

DIOGO DE SOUZA RABELO

**MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL
BASEADO NA TÉCNICA DA IMPEDÂNCIA
ELETROMECÂNICA INCORPORANDO
COMPENSAÇÃO DO EFEITO DA VARIAÇÃO DA
TEMPERATURA**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2014

DIOGO DE SOUZA RABELO

**MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL BASEADO NA
TÉCNICA DA IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA INCORPORANDO
COMPENSAÇÃO DO EFEITO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA**

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

Área de concentração: Mecânica dos sólidos e vibrações.

Orientador: Prof. Dr. Valder Steffen Jr

Coorientador: Prof. Dr. Roberto Mendes Finzi Neto

UBERLÂNDIA –MG

2014

DIOGO DE SOUZA RABELO

**MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL BASEADO NA
TÉCNICA DA IMPEDÂNCIA ELETROMECAÂNICA INCORPORANDO
COMPENSAÇÃO DO EFEITO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA**

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

Área de concentração: Mecânica dos sólidos e
vibrações.

Uberlândia, março de 2014

Dedico este trabalho a toda minha família.

*Em especial meus pais, que sempre me apoiaram, e minha tia Ione por seu suporte
inestimado em meus estudos.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela oportunidade e pela força a mim concedida.

À Universidade Federal de Uberlândia e aos professores e técnicos da Faculdade de Engenharia Mecânica com quem tive o privilégio de conviver e trabalhar neste período.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia pela oportunidade concedida para realização do curso.

Ao auxílio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), por meio do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Estruturas Inteligentes em Engenharia (INCT – EIE), e ao CNPq pela bolsa de mestrado concedida ao autor desta dissertação de mestrado.

À Embraer pelo interesse na realização deste trabalho, através do projeto de Monitoramento da Integridade Estrutural de Aeronaves, envolvendo a concessão de painéis estruturais para teste, além de materiais de consumo.

Agradeço sinceramente a meu orientador Valder Steffen Jr., por seu suporte e motivação nos últimos dois anos. Sua dedicação, exemplo de pessoa e de profissional e senso de humor será sempre lembrado. Muito obrigado pela disposição, pela experiência e pela contribuição a este trabalho. Agradeço de modo similar a meu co-orientador Roberto Mendes Finzi Neto pela contribuição neste trabalho e com minha formação.

A minha amada família, em especial meus pais Farneze e Bernadete, pelo apoio incondicional, que mesmo distantes, me acompanharam em todos momentos.

Aos colegas do Laboratório LMEst pela amizade e momentos compartilhados. Agradeço igualmente à Luciene pelo auxílio com as questões administrativas.

Rabelo, D. S. **Monitoramento de Integridade Estrutural baseado na técnica da Impedância Eletromecânica incorporando Compensação do efeito da variação da Temperatura**. 2014. 102 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RESUMO

O Monitoramento de Integridade Estrutural é uma ferramenta útil para se reduzir custos, ampliar a vida e melhorar o desempenho de estruturas de engenharia. A técnica baseada em impedância utiliza o comportamento eletromecânico de materiais piezelétricos para detectar mudanças adversas e falhas de materiais e mecânicas de estruturas. Condições ambientais tais como variações em temperatura apresentam um desafio para se fornecer um diagnóstico capaz de distinguir entre dano estrutural e efeitos de temperatura. Um método de deslocamento efetivo em frequência foi desenvolvido para compensar as medições de impedância devido a mudanças resultantes de flutuações da temperatura ambiente. Esta dissertação investiga como a precisão deste método pode ser melhorada em termos de faixa de temperatura e largura de banda em frequência usada no processo do monitoramento. Para se reduzir os efeitos da temperatura nas medições de impedância, esta dissertação investiga a possibilidade de se usar diversos *baselines* para se realizar um diagnóstico mais preciso para a integridade estrutural mesmo em aplicações sob variações de temperatura.

Palavras chave: Monitoramento de Integridade Estrutural, Impedância Eletromecânica, Compensação da Temperatura.

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.

Abstract

Structural Health monitoring is a useful tool for reducing maintenance costs and improving life and performance of engineering structures. Impedance-Based SHM utilizes the coupled electromechanical behavior of piezoelectric materials to detect adverse changes due to material and mechanical failures of structures. Environmental conditions such as temperature present a challenge in providing diagnostics capable of distinguishing between structural damage and temperature effects. An effective frequency shift method was developed to compensate impedance measurements for changes resulting from environmental temperature fluctuations. This dissertation investigates how the accuracy of this method can be improved in terms of temperature range and frequency band used in the monitoring process. In order to reduce temperature effects from impedance measurements, this dissertation investigates the possibility of using several baselines to perform a more accurate diagnostic for structural integrity even under temperature variation applications.

