

LUCAS ALTAMIRANDO DE ANDRADE DA ROCHA

**IDENTIFICAÇÃO DE DANO EM ESTRUTURAS UTILIZANDO
UMA METODOLOGIA QUE INTEGRA A TÉCNICA DA
IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA E ONDAS DE LAMB**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2017

LUCAS ALTAMIRANDO DE ANDRADE DA ROCHA

**IDENTIFICAÇÃO DE DANO EM ESTRUTURAS UTILIZANDO
UMA METODOLOGIA QUE INTEGRA A TÉCNICA DA
IMPEDÂNCIA ELETROMECHANICA E ONDAS DE LAMB**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos e Vibrações

Orientador: Prof. Dr. Valder Steffen Jr.

Co-orientador: Prof. Dr. Roberto Mendes Finzi Neto

UBERLÂNDIA – MG

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

L933i
2017

Rocha, Lucas Altamirando de Andrade da, 1984-
Identificação de dano em estruturas utilizando uma metodologia que
integra a técnica da impedância eletromecânica e ondas de Lamb / Lucas
Altamirando de Andrade da Rocha. - 2017.
109 f. : il.

Orientador: Valder Steffen Junior.

Coorientador: Roberto Mendes Finzi Neto.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Monitoramento da integridade
estrutural - Teses. 3. Falha de sistema (Engenharia) - Teses. 4. - Teses. I.
Steffen Junior, Valder. II. Finzi Neto, Roberto Mendes. III. Universidade
Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica. IV. Título.

CDU: 621

LUCAS ALTAMIRANDO DE ANDRADE DA ROCHA

**IDENTIFICAÇÃO DE DANO EM ESTRUTURAS UTILIZANDO
UMA METODOLOGIA QUE INTEGRA A TÉCNICA DA
IMPEDÂNCIA ELETROMECHANICA E ONDAS DE LAMB**

Tese **APROVADA** pelo Programa de
Pós-graduação em Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Uberlândia

Área de Concentração: Mecânica dos
Sólidos e Vibrações

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Valder Steffen Jr – UFU – Orientador

Prof. Dr. Roberto Mendes Finzi Neto – UFU – Co-Orientador

Prof. Dr. Aldemir Aparecido Cavalini Jr. – UFU

Prof. Dr. Leonardo Sanches – UFU

Prof. Dr. Romes Antônio Borges – UFG

Prof. Dr. Gilberto Pechoto de Melo – UNESP

Uberlândia, 3 de Abril de 2017

*“O mal triunfa quando os homens
de bem nada fazem...”*

AGRADECIMENTOS

À Deus, por tudo que aconteceu e ainda pelo o que está por vir.

Ao professor, orientador Valder Steffen Jr., pelo exemplo de pesquisador e por todo o auxílio neste trabalho. Ao meu co-orientador Roberto Mendes Finzi Neto, por me transmitir seu conhecimento, confiar e acreditar em minhas capacidades.

Aos meus pais e familiares por permitirem que eu me dedicasse muitas vezes ao estudo de forma descompromissada com os outros setores da vida, me apoiando sempre.

À minha querida noiva Larissa Silva Soares pelo companheirismo, tolerância, dedicação e amor. Aos amigos da mecânica: Karina, Thiago, Diogo e vários outros nomes que não cabem aqui, mas não menos importantes.

Aos professores e funcionários da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) pelo apoio.

Agradeço ao apoio do INCT- LMEst de Estruturas Inteligentes, apoiado pela CAPES e pelo CNPq, que forneceu o contexto científico dentro do qual este trabalho foi realizado

ROCHA, L. A. A. **Identificação de Dano em Estruturas Utilizando uma Metodologia que Integra a Técnica da Impedância Eletromecânica e Ondas de Lamb**. 2017. 109p. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RESUMO

O presente trabalho é dedicado ao monitoramento de saúde estrutural (SHM), ou seja, o desenvolvimento de um procedimento que interroga uma estrutura para detectar, localizar e identificar danos. Em nossos dias, SHM representa uma das principais áreas de interesse em engenharia, sendo aplicado tanto para a redução do custo de manutenção quanto em segurança operacional. Nesta tese foi realizado o diagnóstico de falhas de um painel de material típico da indústria aeronáutica, através da integração de duas técnicas SHM, a saber, a técnica de impedância eletromecânica e as ondas de Lamb. Para o diagnóstico, foram utilizadas as métricas de dano extraídas das assinaturas de impedância da estrutura em conjunto com um algoritmo para a localização do dano considerando as ondas de Lamb. Técnicas de compensação de temperatura foram sistematicamente para evitar diagnósticos falsos. Um modelo estatístico foi desenvolvido para estabelecer índices de *threshold* de acordo com um nível de confiança predefinido. Assim, este trabalho apresenta uma avaliação da sensibilidade das técnicas propostas, considerando uma taxa de sucesso. Para assegurar a integração das duas técnicas SHM visando aplicações aeronáuticas, foi projetado um *hardware* dedicado, de modo que sua arquitetura permita a integração cooperativa das duas técnicas SHM utilizadas. Finalmente, os resultados obtidos demonstram o grande potencial da integração das duas técnicas propostas em conjunto com o *hardware* desenvolvido as metodologias matemáticas e computacionais.

Palavras chave: Monitoramento da Integridade Estrutural, Impedância Eletromecânica, Ondas de Lamb, Compensação da Temperatura, Diagnostico de Falha.

ROCHA, L. A. A. **Structural Damage Identification Using a Methodology that integrates the Electromechanical Impedance technique and Lamb Waves**. 2017. 109p. Thesis, Federal University of Uberlândia, Uberlândia.

SUMMARY

The present work is dedicated to the monitoring of structural health (SHM), that is the development of a procedure that interrogates a structure to detect, locate and identify damages. Today, SHM represents one of the main areas of interest in engineering and it is applied for both maintenance cost reduction and operational safety. In this thesis was performed the fault diagnosis of a panel of material typical of the aeronautical industry, through the integration of two SHM techniques, namely the electromechanical impedance technique and Lamb waves. For the diagnosis, the damage metrics extracted from the impedance signatures of the structure were used together with an algorithm for the location of the damage considering Lamb waves. Temperature compensation techniques were systematically to avoid false diagnoses. A statistical model was developed to establish threshold indices according to a predefined confidence level. Thus, this work presents an evaluation of the sensitivity of the proposed techniques, considering a success rate. To ensure the integration of the two SHM techniques for aeronautical applications, a dedicated hardware was designed so that its architecture allows the cooperative integration of the two SHM techniques used. Finally, the obtained results demonstrate the great potential of the integration of the two techniques proposed in conjunction with the hardware developed the mathematical and computational methodologies.

Key words: Structural Integrity Monitoring, Electromechanical Impedance, Lamb Waves, Temperature Compensation, Fault Diagnosis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Histórico de trabalhos sobre SHM no âmbito da FEMEC-UFU.....	5
Figura 2.1: Perda de parte da fuselagem do avião da Aloha Airline, em 1988 (RABELO, 2014).....	9
Figura 3.1: Modelo unidimensional do acoplamento eletromecânico utilizado pelo método baseado na impedância eletromecânica (LIANG; SUN; ROGER, 1994).	19
Figura 3.2: Assinaturas de impedância em função da temperatura (RABELO, 2014).	24
Figura 3.3: Principais técnicas para o diagnóstico por ondas de Lamb (RAGHAVAN; CESNIK 2005).	28
Figura 3.4: Um procedimento de análise de wavelets para extrair uma característica sensível a danos (RAGHAVAN; CESNIK 2005).....	29
Figura 3.5: Efeito da variação de temperatura nas ondas de Lamb.	32
Figura 4.1: Diagrama funcional do sistema de SHM proposto.....	39
Figura 4.2: <i>Hardware</i> desenvolvido.....	40
Figura 4.3: Arquitetura do sistema proposto.	41
Figura 4.4: Fluxograma do software do sistema.....	43
Figura 4.5: Fluxograma de controle do <i>hardware</i> do protótipo proposto.....	44
Figura 4.6: Fluxograma para aquisição da impedância e seleção de frequências.	45
Figura 4.7: Fluxograma para localização do dano.....	47
Figura 4.8: Reflexão de onda.	49
Figura 4.9: $x^*(V)$ vs $y^*(V)$ para $N_{Leituras}$	50
Figura 4.10: x^* vs y^* para médias.	52
Figura 5.1: Corpo de prova instrumentado.....	58
Figura 5.2: Estrutura de material aeronáutico instrumentada.	60
Figura 5.3: (a) Equipamento de geração e aquisição de sinal; (b) Câmara climática EPL-4H.	60
Figura 5.4: Corpo de prova na situação livre-livre no interior da câmara climática.	61
Figura 5.5: Conector intermediário com baixa rigidez.	61
Figura 5.6: Estrutura sem dano.....	64
Figura 5.7: Curvas de impedância da pré-análise sem dano: (a) assinatura sem compensação, (b) assinaturas compensadas.	65
Figura 5.8: Valores de CCD na pré-análise na condição não compensados e compensados para a condição sem dano.....	66
Figura 5.9: Estrutura com dano aleatório.	67
Figura 5.10: Valores de CCD na pré-análise para as condições sem e com compensação, condição de dano aleatório.	67
Figura 5.11: Curvas de impedância da análise completa com dano aleatório.	68
Figura 5.12: Valores de CCD na análise completa para as condições com e sem compensação de temperatura, para a condição com dano aleatório.	69
Figura 5.13: Exemplo de coleta de sinais de ondas de Lamb.	70
Figura 5.14: Determinação do TOF do PZT #2.	71
Figura 5.15: Resultado da função objetivo para $N_{Leituras}$ com dano aleatório.	72
Figura 5.16: x^* vs y^* e a localização do dano.....	73

Figura 5.17: Resultado da localização do dano após tratamento estatístico.	75
Figura 5.18: Estrutura com dano em 48 posições diferentes.	76
Figura 5.19: Resultado da localização estimada das 48 posições de dano.	77
Figura 5.20: Estrutura com dano em 12 posições diferentes.	79
Figura 5.21: Resultado CCD das 12 posições de dano por PZT na temperatura de -25°C.	80
Figura 5.22: Resultado estimado da localização das 12 posições de dano na temperatura de -25°C.	80
Figura 5.23: Resultado da métrica CCD das 12 posições de dano por sensor de PZT na temperatura de +5°C.	81
Figura 5.24: Resultado estimado da localização das 12 posições de dano na temperatura de +5°C.	81
Figura 5.25: Resultado da métrica CCD das 12 posições de dano por sensor de PZT na temperatura de +35°C.	82
Figura 5.26: Resultado estimado da localização das 12 posições de dano na temperatura de +35°C.	82
Figura 5.27: Resultado da métrica CCD das 12 posições de dano por sensor de PZT na temperatura de +65°C.	83
Figura 5.28: Resultado estimado da localização das 12 posições de dano na temperatura de +65°C.	83

LISTA DE TABELA

Tabela 5.1: Seleção de frequências para o dano aleatório.....	70
Tabela 5.2: Resultados do Teste de Normalidade para a Técnica das Ondas de Lamb.	74
Tabela 5.3: Erro relativo para as 48 posições de dano.	77
Tabela 5.4: Erro estimado percentual para grande variação de temperatura.	84

Lista de símbolos

A'	Constante relacionada à influência da temperatura
B	Susceptância
C	Capacitância
$CC_{Z_1Z_2}$	Coeficiente de correlação
D	Matriz dicionário
d_{\max}	Valor médio da amostra
d_{3x}	Constante geométrica
F	Função objetivo
F_{exc}	Frequências de excitação no PZT
f	Frequência
G	Condutância
I	Corrente
k	Constante de propagação de onda
k_t	Curtose (kurtosis).
L	Indutância
$Re(Z_{i,1})$	Impedância para condições saudáveis
$Re(Z_{i,2})$	Impedância para situação investigada
$Re(\overline{Z_1})$	Impedância da Medição Baseline
$RE(\overline{Z_2})$	Impedância para nova Configuração da Estrutura
$Re(Z_{corr,i})$	Impedância corrigida
$Re(Z_{i\pm\Delta f,2})$	Impedância deslocada
R_{shunt}	Resistor <i>shunt</i>
RX	Plano de valores complexos
R e θ	Variáveis de projeto (raio e ângulo)
S	Desvio padrão das amostras

s^2	Variância da amostra
$S_a(t)$	Sinal atual à temperatura T_a
$S_b(t)$	Sinal referente da <i>baseline</i> à temperatura T_b
$\hat{S}_b(t)$	Transformada de Hilbert da <i>baseline</i>
$\tilde{S}_b(t)$	Sinal após a compensação de fase instantânea
$\bar{S}_b(t)$	Norma unitária ℓ_2 de $\tilde{S}_b(t)$.
$\bar{S}_b(t)^\oplus$	Pseudo-inversa de <i>Moore-Penrose</i> de $\bar{S}_b(t)$
S_k	Simetria da distribuição de probabilidade (skewness),
$S_r(t)$	Sinal de referência na temperatura T_r
$S_{\text{ta}}(t)$	Sinal Lamb compensado
S_0, S_1 e S_2	Sinais de ondas de Lamb nas temperaturas T_0, T_1 e T_2
T_a	Temperatura atual
T_b	Temperatura <i>baseline</i>
T_r	Temperatura referência
$t_{v;\alpha/2}$	Variável t de <i>Student</i>
V	Velocidade de propagação da onda de Lamb
V_L	Velocidade de propagação longitudinal
V_T	Velocidade de propagação transversal
V_{ex}	Tensão de excitação do PZT
$V_{R\text{shunt}}$	Tensão no resistor <i>shunt</i>
X_C	Reatância capacitiva
X_L	Reatância indutiva
$x_{(t)}$	Sinal da onda de Lamb
$x_{(\lambda t)}$	Sinal da onda de Lamb alongamento no tempo
\bar{x}	Média das amostras,
x^* e y^*	Coordenadas cartesianas

Y	Admitância
Y_A	Parte ativa da admitância
Y_P	Parte passiva da admitância
Y_{xx}^E	Constante de acoplamento piezoelétrico
Z	Impedância
$Z_a(\omega)$	Impedância mecânica complexa do atuador
$Z_{\alpha/2}$	Variável padronizada
$Z(\omega)$	Impedância mecânica da estrutura
α	Significância
β	Coefficiente de representação
Δf	Fator de deslocamento horizontal de correção de impedâncias
δ	Fator de Perda Dielétrica do PZT
$\bar{\epsilon}_{33}^T$	Módulo de Young
λ	Constante tempo-estiramento
$\mu_{X_{MAX}}$	Limite superior para a média da população
μ_x e σ_x	Média da população e o desvio padrão, respectivamente
$\sigma_{X_{MAX}}$	Limite superior para o desvio padrão da população
σ_x^2	Variância
v	Número de DOF
ϕ	Fase do sinal
$\phi_B(t)$	Mudança de fase relacionada à linha de base
$\phi_{PZT\#i}$	Raio do PZT #i, com $i = 1, \dots, 5$.
$\chi_{v;\alpha/2}^2$	Variável Qui-Quadrado
ω	Frequência angular
$2h$	Espessura de placa infinita

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AD	Analógico para Digital
ADCS	Comutadores analógicos controlados digitalmente
BTHC	Controle de temperatura e umidade equilibrado
CCD	Desvio do Coeficiente de Correlação
CCDM	Correlação Desvio do Coeficiente Métrico
CWT	Transformada <i>Wavelet</i> Contínua
DA	Digital para Analógico
EFS	Mudança de frequência efetiva
FFT	Transformada rápida de Fourier
FIR	Resposta ao impulso finito
FRF	Funções de resposta em frequência
HSVF	Corrente de tensão de alta Velocidade
IIG	Impedância integrada e onda guiada
ISHM	Impedância Eletromecânica
JB	<i>Jarque-Bera</i>
LCI	Limite de Controle Inferior
LCS	Limite de Controle Superior
LMEst	Laboratório de Mecânica de Estruturas – Prof. José Eduardo Tannús Reis.
LW	<i>Lamb Wave</i>
LWSHM	<i>Lamb Wave</i> - Monitoramento da Saúde Estrutural
MAPD	Desvio Médio Percentual Absoluto
NDE	Avaliação Não Destrutiva
OMP	Combinação ortogonal
PZT	Piezoelétrico
RMSD	Desvio quadrático médio da raiz
SHM	Monitoramento da Saúde Estrutural
SPC	Limite de Controle Superior
SS	Sistema de comutação
TOF	Tempo de voo

SUMÁRIO

CAPITULO I - INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	6
1.2. Estrutura da Tese	6
CAPITULO II - ESTADO DA ARTE DO MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL	8
2.1 Conceitos básicos	8
2.1.1. Monitoramento de Integridade Estrutural	10
2.1.2. Prognóstico de dano	11
2.2. Revisão da literatura	12
CAPITULO III - IMPEDÂNCIA ELETROMECAÂNICA E ONDAS DE LAMB	16
3.1. Metodologia de SHM Baseada na Impedância Eletromecânica	16
3.1.1. Índice de danos utilizando Impedância eletromecânica	22
3.1.2. Efeitos da Temperatura na Impedância	23
3.1.3. Compensação de temperatura: Mudança de frequência efetiva (EFS)	25
3.2. Metodologia de SHM Baseada em Ondas de Lamb	26
3.2.1. Índice de Dano e localização de dano	30
3.2.2. Efeito da variação da temperatura nas ondas de Lamb	31
3.2.3. Métodos de compensação da temperatura	33
CAPITULO IV - DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO	37
4.1. Introdução	37
4.2. Protótipo Proposto	38
4.3. Hardware	40
4.4. Software	42
4.4.1 Controlador	43
4.4.2 Localização do dano	46
4.4.3 Análise estatística de dados e taxa de ocorrências	53
CAPITULO V - EXPERIMENTOS E RESULTADOS	57
5.1. Configuração e Abordagem Experimental	57

5.2. Testes Experimentais	62
5.2.1. <i>Banco de dados das baselines</i>	62
5.2.2. <i>Temperatura estável em 25°C com e sem dano</i>	63
5.2.3. <i>Temperatura variável com dano</i>	78
CAPITULO VI - CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	86
6.1. Conclusões sobre o Trabalho	86
6.2. Perspectivas Futuras	90
CAPITULO VII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
ANEXO A	101

CAPITULO I

INTRODUÇÃO

Nossa sociedade tem fortemente demandado por soluções inovadoras em engenharia aeroespacial, na construção civil, em sistemas de exploração de petróleo e nas estruturas mecânicas e mecatrônicas em geral, muitas vezes caracterizadas pela crescente necessidade de detectar danos estruturais ainda em sua fase mais precoce possível. A estratégia de Monitoramento da Integridade Estrutural (*Structural Health Monitoring* – SHM) e as técnicas de Avaliação Não Destrutiva (*Non-destructive Evaluation* – NDE) são foco importante de vários trabalhos de investigação científica ao longo dos últimos vinte anos. As futuras tecnologias de SHM tendem a ser autônomas, operando em tempo real e os principais objetivos destas novas tecnologias têm a ver com segurança estrutural e redução de custos de manutenção, através da substituição da manutenção preditiva tradicional pela manutenção baseada na demanda (ou seja, no comportamento dinâmico da estrutura conforme informado pela técnica de monitoramento).

Especialmente no contexto da indústria aeroespacial, ao se considerar o envelhecimento das aeronaves combinado com as atualizações para continuar em operação (maior capacidade de carga e instalação de novos equipamentos, por exemplo), tudo isso motiva o desenvolvimento de técnicas de SHM. Deve-se ainda salientar a tendência do aumento da utilização de materiais compostos em vários dos componentes de aeronaves, justificando a instalação de sistemas de monitoramento dedicados à detecção de delaminações e descolamentos, sendo estes defeitos

típicos que aparecem em estruturas de materiais compostos. Além disso, surgem vantagens econômicas adicionais ao escolher o local e o momento mais adequados para realizar a manutenção (sistemas tolerantes ao dano, prognóstico de falha). Uma variedade de tipos de danos merece destaque ao se considerar o estado da arte atual, tais como: corrosão, trincas e perda de rebites em componentes metálicos e, conforme comentado acima, delaminação e descolamento para o caso de componentes construídos em materiais compostos. Para aeronaves comerciais, trincas de fadiga que se formam em torno de rebites ao longo da fuselagem são exemplos de locais onde o esforço de monitoramento deve ser concentrado. Uma vez estabelecida a metodologia de SHM, o processo completo geralmente inclui as seguintes etapas: avaliação operacional para aquisição de dados, seleção de atributos e, finalmente, análise estatística para tomada de decisão (FARRAR; LIEVEN; BENENT, 2005).

Ao ser implantado, o sistema de SHM lidará com estruturas que experimentam mudanças nas condições operacionais e ambientais. Estas mudanças influenciam na resposta medida e é fundamental que não sejam interpretadas como indícios de danos (falsos positivos). A variação da temperatura ambiente é uma condição comum que deve ser contabilizada durante o processo de detecção de danos (PARK et al., 1999).

Vários métodos de NDE usados para diagnóstico e monitoramento de danos estruturais, tais como inspeção visual, testes radiográficos, ensaios por ultrassom, líquidos penetrantes, partículas magnéticas e medições de propriedades dinâmicas podem ser encontrados em trabalhos anteriores, conforme Palomino, (2008), Tsuruta (2008) e Leucas (2009).

Dois exemplos de detecção ativa de danos de forma não destrutiva e que utilizam sensores de PZT são: Ondas de Lamb (*Lamb Waves – LWSHM*) (SOHN, 2005, SU, YE, 2004 2009, SU; YE; LU, 2006) e Método de Impedância Eletromecânica (*Electromechanical Impedance – ISHM*) (PARK et al., 2003, ANNAMDAS; SOHN, 2010). As características positivas destes transdutores incluem baixo custo, baixo consumo de energia (em geral), operam em uma faixa de alta frequência (tipicamente acima de 30kHz) e proporcionam alta sensibilidade para os sensores. Deve-se lembrar, entretanto, que operar com sinais de alta frequência também promove uma redução da área de sensibilidade dos sensores (RAGHAVAN; CESNIK, 2005). O método LWSHM monitora as propriedades de ondas mecânicas elásticas que viajam na estrutura e que transportam a informação de danos ao longo de sua trajetória. Por outro lado, o método ISHM monitoriza as variações localizadas na impedância eletromecânica usando um sensor piezelétrico fixado (ou embutido) na estrutura em foco. O método ISHM, em geral, usa a parte real da impedância, uma vez que a parte imaginária, que corresponde à parte capacitiva do

sensor, é mais sensível às variações de temperatura. Existem métodos, em contrapartida, que usam a parte imaginária para avaliar a integridade do sensor (PARK et al., 2008).

Uma grande desvantagem dos sistemas SHM ativos que usam transdutores piezelétricos é a influência da temperatura nos sensores. Alguma pequena variação de temperatura pode levar o sistema de SHM a fornecer diagnósticos falsos-positivos, ou seja, indicações positivas em casos onde nenhum dano mecânico existe, de fato, na estrutura monitorada (PALOMINO et al., 2012). Portanto, a compensação da temperatura é imperativa para obter um diagnóstico confiável da integridade estrutural (KIJANKA et al., 2013, HARLEY; MOURA, 2012, ROCHA; RABELO; STEFFEN Jr., 2014, SUN et al., 1995, PARK et al., 1999, BAPTISTA et al., 2014, RABELO; FINZI NETO; STEFFEN Jr., 2015, CAVALINI et al., 2015).

Para a técnica ISHM, o deslocamento efetivo de frequência (*Effective Frequency Shift - EFS*) através da análise de correlação constitui a técnica de compensação de temperatura mais utilizada comumente. Sun et al. (1995) propuseram, pela primeira vez, o uso de correlação cruzada entre duas assinaturas de impedância para equiponderar os deslocamentos de frequência causados pela variação da temperatura. Park et al. (1999) compensaram tanto a frequência quanto a magnitude dos deslocamentos através de uma métrica de dano modificada. Koo et al. (2009) modificaram o método desenvolvido por Park et al. (1999) para desenvolver EFS para equilibrar os efeitos de temperatura através da maximização do coeficiente de correlação. O desvio de frequência para compensação de temperatura através desta técnica é geralmente escolhido como resultado de um problema de otimização simples onde busca maximizar o Coeficiente de Correlação. Como resultado, a métrica de dano (MD) é sempre minimizada mesmo quando o dano está presente na assinatura de impedância (RABELO et al., 2015).

No contexto da técnica LWSHM, uma revisão dos diferentes métodos envolvidos é encontrada em Rocha; Rabelo; Steffen Jr. (2014). A influência da temperatura é observada no deslocamento horizontal do sinal e também na variação da amplitude. O fato das ondas de Lamb estarem associadas a certa complexidade de implementação e serem dependentes da temperatura dificulta a compensação desse efeito. Métodos de compensação de temperatura baseados em modelagem numérica têm sido estudados por Marzani e Salamone, (2012), que abordam um modelo mais abrangente de propagação da onda de Lamb para prever como essas ondas de Lamb atuam sobre a influência da temperatura. An e Sohn (2012) propõem compensar a mudança de amplitude e a mudança de fase da onda de Lamb devido à mudança de temperatura considerando, no entanto, as variações lineares. Estudos numéricos *versus* estudos experimentais demonstram que alta precisão da compensação de temperatura dos sinais das

ondas de Lamb pode ser obtida no caso de estruturas metálicas (AN; SOHN, 2012). Por outro lado, com a utilização de estruturas compostas, aparecem dificuldades no processo de compensação.

Recentemente, foi introduzido um modelo de compensação de temperatura com base na física combinada com correspondência de análise de sinais busca (ROY et al., 2014). O desempenho desse modelo é encontrado para estar em par com a subtração da *baseline* ótima adicionado ao método de compensação de estiramento da *baseline*. Uma abordagem de co-integração apresentada por Dao e Staszewshi (2013), que tem sido amplamente utilizada em econometria, propõe remover o efeito indesejado da temperatura dos sinais da onda Lamb. Esse método é parcialmente construído sobre a análise do comportamento não estacionário do sinal da onda de Lamb adquirido em diferentes estágios. O procedimento e a computação associados a esse método são bastante complexos.

Já no processo de tomada de decisão, a estatística é uma aliada fundamental para o sucesso do esforço de monitoramento, sendo uma das principais ferramentas de SHM. Enquanto as técnicas de SHM (SU; YE, 2006, 2009, RAMADAS et al., 2011, MONNIER, 2006, LU et al., 2009, PARK; CUDNEY; INMAN, 2007, SOROHAN et al., 2011) e o ISHM (DAVIS; RICH; DRZAL, 2004, PARK; INMAN, 2005, PALOMINO; STEFFEN Jr.; FINZI NETO, 2009, PALOMINO; STEFFEN Jr., 2014, ANNAMDAS et al., 2014) são tipicamente usadas para identificar danos estruturais, vários estudos usaram modelos estatísticos em conjunto para realizar a análise do limiar de dano e confiabilidade.

Em uma aplicação um pouco mais avançada utilizando o método denominado impedância integrada e detecção de danos baseada em ondas guiadas (*integrated impedance and guided wave* - IIG), utiliza-se de forma suplementar, os sinais de impedância e ondas de Lamb, obtidos de maneira simultâneo a partir de transdutores piezelétricos para melhorar o desempenho e confiabilidade do diagnóstico de dano, especialmente em condições de temperatura variáveis (YUN; SHON, 2012).

Um dos objetivos dessa tese é a interação entre duas técnicas de SHM, a saber, a técnica da impedância eletromecânica e as ondas de Lamb, uma vez que tal interação ainda não foi explorada o suficiente. A interação é baseada na eficiência do atuador (LIANG; SUN; ROGERS 1994 b) assim é possível diminuir o erro na localização do dano. Um fator limitador é que não existe equipamentos comerciais que possibilitam essa interação, por isso, essa tese também desenvolveu um *hardware* capaz de utilizar ambas as técnicas citadas simultaneamente, além

disso o presente trabalho levou em consideração a condição de temperatura variável para melhorar o desempenho do sistema ao diagnosticar o dano na estrutura.

Todo o trabalho foi realizado no Laboratório de Mecânica de Estruturas “Prof. José Eduardo Tannús Reis” - LMEst da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU (FEMEC). Esse constitui de uma extensão da experiência prévia do grupo de pesquisa do LMEst iniciada por Moura (2004, 2008) e seguida dos trabalhos feitos por Palomino (2008, 2012), Tsuruta (2008), Leucas (2009) e Rabelo (2014) conforme o histórico mostrado na Figura 1.1.



Figura 1.1: Histórico de trabalhos sobre SHM no âmbito da FEMEC-UFU.

No trabalho de Moura (2004), enfoca-se a utilização de técnicas estatísticas acopladas ao método da impedância eletromecânica no monitoramento de falhas em estruturas. Já o trabalho de Palomino (2008) aborda principalmente as diferentes métricas que podem ser utilizadas para quantificar as medições de impedância eletromecânica, focando nas estruturas rebitadas. Moura (2008) apresenta um estudo bastante extenso da utilização de técnicas de SHM, incluindo técnicas de classificação de falhas (*clustering*), onde há várias aplicações em engenharia aeronáutica e aeroespacial. O trabalho de Tsuruta (2008) volta-se para materiais compostos, em particular sob influência de impacto em que técnicas de SHM foram utilizadas para monitorar situações de risco. Já Leucas (2009) apresentou um estudo de duas diferentes técnicas propostas na literatura (impedância eletromecânica e ondas de Lamb), avaliando-as em medições de danos simulados pela perda de rebites, em duas estruturas diferentes. Em seguida Palomino (2012)

retorna aplicando técnicas de inteligência artificial, tais como as redes neurais artificiais e análises de *cluster* para classificar danos detectados pelo processo de monitoramento usando impedância eletromecânica. Por fim, Rabelo (2014) abordou o efeito da temperatura quando implementado uma metodologia para compensar o efeito da variação da temperatura na técnica da impedância eletromecânica, buscando tornar o Monitoramento de Integridade Estrutural nas situações em que as condições ambientais promovem alteração na temperatura durante os ensaios. Essas dissertações e teses geraram várias publicações de periódicos e artigos de congressos científicos, sendo muitos deles incluídos nas referências bibliográficas desta tese.

1.1. Objetivos

No intuito de atender as necessidades da indústria aeronáutica e estando inserido no contexto das técnicas de monitoramento de integridade estrutural baseadas no uso de transdutores piezelétricos, o trabalho de pesquisa reportado nesta tese tem por objetivo geral a avaliação da interação de duas técnicas distintas (impedância eletromecânica e ondas de Lamb) para monitorar uma estrutura aeronáutica metálica.

Nesse sentido, esse trabalho desenvolve um *hardware* de baixo custo capaz de interagir com as duas técnicas de SHM. As principais contribuições buscadas por esse trabalho de tese envolvem tanto a interação como a implementação de *hardware* de baixo custo capaz de promover o funcionamento simultâneo das duas técnicas de SHM mencionadas quanto para melhorar globalmente o diagnóstico de dano estrutural. Além disso, esse trabalho procura trazer à luz a importância da interação das duas técnicas, em especial, nos casos em que existe variação de temperatura durante o monitoramento.

1.2. Estrutura da Tese

Esta tese foi dividida em capítulos de forma a garantir uma melhor compreensão dos diversos assuntos necessários para sua compreensão, porém buscando fazer uma abordagem direta, modular e sucinta de cada parte do problema considerado.

No capítulo 2 são apresentados os conceitos básicos de monitoramento de integridade estrutural. Neste sentido, é realizada uma revisão do estado da arte dos métodos de SHM.

No capítulo 3 são abordados os conceitos fundamentais utilizados nesta tese, a saber, aqueles que fundamentam a impedância eletromecânica e as ondas de Lamb, assim como o efeito da temperatura e as formas de compensação de seus efeitos, visando minimizar os riscos de tomada de decisões equivocadas.

No capítulo 4 são retratados os principais pontos do sistema proposto nesta tese, assim como o *hardware* e *software* desenvolvidos que integram a abordagem vista no capítulo 3. Também apresenta a metodologia empregada para a detecção de danos estruturais, além da análise estatística empregada em ambas as técnicas de SHM aqui abordadas.

No capítulo 5 são apresentados os resultados de diagnóstico de falha da estrutura escolhida, além de mostrar os resultados de desempenho sobre grande variação de temperatura.

No capítulo 6 são expostas as conclusões sobre esta tese e as perspectivas de trabalhos futuros.

CAPITULO II

ESTADO DA ARTE DO MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL

Neste capítulo são abordados os conceitos básicos sobre monitoramento de estruturas, destacando o monitoramento de estruturas aeronáuticas. Será abordado o importante processo de diagnóstico de dano que vem sendo denominado como *Structural Health Monitoring* (FARRAR; LIEVEN; BENENT, 2005) e como as suas diferentes técnicas têm sido aplicadas nas mais diversas áreas da Engenharia, contribuindo tanto para a segurança da estrutura como para a redução de custos de manutenção.

Também é feita uma breve revisão da literatura, descrevendo diferentes trabalhos na área de SHM e como o desenvolvimento de sistemas inteligentes pode contribuir com novas técnicas e soluções.

2.1 Conceitos básicos

Além de sua finalidade precípua, o monitoramento de estruturas possibilita, dentro de uma análise mais específica e ambiciosa, a realização do prognóstico de dano, ou seja, saber no presente qual é a vida útil de um determinado componente ou por quanto tempo a estrutura poderá operar de forma segura até a necessidade de realização de um reparo ou de nova

inspeção. Conhecer o momento mais apropriado para interromper a operação de um sistema para realizar um reparo ou uma inspeção programada traz enormes benefícios para o operador, sobretudo em relação aos aspectos logísticos e de redução de custos. Franco (2009) menciona os altos custos de manutenção e reparo no ciclo de vida de um avião de médio porte, podendo esses chegarem a 27% dos gastos totais.

Além da questão econômica, a segurança operacional é sempre um fator crucial, sobretudo no caso da indústria aeronáutica, onde a segurança de voo é fator prioritário em função do risco de vida para passageiros e tripulação em caso de acidentes.

Neste contexto, o monitoramento de estruturas torna-se ainda mais relevante e apresenta-se como um potencial substituto dos conceitos de manutenção programada cujos intervalos são definidos por tempo ou horas de voo. Tem sido lembrado com frequência o incidente ocorrido em 1988 com uma aeronave da Aloha Airlines, Modelo Boeing 737-297. Na ocasião, em pleno voo, uma parte da fuselagem se separou da estrutura da aeronave (ver a Figura 2.1) provocando um pouso de emergência. Um dos desafios do prognóstico de falha, neste caso, é o de avaliar os danos causados pelo crescimento de trincas (inicialmente incipientes) devido à fadiga ou de outros tipos de danos como a corrosão e a perda de rebites em estruturas de material metálico. Com posse de todas as informações necessárias, pode-se trabalhar no sentido de estimar a vida útil remanescente da aeronave (FARRAR; LIEVEN; BEMENT, 2005).



Figura 2.1: Perda de parte da fuselagem do avião da Aloha Airline em 1988 (RABELO, 2014).

Assim, é de vital importância quantificar a vida útil de um sistema de engenharia. Deve-se considerar que alguns autores questionam a aplicabilidade dos métodos existentes no tocante à eficiência dos sistemas de monitoramento e à viabilidade de implementação dos mesmos. Por outro lado, atualmente, o processo conhecido como SHM é capaz de demonstrar um avanço considerável em termos de produção científica, contando também com aplicações bem-sucedidas (FARRAR; LIEVEN; BENENT, 2005, JÚNIOR; SILVA, 2005, PARK; INMAN, 2005).

2.1.1. Monitoramento de Integridade Estrutural

Conforme com Farrar; Lieven; Benent (2005), o Monitoramento de Integridade Estrutural é o processo de detecção de dano dentro do contexto de aplicações voltadas para diversas áreas da Engenharia, tais como como aeroespacial, civil e mecânica. SHM envolve a observação de um sistema por meio de amostragens periódicas de sua resposta dinâmica mediante a um conjunto de sensores e a análise estatística dos atributos dessas medições com o objetivo de determinar a condição atual do sistema em estudo.

O conceito de monitoramento em tempo real está na essência do SHM, porém algumas estratégias de avaliação de estruturas e localização de danos são aplicadas periodicamente sem perder de vista a possibilidade de viabilizar o monitoramento em tempo real, dependendo dos requisitos tecnológicos da aplicação. Tem-se conhecimento de aplicações estratégicas na área militar, onde o diagnóstico em tempo real é indispensável. Tradicionalmente, os ensaios não destrutivos (testes radiográficos, ensaios por ultrassom, líquidos penetrantes, partículas magnéticas e outros) são normalmente realizados junto das inspeções periódicas.

Segundo Doebling; Farrar; Prime (1998), o processo do SHM pode ser dividido em quatro níveis:

- Nível 1 – Detecta o dano;
- Nível 2 – Detecta e localiza o dano;
- Nível 3 – Detecta, localiza e quantifica o dano; e
- Nível 4 – Detecta, localiza, quantifica o dano e estima a vida útil remanescente.

O tipo de aplicação define qual é o nível mais adequado à vista dos objetivos propostos para solução do problema. Porém, sabe-se que, normalmente, os níveis 1 e 2 são insuficientes em muitas aplicações.

Ao incorporar materiais inteligentes ao sistema de detecção, foram propostos mais três níveis adicionais (INMAN, 2001):

- Nível 5 – Combina o nível 4 com Estruturas Inteligentes para o autodiagnóstico de danos estruturais;
- Nível 6 – Combina o nível 4 com Estruturas Inteligentes e Controle para formar um sistema de auto reparo estrutural (*self-healing*); e
- Nível 7 – Combina o nível 1 com Controle Ativo e Estruturas Inteligentes para obtenção de um sistema simultâneo de controle e monitoramento.

2.1.2. *Prognóstico de dano*

De acordo com Farrar; Lieven; Benent (2005), o prognóstico de dano é definido como a tarefa de estimar a vida útil remanescente de uma estrutura danificada quando submetida a diferentes carregamentos. Essa estimativa é baseada na produção de modelos preditivos que se desenvolvem por meio da correlação entre informações do monitoramento do sistema, resultados obtidos do SHM, condições ambientais (passadas, presentes e futuras), condições operacionais, e características do projeto.

