US ativa).

Fator	Nº de amostras	Tensão (V)	Grupos
1	10	$7,32 \cdot 10^{-4}$	A
R8	10	$4,23 \cdot 10^{-4}$	B
2	10	$4,04 \cdot 10^{-4}$	B C
11	10	$3,94 \cdot 10^{-4}$	B C D
R1	10	$3,91 \cdot 10^{-4}$	B C D
R4	10	$3,82 \cdot 10^{-4}$	B C D E
R10	10	$3,77 \cdot 10^{-4}$	B C D E
R6	10	$3,46 \cdot 10^{-4}$	B C D E F
7	10	$3,29 \cdot 10^{-4}$	B C D E F G
3	10	$2,99 \cdot 10^{-4}$	B C D E F G H
R2	10	$2,95 \cdot 10^{-4}$	B C D E F G H
4	10	$2,90 \cdot 10^{-4}$	B C D E F G H
6	10	$2,72 \cdot 10^{-4}$	C D E F G H I
R7	10	$2,70 \cdot 10^{-4}$	C D E F G H I
R3	10	$2,54 \cdot 10^{-4}$	D E F G H I
9	10	$2,38 \cdot 10^{-4}$	E F G H I J
0	10	$2,15 \cdot 10^{-4}$	F G H I J
5	10	$1,95 \cdot 10^{-4}$	G H I J
10	10	$1,81 \cdot 10^{-4}$	H I J
R5	10	$1,79 \cdot 10^{-4}$	H I J
R9	10	$1,69 \cdot 10^{-4}$	H I J
R0	10	$1,41 \cdot 10^{-4}$	I J
R11	10	$1,36 \cdot 10^{-4}$	I J
8	10	$1,06 \cdot 10^{-4}$	J

Fonte: autor.

total de ensaio. Outra alternativa seria criar um arranjo com outros transdutores para possibilitar medições simultâneas em toda a área externa do vaso de pressão.

Quando se emprega uma menor resolução do intervalo de medição, conforme apresentado na figura 4.2, é obtida uma melhor estimativa da localização do vazamento. Além disso, evita-se que um vazamento localizado entre duas linhas separadas por 30° não seja detectado. Assim, uma base adequada para ensaios deve ter três vezes o número original de linhas (36 linhas de medição se-

paradas por 10°) para identificar corretamente os vazamentos com taxas semelhantes à taxa de vazamento do compressor #1.

Mesmo que seja possível afirmar que os resultados são representativos, uma vez que foram utilizados compressores defeituosos de uma linha de fabricação real, a identificação ficou limitada aos defeitos do compressor #1 (ou com taxa equivalente) por ambas as técnicas. Comparativamente, a identificação do sinal de vazamento com a técnica passiva mostrou-se mais evidente do que com a técnica ativa, dado que a diferenciação entre os sinais de vazamento e os demais é maior.

Os resultados obtidos a partir dos experimentos com transdutores ultrassônicos no ar, aplicando-se as técnicas ativa e passiva, foram publicados na forma de artigo por Piazzetta, Flesch e Pacheco (2017) no ASME *Pressure Vessels and Piping Conference (PVP)* 2017.

4.2 EMISSÕES ACÚSTICAS

Os resultados apresentados nesta seção são organizados de acordo com o meio utilizado para ensaio e com o acoplamento do transdutor no compressor. A seção 4.2.1 apresenta os resultados da aplicação mais simples e convencional, na qual os transdutores são acoplados diretamente no corpo do compressor, o qual se encontra posicionado sobre uma bancada de ensaios. A seção 4.2.2, por sua vez, traz os resultados dos experimentos em que os transdutores são acoplados diretamente no corpo do compressor parcialmente imerso em líquido. Por fim, a seção 4.2.3 expõe os resultados dos ensaios em que os transdutores são acoplados na parede do tanque dentro do qual os compressores são colocados. Os experimentos que necessitam imersão parcial do compressor são realizados com dois fluidos distintos (água ou etanol), a fim de estudar as variações nas emissões acústicas geradas pelo vazamento nesses dois meios.

Os resultados são apresentados de acordo com o transdutor utilizado na medição e com o compressor em análise, sempre relacionando os resultados das medições de vazamento com os do compressor estanque. Para gerar os espectros de frequência apresentados inicialmente para cada transdutor foram empregados filtros passa-faixa, a fim de eliminar componentes CC e de baixas frequências. Em todos os casos deste trabalho foram empregados filtros digitais passa-faixas Butterworth de quinta ordem. Para as medições com o VS75-V, foram definidas as frequências de corte inferior como 10 kHz e superior como 150 kHz. Para as medições

com o VS900-M, o filtro foi configurado com frequência de corte inferior igual a 10 kHz e frequência de corte superior igual a 900 kHz. Para os casos em que foram usadas outras frequências de corte nos filtros, essas são indicadas no texto.

Para que se possa melhor entender os efeitos das interferências do ambiente nas medições, as técnicas de EA também são estudadas em fábrica. Neste trabalho, o estudo é feito analisando-se resultados obtidos a partir de experimentos realizados em linha de produção de compressores herméticos.

4.2.1 Acoplamento no compressor no ar

A ABNT (2013a) indica que a detecção de vazamentos empregando a técnica de emissões acústicas deva ser feita a partir da detecção de um sinal acústico gerado pelo escoamento turbulento proveniente do vazamento. Também sugere que a análise dos resultados dos experimentos pode ser feita considerando-se a amplitude da tensão RMS do sinal. No contexto deste trabalho, deseja-se conhecer as componentes em frequência dos diferentes vazamentos estudados e, para isso, faz-se uso da análise em frequência do sinal medido, como forma de complementar a informação obtida a partir da análise no domínio do tempo.

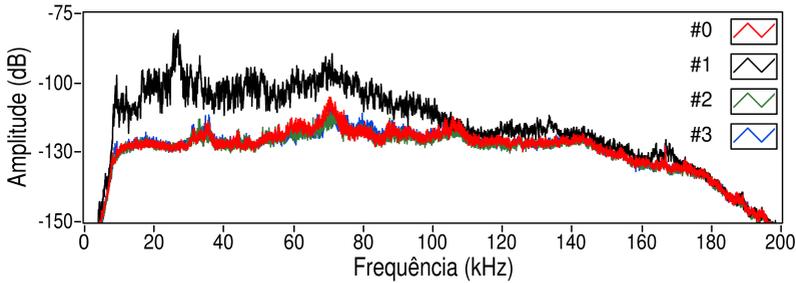
4.2.1.1 Ensaios realizados em laboratório

VS75-V

A figura 4.6 apresenta os espectros de frequência gerados a partir dos dados de medições em laboratório, obtidos de forma independente para cada compressor.

A resposta em frequência permite a análise das componentes de interesse associadas ao sinal acústico gerado pelo vazamento de gás. O sinal medido no compressor #1 é de maior amplitude que o medido no compressor de referência #0, entretanto, as medições com vazamentos menores, dos compressores #2 e #3, não apresentaram nenhuma diferença em relação ao sinal acústico do compressor adotado como estanque. Com isso, pode-se concluir que a técnica empregada não foi capaz de identificar vazamentos que apresentaram taxas com ordens de grandeza menores que a do compressor #1.

Figura 4.6: Respostas em frequência do transdutor VS75-V com acoplamento no compressor no ar.

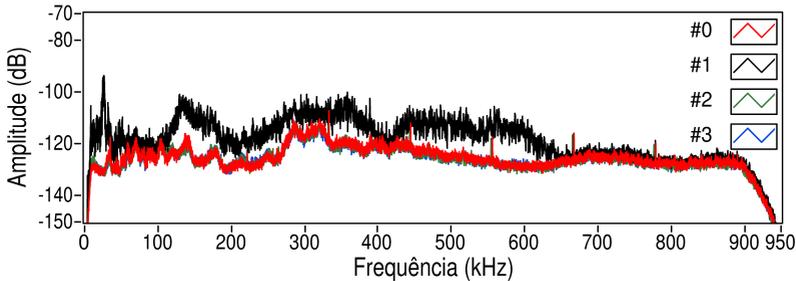


Fonte: autor.

VS900-M

O transdutor VS900-M permite que frequências maiores sejam analisadas, conforme os dados apresentados na figura 4.7.

Figura 4.7: Respostas em frequência do transdutor VS900-M com acoplamento no compressor no ar.



Fonte: autor.

Da mesma forma como nos resultados do transdutor VS75-V, o sinal acústico medido no compressor #1 apresentou componentes de maior amplitude que as dos sinais medidos nos outros compressores. Nesse caso, a ampla faixa de frequências excitada pelo escoamento turbulento de gás atingiu até aproximadamente 650 kHz. Por outro lado, os outros dois compressores defeituosos não apresentaram componentes de frequência que possibilitassem sua distinção

ao serem relacionados com o compressor de referência.

4.2.1.2 Ensaios realizados em fábrica

O estudo do método acústico para avaliação de vazamentos em vasos de pressão é motivado pela sua possível aplicação em linhas de produção industrial. Para isso, é razoável que os efeitos de interferências sejam explorados. Em seu estudo, Marció (2014) identificou que sinais de origem sonora, estrutural (vibração) e eletromagnética em ambiente fabril podem influenciar consideravelmente uma medição de vibração com acelerômetro, adicionando principalmente componentes de baixas frequências⁵ ao sinal de interesse.

A fim de identificar a influência do ruído e interferências do ambiente na faixa de frequência em que os transdutores operam, foram conduzidos experimentos em ambiente industrial. Para maior representatividade dos resultados, a bancada experimental empregada foi posicionada próxima às estações de soldagem e pintura, onde tipicamente ocorrem os ensaios de estanqueidade nos compressores. O ambiente fabril apresenta interferências e ruídos que atuam em forma de perturbações nas medições. Esse ruído de fundo⁶ incide nas medições com componentes com frequências constantes (que não mudam de ensaio para ensaio) e também com componentes com frequências variáveis (que têm diferentes efeitos em ensaios repetidos). Devido a limitações dos equipamentos disponíveis na fábrica, a pressurização dos compressores para esses experimentos foi feita com ar atmosférico e a pressão máxima atingida foi de cerca de 16 bar (1,6 MPa).

VS75-V

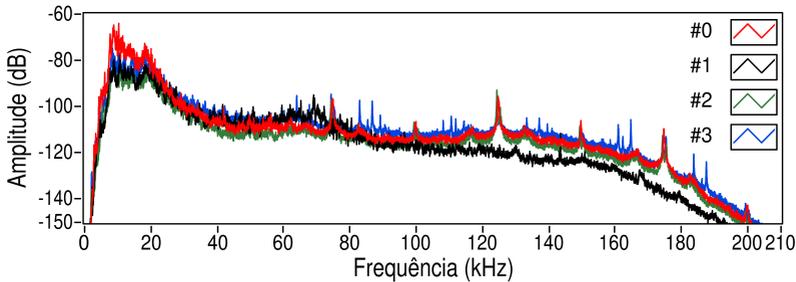
Os resultados das medições apresentados na sequência foram obtidos em fábrica empregando-se o transdutor VS75-V. É possível observar pelo gráfico da figura 4.8 que, em contraste aos resultados obtidos em laboratório (figura 4.6, página 106), a curva do espectro de frequências do sinal medido no compressor #1 não se diferencia das demais em toda a faixa de frequências analisada. Adicional-

⁵Marcío (2014) empregou um acelerômetro e sua análise abrangeu frequências de até 25 kHz.

⁶O termo ruído de fundo é empregado abrangendo amplamente ruídos e interferências do ambiente, podendo ser de origem térmica, eletromagnética, vibro-acústica etc.

mente, em frequências mais altas, a curva referente à medição do compressor #0 apresenta componentes de maior amplitude que as dos compressores com vazamento.

Figura 4.8: Respostas em frequência do transdutor VS75-V com acoplamento no compressor no ar em fábrica.



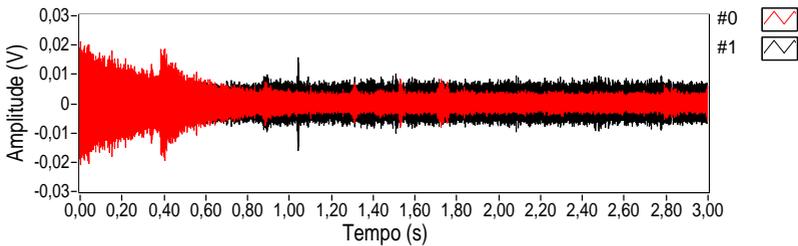
Fonte: autor.

Ainda que a análise em frequência das medições em fábrica não possibilite identificar nenhum compressor defeituoso, pelo sinal no tempo condicionado com filtro passa-faixa com frequências de corte de (50 e 80) kHz é possível identificar o maior dos três vazamentos. No gráfico da figura 4.9, identifica-se uma forte perturbação no início da medição que mascara o espectro de frequências do sinal de vazamento, porém, após meio segundo de ensaio esse sinal de perturbação cessa e a amplitude do sinal medido no tempo, no compressor #0, passa a ser menor que a amplitude do sinal medido no compressor #1. A partir de tal análise, é possível identificar o compressor #1 como defeituoso, da mesma forma como ocorre em laboratório para essa configuração de ensaio.

VS900-M

As medições com o transdutor VS900-M são apresentadas na figura 4.10. Nela, é possível identificar picos de sinal em aproximadamente 150 kHz e 350 kHz que se destacam em relação ao sinal do compressor de referência. Entretanto, não foi possível encontrar uma faixa de frequências que indicasse o vazamento do compressor #1 em todos os ensaios realizados. É possível que uma maior pressão de ensaio contribua para a geração de um sinal vibroacústico de maior amplitude no compressor defeituoso, porém nos

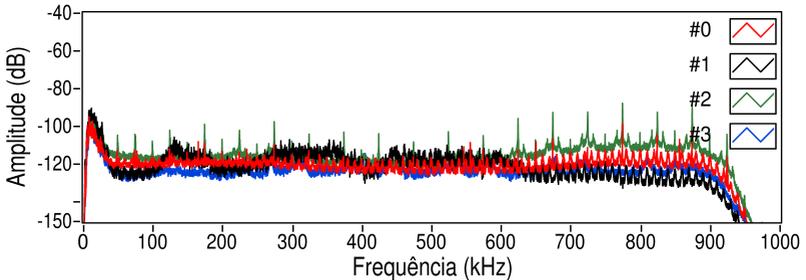
Figura 4.9: Respostas no tempo do transdutor VS75-V com acoplamento no compressor no ar em fábrica.



Fonte: autor.

experimentos conduzidos isso não foi possível devido à limitação técnica da linha de manufatura.

Figura 4.10: Respostas em frequência do transdutor VS900-M com acoplamento no compressor no ar em fábrica.



Fonte: autor.

4.2.2 Acoplamento no compressor parcialmente imerso

Ao combinar a técnica acústica passiva com a técnica de bolha por imersão, procura-se identificar vazamentos a partir dos sinais acústicos presentes no processo de formação das bolhas. Devido a uma combinação de fatores, tais como: a pressão de ensaio; o gás empregado; o líquido para imersão; a taxa de vazamento, as bolhas podem se formar com uma frequência relativamente baixa. Isso faz

com que o evento seja caracterizado como discreto no tempo e, muitas vezes, a análise em frequência necessite ser acompanhada da análise no domínio do tempo.

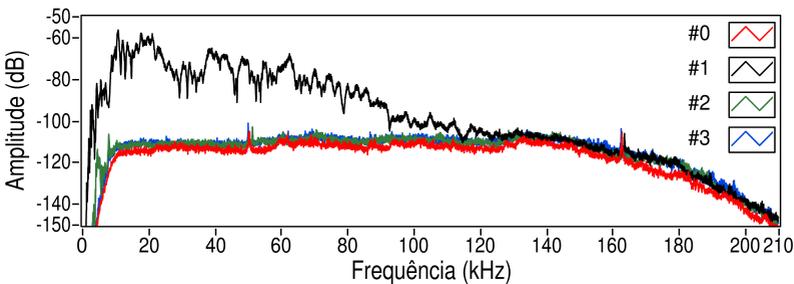
Para avaliação dos sinais são empregados filtros passa-baixas com frequências de corte selecionadas individualmente a cada aplicação. Essa seleção é feita a partir da análise dos espectros de frequências e também por experimentação.

4.2.2.1 Ensaios realizados em laboratório com água

VS75-V

Analisando-se os espectros de frequência dos sinais medidos com o transdutor de EA VS75-V e apresentados na figura 4.11, observa-se que a curva referente ao compressor #1 destaca-se frente à dos demais, principalmente em frequências de até aproximadamente 120 kHz. Esse comportamento possibilita a identificação do compressor #1, defeituoso, sugerindo que vazamentos de mesma ordem também possam ser identificados, nas mesmas condições de ensaio.

Figura 4.11: Respostas em frequência do transdutor VS75-V com acoplamento no compressor parcialmente imerso em água.

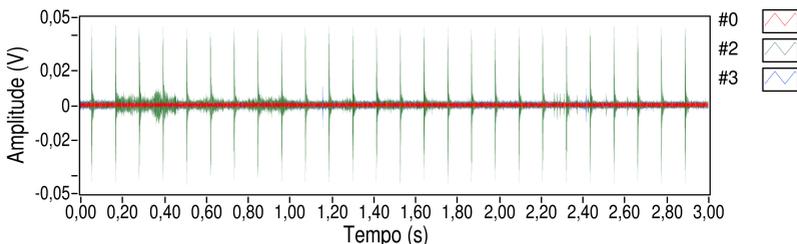


Fonte: autor.

A figura 4.12 ilustra o resultado da aplicação de um filtro passa-faixa com frequências de corte de (2 e 20) kHz ao sinal representado na figura 4.11, possibilitando análise no domínio do tempo. Nela, identificam-se picos igualmente espaçados, que indicam a formação de bolhas de gás na água, devidas aos vazamentos dos compressores #2 (representado em verde) e #3 (representado

em azul). O sinal referente à medição do compressor #1 não foi inserido no gráfico da figura 4.12, pois sua identificação pôde ser feita no domínio da frequência e, no tempo, seu sinal de amplitude, maior que a dos outros, prejudicaria a identificação dos picos de sinal dos compressores #2 e #3.

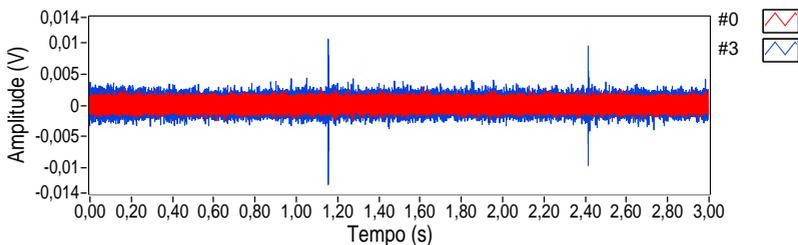
Figura 4.12: Respostas no tempo do transdutor VS75-V com acoplamento no compressor parcialmente imerso em água.



Fonte: autor.

A mesma conclusão pode ser obtida para o compressor #3, visto que dois picos espaçados de aproximadamente 1,25 s também são observados no gráfico da figura 4.12 (nos tempos 1,16 s e 2,41 s). Esses sinais do vazamento do compressor #3 são apresentados em detalhe no gráfico da figura 4.13. O maior espaçamento observado decorre da menor frequência de formação de bolhas.

Figura 4.13: Respostas no tempo do transdutor VS75-V para os compressores #0 e #3, com acoplamento no compressor parcialmente imerso em água.



Fonte: autor.

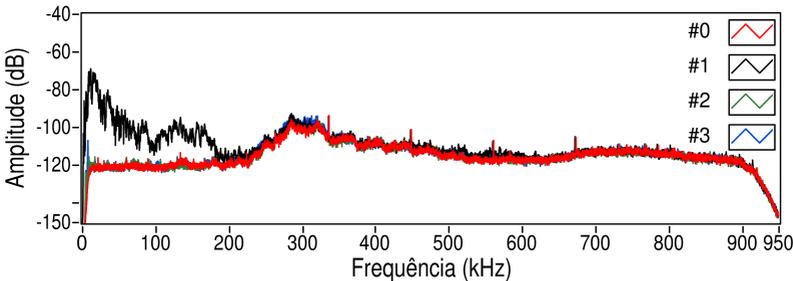
A principal diferença encontrada entre os perfis dos sinais dos compressores #1, #2 e #3 decorre de diferente comportamento

de formação das bolhas na água. Enquanto os vazamentos de gás dos compressores #2 e #3 parcialmente imersos em água formam bolhas bem definidas e espaçadas, o compressor #1 apresenta um vazamento caracterizado por uma formação praticamente contínua de bolhas, o que faz com que uma ampla faixa de frequências seja excitada.

VS900-M

Comparando-se os resultados das medições com o transdutor VS900-M, observa-se que as componentes de frequência do sinal de vazamento medido no compressor #1 parcialmente imerso em água manifestam-se em faixas mais baixas do que quando o experimento é feito no ar: detalhe mostrado pelos espectros do gráfico da figura 4.14. Ainda assim, é possível identificar o sinal gerado pelo vazamento do compressor #1, tanto no domínio da frequência quanto no domínio do tempo.

Figura 4.14: Respostas em frequência do transdutor VS900-M com acoplamento no compressor parcialmente imerso em água.

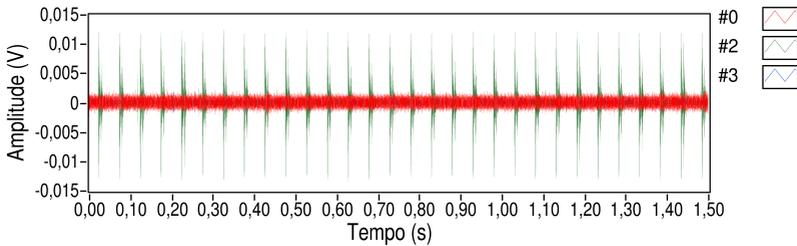


Fonte: autor.

Embora se saiba que o transdutor VS900-M trabalhe em frequências mais elevadas, é feita a filtragem do sinal em uma faixa de baixas frequências, de (3 a 100) kHz, a fim de verificar se a formação das bolhas é identificada também por esse transdutor. A figura 4.15 ilustra, no domínio do tempo, os sinais medidos em ensaios com o compressor de referência juntamente com os compressores #2 e #3, os que apresentam as menores taxas de vazamento. A análise do gráfico possibilitou a identificação dos picos de sinal referentes ao vazamento do compressor #2. Entretanto, não foi pos-

sível identificar sinais que pudessem indicar o menor dos defeitos, o do compressor #3.

Figura 4.15: Respostas no tempo do transdutor VS900-M com acoplamento no compressor parcialmente imerso em água.



Fonte: autor.

4.2.2.2 Ensaios realizados em laboratório com etanol

Para verificar se a mudança no meio em que as bolhas são formadas interfere nas medições acústicas dos vazamentos, os ensaios descritos na seção 4.2.2.1 foram repetidos alterando-se o meio de ensaio para etanol com concentração de 95%, o qual apresenta uma tensão superficial aproximadamente três vezes menor que a da água⁷.

O efeito do líquido com menor tensão superficial na formação das bolhas de gás é visível nos experimentos com água e etanol realizados em laboratório, para os mesmos compressores e nas mesmas condições de pressão e gás de ensaio. Nota-se que as bolhas quando formadas em etanol apresentam menores diâmetros e também maior frequência de desprendimento que aquelas formadas em água. A figura 4.16a mostra o compressor #2 parcialmente imerso em água e a figura 4.16b mostra o mesmo compressor parcialmente imerso em etanol. Nas duas situações as condições de pressão interna, pressão externa e temperatura são as mesmas.