Ainda segundo Farrar; Lieven; Benent (2005), o dano em um sistema mecânico é definido como uma modificação intencional ou não do material e/ou das propriedades geométricas do sistema, incluindo mudanças nas condições de contorno e nos parâmetros físicos do sistema e/ou dos subsistemas conectados, os quais afetam, em geral de modo negativo, o desempenho atual e futuro do sistema como um todo. Como exemplo, uma trinca formada em uma peça mecânica produz uma mudança geométrica que altera as suas características de rigidez. Dependendo da localização da trinca e da carga aplicada ao sistema, o efeito adverso desse dano no desempenho do sistema pode ser imediato ou não.

2.2. Revisão da literatura

Diante do cenário apresentado, foi realizada uma revisão da literatura na busca de trabalhos feitos dentro dessa linha de pesquisa com o objetivo de fundamentar uma contribuição para a área de monitoramento de integridade estrutural por meio do desenvolvimento de sistemas inteligentes.

O monitoramento de estruturas se define pela aplicação de diferentes conhecimentos envolvendo diversas disciplinas afins, caracterizando um contexto claramente interdisciplinar. Farrar; Lieven; Benent (2005) descrevem, de uma forma resumida, as áreas de conhecimento relacionadas ao SHM e ao prognóstico de dano: Engenharia Mecânica, Engenharia Aeroespacial, Engenharia Elétrica, Ciência da Computação, Ciência dos Materiais, Análise de Confiabilidade, Análise de Sinais, Matemática e Estatística. Estão inclusas dentro do grupo Matemática as técnicas de reconhecimento de padrões indispensáveis como ferramenta de caracterização de dano.

Durante a pesquisa sobre o estado da arte na área de SHM percebeu-se que o desenvolvimento de sistemas inteligentes associados ao monitoramento de estruturas ainda não é tão difundido quanto a utilização de modelos estatísticos. Esses, por sua vez, são largamente usados, especialmente na análise das medições feitas por diferentes tipos de sensores.

Foi mencionado que em um processo de SHM é necessário a tirada de atributos das medições obtidas pelos sensores responsáveis pelo monitoramento do sistema. A extração dos atributos remete aos modelos de reconhecimento de padrões, porém, em geral, o uso de modelos estatísticos é recorrente para os métodos que utilizam a análise de impedância de sensores. Esses modelos determinam uma métrica, conhecida também como métrica de dano, que tem como conceito básico a mensuração de dano por meio da relação entre um sinal medido com a estrutura em condição sem danos (*baseline*) – que é usada como referência – e o sinal estimado com a estrutura danificada. Diversos trabalhos como Baptista; Vieira; Inman (2010), Baptista; Filho; Inman (2011), Finzi Neto (2010), Bhalla et al. (2009), Franco (2009), Giurgiutiu; Zagrai, (2005), Giurgiutiu et al. (2003), Koo (2008), Park et al. (2003), Sun et al. (1995), dentre outros, demonstram o uso de modelos estatísticos para a extração de atributos dos sinais observados pelos sensores.

Para o método ISHM, verifica-se que o Desvio da Raiz Média Quadrática (*Root Mean Square Deviation* - RMSD) é utilizado como uma métrica de dano muito aplicada nos trabalhos pesquisados. Bhalla et al. (2009) utiliza o RMSD para avaliar o uso de diferentes grandezas, tais

como condutância, valor absoluto da impedância e valor absoluto da admitância, com a finalidade de validar um sistema de monitoramento de baixo custo para aquisição de impedância.

Finzi Neto (2010) buscou em seu trabalho desenvolver um sistema de aquisição de impedância de baixo custo e multiplexado para permitir o monitoramento de sinais de diferentes sensores. Neste caso, o uso do RMSD é aplicado na avaliação das curvas de impedância, sendo que, inicialmente, foi estabelecido o uso do valor absoluto da impedância para o cálculo dos índices de métrica de dano.

Uma grande quantidade de trabalhos referenciados nesta tese utiliza a técnica de monitoramento da impedância eletromecânica (a técnica é descrita no item 3.1), que tem encontrado inúmeras aplicações em sistemas de monitoramento. Giurgiutiu; Zagari (2005) desenvolveram um trabalho de detecção de danos em estruturas aeroespaciais que aplica a métrica de dano como um índice para avaliar sua severidade. Neste artigo, o índice RMSD foi usado em conjunto com outros índices que também foram avaliados, como o Desvio Médio Percentual Absoluto (*Mean Absolute Percentage Deviation* - MAPD) e o Desvio do Coeficiente de Correlação (*Correlation Coefficient Deviation* - CCD). A utilização de diferentes índices é uma tentativa de extrair um número maior de atributos e, por consequência, melhorar as avaliações e classificações que são realizadas pelo usuário.

Ainda dentro dessa linha de trabalho – com foco no desenvolvimento de sistemas de baixo custo de aquisição de impedância –, Koo (2008) desenvolveu um sistema capaz de compensar automaticamente os efeitos da temperatura sobre o sistema de monitoramento por meio do deslocamento de frequência. De novo, o uso do índice RMSD é aplicado nas análises das curvas de impedância, desta vez, com a avaliação adicional das compensações dos efeitos de temperatura.

Assim como Koo (2008), Baptista; Filho; Inman (2011) também desenvolveram sistemas de compensação de temperatura para monitoramento de impedância eletromecânica em tempo real e multiplexado para vários sensores. Em seu trabalho, Baptista; Filho; Inman, (2011) utilizaram o índice conhecido como Métrica de Desvio do Coeficiente de Correlação (*Correlation Coefficient Deviation Metric* - CCDM).

Palomino (2008) estudou em detalhes as diferentes métricas de dano encontradas na literatura. O estudo se aprofunda na avaliação do índice RMSD e suas variações. A utilização do índice é feita em diferentes estudos, particularmente em ensaios não destrutivos e no monitoramento de impedância eletromecânica de estruturas aeronáuticas.

Outra técnica abordada na área de SHM utiliza as ondas de Lamb, como pode ser observada em inúmeras publicações, especialmente acerca de sua sensibilidade na detecção de falhas em materiais compostos laminados. Díaz Valdés; Soutis (2000) e Saravanos; Birman; Hopkins (1994) demonstraram que uma rede de sensores pode ser utilizada de maneira eficiente para detectar delaminações em placas de compostos com base nas ondas de Lamb.

Kessler; Spearing; Atalla (2002) afirmam que as técnicas das ondas de Lamb são mais eficientes na obtenção de informações sobre o tipo, severidade e localização do dano quando comparadas com outros métodos previamente testados. Nesse caso, pastilhas piezocerâmicas foram utilizadas para excitar o primeiro modo antissimétrico das ondas de Lamb (modalidade A_0).

Outros autores exploraram a otimização das ondas de Lamb na detecção de danos, abordando os problemas da escolha adequada da frequência de atuação, forma do pulso e geometria dos sensores para aplicação dessas ondas. Os resultados foram comparados executando-se a decomposição da onda em *wavelet* de Morlet e apresentando graficamente as magnitudes dos coeficientes na frequência aplicada (LEMISTRE et al., 1999).

Embora as ondas de Lamb apresentem grande capacidade para detectar e localizar danos, alguns autores apontam como principal desvantagem deste método o fato de ser um método ativo, isto é, de necessita de uma tensão produzida por um gerador de funções. Outro requisito é a elevada taxa de aquisição de dados essencial para uma melhor resolução do sinal. Ainda segundo estes autores, esse método deve ser aplicado em conjunto com outro passivo de detecção devido à dificuldade de se interpretar os dados obtidos através da técnica de ondas de Lamb (SU; YE, 2009).

Ricci; Banerjee; Mal (2004) apresentaram uma metodologia automática para identificar e localizar danos em estruturas de materiais compostos. Os danos foram causados por impacto e o reconhecimento destes se baseou no cálculo do índice de correlação obtido pela análise do sinal de frequência conforme conseguido pelos sensores de pastilhas piezelétricas.

Sohn (2005), na continuação no trabalho desenvolvido por Sohn et al. (2004), propôs a utilização de uma técnica de monitoramento de integridade estrutural para detecção de danos em estruturas compostas que combina a propagação de ondas de Lamb, o método da impedância eletromecânica e métodos acústicos e usa de um mesmo sistema de sensores/atuadores para inspeção. No estudo apresentado, as características de atenuação das ondas, identificadas através de um índice *wavelet* são utilizadas para localizar a região danificada (SOHN et al., 2004). Os danos foram introduzidos pelo disparo de um pequeno projétil em diferentes localizações e velocidades sobre uma placa quadrada de material composto com matriz epóxi e fibras de

carbono. Constatou-se que os três métodos estudados podem se complementar de forma eficiente. No caso, verificou-se que a propagação de ondas de Lamb é eficaz para placas finas e o método da impedância é mais adequado para detectar danos próximos de conexões estruturais.

Diamanti; Hodkinson; Soutis (2004) investigaram a detecção de danos em materiais compostos causados por impactos de baixa energia por meio do método das ondas de Lamb. Para isto utilizaram uma placa de material composto laminado de polímero reforçado com fibras de carbono e pastilhas piezelétricas para geração e recepção das ondas antissimétricas de Lamb, A_0 . O impacto é efetuado por um atuador de formato esférico e a placa foi impactada no centro, repetidamente, com níveis progressivos de energia. A cada estágio, a placa era monitorada e inspecionada por ultrassom tipo C. Com isso, demonstrou-se que as ondas de Lamb podem ser utilizadas no primeiro estágio da detecção e localização de danos em conjunto com técnicas mais sensíveis de ensaios não destrutivos.

Mais tarde, Yun; Shon, (2012) implementaram um novo modelo, o IIG, que se baseia na interação entre duas técnicas de SHM, a impedância eletromecânica e as ondas de Lamb. Em uma aplicação utilizando sinais de impedância e onda guiada, obteve-se sinais, de modo simultâneo, a partir de transdutores piezelétricos (PZTs) para melhorar o desempenho e a confiabilidade do diagnóstico de dano, especialmente em condições de temperatura variável. A técnica IIG propõe dividir o sinal de impedância medido em duas partes: impedância passiva (apenas sensível à variação de temperatura) e impedância ativa (estritamente relacionada com as propriedades mecânicas da estrutura alvo). Desse modo, os efeitos de temperatura sobre a impedância ativa e os sinais de onda guiados são minimizados usando a impedância passiva. Por fim, o diagnóstico de danos é realizado usando sinais de impedância e onda guiada que resulta em um processo mais eficiente, segundo os autores. Como aplicação, a técnica IIG foi testada em alguns estudos de caso, a saber: detecção do afrouxamento de parafusos em uma junta de recobrimento de aço, na identificação de um entalhe em uma amostra de alumínio com uma geometria complexa e na identificação de delaminação em uma amostra de asa com longarinas. Em todos os casos a investigação foi feita sob diferentes temperaturas.

A interação entre as técnicas de SHM não é comumente explorada por pesquisadores.

CAPITULO III

IMPEDÂNCIA ELETROMECHANICA E ONDAS DE LAMB

Neste capítulo são abordados os aspectos fundamentais das duas técnicas de SHM que foram escolhidas para operarem de modo simultâneo dentro da estratégia de monitoramento proposta nesta tese. Dentre os tópicos abordados, além das técnicas da impedância eletromecânica e das ondas de Lamb, encontram-se também o efeito da temperatura sobre ambas as técnicas, acompanhado de suas respectivas formas de compensação.

3.1. Metodologia de SHM Baseada na Impedância Eletromecânica

A impedância mecânica de um sistema mecânico pode ser descrita como a divisão da força harmônica aplicada num dado ponto desse sistema pela velocidade com que o mesmo se desloca medida neste mesmo ponto (MASSOUD, 1985). É denominada “impedância elétrica” a oposição que um circuito ou componente oferece à corrente alternada. Trata-se de uma grandeza bidimensional, portanto, contém duas partes: resistência e reatância. A resistência nos circuitos de corrente alternada é a mesma que a contraparte da corrente contínua e é expressa como um valor ôhmico positivo. Já a reatância pode ser indutiva, ou seja, valor ôhmico não-negativo, ou capacitiva, valor ôhmico não-positivo (GIBILISCO, 2002).

A resistência é um escalar e é representada em uma escala unidimensional. Em um circuito de corrente contínua, a corrente diminui conforme a resistência aumenta, obedecendo a Lei de Ohm. Da mesma forma, essa lei também assegura o mesmo para a corrente alternada, que passa por uma resistência. Já para a indutância ou capacitância, a situação não é tão simples. A reatância indutiva X_L de um indutor pode variar desde zero (para o caso de um curto circuito e alguns ohms) para uma bobina pequena, chegando a kilohms ou megaohms conforme se vê nas grandes bobinas. Como resistência pura, a reatância indutiva afeta a corrente em um circuito de corrente alternada. Porém, não sendo uma resistência pura, a reatância muda de acordo com a frequência.

Para uma fonte de corrente alternada, se a frequência é dada por f (Hertz) e a indutância da bobina é L (Henry), então a reatância indutiva X_L (ohm) é dada pela Equação (3.1).

$$X_L = 2\pi f L \quad (3.1)$$

A reatância indutiva tem sua contrapartida na forma de reatância capacitiva. Seja um capacitor alimentado por uma fonte de corrente alternada. A frequência da corrente alternada varia de alguns Hertz até muitos mega-Hertz. No começo, a tensão entre as duas placas do capacitor irá acompanhar quase que exatamente a reversão de polaridade condicionada pela corrente alternada. Ao aumentar a frequência, a carga não ficará bem estabelecida em cada ciclo. Quando a frequência é muito elevada, o conjunto das placas comportará como um curto-circuito. Dessa forma, a oposição que as duas placas oferecerão para a corrente alternada é denominada por reatância capacitiva, X_C , que varia com a frequência. Assim como a reatância indutiva e a resistência, ela também possui sua escala em ohms. Entretanto, os valores são negativos ao invés de positivos e o valor de X_C aumenta de modo negativo conforme a frequência diminui.

Os valores da reatância capacitiva são descritos de forma absoluta, retirando o sinal negativo. Em cálculos de impedância complexa, no entanto, esse valor é sempre considerado uma grandeza não-positiva, o que evita a confusão com a reatância indutiva.

Assim, a reatância capacitiva pode ser considerada como uma imagem espelhada da reatância indutiva, ou seja, é a sua extensão em valores negativos. Para uma dada fonte de corrente alternada de frequência f em Hertz, com um capacitor C expresso em Farads, a reatância capacitiva X_C em ohms é obtida pela Equação (3.2) (GIBILISCO, 2002).

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad (3.2)$$

Seja um plano RX utilizado para descrever valores complexos. O eixo das abscissas caracteriza os valores para R , enquanto que, nas ordenadas, são representados os valores para X . Assim, o plano para RX_L é o quadrante superior à direita do plano. De maneira similar, o plano para RX_C corresponde ao quadrante inferior à direita dos números complexos. As resistências são retratadas por números reais não-negativos, ao mesmo tempo que a reatância pode ser indutiva, ou seja, valores positivos (ou então capacitiva) com valores negativos, correspondendo aos valores sobre o eixo imaginário. Desta forma, é possível remover do plano complexo a metade esquerda do gráfico, podendo haver somente valores não-negativos para o eixo real (GIBILISCO, 2002).

Os valores retratado neste plano descrevem uma quantidade genérica $R + jX$ que representa um valor também genérico para a impedância Z reproduzido por estas duas componentes. Uma impedância resistiva (ou impedância não-reativa ou, ainda, resistência ideal) é caracterizada por um valor de impedância no qual não existe o termo imaginário.

A admitância é uma medida que corresponde a facilidade com que um meio conduz corrente alternada e equivale à condutância no caso de uma corrente contínua. Assim como a impedância, esse é um valor complexo.

Da mesma forma como ocorre em um circuito com corrente contínua, a condutância G aparece em um circuito de corrente alternada. A condutância elétrica é o inverso da resistência e sua unidade é medida em Siemens ou Mho.

O inverso da reatância é a susceptância B , que também pode ser capacitiva ou indutiva. Combinando a condutância e a susceptância, pode-se formar a admitância complexa Y que é descrita similarmente à impedância por $Y = G + jB$.

Conforme comentado, o método de monitoramento de integridade estrutural, baseado na impedância eletromecânica, tem sido desenvolvido como uma ferramenta promissora para identificação de falhas estruturais em tempo real e é considerado como um novo método de avaliação não destrutiva (PARK et al., 2003).

A impedância elétrica do material PZT pode ser associada diretamente à impedância mecânica da estrutura à qual a pastilha de PZT esteja colada. Utilizar o mesmo elemento tanto

como sensor quanto como atuador (material inteligente) não somente reduz o número de componentes, como também o cabeamento necessário à instalação (PARK et al, 2003).

O desenvolvimento teórico que apresenta o método da impedância como técnica para o monitoramento estrutural foi inicialmente proposto por Liang; Sun; Rogers (1994) e posteriormente ampliado por Chaudhry et al. (1995, 1996), Sun et al. (1995), Park et al. (1999a, 1999b, 2000a, 2000b, 2001, 2003), Giurgiutiu; Zagrai, (2000 2002), Giurgiutiu et al. (2003), Zagrai; Giurgiutiu (2005), Soh et al. (2000), Bhalla et al. (2002a, 2002b), Bhalla; Naidu; Soh (2002) e Moura; Steffen (2004). Utilizando de geralmente acima de 30 KHz, o método usa frequências elevadas (quando comparadas com aquelas que são normalmente utilizadas em análise modal) que são aplicadas a pastilhas de PZT instaladas na superfície de estruturas para a monitoração da integridade estrutural, ou seja, para a avaliação das modificações que aparecem nos sinais de resposta que são capturados pelo sensor. As pastilhas de PZT usitam de uma diferença de potencial muito baixa (menores que 1 V), gerando uma alta frequência de excitação em determinados pontos da estrutura (PARK et al., 2003). Entretanto, de acordo com Raju (1997), o valor de 1V conduz a bons resultados para identificação de mudanças estruturais.

Na Figura 3.1 é feita uma representação do modelo unidimensional eletromecânico do sistema de monitoramento de integridade estrutural por meio dos sinais de impedância (RAJU, 1997).

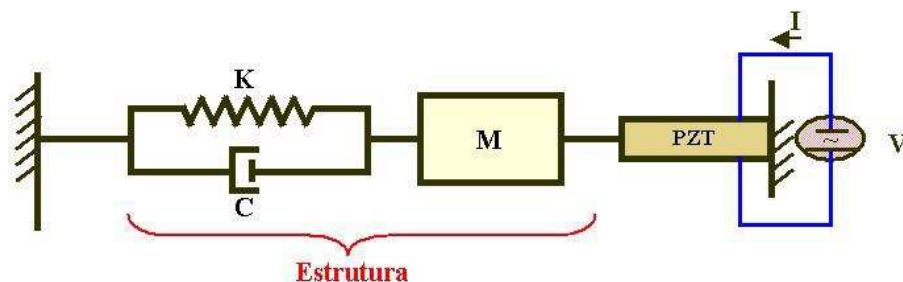


Figura 3.1: Modelo unidimensional do acoplamento eletromecânico utilizado pelo método baseado na impedância eletromecânica (LIANG; SUN; ROGER, 1994).

É considerado que um atuador de PZT axial encontra-se posicionado em uma das extremidades do sistema, enquanto a outra está fixa. Liang; Sun; Rogers (1994) demonstraram

que a admitância $Y(\omega)$ do atuador de PZT é uma função combinada da impedância mecânica do atuador $Z_a(\omega)$ e da estrutura $Z(\omega)$, conforme mostrado na Equação (3.3):

$$Y(\omega) = \frac{I}{V} = i\omega a \left(\bar{\epsilon}_{33}^T (1 - i\delta) - \frac{Z(\omega)}{Z(\omega) + Z_a(\omega)} d_{3x}^2 \hat{Y}_{xx}^E \right) \quad (3.3)$$

onde V é a voltagem de entrada no atuador de PZT, I é a corrente de saída do PZT, a é a constante geométrica, d_{3x} é a constante de acoplamento piezoelétrico, Y_{xx}^E é o módulo de Young, $\bar{\epsilon}_{33}^T$ é a constante dielétrica complexa do PZT com tensão zero, ω é a frequência angular, Z_a e Z são as impedâncias complexas da estrutura e do PZT, respectivamente, e δ é a perda dielétrica tangencial do PZT.

Supondo que as propriedades mecânicas do PZT não variam ao longo do tempo de monitoramento, a Equação (3.3) mostra que a impedância elétrica do PZT é diretamente relacionada com a impedância mecânica da estrutura, levando ao uso dos sinais de impedância elétrica do PZT para o monitoramento da integridade estrutural do sistema representado pela impedância mecânica da estrutura.

Deve ser notado que a admitância elétrica é basicamente capacitiva, indicando que a parte imaginária é o termo dominante. Esse termo imaginário é mais sensível a variação de temperatura do que a parte real. Dessa forma, a parte real do sinal é, em geral, utilizada na maioria das aplicações (RAJU, 1997).

A técnica basicamente consiste na obtenção de funções de resposta em frequência (FRFs) da estrutura e a avaliação posterior da alteração destes sinais. Uma modificação dessas FRFs indicaria uma modificação estrutural e, portanto, uma eventual falha (RAJU, 1997).

Quanto à identificação da melhor banda de frequências a ser monitorada para uma estrutura, pouco trabalho foi realizado neste aspecto. Em geral, é adotado um processo de tentativa e erro para identificação da melhor banda. Entretanto, Moura; Steffen (2004) mostraram um procedimento estatístico que pode ser utilizado para obtenção das melhores configurações para os ensaios. Sun et al. (1995) sugerem que faixas acima de 200 KHz são favoráveis para obter falhas localizadas, enquanto menores que 70 KHz são indicadas para áreas mais extensas.

Enquanto a maior parte dos trabalhos usa a parte real da impedância ou da admitância, Bhalla; Naidu; Soh (2002a) introduzem o conceito de assinatura “ativa”, já que é possível utilizar a componente interativa direta do sinal após filtrar a componente “inerte”.

Como as propriedades do material piezelétrico são conhecidas, pode-se reescrever a Equação (3.3) como a Equação (3.4).

$$Y = i\omega a \bar{\varepsilon}_{33}^T - i\omega a \frac{Z(\omega)}{Z(\omega) + Z_a(\omega)} d_{3x}^2 \hat{Y}_{xx}^E = Y_P + Y_A \quad (3.4)$$

Nessa equação, o termo Y_P denota a parte passiva da admitância e representa a contribuição do PZT. Já o termo Y_A corresponde a parte ativa que equivale à interação PZT-estrutura. Como o termo passivo apresenta a parte real do sinal e o termo ativo contém a parte imaginária, basta isolar o termo ativo da soma da Equação (3.4) para trabalhar tanto com a parte imaginária quanto com a real para identificar falhas, mantendo assim toda a informação sobre as condições da estrutura (PARK et al., 2003). Quanto à região sensível para identificação de mudanças estruturais, Park et al. (2003) dizem que, para um simples PZT, o mesmo pode identificar uma falha localizada a uma distância (radial) de 0,4 m em estruturas de material composto e de até 2 metros em estruturas de barra de um único metal.

Sobre o material utilizado, o PZT apresenta boas características dinâmicas, tal como grandes faixas de linearidade, resposta rápida, elevada eficiência de conversão e estabilidade (PARK et al., 2003). Visando o custo, observa-se que este vem reduzindo ao longo do tempo na medida em que sua utilização populariza.

Os sinais de impedância são, em geral, obtidos através de um equipamento conhecido como analisador de impedância. Os dados adquiridos são transferidos para um computador para posterior análise e avaliação. Algumas desvantagens deste procedimento são: o analisador não é portátil, possui inúmeras funções, além de ter um alto custo, sendo que poucos dos recursos disponíveis no mesmo são usados no contexto do monitoramento da integridade estrutural.

Como alternativa, Peairs et al. (2005) desenvolveram um circuito equivalente para medição da impedância, reduzindo o custo do equipamento de cerca de U\$ 40,000.00 para apenas U\$ 10.00. Entretanto, esse dispositivo necessita ser acoplado a um analisador de sinais digitais com FFT (transformada rápida de Fourier); porém, é um aparato bastante comum em laboratórios de pesquisa.

3.1.1. Índice de danos utilizando Impedância eletromecânica

Para se quantificar um dano usando o método da impedância, os dados são adquiridos antes que qualquer dano tenha ocorrido na estrutura. Essa medição caracteriza a chamada *baseline*, sendo usada como referência. Periodicamente, a impedância é medida de novo para ser então comparada com a *baseline* para determinar possível alteração estrutural na vizinhança deste sensor (SUN, et al., 1995). Entretanto, a simples observação (qualitativa) das curvas da resposta no domínio da frequência não é bastante para o diagnóstico. Assim, a diferença entre as duas curvas é quantificada através de uma grandeza denominada métrica de dano, definida através de uma equação estatística. Desta forma, junto com um valor limiar previamente definido para caracterizar o dano, pode-se afirmar se ocorreu ou não uma modificação estrutural, ou seja, o dano.

No trabalho realizado por Palomino (2008) são encontradas várias métricas de dano, que são comparadas em muitas aplicações. O presente trabalho de tese utilizará as métricas de dano conhecidas como RMSD (Desvio Quadrático Médio da Raiz) e algumas de suas variantes, bem como a CCD por serem as mais usadas na literatura e por apresentarem resultados satisfatórios, em especial, no que diz respeito às influências de variação de temperatura

Os gráficos das respostas da impedância fornecem informações qualitativas a respeito da integridade da estrutura, enquanto a informação quantitativa é obtida através de um escalar representativo que pode ser manuseado para fins de comparação entre situações distintas.

Como exemplo, a métrica de dano conhecida como “desvio da raiz média quadrática” foi definido por Sun et al. (1995), sendo dada pela Equação (3.5):

$$RMSD = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{[\text{Re}(Z_{i,1}) - \text{Re}(Z_{i,2})]^2}{[\text{Re}(Z_{i,1})]^2}} \quad (3.5)$$

no qual *RMSD* representa a métrica associada ao dano estudada, $\text{Re}(Z_{i,1})$ indica a impedância medida pelo PZT para condições saudáveis e $\text{Re}(Z_{i,2})$ retrata a impedância que corresponde à situação investigada quando a possível existência de dano. Cada medição é feita *n* vezes dentro do intervalo de frequências de interesse.

Dentre as várias alternativas a essa métrica de dano, pode-se citar a métrica de dano referente ao desvio do coeficiente de correlação proposta por Giurgiutiu; Zagari (2005), a diferença média quadrada utilizada por Raju (1997) e o desvio percentual da média absoluta (TSENG; NAIDU, 2002). Conforme mencionado, no trabalho de Palomino (2008) são encontradas várias métricas de dano que são comparadas em termos de desempenho. O presente trabalho utiliza somente a métrica de dano conhecida como CCD por ser a mais usada na literatura e por apresentar resultados satisfatórios (PALOMINO, 2008, TSURUTA, 2008).

Uma outra alternativa de métrica de dano é a empregada por Palomino; Steffen Jr. (2009), ou seja, o Desvio do Coeficiente de Correlação. Essa métrica usa dois sinais, sendo que o primeiro corresponde à referência (*baseline*) e o segundo à medida feita no teste. O CCD é dado pela Equação (3.6):

$$CCD = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{[\text{Re}(Z_{i,1}) - \text{Re}(\overline{Z_1})][\text{Re}(Z_{i,2}) - \text{Re}(\overline{Z_2})]}{S_{Z_1} S_{Z_2}} \right\} \quad (3.6)$$

em que $\text{Re}(\overline{Z_1})$ e $\text{Re}(\overline{Z_2})$ são as médias das medidas de linha de base e de teste, respectivamente; S_{Z_1} e S_{Z_2} são os desvios padrão das medidas de linha de base e de teste.

Quando o coeficiente de correlação é igual a 1, os sinais têm total correlação. Quanto maior é a diferença entre os sinais, menor é o valor de CCD.

Em seu trabalho, Palomino (2008) utiliza esta métrica, além de outras, tais como, a diferença média quadrática, o desvio percentual da média absoluta (MAPD) e a somatória da diferença média.

3.1.2. Efeitos da Temperatura na Impedância

Quando as cerâmicas de PZT são acopladas a uma estrutura, sua impedância elétrica (tanto a parte real como a imaginária) estão sujeitas a mudanças com a temperatura, conforme a Equação (3.3). À medida que a temperatura varia, as propriedades físicas da estrutura, da camada de cola e da própria cerâmica de PZT também vão se alterarão.

O módulo de Young do material da estrutura e, conseqüentemente, a impedância da estrutura, varia de maneira leve com a temperatura e a expansão térmica do material irá induzir

tensões nas estruturas restritas. Em estruturas complexas, a modelagem analítica dos efeitos da temperatura seria uma tarefa árdua devido aos cálculos de impedância mecânica e aos complexos modelos termoeletromecânicos resultantes da interação estrutura-PZT. Por isso, uma abordagem empírica é utilizada no método da impedância para estudar o efeito da temperatura (KRISHNAMURTHY; LALANDE; ROGERS 1996).

Quanto à camada de cola, trata-se da única interface para transferência de deformação entre a pastilha de PZT e a estrutura. Ora, a variação da temperatura implica em alterar a rigidez da camada de cola. Estudos analíticos e experimentais sugerem que, caso a espessura da camada de cola seja mais fina do que um-terço da espessura da pastilha de PZT, seu efeito pode ser desprezado. Além disso, caso a camada de cola exceda esse critério, frequências de excitação acima de 100 kHz devem ser evitadas (YANG; LIM; SOH, 2008).

Na assinatura da impedância elétrica de uma estrutura monitorada, o efeito da temperatura se manifesta como um deslocamento dos picos de ressonância (ver Figura 3.2). Os experimentos mostram que a variação com a temperatura poderia resultar em valores de métricas de dano da mesma ordem de grandeza em comparação com aqueles encontrados quando de uma alteração associada a um dano estrutural, mesmo em condições de laboratório. Esse deslocamento térmico pode facilmente levar a conclusões errôneas, comprometendo o diagnóstico da integridade estrutural.

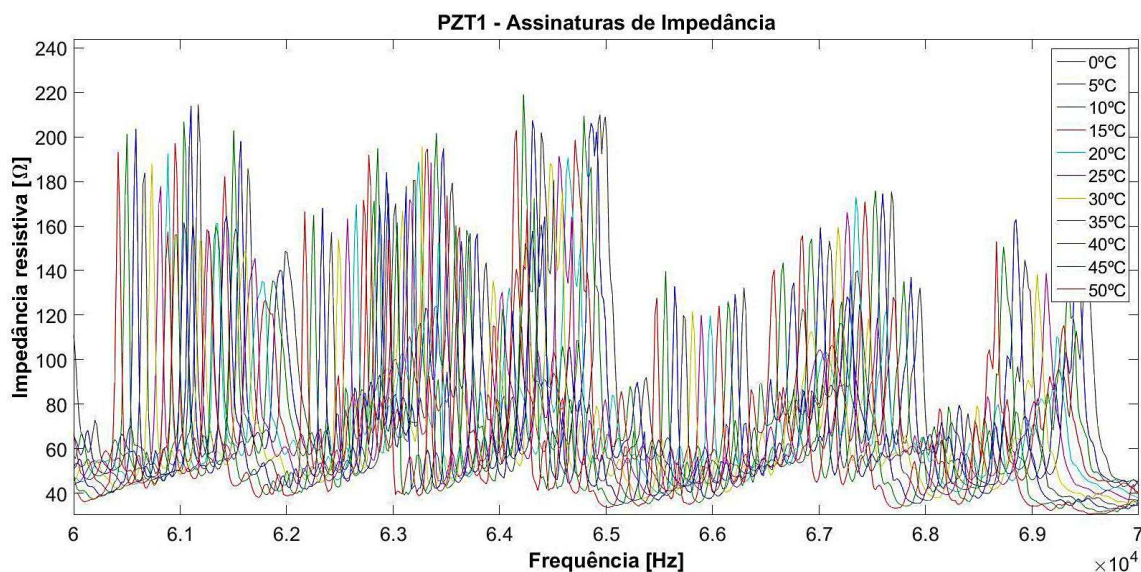


Figura 3.2: Assinaturas de impedância em função da temperatura (RABELO, 2014).

Felizmente, existe uma diferença importante entre o efeito causado pela variação da temperatura e o efeito causado por um dano estrutural na impedância. Mudanças de temperatura geram, ao mesmo tempo, um deslocamento horizontal nas frequências de ressonância, bem como um deslocamento vertical na assinatura de impedância. Além disto, existe variação nas amplitudes dos picos de ressonância. Por outro lado, a variação na impedância resultante de um dano estrutural é, de certa forma, “local e abrupta”, mudando a forma da assinatura. Essa característica permite a utilização de técnicas capazes de isolar e reduzir o efeito da temperatura através de modificações nas lógicas de pós-processamento (SUN et al., 1995).

3.1.3. *Compensação de temperatura: Mudança de frequência efetiva (EFS)*

Os deslocamentos causados pela variação da temperatura podem ser considerados uniformes para uma banda de frequência determinada e limitada. As alterações devido a danos estruturais não seguem a mesma tendência. Esse recurso permite a mitigação de efeitos de variação de temperatura através de um procedimento de normalização de dados (RABELO; FINZI NETO; STEFFEN Jr., 2015).

Em primeiro lugar, o desvio vertical pode ser corrigido pela diferença no valor médio global da linha de base e o padrão de assinatura de teste de acordo com a Equação (3.7):

$$\Delta_v = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n \text{Re}(Z_{i,2}) - \sum_{i=1}^n \text{Re}(Z_{i,1}) \right] \quad (3.7)$$

Como passo seguinte, o coeficiente de correlação $CC_{Z_1 Z_2}$ é usado para determinar a extensão do deslocamento de frequência. O coeficiente $CC_{Z_1 Z_2}$ é obtido com a Equação (3.8), que faz parte do índice de danos CCD:

$$CC_{Z_1 Z_2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{[\text{Re}(Z_{i,1}) - \text{Re}(\overline{Z_1})][\text{Re}(Z_{i,2}) - \text{Re}(\overline{Z_2})]}{S_{Z_1} S_{Z_2}} \right\} \quad (3.8)$$

Se a medida de teste Z_2 é deslocada de n pontos frequências a partir da referência (*baseline*) Z_1 , então o seu coeficiente de correlação será maximizado. Após este procedimento, ambas as assinaturas devem ser totalmente correlacionadas, exceto a parte associada a danos estruturais. Assim, é realizado um procedimento de otimização, procurando o valor máximo do coeficiente de correlação em função da mudança de frequência cobrindo n pontos frequências (atrasados ou avançados). Portanto, esta técnica busca o deslocamento de frequência Δf ótimo e a assinatura de impedância corrigida é escrita de acordo com a Equação (3.9):

$$\text{Re}(Z_{\text{corr},i}) = \text{Re}(Z_{i \pm \Delta f,2}) + \Delta_v \quad (3.9)$$

sendo $\text{Re}(Z_{\text{corr},i})$ a parte real da impedância corrigida na frequência i , $\text{Re}(Z_{i \pm \Delta f,2})$ a parte real da medição de teste deslocada de Δf pontos frequências.

No eixo de frequência, o deslocamento será aplicado para a direita se a temperatura da medição de teste for maior que a temperatura da *baseline*; caso contrário, a mudança será orientada para a esquerda. Por isso, é importante ter leituras de temperatura para todas as medições efetuadas o mais próximo possível dos sensores na estrutura considerada.

3.2. Metodologia de SHM Baseada em Ondas de Lamb

As ondas de Lamb foram descritas pela primeira vez por Horace Lamb em 1917 (LAMB, 1917). Essas são ondas acústicas (elásticas) que se propagam em placas finas, isto é, aquelas cuja espessura é menor do que o comprimento de onda. A propagação das ondas é guiada pelas superfícies da placa. A atenuação é reduzida, permitindo que a onda se propague em grandes distâncias da ordem de metros. Informações detalhadas sobre a teoria das ondas de Lamb podem ser encontradas em livros clássicos, tais como Viktorov (1967) ou Krautkramer (1983).

Assim, as ondas de Lamb, enquanto ondas elásticas, se propagam no plano que contem a direção de propagação e a normal à placa. Essas placas funcionam como guias dessas ondas, dando origem ao aparecimento de um número infinito de modos de propagação, cada um dos modos de propagação tem características bem definidas como velocidade de fase, velocidade de

grupo, etc. Atendendo ao seu deslocamento, os vários modos são designados como simétricos e antissimétricos.

Existem vários métodos para conseguir os modos guiados existentes na placa. O mais popular é provavelmente o método dos potenciais (VIKTOROV, 1967), que obtém as expressões que regem os modos de propagação. Outro bastante conhecido é o chamado método da ressonância transversa ou das ondas parciais (AULD, 1990). A sua vantagem em relação ao anterior é que pode também ser usado quando no monitoramento de placas anisotrópicas.

A seguir temos as conhecidas equações de Rayleigh-Lamb dadas por:

Modos simétricos

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{4k^2 pq}{(q^2 - k^2)^2} \quad (3.10)$$

Modos antissimétricos

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{(q^2 - k^2)^2}{4k^2 pq} \quad (3.11)$$

sendo $2h$ é a espessura de uma placa infinita, ou seja, o comprimento da placa é muito maior que a espessura $2h$, no qual a onda se propaga; k é a constante de propagação da onda; ω é a frequência angular; V_L e V_T são as velocidades de propagação da onda longitudinal e transversal, respectivamente; e p e q são definidos como:

$$p = \sqrt{\frac{\omega^2}{V_L^2} - k^2} \quad (3.12)$$

$$q = \sqrt{\frac{\omega^2}{V_T^2} - k^2} \quad (3.13)$$

As Equações (3.12) e (3.13) podem ser usadas para determinar a velocidade de propagação de um dado modo para uma determinada frequência. São conhecidas pela relação de dispersão e permitem verificar o carácter dispersivo das velocidades (variação com a frequência). Apesar de aparentarem simplicidade, para um valor fixo da frequência, as equações

são transcendentais e o conjunto das suas soluções é formado por um número infinito de valores reais, imaginários puros e complexos da velocidade. As soluções reais representam modos de propagação não amortecidos, enquanto as soluções imaginárias puras e complexas retratam modos que têm um decaimento exponencial.

A técnica de LW é considerada um método não destrutivo (MONNIER, 2006). Normalmente esta técnica é aplicada em materiais que servem como guias de ondas, tais como vigas e placas. A propagação de LW envolve uma certa dificuldade devido a características conhecidas como dispersão e resposta multimodo segundo Viktorov (1967). Esta técnica pode detectar defeitos que aparecem em estruturas esbeltas e que podem ser excitadas por um atuador piezelétrico embutido (FARRAR; LIEVEN; BENENT, 2005). Assim, as ondas de Lamb são ondas elásticas que se propagam através de meios sólidos e, portanto, estão sujeitas a reflexões e atenuações impostas por este meio de propagação. Ao considerar a estrutura monitorada como meio de propagação, danos estruturais também alteram esse meio. Assim, a técnica de LW provou ser uma maneira confiável para encontrar danos estruturais, incluindo sua localização, severidade e tipo de falhas (RAGHAVAN; CESNIK 2005).

Raghavan; Cesnik (2005) definem dois métodos de diagnóstico associados à técnica de LW: *pulse-echo* e *pitch-catch* (Figura 3.3). Em ambos os métodos, o atuador excita a estrutura com um sinal impulsivo, tipicamente um único tom modulado.

No método de *pulse-echo* o atuador é usado como um sensor para o monitoramento dos ecos do sinal ao longo do percurso de propagação. Na abordagem *pitch-catch*, o sinal de pulso é gerado por um atuador e se propaga através da estrutura; assim, um sensor localizado numa região diferente da estrutura recebe o sinal.

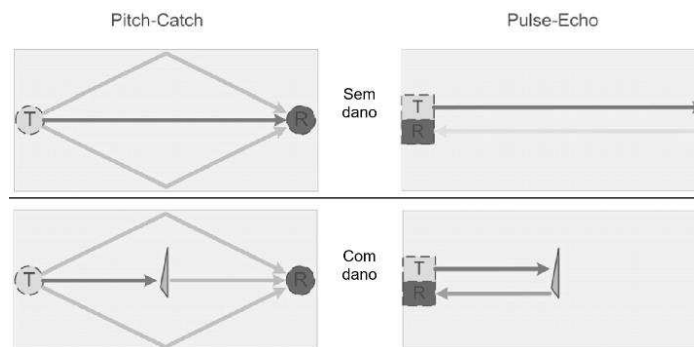


Figura 3.3: Principais técnicas para o diagnóstico por ondas de Lamb (RAGHAVAN; CESNIK 2005).

Ambas as abordagens de LW usita de algoritmos de processamento de sinais digitais para extrair propriedades relacionadas ao meio de propagação do sinal adquirido. Assim, pode-se empregar a Transformada Rápida de Fourier para detectar frequências características (LEMISTRE et al., 1999). Também é possível usar a Transformada *Wavelet* Contínua (CWT) para extrair as características necessárias (SOHN, 2005).

A Figura 3.4 descreve a metodologia utilizando uma excitação pulsada em uma dada frequência até a decomposição do sinal em frequências através da CWT.

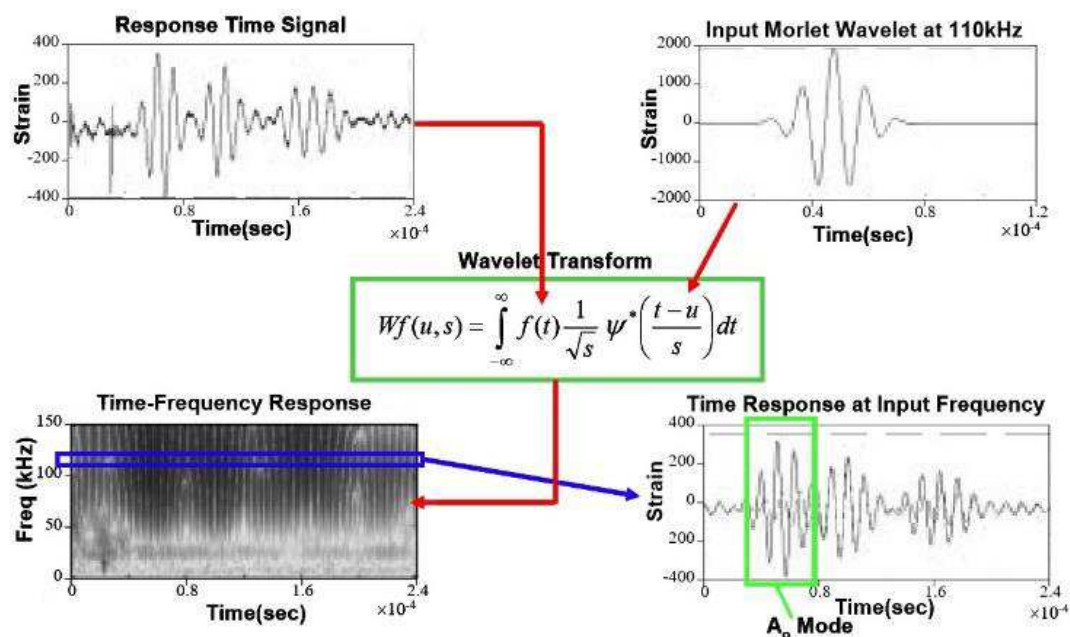


Figura 3.4: Um procedimento de análise de wavelets para extrair uma característica sensível a danos (RAGHAVAN; CESNIK 2005).

Desse modo, analisando a janela de dados e procurando o pico do sinal, pode-se definir o instante de tempo em que ocorre o chamado Tempo de Voo (*Time of Flight* - TOF) e o valor de pico num dado instante. Além disso, a energia do sinal pode ser usada para fins de caracterização (SOHN, 2005). Uma vez que o sinal é classificado como transitório, ferramentas de análise transitória como a transformada *wavelet* contínua é empregada para extrair informações adicionais dos dados adquiridos (WANG; CHANG 2000).

3.2.1. Índice de Dano e localização de dano

Durante a propagação da onda Lamb em uma placa infinita, a interação da onda com o dano desencadeia uma dispersão na onda, conforme caracterizada pela reflexão, transmissão ou conversão de modo. Diferentes tipos de danos, localização e gravidade diferentes causam fenômenos de dispersão de ondas. Assim, qualquer alteração de material na placa – como resultado dos muitos tipos de danos mencionados – influencia as características de propagação da onda, tais como a velocidade de propagação, amplitude do sinal e tempo de voo. De acordo com a técnica básica de detecção de danos, esses parâmetros do sinal de onda da placa danificada são comparados com os parâmetros de onda do sinal transmitido quando a placa é sem defeitos. Toda diferença nos parâmetros dos sinais de onda entre a placa danificada e a saudável expõe reflexões de quaisquer locais de dano existentes e é considerada uma boa indicação da presença de um defeito na placa.

Muitos pesquisadores neste campo têm seguido diferentes procedimentos para detectar danos (HU et al., 2008, YU et al., 2012). Alguns vão mais longe para localizar e medir a severidade dos danos (PUTKIS; DALTON; CROXFORD, 2015). Para fins de detecção apenas, a técnica baseada na comparação de sinais de ondas de Lamb alcançados a partir de uma estrutura defeituosa com os obtidos a partir da condição saudável (dados da *baseline*) da estrutura são amplamente utilizados e serão adotados no próximo capítulo. No entanto, condições operacionais e ambientais variáveis, como temperatura e ruído, podem causar uma variação no sinal de onda e, portanto, esse método pode levar a uma comparação falsa se essas condições não forem estáveis. Normalmente, os modos mais baixos S_0 e A_0 são utilizados principalmente para a detecção de danos considerando seus méritos, ou seja, por tempo de propagação e velocidade para estimar a distância.

O primeiro método de diagnóstico (Figura 3.3) propõe o uso de pares de sensores e atuadores localizados nas extremidades da estrutura. Desta forma, um sinal pulsado é enviado de uma extremidade à outra da estrutura, acumulando informações sobre a estrutura na forma da propagação nesse meio. Ao se instalar o dano, a propagação é alterada, tornando possível a determinação do dano.

No método *pulse-echo*, um único elemento de PZT age como atuador e sensor excitando a estrutura e, logo em seguida, é adquirido o sinal ecoado por reflexões no meio de propagação.

Quando um dano se localiza na estrutura, esse altera o padrão anterior de reflexão, tornando possível a sua identificação

O método *pulse-echo* pode não ser sensível o suficiente, porque ondas ecoadas do dano percorrer mais distância e perder informações importantes sobre o defeito. No entanto, muitos estudos sugerem um método *pulse-echo* para localizar o dano na estrutura.

Nos próximos capítulos desta tese, será utilizado o método *pulse-echo* que em conjunto com a impedância eletromecânica para localizar e quantificar o dano em uma estrutura aeronáutica, considerando o efeito da temperatura. Para inspecionar a presença de um defeito, uma rede de transdutor/receptor é colocada no centro da estrutura, monitorando a mesma à procura de dano na estrutura. Essa técnica de ondas de Lamb combinada com impedância eletromecânica será melhor discutida no capítulo IV.

3.2.2. *Efeito da variação da temperatura nas ondas de Lamb*

Entre as condições ambientais, a temperatura mostrou ser um dos efeitos dominantes sobre as ondas Lamb. Isso porque ela pode ter um efeito sobre o sinal da *baseline* tão forte quanto o dano (CAWLEY; CEGLA; GALVAGNI, 2012). Para contornar esse problema do efeito da temperatura, muitos pesquisadores conduzem investigações teóricas e experimentais sobre a variação na propagação de ondas guiadas causada por flutuações de temperatura na última década (ANDREWS et al., 2008, RAGHAVAN; CESNIK, 2008, KIJANKA et al., 2008, PUTKIS; DALTON; CROXFORD, 2015, LEE; MANSON; STASZEWSKI, 2003, MANSON; LEE; STASZEWSKI, 2004). Além disso, várias estratégias para compensação de temperatura da onda Lamb foram desenvolvidas nos últimos anos.

Antes de compensar o sinal da onda de Lamb é necessário compreender os efeitos da temperatura sobre o sinal variante com o tempo $x_{(t)}$, que podem ser observados como uma mudança na amplitude e fase do sinal (Figura 3.5).

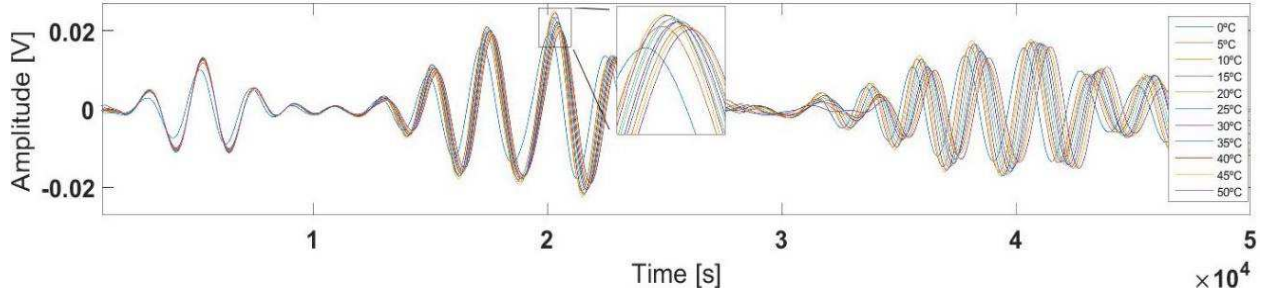


Figura 3.5: Efeito da variação de temperatura nas ondas de Lamb.

Com base nisso, pode-se supor que um efeito de temperatura em um sinal LW pode ser aproximado por um sinal de alongamento de tempo $x_{(\lambda t)}$, como mostra a Equação (3.14). Posteriormente será abordado o efeito na amplitude.

$$x_{(t)} \xrightarrow{\text{Temp}} x_{(\lambda t)} \quad (3.14)$$

no qual λ é a constante tempo-estiramento (HARLEY; MOURA, 2012). Essa modificação pode ser vista como uma alteração na fase do sinal instantâneo. A transformada de Hilbert pode ser usada como uma ferramenta para extrair tal característica (KIJANKA et al., 2013). Por meio dessa abordagem, obtém-se um sinal complexo:

$$Z_{(t)} = A_{(t)} e^{j\phi(t)} \quad (3.15)$$

onde ϕ é a fase do sinal.

Se o sinal é afetado somente pela temperatura, espera-se que sua fase mude. Portanto, a influência da mudança de temperatura pode ser reduzida se o desvio de fase e a *baseline* forem conhecidos. O desvio de fase do sinal modificado é determinado usando a seguinte relação:

$$Z'_{(t)} = Z_{(t)} e^{j[\phi_B(t) - \phi(t)]} \quad (3.16)$$

em que $\phi_B(t)$ é a mudança de fase relacionada à linha de base.

O sinal adquirido pode ser convertido da sua forma analítica de volta para o domínio do tempo, produzindo o sinal com a influência da temperatura compensada (AMBROZINSKI et al., 2013).

Para a alteração na amplitude pode se perceber um comportamento linear em materiais metálicos, ou seja, a onda pode ser descrita como a Equação (3.17) a seguir:

$$Z''_{(t)} = A' Z'_{(t)} \quad (3.17)$$

no qual A' é uma constante relacionada à influência da temperatura.

Deve-se salientar que procurar compensar todos os sinais lidos é um esforço computacional muito grande no processo de localização do dano. Por isso, é usual contrabalancear apenas o sinal da baseline para a temperatura de aquisição do sinal. Esse processo será melhor explicado no próximo tópico.

3.2.3. Métodos de compensação da temperatura

Esse método de compensação de temperatura é baseado na reconstrução do sinal *baseline* e na compensação desse sinal para a temperatura do sinal de monitoramento. A transformada de Hilbert é usada para compensar a fase do sinal da *baseline*. A busca de correspondência ortogonal (*Orthogonal matching pursuit* - OMP) é utilizada para contrabalancear a amplitude do sinal.

Conforme Ambrozinski (2013), o deslocamento relacionado à temperatura dos sinais de onda de Lamb pode ser observado como uma mudança na fase instantânea. De acordo com a literatura (WANG et al., 2014), o tempo de voo (*time of flight* - TOF) de pacotes de onda em sinais de onda Lamb tem uma boa relação linear com a temperatura. Assim, supõe-se que a diferença de fase instantânea dos dois sinais de onda de Lamb com temperaturas diferentes é proporcional à diferença de temperatura. Isso pode ser expresso por:

$$\arg S_2(t) - \arg S_0(t) = \frac{T_2 - T_0}{T_1 - T_0} [\arg S_1(t) - \arg S_0(t)] \quad (3.18)$$

onde T_0 , T_1 e T_2 são as temperaturas para as três condições consideradas, $S_0(t)$, $S_1(t)$ e $S_2(t)$ são os sinais de onda de Lamb nas temperaturas T_0 , T_1 e T_2 , respectivamente, \arg denota a fase instantânea do sinal.

Consoante com o que foi mencionado o desvio relacionado com a temperatura dos sinais da onda de Lamb pode então ser compensado. Conforme a Equação (3.18) são necessários dois sinais de onda de Lamb com temperaturas diferentes para fazer a compensação. Entre os dois sinais de onda de Lamb, um é a própria *baseline* que é compensada à temperatura do sinal atual. O outro é o sinal de referência que, em conjunto com o *baseline*, é utilizado para determinar a relação entre a diferença de fase instantânea e a diferença de temperatura.

$S_b(t)$ é o sinal de *baseline* na temperatura T_b , $S_r(t)$ é o sinal de referência na temperatura T_r e $S_a(t)$ é o sinal atual à temperatura T_a . Por meio da transformada de Hilbert, a fase instantânea do sinal da onda de Lamb pode ser extraída. Assim, para compensar a fase instantânea do sinal referente à *baseline* $S_b(t)$ para a fase instantânea do sinal atual $S_a(t)$ tem-se a seguinte fórmula:

$$\tilde{S}_b(t) = \text{Re} \left\{ \left(S_b(t) + i\hat{S}_b(t) \right) e^{i\phi(t)} \right\} \quad (3.19)$$

no qual $\phi(t) = \frac{T_a - T_b}{T_r - T} [\arg S_r(t) - \arg S_b(t)]$, $\hat{S}_b(t)$ é a transformada de Hilbert do sinal da *baseline* $S_b(t)$, $\text{Re}\{\cdot\}$ indica a parte real do sinal analítico, $i = \sqrt{-1}$ é o imaginário puro, $\tilde{S}_b(t)$ é o sinal após a compensação de fase instantânea do sinal da *baseline* $S_b(t)$. Em seguida, é importante compensar a amplitude de $\tilde{S}_b(t)$ com a amplitude do sinal atual $S_a(t)$. Esse problema é equivalente a representar $S_a(t)$ usando $\tilde{S}_b(t)$ e ser expresso como:

$$\min \left\| S_a(t) - \varsigma \tilde{S}_b(t) \right\|_2^2 \quad (3.20)$$

em que ς é o coeficiente linear, $\min \|\bullet\|$ é a norma ℓ_2 do vetor. A questão da otimização associado à Equação (3.20) pode ser reescrita como:

$$\min \|S_a(t) - \beta \bar{S}_b(t)\|_2^2 \quad (3.21)$$

onde β é o coeficiente de representação, $\bar{S}_b(t)$ é a norma unitária ℓ_2 de $\tilde{S}_b(t)$. $\bar{S}_b(t)$ é calculada por:

$$\bar{S}_b(t) = \frac{\tilde{S}_b(t)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} (\tilde{S}_b(t))^2 dt}} \quad (3.22)$$

Para solucionar a Equação (3.21), aplica-se o OMP (PATI; REZAIIFOR; KRISHNAPRASAD, 1993). OMP é um algoritmo iterativo da família *Greedy*, capaz de fornecer uma resposta para o problema de otimização:

$$\min_x \|s - D_x\|_2^2 \quad \text{sujeito a } \|x\| \leq K \quad (3.23)$$

no qual s é dado vetor de medição, D é dado pela matriz dicionário (HUANG; AVIYENTE, 2006), x é o vetor esparso que é desejável para ser recuperado, a ℓ_0 pseudo-norma $\|x\|_0$ é o número de componentes não nulos em x , e K é a suposta dispersão de x .

Esse estudo usa o OMP para calcular o coeficiente de representação $\beta \cdot \bar{S}_b(t)$ como o único átomo para formar o dicionário. Por meio de uma iteração, o coeficiente β de representação equivale a:

$$\beta = \bar{S}_b(t)^\oplus S_a(t) = \bar{S}_b(t)^\top (\bar{S}_b(t) \bar{S}_b(t)^\top)^{-1} S_a(t) = \langle \bar{S}_b(t), S_a(t) \rangle \quad (3.24)$$

sendo que $\bar{S}_b(t)^\oplus$ é o pseudo-inversa de Moore-Penrose de $\bar{S}_b(t)$, $^\top$ denota o vetor transposto, -1 indica a inversão da matriz, $\langle \cdot, \cdot \rangle$ designa a operação de produto interno.

Finalmente, o sinal de compensação de temperatura do sinal da *baseline* $S_b(t)$ para o sinal atual $S_a(t)$ pode ser expresso por:

$$S_{ta}(t) = \langle \bar{S}_b(t), S_a(t) \rangle \bar{S}_b(t) \quad (3.25)$$

no qual $S_{ta}(t)$ é o sinal compensado.

CAPITULO IV

DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento de um sistema de SHM que utiliza duas técnicas, a da impedância eletromecânica junto com a das ondas de Lamb, no qual uma rede de sensores posicionada de forma a abranger uma grande área de monitoramento é utilizada. O *hardware* e o *software* foram implementados para interagir com ambas essas técnicas.

4.1. Introdução

O estudo de diferentes técnicas de SHM tem atraído o interesse de muitos centros de pesquisa e indústrias dispostos a monitorar a integridade das estruturas e evitar falhas devido a trincas, corrosão, delaminação (materiais compostos) e vários outros tipos de danos. Dessa forma, novas arquiteturas de *hardware* vêm surgindo para atender a demanda das empresas quanto ao monitoramento da integridade estrutural.

Um bom exemplo foi o apresentado por Taylor et al. (2010), que desenvolveu um *hardware* compacto que funciona como sensor e que é usado apenas para coletar dados de aceleração e impedância elétrica. O sensor incorpora um *chip* que resolve as medições de impedância elétrica até 100 kHz e, em seguida, detecta dano estrutural.

Com o intuito de atender a procura por monitoramento de grandes estruturas implementando *hardware* de baixo custo, surgem novos sistemas usando o conceito de multi-sensor. Essa demanda introduziu um novo problema aos sistemas miniaturizados que podem acompanhar grandes estruturas, destacando restrições sobre a capacidade de aquisição de dados (dentre outras). Entretanto, Finzi Neto (2010) apresentou um sistema de aquisição de impedância de baixo custo por meio de multiplexadores para possibilitar o monitoramento de sinais de diferentes sensores. Assim, as implementações práticas de redes de sensores aplicadas a sistemas de SHM realizadas por diferentes pesquisadores permitiram estudos para superar desafios em uma variedade de sistemas de infraestrutura, tais como pontes e viadutos, que tiveram várias implantações bem-sucedidas (KURATA et al., 2013; PECKENS et al., 2014; TORFS et al., 2013).

Posteriormente, Cortez; Filho; Baptista (2015) elaboraram um sistema inteligente de sensor sem fio para aplicações de SHM baseadas na impedância, com características de multi-sensores e compensação automática para os efeitos de temperatura.

O presente trabalho incorporou a técnica de Finzi Neto (2010) para garantir um acesso maior a rede de sensores, sendo que o *hardware* de baixo custo desenvolvido também incorpora, além da técnica de ISHM, a técnica LWSHM, de forma a garantir que interajam entre si – garantindo realizar em melhores condições o prognóstico de dano para a estrutura e considerando também o efeito da temperatura.

4.2. Protótipo Proposto

O protótipo do sistema de SHM utilizado incorpora um projeto de *hardware* e *software* integrados para implementar a interação das duas técnicas utilizadas (ISHM e LWSHM). Como ilustrado na Figura 4.1, o sistema analisa periodicamente a estrutura servindo-se apenas de alguns sensores estratégicos (essa análise engloba apenas a análise da impedância). Quando detecta alguma alteração, ou seja, um possível dano na estrutura, inicializa-se uma análise dos sinais de impedância eletromecânica em cada sensor da rede (já compensando o efeito da temperatura). Assim, é calculado o valor de *threshold* e a métrica de dano. Caso nenhum dano seja detectado, o sistema entra em modo de espera antes de começar um novo ciclo. Por outro lado, caso algum dano seja detectado, o sistema seleciona, a partir das curvas de impedância de cada sensor da estrutura, a melhor frequência para cada sensor para implementar a análise com

as ondas de Lamb. Nesse sentido, é selecionada a frequência onde a curva de impedância tem seu menor valor dentro da faixa de frequência utilizada, em outras palavras, onde a onda elástica de Lamb terá maior amplitude, facilitando a etapa de localização de dano (onde a eficiência do atuador é máxima – segundo Liang; Sun; Rogers (1994 b). Essa etapa tem a função de estimar e localizar o dano pelo método da triangulação e o TOF da onda por meio de 5 sensores para essa tarefa (note também que o efeito da temperatura é considerado nessa etapa). Com o dano identificado e localizado, inicia-se à análise estatística que levará, finalmente, ao diagnóstico do estado da estrutura.

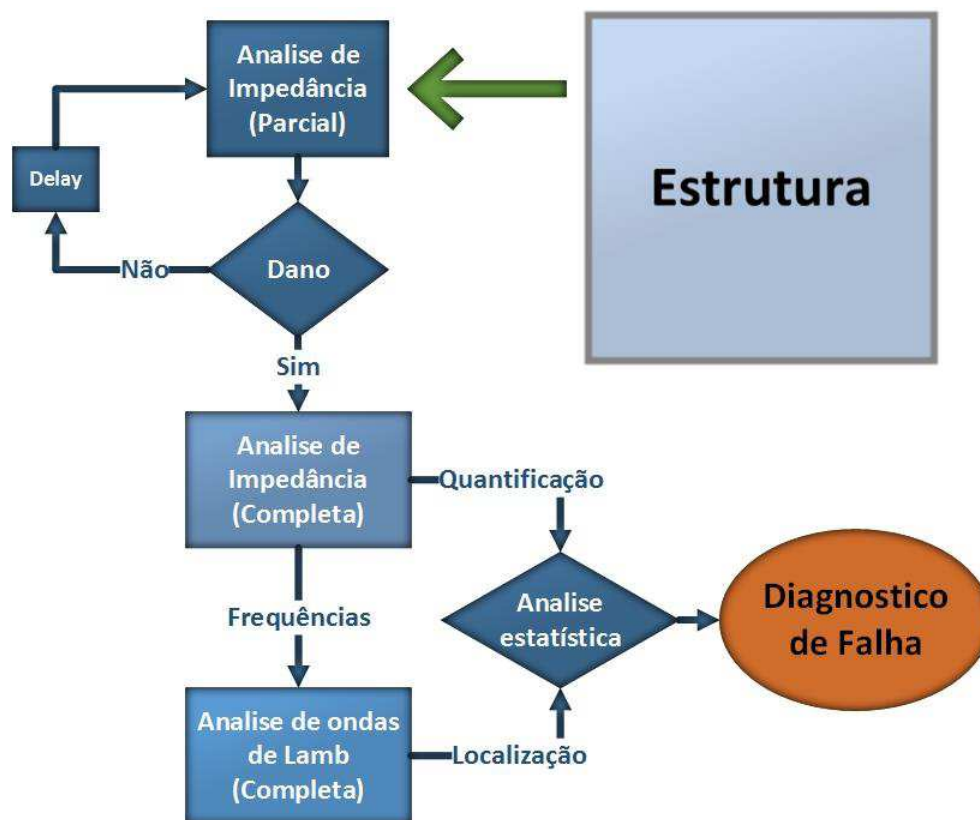


Figura 4.1: Diagrama funcional do sistema de SHM proposto.

O sistema proposto utiliza multiplexadores de forma semelhante à topologia proposta por Finzi Neto (2010) em sua rede de sensores. Além disso, foi implementado no *hardware* uma segunda rede de multiplexadores que possibilita operar simultaneamente com as duas técnicas de SHM aqui consideradas (ISHM e LWSHM), sendo essas separadas por relés sólidos de alta velocidade.

A seguir, são descritas as características básicas de *hardware* e *software* dos componentes principais do sistema de SHM proposto.

4.3. *Hardware*

O *hardware* desenvolvido nesta tese (Figura 4.2) usa uma rede de multiplexadores e amplificadores de alta desempenho junto com outros componentes eletrônicos para monitorar um sistema de engenharia quanto à sua saúde estrutural.

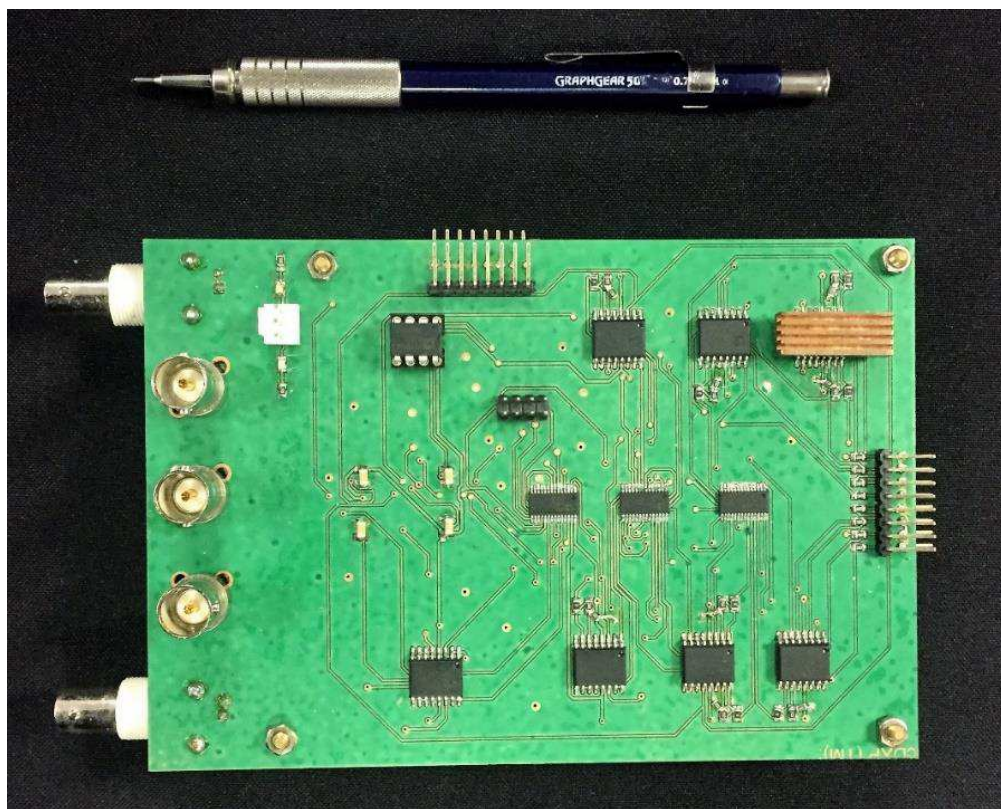


Figura 4.2: *Hardware* desenvolvido.

Se um número n de pastilhas de PZT está instalado em uma estrutura, ele não pode ser analisado simultaneamente, uma vez que a excitação mecânica de um transdutor de PZT pode influenciar a medição. Assim, cada PZT deve ser analisado de maneira individual, sendo também necessário um bloco de sistema de comutação (*switching system* - SS) para oportunamente ativar/desativar cada transdutor (Figura 4.3). O esquemático do *hardware* pode ser encontrado Anexo A.

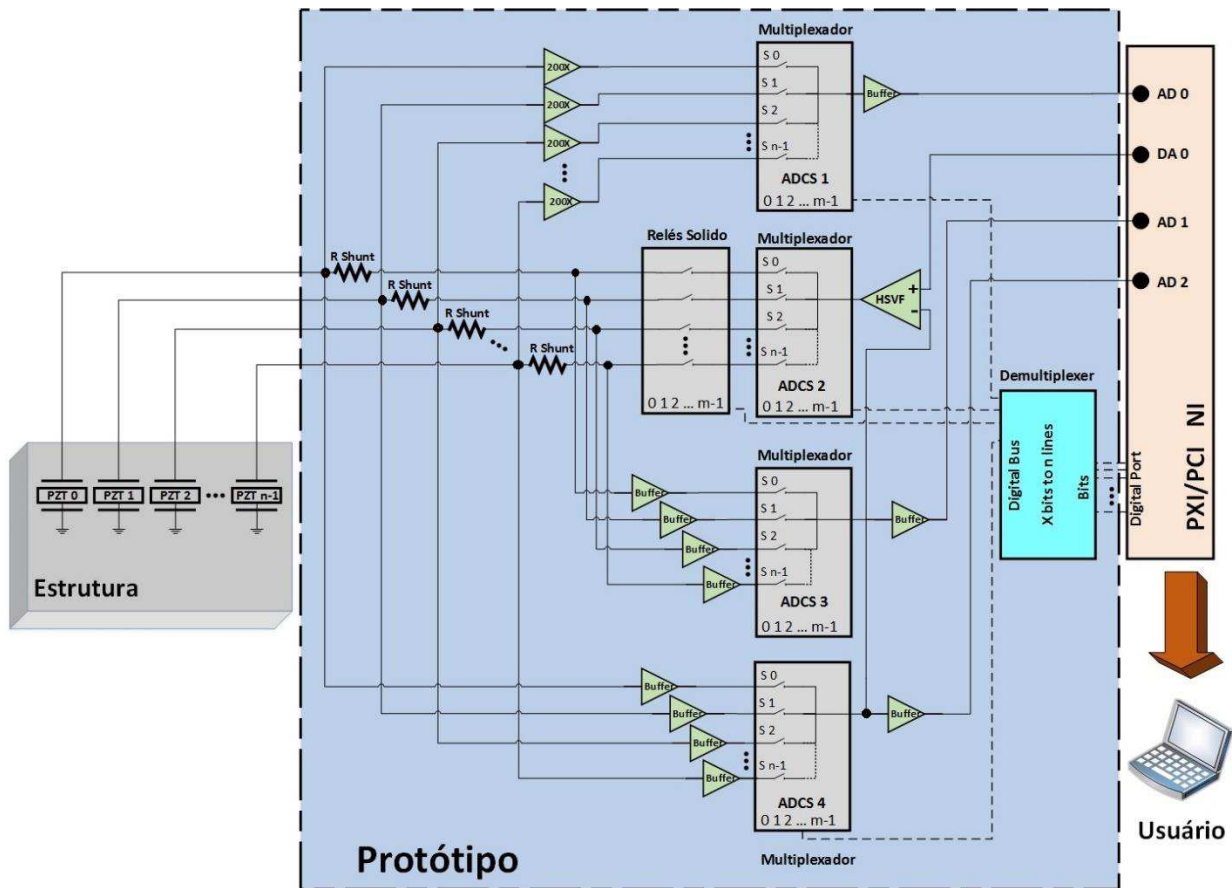


Figura 4.3: Arquitetura do sistema proposto.

Comutadores analógicos controlados digitalmente (*analog digitally controlled switches* - ADCS) de estado sólido são utilizados para comutar a rede de pastilhas de PZT. Cada um é capaz de comutar n saídas controladas digitalmente para uma entrada comum. Para a aquisição do sinal necessário para a técnica ISHM, precisa-se de três *switches* para cada PZT em uma configuração que compensa a não-linearidade de cada ADCS. O ADCS 4 fornece o *feedback* para o seguidor de tensão de alta velocidade (HSVF) para equiponderar qualquer não linearidade (capacitâncias de entrada/saída, resistência em série, etc.) e queda de tensão sobre o resistor R_{shunt} e ADCS4. O ADCS 2 liga diretamente a saída do DAQ's (PXI-5412) a cada pastilha de PZT selecionada (note que nesta configuração os relés sólidos comutam em sincronia com ADCS 2; os relés sólidos têm função significativa apenas para a aquisição das ondas de Lamb). ADCS 3 e ADCS 4 conectam o PZT selecionado a AD 1 e AD 2 (PXI-5105) fornecendo as quantidades $V_{Rshunt}(\omega, t)$ e $V_{ex}(\omega, t)$ respectivamente, necessários para calcular a impedância da estrutura (ver

item 3.1). Já para a aquisição do sinal referente à técnica LWSHM, três *switches* são também primordiais para cada pastilha de PZT, usando o ADSC 4 para *feedback* (semelhante à impedância). O sinal de sensor é amplificado em 200 vezes e em seguida o ADSC 1 liga o sinal amplificado do PZT selecionado ao conversor analógico digital AD 0 (PIX-5105), e o ADSC 2 liga o gerador de sinal DA 0 (PXI-5412) ao PZT escolhido. Como o PZT pode ser considerado uma carga capacitiva, ou seja, pequenos resíduos de tensão podem saturar os amplificadores de alta performance, é necessário estabilizar os mesmos com resistores de referência. Além disso, a rede de reles sólidos tem a função de remover a influência do gerador de sinal sobre o PZT que está sendo usado para realizar a coleta, visto que o sinal a ser adquirido tem amplitudes da ordem de *microvolts*, chegando em algumas situações a nano volts.

Note que todo o controle do *hardware* desenvolvido é implementando em *LABVIEW*, conforme será melhor explicado à frente.

4.4. Software

O *software* proposto integra duas partes: o controle do *hardware* e o processamento dos sinais. Na Figura 4.4 está ilustrada um fluxograma da rotina para o diagnóstico de dano proposta nesta tese.

Quando o sistema é inicializado (já devidamente configurado com os parâmetros da estrutura e com o banco de dados das *baselines*), são acionados apenas alguns dos sensores à procura de alguma alteração na estrutura. Caso não seja detectada nenhuma alteração, o sistema aguarda um determinado tempo e verifica novamente; caso alguma alteração seja detectada, nesse caso, a temperatura é compensada, para que não ocorra uma eventual tomada de decisão equivocada – sendo para isso consultado um banco de dados *baselines* obtidas antes – e começa uma análise completa de impedância envolvendo todos os sensores em uma faixa de frequência já pré-definida. Logo após, é acionado o algoritmo de localização de dano (LW), a partir dos sinais de ondas de Lamb adquiridos. Feita a compensação da temperatura, a posição do dano é determinada. Faz-se, finalmente, uma análise estatística para definir o valor de *threshold* e a métrica de dano da impedância, assim como a probabilidade de localização do dano, concluindo em seguida o diagnóstico de falha.

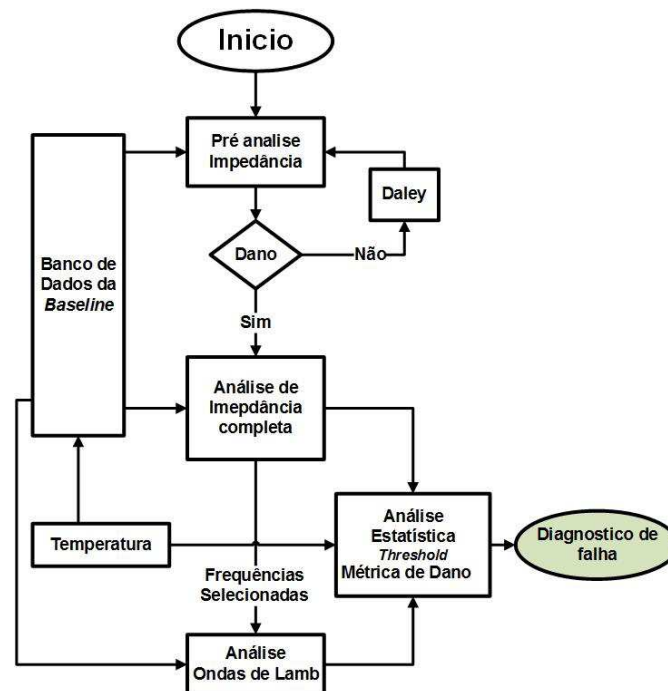


Figura 4.4: Fluxograma do *software* do sistema.

O *software* aqui apresentado foi dividido em duas partes: a primeira tem a ver com o controle do *hardware* (protótipo) que foi implementado em *LABVIEW*[®] e, a segunda, contém o processamento que é executado em plataforma *MATLAB*[®]. Ambas apresentam certa complexidade. Para melhor compreensão, a primeira parte é mostrada através de um fluxograma conforme as Figuras 4.5 e 4.6 e a segunda será discutida através de um fluxograma e matematicamente.

4.4.1 Controlador

Conforme comentado, devido a sua complexidade, o controlador do *hardware* será mostrado através de dois fluxogramas (Figuras 4.5 e 4.6). Nesses estão ilustradas a lógica de controle e da análise prévia realizada pelo *LABVIEW*[®], sendo que a lógica de controle completa (em *LABVIEW*[®]) pode ser encontrada no anexo A.