O compressor #3 nos dois diferentes meios é mostrado na figura 4.17. Nesse caso, com a menor das taxas de vazamentos analisadas, fica evidente o menor diâmetro das bolhas formadas em etanol (4.17a), quando comparadas às formadas em água (4.17b).

⁷As tensões superficiais a 20 °C para etanol e água são, respectivamente, (22,39 e 77,88) mN/m (DEAN, 1998).

Adicionalmente, é possível verificar que existem duas descontinuidades passantes presentes no cordão de solda do compressor #3, o que não se percebe quando o ensaio é feito em água.

Figura 4.16: Vazamento do compressor #2 em diferentes meios.

(a) Parcialmente imerso em água.



(b) Parcialmente imerso em etanol.



Fonte: autor.

VS75-V

Ao se observar de maneira gráfica no domínio da frequência os resultados provenientes dos experimentos com etanol (a partir da figura 4.18), pode-se verificar que o sinal acústico excita uma maior faixa de frequências quando comparado às medições com o mesmo transdutor e compressores parcialmente imersos em água (mostradas na figura 4.11, página 110). Essa diferença entre as respostas em frequência dos vazamentos em água e etanol se dá pela maior taxa de formação de bolhas no líquido com menor tensão superficial.

No caso do gráfico no domínio do tempo mostrado na figura 4.19, os sinais obtidos nas medições com os compressores #0, #2 e #3 são condicionados com um filtro passa-faixa com frequências de corte de (10 e 60) kHz e permitem verificar diferenças importantes em relação aos ensaios com água. Dessa vez não são vistos os picos característicos da formação de bolhas isoladas, mas sinais com uma amplitude maior que a do compressor de referência durante todo o período de medição.

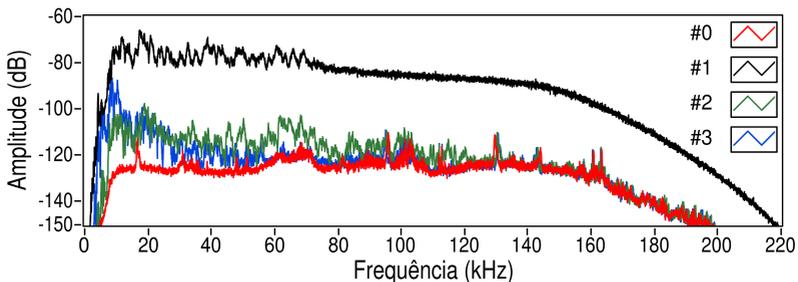
Figura 4.17: Vazamento do compressor #3 em diferentes meios.

(a) Parcialmente imerso em água. (b) Parcialmente imerso em etanol.



Fonte: autor.

Figura 4.18: Respostas em frequência do transdutor VS75-V com acoplamento no compressor parcialmente imerso em etanol.

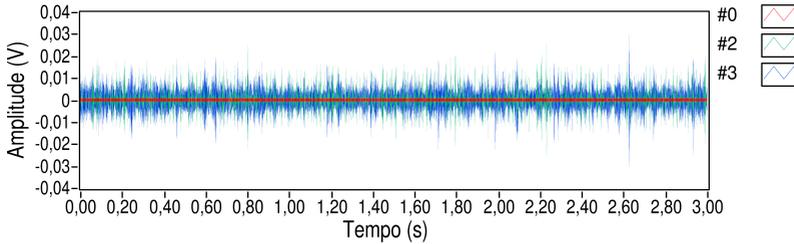


Fonte: autor.

VS900-M

A análise dos experimentos com acoplamento do transdutor VS900-M diretamente no corpo dos compressores parcialmente imersos em etanol é feita da mesma forma que a dos experimentos com o VS75-V. O gráfico de espectros de frequência da figura 4.20 mostra que o compressor #1 apresenta componentes com maior amplitude que as do compressor #0 em praticamente toda a faixa

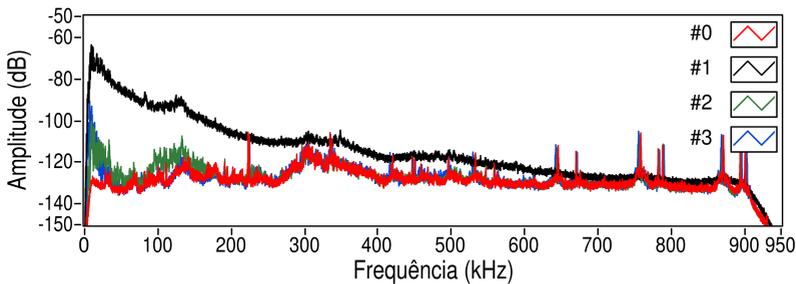
Figura 4.19: Respostas no tempo do transdutor VS75-V com acoplamento no compressor parcialmente imerso em etanol.



Fonte: autor.

analisada. Os outros dois compressores, com taxas de vazamento menores, também apresentam uma maior amplitude em componentes que chegam até a aproximadamente 150 kHz.

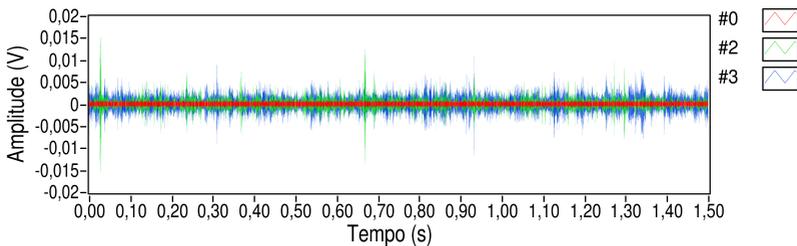
Figura 4.20: Respostas em frequência do transdutor VS900-M com acoplamento no compressor parcialmente imerso em etanol.



Fonte: autor.

Aplicando-se um filtro passa-faixa com frequências de corte de (10 e 150) kHz nos sinais dos compressores #0, #2 e #3, obtém-se o sinal no tempo mostrado na figura 4.21. Tal como observado para o VS75-V, não são vistos os picos de sinal como nos ensaios em água, devido à maior taxa de formação das bolhas em etanol. As amplitudes dos sinais de vazamento no tempo também se apresentaram maiores que a amplitude do sinal medido no compressor estanque, tornando a identificação dos defeitos mais evidente.

Figura 4.21: Respostas no tempo do transdutor VS900-M com acoplamento no compressor parcialmente imerso em etanol.



Fonte: autor.

4.2.2.3 Ensaios realizados em fábrica com água

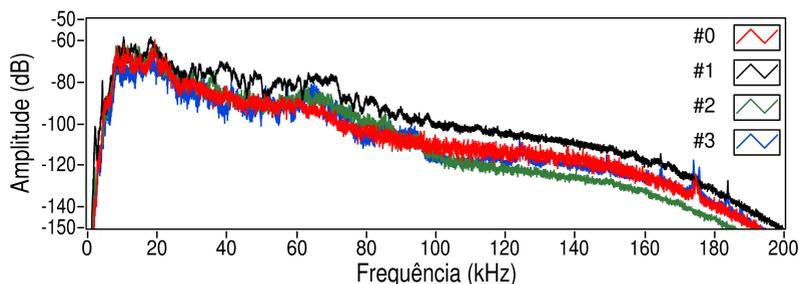
É desejável que os experimentos em ambiente fabril reproduzam fielmente aqueles previamente realizados em laboratório. Para os que envolvem imersão parcial dos objetos em ensaio, são utilizados em fábrica: o mesmo recipiente usado em laboratório; o sistema de medição completo; os compressores #0, #1, #2 e #3. Além das restrições de utilização de ar atmosférico como gás de ensaio e da pressão máxima menor que 20 bar (2 MPa), por questões de segurança, também não foram reproduzidos em fábrica os ensaios com etanol.

VS75-V

Os espectros de frequência apresentados no gráfico da figura 4.22 representam medições feitas em fábrica empregando o transdutor VS75-V, com os compressores parcialmente imersos em água. No exemplo ilustrado, a linha representada na cor preta, referente ao compressor #1, apresenta componentes de frequência com amplitudes maiores que as demais para toda a faixa analisada. Entretanto, tal comportamento não é comum a todas as medições realizadas, não permitindo indicação precisa de existência de vazamentos nos objetos em ensaio.

A figura 4.23 ilustra resultados da aplicação de um filtro passa-faixa com frequências de corte de (2 e 20) kHz às medições obtidas nessa configuração, possibilitando a análise no domínio do tempo. Desconsiderando-se os sinais de perturbações momentâneas que ocorrem em todas as medições, o nível de tensão RMS do compressor #1 passa a ser superior aos demais, permitindo a

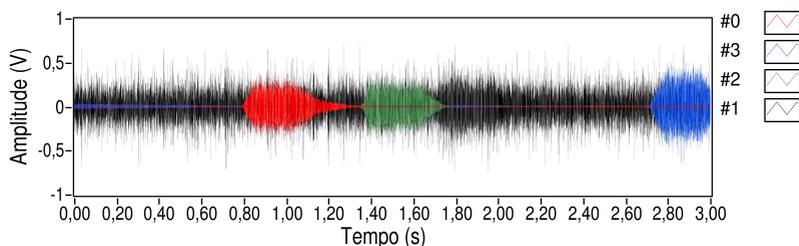
Figura 4.22: Respostas em frequência do transdutor VS75-V com acoplamento no compressor parcialmente imerso em água em fábrica.



Fonte: autor.

identificação do vazamento. Embora os mesmos parâmetros de filtragem usados na análise em laboratório tenham sido adotados, para os resultados de fábrica não é possível a identificação dos vazamentos de taxas menores que a do compressor #1 devido à grande amplitude do ruído de fundo, que incide nas medições durante todo o período de aquisição dos dados.

Figura 4.23: Respostas no tempo do transdutor VS75-V com acoplamento no compressor parcialmente imerso em água em fábrica.



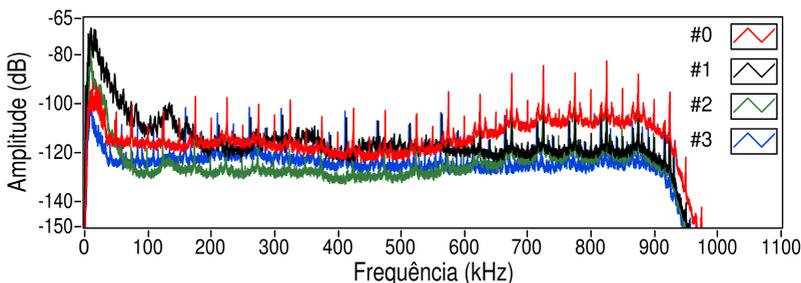
Fonte: autor.

VS900-M

Os resultados obtidos nas medições com o transdutor VS900-M são semelhantes aos obtidos com o VS75-V mostrados anteriormente, apesar da faixa distinta de frequências de operação. Nos

espectros ilustrados na figura 4.24 é possível observar o efeito das perturbações do ambiente influenciando as quatro medições. Exemplo disso é o nível da curva do compressor #0 que se mostra maior que o das demais curvas em algumas frequências, o que não ocorre nos ensaios em laboratório.

Figura 4.24: Respostas em frequência do transdutor VS900-M com acoplamento no compressor parcialmente imerso em água em fábrica.



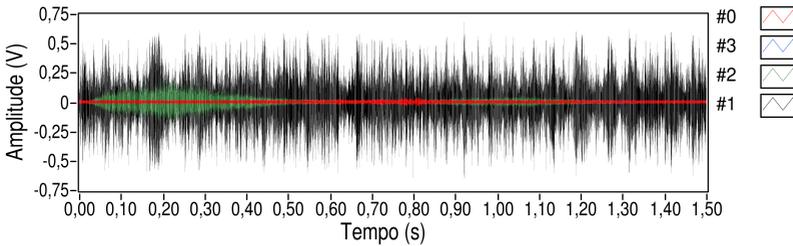
Fonte: autor.

Selecionou-se a mesma faixa de frequências empregada em laboratório para análise dos resultados no domínio do tempo. Então, aplicando-se um filtro passa-faixa com frequências de corte de (3 e 100) kHz nos sinais medidos, cujos espectros de frequência são mostrados na figura 4.24, obteve-se o gráfico ilustrado na figura 4.25, o qual relaciona os quatro sinais no tempo. Nesse caso, é possível observar que o nível de tensão RMS do compressor #1 mostra-se maior que o do compressor #0 em todo o período, permitindo a identificação do vazamento.

4.2.3 Acoplamento na parede do tanque

Ao se fixar os transdutores na parte externa da parede do tanque, também se deseja identificar os sinais acústicos gerados pelo vazamento de gás, seja na formação ou no estouro das bolhas ou em algum outro estágio desse processo. Nos experimentos, o compressor em ensaio é parcialmente imerso em líquido e o transdutor empregado é fixado a uma altura próxima à da coluna de fluido. Os transdutores são posicionados sempre no mesmo local da parede do tanque, cerca de 10 mm distantes da parede de pressão dos compressores (e das descontinuidades para os compressores defei-

Figura 4.25: Respostas no tempo do transdutor VS900-M com acoplamento no compressor parcialmente imerso em água em fábrica.



Fonte: autor.

tuosos). Não foram estudados os efeitos de atenuação e a distância máxima para detecção de vazamentos.

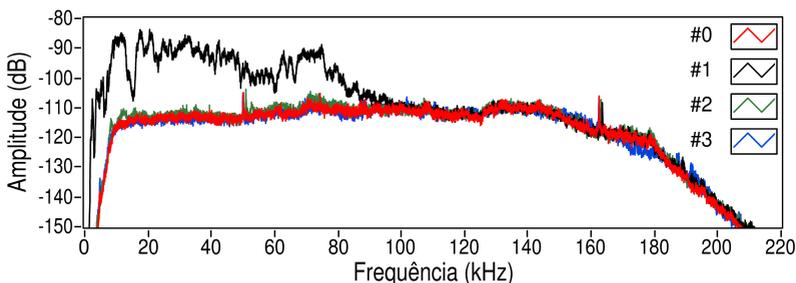
4.2.3.1 Ensaios realizados em laboratório com água

VS75-V

A figura 4.26 mostra os espectros de frequência gerados a partir de medições em laboratório dos compressores defeituosos e do estanque, com o transdutor VS75-V. Verifica-se que o compressor #1 apresenta uma resposta de maior amplitude que a do compressor #0 para frequências de até aproximadamente 100 kHz, possibilitando sua identificação.

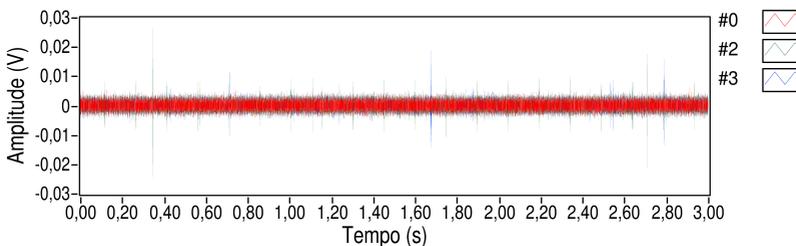
Para análise dos sinais acústicos de vazamento dos compressores #2 e #3, os sinais medidos pelo transdutor VS75-V são condicionados por um filtro passa-faixa com frequências de corte de (20 e 60) kHz. Os sinais filtrados são apresentados no domínio do tempo pelo gráfico da figura 4.27. A partir do gráfico, pode-se verificar picos de sinal com amplitude pequena e espaçamento temporal de aproximadamente 150 ms, coerente com o sinal de formação das bolhas do compressor #3, identificado a partir da medição com outras técnicas. Além desses, também se observam outros picos de maior amplitude e sem frequência definida, tanto para o sinal medido do compressor #2 quanto para o do #3. Ainda que não se tenha feito um estudo detalhado desse fenômeno, identificou-se que ele não ocorre quando não há vazamento no compressor parcialmente imerso.

Figura 4.26: Respostas em frequência do transdutor VS75-V com acoplamento no tanque com compressor parcialmente imerso em água.



Fonte: autor.

Figura 4.27: Respostas no tempo do transdutor VS75-V com acoplamento no tanque com compressor parcialmente imerso em água.



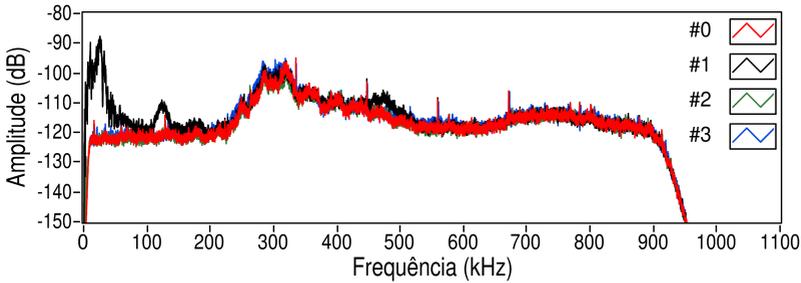
Fonte: autor.

VS900-M

Os espectros de frequência apresentados na figura 4.28 foram gerados a partir dos dados medidos com o transdutor VS900-M. Apesar de apresentar sensibilidade em uma ampla faixa de frequências, apenas as componentes mais baixas foram excitadas pelo vazamento do compressor #1, de forma a possibilitar sua identificação como defeituoso.

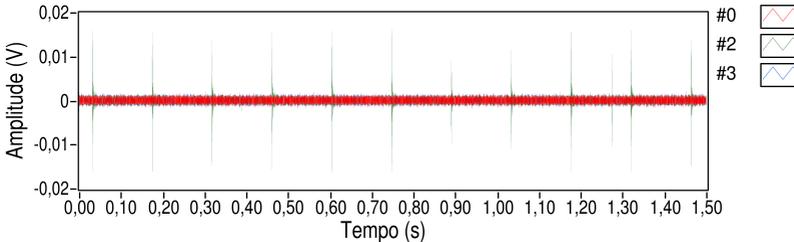
Ao se analisar a figura 4.29, na qual são apresentados os sinais das medições condicionados por um filtro passa-faixa, com frequências de corte de (3 e 100) kHz, no domínio do tempo, são identificados pulsos referentes ao vazamento do compressor #2. Entretanto, para o compressor de menor taxa de vazamento, nenhum

Figura 4.28: Respostas em frequência do transdutor VS900-M com acoplamento no tanque com compressor parcialmente imerso em água.



Fonte: autor.

Figura 4.29: Respostas no tempo do transdutor VS900-M com acoplamento no tanque com compressor parcialmente imerso em água.



Fonte: autor.

sinal que possa levar à identificação do vazamento de gás é observado.

4.2.3.2 Ensaios realizados em laboratório com etanol

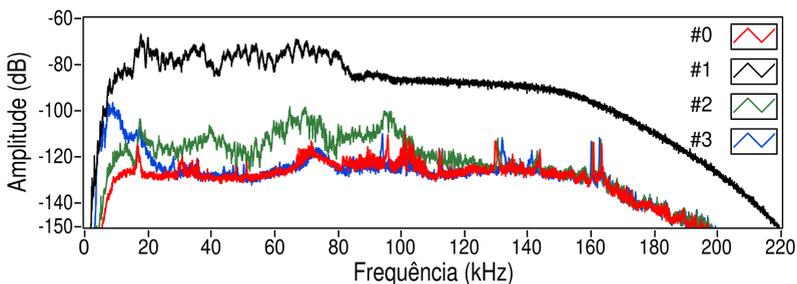
O efeito da alteração da água por outro líquido de ensaio de menor tensão superficial é explorado na seção 4.2.2.2 (página 113) e os ensaios nela apresentados mostram resultados significativos. Ao se reproduzir os ensaios com acoplamento dos transdutores na parede do tanque, cujos resultados são apresentados em 4.2.3.1, substituindo-se a água utilizada anteriormente por etanol, também se encontrou uma considerável variação nos resultados obtidos. Mais uma vez, essa alteração nas respostas ocorreu, principal-

mente, devido à maior frequência de formação de bolhas de gás nas descontinuidades passantes dos compressores.

VS75-V

Uma grande diferença em relação aos resultados encontrados nos ensaios com água pode ser vista no gráfico dos sinais no domínio da frequência, mostrado na figura 4.30. Nesse caso, é possível verificar que o sinal do compressor #1 apresenta componentes de maior amplitude que as do compressor estanque para toda a faixa avaliada. Comportamento semelhante foi encontrado no resultado apresentado na figura 4.18 (página 115), obtido com o mesmo transdutor e acoplamento direto nos compressores parcialmente imersos em etanol. Em relação aos vazamentos menores, são observadas componentes de frequências mais baixas que tornam possível a identificação dos vazamentos no domínio da frequência, o que não é possível quando os ensaios são realizados com água.

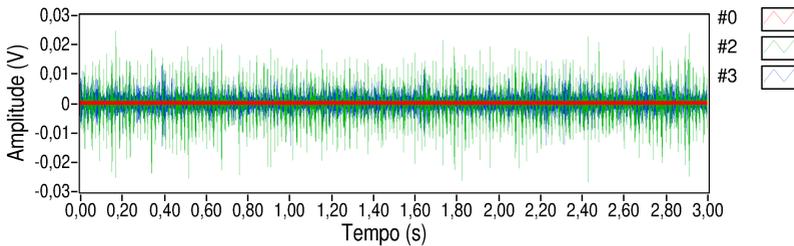
Figura 4.30: Respostas em frequência do transdutor VS75-V com acoplamento no tanque com compressor parcialmente imerso em etanol.



Fonte: autor.

A figura 4.31 traz os sinais dos compressores #0, #2 e #3 no domínio do tempo, após serem filtrados com um filtro passa-faixa com frequências de corte de (10 e 60) kHz. Nela, é possível observar que os sinais de vazamento não apresentam picos bem definidos como em água, mas uma maior amplitude em todo o período de aquisição, tornando possível a identificação dos vazamentos de todos os níveis avaliados.

Figura 4.31: Respostas no tempo do transdutor VS75-V com acoplamento no tanque com compressor parcialmente imerso em etanol.

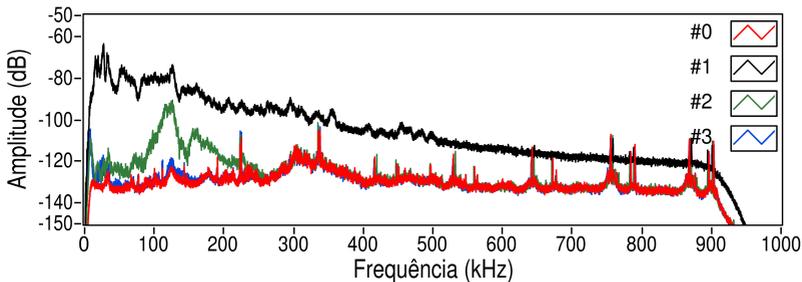


Fonte: autor.

VS900-M

A resposta em frequência de grande amplitude do compressor #1, visto nas medições com o VS75-V, mantém-se nas regiões de altas frequências, conforme mostrado no gráfico da figura 4.32. Observa-se ainda, que para menores vazamentos também são mais baixas as frequências dos sinais acústicos gerados. O sinal proveniente da medição com compressor #2 apresenta componentes de até aproximadamente 250 kHz, que se diferenciam das do compressor de referência, enquanto para o sinal do vazamento do compressor #3 as frequências envolvidas são menores, na ordem de 50 kHz.

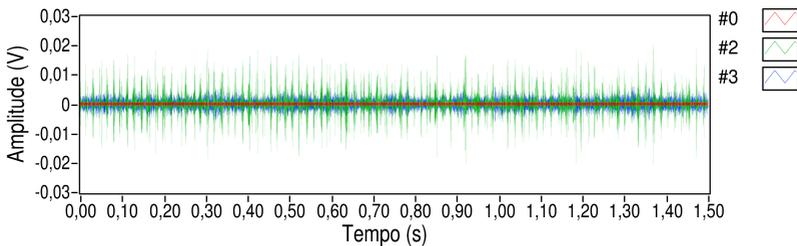
Figura 4.32: Respostas em frequência do transdutor VS900-M com acoplamento no tanque com compressor parcialmente imerso em etanol.



Fonte: autor.

Os sinais no domínio do tempo vistos na figura 4.33 foram obtidos ao se condicionar os sinais medidos com o transdu-

Figura 4.33: Respostas no tempo do transdutor VS900-M com acoplamento no tanque com compressor parcialmente imerso em etanol.



Fonte: autor.

tor VS900-M por um filtro passa-faixa com frequências de corte de (3 e 100) kHz. A partir da análise gráfica, é possível verificar que as amplitudes dos sinais medidos nos compressores #2 e #3 são maiores que a do sinal medido no compressor #0, possibilitando a identificação dos defeitos.

4.2.3.3 Ensaios realizados em fábrica com água

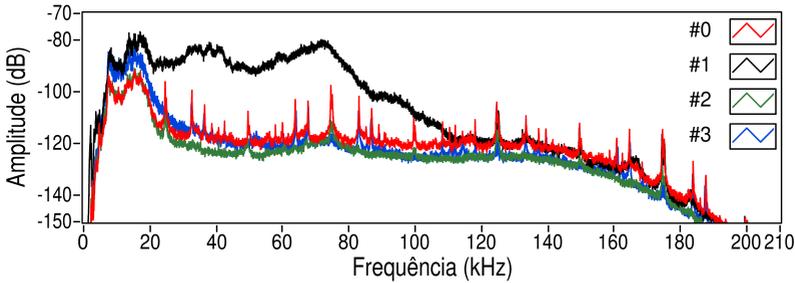
Os ensaios em que os compressores são parcialmente imersos em água foram reproduzidos em fábrica utilizando-se os mesmos equipamentos, porém com as limitações abordadas na seção 4.2.1.2, página 107.

VS75-V

O gráfico mostrado na figura 4.34 apresenta espectros gerados a partir de medições com o transdutor VS75-V. Tal como nos demais resultados de fábrica apresentados, o acoplamento do transdutor no tanque também é bastante suscetível às perturbações do ambiente, o que pode ser evidenciado pelos diferentes níveis de amplitude encontrados nas curvas dos compressores #0, #2 e #3. Ainda assim, é possível identificar que a curva referente ao compressor #0 apresenta componentes de frequência com amplitudes maiores que as demais em uma larga faixa.

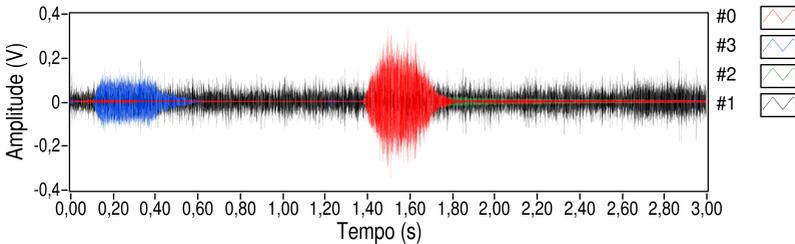
A figura 4.35 apresenta os sinais medidos nos compressores para o domínio do tempo, condicionados com o mesmo filtro empregado nos ensaios de laboratório, passa-faixa com frequências de corte de (20 e 60) kHz. Ainda que ruídos e interferências do ambiente fabril influenciem em todas as medições, é possível observar

Figura 4.34: Respostas em frequência do transdutor VS75-V com acoplamento no tanque com compressor parcialmente imerso em água em fábrica.



Fonte: autor.

Figura 4.35: Respostas no tempo do transdutor VS75-V com acoplamento no tanque com compressor parcialmente imerso em água em fábrica.



Fonte: autor.

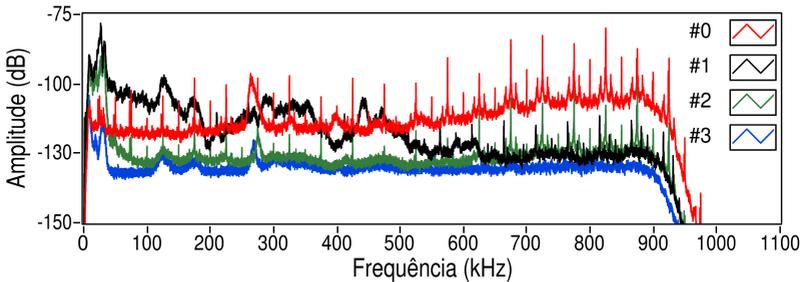
que a tensão RMS do sinal medido no compressor #1 é maior que as dos demais sinais em quase todo o período de aquisição dos dados.

VS900-M

Os espectros mostrados na figura 4.36 são obtidos a partir dos dados do transdutor VS900-M. Assim como nos resultados com o VS75-V, os efeitos dos ruídos e interferências de fábrica afetaram de maneira significativa o resultado das medições. Entretanto, a análise dos espectros permitiu a identificação do vazamento do compressor #1, por apresentar componentes de frequências com maior amplitude em relação às do compressor #0.

Os sinais no domínio do tempo mostrados na figura 4.37 fo-

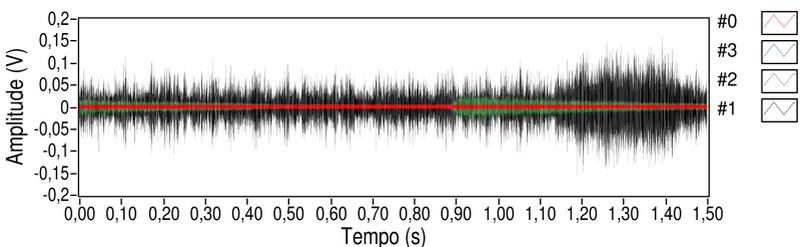
Figura 4.36: Respostas em frequência do transdutor VS900-M com acoplamento no tanque com compressor parcialmente imerso em água em fábrica.



Fonte: autor.

ram condicionados por um filtro passa-faixa com frequências de corte de (3 e 100) kHz. A partir do gráfico, é possível identificar a influência de ruído e interferências de fábrica, assim como visto nas demais medições realizadas nesse ambiente. Porém, mesmo com a influência dessas componentes externas à medição, a amplitude maior do sinal representado em preto possibilitou a identificação do vazamento do compressor #1.

Figura 4.37: Respostas no tempo do transdutor VS900-M com acoplamento no tanque com compressor parcialmente imerso em água em fábrica.



Fonte: autor.

4.2.4 Discussão acerca dos resultados

As variações da técnica de ensaio passiva com transdutores de EA apresentam resultados distintos quanto ao nível de detecção das taxas de vazamento. Os ensaios com acoplamento direto na carcaça

do compressor no ar realizados em laboratório mostraram-se adequados para identificação de vazamentos da ordem do encontrado no compressor #1, tanto com o transdutor VS75-V quanto com o VS900-M. Os níveis menores avaliados não puderam ser identificados com nenhum dos dois transdutores empregados.

Ao se associar a técnica passiva de ensaio com EA à da bolha por imersão, foi possível identificar todos os níveis de vazamento avaliados em laboratório. Nos ensaios com os transdutores acoplados diretamente no corpo dos compressores, o transdutor VS75-V apresentou melhor desempenho, possibilitando a identificação dos defeitos dos compressores #1, #2 e #3. O VS900-M limitou-se à identificação dos defeitos dos compressores #1 e #2. Ao se acoplar os transdutores na parede do tanque, os defeitos dos três compressores foram identificados, em laboratório, por ambos os transdutores. Para a maior das taxas de vazamento, a formação das bolhas em água ocorre de maneira contínua, permitindo a identificação de ampla faixa de frequências excitada. Quando menores taxas de vazamento estão envolvidas nos experimentos com água, a análise no domínio do tempo mostra-se mais adequada por permitir a identificação de pulsos acústicos relacionados à formação das bolhas. A diminuição da tensão superficial do meio de ensaio no qual os compressores são parcialmente imersos apresentou efeito significativo nas medições. Os sinais de formação de bolhas de vazamentos com pequena taxa, que com água se apresentaram como pulsos discretos, passaram a apresentar uma maior amplitude de seus respectivos sinais em todo o período de aquisição. Tal característica possibilitou a identificação dos vazamentos de todos os compressores em análise de forma mais evidente do que em água.

As perturbações encontradas em ambiente fabril reduziram consideravelmente a capacidade de detecção das técnicas, se comparado à capacidade observada em laboratório. Sinais vibroacústicos e eletromagnéticos provenientes de equipamentos operando paralelamente aos ensaios contaminam as medições com diferentes tipos de sinais. Isso faz com que, em muitos casos, a análise em frequência deva ser acompanhada da análise no domínio do tempo.

4.3 HIDROFONE

Os ensaios com hidrofone são conduzidos em um tanque diferente do empregado nos experimentos com EA que envolvem com-

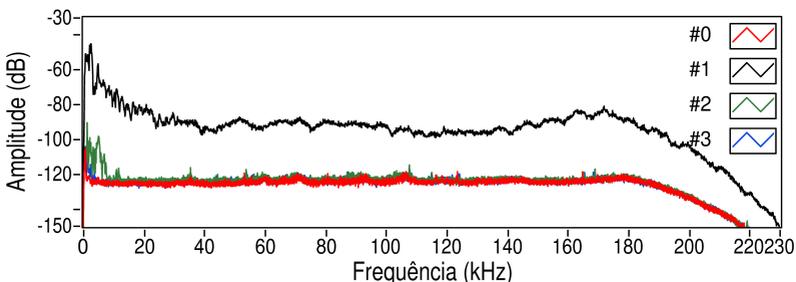
pressores parcialmente imersos em líquido. Isso se dá pelo fato de que os transdutores de EA disponíveis não permitem o contato com líquidos, logo foi necessário realizar uma imersão parcial do compressor no tanque. Por outro lado, medições com hidrofones devem ser realizadas com o transdutor submerso e, nesse caso, foi empregado um tanque maior que permitiu a imersão completa tanto do compressor em ensaio quanto do hidrofone empregado.

Da mesma forma como para os resultados da técnica de EA, todos os espectros de frequência apresentados foram gerados condicionando-se os sinais medidos com o hidrofone com um filtro digital passa-faixa Butterworth de quinta ordem. As frequências de corte empregadas foram: inferior igual a 500 Hz e superior igual a 190 kHz.

4.3.1 Ensaios realizados em laboratório

A partir da figura 4.38, observa-se que o sinal do vazamento do compressor #1 apresenta componentes de frequência em toda a faixa de análise com amplitudes maiores que as do compressor de referência. Os compressores #2 e #3, por sua vez, apresentam diferenças em relação ao compressor de referência apenas em frequências abaixo de 10 kHz.

Figura 4.38: Respostas em frequência do hidrofone.

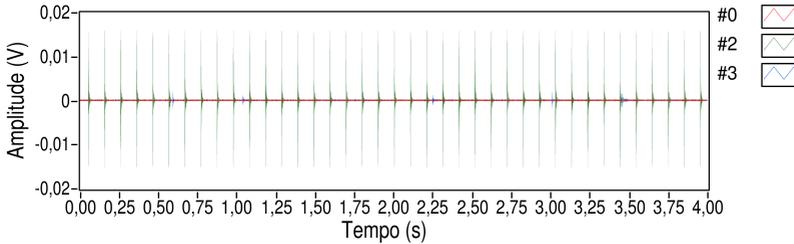


Fonte: autor.

Ao se filtrar os sinais dos compressores com menores taxas de vazamento com frequência de corte inferior igual a 2,5 kHz e frequência de corte superior igual a 5,0 kHz, obtêm-se os sinais no domínio do tempo mostrados na figura 4.39. A partir deles é possível identificar pulsos emitidos pelo processo de formação de bolhas

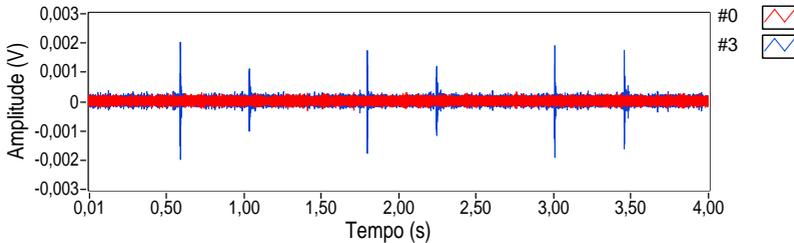
do compressor #2 e também do compressor #3 (apresentados com mais detalhes na figura 4.40).

Figura 4.39: Respostas no tempo do hidrofone.



Fonte: autor.

Figura 4.40: Respostas no tempo do hidrofone para os compressores #0 e #3.



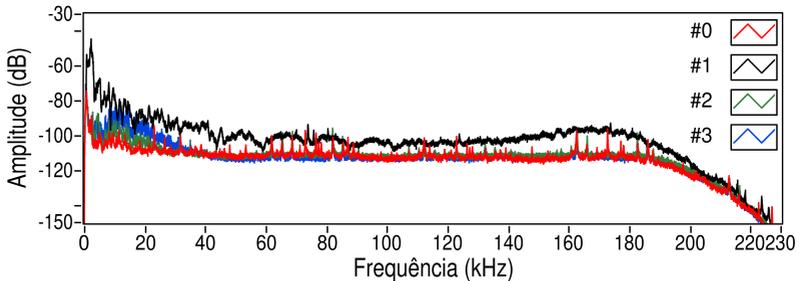
Fonte: autor.

4.3.2 Ensaios realizados em fábrica

Os mesmos ensaios de laboratório, com resultados descritos na seção 4.3.1, foram realizados em ambiente fabril. Em laboratório, foi possível a identificação de todos os níveis de vazamento avaliados ao se analisar os sinais medidos nos domínios do tempo e da frequência. A análise em frequência dos sinais medidos em fábrica é apresentada na figura 4.41, pela qual, mais uma vez, identifica-se o sinal do vazamento do compressor #1.

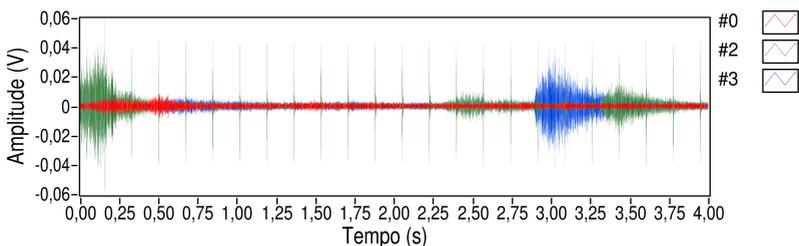
Ao se analisar o sinal no tempo para os dois vazamentos menores, a partir da figura 4.42, é possível identificar os picos de sinal relativos à formação das bolhas no compressor #2. Pode-se notar

Figura 4.41: Respostas em frequência do hidrofone em fábrica.



Fonte: autor.

Figura 4.42: Respostas no tempo do hidrofone em fábrica.



Fonte: autor.

também, que a frequência das bolhas é menor do que a do sinal avaliado em laboratório, devido à menor pressão de ensaio. Já o sinal referente à menor das taxas de vazamento analisadas, a do compressor #3, não é identificado devido à maior amplitude do sinal de ruído de fundo.

4.3.3 Processamento digital dos sinais

De todas as técnicas avaliadas, os experimentos com hidrofone foram os que resultaram em uma maior capacidade de detecção dos vazamentos, possibilitando a identificação do defeito do compressor #2 em fábrica. A fim de estudar uma forma de aprimorar a capacidade de detecção da técnica, a decomposição empírica de modos (EMD) é empregada para processamento dos sinais medidos. Assim sendo, a aplicação da EMD tem dois objetivos princi-

pais: dispensar o conhecimento prévio das frequências de interesse do sinal de vazamento, e separar os ruídos de fundo dos sinais de interesse, para que se possa identificar o defeito do compressor #3 mesmo para ensaios em fábrica.

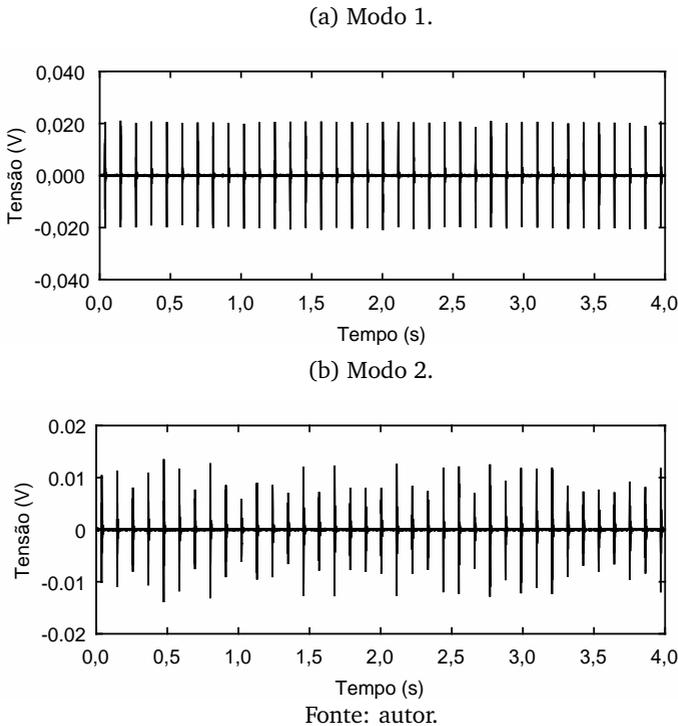
Inicialmente, a decomposição foi avaliada para resultados de medições feitas em laboratório. Essa análise foi focada nas taxas de vazamentos menores pelo fato de que a maior das três taxas de vazamentos foi plenamente identificada em fábrica pela maior parte das técnicas aplicadas. A figura 4.43 apresenta os dois primeiros modos decompostos a partir do sinal medido pelo hidrofone no ensaio com o compressor #2. Nenhum tratamento foi feito anteriormente ao processamento por meio da técnica CEEMDAN. Os demais modos são apresentados no apêndice E (seção E.1, página 179). Os modos 1 e 2, mostrados nas figuras 4.43a e 4.43b, respectivamente, apresentam características bastante similares ao que foi observado quando se empregou o filtro passa-faixa com frequências de corte de (2,5 e 5,0) kHz nos mesmos dados.

Os modos decompostos a partir do sinal obtido no ensaio do compressor #2 em fábrica são mostrados na seção E.2 (página 182) do apêndice E. Desses, os dois primeiros, representados na figura 4.44, podem ser usados para a identificação do vazamento. Novamente, pode-se verificar que o sinal representado pelo modo 1 (figura 4.44a) é bastante semelhante ao obtido condicionando-se o sinal com filtro passa-faixa com frequências de corte de (2,5 e 5,0) kHz. Entretanto, verifica-se que, tanto no modo 1 quanto no modo 2 (figura 4.44b), as componentes do sinal, proveniente das formações sequenciais de bolhas em água, são misturadas com componentes de interferências e ruídos do ambiente de fábrica.

Para o menor dos vazamentos, o do compressor #3, a EMD do sinal medido tem seu resultado apresentado na seção E.3 (página 186) do apêndice E. De todos os modos gerados, os modos 2 e 3, apresentados na figura 4.45, são os que mais bem expressam o sinal periódico de formação das bolhas. Observando-se esses dois modos, pelas figuras 4.45a e 4.45b, identifica-se semelhança com o perfil e amplitude dos sinais encontrados quando aplicado o filtro passa-faixa com frequências de corte de (2,5 e 5,0) kHz, mostrado no gráfico da figura 4.40 (página 130). Ambas as abordagens de processamento do sinal permitiram a identificação do defeito.

Nos resultados mostrados anteriormente para os compressores #2 (laboratório e fábrica) e #3 (laboratório), os três primeiros modos foram empregados para a identificação dos defeitos a partir do comportamento característico da formação de bolhas em água.

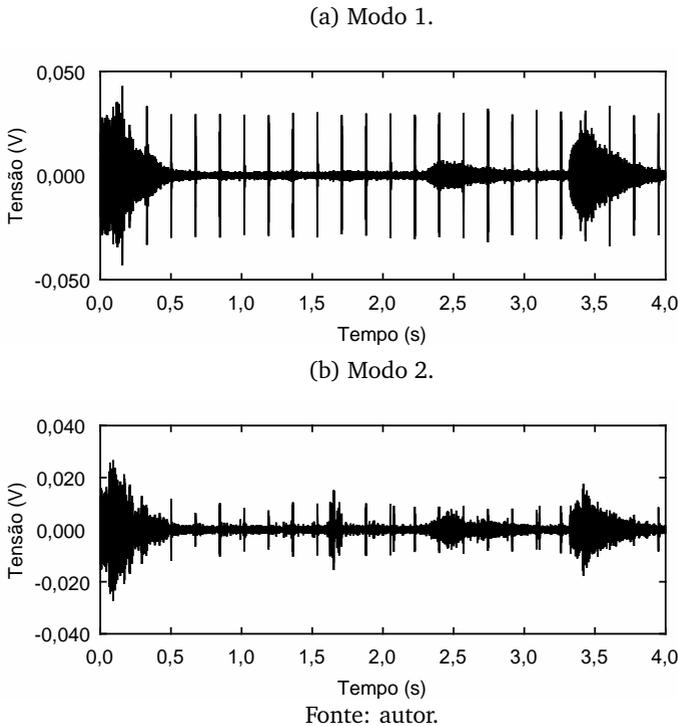
Figura 4.43: Primeiros modos da decomposição empírica para o compressor #2 – laboratório.



Fonte: autor.

Por outro lado, para o caso do compressor #3 com medição em ambiente de fábrica, não foi possível identificar o vazamento por meio da análise de modos. Todos os modos da EMD para o compressor #3 em fábrica são apresentados na seção E.4 (página 189) do apêndice E. Os modos 2 e 3 são apresentados na figura 4.46a. Ainda que nos dois sinais (figuras 4.46a e 4.46b) sejam vistos pulsos que aparentam ser sinais acústicos gerados pela formação de bolhas, isso é descartado por duas análises: pela observação dos mesmos elementos ao se analisarem os modos decompostos a partir de um sinal de medição do compressor #0, adotado como referência; pela amplitude dos pulsos, que no ensaio com o compressor #3 em laboratório (figura 4.45) são de aproximadamente 0,002 V, ou seja, dez vezes menor que o visto nesses modos obtidos a partir de dados de fábrica.

Figura 4.44: Primeiros modos da decomposição empírica para o compressor #2 – fábrica.



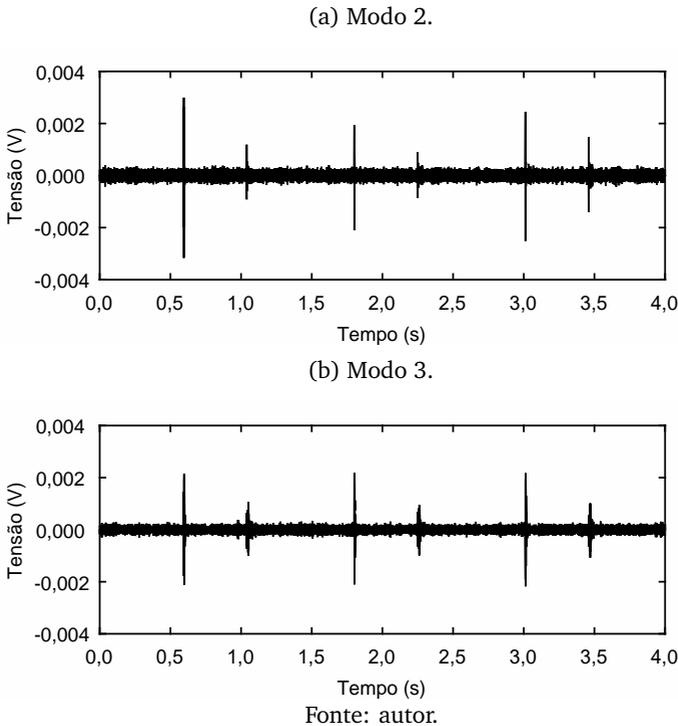
Fonte: autor.