Antes de inicializar o *hardware* é importante ajustar alguns parâmetros no *LABVIEW*[®] como, por exemplo, a faixa de frequência, o número de transdutores, o número de medidas, tempo de espera entre experimentos, dentre outros. Na Figura 4.5 mostra-se o fluxo de controle do *hardware*, onde é possível ver passo a passo como é processada a aquisição do sinal de

impedância e, posteriormente, das ondas de Lamb. Já na Figura 4.6 caracteriza uma execução em paralelo com o processamento da impedância (do fluxograma da Figura 4.5), gerando informações necessárias para a aquisição das ondas de Lamb como as frequências de excitação. O sinal da impedância resulta da tensão dividida pela corrente na pastilha de PZT em análise; assim, esse já é calculado pelo próprio *LABVIEW*[®] e armazenado para pós-processamento.

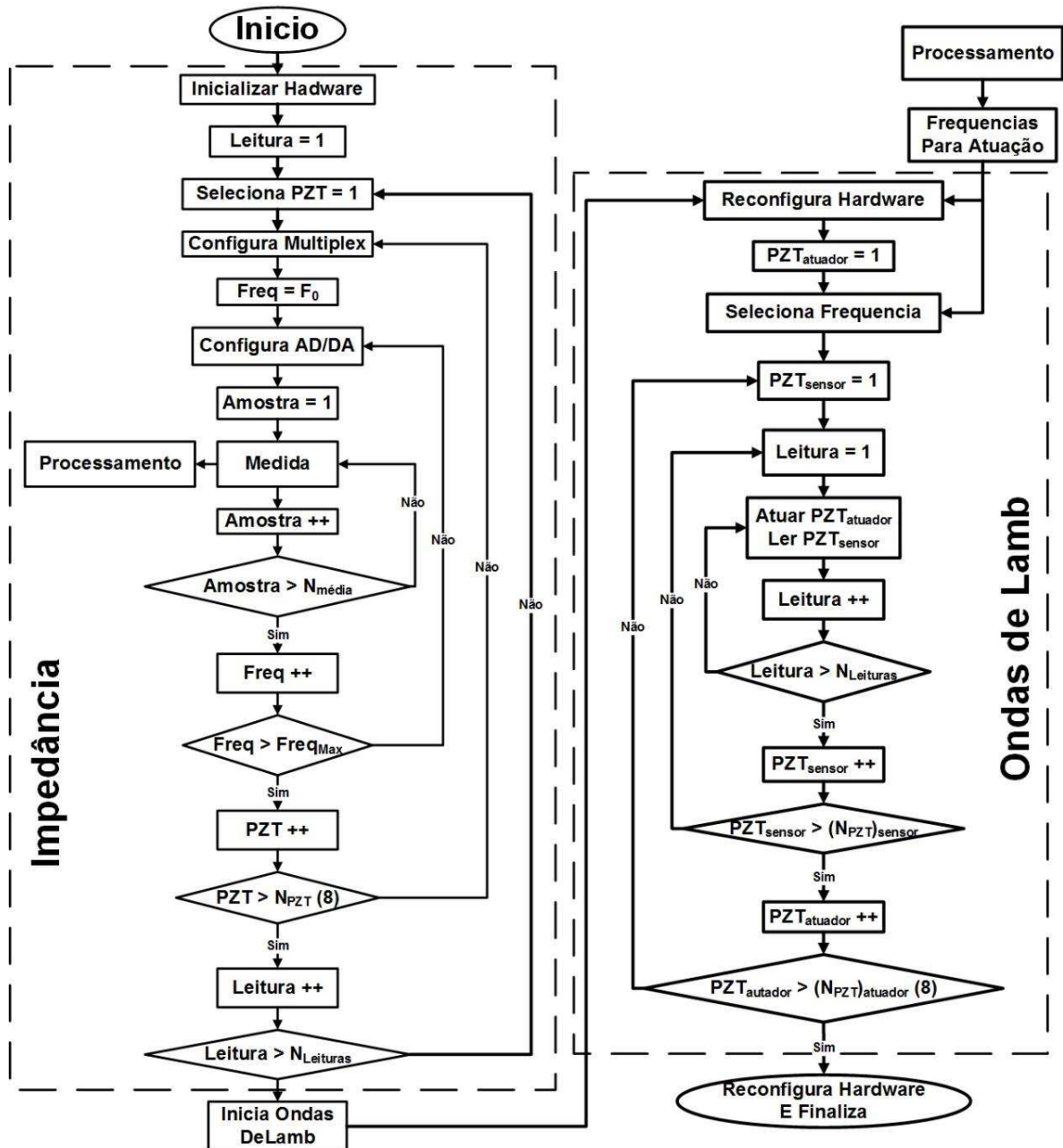


Figura 4.5: Fluxograma de controle do *hardware* do protótipo proposto.

Ao inicializar o *hardware*, o controlador configura o conversor AD/DA e a rede de multiplexadores para acessar cada pastilha de PZT. Um *trigger* digital que tem a função de sincronizar a geração de sinal com a aquisição, com a rede de sensores (multiplexadores) e com os relés sólidos é ajustado. Quando cada etapa termina, o sinal é armazenado para pós-processamento na plataforma *MATLAB*®.

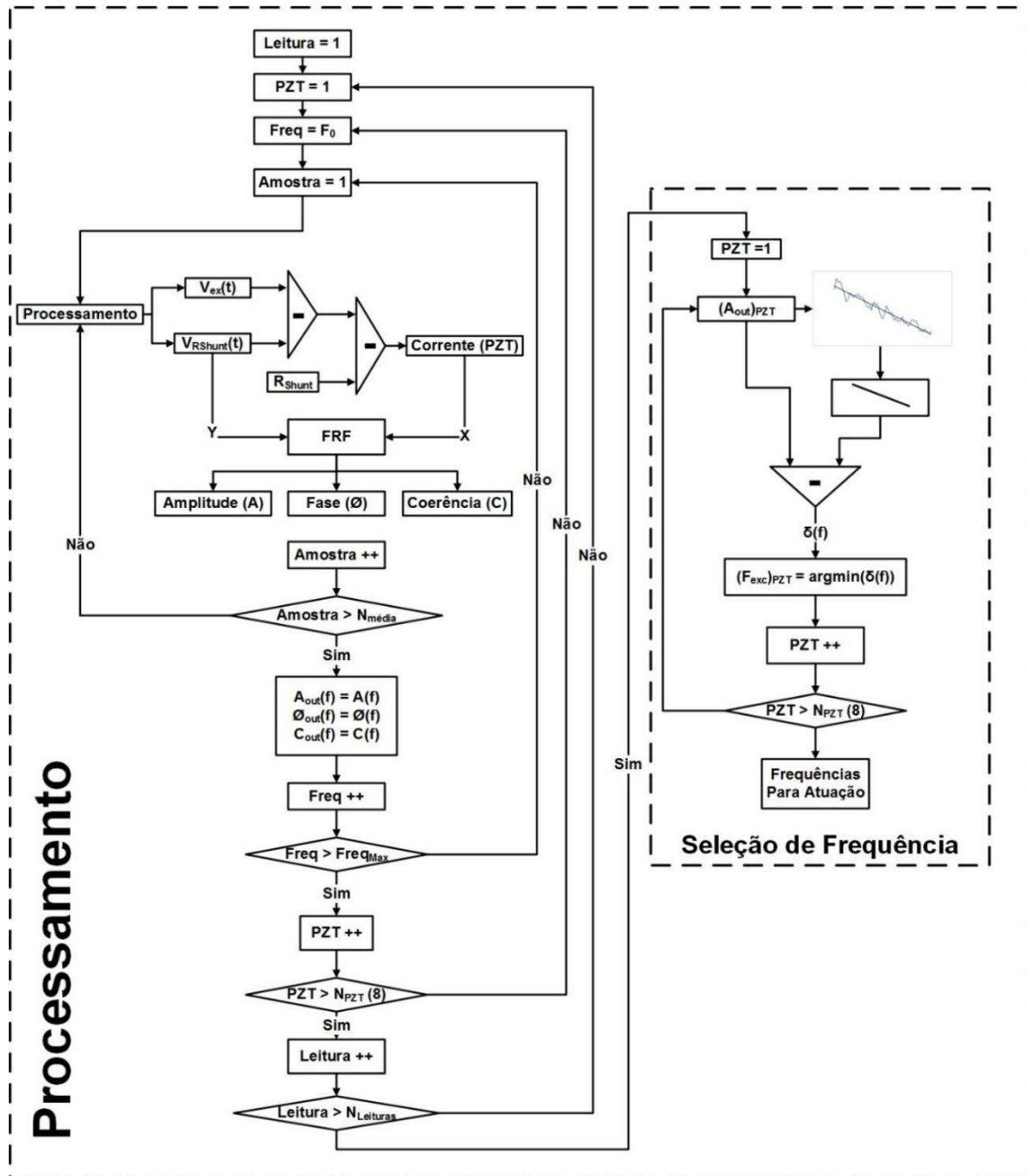


Figura 4.6: Fluxograma para aquisição da impedância e seleção de frequências.

Uma vez que todos os sinais de impedância forem coletados (ou seja, A_{out} tiver sido calculado para cada sensor), inicia-se a seleção de frequência (Figura 4.6). Para esta seleção é obtida a curva de tendência e subtraída da assinatura de impedância de cada PZT (é utilizada a média, caso sejam coletadas mais de uma assinatura) e é selecionada a frequência ($(F_{exc})_{PZT}$) que corresponde ao menor valor da impedância. Com a frequência devidamente escolhida, dá-se início à aquisição das ondas de Lamb (Figura 4.5).

Para inicializar a aquisição de ondas de Lamb, o *hardware* é reconfigurado selecionando a nova rede de sensores. Usando as frequências de excitação ($(F_{exc})_{PZT}$) anteposta, os sinais são coletados e armazenados. Note que esse sistema foi desenvolvido para trabalhar na configuração *pulse-echo* com multi-transdutores com o mesmo princípio de multiplexador que o encontrado no sistema de impedância. A quantidade de sinais a serem coletados pode ser pré-selecionada no início do programa. Assim, para o algoritmo de localização de dano é fundamental à coleta de cinco sensores, sendo um deles o da posição central e (Figura 4.8). Desta forma, a pastilha de PZT localizada na posição central (terceiro dos cinco sensores) é excitada cinco vezes (obedecidos intervalos de 100ms), sendo feita uma aquisição para cada um dos cinco sensores. O processo se repete para os n PZTs (se necessário pode-se utilizar apenas três sensores, caso o número de pastilhas de PZT seja pequeno).

4.4.2 Localização do dano

A seguir serão descritas as etapas necessárias para localização do dano utilizando ondas de Lamb. Deve-se destacar que o efeito da temperatura é uma fonte de erro a ser considerada, devendo ser compensado utilizando a metodologia apresentada no item 3.2.3.

A Figura 4.7 mostra o fluxograma para localização de dano, onde é possível visualizar cada etapa do processo.

Quando o algoritmo é inicializado, são definidas as configurações iniciais como, por exemplo, o número de sinais a serem analisados, as dimensões da estrutura analisada, as posições dos transdutores, o número de pontos, a frequência de amostragem, dentre outros. Como compensar todos os sinais coletados das ondas de Lamb é um esforço computacional demasiado, é preferível compensar a *baseline* correspondente a temperatura selecionada (ver item 3.2.3).

Terminada a etapa de compensação das *baselines* os sinais coletados passam por um filtro passa alta de resposta de impulso finito Savitzky-Golay (*finite impulse response – FIR*) com frequência de corte de 1kHz. Esse filtro tem a função de minimizar o ruído de vibração proveniente do motor da câmara climática (a câmara climática será descrita no item 5.1).

Junto com o envelope é determinado o TOF de cada sinal. De posse do TOF é possível resolver o problema de minimização.

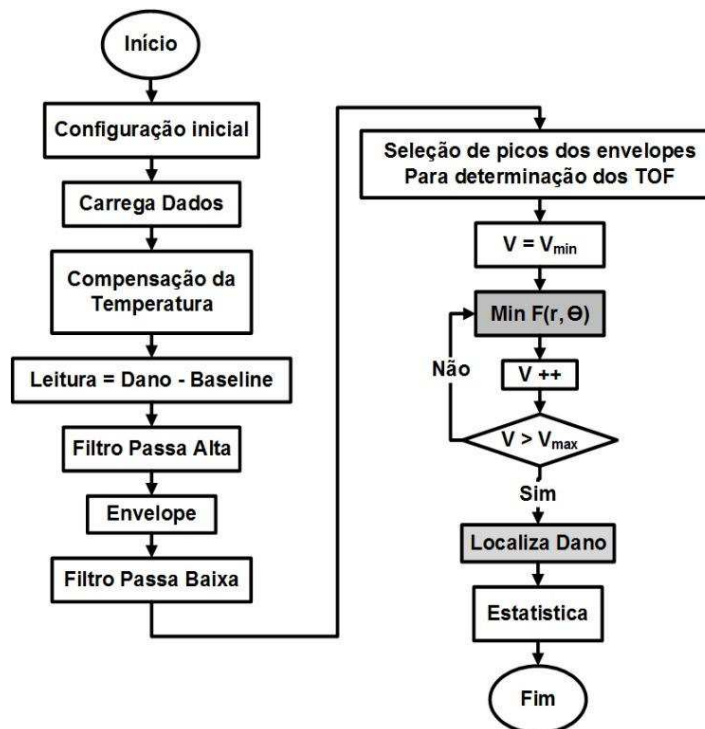


Figura 4.7: Fluxograma para localização do dano.

O problema de minimização foi resolvido utilizando a função `gs()` (UGRAY et al, 2007) de busca global disponível na plataforma MATLAB®. As variáveis de projeto consideradas foram R e θ , que designam a localização do dano na placa em um sistema de coordenadas polar. A partir destas coordenadas é possível determinar as coordenadas cartesianas de forma bastante simples, conforme as equações:

$$x^* = R \cos(\theta) \quad (4.1)$$

$$y^* = R \sin(\theta) \quad (4.2)$$

Para o cálculo da função objetivo, é fundamental conhecer os TOF's associados a cada uma das pastilhas de PZT usadas como sensores. Esses são obtidos a partir da identificação de picos nos envelopes associados às leituras realizadas (dadas pela diferença entre as medidas com e sem danos (*baseline*), devidamente compensadas).

Além disto, adota-se uma velocidade V para propagação da onda de Lamb (compatível com o meio de propagação). Na notação utilizada, considera-se que o PZT #3 é o atuador (Fig. 4.8). Como hipótese, assume-se que a velocidade de propagação de onda permanece constante durante todo o trajeto por ela percorrido até os sensores de PZT. Desta forma, o dano deve estar sobre uma circunferência cujo raio é dado por:

$$R_{\text{PZT}\#3} = \frac{1}{2} V \text{TOF}_{\text{PZT}\#3} \quad (4.3)$$

Com centro no PZT #3 (atuador). Para as demais pastilhas de PZT (usadas como sensores), o raio da circunferência sobre a qual o dano deve estar localizado é calculado por:

$$R_{\text{PZT}\#i} = V \text{TOF}_{\text{PZT}\#i} - R_{\text{PZT}\#3} \quad (4.4)$$

Com centro localizado no PZT #i, para $i = 1, \dots, 5$. Essa equação se justifica ao considerar que a onda percorre o caminho até o dano desde o PZT #3, e, em seguida, por reflexão, retorna para excitar o PZT #i, conforme a Figura 4.8.

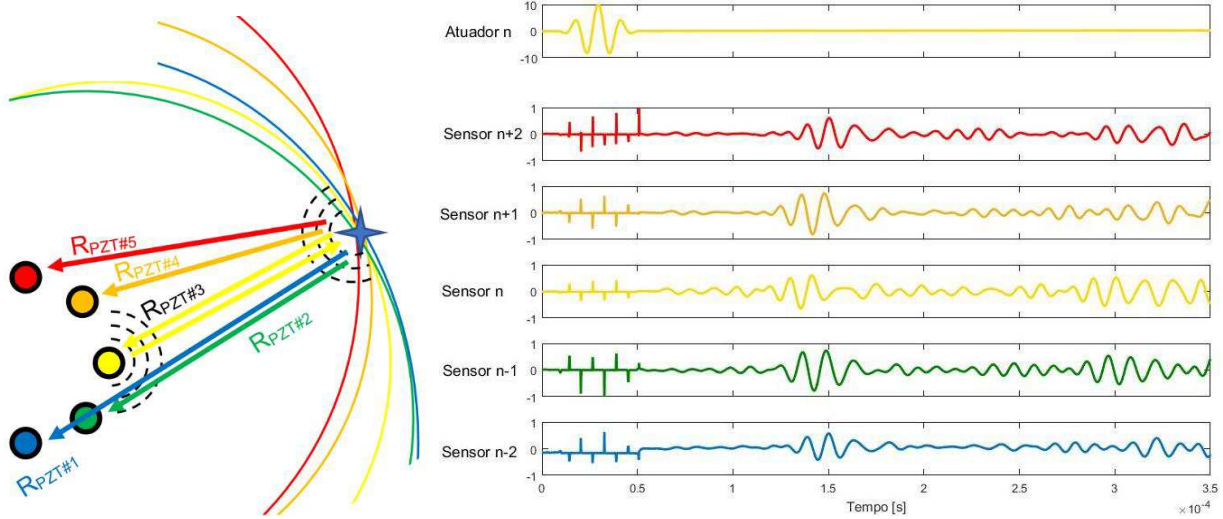


Figura 4.8: Reflexão de onda.

Com os raios estimado acima, pode-se calcular um resíduo, dado por:

$$Q_{PZT\#i} = (x^* - x_{PZT\#i})^2 + (y^* - y_{PZT\#i})^2 - \left(R_{PZT\#i} + \frac{1}{2}\phi_{PZT\#i}\right)^2 \quad (4.5)$$

no qual $\phi_{PZT\#i}$ é o diâmetro do PZT #i, com $i = 1, \dots, 5$. Cada um destes resíduos representam a equação de uma circunferência e deveriam ser nulo para uma condição ideal (dano considerado como sendo pontual e as medidas obtidas para os TOFs consideradas exatas). Na prática, essas condições são quase impossíveis de serem atendidas de forma exata. Por este motivo, busca-se a minimização do erro RMS associado a estes resíduos, de forma que a função F dada por

$$F = \sqrt{\sum_{i=1}^{n_{PZT}} \frac{Q_{PZT\#i}^2}{n_{PZT}}} \quad (4.6)$$

é definida como sendo a função objetivo.

Uma vez finalizado o procedimento de otimização, resulta uma coleção de valores de R e θ , uma para cada leitura, PZT atuador. A partir daí, pode-se obter as coordenadas cartesianas x^* e y^* correspondentes, como explicado antes. Para determinação da localização do dano, essa coleção de dados é analisada. Para cada leitura e para cada pastilha de PZT funcionando

como atuador, é possível obter uma curva $x^*(V)$ versus $y^*(V)$, como mostrado na Figura 4.9. No caso de haver um dano na estrutura, essas curvas, numa situação ideal, devem todas interceptarem-se num mesmo ponto onde o dano está localizado.

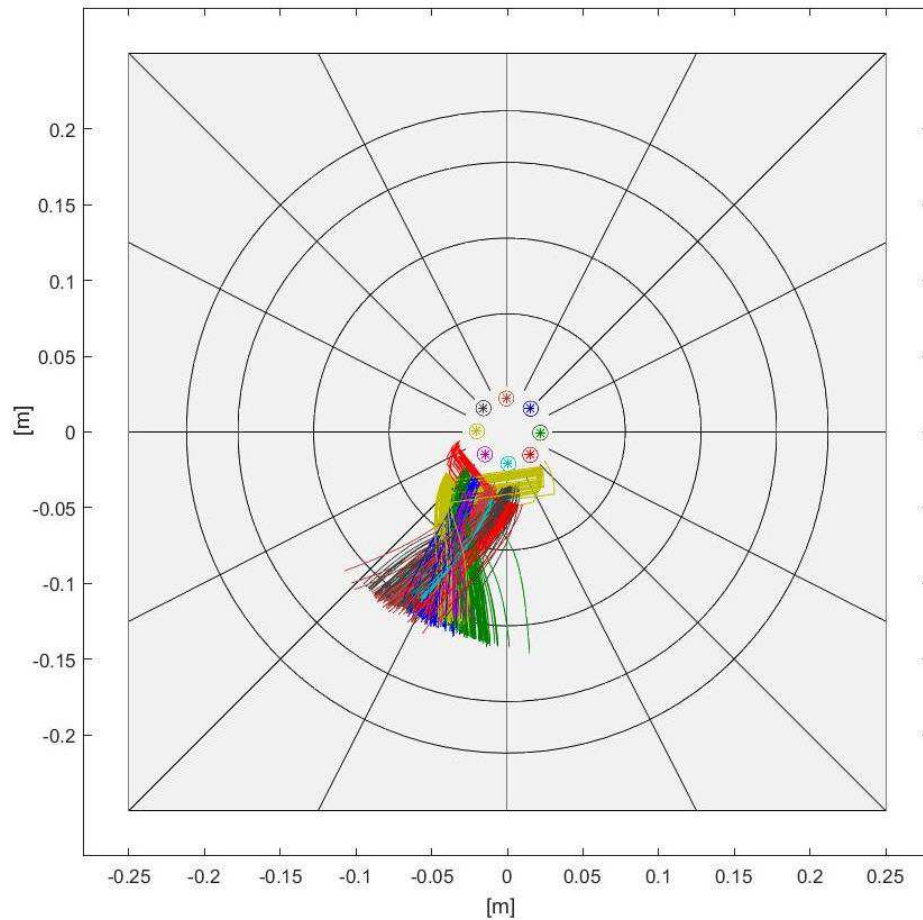


Figura 4.9: $x^*(V)$ vs $y^*(V)$ para $N_{Leituras}$.

Assim, para determinar a localização do dano, computa-se a dispersão da média de x^* e da média de y^* com respeito às leituras, com relação à média destas grandezas computadas e, ainda, com respeito aos atuadores, como mostrado a seguir:

$$(\delta_x)_{atuador} = \frac{1}{N_{Leituras}} \sum_{Leitura=1}^{N_{Leituras}} (x_{Leitura}^*)_{atuador} - \frac{1}{N_{Leituras} N_{atuadores}} \sum_{atuador=1}^{N_{atuadores}} \sum_{Leitura=1}^{N_{Leituras}} (x_{Leitura}^*)_{atuador} \quad (4.7)$$

$$(\delta_y)_{atuador} = \frac{1}{N_{Leituras}} \sum_{Leitura=1}^{N_{Leituras}} (y_{Leitura}^*)_{atuador} - \frac{1}{N_{Leituras} N_{atuadores}} \sum_{atuador=1}^{N_{atuadores}} \sum_{Leitura=1}^{N_{Leituras}} (y_{Leitura}^*)_{atuador} \quad (4.8)$$

Observa-se que δ_x e δ_y são funções, ainda, de V .

Na sequência, essas dispersões são usadas para calcular uma dispersão radial, conforme segue:

$$(\delta_r)_{atuador} = \sqrt{(\delta_x)_{atuador}^2 + (\delta_y)_{atuador}^2} \quad (4.9)$$

Finalmente, por meio dessa última equação, toma-se para a velocidade de propagação o valor de velocidade que minimiza o produto da média e do desvio padrão de δ_r com respeito aos atuadores. Desse modo, matematicamente:

$$V^* = \arg \min \left[\frac{1}{N_{atuadores}} \sum_{atuador=1}^{N_{atuadores}} (\delta_r)_{atuador} \times \sqrt{\frac{1}{N_{atuadores}} \sum_{atuador=1}^{N_{atuadores}} \left[(\delta_r)_{atuador} - \frac{1}{N_{atuadores}} \sum_{atuador=1}^{N_{atuadores}} (\delta_r)_{atuador} \right]^2} \right] \quad (4.10)$$

De posse desse valor para V^* , a localização do dano é estabelecido a partir do valor médio de x^* e y^* com respeito às leituras e aos atuadores, para a situação em que $V = V^*$:

$$x^* = \frac{1}{N_{Leituras} N_{atuadores}} \sum_{atuador=1}^{N_{atuadores}} \sum_{Leitura=1}^{N_{Leituras}} (x_{Leitura}^*)_{atuador} \Big|_{V=V^*} \quad (4.11)$$

$$y^* = \frac{1}{N_{Leituras} N_{atuadores}} \sum_{atuador=1}^{N_{atuadores}} \sum_{Leitura=1}^{N_{Leituras}} (y_{Leitura}^*)_{atuador} \Big|_{V=V^*} \quad (4.12)$$

A Figura 4.10 retrata um exemplo do resultado da localização do dano (pontos pretos) para as $N_{Leituras}$ assim com a média (ponto vermelho).

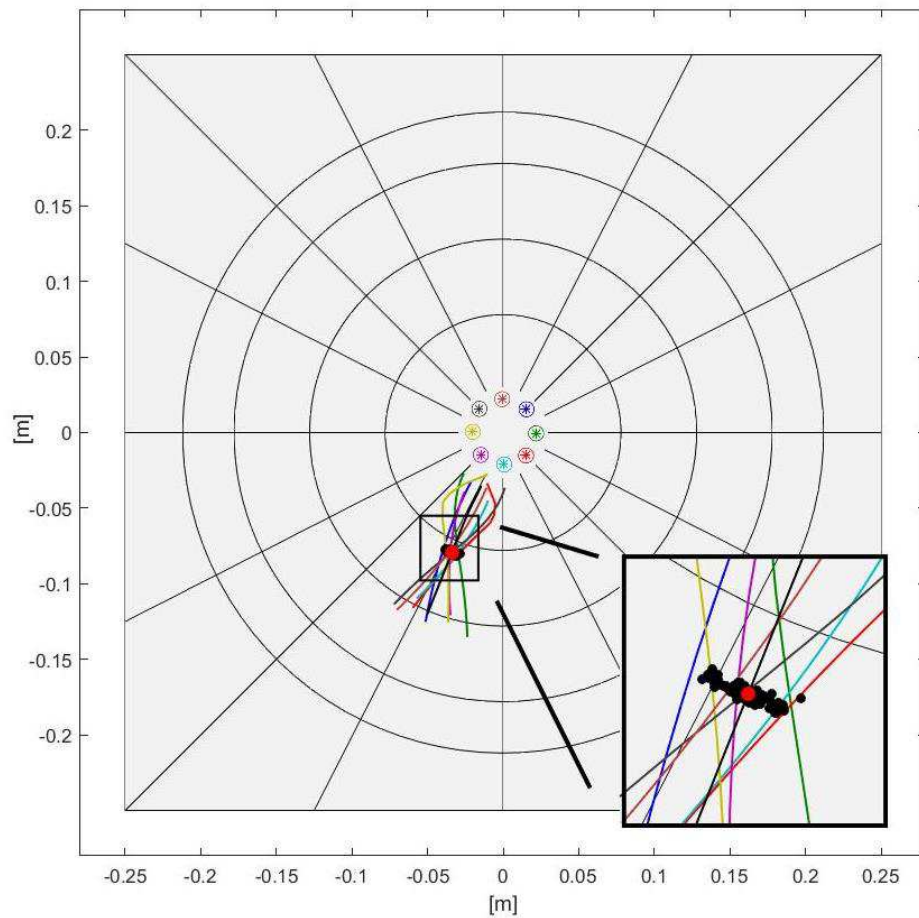


Figura 4.10: x^* vs y^* para médias.

Neste ponto, a análise estatística possibilita melhorar a precisão na localização do dano. Esse assunto será melhor abordado no item 4.4.3.

4.4.3 *Análise estatística de dados e taxa de ocorrências*

Quando se trata do monitoramento da integridade estrutural (SHM), é desejável que um nível de *threshold* confiável seja estabelecido com base na informação adquirida para a condição saudável da estrutura. Depois que os dados são adquiridos e processados, o próximo passo é a preparação dos dados brutos para análise. Neste sentido, primeiro faz-se a edição de dados. Isto refere-se às operações de pré-análise que são concebidas para detectar e eliminar sinais de dados degradados que possam ter resultado das aquisições e dos processos de gravação, tais como ruído excessivo, falhas de sinal ou mesmo de uma causa externa como uma deficiência na fonte de alimentação (BENDAT; PIERSOL, 2000).

4.4.3.1. *Detecção de valores atípicos e limpeza de dados*

Às vezes, a aquisição de uma série de medidas aparece em desacordo em comparação com todas as outras medições. Quando isso ocorre, o operador deve decidir se a medida anômala resultou de um erro e deve ser rejeitada ou se foi uma medida genuína que deve ser preservada junto com as demais. Ao fazer o procedimento de limpeza de dados, alguns parâmetros estatísticos importantes devem ser usados e, portanto, o valor do *threshold* de danos não deve ser afetado por possíveis *outliers* que são descartados antes.

Se a anomalia ocorrer mais de uma vez, o procedimento permite rastrear a causa de seu aparecimento, seja como um erro ou como um efeito físico real. O uso do critério de Chauvenet mostrado na seção seguinte permite melhorar a taxa de sucesso (ou a probabilidade de detecção) dos métodos usados em SHM. Esse critério foi escolhido na presente contribuição devido à sua simplicidade e bom desempenho relatado em situações semelhantes.

4.4.3.2. *Critério de Chauvenet*

O critério de Chauvenet é uma maneira de identificar *outliers*. O método funciona criando uma faixa aceitável de dados em torno da média, estabelecendo que quaisquer valores que se encontrem fora desta faixa devam ser eliminados. Esse critério pressupõe que os erros são normalmente distribuídos e têm variância constante. Além disso, especifica que qualquer

resultado de uma amostra de N leituras será rejeitado se a magnitude do seu desvio d_{\max} do valor médio da amostra for tal que a probabilidade de ocorrência do desvio considerado exceder $1/2N$. A Equação (4.13) fornece o desvio máximo:

$$\frac{d_{\max}}{S} = 2,8751e^{0,0003N} - 1,0038e^{-0,0212N} - 1,2712e^{0,2674N} \quad (4.13)$$

onde S é o desvio padrão das amostras e N é o número de pontos de dados.

A recomendação da literatura estabelece que o critério de Chauvenet não deve ser aplicado uma segunda vez (CHARLES ANNIS, 2013). Além disso, a hipótese de que a amostra acompanha uma distribuição normal deve ser devidamente verificada através de testes apropriados.

4.4.3.3. *Teste de Normalidade*

Vários testes podem ser realizados para analisar uma amostra quanto à normalidade (RABELO et al., 2016). Nesta tese, escolheu-se o teste de *Jarque-Bera* (JB) por ser estatisticamente rigoroso em comparação com os métodos gráficos. Esse teste é um *goodness-of-fit* dedicado ao ajuste bidimensional, adequado para os casos em que uma distribuição nula totalmente especificada é desconhecida e seus parâmetros devem ser estimados. A Equação (4.14) define o teste JB:

$$JB = \frac{N}{6} \left[S_k^2 + \frac{(k_t - 3)^2}{4} \right] \quad (4.14)$$

no qual N é o tamanho da amostra, S_k é a simetria da distribuição de probabilidade (*skewness*) e k_t é a curtose (*kurtosis*).

4.4.3.4. *Determinação de Threshold com Controle Estatístico de Processos e Intervalos de Confiança*

O conceito de Controle Estatístico de Processo (*Statistical Process Control* - SPC) foi utilizado para determinar o Limite de Controle Superior (LCS) e o Limite de Controle Inferior (LCI) dos índices de dano, uma vez que a técnica SPC assume desvios sucessivos de uma função normalmente distribuída. Como esse não é sempre o caso e estamos interessados no valor limite superior do limiar, este trabalho mostra uma metodologia para a determinação deste limiar por meio do conceito de intervalo de confiança.

Um procedimento mais leal para estabelecer parâmetros de variáveis aleatórias envolve a estimativa de um intervalo, ao contrário de um único ponto, que contém o parâmetro que está sendo ponderado com um nível de incerteza conhecido. Para calcular o valor médio, pode-se estabelecer um intervalo de confiança para o valor médio μ_x com base na média da amostra \bar{x} e de acordo com a Equação (4.15):

$$\left[\bar{x} - \frac{\sigma_x Z_{\alpha/2}}{\sqrt{N}} \leq \mu_x < \bar{x} + \frac{\sigma_x Z_{\alpha/2}}{\sqrt{N}} \right] \quad (4.15)$$

onde μ_x e σ_x são a média da população e o desvio padrão, respectivamente, \bar{x} é a média das amostras, N é o tamanho da amostra, e $Z_{\alpha/2}$ é a variável padronizada dada pela Equação (4.16), associada com a significância de α :

$$z = \frac{x - \mu_x}{\sigma_x} \quad (4.16)$$

Como σ_x é desconhecido, os intervalos de confiança para a média μ_x e variância σ_x^2 tem que ser determinados. Para uma amostra de tamanho N , considera-se que as Equações (4.17 e 4.18) (CHARLES, 2013) dão os intervalos de confiança para as médias e variâncias:

$$\left[\bar{x} - \frac{s t_{v;\alpha/2}}{\sqrt{N}} \leq \mu_x < \bar{x} + \frac{s t_{v;\alpha/2}}{\sqrt{N}} \right], v = N - 1 \quad (4.17)$$

$$\left[\frac{v S^2}{\chi_{v;\alpha/2}^2} \leq \sigma_x^2 < \frac{v S^2}{\chi_{v;1-\alpha/2}^2} \right], v = N - 1 \quad (4.18)$$

no qual s^2 é a variância da amostra, $t_{v;\alpha/2}$ é uma variável t de *Student* e $\chi_{v;\alpha/2}^2$ é uma variável Qui-Quadrado, considerados v graus de liberdade (DOF).

Portanto, esses intervalos foram então obtidos e o limiar foi determinado de acordo com a Equação (4.19):

$$PZT_{Threshold} = \mu_{X_{MAX}} + 3\sigma_{X_{MAX}} \quad (4.19)$$

onde $\mu_{X_{MAX}}$ é o limite superior para a média da população e $\sigma_{X_{MAX}}$ é o limite superior para o desvio padrão da população – ambos obtidos a partir da escolha de um nível de significância dado por $\alpha = 3\%$ aplicado as Equações (4.17 e 4.18).

Nota-se que a escolha do valor de *threshold* influencia na probabilidade de detectar um falso positivo. Além disso, o intervalo de confiança dado pela Equação (4.17) é geralmente mais amplo do que o obtido com a Equação (4.15), embora essa diferença diminui à medida que o tamanho da amostra aumenta. No entanto, a Equação (4.15) fornece um intervalo de confiança da média– com o pressuposto de que a variância da amostra é igual à variação da população.

CAPITULO V

EXPERIMENTOS E RESULTADOS

O principal objetivo deste capítulo é apresentar os resultados do protótipo desenvolvido e integrar as técnicas de impedância eletromecânica e ondas de Lamb na tarefa de diagnosticar falhas. Serão também registradas os resultados referentes ao desempenho do sistema quando a estrutura está sujeita a grandes variações de temperatura. Neste sentido, usou-se de uma placa de alumínio aeronáutico com uma rede de sensores disposta no centro da estrutura.

Assim, através dos estudos de caso apresentados neste capítulo deseja-se avaliar a eficiência da interação das duas técnicas de SHM utilizadas, considerando o efeito da temperatura no processo de avaliação da saúde estrutural por meio dos procedimentos apresentados nos capítulos 3 e 4. Após a avaliação da capacidade de detecção/localização de dano no corpo de prova, realizou-se uma análise estatística para o diagnóstico de dano da estrutura.

5.1. Configuração e Abordagem Experimental

O avanço da ciência tem fortemente demandado por soluções na área aeroespacial. Esse contexto motivou a escolha do corpo de prova como sendo uma placa de alumínio aeronáutico 2024-T3, com dimensões 500x500x1,6 mm e massa de 1,120 kg, instrumentada com oito pastilhas de PZT (diâmetro de 10 mm x 0,5 mm espessura, do tipo 5H). Os sensores-

atuadores foram colados com um adesivo à base de epóxi (Hysol EA9320NA). O corpo de prova foi preparado conforme ilustra a Figura 5.1.

A disposição das pastilhas de PZT foi escolhida para facilitar o trabalho do algoritmo de localização de dano (apresentada no item 4.4.2), abrangendo uma grande área da estrutura, sendo ajustada de forma a não interferir muito na funcionalidade da estrutura. Além disso, a posição das pastilhas foi inspirada na arquitetura do sensor CLoVER desenvolvido por Salas; Cesnik (2008). Na Figura 5.2 pode-se observar a estrutura escolhida já instrumentada.

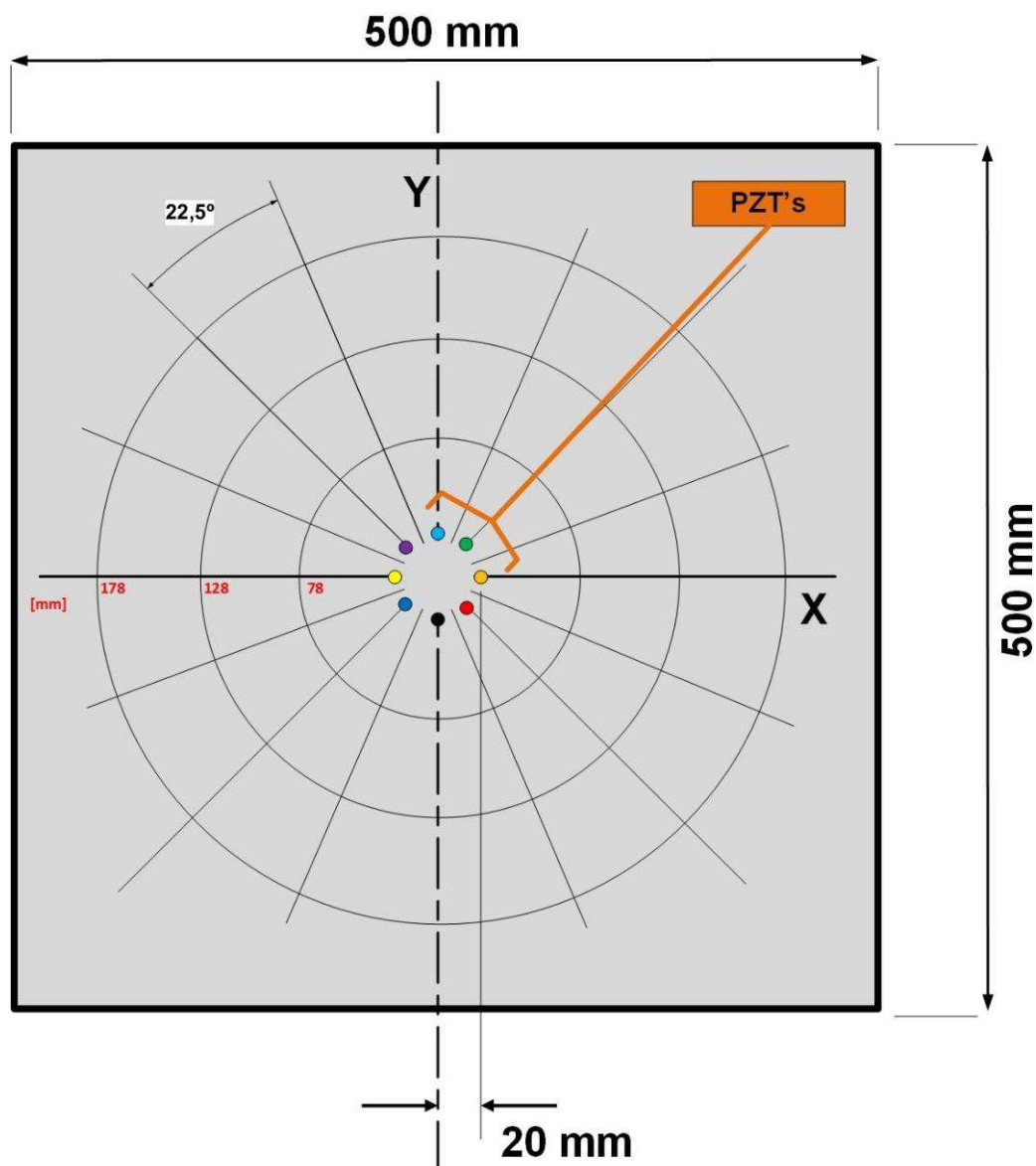


Figura 5.1: Corpo de prova instrumentado.