4.3.4 Discussão acerca dos resultados

De todas as técnicas empregadas para identificação dos vazamentos dos compressores avaliados, a que utiliza o hidrofone para medição com compressor totalmente submerso apresentou melhores resultados gerais. Em laboratório, foi possível identificar vazamentos em todos os três compressores defeituosos. Para os ensaios em fábrica, a técnica destacou-se das demais por proporcionar a identificação da taxa de vazamento intermediária (na ordem de $0,124 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$), a do compressor #2. Isso ocorre por dois fatores identificados: menor suscetibilidade do sistema de medição às perturbações do ambiente, resultado de os ensaios serem feitos com o compressor e transdutor submersos, e menor atenuação do sinal nas interfaces e na propagação pelo meio de ensaio.

Ao se aplicar nos sinais medidos com o hidrofone o filtro

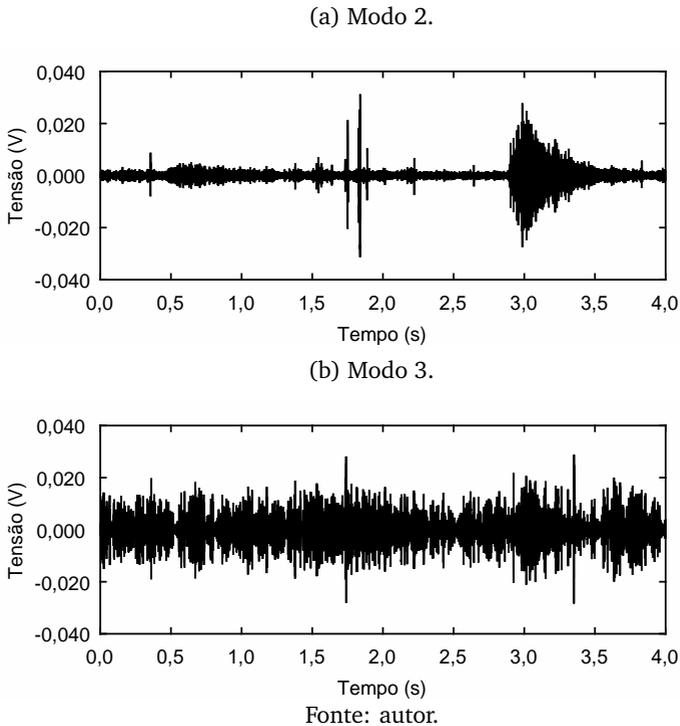
Figura 4.45: Segundo e terceiro modos da decomposição empírica para o compressor #3 – laboratório.



passa-faixa com frequências de corte de (2,5 e 5,0) kHz, com o objetivo de identificação do sinal de formação das bolhas, é reforçada a teoria de Minnaert (1933). Em seu trabalho, o autor apresenta a equação para cálculo da frequência emitida em função do raio das bolhas (dentre outras variáveis). Assim, as bolhas formadas em água com raio de aproximadamente 1 mm geram um sinal acústico de aproximadamente 3 kHz.

A segunda abordagem empregada para análise dos sinais, o método de EMD, também se mostrou aplicável. Uma vantagem dessa abordagem é não exigir nenhuma filtragem prévia do sinal medido. Ainda assim, uma análise totalmente automática dos dados não foi possível por algumas razões, dentre elas: o sinal de formação das bolhas nem sempre foi decomposto no mesmo modo (apesar de, para os sinais medidos, sempre se revelar nos primeiros

Figura 4.46: Segundo e terceiro modos da decomposição empírica para o compressor #3 – fábrica.



três); os sinais de ruído de fundo e interferências da fábrica não foram totalmente separados dos sinais de vazamento. Outro ponto que pode se mostrar impeditivo em um sistema comercial é o considerável tempo de processamento para decomposição dos sinais medidos.

4.4 CONSIDERAÇÕES

Mostrou-se a partir dos resultados que todas as técnicas avaliadas possibilitaram a identificação de vazamentos, embora diferentes níveis de detecção tenham sido encontrados. O quadro 4.1 agrupa os resultados obtidos nos experimentos propostos. Cada linha do quadro representa um diferente ensaio realizado e cada coluna representa um compressor defeituoso em ensaio em laborató-

rio ou em fábrica. Os asteriscos do quadro indicam a identificação do defeito do compressor avaliado no respectivo ensaio. Não foram avaliadas questões de robustez, repetibilidade ou outras características que pudessem diferenciar uma técnica da outra em relação à usabilidade ou aplicação comercial. Os limites de detecção encontrados são caracterizados quanto a termos de ordem de grandeza das taxas de vazamento, isto é, foram avaliados três compressores com taxas de três ordens de grandeza diferentes.

Quadro 4.1: Comparativo dos resultados da aplicação das técnicas acústicas propostas quanto à identificação dos compressores avaliados.

Técnica	Laboratório			Fábrica		
	#1	#2	#3	#1	#2	#3
US passivo	*					
EA ar VS75-V	*			*		
EA ar VS900-M	*					
EA água VS75-V	*	*	*	*		
EA água VS900-M	*	*		*		
EA etanol VS75-V	*	*	*			
EA etanol VS900-M	*	*	*			
EA tanque água VS75-V	*	*	*	*		
EA tanque água VS900-M	*	*		*		
EA tanque etanol VS75-V	*	*	*			
EA tanque etanol VS900-M	*	*	*			
Hidrofone água	*	*	*	*	*	

Fonte: autor.

Os experimentos com as técnicas ativa e passiva de ensaio com transdutores US no ar apresentaram as maiores limitações para identificação de vazamentos. Para o caso da técnica ativa, a impossibilidade de utilizar o transdutor fora do vaso de pressão aliada à incompatibilidade dimensional para sua inserção pelo tubo passador fizeram com que seu estudo fosse limitado aos experimentos de viabilidade apresentados. A técnica passiva, por sua vez, apresentou limitações quanto à detectabilidade de vazamentos com taxas menores que a do compressor #1, mesmo em laboratório, o que fez com que sua aplicação fosse descartada para ambiente de fábrica.

As diversas possibilidades na aplicação da técnica de EA para ensaios de estanqueidade permitiu que fossem avaliadas as influências de diferentes variáveis nas medições. Em laboratório, os experimentos com acoplamento direto dos transdutores no corpo do

compressor em ensaio com o mesmo no ar permitiram apenas a identificação do defeito do compressor #1. Em fábrica, o mesmo foi observado apenas para o transdutor VS75-V, dado que nenhum dos defeitos foi detectado com o transdutor VS900-M. A identificação de taxas menores foi possível ao se combinar a técnica da bolha por imersão com as técnicas de EA. Os ensaios de laboratório com imersão parcial dos compressores em líquido e acoplamento direto no compressor proporcionaram a identificação de todas as taxas de vazamento avaliadas quando usado o transdutor VS75-V. Para ensaios de laboratório, o VS900-M ficou limitado ao defeito do compressor #2. Em fábrica, a grande influência de ruídos e interferências do ambiente nas medições possibilitou apenas a identificação da maior das três taxas de vazamento, a do compressor #1, para ambos os transdutores.

Nas medições com o VS75-V na parede do tanque com água, foram observados sinais não periódicos relacionados aos vazamentos, mas que não foram identificados quanto a sua origem. Como resultado, foi possível identificar os defeitos de todos os compressores avaliados em laboratório com uso desse transdutor. Com o VS900-M acoplado na parede do tanque, não foi possível identificar o defeito do compressor #3. Em fábrica, não foi possível identificar os picos associados à formação das bolhas nos compressores #2 e #3 devido ao ruído de fundo. Portanto, conclui-se que a técnica ficou limitada à identificação do defeito do compressor #1, tanto com o transdutor VS900-M quanto com o VS75-V acoplados na parede do tanque.

A mudança do líquido de ensaio resultou em alterações significativas nas respostas encontradas. A menor tensão superficial do etanol em relação à da água proporcionou formação de bolhas com maior frequência (para o mesmo gás e a mesma pressão de ensaio). Isso fez com que os sinais medidos nos compressores defeituosos apresentassem maior amplitude durante todo o período de medição, facilitando a identificação dos defeitos. Devido a questões de segurança, o único líquido empregado em fábrica para os ensaios que envolvem imersão dos compressores foi a água. O ambiente fabril apresentou forte influência de perturbações nas medições, porém não foram abordadas neste trabalho estratégias para atenuação dos efeitos de interferências vibro-acústicas ou eletromagnéticas.

A técnica com hidrofone mostrou-se promissora por apresentar maior capacidade de detecção de defeitos em fábrica do que as alcançadas com as demais técnicas. Foi observado que a formação das bolhas gera sinais com frequências relativamente baixas, faixa

na qual foi verificado ocorrer também maior influência de ruído e interferências. Ainda assim, as medições submersas contribuíram para menor influência de fontes externas e menor atenuação dos sinais de vazamento no meio e interfaces. Dessa forma, a capacidade de detecção da técnica em fábrica ficou limitada ao defeito do compressor #2, na ordem de 1,24 mbar·l/s ($0,124 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$), e não mais apenas ao defeito do compressor #1, na ordem de 12,1 mbar·l/s ($1,210 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$). Não foram feitos experimentos com hidrofone empregando o etanol como líquido de ensaio, pois o fabricante do instrumento não garantiu que o material do invólucro fosse adequado para uso nessa substância. Quanto ao processamento dos sinais medidos, tanto a aplicação de filtro passa-faixa quanto o emprego do método de EMD proporcionaram a mesma capacidade de detecção máxima para a técnica, possibilitando identificação de todas as taxas de vazamento em laboratório e limitando-se à taxa do compressor #2 em fábrica.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresenta as considerações finais do trabalho de dissertação de mestrado e é dividido em duas seções. A seção 5.1 apresenta as principais conclusões obtidas com o trabalho de maneira abrangente, uma vez que considerações pontuais são feitas ao fim de cada capítulo. Em seguida, a seção 5.2 propõe sugestões para trabalhos futuros, levando-se em consideração variações de ensaios que não puderam ser realizadas e resultados promissores obtidos neste projeto.

5.1 CONCLUSÕES

O principal objetivo do trabalho foi avaliar experimentalmente técnicas disponíveis na literatura para avaliação de estanqueidade em vasos de pressão de pequeno porte, buscando-se identificar descontinuidades passantes na região do cordão de solda. Para atingir tal objetivo, foram seguidas etapas de: revisão da literatura para identificação de métodos de avaliação de vazamento e de processamento de sinais; identificação das taxas de vazamentos apresentadas pelos compressores defeituosos reais empregados como estudo de caso; realização dos experimentos em laboratório e fábrica; análise objetiva dos resultados obtidos.

Para a avaliação comparativa foram utilizados um compressor estanque e três compressores defeituosos provenientes de uma linha de produção real. Ao se avaliar defeitos com taxas de vazamento comumente encontradas na manufatura, foi possível analisar de maneira representativa os limites de detecção de cada técnica avaliada. Além da determinação de limites relativos (comparando-se os três defeitos entre si e com o nível de referência), também foi possível estabelecer uma estimativa quantitativa do limite de detecção de cada técnica, uma vez que as taxas de vazamento dos compressores avaliados foram quantificadas por meio da técnica da queda de pressão.

Para os ensaios em laboratório, em todos os casos propostos foi possível identificar o vazamento do compressor #1 (12,1 mbar·l/s), o de maior taxa. Para os outros dois níveis de vazamento avaliados, a identificação apenas foi possível com as técnicas que envolveram a imersão em líquido dos compressores em ensaio. As medições em fábrica apresentaram forte influência das perturbações causadas por ruídos e interferências de origem vibro-acústica e eletromagnética geradas por equipamentos próxi-

mos. Essas componentes externas à medição podem ser divididas em função de dois comportamentos distintos identificados: parcelas de ruído de fundo presentes durante todo o tempo de aquisição; parcelas com amplitudes variáveis e durações finitas dentro do período de aquisição dos dados. Ainda que as componentes de duração finita possam ser identificadas como perturbações e descartadas na análise (para um tempo de aquisição suficientemente longo), as outras componentes apresentam-se como um ruído de fundo que se sobrepõe ao sinal gerado pela menor das taxas de vazamento avaliadas, a do compressor #3 (0,179 mbar·l/s). Devido a esse comportamento, não foi possível identificar a menor das três taxas mesmo com a técnica que apresentou os melhores resultados, a que emprega o hidrofone.

A menor das três taxas de vazamento avaliadas pôde ser identificada em laboratório com técnicas de emissões acústicas ou com hidrofone, condicionando-se os dados com um filtro passa-faixas adequado. Já quando analisados os dados dos experimentos em fábrica, a menor taxa identificada foi a do compressor #2 (1,24 mbar·l/s) e apenas com a técnica que emprega o hidrofone. Assim, conclui-se que dentre as técnicas avaliadas, a técnica acústica com hidrofone foi a que mostrou capacidade para identificar as menores taxas de vazamento, principalmente pelo fato de apresentar menor suscetibilidade às interferências observadas em ambiente fabril.

Os sinais acústicos medidos foram processados a partir de métodos de análise em tempo e frequência. A FFT foi empregada para avaliação das componentes de frequência excitadas pelos vazamentos e, partir da análise, foram determinadas faixas de frequência para filtragem do sinal e posterior análise no domínio do tempo. Isso permitiu a visualização dos sinais de formação de bolhas isoladas. O método EMD também resultou na possibilidade de identificar sinais de vazamento em todos os compressores avaliados em laboratório, dispensando a necessidade de identificação prévia das componentes de frequência de interesse e do uso de filtros. A desvantagem encontrada no uso dessa técnica foi o alto tempo de processamento para decomposição do sinal original em modos.

Quanto aos principais benefícios oferecidos pelo trabalho, pode-se destacar a comprovação experimental de que técnicas acústicas trazem resultados satisfatórios na avaliação de estanqueidade em vasos de pressão de pequeno porte (volume aproximado de 1,85 l), embora também apresentem limitações importantes abordadas neste documento. Outro aspecto comprovado é que uma

solução híbrida deve sempre ser considerada por explorar vantagens de métodos ou técnicas distintas. Exemplo disso é a técnica que emprega o hidrofone, que combina o método acústico com o método da bolha por imersão e apresentou os melhores resultados dentre as técnicas avaliadas.

A mudança do líquido de ensaio para outro com menor tensão superficial apresentou alteração significativa na formação das bolhas. Visualmente, foi possível identificar que, nas mesmas condições de ensaio, as bolhas formadas em etanol apresentaram menor diâmetro e maior frequência de formação em relação às formadas em água. Acusticamente, encontrou-se uma faixa mais ampla de frequências excitadas pelo vazamento quando comparada à medida a partir dos vazamentos em água. Esse efeito fez com que as análises nos domínios do tempo e da frequência permitissem maior facilidade de identificação do sinal de vazamento.

O objetivo geral proposto para o trabalho foi alcançado, dado que todas as técnicas selecionadas mostraram-se adequadas para identificação, em fábrica, do defeito do compressor #1. Dentre as técnicas avaliadas, destaca-se a que empregou o hidrofone como transdutor, que possibilitou identificação em fábrica também da taxa de vazamento intermediária, da ordem de 1,24 mbar·l/s (0,124 Pa·m³/s). Entretanto, estudos adicionais ainda são necessários para que a técnica que apresentou os melhores resultados possa ser efetivamente levada para uma linha de produção. Com base nos resultados obtidos, algumas sugestões são apresentadas na seção 5.2 para que este estudo seja continuado, a fim de dar origem a um sistema de avaliação de estanqueidade aplicável dentro dos requisitos da linha de produção de compressores herméticos de refrigeração.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As sugestões para trabalhos futuros baseiam-se em resultados promissores obtidos na avaliação de estanqueidade dos compressores analisados ou em variações de experimentos que não puderam ser realizadas devido à indisponibilidade de tempo ou recursos.

Uma vez que as medições com o transdutor totalmente imerso em água (hidrofone) mostraram-se menos suscetíveis a ruídos e interferências, sugere-se que a técnica de EA também seja avaliada dessa forma, ou seja, com o transdutor submerso. Não foi possível realizar essa avaliação devido à indisponibilidade no labo-

ratório de transdutores adequados para uso em líquido. Entretanto, há diversos modelos de transdutores de EA à prova d'água disponíveis comercialmente, inclusive do mesmo fabricante dos transdutores empregados neste trabalho.

Visto que a substituição da água por etanol em ensaios com compressores parcialmente submersos apresentou grande influência nas respostas medidas, sugere-se que os ensaios com o hidrofone sejam também feitos substituindo-se água por outro líquido de menor tensão superficial. Para isso, é necessário que ensaios de compatibilidade do material seja feito ou então outro líquido seja adotado, uma vez que o hidrofone empregado possui revestimento de poliuretano e seu uso com etanol não é garantido pelo fabricante.

Sabe-se que, por sua inflamabilidade e toxicidade, o etanol não é adequado para uso industrial e o mesmo foi adotado por ser uma alternativa prática para o estudo em laboratório. Sugere-se então a pesquisa de líquidos com baixa tensão superficial que possam ser adotados em uso industrial. Para essa questão sugere-se ainda a pesquisa de tensoativos, substâncias também chamadas de surfactantes, que diminuem a tensão superficial de líquidos.

Para atenuação dos efeitos de perturbações decorrentes de fontes externas (ruídos e interferências) nos resultados, é sugerida como alternativa a adoção de transdutores de compensação. A ideia é que sejam realizadas medições em um vaso de pressão estanque (de referência) simultâneas às dos objetos cuja estanqueidade é avaliada. O estudo de um método de processamento de sinais que considere os dados da medição principal juntamente com os das medições do ruído de fundo pode levar a uma solução promissora para medições em ambientes ruidosos.

Um estudo mais elaborado é sugerido para que o ensaio de avaliação de estanqueidade com hidrofone ofereça, além da identificação de vazamentos e localização aproximada da descontinuidade passante, a estimativa da taxa de vazamento envolvida. Conforme visto na literatura (MANASSEH et al., 2001), ao se analisar a frequência do primeiro período do pulso de formação das bolhas no vazamento e, a partir dela, estimar o diâmetro da bolha de gás. Essa dimensão, por sua vez, é proporcional ao volume de uma única bolha, mas a partir da taxa de formação de bolhas estima-se também a taxa de vazamento de gás. Variáveis envolvidas, como por exemplo o gás de ensaio, a pressão e o tamanho da descontinuidade passante possivelmente são bastante significativas no processo, portanto um estudo exploratório mais aprofundado envolvendo o controle dessas variáveis deve ser conduzido.

REFERÊNCIAS

- ABNT. *NBR 15404:2013: Ensaios não destrutivos – Emissão acústica – Detecção e localização de vazamento*. Rio de Janeiro, 2013.
- ABNT. *NBR 15571:2013: Ensaios não destrutivos – Estanqueidade – Detecção de vazamentos*. Rio de Janeiro, 2013.
- ALBERTAZZI, A.; SOUSA, A. R. de. *Fundamentos de metrologia científica e industrial*. Barueri: Manole, 2008.
- ANASTASOPOULOS, A.; KOUROUSIS, D.; BOLLAS, K. Acoustic emission leak detection of liquid filled buried pipeline. *Journal of Acoustic Emission*, v. 27, p. 27–39, 2009.
- ASME. *Boiler and pressure vessel code, section VIII division 3*. New York, 2015.
- ASTM. *E650/E650M: Standard Guide for Mounting Piezoelectric Acoustic Emission Sensors*. West Conshohocken, 2007.
- ASTM. *E1002-11: Standard Practice for Leaks Using Ultrasonics*. West Conshohocken, 2011.
- ASTM. *E432-91: Standard Guide for Selection of a Leak Testing Method*. West Conshohocken, 2011.
- ASTM. *E1211/E1211M: Standard Practice for Leak Detection and Location Using Surface-Mounted Acoustic Emission Sensors*. West Conshohocken, 2012.
- ASTM. *E2930-13: Standard Practice for Pressure Decay Leak Test Method*. West Conshohocken, 2013.
- ASTM. *E1316-16: Standard Terminology for Nondestructive Examination*. West Conshohocken, 2016.
- BAGAVATHIAPPAN, S. et al. Infrared thermography for condition monitoring – a review. *Infrared Physics & Technology*, Elsevier BV, v. 60, p. 35–55, 2013.
- BIALOUS, A. J.; PETERS, P. H.; STONE, E. E. *Leakage testing handbook*. New York: General Electric, 1969.
- BIRAM, J.; BURROWS, G. Bubble tests for gas tightness. *Vacuum*, Elsevier BV, v. 14, n. 6, p. 221–226, 1964.

BOYD, J. W.; VARLEY, J. The uses of passive measurement of acoustic emissions from chemical engineering processes. *Chemical Engineering Science*, Elsevier BV, v. 56, n. 5, p. 1749–1767, 2001.

CEN. *EN 1779:1999: Non-destructive testing. Leak testing. Criteria for method and technique selection*. 1999.

CHRAIM, F.; EROL, Y. B.; PISTER, K. Wireless gas leak detection and localization. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 12, n. 2, p. 768–779, 2016.

CICINNATI TEST SYSTEMS. *Derivation of pressure loss to leak rate formula from the ideal gas law*. Cleves, 2004.

COLOMBO, I. S.; MAIN, I.; FORDE, M. Assessing damage of reinforced concrete beam using “b-value” analysis of acoustic emission signals. *Journal of Materials in Civil Engineering*, American Society of Civil Engineers, v. 15, n. 3, p. 280–286, 2003.

COLOMINAS, M. A.; SCHLOTTHAUER, G.; TORRES, M. E. Improved complete ensemble EMD: A suitable tool for biomedical signal processing. *Biomedical Signal Processing and Control*, Elsevier BV, v. 14, p. 19–29, 2014.

CUI, X. et al. Localization of continuous gas leaks from a flat-surface structure using an acoustic emission sensor array. In: *Proceedings of the International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*. Taipei: IEEE, 2016. p. 1–5.

DEAN, J. A. Physical properties. In: *Lange’s Handbook of Chemistry*. New York: McGraw-Hill Professional, 1998. p. 5.1–5.172.

DOSSAT, R. J. *Princípios de refrigeração: teoria, prática, exemplos, problemas e soluções*. 4. ed. São Paulo: Hemus, 2004.

EIA. *Appliances in U.S. homes by housing unit type*. 2015. Disponível em: <<https://www.eia.gov/consumption/residential/data/2015/hc/php/hc3.1.php>>. Acesso em: 18 maio 2017.

ELLENBERGER, P. *Pressure vessels*. 8. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2004.

EU. *Pressure Equipment Directive (PED)*. Brussels, 2014.

EWGAE. Codes for acoustic emission examination: Code II - leak detection; code III - examination of small parts. *NDT International*, v. 17, n. 4, p. 215–220, 1984.

GAUTSCHI, G. *Piezoelectric sensors*. Berlin: Springer, 2002.

GOMES, G. C. *Avaliação do comportamento de refrigeradores domésticos frente a defeitos provocados e emulados*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

HARVEY, J. F. *Theory and Design of Pressure Vessels*. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1985.

HAYKIN, S.; VAN VEEN, B. *Sinais e Sistemas*. Porto Alegre: Bookman, 2001.

HELLIER, C. Introduction to nondestructive testing. In: *Handbook of nondestructive evaluation*. New York: McGraw-Hill Professional, 2001. p. 1.1–1.27.

HUANG, N. E. et al. The empirical mode decomposition and the hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, The Royal Society, v. 454, n. 1971, p. 903–995, 1998.

HUNAIDI, O.; CHU, W. T. Acoustical characteristics of leak signals in plastic water distribution pipes. *Applied Acoustics*, v. 58, n. 3, p. 235–254, 1999.

HUSIN, S.; ADDALI, A.; MBA, D. Observation of acoustic emission from gas bubble inception and burst. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, SAGE Publications, v. 226, n. 1, p. 79–88, 2011.

INMETRO. *Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM)*. Rio de Janeiro, 2012. Edição luso-brasileira.

JABARDO, J. M. S.; STOECKER, W. F. *Refrigeração industrial*. 2. ed. São Paulo: Editora Edgar Blücher, 2002.

JACKSON, C. N.; SHERLOCK, C. N. *Nondestructive Testing Handbook: leak testing*. 3. ed. Ohio: American Society of Nondestructive Testing, 1998. v. 1.

- KANES, R. et al. Simulation of venting and leaks from pressure vessels. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v. 40, p. 563–577, 2016.
- KUENZI, C. D.; KNAPP-KLEINSORGE, S. A. Ultrasonic stimulus and response tests leveraging modular instrumentation. In: *Proceedings of the Autotestcon*. Baltimore: IEEE, 2007. p. 589–597.
- LAÏNE, J. et al. Acoustic sensor: a novel technique for low pressure membrane integrity monitoring. *Desalination*, v. 119, n. 1, p. 73–77, 1998.
- LATHI, B. P. *Sinais e Sistemas Lineares*. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2007.
- LEIGHTON, T. G. *The acoustic bubble*. London: Academic Press, 1994.
- MALDAGUE, X. P. Introduction to NDT by active infrared thermography. *Materials Evaluation*, Society for Nondestructive Testing, v. 60, n. 9, p. 1060–1073, 2002.
- MANASSEH, R. et al. Passive acoustic bubble sizing in sparged systems. *Experiments in Fluids*, Springer Nature, v. 30, n. 6, p. 672–682, 2001.
- MANN, C. Leak testing. *Non-Destructive Testing*, Elsevier BV, v. 1, n. 4, p. 237–241, 1968.
- MARCÍO, B. S. *Avaliação de estanqueidade em vasos de pressão de pequeno porte*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.
- MASER, K. R.; ZARGHAMEE, M. S. Leak and condition evaluation of a buried aqueduct. In: *Proceedings of the Nondestructive Evaluation of Utilities and Pipelines II*. San Antonio: SPIE, 1998.
- MATAS, J. G. *Leak detection of shock absorber tubes with acoustic emission*. Dissertação (Mestrado) — Department MTM Metallurgy and Materials Engineering, Katholieke Universiteit, Leuven, 2010.
- MEOLA, C.; CARLOMAGNO, G. M. Recent advances in the use of infrared thermography. *Measurement Science and Technology*, IOP Publishing, v. 15, n. 9, p. R27–R58, 2004.
- MILLER, R.; MILLER, M. R. *Air conditioning and refrigeration*. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2011.

- MILLER, R. K. *Nondestructive testing handbook: acoustic emission testing*. 2. ed. Columbus: American Society for Nondestructive Testing, 1987. v. 5.
- MINNAERT, M. XVI. On musical air-bubbles and the sounds of running water. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, v. 16, n. 104, p. 235–248, 1933.
- MIX, P. E. *Introduction to nondestructive testing: a training guide*. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 2005.
- MOHAMMAD, F.; ABDULHAMEED, A.; KAHM, N. Application of ultrasonic technology for well leak detection. In: *Proceedings of the International Petroleum Technology Conference*. Dubai: International Petroleum Technology Conference, 2007. v. 2, p. 1348–1352.
- MONTGOMERY, D. C. *Design and analysis of experiments*. 8. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2013.
- MOON, C. et al. Ultrasound techniques for leak detection. In: *Proceedings of the SAE 2009 Noise and Vibration Conference and Exhibition*. Michigan: SAE International, 2009.
- MURATA. *Ultrasonic Sensor Application Manual*. S15. Nagaokakyo, 2010.
- MURVAY, P.-S.; SILEA, I. A survey on gas leak detection and localization techniques. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Elsevier BV, v. 25, n. 6, p. 966–973, 2012.
- NATIONAL INSTRUMENTS. *NI X Series Multifunction Data Acquisition*. Nagaokakyo, 2014.
- NEPTUNE SONAR. *Hydrophone with Pre-amplifier Model D/140/H Datasheet*. Kelk, 2016.
- NI. *Aquisição de dados*. 2017. Disponível em: <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/pt>. Acesso em: 29 maio 2017.
- NIER, A. O. et al. Mass spectrometer for leak detection. *Journal of Applied Physics*, AIP Publishing, v. 18, n. 1, p. 30–33, 1947.
- OSTAPKOWICZ, P. Leak detection in liquid transmission pipelines using simplified pressure analysis techniques employing a minimum of standard and non-standard measuring devices. *Engineering Structures*, Elsevier BV, v. 113, p. 194–205, 2016.

OZEVIN, D.; HARDING, J. Novel leak localization in pressurized pipeline networks using acoustic emission and geometric connectivity. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Elsevier BV, v. 92, p. 63–69, 2012.

PAYÃO, J. C.; SCHMIDT, W.; SCHRÖDER, G. *Fundamentos de ensaio de vazamento e estanqueidade*. Jülich: Forschungszentrum Juelich GmbH, 2000.

PEREIRA FILHO, J. dos S. *Análise de efeitos de teste hidrostático em vaso de pressão*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

PIAZZETTA, G. R.; FLESCH, R. C. C.; PACHECO, A. L. S. Leak detection in pressure vessels using ultrasonic techniques (PVP2017-65178). In: *Proceedings of the Pressure Vessels and Piping Conference*. Waikoloa: ASME, 2017. p. 1–9.

POLETTI, E. L. *Aprimoramento de uma bancada de ensaios de desempenho de compressores herméticos visando reduzir incertezas de medição*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

PREGELJ, A.; MOZETIC, M. Leak detection methods and defining the sizes of leaks. In: *Proceedings of the 4th International Conference of the Slovenian Society for Nondestructive Testing*. Ljubljana: Slovenian Society for Nondestructive Testing, 1999. v. 4, n. 2, p. 247–256.

RAO, B. S. C. Quality assurance in fabrication of boilers and pressure vessels. In: *Proceedings of the International Conference on Heat Exchangers, Boilers and Pressure Vessels*. Alexandria: HEB 97, 1997. v. 1.

RIENSTRA, S. S.; HIRSCHBERG, A. A. *An introduction to acoustics*. Eindhoven, 1999.

RONGXIN, Y.; WEIDAN, L. Study on the leak test technology of spacecraft using ultrasonic. In: *Proceedings of the 2nd Singapore International Non Destructive Testing Conference and Exhibition*. Singapore: Citeseer, 2013. p. 19–21.

ROSSETO, J. P. *Análise de fontes de erro na medição de vazão mássica em ensaios de compressores de refrigeração*. Dissertação (Mestrado) —

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

SETTLES, G. S. *Schlieren and Shadowgraph Techniques*. Berlin: Springer, 2006. ISBN 3540661557. Disponível em: <http://www.ebook.de/de/product/1444970/g_s_settles_schlieren_and_shadowgraph_techniques.html>.

SHANNON, C. Communication in the presence of noise. *Proceedings of the IRE*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 37, n. 1, p. 10–21, 1949.

SHULL, P. J. *Nondestructive evaluation: theory, techniques, and applications (mechanical engineering)*. Altona: CRC Press, 2002.

STOUPPE, D.; LAU, Y. Air conditioning and refrigeration equipment failures. *National Engineer*, v. 93, n. 9, p. 14–17, 1989.

SUTERA, S. P.; SKALAK, R. The history of Poiseuille's law. *Annual Review of Fluid Mechanics*, Annual Reviews, v. 25, n. 1, p. 1–20, 1993.

SZILARD, J. *Ultrasonic testing: non-conventional testing techniques*. New York: JOHN WILEY & SONS, 1982.

TAO, W. et al. Gas leak localization and detection method based on a multi-point ultrasonic sensor array with TDOA algorithm. *Measurement Science and Technology*, IOP Publishing, v. 26, n. 9, p. 095002, 2015.

TELLES, P. C. S. *Vasos de pressão*. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

TIAN, S. et al. A study on a real-time leak detection method for pressurized liquid refrigerant pipeline based on pressure and flow rate. *Applied Thermal Engineering*, Elsevier BV, v. 95, p. 462–470, 2016.

TING, C.-C.; CHEN, C.-C. Detection of gas leakage using microcolor schlieren technique. *Measurement*, Elsevier BV, v. 46, n. 8, p. 2467 – 2472, 2013.

TORRES, M. E. et al. A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise. In: *Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. Prague: IEEE, 2011.

TRIMM, M. W. Introduction to nondestructive testing: overview. In: WORKMAN, G. L. (Ed.). *Nondestructive testing handbook*. 3. ed. Ohio: American Society of Nondestructive Testing, 2012. v. 10, p. 1–30.

- TUŠEK, J.; BAJCER, B.; KAMPUŠ, Z. On line leak testing of welded water heaters. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 155-156, p. 1164–1170, 2004.
- VALLEN SYSTEME. *Acoustic Emission Sensors Specification*. Icking, 2015.
- VALLEN SYSTEME. *Decoupling Circuit (DCPL2) Datasheet*. Icking, 2016.
- VALLEN SYSTEME. *Accessories for Acoustic Emission Systems Specification*. Icking, 2017.
- VALLEN SYSTEME. *Acoustic Emission Preamplifiers Specification*. Icking, 2017.
- WANG, D.; ZHAO, F.; WANG, T. The ultrasonic characteristics study of weak gas leakage. In: *Proceedings of the International Conference on Fluid Power and Mechatronics*. Harbin: IEEE, 2015. p. 681–685.
- WELLS, P. S. et al. Value of assessment of pretest probability of deep-vein thrombosis in clinical management. *The Lancet*, Elsevier, v. 350, n. 9094, p. 1795–1798, 1997.
- WESCOTT, T. Sampling: what Nyquist didn't say, and what to do about it. *Wescott Design Services*, 2010.
- WHITE, F. *Fluid Mechanics*. 7. ed. New York: McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 2010.
- WOOD, J. D. Leak testing. In: *ASM Metals Handbook: Nondestructive evaluation and quality control*. Ohio: ASM International, 1992. v. 17.
- WU, Z.; HUANG, N. E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method. *Advances in adaptive data analysis*, World Scientific, v. 1, n. 1, p. 1–41, 2009.
- YEH, J.-R.; SHIEH, J.-S.; HUANG, N. E. Complementary ensemble empirical mode decomposition: A novel noise enhanced data analysis method. *Advances in Adaptive Data Analysis*, World Scientific, v. 2, n. 2, p. 135–156, 2010.
- YU, L.; LI, S. Acoustic emission (AE) based small leak detection of galvanized steel pipe due to loosening of screw thread connection. *Applied Acoustics*, Elsevier, v. 120, p. 85–89, 2017.

A OUTROS MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE ESTANQUEIDADE

Os métodos de avaliação de estanqueidade apresentados neste apêndice não foram empregados no desenvolvimento do presente trabalho, mas são comuns na indústria em diversas aplicações, como em vasos de pressão. Rao (1997) cita três métodos que são tipicamente utilizados na indústria para controle de qualidade em vasos de pressão. Desses, o método da bolha com pressurização foi revisado na seção 2.2.1 (página 48) e os outros dois, o método de detecção de gases halógenos e o de detecção de gás hélio, são apresentados neste apêndice, nas seções A.1 e A.2, respectivamente. A seção A.3 aborda o método da termografia infravermelha e a seção A.4 completa essa lista de métodos revisados com o método *schlieren*. A seção A.5 identifica questões relativas ao processo de escolha de métodos e técnicas para ensaios de estanqueidade, referenciando diretrizes das normas do Comitê Europeu de Normalização (CEN, 1999) e da Sociedade Americana para Testes e Materiais (ASTM, 2011).

A.1 MÉTODO DE DETECÇÃO DE GASES HALÓGENOS

O método com detecção de gases halógenos utiliza detectores que respondem à maioria dos compostos gasosos que contém halogênios⁸ (flúor, cloro, bromo ou iodo). Preferencialmente, os gases halógenos empregados são compostos químicos atóxicos, como os gases refrigerantes R-22 (monoclorodifluorometano) e R-134a (1,1,1,2-tetrafluoroetano), que têm uso mais difundido. Gases que podem ser determinados por detectores específicos e são empregados em ensaios de vazamentos são conhecidos como gases marcadores (JACKSON; SHERLOCK, 1998).

O ensaio é feito pressurizando-se o objeto em ensaio com algum dos gases halógenos ou com uma mistura de um gás halógeno com ar ou nitrogênio. Detectores são então usados para examinar selos, juntas, soldas etc., a fim de identificar vazamentos, podendo localizá-los e medir as respectivas taxas. Alguns exemplos de equipamentos que são testados utilizando esse método são: sistemas de suspensão e radiadores automotivos; sistemas de condicionamento de ar; equipamentos de refrigeração; compressores de ar; trocado-

⁸Os gases halógenos elementares não são comumente utilizados pois são tóxicos e os detectores não respondem sensivelmente a eles (JACKSON; SHERLOCK, 1998).

res de calor; caldeiras (JACKSON; SHERLOCK, 1998; PAYÃO; SCHMIDT; SCHRÖDER, 2000).

No detector de vazamento convencional, o transdutor para detecção de halógenos constitui o componente mais importante e opera em conjunto com uma sonda aspiradora. Ele se assemelha, no que diz respeito à sua construção, a um tubo de elétrons. A corrente de íons que se forma entre o ânodo e o catodo, que é constante a uma dada temperatura, aumenta rapidamente quando uma pequena quantidade de gás halógeno penetra neste sistema de elétrons (PAYÃO; SCHMIDT; SCHRÖDER, 2000).

O fato de gases refrigerantes serem halogenados e usados para a detecção de vazamentos torna esse método bastante adequado para avaliação de estanqueidade de sistemas de refrigeração, que já são previamente carregados com esses tipos de gases. Além disso, tornam favoráveis o emprego dessa técnica fatores como: alta sensibilidade com relativo baixo custo; portabilidade do sistema; facilidade de operação e manutenção (JACKSON; SHERLOCK, 1998).

A.2 MÉTODO DE DETECÇÃO DE HÉLIO

Da mesma forma como no método de detecção de gases halógenos, o método de detecção de vazamentos com hélio (He) faz uso de um gás marcador para ensaio. O hélio é um gás inerte, não combustível e atóxico, que possui elevada permeabilidade em diferentes materiais e é encontrado no ar atmosférico em baixo teor (reduzindo assim efeitos espúrios durante o ensaio). Por conta dessas propriedades, o hélio é o gás de ensaio mais empregado no âmbito da avaliação de estanqueidade (PAYÃO; SCHMIDT; SCHRÖDER, 2000).

O principal componente do detector de hélio é o espectrômetro de massa. Esse componente constitui o transdutor que faz a identificação do hélio proveniente de descontinuidades do objeto em ensaio (PAYÃO; SCHMIDT; SCHRÖDER, 2000).

As técnicas associadas ao método de ensaio para detecção de vazamentos com hélio podem ser divididas em dois grupos (PAYÃO; SCHMIDT; SCHRÖDER, 2000):

1. técnicas com sobrepressão (sonda aspiradora);
2. técnicas com vácuo.

Quando o objeto a ser testado não pode ser evacuado e não é possível posicionar o transdutor no interior do objeto, são aplicadas técnicas do primeiro grupo, nas quais o objeto é pressurizado

com uma pressão maior que a atmosférica. Nesse caso são usadas sondas aspiradoras conectadas ao detector de hélio.

Nas aplicações das técnicas do segundo grupo, o objeto em ensaio é evacuado e sua superfície externa é colocada em contato com o hélio. Nesses casos, o transdutor interno identifica as situações em que o gás adentra o objeto por meio de uma descontinuidade.

As técnicas ainda podem ser empregadas de maneira local, tornando possível a localização do vazamento, ou então de maneira integral, feita em uma câmara para identificação apenas da presença de vazamentos (PAYÃO; SCHMIDT; SCHRÖDER, 2000). A figura A.1 ilustra por meio de esquemas as diferentes técnicas de ensaio de estanqueidade com o método de detecção do gás hélio.

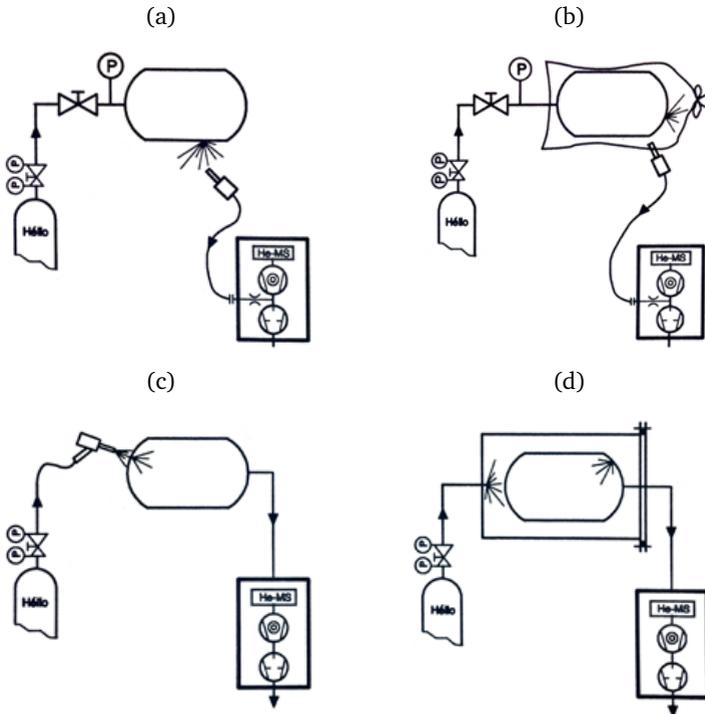
A.3 MÉTODO DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

O método da termografia infravermelha (TI) é baseado no fato de que todos os objetos com temperatura acima de 0 K emitem radiação na região infravermelha do espectro eletromagnético (BAGAVATHIAPPAN et al., 2013). Sua aplicação inclui basicamente um computador e uma câmera, cuja principal parte é o detector infravermelho, que absorve a energia infravermelha emitida pelo objeto em ensaio (cuja temperatura superficial deve ser medida) e a converte em tensão ou corrente elétrica. Ainda que qualquer objeto emita energia proporcional à sua temperatura, a energia medida pelo detector infravermelho depende do coeficiente de emissividade da superfície (MEOLA; CARLOMAGNO, 2004).

As técnicas de TI têm sido utilizadas com sucesso em diversas aplicações de monitoramento, como por exemplo de estruturas civis, equipamentos elétricos e soldas (BAGAVATHIAPPAN et al., 2013) e podem ser divididas em passivas e ativas. As técnicas passivas compreendem o ensaio de materiais e estruturas que estão naturalmente em temperaturas diferentes da ambiente (geralmente mais altas). As ativas envolvem a necessidade de um estímulo externo para induzir um contraste térmico no objeto em ensaio (MALDAGUE, 2002).

O uso de TI é útil aos ensaios não destrutivos por possibilitar uma inspeção rápida e sem contato em uma vasta gama de aplicações, proporcionando segurança ao operador. Por outro lado, o método apresenta algumas limitações, dentre elas: os efeitos espúrios causados por perdas térmicas (por convecção e radiação); a possibilidade de identificar apenas defeitos que causem variações

Figura A.1: Diferentes técnicas de ensaio de estanqueidade com hélio.



- Legenda: a) Objeto pressurizado e uso de sonda aspiradora (local).
 b) Objeto pressurizado e uso de envoltório (integral).
 c) Objeto com vácuo e uso de pistola de gás He (local).
 d) Objeto com vácuo dentro de recipiente com He (integral).

Fonte: adaptado de Payão, Schmidt e Schröder (2000).

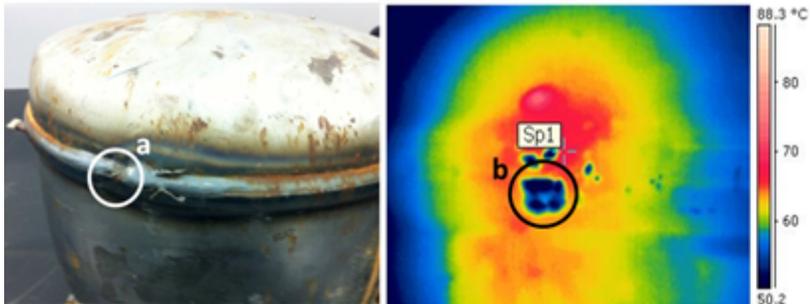
mensuráveis na temperatura; a impossibilidade de inspecionar o interior de materiais; o custo do equipamento, que pode tornar a técnica inviável economicamente (MALDAGUE, 2002).

Ao se aplicar a TI a ensaios de estanqueidade, busca-se identificar variações na temperatura superficial de objetos em ensaio, causadas por vazamentos de fluido. Maser e Zarghamee (1998) utilizaram o método para identificação de vazamentos em aquedutos urbanos. O estudo foi feito com uma câmera infravermelha e os registros foram feitos a partir de um helicóptero. Nenhum estímulo externo foi utilizado pois a água que corria nos dutos já estava a

uma temperatura superior à ambiente. O vazamento de água criava regiões quentes no solo em seu entorno, além de alterar a emissividade dessas regiões, possibilitando a detecção desejada.

Marcio (2014) empregou técnicas de TI ativa em vasos de pressão para identificar vazamentos de gás. Em laboratório, foram feitos ensaios aquecendo o corpo do vaso com auxílio de uma fonte externa, incluindo a região da descontinuidade passante, e pressurizando o vaso com ar comprimido resfriado. Como resultado, constatou que a região onde o vazamento encontrava-se apresentou uma evidente diferença de temperatura em relação ao resto da superfície analisada, indicando a localização do vazamento, conforme pode ser visto na figura A.2.

Figura A.2: Uso de termografia infravermelha em ensaio de estanqueidade de vaso de pressão.



- Legenda: a) local do vazamento – imagem obtida com câmera convencional.
b) local do vazamento – termograma.

Fonte: Marcio (2014).

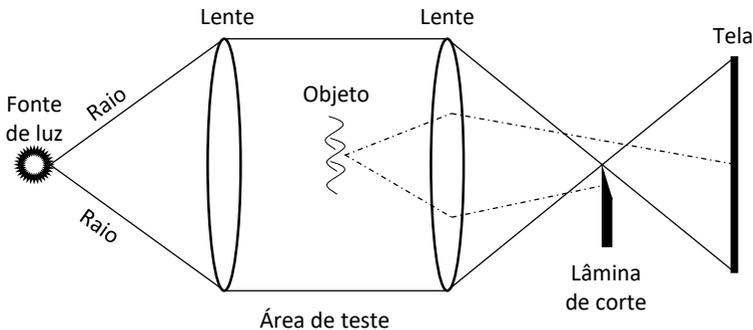
A.4 MÉTODO *SCHLIEREN*

Mais um método que pode ser aplicado na identificação de vazamentos é conhecido como *schlieren* (palavra da língua alemã). ‘*Schlieren*’ são diferenças de refração relativamente pequenas que alteram a direção de raios de luz que atravessam meios não homogêneos. As refrações podem ocorrer em sólidos, líquidos e gases e podem resultar de variações de temperatura, vazões de alta velocidade ou da mistura de materiais ou substâncias distintas (SET-

TLES, 2006). O método muitas vezes é aplicado para identificação e medição de gradientes de densidade em meios gasosos não homogêneos, baseando-se na relação linear entre o índice de refração da luz e a densidade do gás (SETTLES, 2006; TING; CHEN, 2013).