Para simular o dano na estrutura, optou-se pela adição de massa. Para tanto, um par de ímãs de NdFeB, Grade N52 (B444-N52) de dimensões de 6,35x6,35x6,35 mm e peso de 1,92g foram usados em uma temperatura máxima de operação de 80°C. Esse dano (adição de massa) foi selecionado pela facilidade de simular danos ao longo toda a estrutura, porém sem danificar a mesma.

Para geração de sinal foi utilizado um gerador de função da *National Instruments* (PXI-5412 de 14 Bits de resolução e taxa de amostragem de 100 MS/s com amplitude máxima de $\pm 12V_{pk-pk}$). Já para aquisição do sinal foi utilizado digitalizador, também da *National Instruments* (PXI-5105, com 12 bits de resolução e taxa de amostragem de 60 MS/s, com 8 canais independentes). Essa descrição se refere às configurações máximas do equipamento; no entanto, o próprio *software* promove a configuração adequada para melhor funcionamento. Esses equipamentos (PXI-5412 e PXI-5105) estão embarcados no chassi PXI-1033, que é uma controladora robusta com capacidade de operar ambos os equipamentos em tempo real. Na Figura 5.3 (a) mostra-se o equipamento utilizado.

Para o controle de temperatura foi utilizada a câmara climática EPL-4H da série Platinous, Figura 5.3 (b), que emprega um sistema BTHC (*Balanced Temperature and Humidity Control*) para controle de temperatura e umidade. O sistema BTCH regula a temperatura e umidade dentro da câmara para reproduzir as condições desejadas pelo usuário. Isto é feito controlando continuamente a capacidade de um refrigerador (desumidificador) de alta carga de calor e um aquecedor de umidificação de baixa carga de calor, em tempo real. Assim, a câmara EPL-4H opera com temperaturas que vão de -40°C a 180°C com uma resolução de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ (note que não será utilizado o controle de umidade, pois não é um dos parâmetros de interesse nesta tese).

Todos os testes foram realizados na situação livre-livre (Figura 5.4), para minimizar a interferência de outras fontes de ruído durante o experimento (por exemplo, a eventual vibração da câmara climática, dentre outros). A rigidez do cabo que conecta a placa ao protótipo é outro fator relevante quando considerada a repetibilidade do experimento, principalmente quando é feita a análise de impedância. Desse modo, foi utilizado um conector intermediário com baixa rigidez, como mostrado na Figura 5.5.

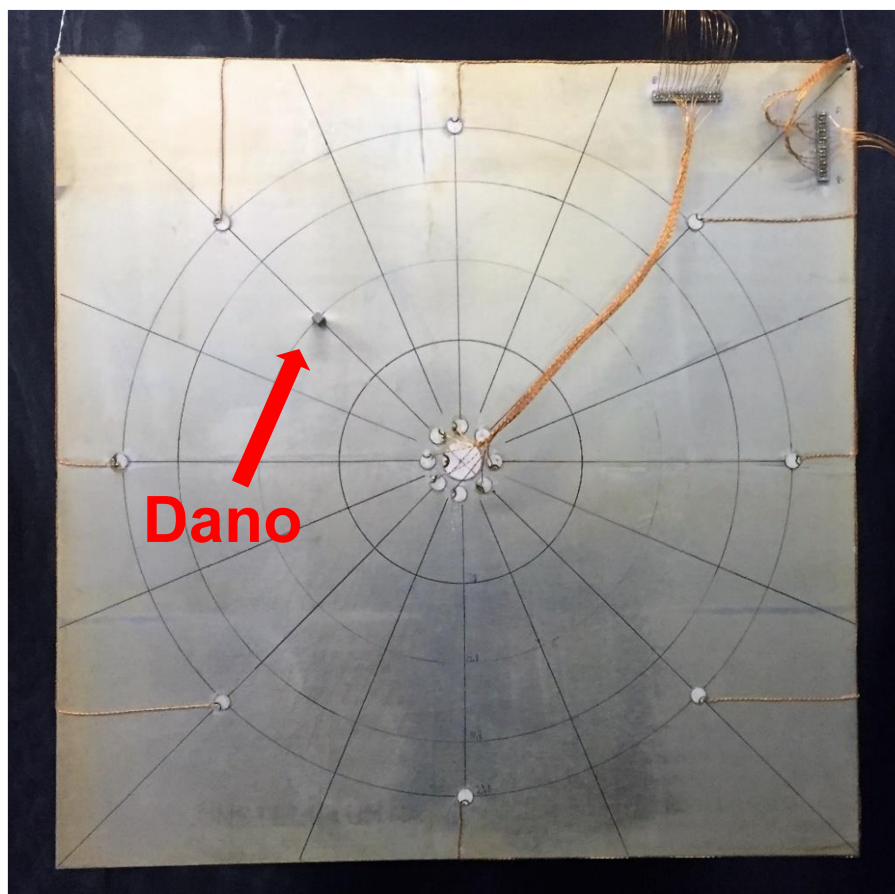


Figura 5.2: Estrutura de material aeronáutico instrumentada.



Figura 5.3: (a) Equipamento de geração e aquisição de sinal; (b) Câmara climática EPL-4H.

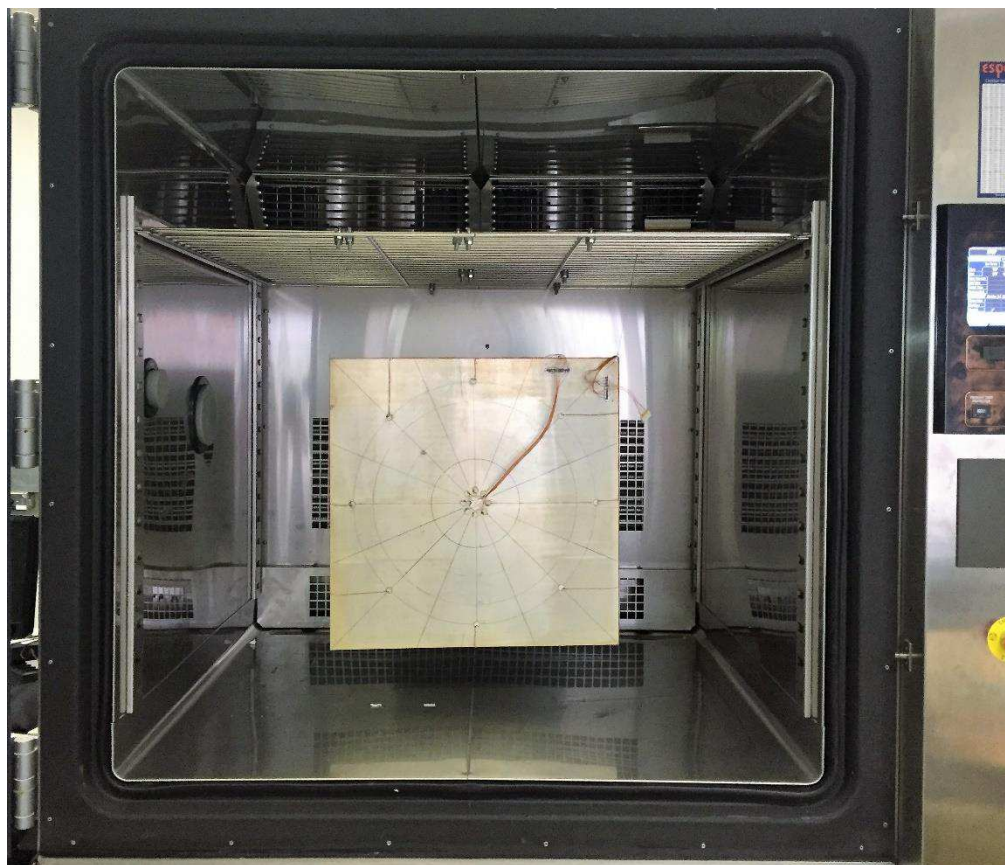


Figura 5.4: Corpo de prova na situação livre-livre no interior da câmara climática.

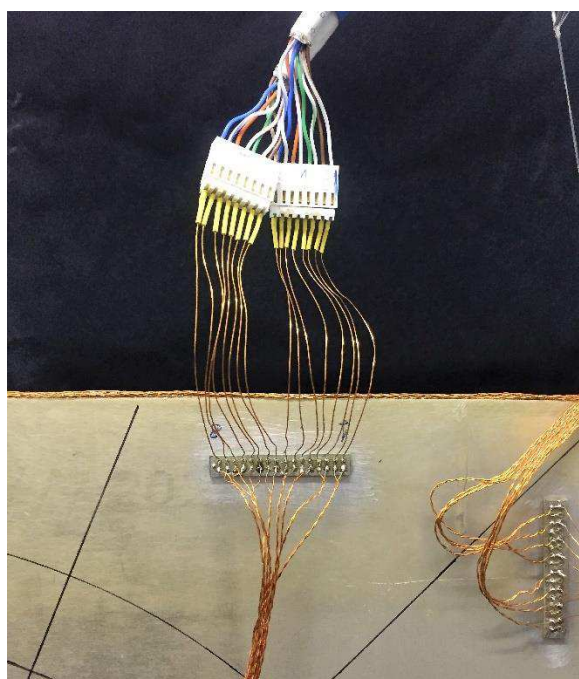


Figura 5.5: Conector intermediário com baixa rigidez.

5.2. Testes Experimentais

Nessa seção serão mostrados os resultados de diagnóstico de falha, buscando assim ilustrar o desempenho do sistema proposto a partir de três situações principais:

- 1ª – Banco de dados para *baseline*;
- 2º – Temperatura estável em 25°C com e sem danos; e
- 3º – Temperatura variável com danos.

Antes de começar o processo de diagnóstico da estrutura aeronáutica é necessário criar um banco de dados da estrutura “saudável”. Para demonstrar o desempenho do sistema sobre a influência da temperatura, as *baselines* foram coletadas em diferentes temperaturas para as condições com e sem danos. Esse assunto será melhor abordado no item 5.2.3.

No segundo caso, a temperatura foi mantida constante em 25°C durante todo o experimento; já no terceiro, a temperatura variou de -25°C a 65°C.

Para todas as situações, os passos principais referentes tanto ao *hardware* como ao *software* (como, por exemplo, a configuração do *hardware*, o cálculo do TOF, o tratamento estatístico para a tomada de decisão do diagnóstico de falha) serão abordados.

5.2.1. Banco de dados das *baselines*

Antes de coletar os sinais necessários para criar o banco de dados das *baselines*, foram definidas primeiramente em quais temperaturas os sinais seriam coletados. Para as situações 2 e 3 foram escolhidas as temperaturas de -25, 5, 25, 35 e 65°C, assim como foi adotada uma diferença de 5°C para a criação do banco de dados, ou seja, os sinais da *baseline* foram coletados a -30, 0, 20, 30 e 60°C (tais valores foram escolhidos arbitrariamente).

O tempo para estabilizar a temperatura no interior da câmara climática foi definido em 45 minutos (INCROPERA; DEWITT; BERGAMN, 2006). Desta forma, com a temperatura estável, foi realizada a aquisição das *baselines* da estrutura saudável nas temperaturas alvo.

A faixa de frequência da impedância foi selecionada segundo a maior densidade de picos para ter a melhor sensibilidade ao dano (MOURA, 2008).

A seguir são apresentadas as configurações necessárias para a coleta de sinais do banco de dados.

Para a impedância eletromecânica:

- Números de pastilhas de PZT igual a 8;
- Faixa de frequência: 80000 Hz a 90000 Hz;
- 500 pontos por frequência;
- 100 amostras por média de ponto de frequência;
- 30 leituras de assinaturas por temperatura.

Para as ondas de Lamb:

- Números de pastilhas de PZT igual a 8;
- Frequência selecionada na etapa referente à impedância para cada PZT;
- Taxa de amostragem de 6MS/s com 3000 amostras
(podendo variar, para tender a frequência de geração de sinal);
- Amplitude de atuação de $20V_{pk-pk}$;
- Modulação Hann de 3.5 (SOHN, 2005);
- Intervalo entre leituras de 100 ms;
- Número de leituras igual a 100 por PZT.

Para as temperaturas na faixa selecionada foram armazenadas todas as assinaturas de impedância e ondas de Lamb. Assim, o banco de dados fica disponível para o algoritmo de compensação de temperatura, determinação de *threshold*, além de outras finalidades.

5.2.2. Temperatura estável em 25°C com e sem dano

Com o banco de dados disponível é possível analisar a estrutura para qualquer temperatura dentro da faixa estudada. Em um primeiro momento, foi realizada a análise com a temperatura em 25°C para as condições com e sem danos para verificar se o sistema apresentava um falso positivo, para um dano aleatório. Em seguida, o dano foi colocado em 48 posições diferentes para avaliar a sensibilidade do sistema ao longo de toda a estrutura.

Para melhor compreender o procedimento adotado, foi construído o fluxograma mostrado na Figura 4.4. Na Figura 5.6 encontra-se ilustrado o corpo de prova instrumentado com 8 pastilhas de PZT na condição sem danos.

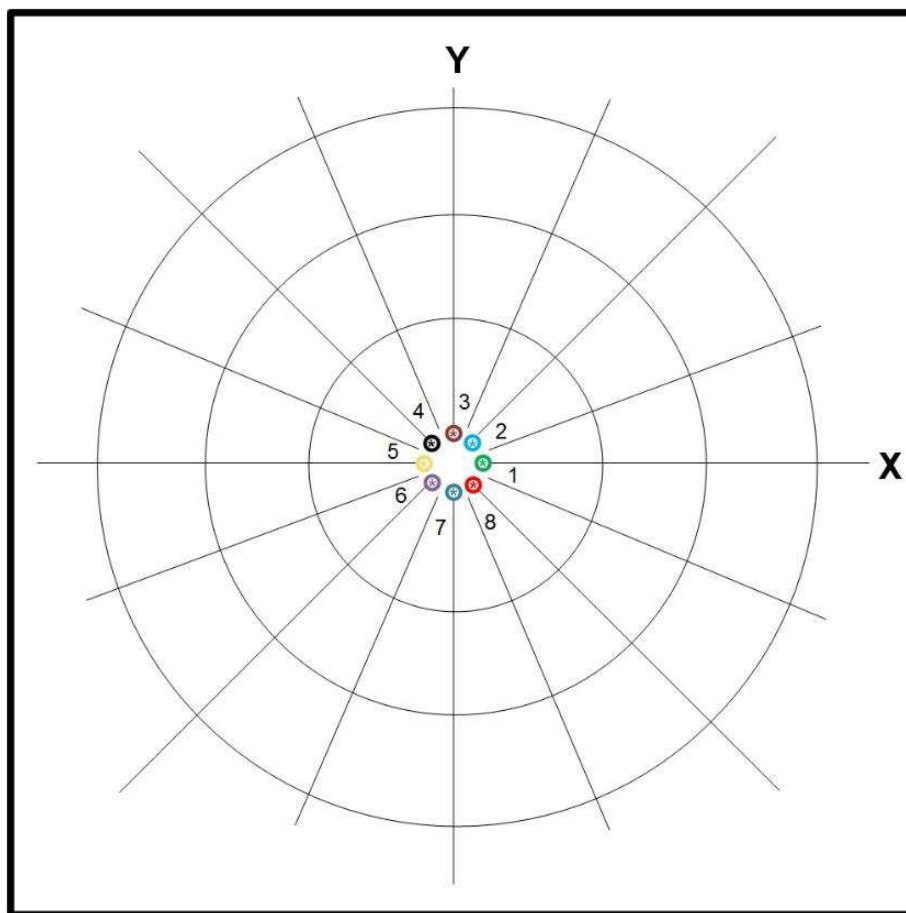


Figura 5.6: Estrutura sem danos.

Primeiramente foi realizada uma pré-análise das curvas de impedância das pastilhas de PZT numeradas como 2, 4, 6 e 8. Esses sensores-atuadores foram escolhidos para monitorar os quatro quadrantes da estrutura e, assim, diminuir o esforço computacional. Para essa primeira parte da pré-análise foi compensado o efeito de temperatura sobre as assinaturas de impedância antes de calcular o valor de limiar de dano (*threshold*) e verificar se existia alguma alteração na estrutura que seja suficientemente significativa para dar seguimento à análise completa.

O efeito da variação de temperatura (25°C para 20°C) sobre as assinaturas de impedância pode ser observado na Figura 5.7 (a) – correspondente ao sensor #2; na Figura 5.7 (b) – as mesmas curvas, já com o efeito da temperatura compensado, que se relaciona à temperatura mais próxima da *baseline* do banco de dados, nesse caso 20°C.

Todas as assinaturas de impedância foram filtradas digitalmente com um filtro de suavização de resposta de impulso finito *Savitzky-Golay* (*finite impulse response* - FIR), com 31 pontos de interpolação, que prepara os sinais para os algoritmos de pós-processamento.

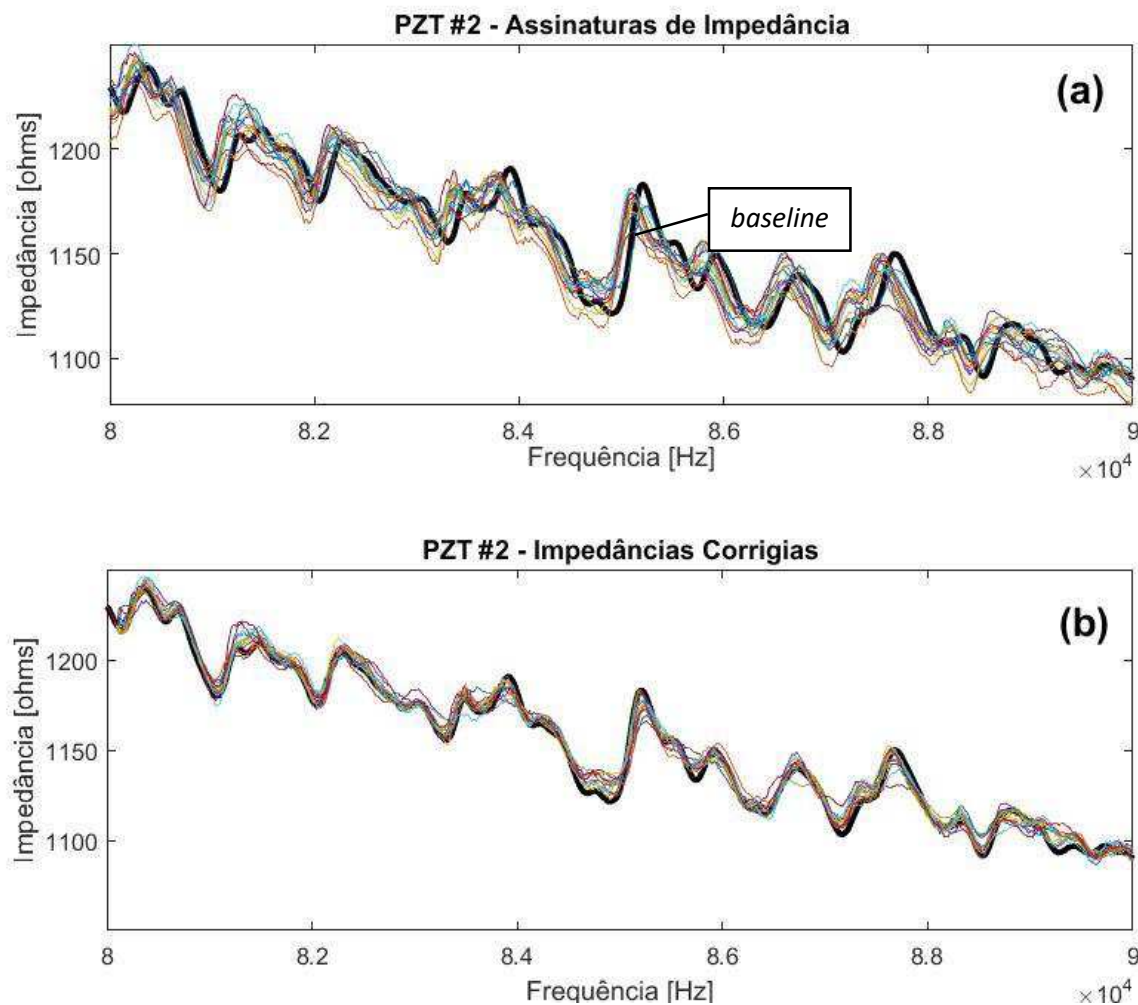


Figura 5.7: Curvas de impedância da pré-análise sem danos: (a) assinatura sem compensação, (b) assinaturas compensadas.

A Figura 5.7 (b) mostra que a compensação de temperatura proporciona uma boa correlação entre as assinaturas de impedância. Como não existe dano na estrutura, as assinaturas de impedância são bem semelhantes às assinaturas das *baselines*. Os índices de dano não compensados e os compensados são mostrados na Figura 5.8.

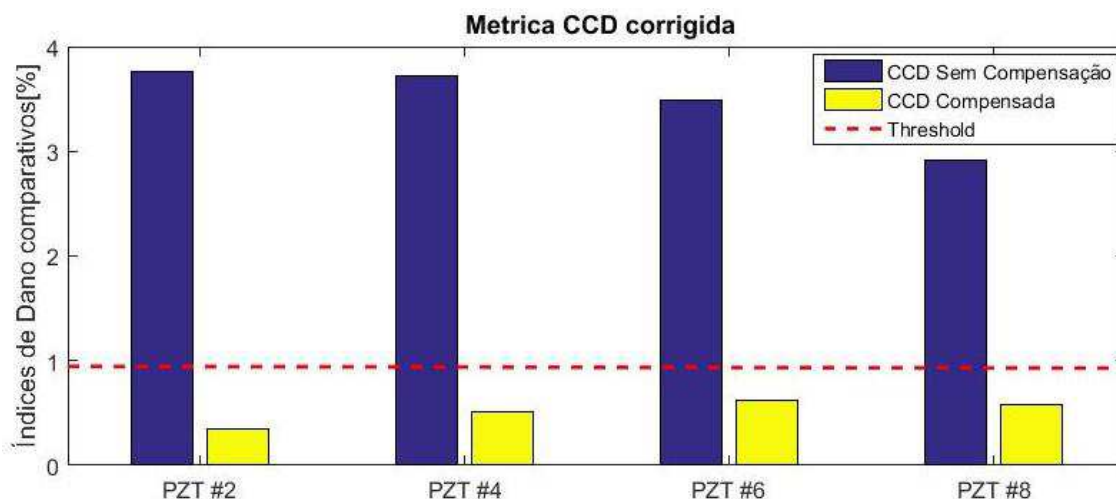


Figura 5.8: Valores de CCD na pré-análise na condição não compensados e compensados para a condição sem danos.

Na Figura 5.8 pode-se notar também que os índices de dano para a condição compensada são reduzidos de maneira significativa com a variação de temperatura. O valor do *threshold* foi calculado segundo o item 4.4.3.

Assim, como não foi identificada nenhuma alteração relevante na estrutura, o sistema de monitoramento entra em modo de espera antes de nova verificação.

Considerando agora um dano aleatório na estrutura na posição cartesiana dada por 73X64 mm, como mostrado na Figura 5.9, com a temperatura estável em 25°C. Na pré-análise de impedância o índice de dano (CCD) indica uma variação significativa em relação ao nível de *threshold*, como indicado na Figura 5.10.

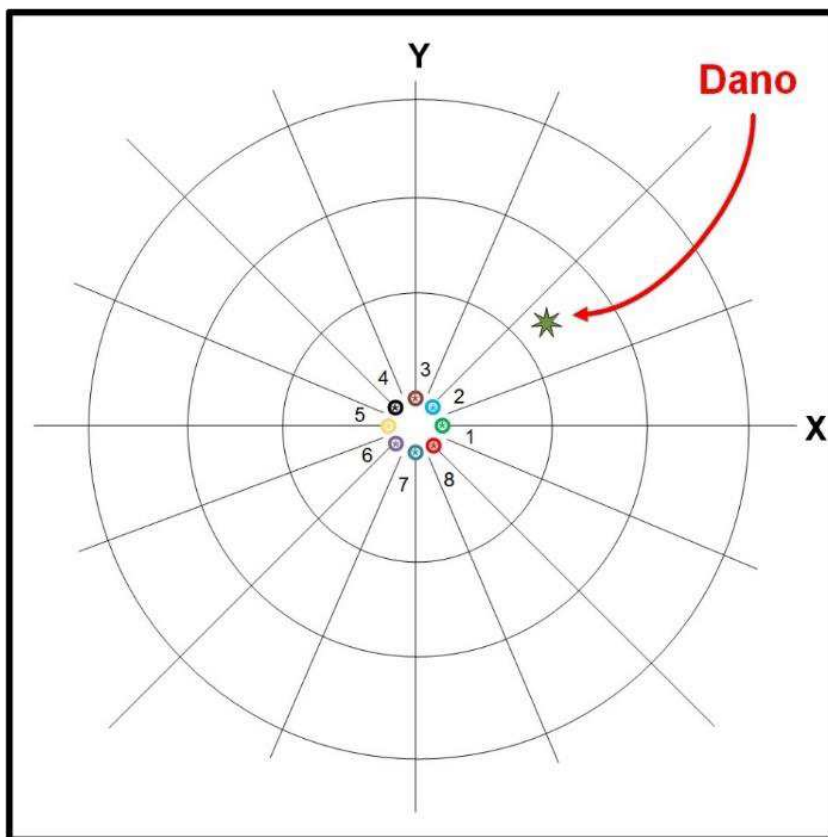


Figura 5.9: Estrutura com dano aleatório.

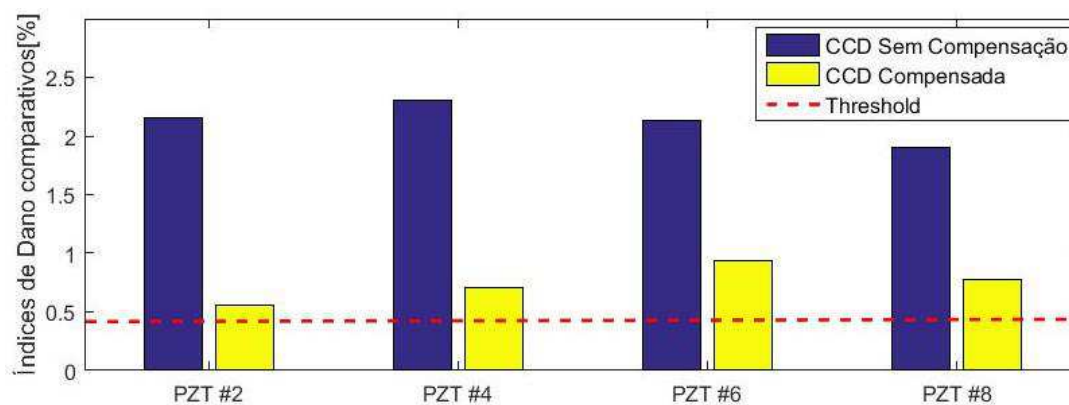


Figura 5.10: Valores de CCD na pré-análise para as condições sem e com compensação, condição de dano aleatório.

Ao observar a Figura 5.10, na pré-análise das quatro pastilhas de PZT, nota-se um possível dano na estrutura, justificando a passagem do processo de monitoramento para a próxima etapa, ou seja, “Análise de impedância Completa”, sendo então coletadas as assinaturas

de impedância de toda as pastilhas de PZT. Na Figura 5.11 estão presentes as médias (30 leituras) das assinaturas das oito pastilhas de PZT, já compensado o efeito da temperatura. Repare também que as curvas de tendência das assinaturas já foram subtraídas para demonstrar a seleção de frequências para a avaliação através das ondas de Lamb.

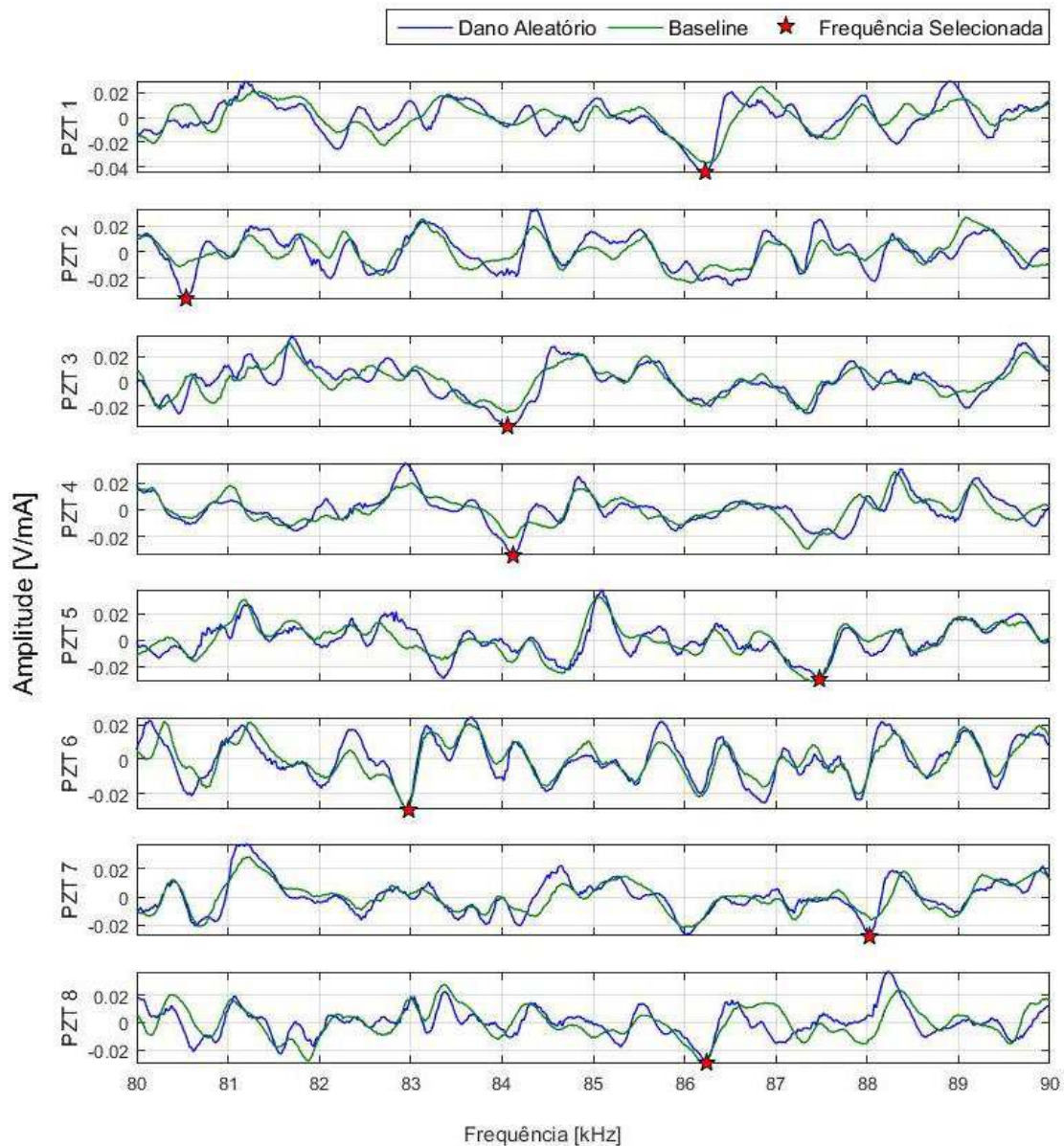


Figura 5.11: Curvas de impedância da análise completa com dano aleatório.

Na Figura 5.12, pode-se notar que os índices de dano CCD da estrutura com um dano aleatório apontam para a existência de dano. Ainda na Figura 5.12, “SD” representa a estrutura

sem dando e “D1” a condição de dano aleatório, já o valor de *threshold* é calculado independentemente para cada atuador (ver item 4.4.3.4).

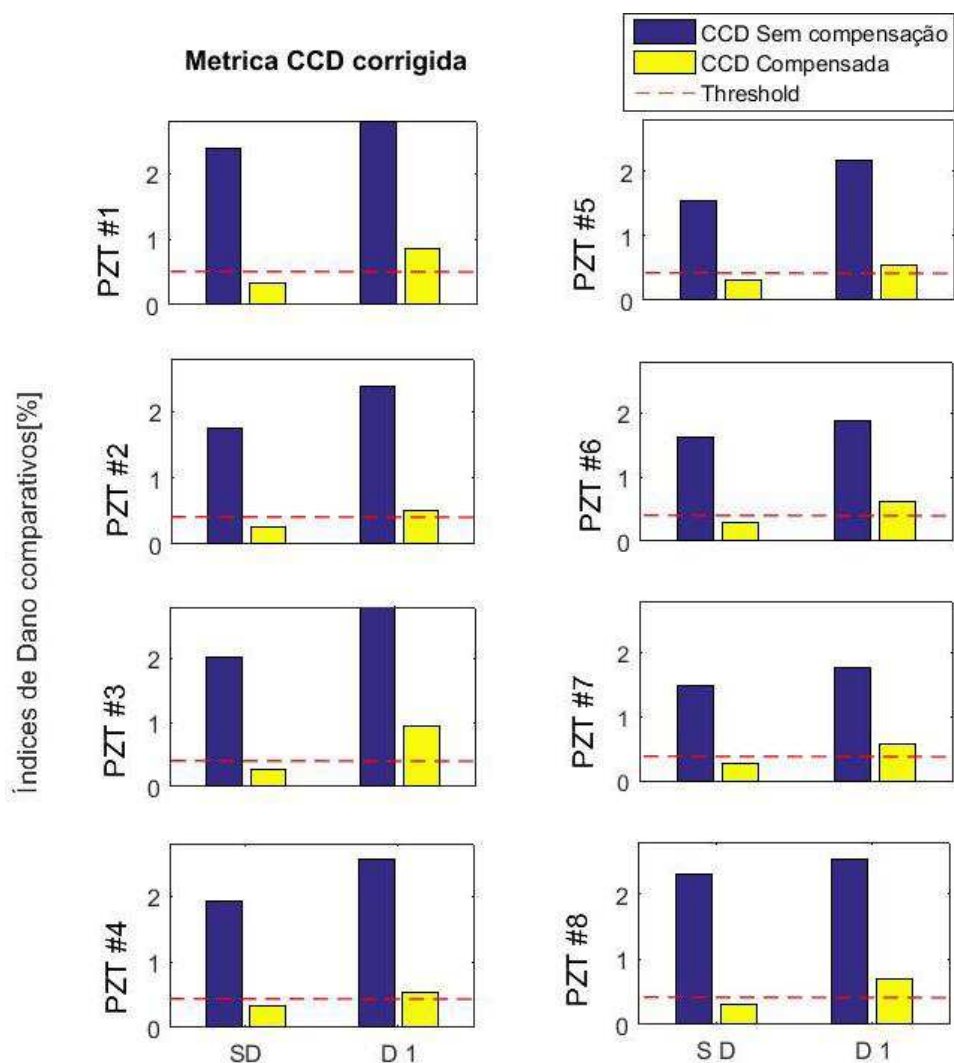


Figura 5.12: Valores de CCD na análise completa para as condições com e sem compensação de temperatura, para a condição com dano aleatório.

Para a análise com as ondas de Lamb é necessário selecionar as melhores frequências dentro da faixa selecionada (80 kHz a 90 kHz). Da figura 5.11 é possível escolher a frequência de excitação de cada PZT para a geração das ondas de Lamb. Na Tabela 5.1 estão mostradas as frequências selecionadas da Figura 5.11.

Tabela 5.1: Seleção de frequências para o dano aleatório.

Frequências selecionadas [kHz]							
PZT 1	PZT 2	PZT 3	PZT 4	PZT 5	PZT 6	PZT 7	PZT 8
86.22	80.54	84.06	84.12	87.48	82.98	88.02	86.24

De posse das frequências, foram realizadas 100 leituras para cada sensor de PZT, além das leituras de quatro sensores de PZT vizinhos ao PZT atuador. Para exemplificar o procedimento, considere o PZT #2 como sendo o atuador. O PZT #2 é então responsável pela excitação e o sinal é coletado pelo PZT #n-2, ou seja, pelo PZT #8. Após completar as 100 leituras, o mesmo processo se repete, mas agora utilizando o PZT #1 (PZT #n-1) como sensor, até chegar no PZT #4 (PZT #n+2). Desta forma, foram coletados os sinais apresentados na Figura 5.13.

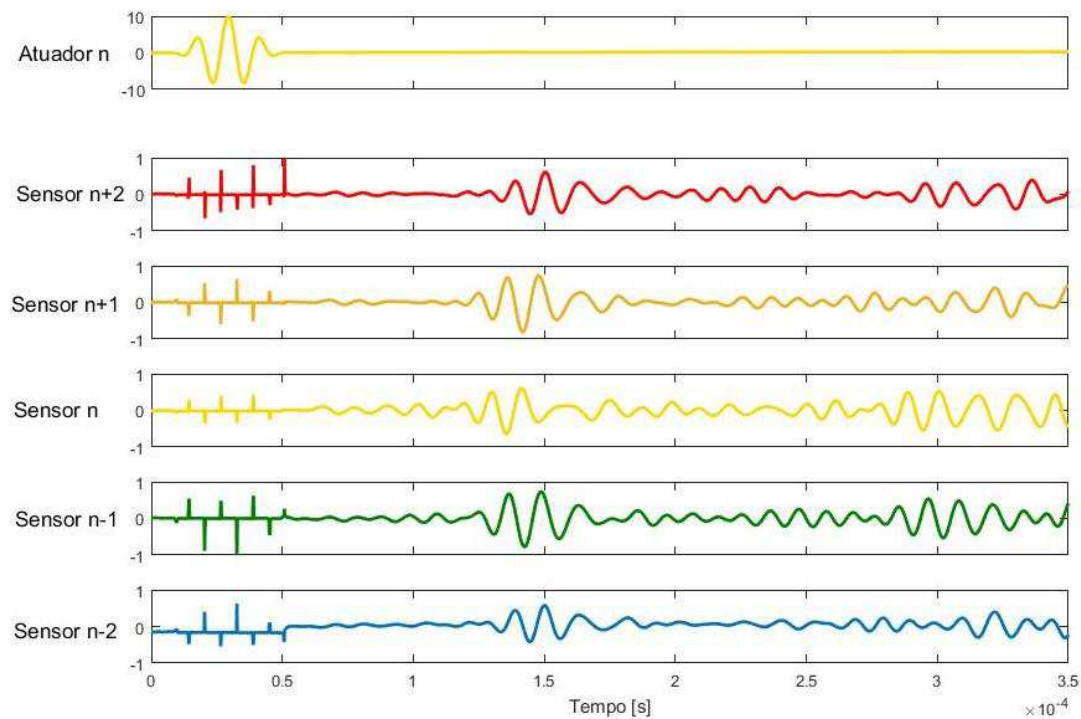


Figura 5.13: Exemplo de coleta de sinais de ondas de Lamb.

Como na impedância, o efeito da temperatura neste caso é também um fator de erro a ser considerado, principalmente quando se determina o TOF de cada sinal. Considerando o algoritmo de compensação de temperatura para as ondas de Lamb (item 3.2.3.), baseado na reconstrução do sinal da *baseline* para a temperatura do sinal de monitoramento, todos as

baselines são compensadas para a temperatura de 25°C. Em seguida, os sinais passam por um filtro passa alta FIR com frequência de corte de 1 kHz para minimizar os efeitos da vibração da câmara térmica.

Na Figura 5.14, o TOF do PZT #2 é obtido a partir da identificação do valor pico do envelope associado ao eco do sinal refletido no dano aleatório na estrutura, conforme mostrado na Figura 5.14.

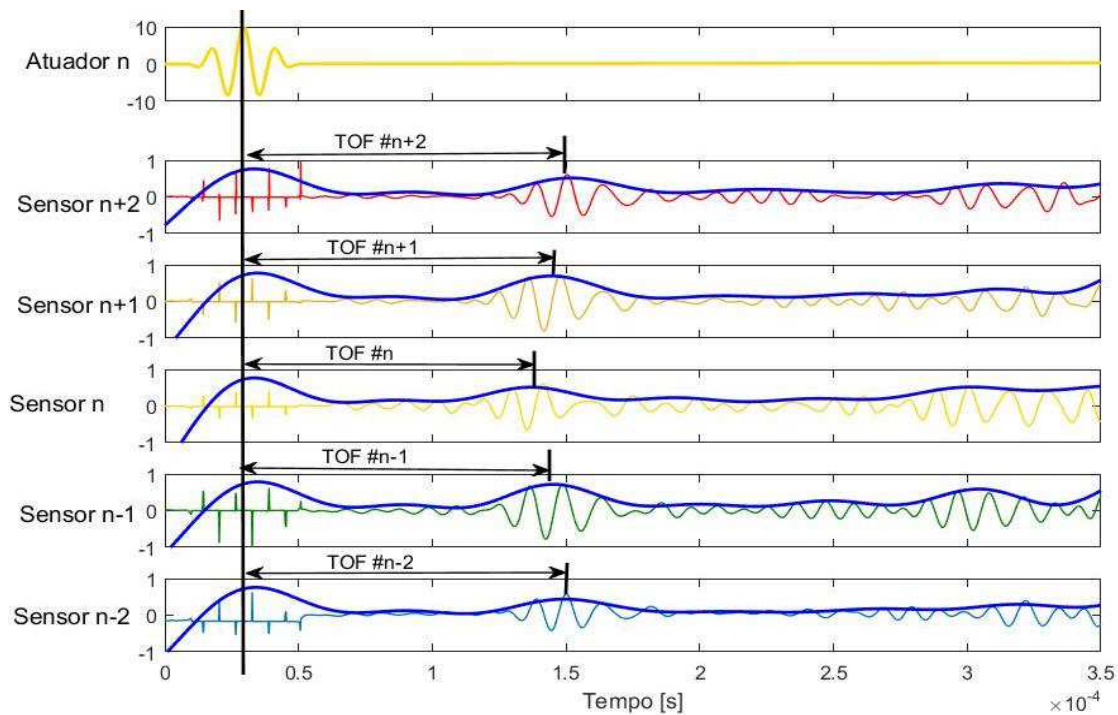


Figura 5.14: Determinação do TOF do PZT #2.

Com as TOF's referentes a cada um dos sensores é possível resolver o problema de minimização de busca global. Na Figura 5.15 há os resultados para a função objetivo correspondente (Equação (4.6)).

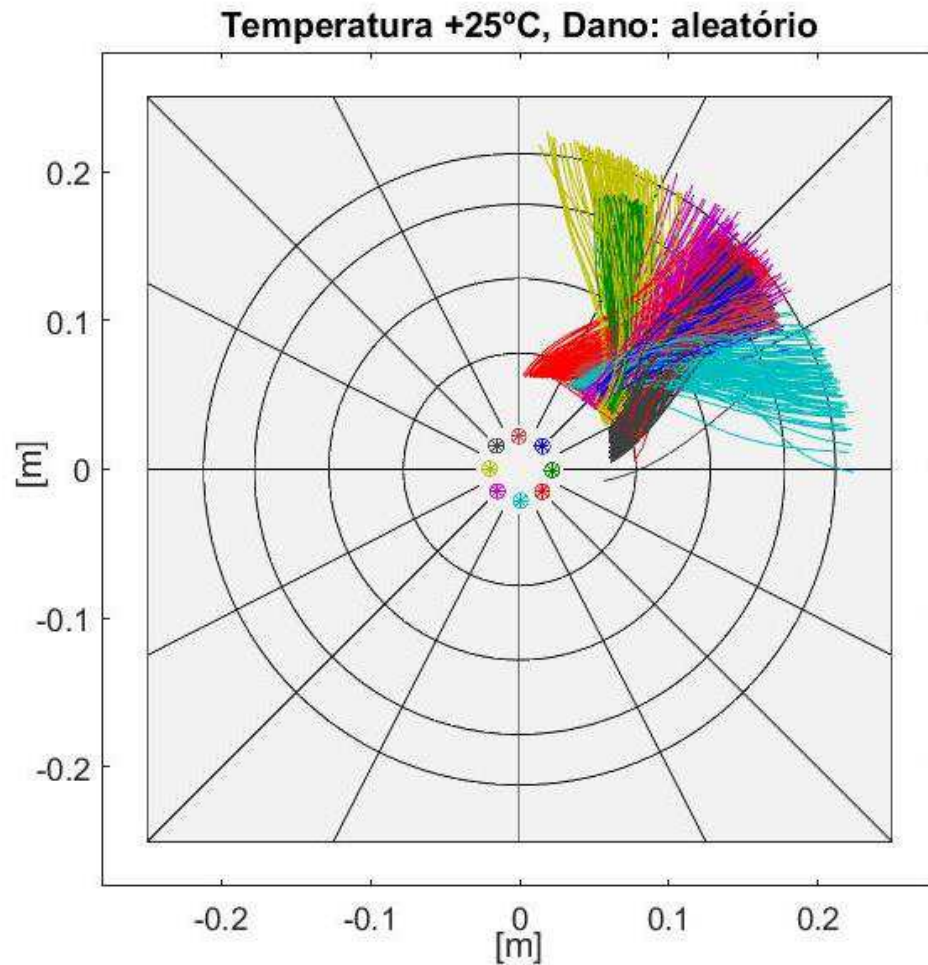


Figura 5.15: Resultado da função objetivo para $N_{Leituras}$ com dano aleatório.

Na Figura 5.15 acha-se representada uma coleção de valores de R e θ , sendo uma para cada leitura, PZT atuador, e velocidade considerados. Já na Figura 5.16 são ilustradas as médias das curvas $x^*(V)$ vs $y^*(V)$ para cada PZT, sendo ainda apresentados os resultados das Equações (4.11 e 4.12), ou seja, as possíveis localizações (ponto pretos) do dano e a sua posição média (ponto vermelho).

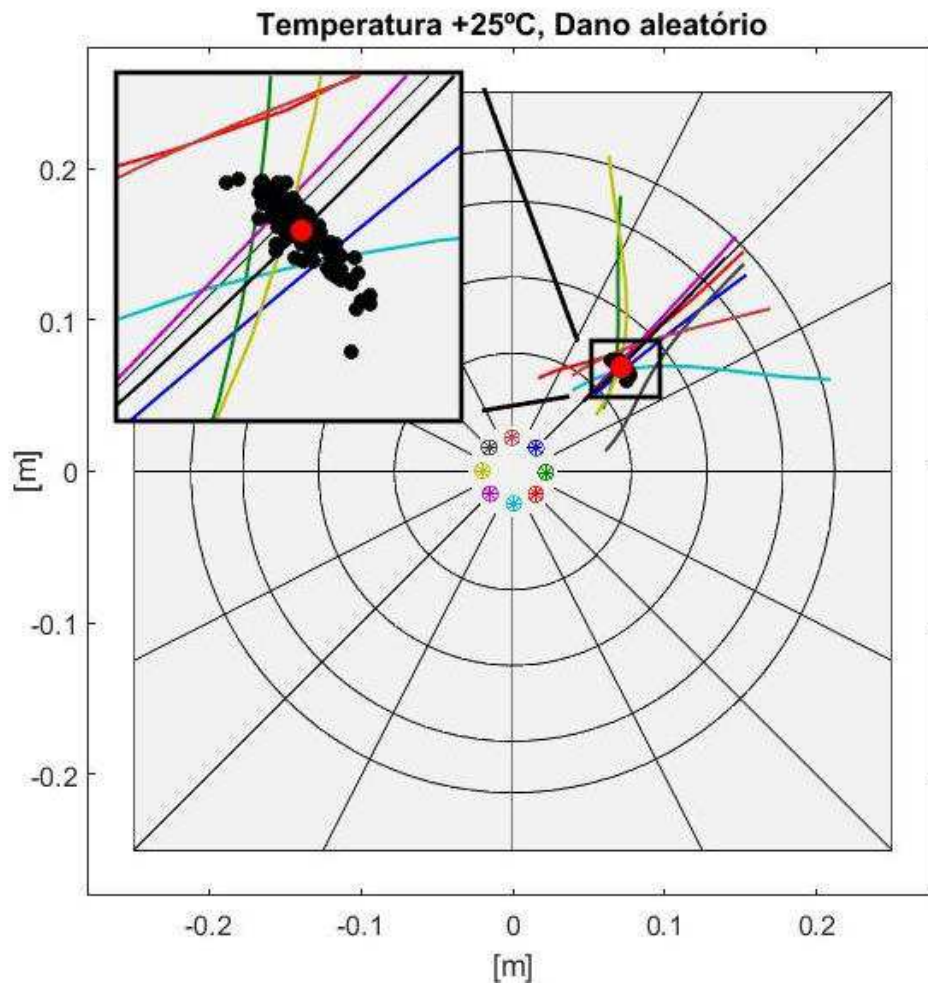


Figura 5.16: x^* vs y^* e a localização do dano.

A partir do resultado da Figura 5.16, pode-se estimar a posição cartesiana do dano em 71,2 mm no eixo X e 69,8 mm no eixo Y, o que corresponde a um erro relativo percentual de 2.70%.

Nesse ponto do processamento, o valor x^* e y^* ainda pode ser melhorado aplicando o critério de Chauvenet e excluindo *outliers*. Além disso, é necessário que a amostra tenha uma distribuição normal e, para tanto, foi aplicado o teste JB. A Tabela 5.2 mostra o resultado do teste de normalidade.

Tabela 5.2: Resultados do Teste de Normalidade para a Técnica das Ondas de Lamb.

Skewness	Kurtosis	H_0	p-value [%]	Lim. Val.	Crit. Val.
0,0278	2,9831	0	0,5000	0,4032	5,8581

Na Tabela 5.2, os valores de *skewness* e *kurtosis* correspondem aos momentos estatísticos da amostra analisada. Um teste de normalidade simples foi feito para verificar a assimetria (*skewness*) da amostra (esta deve ser próxima de zero), ficando caracterizada a simetria referente ao PDF (densidade de probabilidade de Gauss). Vê-se ainda o valor da *kurtosis* é da ordem de 3,0, indicando o formato de pico semelhante a um sino - forma clássica de uma distribuição Gaussiana - H_0 corresponde à hipótese nula, ou seja, a amostra segue uma distribuição normal (o resultado sendo 0 significa que a hipótese nula não deve ser rejeitada). O *p-value* indica o resultado para o teste de hipótese. Se o valor de *p* for menor que o nível de significância, α , (neste caso, $\alpha = 5\%$) indica que a hipótese nula não deve ser rejeitada. As duas últimas colunas correspondem aos valores-limite e aos valores críticos dos ensaios de normalidade. Para aceitar a hipótese nula, o valor crítico deve ser maior que o valor limite. Esses resultados seguem a notação utilizada na *toolbox* de estatística do MATLAB®. Portanto, pode-se concluir que a amostra se origina de uma distribuição Gaussiana com 95% de confiança.

Na Figura 5.17 tem-se o resultado da possível localização cartesiana do dano após o tratamento estatístico, sendo estimada em 72,3 mm no eixo X e 66,4 mm no eixo Y, o que corresponde a um erro relativo percentual de 1,14%.

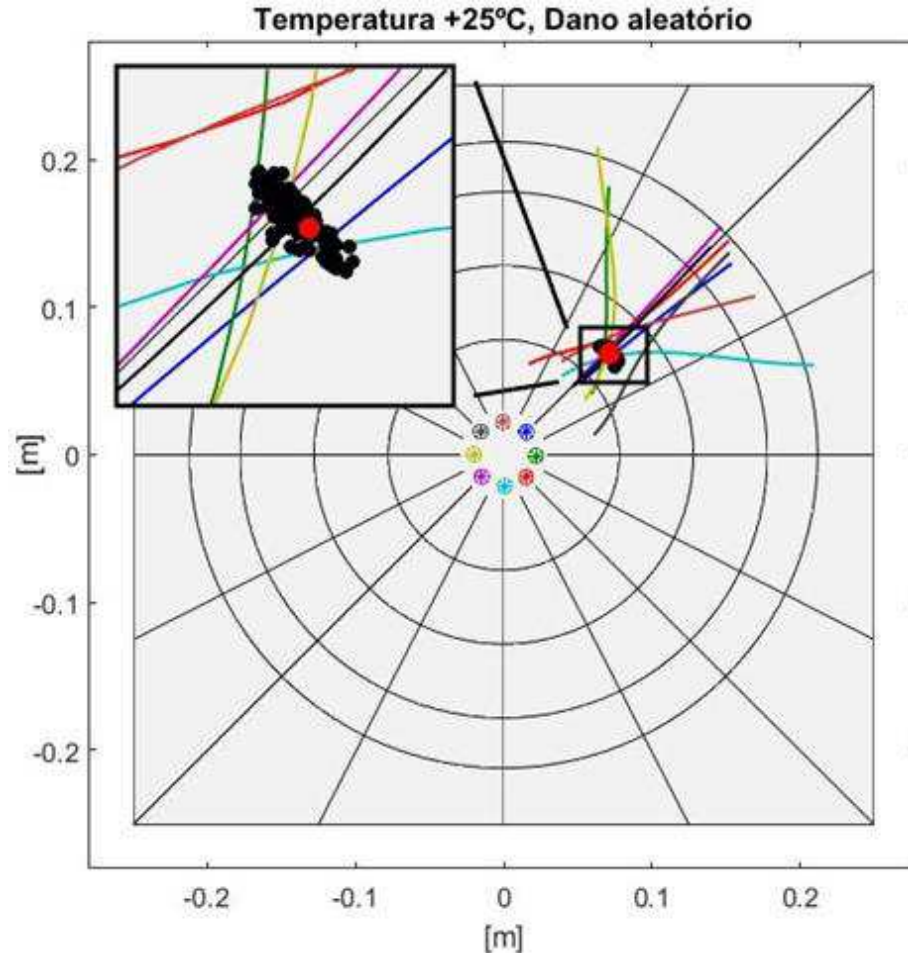


Figura 5.17: Resultado da localização do dano após tratamento estatístico.

Considerando as Figuras 5.12 e 5.17 é possível fazer um diagnóstico de falha da estrutura, onde o dano foi detectado pelas assinaturas de impedância e quantificado pela métrica CCD. Já a localização pode ser estimada a partir das ondas de Lamb com erro menor que 2%. Note que o erro relativo da localização do dano não é de 2% para toda a estrutura, pois ao se afastar da rede de sensores o erro aumenta significativamente, conforme mostrado a seguir.

Para determinar a sensibilidade e a eficiência do sistema de SHM proposto ao longo de toda a estrutura, o dano foi posicionado em 48 posições distintas, sendo a análise realizada individualmente para os vários casos, mantida a temperatura de 25°C. Na Figura 5.18 encontram-se ilustradas as posições do dano. As posições dos danos foram escolhidas de forma a abranger uma grande área da estrutura. Não foram colocados danos muito próximo da extremidade da estrutura devido às refrações de borda.

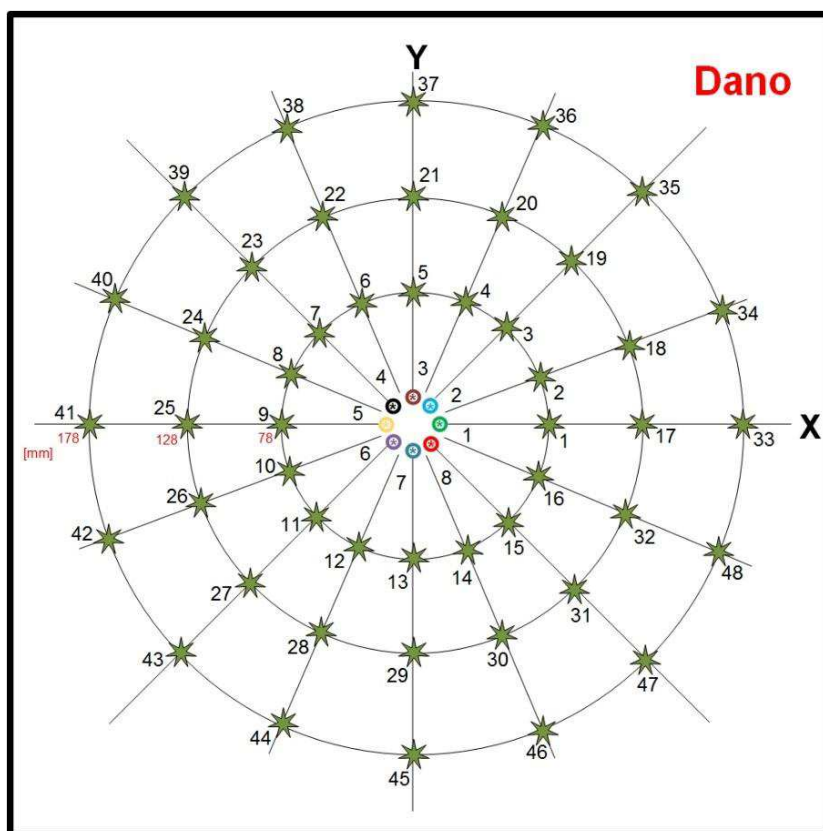


Figura 5.18: Estrutura com dano em 48 posições diferentes.

Repetindo os mesmos procedimentos usados para o dano aleatório para todas as 48 posições distintas é possível verificar a sensibilidade e desempenho do sistema de monitoramento. Os resultados da taxa de acerto da métrica CCD para cada situação mostrou que as 48 posições de dano foram detectar 100% em todos os PZT's. Já na Figura 5.19 pode-se observar a conclusão da localização estimada para todas as situações, sendo o erro relativo apresentado na Tabela 5.3 para cada caso.

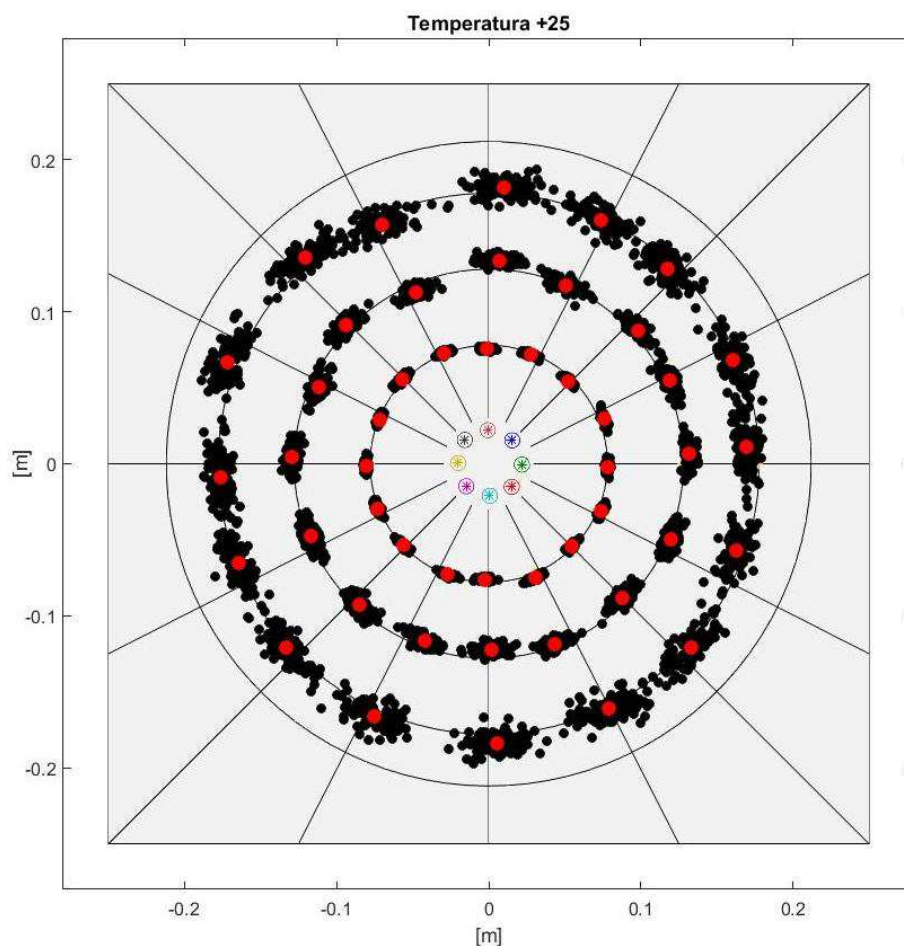


Figura 5.19: Resultado da localização estimada das 48 posições de dano.

Tabela 5.3: Erro relativo para as 48 posições de dano.

Posição	Erro [%]	Posição	Erro [%]	Posição	Erro [%]
1	2.17	17	3.01	33	8.08
2	3.73	18	2.28	34	6.81
3	2.66	19	2.50	35	11.71
4	4.03	20	2.44	36	6.51
5	1.62	21	5.27	37	8.58
6	0.94	22	4.87	38	7.83
7	1.37	23	5.04	39	10.52
8	2.15	24	2.60	40	9.45
9	1.87	25	3.66	41	5.64
10	3.32	26	6.58	42	6.35

11	2.21	27	5.61	43	5.35
12	1.99	28	7.64	44	10.76
13	2.13	29	3.42	45	6.93
14	2.49	30	4.18	46	7.66
15	2.83	31	3.65	47	8.61
16	3.70	32	4.80	48	9.96
Media:	2.45	Média:	4.22	Média:	8.17

5.2.3. Temperatura variável com dano

A temperatura influencia não somente na estrutura, mas também no próprio comportamento do transdutor piezelétrico, além da cola de fixação (neste caso *epoxy*). O conjunto dessas interferências representam parâmetros que devem ser considerados. Assim, foi feito um experimento para verificar se o desempenho do sistema de medição é robusto o bastante para diagnosticar falha em temperaturas bastante distintas.

Inicialmente foi proposto a faixa de -25°C a $+65^{\circ}\text{C}$, dividida em 4 temperaturas diferentes, ou seja, -25°C , $+5^{\circ}\text{C}$, $+35^{\circ}\text{C}$ e 65°C . O tempo de espera para estabilizar a temperatura no interior da câmara climática foi de 45 minutos, sendo que o dano simulado foi o mesmo do caso anterior. Porém, devido ao esforço computacional, o teste de sensibilidade da estrutura foi reduzido para 3 posições distintas por quadrante, totalizando 12 posições (ver Figura 5.20).

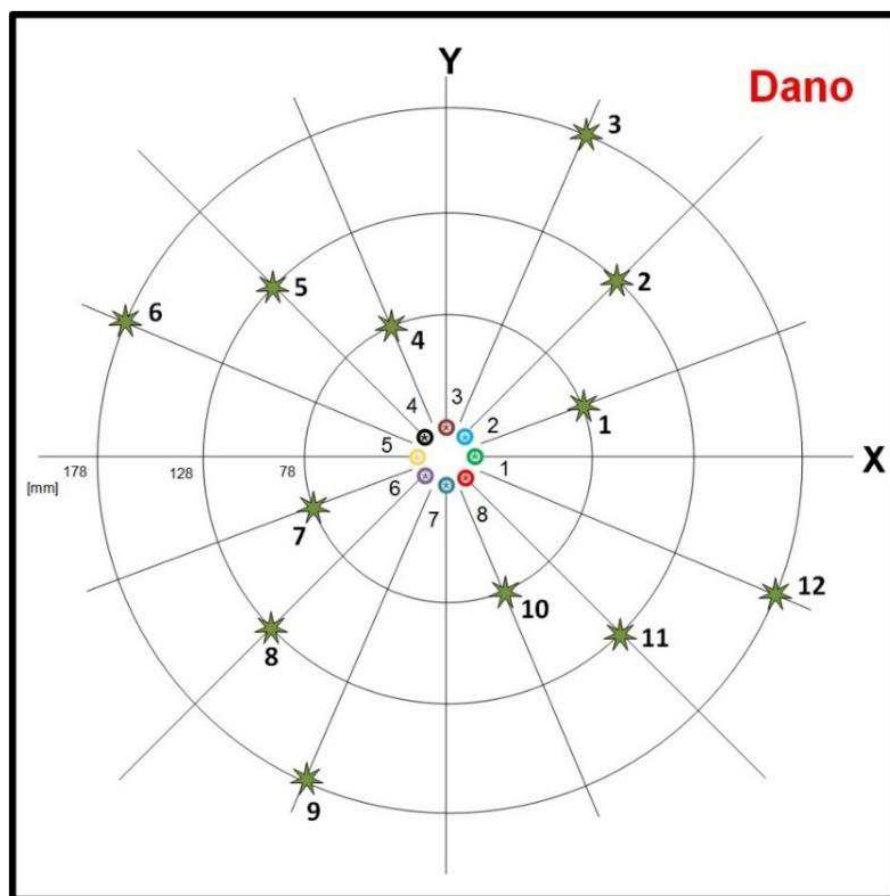


Figura 5.20: Estrutura com danos em 12 posições diferentes.

A configuração usada é a mesma do item 5.2.1. Foi realizado o experimento, começando da temperatura mais baixa e indo para a mais alta. Os resultados das análises estão mostrados nas Figuras 5.21 a 5.28 e Tabela 5.4.

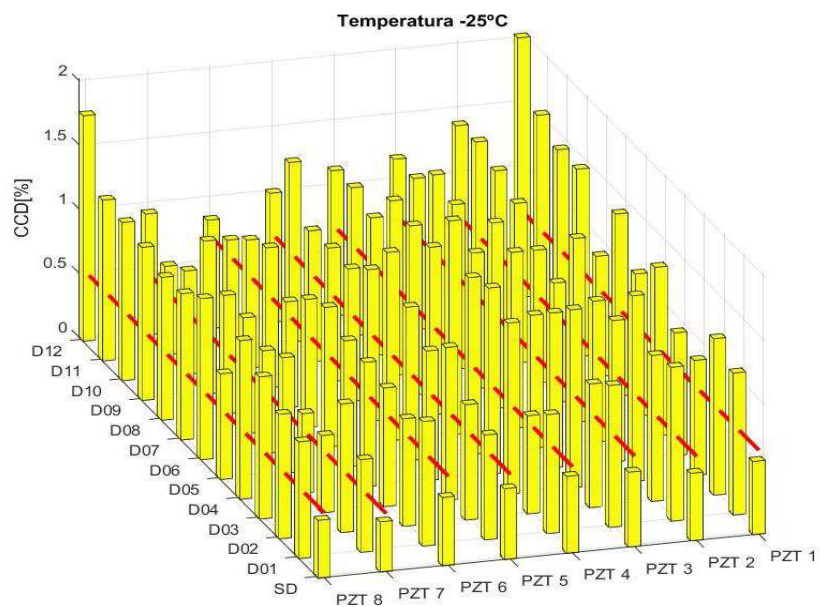


Figura 5.21: Resultado CCD das 12 posições de dano por PZT na temperatura de -25°C.

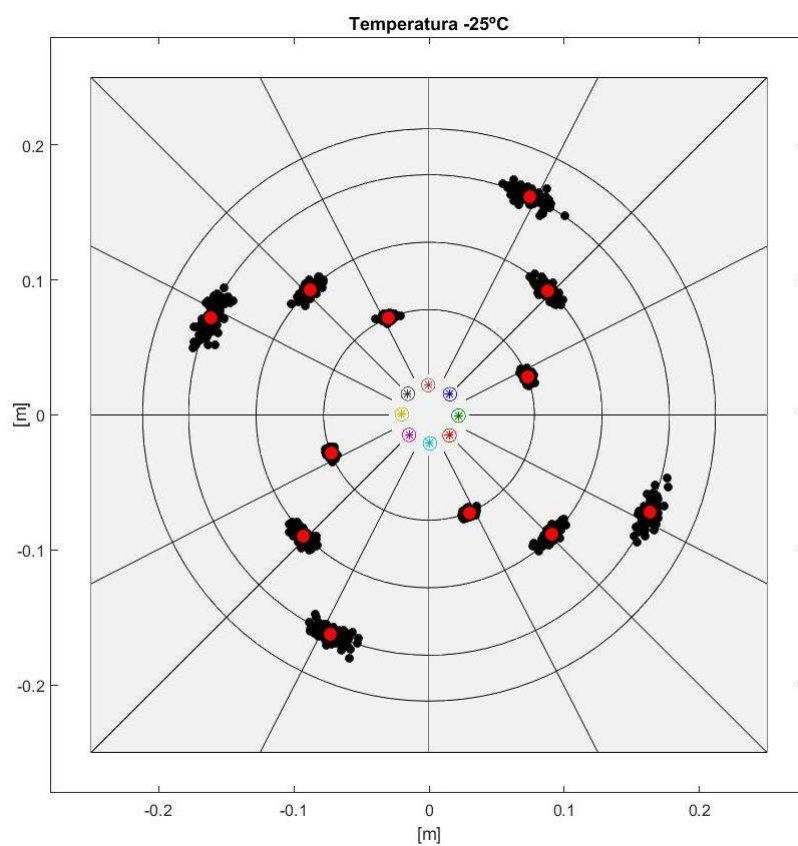


Figura 5.22: Resultado estimado da localização das 12 posições de dano na temperatura de -25°C.

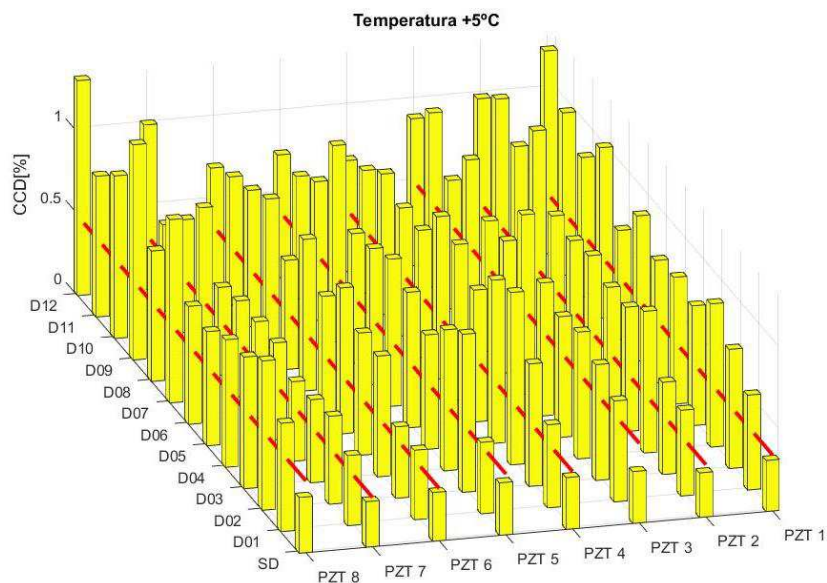


Figura 5.23: Resultado da métrica CCD das 12 posições de dano por sensor de PZT na temperatura de +5°C.

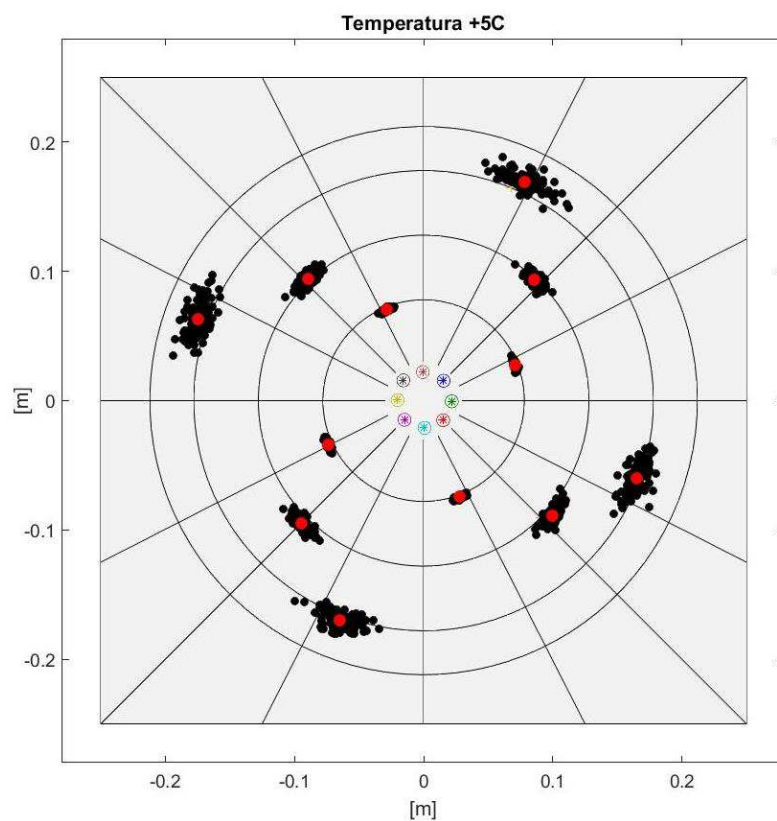


Figura 5.24: Resultado estimado da localização das 12 posições de dano na temperatura de +5°C.

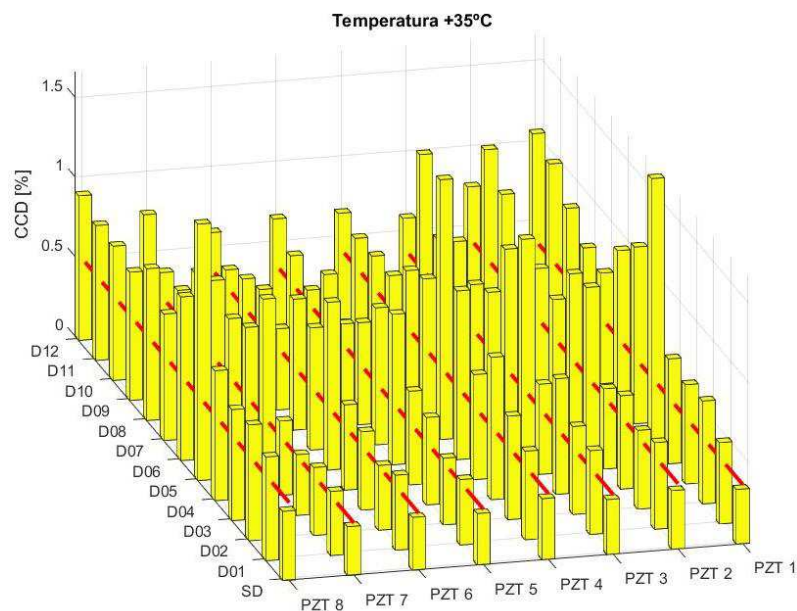


Figura 5.25: Resultado da métrica CCD das 12 posições de dano por sensor de PZT na temperatura de +35°C.

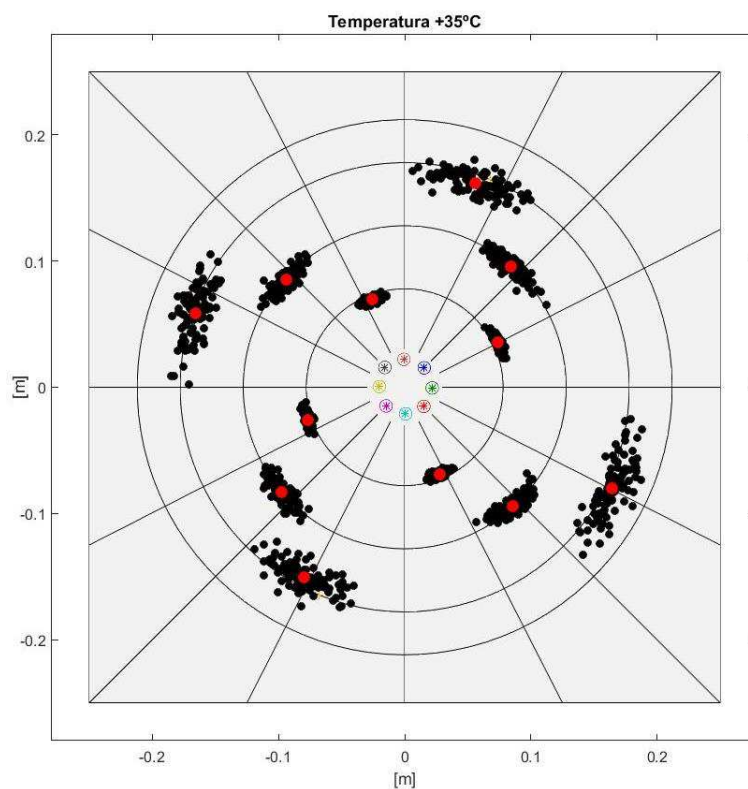


Figura 5.26: Resultado estimado da localização das 12 posições de dano na temperatura de +35°C.