A técnica *schlieren* é baseada na conversão de diferença de fase da luz em diferença de amplitude. Para entendimento do método, a figura A.3 apresenta um sistema simplificado com duas lentes e uma fonte luminosa. O feixe de raios proveniente da fonte é colimado pela primeira lente, atravessa a área de teste e então a segunda lente projeta os raios em uma tela de visualização posicionada após seu ponto focal. Quando um objeto *schlieren* é colocado na área de teste, os raios que o atravessam são desviados em relação ao seu traçado original. Na figura A.3, são representados com linhas tracejadas dois raios que se desviam de suas trajetórias paralelas ao atravessarem o objeto, um para cima e o outro para baixo. Ambos os raios refratados não passam pelo foco do sistema óptico, o raio deslocado para cima ilumina um ponto na tela e o raio desviado para baixo atinge a lâmina de corte. O raio bloqueado pela lâmina projeta um ponto escuro na tela. Para este ponto específico do objeto, a diferença de fase que causa um gradiente na área de teste é convertida em uma diferença de amplitude, e visivelmente pode-se identificar a heterogeneidade originalmente invisível (SETTLES, 2006).

Figura A.3: Diagrama de um sistema *schlieren* simples com uma fonte luminosa.

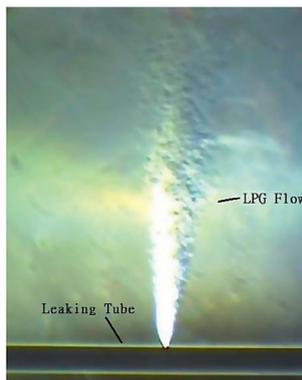


Fonte: adaptado de Settles (2006).

Ting e Chen (2013) estudaram experimentalmente o método

schlieren com o objetivo de identificar vazamentos de gás liquefeito de petróleo (GLP) em pequenos orifício em tubulações, uma vez que o gás possui uma densidade diferente da do meio (ar atmosférico). Como resultado, puderam observar vazamentos provenientes de orifícios de dimensões distintas e com diferentes pressões de fluido. Como exemplo, a figura A.4 ilustra um dos resultados obtidos pelos autores, na qual um vazamento de GLP de um orifício de 1,13 mm em um duto pressurizado com 4,66 kPa é identificado.

Figura A.4: Foto de vazamento de gás liquefeito de petróleo (indicado na figura como LPG, do inglês *Liquefied Petroleum Gas*).



Fonte: Ting e Chen (2013).

A.5 ESCOLHA DE MÉTODOS E TÉCNICAS PARA ENSAIO

Selecionar um método e uma técnica para avaliação de vazamentos é um processo sequencial e muitas vezes não trivial. As condições de ensaio, as limitações do sistema, o orçamento, o pessoal e os equipamentos disponíveis são algumas das informações necessárias para uma seleção adequada. Jackson e Sherlock (1998) sugerem definir para qual finalidade a avaliação de vazamentos é empregada, se o ensaio deve apenas revelar a presença de um vazamento ou indicar sua localização e também se é necessário medir a taxa dos vazamentos encontrados.

A seleção de uma técnica de ensaio deve ser criteriosa. Uma escolha adequada pode representar racionalização de custos, maior capacidade de detecção de defeitos e confiabilidade dos ensaios (BI-

ALOUS; PETERS; STONE, 1969). A etapa de planejamento do projeto envolve analisar cada método disponível de forma que a reflexão possa levar à escolha da opção mais adequada ou guiar em direção a uma solução com princípio básico mais coerente.

Payão, Schmidt e Schröder (2000) afirmam que, antes de escolher um método de ensaio, é preciso conhecer detalhes da aplicação: o nível de vazamento tolerado para o projeto; o limite de pressão de ensaio; a necessidade de pressurização ou evacuação; os aspectos técnicos relativos à segurança; a necessidade de um ensaio local, no qual se localiza o vazamento, ou de um ensaio integral, no qual a taxa de vazamento é medida.

A norma EN 1779:1999 (CEN, 1999 apud PAYÃO; SCHMIDT; SCHRÖDER, 2000) apresenta algumas técnicas de identificação e localização de vazamentos. Além da menor taxa de vazamento detectável com cada método, são citados detalhes importantes relativos ao princípio de medição, aos instrumentos e aos equipamentos necessários para a inspeção, bem como as limitações e restrições relativas ao objeto em ensaio. A norma também sugere uma metodologia para seleção de ensaios para inspeção de objetos, orientada a partir dos seguintes requisitos do usuário: definição do sentido do escoamento de matéria; abrangência do ensaio: se a inspeção é integral ou em apenas uma região específica do objeto; aplicabilidade: se o objetivo é localizar o vazamento ou apenas identificar sua existência. O quadro A.1, originalmente adaptada de CEN (1999) por Payão, Schmidt e Schröder (2000), descreve essa metodologia de seleção. As técnicas que atendem aos requisitos de ensaio são sugeridas na coluna 'Ensaio' por meio de códigos. Aqueles denotados pela letra A são relativos a ensaios com objeto evacuado utilizando o gás hélio como rastreador. Os códigos com a letra B também empregam o gás hélio, mas nesse caso o objeto de ensaio é pressurizado. As técnicas representadas pelas códigos com a letra C consideram a detecção por formação de bolha. Por fim, a letra D indica técnicas que levam em conta a variação de pressão resultante do vazamento. Técnicas que utilizam ensaios hidrostáticos, métodos ultrassônicos, eletromagnéticos ou óticos não estão incluídos na norma.

O guia E432-91 da ASTM (ASTM, 2011) é outro documento que auxilia na seleção de métodos e técnicas de ensaio de estanqueidade, baseando-se nas particularidades de cada aplicação. Ele apresenta uma árvore de decisões que conduz a seleção do método a partir das necessidades e limitações impostas. As ramificações da árvore indicam peculiaridades, como: localização; detecção ou medição de vazamento; necessidade de fluido de ensaio adicio-

nal; sensores específicos ou inerentes ao sistema; possibilidade de pressurização ou evacuação.

Quadro A.1: Metodologia para escolha de ensaio para avaliação de estanqueidade.

Sentido do escoamento	Tipo de ensaio	Aplicabilidade	Técnicas
De dentro para fora do objeto de ensaio	Local	Localização	B1, B2.2, B4, C3
		Medição quantitativa	B2.1, B3, D3
	Integral	Localização	C1, C2
		Medição quantitativa	B5, D1, C1, B3, B6, D3, D4
De fora para dentro do objeto de ensaio	Local	Localização	A3
		Medição quantitativa	A2, D3
	Integral	Localização	
		Medição quantitativa	A1, D2, D3, D4

Fonte: adaptado de CEN (1999 apud PAYÃO; SCHMIDT; SCHRÖDER, 2000).

Como visto, existem diversos métodos que podem ser utilizados para detecção e localização de vazamentos e ainda mais técnicas destinadas a cada aplicação. Tão importante quanto a correta aplicação das técnicas é o conhecimento das limitações e da aplicabilidade de cada uma.

B PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE SINAIS

Os conceitos de processamento e análise de sinais são apresentados para que as etapas de desenvolvimento do trabalho e avaliação dos resultados no capítulo 4 sejam mais bem compreendidos. A ferramenta EMD é importante para análise dos sinais não estacionários no domínio do tempo, sobretudo em técnicas que possuem como objetivo a identificação de bolhas em líquido.

As técnicas de avaliação de estanqueidade revisadas no capítulo 2 (seção 2.2) e no apêndice A contemplam, em sua maioria, a medição de variáveis que possuem forte relação com os vazamentos encontrados. Essas medições, por sua vez, resultam em sinais elétricos que são processados e analisados por sistemas digitais. Nesse processo, ocorre uma importante etapa que gera um sinal de tempo discreto a partir de um sinal de tempo contínuo, a amostragem. O processo de amostragem faz com que seja perdida toda informação que ocorre entre os instantes em que são obtidas as amostras e, por essa razão, é importante garantir que as amostras representem bem o fenômeno que se deseja estudar. A seção B.1 aborda o fenômeno de *aliasing*, que distorce o espectro do sinal original, e o teorema da amostragem de Nyquist–Shannon, usado para garantir que o sinal amostrado represente adequadamente o sinal em tempo contínuo (HAYKIN; VAN VEEN, 2001).

Métodos de processamento e análise de sinais tipicamente envolvem representações no domínio do tempo ou da frequência, ou ainda uma combinação de ambos. Muitas referências abordam e revisam tais técnicas, como Lathi (2007) em sua obra. Quando se fala de análise em frequência, a transformada de Fourier surge como uma alternativa natural para quase todos os casos, seja por sua simplicidade ou por sua aplicação em condições gerais. Entretanto, são encontradas algumas restrições nas análises espectrais de Fourier: o sistema deve ser linear e os dados devem ser estritamente periódicos ou estacionários. Caso contrário, o espectro resultante terá pouco sentido físico (HUANG et al., 1998). Para uma análise no tempo visando identificar componentes de vazamento e também possíveis interferências do ambiente, é apresentada na seção B.2 a ferramenta de decomposição do sinal em funções proposta por Huang et al. (1998), chamada de ‘decomposição empírica de modos’ (EMD, do inglês *Empirical Mode Decomposition*), e algumas variações baseadas na EMD e encontradas na literatura. Esse método de análise é empregado em diversas aplicações por ser projetado para trabalhar com sinais não lineares e não estacionários. Assim, ao se decompor o sinal em um número pequeno de modos, podem ser identificadas

componentes que representam sinais de interesse, como os relacionados ao vazamento. Em um estudo semelhante ao proposto no presente trabalho, Cui et al. (2016) empregam a EMD para extrair o sinal de vazamento medido com transdutores de emissões acústicas, uma vez que os sinais de vazamento originais coletados contêm ruído significativo.

B.1 AMOSTRAGEM DE SINAIS

O teorema da amostragem fundamenta uma forma para garantir que um sinal de tempo contínuo seja adequadamente representado por um sinal de tempo discreto. Sua origem foi atribuída por H. S. Black a Cauchy em 1841. Mais tarde, na década de 1920, a ideia essencial do teorema foi redescoberta por Carson, Hartley e Nyquist (LATHI, 2007). Também conhecido como ‘teorema da amostragem de Nyquist–Shannon’, foi definido por Shannon (1949, p. 448, tradução nossa) da seguinte forma:

Se uma função $f(t)$ não possui frequências superiores a W ciclos por segundo (Hz), ela é completamente determinada por seus valores em uma série de pontos espaçados em $W/2$ segundos. Intuitivamente, a justificativa é que, se não há frequências maiores do que W , o sinal não pode mudar para um valor substancialmente novo em um tempo menor que meio ciclo da frequência mais alta, ou seja, $W/2$.

A frequência mínima de amostragem muitas vezes é denominada ‘taxa de amostragem de Nyquist’ ou ‘taxa de Nyquist’. Se f_m for a mais alta frequência presente no sinal e f_s denotar a frequência de amostragem, ambas expressas em hertz, então o teorema da amostragem afirma que a condição $f_s > 2f_m$ deve ser satisfeita para que o sinal amostrado de tempo discreto represente de forma adequada o sinal de tempo contínuo original (HAYKIN; VAN VEEN, 2001).

Em uma representação do espectro de frequências de um sinal amostrado durante um período finito, o cálculo computacional da transformada de Fourier considera o sinal como periódico, de período igual ao valor do tempo total de aquisição. Com isso, o espectro gerado é discretizado e repetido em pontos múltiplos da frequência fundamental f_0 , a qual é inversamente proporcional ao

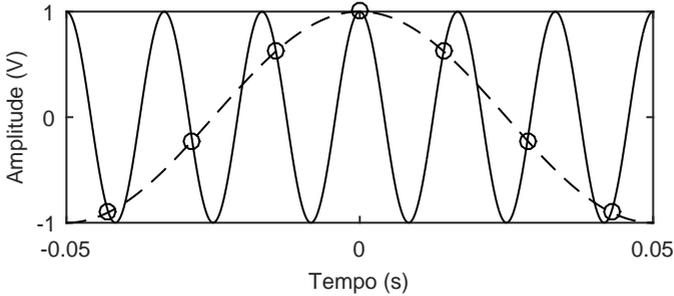
tempo total de aquisição, T_A ($f_0 = 1/T_A$). Dessa forma, a cada intervalo equivalente a T_A , a representação espectral do sinal se repete. Isso gera regiões de sobreposição em seu espectro de frequência que causam o efeito indesejado de *aliasing*. Uma componente de alta frequência (com frequência maior que $f_s/2$) presente no sinal original faz com que a repetição do espectro sobreponha-se ao espectro original de frequências, alterando o valor de componentes na região de sobreposição ou fazendo aparecer componentes inexistentes. Portanto, o efeito de *aliasing* é inerente ao processo de amostragem e pode ser atenuado se a frequência adequada de aquisição for empregada. Quando isso não é possível, devem ser empregados filtros analógicos com o objetivo de impedir que as componentes de alta frequência sejam amostradas (LATHI, 2007).

A figura B.1 ilustra três casos de como a amostragem interfere na análise de um sinal senoidal com amplitude de 1 V e frequência de 60 Hz. As circunferências indicam o valor do sinal amostrado a cada instante a uma taxa de 70 Hz. O sinal tracejado representa um outro sinal com frequência de 10 Hz. A figura B.1a mostra um exemplo de *aliasing* no qual dois sinais distintos, um sinal senoidal de 60 Hz representado pela linha contínua e um outro de frequência 10 Hz representado pela linha tracejada, foram amostrados nos mesmos instantes. Nesse exemplo, a frequência de amostragem empregada não satisfaz a condição do teorema de Nyquist–Shannon, resultando em duas representações iguais no tempo discreto para dois sinais diferentes. Para evitar esse efeito indesejado, o teorema da amostragem indica o quão rápido essas amostras devem ser extraídas do sinal original, no tempo contínuo, para que o representem de maneira adequada (WESCOTT, 2010).

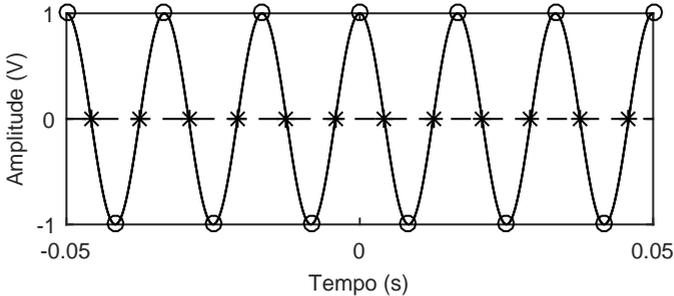
A figura B.1b apresenta um exemplo no qual a amostragem é feita com uma taxa exatamente igual à taxa de Nyquist. As circunferências indicam valores amostrados que coincidem com os picos e vales do sinal original, enquanto os asteriscos representam a amostragem dos cruzamentos por zero da tensão. Isso mostra a necessidade de f_s ser maior que $2f_m$, pois, a não ser que a fase do sinal seja conhecida, existe a possibilidade de ser obtido um sinal amostrado com amplitude bastante diferente da real, como o representado pela linha tracejada (WESCOTT, 2010).

Na figura B.1c, o sinal de 60 Hz é amostrado com uma taxa de 400 Hz, muito maior que a taxa de Nyquist correspondente. A amostragem apresentada permite a reconstrução do sinal sem que existam ambiguidades, como aquelas mostradas nas figuras B.1a e B.1b.

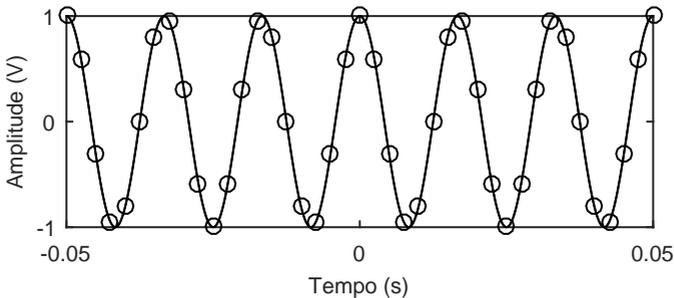
Figura B.1: Exemplos de diferentes amostragens de um mesmo sinal.

(a) *Aliasing* entre dois sinais senoidais.

(b) Amostragem na exata frequência de Nyquist.



(c) Amostragem extraindo adequadamente a forma do sinal original.



Fonte: adaptado de Wescott (2010).

Sinais encontrados no mundo real são limitados no tempo (duração finita), porém não são limitados em banda (infinitas frequências). Para que essas faixas de frequência acima das de interesse não gerem ambiguidades e, conseqüentemente, erros na

reconstrução do sinal original, elas devem ser suprimidas. Isso pode ser feito com o uso de um filtro passa-baixas com frequência de corte $f_s/2$, que nesse caso é chamado de filtro *anti-aliasing*. O uso do filtro também auxilia na redução do efeito do ruído, que apresenta essencialmente uma ampla faixa de frequências (LATHI, 2007). Na prática, tipicamente é necessário amostrar um sinal com uma frequência maior que o dobro da frequência de interesse, pois o sinal tem duração limitada e, no caso de a frequência de amostragem f_s ser muito próxima de duas vezes a frequência máxima contida no sinal, os erros de reconstrução de amplitude podem ser muito grandes.

B.2 DECOMPOSIÇÃO EMPÍRICA DE MODOS (EMD)

A decomposição empírica de modos (EMD, do inglês *Empirical Mode Decomposition*) é um método adaptativo e eficaz para análise de processos não lineares e não estacionários. Desenvolvido originalmente por Huang et al. (1998), o método é dependente apenas do próprio sinal e baseia-se em características locais para decompor um conjunto de dados em um número finito e, normalmente, pequeno de funções. Para isso, emprega uma sequência de etapas que têm como objetivo decompor o sinal em diferentes modos de oscilação. Ao final, o sinal original pode ser expresso como uma soma de funções moduladas em amplitude e em frequência, chamadas funções de modo intrínseco (IMF, do inglês *Intrinsic Mode Functions*), mais uma parcela de resíduo, que representa a tendência do sinal ou um valor médio local (HUANG et al., 1998).

Para ser considerado uma IMF, um sinal deve atender a duas condições: em todo o conjunto de dados, o número de extremos (pontos máximos e mínimos) e o número de cruzamentos por zero devem ser iguais ou se diferenciarem em, no máximo, um; em qualquer ponto, a média local, definida como a média dos envelopes superior e inferior, deve ser zero (HUANG et al., 1998).

A decomposição do sinal em um certo número de IMF é feita a partir de etapas sequenciais aplicadas ao sinal e pode ser expressa na forma do algoritmo a seguir (HUANG et al., 1998):

1. definir $k = 0$ e encontrar todos os extremos de $r_0 = x$;
2. interpolar os pontos mínimos de r_k para obter o envelope e_{min} . O mesmo é feito com os máximos para obter e_{max} ;
3. calcular o envelope médio $m = (e_{min} + e_{max})/2$;
4. calcular a candidata a IMF $d_{k+1} = r_k - m$;

5. d_{k+1} é uma IMF?

Se sim: salvar d_{k+1} , calcular o resíduo $r_{k+1} = x - \sum_{i=1}^k d_i$, fazer $k = k + 1$ e tratar r_k como dado de entrada para o passo 2.

Se não: tratar d_{k+1} como dado de entrada para o passo 2;

6. continuar até o resíduo final r_k satisfazer o critério de parada predefinido.

Os passos de 2 a 5 representam o processo de refinamento necessário para a extração de cada modo. Esse processo, chamado de *sifting process*, requer certas iterações até que o critério de parada seja atingido (TORRES et al., 2011).

Uma das principais desvantagens do método EMD original é o aparecimento frequente de um fenômeno chamado de mistura de modos (do inglês *mode mixing*). Wu e Huang (2009, p. 1, tradução nossa) definiram esse fenômeno como “uma única IMF consistindo de sinais de escalas muito díspares, ou um sinal de uma escala similar residindo em diferentes componentes da IMF”. Tais autores ainda afirmaram que o fenômeno é frequentemente uma consequência da intermitência do sinal.

Para superar o problema de separação inadequada do espectro pelo método EMD, foi proposto a Decomposição Empírica Conjunta de Modos (EEMD, do inglês *Ensemble Empirical Mode Decomposition*), um melhoramento do método EMD com análise de dados assistida por ruído (NADA, do inglês *Noise-Assisted Data Analysis*). O EEMD define os modos ‘verdadeiros’ como uma média das IMF obtidas via EMD sobre um conjunto de tentativas, as quais consistem do sinal original adicionado de realizações de ruído branco com variância finita (WU; HUANG, 2009). Sendo x o sinal original de interesse, o algoritmo do método EEMD é apresentado a seguir (COLOMINAS; SCHLOTTHAUER; TORRES, 2014):

1. gerar $x^{(i)} = x + \beta w^{(i)}$, onde $w^{(i)} (i = 1, \dots, I)$ é uma sequência com cada uma das I realizações do ruído com média nula e variância unitária e $\beta > 0$;
2. decompor completamente cada $x^{(i)} (i = 1, \dots, I)$ pelo método EMD, obtendo-se os modos $d_k^{(i)}$, onde $k = 1, \dots, K$ indica o modo;
3. classificar \bar{d}_k como o k -ésimo modo de x , obtido pela média dos modos correspondentes: $\bar{d}_k = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I d_k^{(i)}$.

No algoritmo do método EEMD, os resíduos são obtidos de

forma independente das outras iterações e isso resulta em duas desvantagens: a decomposição é incompleta e diferentes execuções podem produzir diferentes números de modos (COLOMINAS; SCHLOTTHAUER; TORRES, 2014). Para lidar com o problema de erro de reconstrução devido ao ruído residual, Yeh, Shieh e Huang (2010) propuseram um método EEMD complementar que suaviza esse efeito, o CEEMD (do inglês, *Complementary Ensemble Empirical Mode Decomposition*). No CEEMD, ruído branco é adicionado em pares ao sinal original (um positivo e outro negativo) para gerar dois conjuntos de grupos de IMF. Nesse método, porém, não há garantia que cada agrupamento resulte no mesmo número de modos, o que dificulta o cálculo da média final. Nele também ainda há a presença de ruído residual nos modos.

Visando superar as limitações do CEEMD, um novo método foi proposto por Torres et al. (2011): o CEEMDAN (do inglês, *Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise*). O CEEMDAN adiciona um ruído particular em cada estágio e consegue uma decomposição completa sem erro de reconstrução. O algoritmo do método consiste em: gerar $x^{(i)}$ a partir do sinal original x adicionado de realizações de ruído branco ($w^{(i)}$) e então calcular o primeiro modo $\tilde{d}_1 = \bar{d}_1$ exatamente como no método EEMD. Assim, um primeiro resíduo é obtido: $r_1 = x - \tilde{d}_1$. Em seguida, o primeiro modo EMD é calculado a partir de uma combinação de r_1 adicionado de diferentes realizações de ruído. O segundo modo \tilde{d}_2 é definido pela média desses modos. O próximo resíduo será: $r_2 = r_1 - \tilde{d}_2$. O procedimento persiste até que o critério de parada seja atingido.