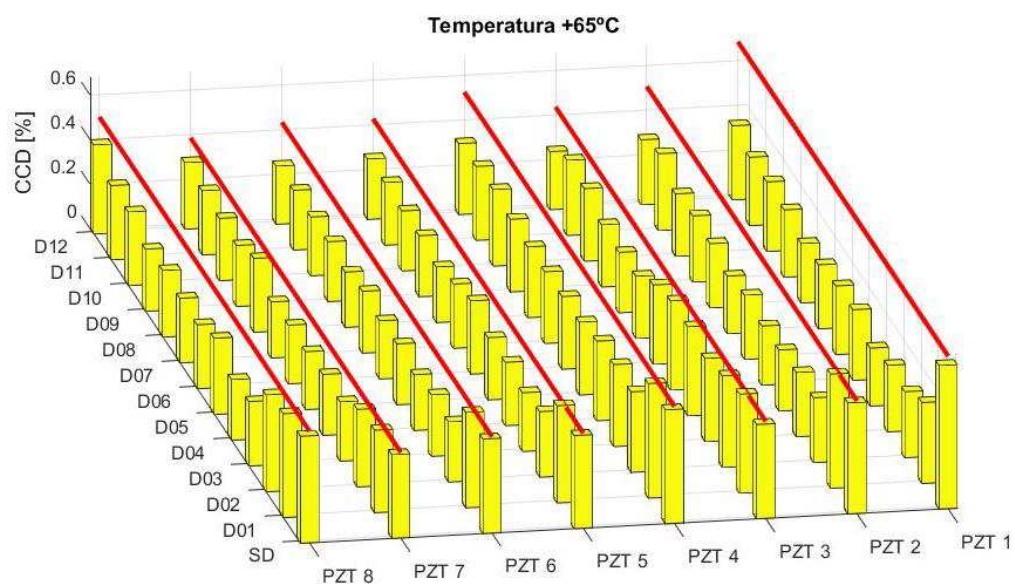


Figura 5.27: Resultado da métrica CCD das 12 posições de dano por sensor de PZT na temperatura de +65°C.

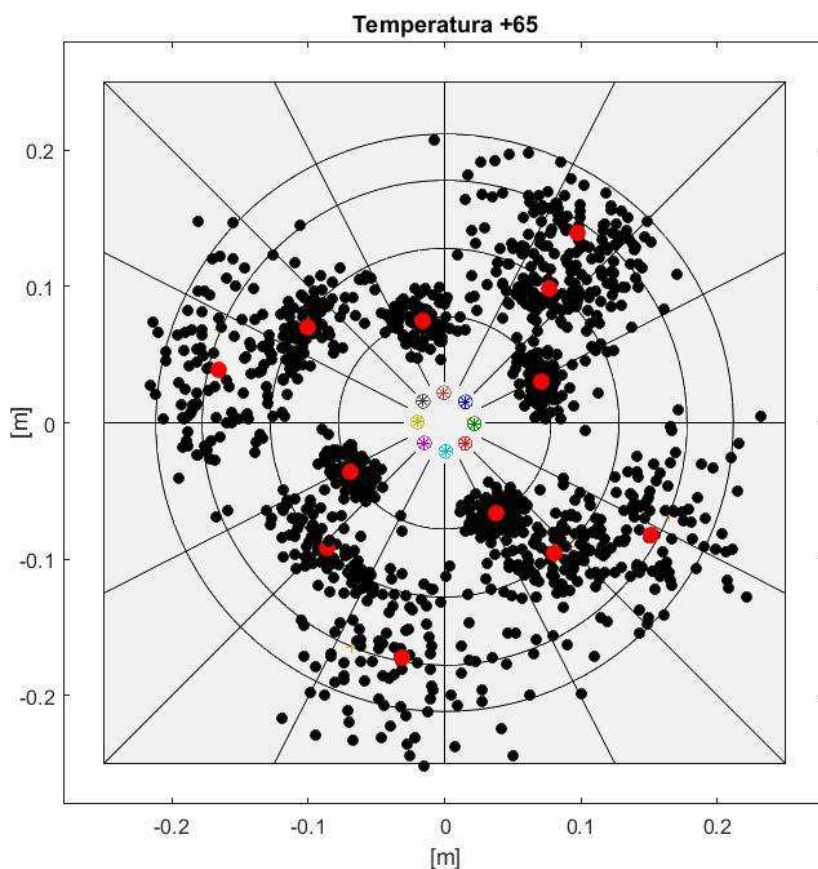


Figura 5.28: Resultado estimado da localização das 12 posições de dano na temperatura de +65°C.

Tabela 5.4: Erro estimado percentual para grande variação de temperatura.

Dano	Erro [%]			
	Temperatura			
	-25°C	+5°C	+35°C	+65°C
1	2.25	2.68	7.95	8.93
2	2.47	5.75	6.48	18.29
3	4.84	4.41	7.64	15.16
4	2.85	2.88	4.91	13.36
5	2.15	4.68	7.87	8.16
6	5.59	3.00	4.86	17.75
7	2.33	4.50	6.18	7.33
8	1.77	7.27	4.86	8.43
9	3.01	3.77	10.13	20.98
10	2.95	6.42	5.31	16.68
11	3.79	6.33	7.17	21.96
12	4.43	4.54	6.90	11.12
Média:	3.20	4.69	6.69	14.01

Relembrando: para uma cada das quatro temperaturas estudadas o dano foi posicionando em 12 pontos diferentes (Figura 5.20), 3 em cada quadrante – O primeiro mais perto, o segundo intermediário e o ultimo mais afastado. Assim pode-se verificar a sensibilidade do sistema de SHM desenvolvida nesta tese.

Para a temperatura de -25°C os resultados da CCD vistos na Figura 5.21 mostram que todos os PZT's foram capazes de identificar 100% dos danos simulados, ou seja, todas as CCD foram maiores que os *threshold* calculados, considerando a localização estimada do dano ao observar a Figura 2.22, pode se perceber que todas as localizações dos 12 danos foram estimadas com um pequeno erro, na Tabela 5.4 é mostrado o erro percentual relativo.

Para as temperaturas de 5°C e 35°C notadas nas Figuras 5.23 a 5.26 e Tabela 5.4 tiveram resultados semelhantes a temperatura de -25°C. A principal diferença é que o erro percentual aumenta com a elevação da temperatura (Tabela 5.4), esse efeito pode ser melhor reparado quando observados os resultados da temperatura em 65°C. De fato, ao observar a Figura 5.27 pode se verificar que as CCD's de todos os PZT's não demostram dano, ou seja, nenhuma das CCD's foram maiores que os *threshold* calculados. Na Figura 5.28 observa-se que

a precisão ao se estiver a posição do dano piora consideravelmente e é confirmado ao se observar o erro relativo na Tabela 5.4, esse fato se dá principalmente devido a variação de rigidez do adesivo (*epoxy*) utilizado para fixar os PZT's, ou seja, a elevada temperatura diminui a rigidez aumentando o amortecimento do sistema do ponto de vista dos PZT's provocando a ineficiência da análise de impedância (CCD) e o elevado erro ao se estimar a localização do dano.

Os resultados aqui apresentados revelam que o sistema desenvolvido na tese atendeu a todos os pontos propostos integrando duas técnicas de SHM distintas de forma a melhorar a performance do sistema. Mais que isso, foi desenvolvido um *hardware* de baixo custo para a aquisição simultânea dos sinais da rede de PZT's utilizados, também foram usados métodos estatísticos para melhorar a confiabilidade dos resultados. Já o problema apresentado na temperatura de 65°C pode ser minimizado trocando o adesivo por outro menos sensível a variação de temperatura, além disso acrescentar em nível de *hardware* uma pré-amplificação programável para compensar a baixa amplitude do sinal ao se estimar a localização do dano.

CAPITULO VI

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Neste capítulo são apresentadas as considerações finais deste trabalho, além das perspectivas para sua continuidade. Como o trabalho envolveu vários temas de desenvolvimento distintos, abrangendo algumas áreas de conhecimento e propostas específicas, estas considerações serão apresentadas separadamente. Além disso, futuras contribuições ou aprimoramentos são propostos.

6.1. Conclusões sobre o Trabalho

Considerando-se que o tema é considerado, de certo modo, novo, com muitas áreas de investigação ainda não suficientemente exploradas, principalmente no que diz respeito à ausência de estudos envolvendo a interação de diversas técnicas de SHM, essa tese apresenta uma combinação entre a técnica da impedância eletromecânica e a técnica das ondas de Lamb, com a finalidade de melhor diagnosticar falhas, com foco em uma estrutura aeronáutica. Uma das principais limitações de estudos e aplicações nessa área é a de equipamento específicos que atendam às necessidades das técnicas envolvidas. Neste sentido, a tese aqui apresentada também mostra o desenvolvimento de um sistema (*hardware* e *software*) com capacidade de dar atenção às técnica da impedância quanto a técnica das ondas de Lamb.

No capítulo 1 foi abordado a motivação inicial desta tese, além de abordar trabalhos importantes a respeito das técnicas aqui aplicadas, assim como o efeito da temperatura e a utilização de análise estatística para a tomada de decisão. Também se apresentou um histórico de trabalhos sobre SHM no âmbito da FEMEC-UFU que formou a base para a realização desta tese. Neste sentido, pode-se dizer que a intenção de desenvolver um sistema de monitoramento de falhas (SHM) com vistas a aplicação aeronáutica foi atendida.

O capítulo 2 retratou o estado da arte sobre monitoramento de integridade estrutural. Neste contexto, foram apresentados conceitos básicos, exemplos de falhas do monitoramento de estruturas, além dos novos *hardwares* desenvolvidos para aplicações específicas de SHM. Pode-se considerar que foram abordados os fundamentos mais importantes, permitindo que o leitor interessado possa iniciar-se nesta ciência.

Já no capítulo 3 procurou-se dar os contornos do trabalho em si, ou seja, foram introduzidos conceitos básicos das técnicas de impedância e ondas de Lamb; foram também considerados os índices de danos, para o caso da impedância eletromecânica, e detalhes do algoritmo de localização para as ondas de Lamb. O efeito da temperatura sobre essas duas técnicas, além dos métodos de compensação também foram abordados neste capítulo.

No capítulo 4 foi apresentado o desenvolvimento do *hardware* e *software* do sistema de SHM proposto nessa tese. O *hardware* utiliza uma topologia de vários ADCS para comutar a rede de multi-sensores piezelétricos. Como alguns dos sinais coletados dependem muito da fase e da amplitude, usou-se de um *feedback* para o seguidor de tensão de alta velocidade para compensar qualquer não linearidade dos ADCS utilizados. O controlador do *hardware* foi implementado em *LABVIEW* e, devido a sua complexidade, foi importante demonstrar passo a passo seu funcionamento. Outro ponto muito importante no desenvolvimento do *hardware* foi a necessidade de implementar um *trigger* digital que tem a função de sincronizar a geração do sinal com a aquisição, junto com a rede de multiplexadores e reles sólidos. Já o processamento dos sinais e análise estatística dos resultados foram executados na plataforma *MATLAB*. Devido ao erro introduzido pela variação de temperatura, foram utilizados algoritmos para compensar o efeito da temperatura em todos os sinais coletados. Para a impedância, a compensação se dá por um procedimento de normalização de dados e, para as ondas de Lamb, trabalhou-se com a reconstrução do sinal de *baseline*. A quantificação do dano utiliza a métrica CCD a partir das assinaturas de impedância. A localização do dano foi realizada por meio de triangulação, tendo base em um procedimento de otimização que promove a minimização de um erro RMS.

Já para a análise estatística foi utilizado o critério de Chauvenet, que promove uma limpeza nos dados tanto para a técnica da impedância eletromecânica, quanto para as ondas de Lamb (resultado da localização do dano). Calculou-se também um nível de *threshold* confiável, aspecto este de suma importância para garantir que o sinal medido de fato está associado a um dano estrutural.

Finalmente, no capítulo 5 registrou-se os resultados do sistema de monitoramento proposto, buscando ilustrar seu funcionamento para diferentes locais na estrutura testada, além de uma grande variação de temperatura. A faixa de temperatura escolhida para os experimentos foi de -30°C a $+65^{\circ}\text{C}$, com auxílio da câmara climática EPL-4H. Claramente, a escolha desta faixa de temperatura não corresponde a toda a gama de temperaturas de uma superfície de asa de aeronave (-55°C a $+60^{\circ}\text{C}$). No entanto, a intenção foi a de fornecer uma ilustração do método proposto.

A escolha da configuração das pastilhas de PZT foi inspirada no sensor/atuador CLoVER desenvolvido por Salas; Cesnik (2008). O CLoVER propriamente dito não pôde ser utilizado nessa tese devido a limitações técnicas, pois requer de alta tensão para seu funcionamento. Porém, sua configuração facilita o método de localização de dano, além de permitir o monitoramento de uma grande área na estrutura.

A dificuldade de provocar danos não permanentes na estrutura (de forma a garantir sua integridade), a não interferência na repetibilidade dos experimentos e a necessidade de ser detectável para ambas as técnicas abordadas nessa tese motivaram a escolha do dano representado pela adição de massa, o que foi conseguido por um par de ímãs de NdFeB. A motivação dessa estratégia tem a ver com o fato do autor considerar que as alterações estruturais assim obtidas se comportam de forma muito semelhante às falhas reais. Desse modo, considera-se que o princípio de funcionamento da metodologia proposta foi testado adequadamente a partir de modificações estruturais introduzidas pela adição de massa.

Em relação ao *hardware*, foi utilizado um digitalizador de sinal e gerador de função comercial para funcionarem complementarmente ao *hardware* desenvolvido. A remoção desse equipamento será um dos pontos abordados nos trabalhos futuros, juntamente com o controlador embarcado. Em relação a topologia de multiplexadores, essa mostrou-se muito versátil, pois a possibilidade de utilizar multi-sensores possibilita a aplicação simultânea do sistema de monitoramento a um número maior de estruturas. A interação de duas técnicas de SHM diretamente em nível de *hardware* foi uma tarefa complexa, pois cada técnica tem características

específicas que devem ser atendidas sem interferir na outra. Esse desafio foi plenamente atendido nessa tese, sendo este considerado uma de suas mais significativas contribuições.

É importante ressaltar que a interação das duas técnicas – juntamente com a seleção de frequência feita pela assinatura de impedância para melhorar o algoritmo de localização de dano com as ondas de Lamb – se constitui numa realização inédita desta tese, segundo a bibliografia consultada pelo autor até este momento.

Considerando os experimentos realizados, pode-se concluir:

- A criação de um banco de danos é crucial quando abordamos o efeito da temperatura e algoritmos para compensar este efeito;
- O sistema de monitoramento mostrou ótima capacidade quanto aos chamados falsos positivos (não apontando dano quando este não existe), mesmo utilizando apenas 4 sensores e considerando o efeito da temperatura;
- Para um dano aleatório, o sistema revelou-se capaz de quantificar a métrica CCD e localizar o dano com um erro relativo inferior a 2%.
- Para mostrar a capacidade de diagnosticar falha em diferentes locais da estrutura e também sua sensibilidade, o dano foi posicionado em 48 posições diferentes nas mesmas condições ambientais do dano aleatório. Em todos os casos, o sistema foi capaz de detectar e localizar o dano após tratamento estatístico. É possível notar também que o erro relativo da localização do dano aumenta à medida que esse é posicionado mais distante das pastilhas de PZT, conforme esperado; e
- Sumarizando, ao se considerar uma grande variação de temperatura, os resultados variaram, ou seja, para a temperatura mais baixa o sistema de monitoramento mostrou melhor sensibilidade devido ao aumento da rigidez do conjunto estrutura-adesivo-sensor; para as intermediárias os resultados foram semelhantes. Já para a maior temperatura houve um crescimento significativo no amortecimento da estrutura, o que acarretou uma grande suavização das assinaturas de impedância e baixa sensibilidade da métrica CCD. Para as ondas de Lamb, esse efeito implicou uma baixa amplitude dos sinais adquiridos, aumentando a dispersão dos resultados e, conseqüentemente, um aumento significativo do erro relativo à medida que o dano se afasta dos sensores.

6.2. Perspectivas Futuras

Como perspectivas para trabalhos futuros, pode-se mencionar:

- A extensão da interação de diversas técnicas de SHM para diagnosticar falhas estruturais. Esse assunto ainda não foi totalmente explorado e tem demonstrado resultados promissores.
- A implementação do sistema de monitoramento desenvolvido para considerar estruturas de material composto;
- O aumento da confiabilidade do processo de detecção de danos: o processo de monitoramento deve ser capaz de definir, através de ferramentas de estatística, um limiar de dano adequado para as métricas utilizadas, quaisquer que sejam as condições impostas ao processo de monitoramento;
- Quanto à rotina de diagnóstico de sensores, é muito importante garantir o pleno funcionamento da rede de sensores durante todo o processo de monitoramento. Este cuidado diminui a incidência de falsos diagnósticos que podem comprometer a confiabilidade do procedimento. Neste sentido, pode-se mencionar a implementação de lógicas de auto diagnóstico dos sensores no *software* de monitoramento, em nível de pré-processamento dos dados; e
- Quanto ao projeto do *hardware*, a velocidade de operação e execução dos comutadores em sincronia com o digitalizador e gerador de função cria a necessidade de uma controladora embarcada, além de amplificadores programáveis para suprir a baixa amplitude do sinal em alta temperatura e incorporação do digitalizador e gerador de função em um *hardware* de baixo custo.

CAPITULO VII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMBROZINSKI, L.; MAGDA, P.; STEPINSKI, T.; UHL, T.; DRAGAN, K., A method for compensation of the temperature effect disturbing Lamb waves propagation. **In Proceedings of the 10th International Conference on Barkhausen and Micro-Magnetics (ICBM)**, Baltimore, MD, USA, 21–26 July 2013.

AN Y.K.; SOHN, H., Integrated impedance and guided wave based damage detection, **Mechanical Systems and Signal Processing** 28, 2012, 50–62.

ANDREWS, J. P.; PALAZOTTO, A.N.; DESIMIO, M.P.; OLSON, S.E., Lamb wave propagation in varying isothermal environments. **Struct. Health Monit.** 2008, 7, 265–270.

ANNAMDAS, V. G. M.; IAN, L. S.; PANG, H. L. J.; SOH, C. K., Monitoring of Fatigue in Welded Beams Using Piezoelectric Wafer Based Impedance Technique. **J. Nondestruct. Eval.**, 2014, 33(1): 124-140.

ANNAMDAS, V. G. M.; SOHN, C. K., Application of electromechanical impedance technique for engineering structures: review and future issues. **J. Intell. Mater. Syst. Struct.**, 2010, 21(1): 41-59.

AULD, B. A., **Acoustic fields and waves in solids**. [S.I.]: Krieger, 1990.

BAPTISTA, F. G.; FILHO, J. V.; INMAN, D. J., Real-time multi-sensors measurement system with temperature effects compensation for impedance-based structural health monitoring. **Journal of Structural Health Monitoring**. 2011.

BAPTISTA, F. G.; BUDOYA, D. E.; ALMEIDA, V. A. D.; ULSON, J. A. C. An Experimental Study on the Effect of Temperature on Piezoelectric Sensors for Impedance-Based Structural Health Monitoring. **Sensors** v. 14, p. 1208-1227, 2014.

BAPTISTA, F.; VIEIRA, J.; INMAN, D. J., Influence of excitation Signal on Impedance-based Structural Health Monitoring. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**. v. 21, n. 14, p. 1409-1416, nov. 2010.

BENDAT, J. S.; PIERSON, A. G., **Random Data – Analysis and Measurement Procedures**. 4th edition. ISBN: 978-0470248775. John Wiley, New York, NY, USA, 2000.

BHALLA, S.; GUPTA A.; BANSAL S.; GARG T., Ultra Low-cost Adaptations of Electro-Mechanical Impedance Technique for Structural Health Monitoring. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, 2009.

BHALLA, S.; NAIDU, A. S. K.; SOH, C. K., Influence of Structure– Actuator Interactions and Temperature on Piezoelectric Mechatronic Signatures for NDE. In: **Proceedings of ISSS-SPIE 2002 International Conference on Smart Materials Structures and Systems**, December 12–14 de 2002a, Bangalore, India (paper no ISSS-SA502).

BHALLA, S.; NAIDU, A. S. K.; ONG, C. W.; SOH, C. K., Practical Issues in the Implementation of Electromechanical Impedance Technique for NDE. In **Proceedings of the SPIE International Symposium on Smart Materials, Nano-, and Micro-Smart Systems**. December 16-18 de 2002b, Melbourne, Australia, 2002b.

CAVALINI Jr., A. A.; OLIVEIRA, D. D.; RABELO, D. S.; FINZI NETO, R. M.; STEFFEN Jr., V., “Fault detection in a rotating shaft by using the electromechanical impedance method and a temperature compensation approach”. In: **Proc. of the XXXVI Ibero-Latin American congress on computational methods in engineering (CILAMCE 2015)**, Rio de Janeiro, Brazil, November, 2015.

CAWLEY, P.; CEGLA, F.; GALVAGNI, A., Guided waves for NDT and permanently installed monitoring. **Insight Non-Destr. Test. Cond. Monit**, 54, 594–601, 2012.

CHARLES ANNIS, P. E., **Statistical best-practices for building Probability of Detection (POD) models**. R package mh1823, version 3.1.4, available in: Accessed in: August 5th 2013.

CHAUDHRY, Z., JOSEPH, T.; SUN, F.; ROGERS, C., Local-Area Health Monitoring of Aircraft via Piezoelectric Actuator/Sensor Patches. In: **Smart Structures and Integrated Systems, SPIE Conference**. San Diego, CA. Proceedings of the SPIE. Vol.2443. 1995.

CHAUDHRY, Z.; LALANDE, F.; GANINO, A.; ROGERS, C., Monitoring the Integrity of Composite Patch Structural Repair via Piezoelectric Actuators/Sensors. **AIAA-19961074-CP**, 1996.

CORTEZ, N. E.; FILHO, J. V.; BAPTISTA, F. G., A New Microcontrolled Structural Health Monitoring System Based on the Electromechanical Impedance Principle. **Journal of Structural Health Monitoring**. 2015.

DAO, P. B.; STASZEWSKI, W. J., Cointegration Approach for Temperature Effect Compensation in Lamb-Wave-Based Damage Detection. **Smart Materials and Structures**, 22:095002, 2013.

DAVIS, G. D.; RICH, M. J.; DRZAL, L. T., Monitoring Moisture Uptake and Delamination in CFRP Reinforced Concrete Structures with Electrochemical Impedance Sensors. **J. Nondestruct. Eval.** 23(1):1-9, 2004.

DIAMANTI, K.; HODKINSON, J. M.; SOUTIS, C., Detection of low- velocity impact damage in composite plates using lamb waves. **Structural Health Monitoring**, 2004.

DÍAZ VALDÉS, S.H.; SOUTIS, C., Health monitoring of composites using Lamb waves generated by piezoelectric devices. **Plastics, Rubber and Composites**, vol.29(9), p.475–481, 2000.

DOEBLING, S. W.; FARRAR, C. R.; PRIME, M. B., A summary review of vibration-based damage identification methods. **Shock and Vibration Digest**. Thousand Oaks, v. 30, n. 2, p. 91-105, 1998.

FARRAR, C. R.; LIEVEN, N. A. J.; BENENT, M. T., An Introduction to Damage Prognosis. In: Damage Prognosis for Aerospace, **Civil and Mechanical System**; Wyle, Inglaterra, 2005, p. 449.

FINZI NETO, R. M., A Low-cost electromechanical impedance-based SHM architecture for multiplexed piezoceramic actuators. **Journal of Structural Health Monitoring**. 2010.

FINZI NETO, R. M.; STEFFEN, V.; RADE, D. A.; GALLO, C. A.; PALOMINO, L. V., A Low-cost Electromechanical Impedance-based SHM Architecture for Multiplexed Piezoceramic Actuators. **Structural Health Monitoring**. v. 10, n. 4, p. 391-401, 2011.

FRANCO, V. R., **Monitoramento da Integridade em Estruturas Aeronáuticas**. 2009. 202f. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, São Paulo, 2009.

GIBILISCO, S., **Manual de Eletrônica e de Telecomunicações**. Reichmann e Affonso Editores, Brasil. 2002.

GIURGIUTIU, V.; ZAGRAI, A., Damage detection in thin plates and aerospace structures with the electro-mechanical impedance method. **Structural Health Monitoring**, vol.4(2), p.99-118, 2005.

GIURGIUTIU, V. I.; ZAGRAI, A., Characterization of Piezoelectric Wafer Active Sensors. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**. v. 11. p. 959-976. 2000.

GIURGIUTIU, V. I.; ZAGRAI, A.; BAO, J. J., Piezoelectric Wafer Embedded Active Sensors for Aging Aircraft Structural Health Monitoring. **International Journal of Structural Health Monitoring**. v. 1. p. 41-61. 2002.

GIURGIUTIU, V. I.; ZAGRAI, A.; BAO, J.J. REDMOND, J.; ROACH, D.; RACKOW, K., Active Sensors for Health Monitoring of Aging Aerospace Structures. **International Journal of the Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management**. v. 6. n. 1. p. 3-21. 2003.

HARLEY, J.; MOURA, J., Scale transform signal processing for optimal ultrasonic temperature compensation, *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, **IEEE Transactions on**, vol. 59, no. 10, pp. 2226–2236, 2012.

HU, N.; SHIMOMUKAI, T.; FUKUNAGA, H.; SU, Z. Q., Damage identification of metallic structures using A0 mode of Lamb wave. **Struct. Health Monit.**, 7, 271–285, 2008.

HUANG, K.; AVIYENTE, S., Sparse representation for signal classification. In: **Advances in Neural Information Processing Systems** (NIPS 2006). [S.I.]: MIT Press, p. 609–616, 2006.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGAMN, T. L., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. **Wiley edition 6**, p. 272-275, 2006.

INMAN, D. J., Smart structures: examples and new problems. In: **Congresso Brasileiro De Engenharia Mecânica – COBEM**, 16, 2001. Uberlândia. Anais: ABCM, 2001.

JÚNIOR, V. L.; SILVA, S., Structural Health Monitoring Algorithms for Smart Structures. In: **Damage Prognosis for Aerospace, Civil and Mechanical System**; Wyle, Inglaterra, 449 p, 2005.

KESSLER, S. S.; SPEARING, S. M.; ATALLA, M. J, In-Situ Damage Detection of Composites Structures using Lamb Waves Methods, In **Proceedings of the 1st European Workshop on Structural Health Monitoring**, Ecole Noemale Supérieure, Cachan, Paris, France, 374–381, 2002.

KIJANKA, P.; RADECKI, R.; PACKO, P. W.; STASZEWSKI, J.; UHL, T., GPU-based local interaction simulation approach for simplified temperature effect modelling in Lamb wave propagation used for damage detection, **Smart Materials and Structures**, 22(3): 035014, 2013.

KOO, K. Y.; PARK, S.; LEE, J. J.; YUN, C. B., Automated impedance-based structural health monitoring incorporating effective frequency shift for compensating temperature effects. **J. Intell. Mater. Syst. Struct.** 20(4): 367-377, 2009.

KOO, K. Y., Automated Impedance-based Structural Health Monitoring Incorporating Effective Frequency Shift for Compensating Temperature Effects. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, 2008.

KRAUTKRAMER, J., *Ultrasonic Testing of Materials 3rd ed.*, **Springer Verlag**, 1983.

KRISHNAMURTHY, K.; LALANDE, F.; ROGERS, C. A., Effects of temperature on the electrical impedance of piezoelectric sensors. In: Proc. SPIE 2717, **Smart Structures and Materials 1996: Smart Structures and Integrated Systems**, 302 (mai. 1996); San Diego, CA. doi: 10.1117/12.239033, 1996.

KURATA, M.; KIM, J.; LYNCH, J.; VAN DER LINDEN, G.; SEDARAT, H.; THOMETZ, E.; HIPLEY, P.; SHENG, L., Internet-enabled wireless structural monitoring systems: development and permanent deployment at the new carquinez suspension bridge. **Journal of Structural Engineering**, New York, v. 139, n. 10, p. 1688-1702, ISSN: 1943-541X, 2013.

LAMB, H., On waves in an elastic plate, in **Conference of the Royal Society**, London, vol. XCIII, pp. 114-128, 1917

LEMISTRE, M.; GOUYON, R.; KACZMAREK, H.; BALAGEAS, D., Damage Localization in Composite Plates Using Wavelet Transform Processing on Lamb Wave Signals, **Second International Workshop on Structural Health Monitoring**, Stanford, USA, 1999.

LEUCAS, L. F., **Utilização das Técnicas de Impedância eletromecânica e Ondas de Lamb para Identificação de Dano em Estruturas com Rebite**. 2009. 58f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

LIANG, C.; SUN, F. P.; ROGERS, C. A., Coupled electromechanical analysis of adaptive material system – determination of actuator power consumption and system energy transfer. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, p. 21-20, 1994.

LU, Y.; YE, L.; WANG, D.; ZHONG, Z.; HERSZBERG, I., Damage Detection in a Large Composite Panel of Five Stiffeners Using Lamb Wave Signals, **Materials forum volume 33**, 2009.

MANSON, G.; LEE, B. C.; STASZEWSKI, W. J., Eliminating environmental effects from Lamb wave-based structural health monitoring. In **Proceedings of the International Conference on Modal Analysis, Noise and Vibration Engineering**, Louvain, Belgium, 20–22 September 2004.

MARZANI, A.; SALAMONE, S., Numerical Prediction and Experimental Verification of Temperature Effect on Plate Waves Generated and Received by Piezoceramic Sensors. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 30:204–217, 2012.

MASSOUD, M., Impedance Methods for Machine Analysis: **Modal Parameters Extraction Techniques**. **Université de Sherbrooke**, Quebec, Canada, p. 4-14, 1985.

MONNIER, T., Lamb Waves-based Impact Damage Monitoring of a Stiffened Aircraft Panel using Piezoelectric Transducers, **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, 17(5):411-421, 2006.

MOURA Jr., J. R. V., **Uma Contribuição aos Sistemas de Monitoramento de Integridade Estrutural Aplicada a Estruturas Aeronáuticas e Espaciais**. 2008. 264f. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

MOURA Jr., J. R. V., **Métodos de Identificação de Falhas em Estruturas Aeronáuticas Utilizando Meta-Modelagem Aliada às Técnicas de Impedância e Estruturas Inteligentes**. 2004. 158 F. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

MOURA Jr., J. R. V.; STEFFEN Jr., V., Impedance-based Health Monitoring: Frequency Band Evaluation. In **Proceedings of the 22nd International Modal Analysis Conference (IMAC XXII)**, Dearborn, Michigan, USA, paper no. 161, 2004.

PALOMINO, L. V., **Análise das Métricas de Dano associadas à Técnica da Impedância Eletromecânica para Monitoramento de Integridade Estrutural**. 2008. 111 f. Dissertação de

Mestrado (Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia.

PALOMINO, L. V., **Técnicas de inteligência artificial aplicada ao método de monitoramento de integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica para monitoramento de danos em estruturas aeronáuticas**. 2012. 175f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

PALOMINO, L. V.; STEFFEN Jr., V., Damage metrics associated with electromechanical impedance technique for SHM applied to a riveted structure”. In **Proceedings of the 20th International Congress of Mechanical Engineering – COBEM2009**. Porto Alegre, Brazil, 2009.

PALOMINO, L. V.; TSURUTA, K. M.; MOURA Jr., J. R. V.; RADE, D. A.; STEFFEN Jr., V.; INMAN, D. J., Evaluation of the influence of sensor geometry and physical parameters on impedance-based structural health monitoring. **Shock and Vibration**, 19, p. 811-823, 2012.

PALOMINO, L.V.; STEFFEN Jr., V.; FINZI NETO, R. M., Probabilistic Neural Network and Fuzzy Cluster Analysis Methods Applied to Impedance-Based SHM for Damage Classification. **Shock and Vibration**, vol. Article ID 401942, 2014.

PARK, C. Y., Damage Index Comparison for a Composite Stiffened Panel Using Lamb Wave, **Advanced Materials Research**, Vols. 26-28, 2007.

PARK, G.; CUDNEY, H.; INMAN, D. J., An Integrated Health Monitoring Technique Using Structural Impedance Sensors. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**. Vol. 11. No. 6. p. 448–455, 2000b.

PARK, G.; CUDNEY, H.; INMAN, D. J., Based Structural Health Monitoring Using a Miniaturized Impedance Measuring Chip for Corrosion Detection. **American Society for Nondestructive Testing**. Pesquisa em Nondestructive Evaluation, 18: 139-150, 2007.

PARK, G.; CUDNEY, H.; INMAN, D. J., Feasibility of Using Impedance-Based Damage Assessment for Pipeline Systems. **Earthquake Engineering and Structural Dynamics Journal**. v. 30. n. 10. p. 1463-1474. 2001.

PARK, G.; CUDNEY, H.; INMAN, D. J., Impedance-based health monitoring of civil structural components. **ASCE Journal of Infrastructure Systems**, 6, 153-160, 2000.

PARK, G.; CUDNEY, H.; INMAN, D. J., Impedance-Based Health Monitoring Technique for Massive Structures and High-Temperature Structures. In: **Smart Structures and Materials** 1999: Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials. Proceedings of the SPIE. v. 3670. p. 461-469. 1999b.

PARK, G.; CUDNEY, H.; INMAN, D. J., Impedance-Based Health Monitoring of Civil Structural Components. **ASCE Journal of Infrastructure Systems**. Vol. 6. No. 4. p. 153– 160, 2000a.

PARK, G.; INMAN, D. J., Impadance-Based Structural Health Monitoring. In: **Damage Prognosis for Aerospace, Civil and Mechanical System**; Wyle, Inglaterra, 449 p, 2005.

PARK, G.; INMAN, D. J., Smart Bolts: An Example of Self-Healing Structures, **Smart Materials Bouletin**, 2001.

PARK, G.; KABEYA, K.; CUDNEY, H. H.; INMAN, D. J., Impedance- Based Structural Health Monitoring for Temperature Varying Applications. **JSME International Journal**. Vol. 42. No. 2. p. 249–258, 1999a.

PARK, G.; KABEYA, K.; CUDNEY, H.H.; INMAN, D. J., Impedance-Based Structural Health Monitoring for Temperature Varying Applications. **JSME International Journal**, 42(2): 249-258, 1999.

PARK, G.; SOHN, H.; FARRAR, C. R.; INMAN, D. J. Overview of Piezoelectric Impedance based Health Monitoring and Path-Forward. **The Shock and Vibration Digest**. v. 35, Issue 6, p. 85-92, 2003.

PARK, S.; LEE, J.-J.; YUN, C.-B.; INMAN, D. J., Electro-Mechanical Impedance-Based Wireless Structural Health Monitoring Using PCA-Data Compression and k-means Clustering Algorithms Monitoring and Path Forward. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, vol. 19, 2008.

PATI, Y.C.; REZAIIFAR, R.; KRISHNAPRASAD, P.S., Orthogonal matching pursuit: Recursive function approximation with applications to wavelet decomposition. In **Proceedings of the 27th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers**, Pacific Grove, CA, USA, 1–3 November 1993.

PEAIRS, D. M.; PARK, G.; INMAN, D. J., Impedance-based SHM Modeling using Spectral Elements and Circuit Analysis. In **Proceedings of the 23rd International Modal Analysis Conference (IMAC XXIII)**, Orlando, Florida, USA, paper no. 232, 2005

PECKENS, C. A.; KANE, M. B.; ZHANG, Y.; LYNCH, J. P., Permanent installation of wireless structural monitoring systems in infrastructure systems. In: WANG, M. L.; LYNCH, J. P.; SOHN, H. (Ed.). **Sensor technologies for civil infrastructures: sensing hardware and data collection methods for performance assessment**. Waltham: Woodhead Publishing, v.1, p. 480-509, 2014.

PUTKIS, O.; DALTON, R. P.; CROXFORD, A. J., The influence of temperature variations on ultrasonic guided waves in anisotropic CFRP plates. **Ultrasonics** 2015, 60, 109–116. [CrossRef] [PubMed] *Sensors*, 16, 1273 15 of 15, 2016.

RABELO, D. S., **Impedance-based Structural Health Monitoring incorporating Compensation of the temperature variation effect**. 2014. 102 f. M.Sc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RABELO, D. S.; FINZI NETO, R. M.; STEFFEN Jr., V., Impedance-based Structural Health Monitoring incorporating compensation of temperature variation effects. In: **Proc. of the 23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering**. Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 2015b.

RABELO, D. S.; GUIMARÃES, C. G.; CAVALINI JR.; A. A.; STEFFEN JR., V., A comparative study of temperature compensation techniques for impedance-based structural health monitoring

systems In: **Proc. of the 1st Workshop in Industrial Mathematics, Modelling and Optimization**. Catalão, GO, Brazil, 2015c.

RABELO, D. S.; STEFFEN JR., V.; FINZI NETO, R. M.; LACERDA, H. B., Impedance-based structural health monitoring and statistical method for threshold-level determination applied to 2024-T3 aluminum panels under varying temperature, **Structural Health Monitoring**, Online First, doi:10.1177/1475921716671038, 2016.

RAGHAVAN, A.; CESNIK, C. E. S., Lamb-Wave Based Structural Health Monitoring. **Damage Prognosis for Aerospace**, Civil and Mechanical System, Wiley, Cap.11, pp. 235-274. 2005.

RAGHAVAN, A.; CESNIK, C. E. S., Effect of elevated temperature on guided-wave structural health monitoring. **J. Intell. Mater. Syst. Struct.**, 19, 1383–1398, 2008.

RAJU, V. **Implementing Impedance-Based Health Monitoring**. 1997. 224 f. Dissertação de Mestrado – Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia.

RAMADAS, C.; BALASUBRAMANIAM, K.; JOSHI, M.; KRISHNAMURTHY, C. V., Interaction of Lamb mode (A0) with Structural Discontinuity and Generation of “Turning modes” in a T-joint, **Elsevier**, 2011.

RICCI, F.; BANERJEE, S.; MAL, A. K., Health monitoring of composite structures using wave propagation data. In **Proceedings of the 2nd European Workshop on Structural Health Monitoring**, Forum am Deutschen Museum, Munich, Germany, 1035–1042, 2004.

ROCHA, L. A. A.; RABELO, D. S.; STEFFEN JR., V., Identification of Damage in Structures with Rivets using Impedance techniques and controls of Lamb waves, **CONEM** 2014 no. 0503, 2014.

ROY, S.; LONKAR, K.; JANAPATI, V.; CHANG, F. K., A Novel Physics-Based Temperature Compensation Model for Structural Health Monitoring Using Ultrasonic Guided Waves. **Structural Health Monitoring**: DOI: 10.1177/1475921714522846, 2014.

SALAS, K. I.; CESNIK, C. E. S., Design and Characterization of the CLoVER transducer for structural health monitoring. **Proceedings of the 15th SPIE Symposium on Smart Structures and Materials & Nondestructive Testing and Health Monitoring**, March 2008, Paper #6935-11, San Diego, CA, 2008.

SARAVANOS, D. A.; BIRMAN, V.; HOPKINS, D. A., Detection of delaminations in composite beams using piezoelectric sensors. In **Proceedings of the 31st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures**, Structural Dynamics and Materials Conference, p. 181–191, 1994.

SOH, C. K.; TSENG, K.; BHALLA, S.; GUPTA, A., Performance of Smart Piezoceramic Patches in Health Monitoring of a RC Bridge. **Smart Materials and Structures**. v. 9. p. 533542. 2000.

SOHN, H., Statistical Pattern Recognition Paradigm Applied to Defect Detection in Composite Plates in Damage Prognosis – for Aerospace, Civil and Mechanical Systems, **John Wiley & Sons** Inc. Hoboken, NJ, USA, 2005.

SOHN, H., Effects of environmental and operational variability on structural health monitoring. **Phil. Trans. R. Soc. A**, vol. 365, p. 539–560, 2007.

SOHN, H.; PARK, G.; WAIT, J. R.; LIMBACK, N. P.; FARRAR, C. R., Wavelet-based signal processing for detecting delamination in composite plates. **smart materials and structures**, vol. 13, p. 153–160, 2004b.

SOROHAN, S.; CONSTANTIN, N.; GAVAN, M., ANGHEL, V., Extraction of Dispersion Curves for Waves Propagating in Free Complex Waveguides by **Standard Finite Element Codes**, *Ultrasonics* 51, 2011.

SU, Z.; YE, L., Lamb Wave-based Quantitative Identification of Delamination in CF/EP Composite Structures Using Artificial Neural Algorithm, **Composite Structures** 66, 2004.

SU, Z.; YE, L., Identification of Damage Using Lamb Waves from Fundamentals to Applications, **Springer**, e-ISBN:978-1-84882-784-4, 2009.

SU, Z., YE, L., LU, Y. Guided lamb waves for identification of damage in composite structures: a review. **Journal of Sound and Vibration**, vol. 295, p. 753-780, 2006.

SUN, F. P.; CHAUDHRY, Z.; LIANG, C.; ROGERS, C. A., Truss structure integrity identification using PZT sensor–actuator. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, vol. 6, 134–139, 1995.

TAYLOR, S. G.; FARINHOLT, K. M.; PARK, G.; TODD, M. D.; FARRAR, C. R., Multiscale wireless sensor node for health monitoring of civil infrastructure and mechanical systems. **Smart Structures and Systems**, Daejeon, v. 6, n. 5-6, p. 661–673, 2010. ISSN: 1738-1584, 2010.

TORFS, T.; STERKEN, T.; BREBELS, S.; SANTANA, J.; VAN DEN HOVEN, R.; SPIERING, V.; BERTSCH, N.; TRAPANI, D.; ZONTA, D., Low power wireless sensor network for building monitoring. **IEEE Sensors Journal**, New York, v. 13, n. 3, p. 909-915, 2013. ISSN: 1530-437X, 2013.

TSENG, K. K-H.; NAIDU, A. S. K., Non-parametric damage detection and characterization using smart piezoceramic material. **Journal Smart Material and Structures**. V.11, p. 317-329, maio, 2002.

TSURUTA, K. M., **Monitoramento de Integridade Estrutural de Materiais Compostos Sujeitos a Impactos Empregando a Técnica de Impedância Eletromecânica**. 2008. 114 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

UGRAY, Z.; LEON L.; JOHN C.; PLUMMER, F. G.; JAMES K.; RAFAEL M., Scatter Search and Local NLP Solvers: A Multistart Framework for Global Optimization. **INFORMS Journal on Computing**, Vol. 19, No. 3, 2007, pp. 328–340.

VIKTOROV, I. A., **Raleigh and Lamb Waves: Physical Theory and Applications Plenum Press**, 1967.

WANG, C. S.; CHANG, F. K., Diagnosis of Impact Damage in Composite Structures with built-in piezoelectric networks, **Proceedings of SPIE**, 3990, 13-19, 2000.

WANG, Y. S.; GAO, L. M.; YUAN, S. F.; QIU, L.; QING, X. L., An adaptive filter-based temperature compensation technique for structural health monitoring. **J. Intell. Mater. Syst. Struct.** 2014, 25, 2187–2198, 2014.

YANG, Y.; LIM, Y. Y.; SOH, C. K., Practical issues related to the application of the electromechanical impedance technique in the structural health monitoring of civil structures: I. **Experiment. Smart Materials and Structures**. v. 17, n. 3. doi:10.1088/09641726/17/3/035008. Mar. 2008.

YU, L. Y.; GIURGIUTIU, V.; WANG, J. J.; SHIN, Y. J., Corrosion detection with piezoelectric wafer active sensors using pitch-catch waves and cross-time-frequency analysis. **Struct. Health Monit.** 2012, 11, 83–93.

YUN K. A.; SOHN H., Integrated impedance and guided wave based damage detection, **Mechanical Systems and Signal Processing**. Mechanical Systems and Signal Processing 28 (2012) 50–62

ZAGRAI, A. N.; GIURGIUTIU, V., Electro-Mechanical Impedance Method for Crack Detection in Thin Plates. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**; vol. 12, p. 709, 2005.

Anexo A

Controle do hardware implementada em *LABVIEW*

Neste anexo é apresentada o controle do hardware implementado em *LABVIEW*, a lógica de controle foi especificada no capítulo 4 e também é apresentado o esquemático do hardware desenvolvido.

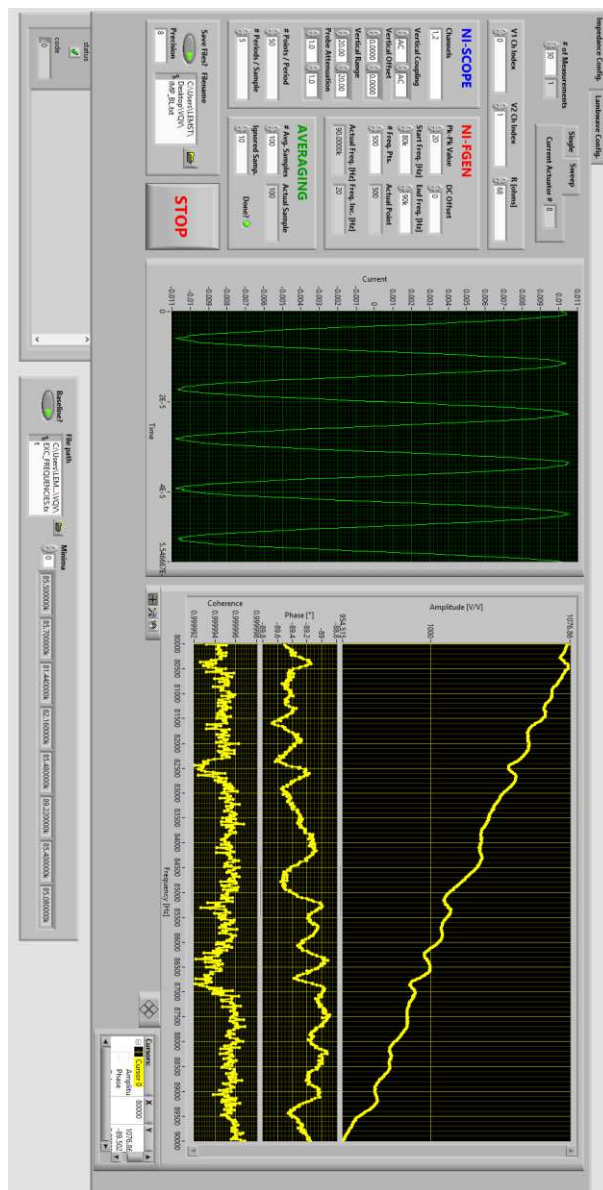


Figura A.1: LABVIEW: configuração para aquisição de assinaturas de impedância.

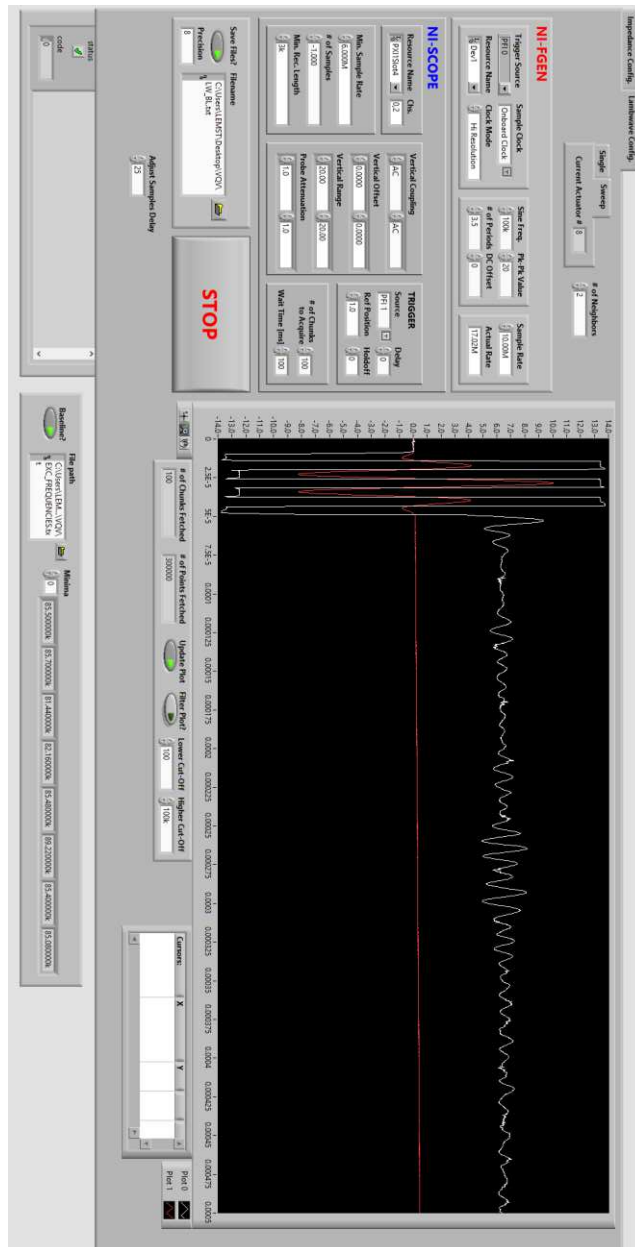


Figura A.2: LABVIEW: configuração para aquisição de onda de Lamb.

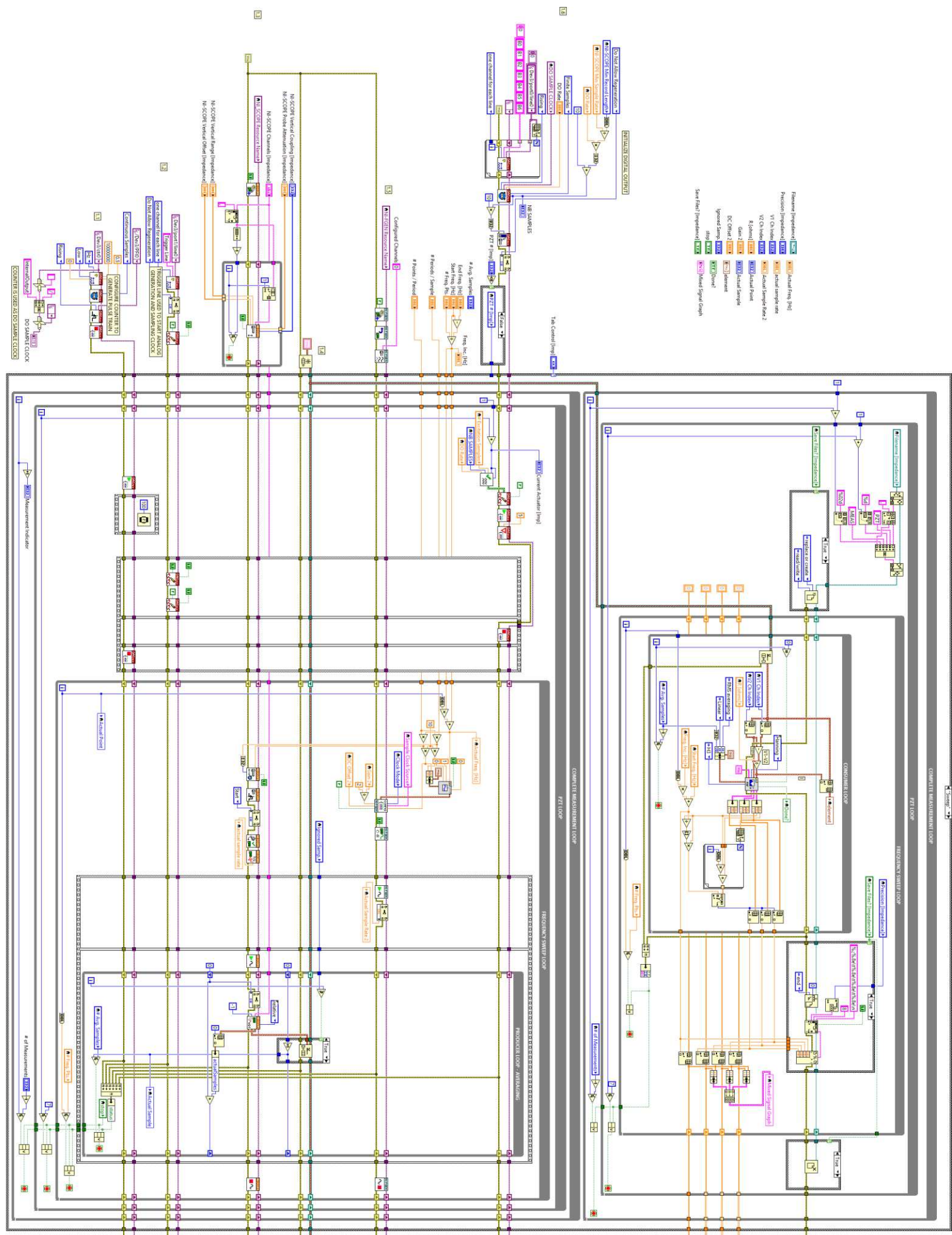


Figura A.3: LABVIEW: controle para aquisição de assinaturas de impedância (1).

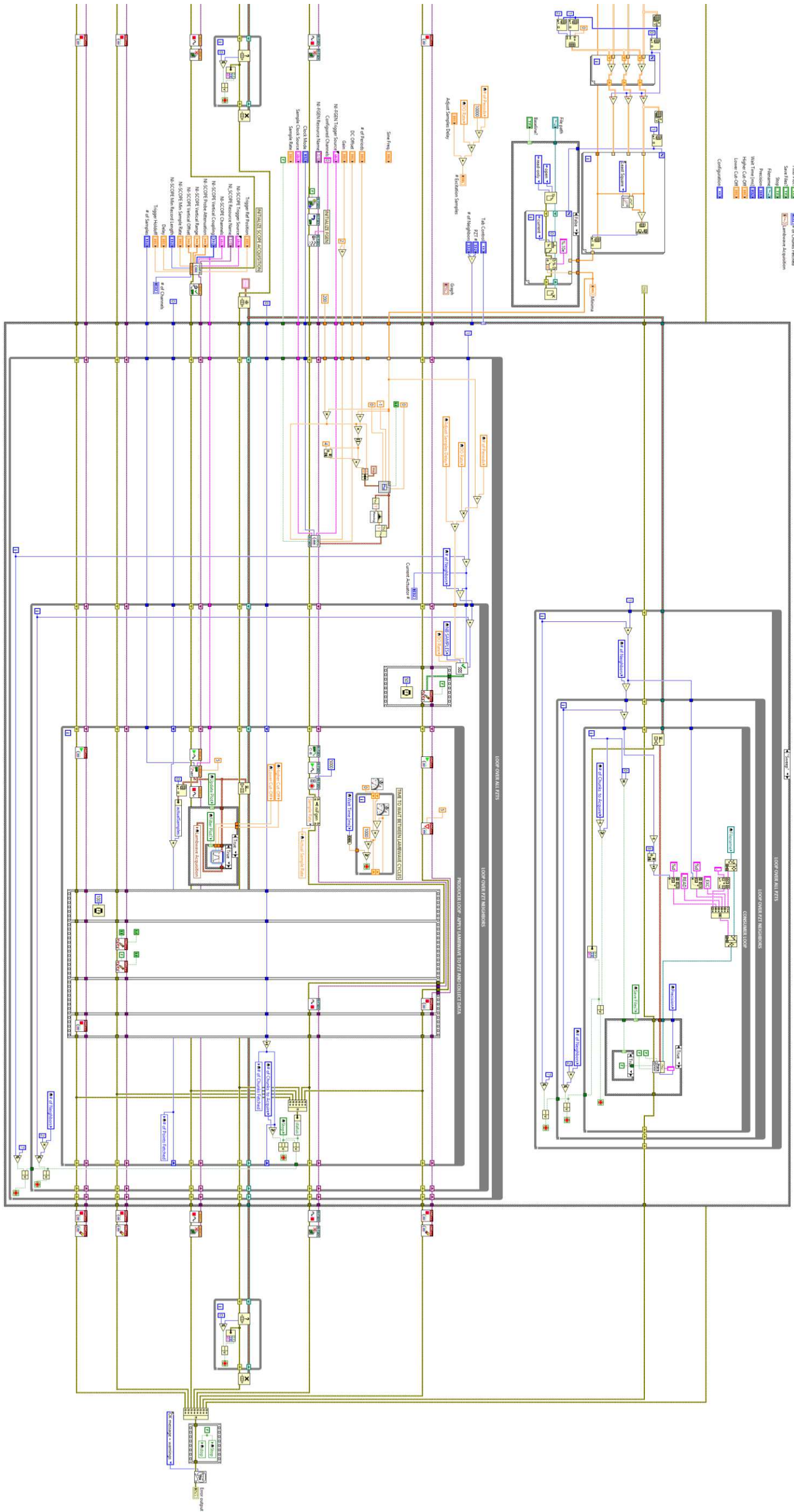


Figura A.4: LABVIEW: controle para aquisição de assinaturas de impedância (2).

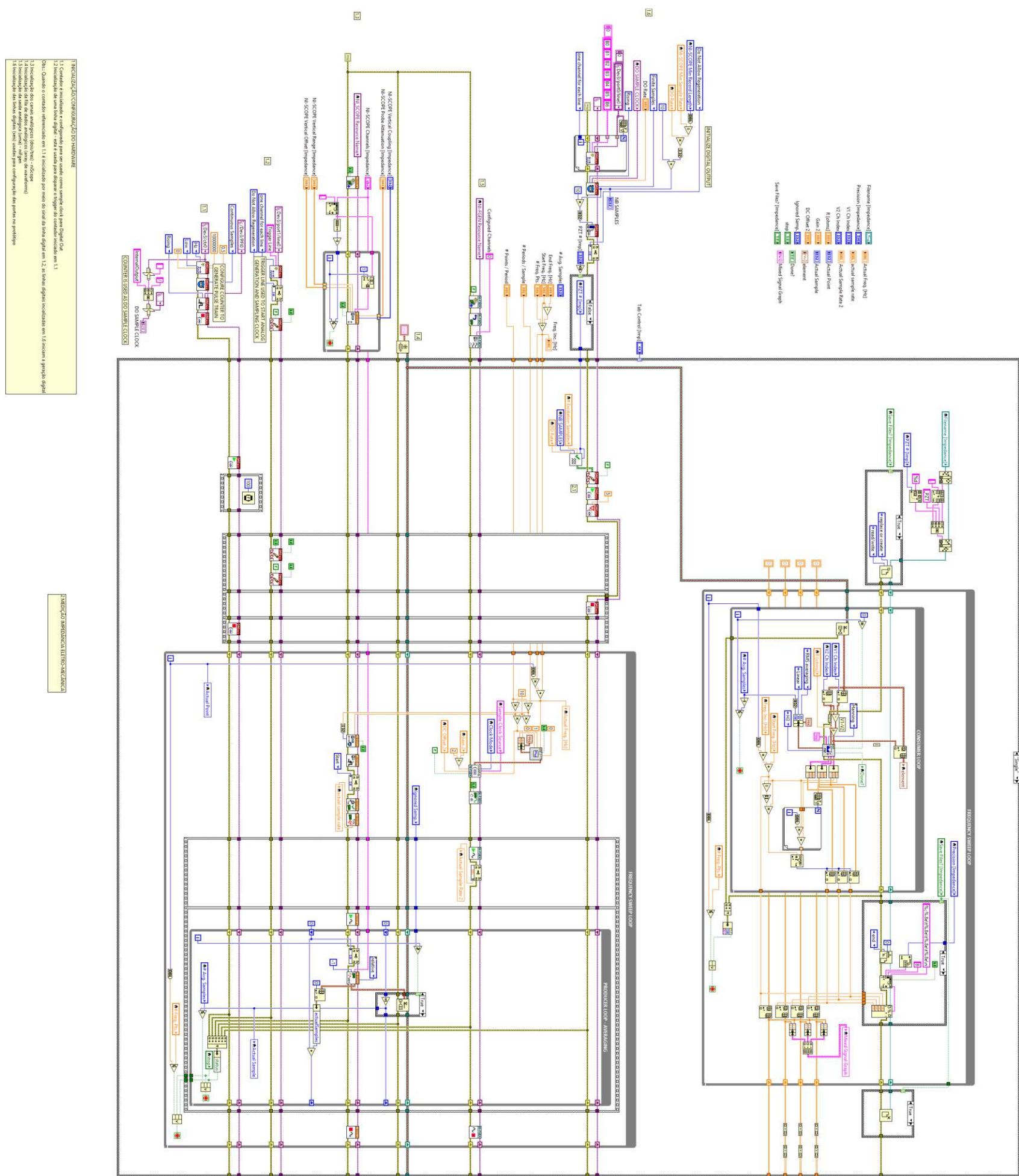


Figura A.5: LABVIEW: controle para aquisição do sinal de andas de Lamb (1).

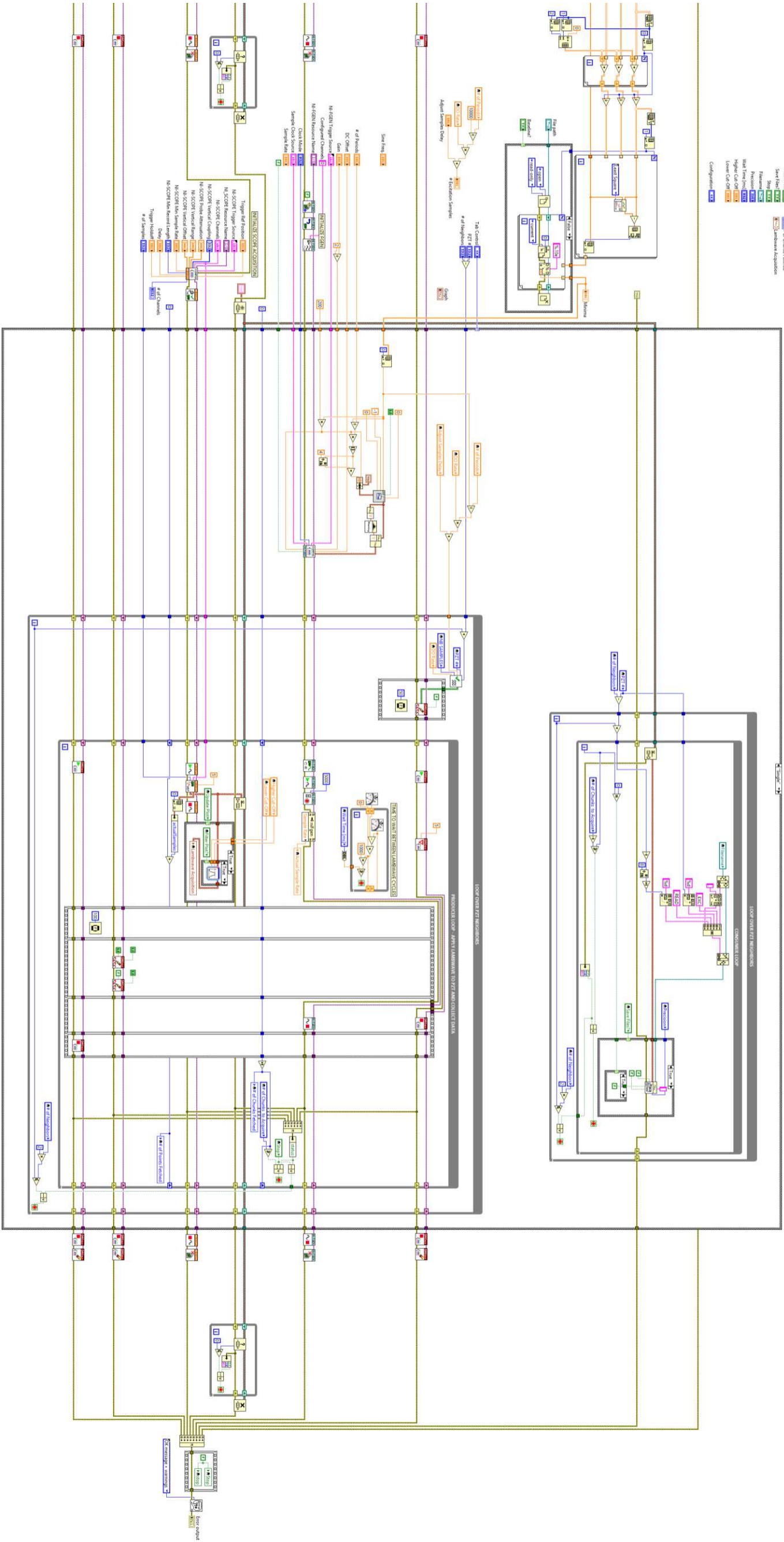
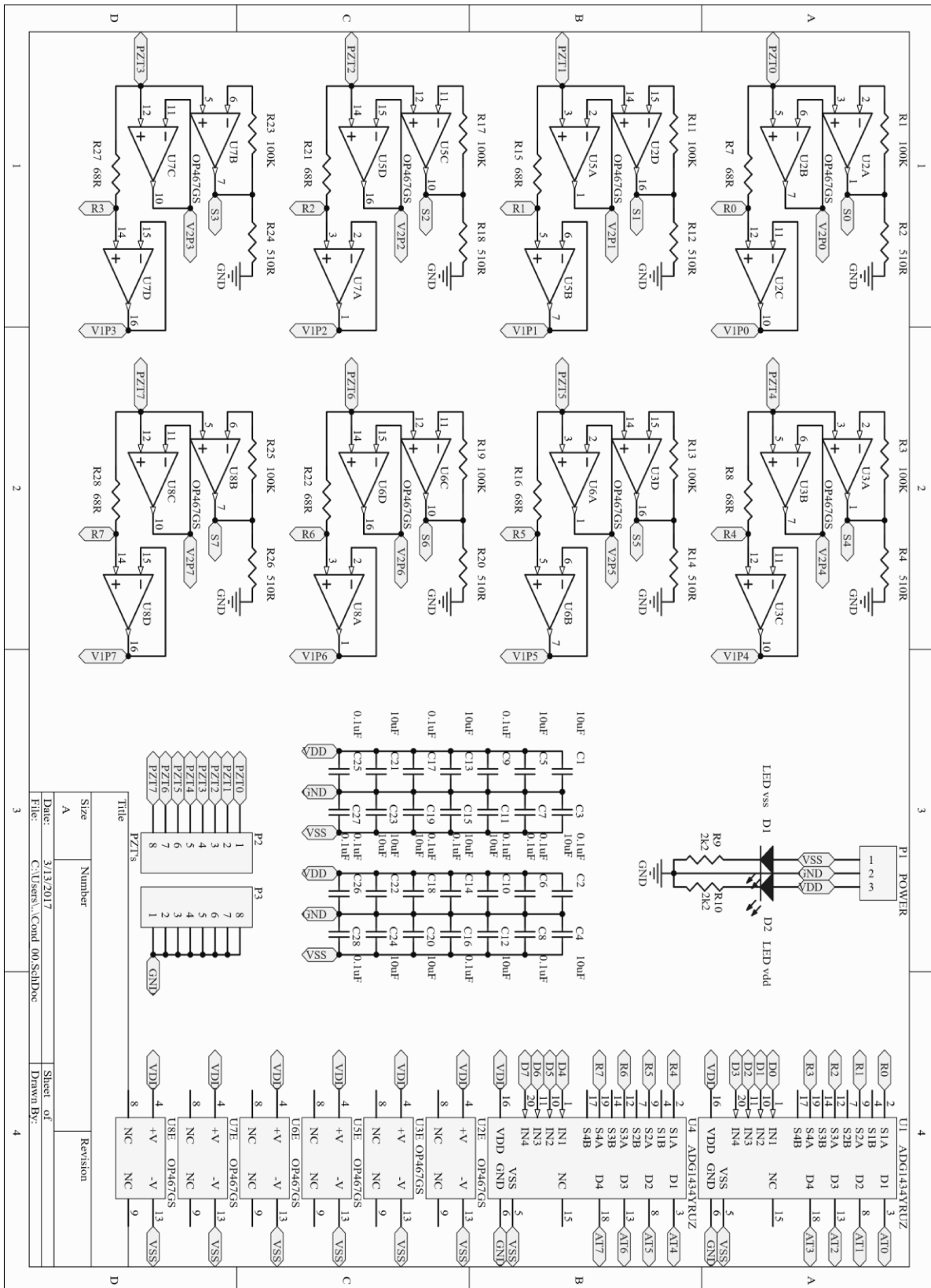


Figura A.5: LABVIEW: controle para aquisição do sinal de andas de Lamb (2).



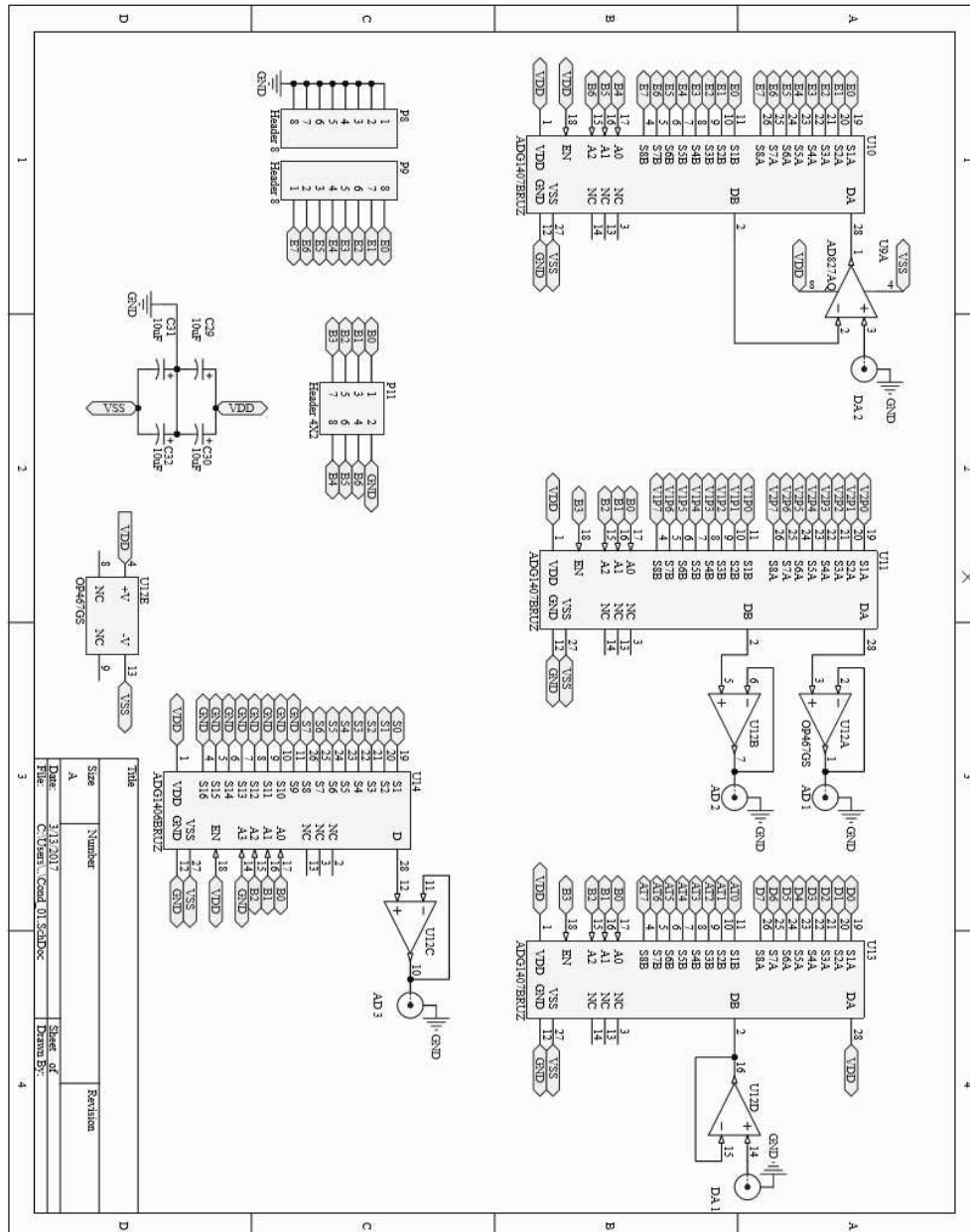


Figura A.8: Esquemático dos multiplexadores do hardware proposto.

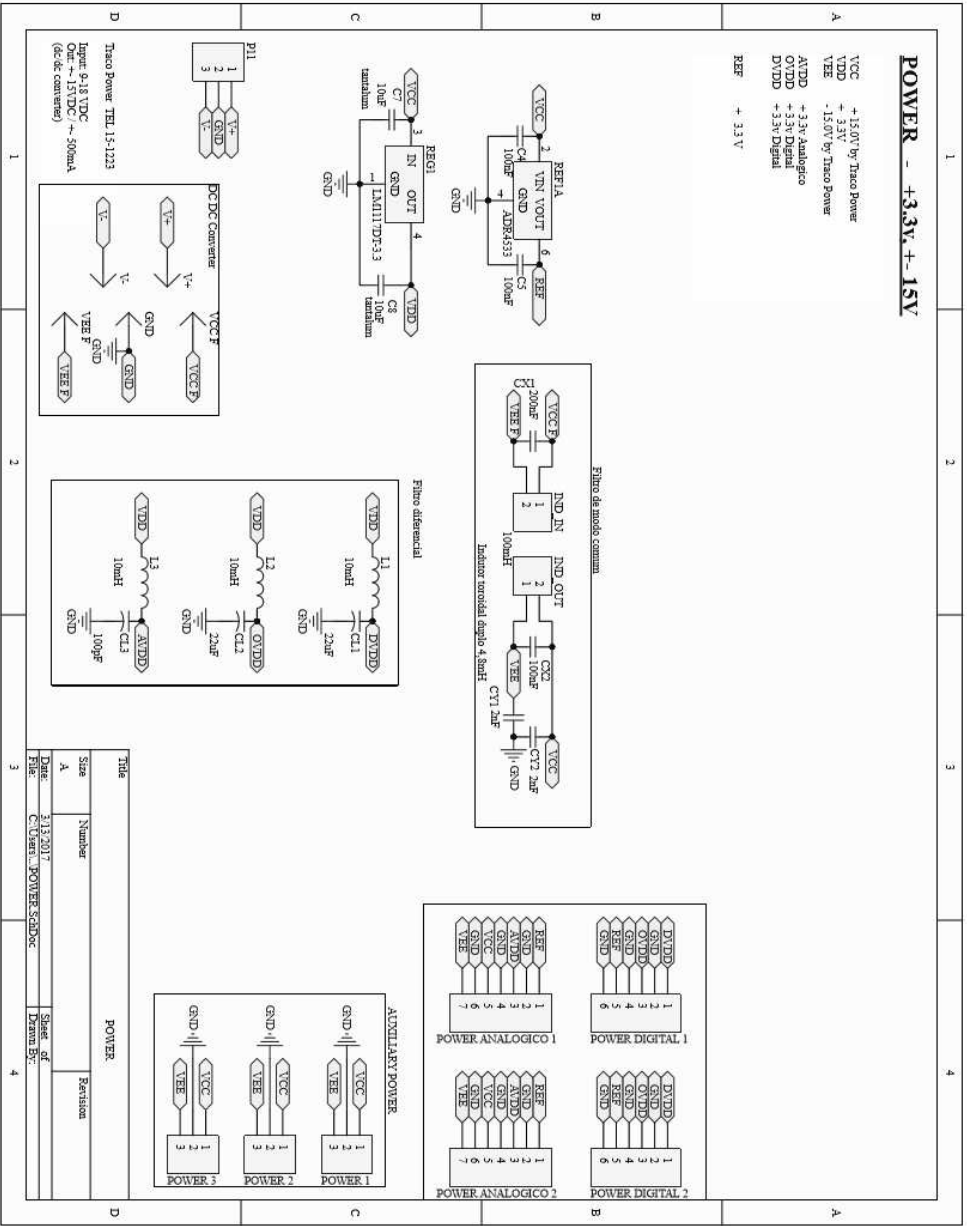


Figura A.9: Esquemático da fonte estável do hardware proposto.