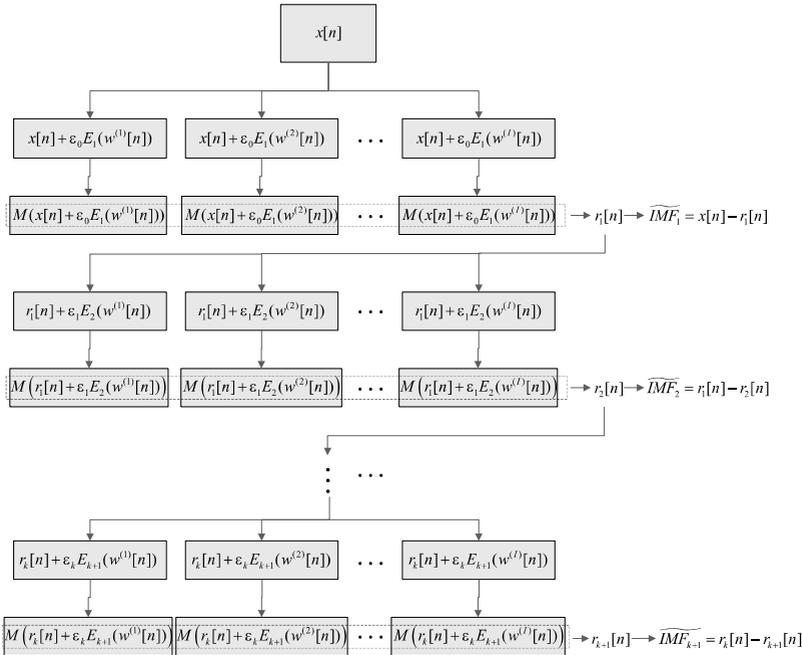
Segundo Colominas, Schlotthauer e Torres (2014), o método CEEMDAN mostrou-se superior ao EEMD, por atingir um erro desprezível na reconstrução do sinal e por solucionar o problema de diferentes quantidades de modos para diferentes valores observados do sinal com ruído branco. Entretanto, esses autores identificaram aspectos que ainda precisavam ser melhorados, como: seus modos continham ruído residual e a informação do sinal aparecia em modos de ordem maior que no EEMD, com alguns modos espúrios nos primeiros estágios da decomposição. Tendo em vista esses dois problemas, os autores propuseram um novo algoritmo para melhoramento do método CEEMDAN, cuja sequência de passos é apresentada na forma de pseudocódigo e é ilustrado na figura B.2.

O algoritmo a seguir faz uso: dos operadores $M(\cdot)$, que produz a média local do sinal a que é aplicado, e $E_k(\cdot)$, que produz o k -ésimo modo obtido por EMD; da realização do ruído com média

nula e variância unitária, $w^{(i)}$; da constante β , utilizada para ajuste da relação sinal-ruído (COLOMINAS; SCHLOTTHAUER; TORRES, 2014).

1. calcular por EMD as médias locais de I realizações $x^{(i)} = x + \beta_0 E_1(w^{(i)})$ para se obter o primeiro resíduo: $r_1 = \langle M(x^{(i)}) \rangle$;
2. no primeiro estágio, $k=1$, calcular o primeiro modo $\tilde{d}_1 = x - r_1$;
3. estimar o segundo resíduo como a média das médias locais das realizações $r_1 + \beta_1 E_2(w^{(i)})$ e definir o segundo modo: $\tilde{d}_2 = r_1 - r_2 = r_1 - \langle M(r_1 + \beta_1 E_2(w^{(i)})) \rangle$;
4. para $k = 3, \dots, K$, calcular o k -ésimo resíduo: $r_k = \langle M(r_{k-1} + \beta_{k-1} E_k(w^{(i)})) \rangle$;
5. computar o k -ésimo modo: $\tilde{d}_k = r_{k-1} - r_k$;
6. retornar ao passo 4 para o próximo k .

Figura B.2: Algoritmo do método CEEMDAN.



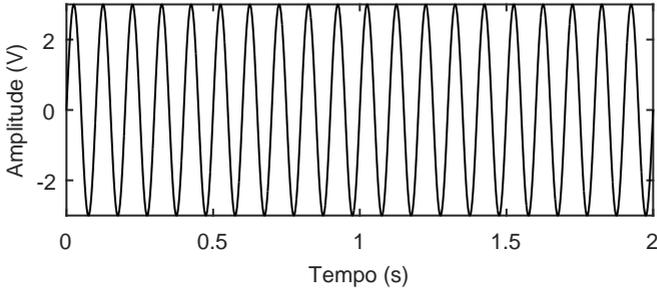
Fonte: Torres et al. (2011)

Para exemplificar a aplicação do método, são empregados os sinais representados na figura B.3. O sinal a ser analisado (figura B.3c) é a soma de outros dois: um seno puro com amplitude de 3 V e frequência de 10 Hz (figura B.3a) e um sinal que altera sua frequência com o tempo – conhecido como sinal *Chirp* – com amplitude de 1,5 V, que tem sua frequência aumentada com o tempo de (20 até 70) Hz (figura B.3b).

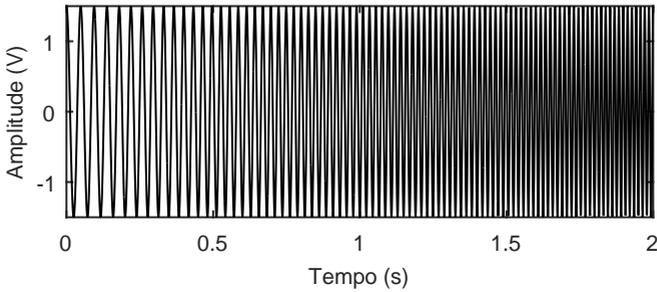
Ao se submeter o sinal representado pela figura B.3c à decomposição em modos a partir do CEEMDAN, são obtidos dez modos como resultado, dos quais os quatro que melhor representam as componentes são ilustrados na figura B.4. Pode-se perceber que o sinal original pôde ser decomposto de maneira a tornar possível a identificação de suas componentes. Ainda que tenha ocorrido uma mistura dos modos, ou seja, cada um dos dois sinais formadores foi separado em dois modos distintos, é possível identificá-los.

Figura B.3: Sinais utilizados para análise com método CEEMDAN.

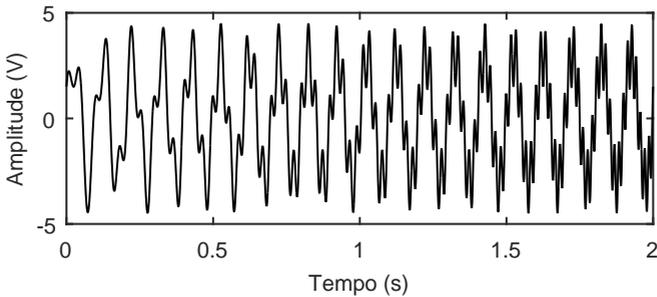
(a) Seno puro.



(b) Sinal Chirp.

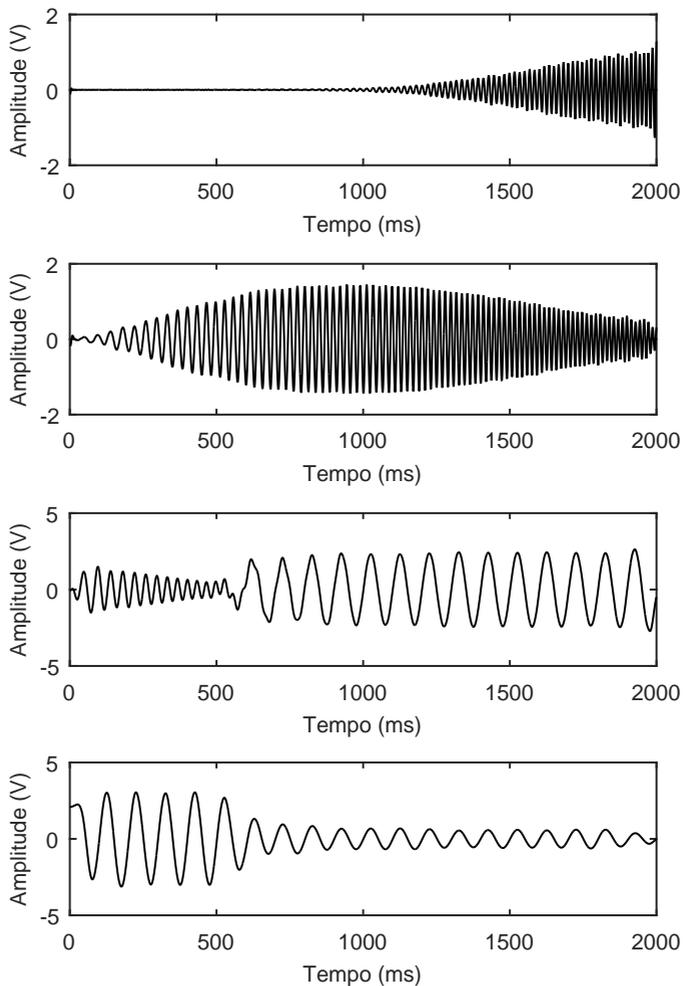


(c) Sinal resultante da soma de seno com Chirp.



Fonte: autor.

Figura B.4: Quatro modos da decomposição do sinal original pelo método CEEMDAN.



Fonte: autor.

C PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

Para compreender a necessidade e importância de garantir um sistema estanque e as consequências do vazamentos de fluido de refrigeração, deve-se entender o sistema de refrigeração quanto a sua composição e seu princípio de funcionamento.

Apesar deste projeto ser direcionado a compressores herméticos usados em sistemas de refrigeração domésticos, os princípios do ciclo de troca de calor e resfriamento apresentados correspondem também para aplicações de condicionamento de ar, armazenamento de alimentos, processos químicos industriais, construção civil, controle de processos etc. (JABARDO; STOECKER, 2002).

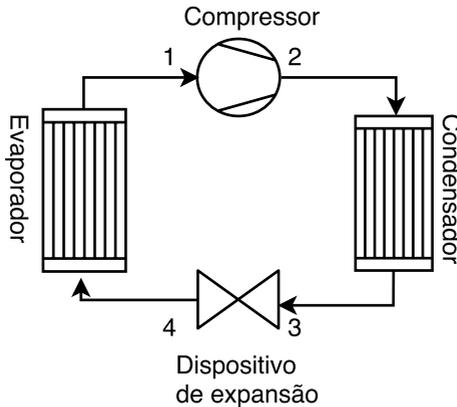
Um sistema de refrigeração pode ser compreendido como um conjunto de elementos combinados com o objetivo de transferir calor de um ambiente a outro. No caso do ciclo de refrigeração por compressão de vapor, mostrado na figura C.1, um fluido conhecido como refrigerante circula pelo sistema, passando por etapas de vaporização e condensação, retirando calor de um ambiente a baixa temperatura (POLETTI, 2006).

As principais partes do sistema são destacadas na figura C.1: o evaporador, cuja função é garantir uma superfície de transmissão de calor através da qual o calor possa passar da câmara de refrigeração (baixa temperatura) para o refrigerante em vaporização; um compressor de vapor, cuja função é eliminar o vapor do evaporador e elevar a pressão e temperatura deste a um ponto tal que ele possa ser condensado com o agente de condensação normalmente disponível; um condensador, cuja função é garantir uma superfície de transmissão de calor através da qual este passe do vapor de refrigerante superaquecido para o agente condensador; e um dispositivo de expansão, cuja função é reduzir a pressão do líquido que entra no evaporador, de modo que este vaporize à temperatura baixa conveniente (DOSSAT, 2004).

Esse ciclo de refrigeração consiste basicamente em quatro etapas principais, representadas na figura C.1 por quatro pontos enumerados (DOSSAT, 2004; MILLER; MILLER, 2011):

1. chamada de linha de sucção, o fluido vaporizado e superaquecido encontra-se com baixa pressão. Chegando ao compressor, o fluido refrigerante recebe energia pelo processo de compressão;
2. ao sair do compressor, o fluido pressurizado em alta temperatura é direcionado ao condensador. Nele, o fluido, que ao

Figura C.1: Ciclo de refrigeração por compressão de vapor.



Fonte: Adaptado de Miller e Miller (2011)

- entrar encontra-se em estado gasoso, é condensado ao longo do trocador de calor, ocorrendo a transferência de calor para o meio externo;
- o fluido refrigerante chega ao ponto 3 em estado líquido e, ainda sob alta pressão, ao dispositivo de expansão. Nesse dispositivo, ocorre uma redução brusca da pressão fazendo com que o fluido chegue ao evaporador a baixa pressão;
 - na sequência, o fluido que adentra o evaporador absorve calor do meio e se vaporiza a medida que passa pelo trocador de calor. Finalmente, o refrigerante retorna para o compressor e o ciclo é repetido continuamente.

D TESTES DE TUKEY DOS COMPRESSORES #2 E #3

Tabela D.1: Resultados do teste de Tukey com nível de confiança de 95% para o compressor #2 (técnica US passiva).

Fator	Nº de amostras	Tensão (V)	Grupos
R6	10	$1,17 \cdot 10^{-4}$	A
R1	10	$0,94 \cdot 10^{-4}$	B
R2	10	$0,93 \cdot 10^{-4}$	B
R3	10	$0,89 \cdot 10^{-4}$	B C
R0	10	$0,84 \cdot 10^{-4}$	B C D
R4	10	$0,82 \cdot 10^{-4}$	B C D E
R5	10	$0,77 \cdot 10^{-4}$	C D E F
6	10	$0,73 \cdot 10^{-4}$	D E F G
3	10	$0,71 \cdot 10^{-4}$	D E F G
2	10	$0,71 \cdot 10^{-4}$	D E F G
R8	10	$0,70 \cdot 10^{-4}$	D E F G
1	10	$0,69 \cdot 10^{-4}$	E F G
R11	10	$0,69 \cdot 10^{-4}$	E F G
R7	10	$0,68 \cdot 10^{-4}$	E F G
4	10	$0,68 \cdot 10^{-4}$	E F G
5	10	$0,67 \cdot 10^{-4}$	F G
R9	10	$0,67 \cdot 10^{-4}$	F G
R10	10	$0,66 \cdot 10^{-4}$	F G
2C0	10	$0,63 \cdot 10^{-4}$	F G
11	10	$0,63 \cdot 10^{-4}$	F G
7	10	$0,61 \cdot 10^{-4}$	G
8	10	$0,61 \cdot 10^{-4}$	G
9	10	$0,6 \cdot 10^{-4}$	G
10	10	$0,59 \cdot 10^{-4}$	G

Fonte: autor.

Tabela D.2: Resultados do teste de Tukey com nível de confiança de 95% para o compressor #3 (técnica US passiva).

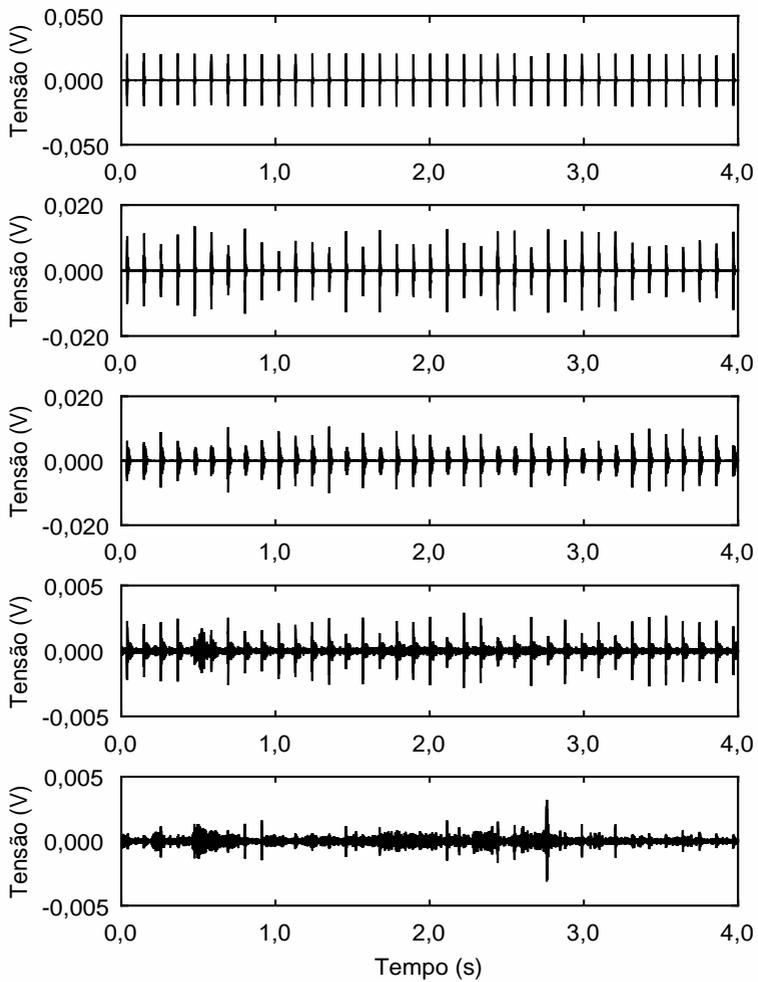
Fator	Nº de amostras	Tensão (V)	Grupos
R6	10	$1,17 \cdot 10^{-4}$	A
2	10	$1,01 \cdot 10^{-4}$	B
1	10	$0,96 \cdot 10^{-4}$	B C
6	10	$0,96 \cdot 10^{-4}$	B C
3	10	$0,95 \cdot 10^{-4}$	B C D
R1	10	$0,94 \cdot 10^{-4}$	B C D E
R2	10	$0,93 \cdot 10^{-4}$	B C D E
R3	10	$0,89 \cdot 10^{-4}$	B C D E F
0	10	$0,88 \cdot 10^{-4}$	B C D E F
4	10	$0,85 \cdot 10^{-4}$	C D E F G
R0	10	$0,84 \cdot 10^{-4}$	C D E F G H
R4	10	$0,82 \cdot 10^{-4}$	D E F G H I
5	10	$0,81 \cdot 10^{-4}$	E F G H I J
R5	10	$0,77 \cdot 10^{-4}$	F G H I J K
10	10	$0,76 \cdot 10^{-4}$	F G H I J K
9	10	$0,71 \cdot 10^{-4}$	G H I J K L
11	10	$0,71 \cdot 10^{-4}$	G H I J K L
R8	10	$0,70 \cdot 10^{-4}$	H I J K L
R11	10	$0,69 \cdot 10^{-4}$	I J K L
R7	10	$0,68 \cdot 10^{-4}$	I J K L
7	10	$0,67 \cdot 10^{-4}$	J K L
R9	10	$0,67 \cdot 10^{-4}$	J K L
R10	10	$0,66 \cdot 10^{-4}$	K L
8	10	$0,60 \cdot 10^{-4}$	L

Fonte: autor.

E MODOS DECOMPOSTOS COM O MÉTODO CEEMDAN

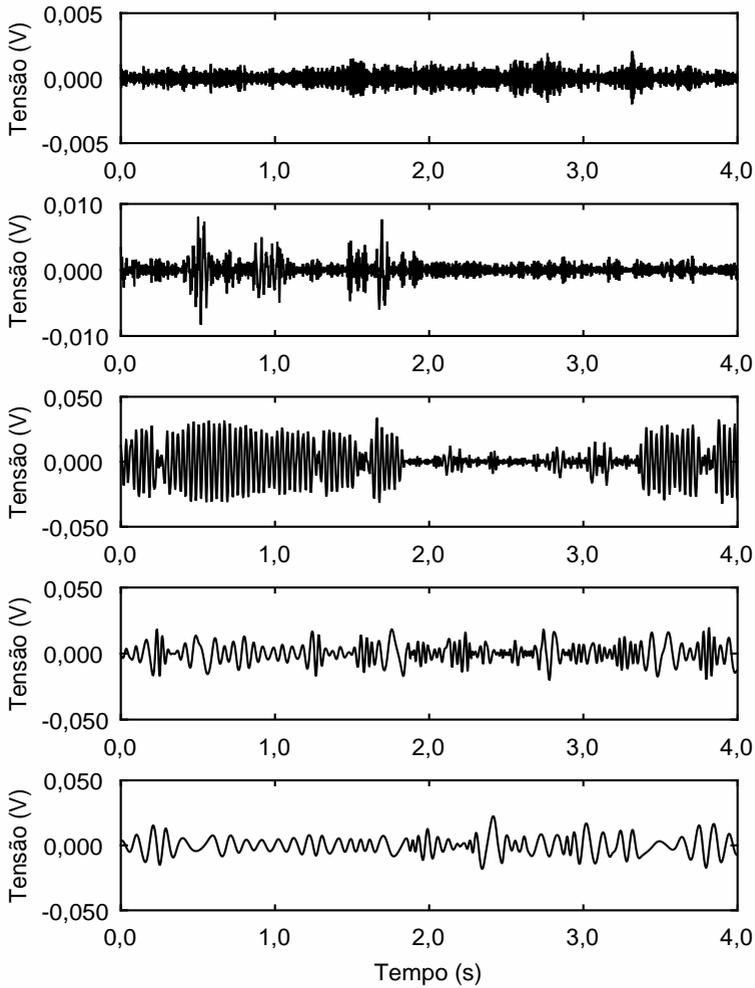
E.1 MODOS – COMPRESSOR #2 EM LABORATÓRIO

Figura E.1: Modos 1, 2, 3, 4 e 5 – compressor #2 – laboratório.



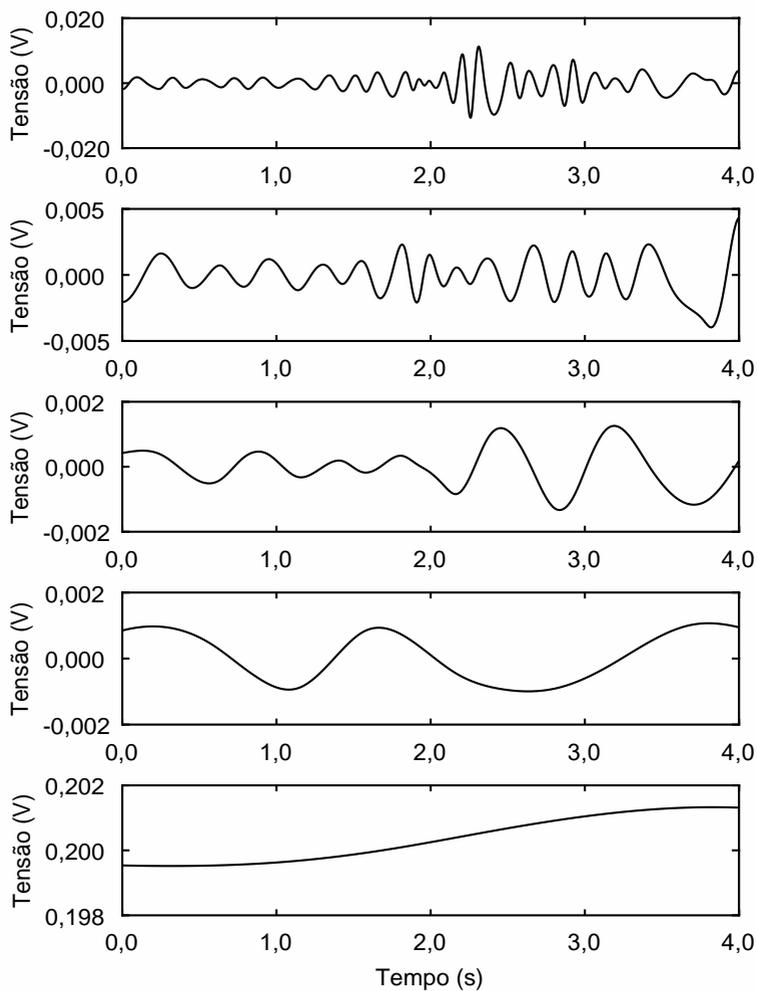
Fonte: Autor.

Figura E.2: Modos 6, 7, 8, 9 e 10 – compressor #2 – laboratório.



Fonte: Autor.

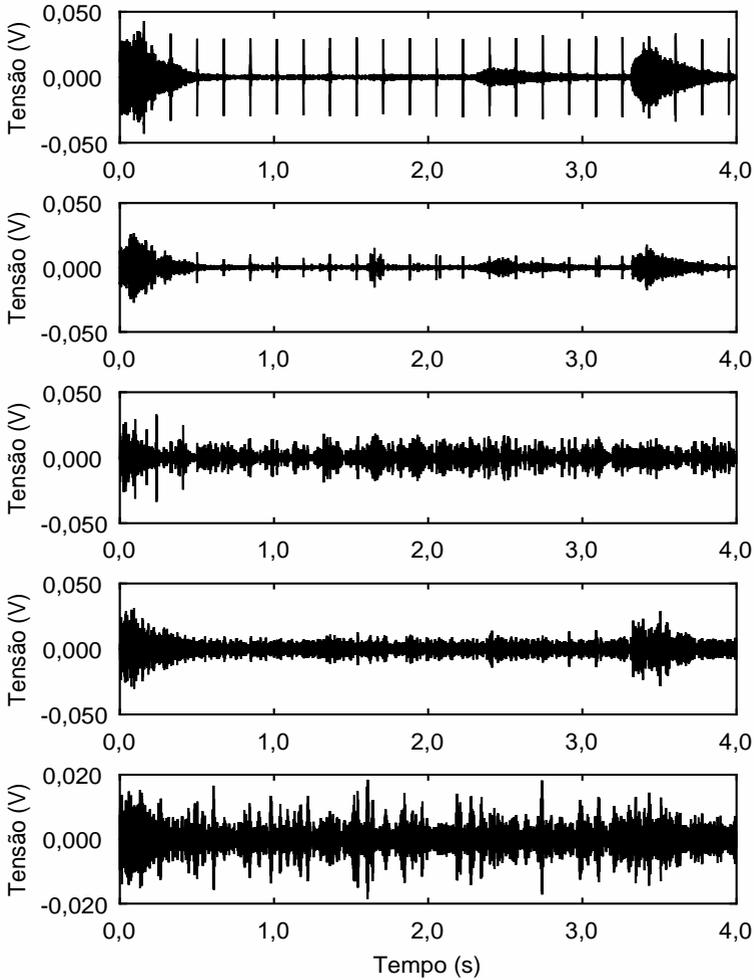
Figura E.3: Modos 11, 12, 13, 14 e 15 – compressor #2 – laboratório.



Fonte: Autor.

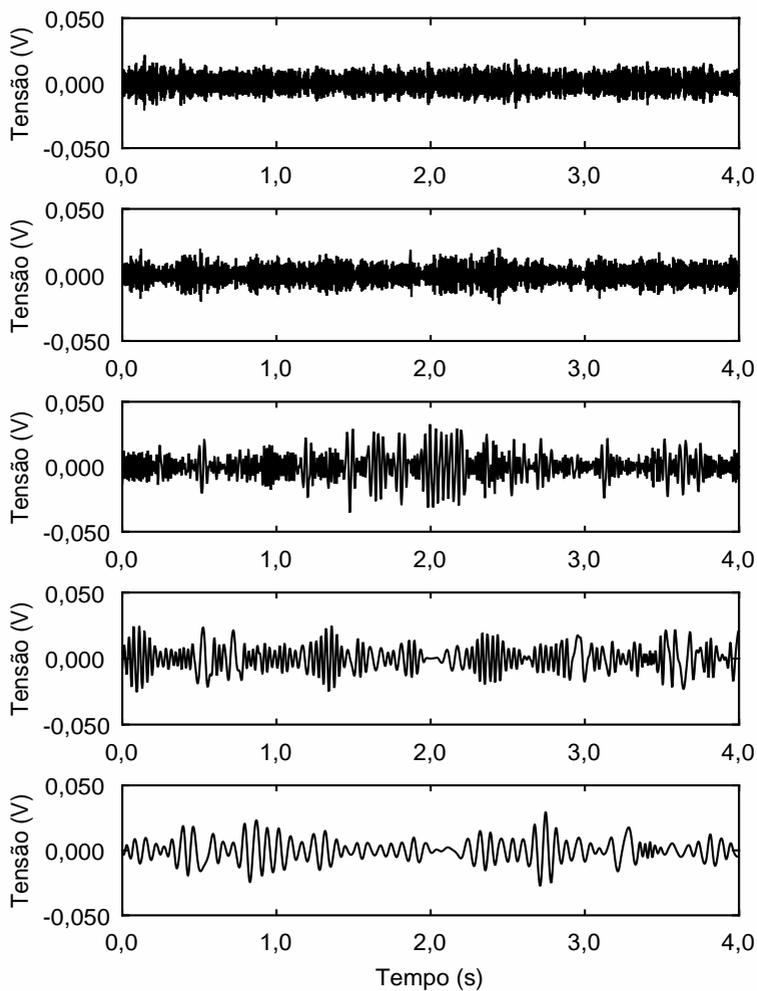
E.2 MODOS – COMPRESSOR #2 EM FÁBRICA

Figura E.4: Modos 1, 2, 3, 4 e 5 – compressor #2 – fábrica.



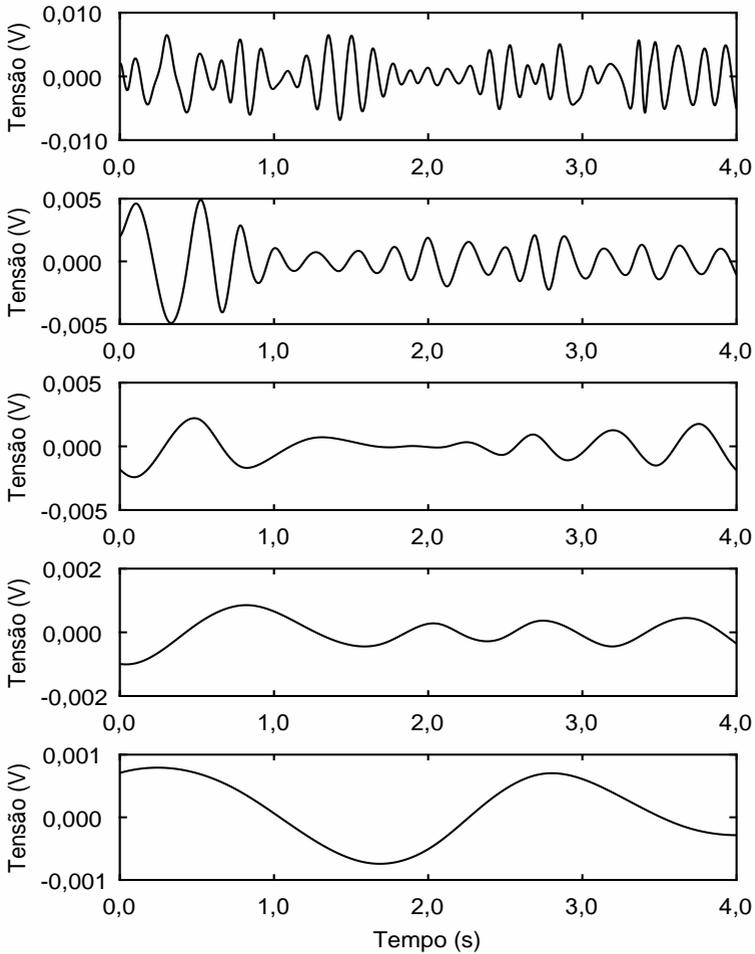
Fonte: Autor.

Figura E.5: Modos 6, 7, 8, 9 e 10 – compressor #2 – fábrica.



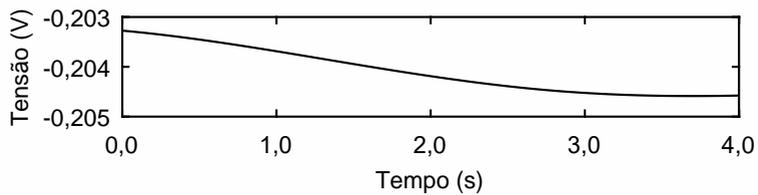
Fonte: Autor.

Figura E.6: Modos 11, 12, 13, 14 e 15 – compressor #2 – fábrica.



Fonte: Autor.

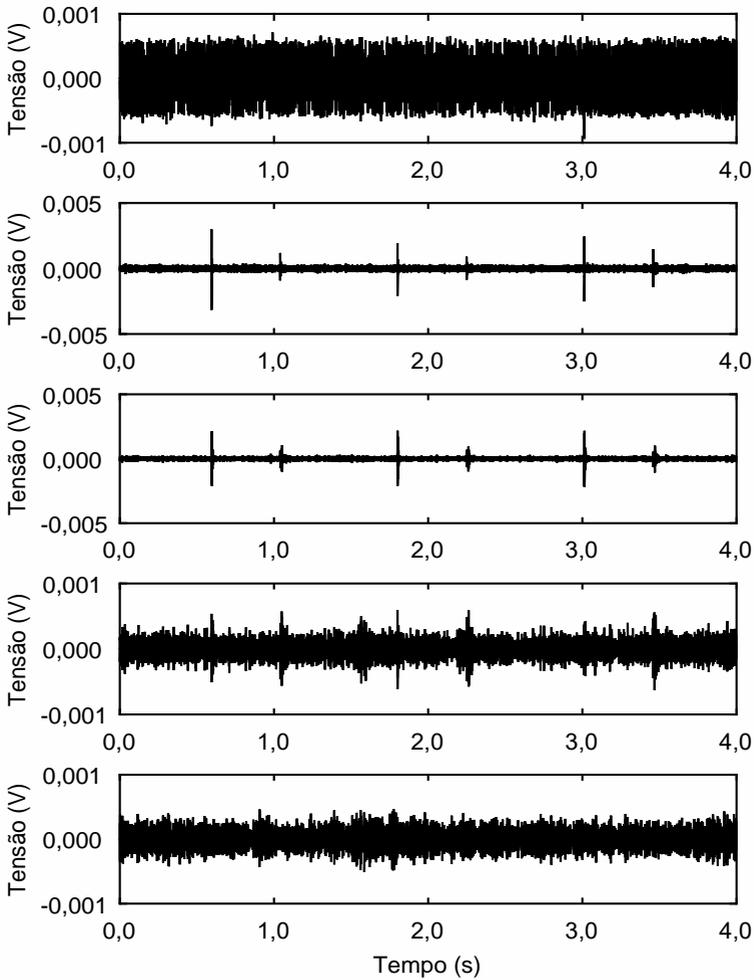
Figura E.7: Modo 16 – compressor #2 – fábrica.



Fonte: Autor.

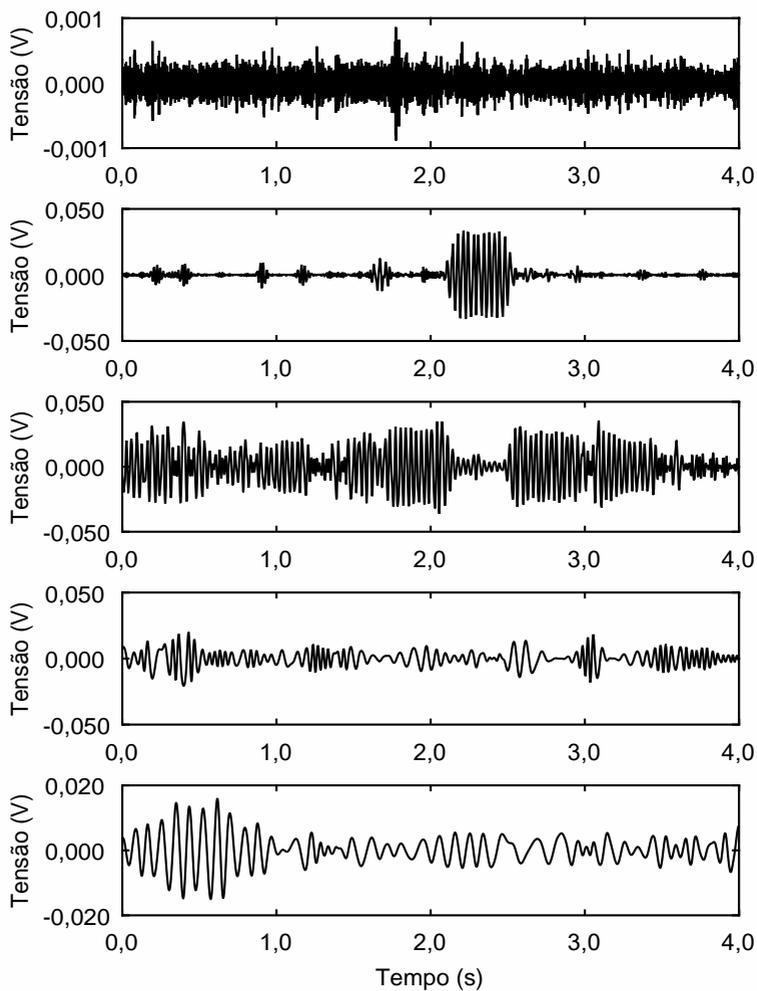
E.3 MODOS – COMPRESSOR #3 EM LABORATÓRIO

Figura E.8: Modos 1, 2, 3, 4 e 5 – compressor #3 – laboratório.



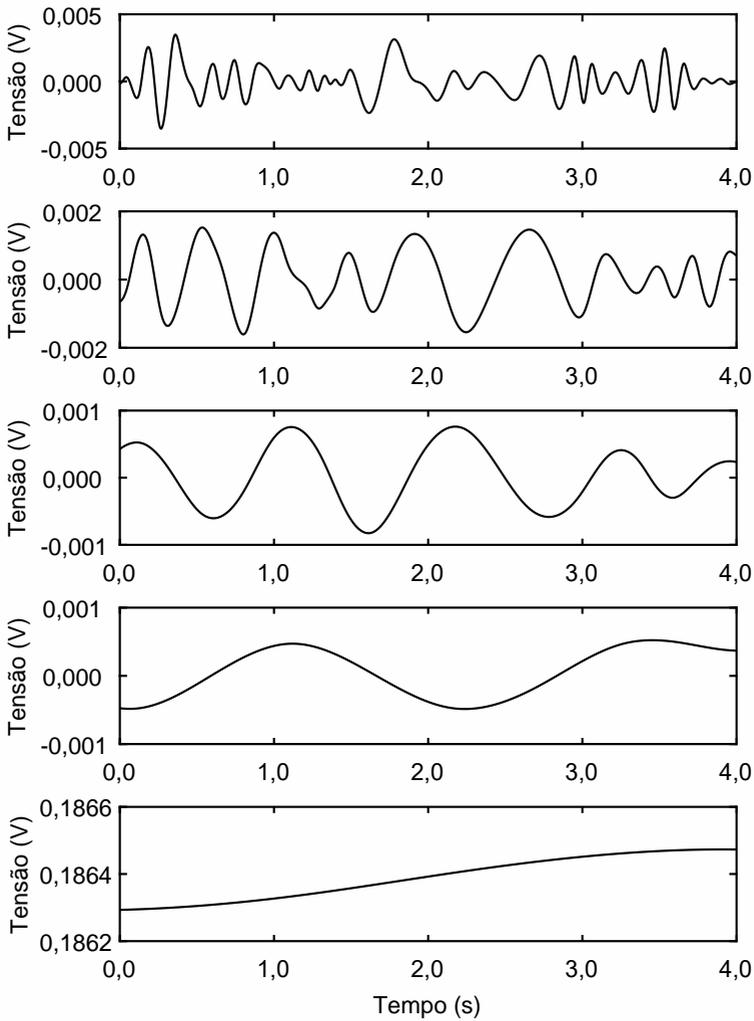
Fonte: Autor.

Figura E.9: Modos 6, 7, 8, 9 e 10 – compressor #3 – laboratório.



Fonte: Autor.

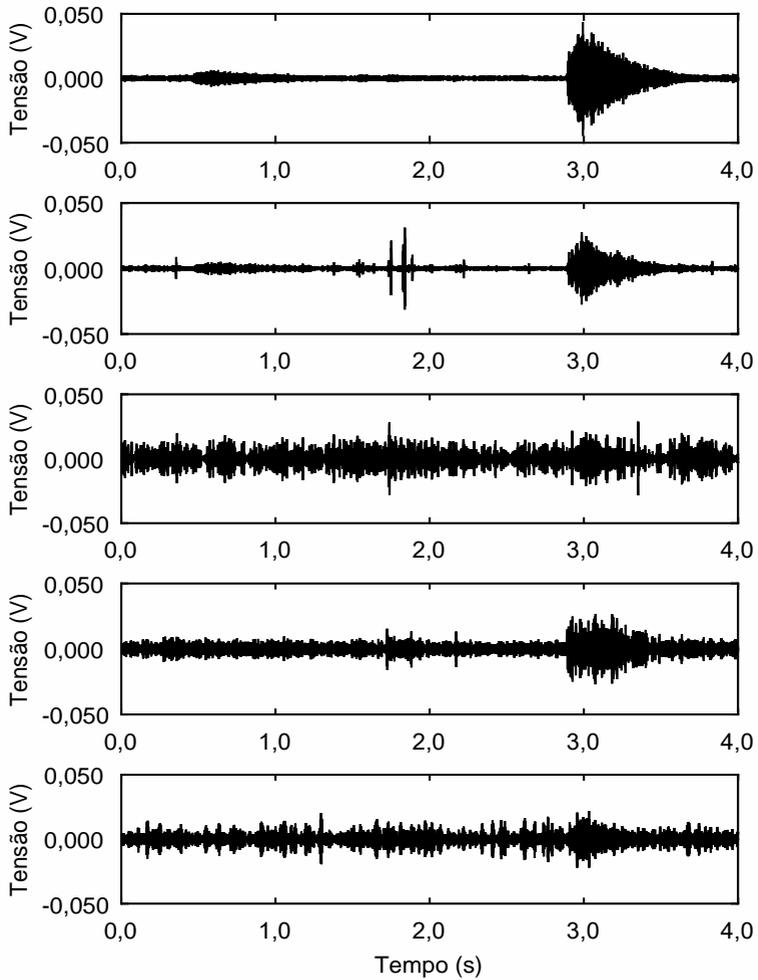
Figura E.10: Modos 11, 12, 13, 14 e 15 – compressor #3 – laboratório.



Fonte: Autor.

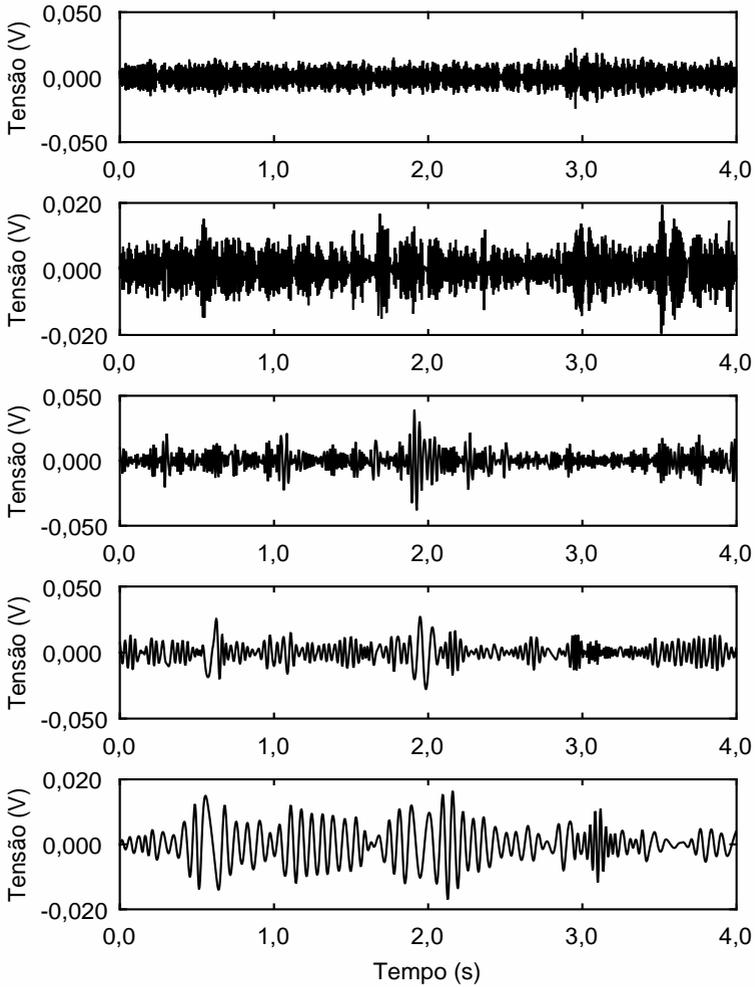
E.4 MODOS – COMPRESSOR #3 EM FÁBRICA

Figura E.11: Modos 1, 2, 3, 4 e 5 – compressor #3 – fábrica.



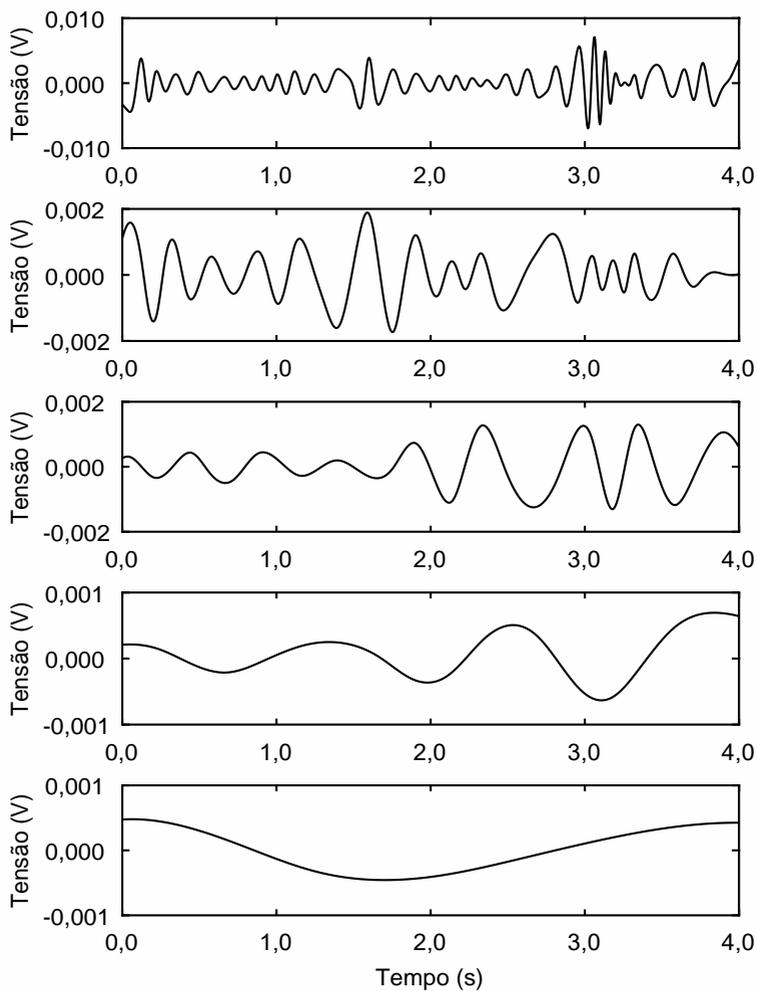
Fonte: Autor.

Figura E.12: Modos 6, 7, 8, 9 e 10 – compressor #3 – fábrica.



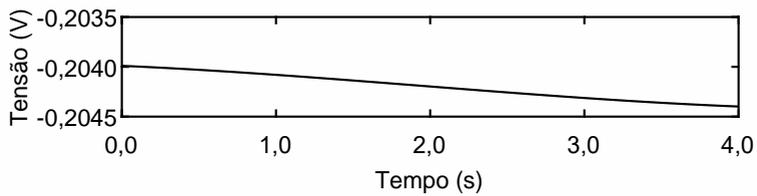
Fonte: Autor.

Figura E.13: Modos 11, 12, 13, 14 e 15 – compressor #3 – fábrica.



Fonte: Autor.

Figura E.14: Modo 16 – compressor #3 – fábrica.



Fonte: Autor.