Keywords: Structural Health Monitoring, Electromechanical Impedance, Temperature Compensation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Separação da fuselagem do avião devido a fadiga metálica.	5
Figura 2.1 – Exemplos de cerâmicas piezelétricas produzidas pela MPI <i>Ultrasonics</i> . Imagens retiradas do site: www.mpi-ultrasonics.com	14
Figura 2.2 – Modelo eletromecânico do método de integridade estrutural baseado em impedância eletromecânica.	20
Figura 2.3 – Modelo 1-D do sistema E/M considerando a camada de adesivo.	21
Figura 2.4 – Exemplo do sinal obtido com o método de impedância eletromecânica.	22
Figura 2.5 – Ilustração de várias aplicações da técnica de monitoramento de integridade estrutural baseada em impedância (Fontes: Moura Jr., 2004; Moura e Steffen, 2005; Moura Jr., 2008).	24
Figura 2.6 – Exemplo de método para escolha da faixa de frequência. Fonte: (Palomino, 2012)	26
Figura 3.1 - Para um PZT PSI 5-A livre, um aumento na temperatura leva a uma pequena mudança de magnitude na impedância resistiva (Fonte: Park, 1999a).	35
Figura 3.2 - Ilustração da Câmara usada para testes com temperatura e umidade controlada.	37
Figura 3.3 - Princípio do sistema de controle de temperatura e umidade.	38
Figura 3.4 - Orientação do posicionamento das amostras.	39
Figura 3.5 - Viga de Alumínio com uma cerâmica de PZT acoplada.	39
Figura 3.6 - Assinaturas de impedância da Viga de alumínio em função da temperatura.	40
Figura 3.7 – Viga de Alumínio posicionada na câmara climática.	41
Figura 3.8 – Função de Temperatura Programada na Câmara Climática.	42
Figura 3.9 – Métricas de dano (RMSD) no teste de histerese.	42
Figura 3.10 – Curvas de impedância sem compensação da Temperatura.	48
Figura 3.11 – Curvas de impedância após compensação da Temperatura.	49
Figura 3.12 – Índices de dano CCD sem e com compensação para o caso em tela.	50
Figura 3.13 – Busca do parâmetro ótimo de deslocamento em frequência.	51
Figura 3.14 – Placa retangular de Alumínio posicionada na Câmara Climática.	52
Figura 3.15 – Assinaturas de Impedância da Placa retangular sem compensação de temperatura.	52
Figura 3.16 – Assinaturas de Impedância da Placa retangular com compensação de temperatura.	53
Figura 3.17 – Comparação de métricas de dano entre casos sem compensação e com compensação, em função da temperatura de medição – Placa Retangular de Alumínio.	54
Figura 4.1 - Montagem experimental de viga de alumínio parafusada.	57
Figura 4.2 - Faixas de medição com Largura de Banda BW1.	58
Figura 4.3 - Deslocamentos frequenciais em torno do pico de ressonância de 28,03 kHz.	59
Figura 4.4 - Deslocamentos frequenciais em torno do pico de ressonância de 104,1 kHz.	59
Figura 4.5 - Deslocamentos frequenciais em torno do pico de ressonância de 180,9 kHz.	60

Figura 4.6 – Assinaturas de Impedância: (a) sem Compensação e (b) com compensação obtidas a 30°C, <i>baseline</i> a 0°C, usando uma faixa estreita de frequência.....	61
Figura 4.7 – Assinaturas de Impedância: (a) sem Compensação e (b) com compensação obtidas a 30°C, <i>baseline</i> a 0°C, usando uma faixa larga de frequência.....	61
Figura 4.8 – Coeficientes de Correlação Ótimos em função da temperatura e da faixa de monitoramento.....	62
Figura 4.9 – Viga com dano inserido à distância de 20 cm da pastilha de PZT.....	63
Figura 4.10 – Assinaturas de Impedância sem Compensação – Viga de alumínio.	64
Figura 4.11 – Assinaturas de Impedância com Compensação – Viga de alumínio.	64
Figura 4.12 – Métricas de dano CCD sem e com compensação – Viga de Alumínio.....	65
Figura 4.13 – Métricas de dano RMSD sem e com compensação – Viga de Alumínio.	65
Figura 4.14 – Métricas de dano CCD utilizando um <i>baseline</i> de 20°C.....	66
Figura 4.15 – Métricas de dano RMSD utilizando um <i>baseline</i> de 20°C.....	67
Figura 4.16 – Métricas de dano CCD utilizando <i>baseline</i> medido a 0°C.....	68
Figura 4.17 – Métricas de dano CCD utilizando <i>baseline</i> medido a 20°C.....	69
Figura 4.18 – Painel aeronáutico instrumentado com 7 pastilhas de PZT. (a) - Visão Geral; (b) – Posição dos Danos; (c) – Massas usadas para simulação de danos.	70
Figura 4.19 – Ilustração do painel aeronáutico inserido na Câmara Climática.	71
Figura 4.20 – Assinaturas de Impedância do PZT1 sem compensação térmica: Diagnóstico 1 Painel aeronáutico.	73
Figura 4.21 – Assinaturas de Impedância do PZT1 com compensação térmica para Diagnóstico 1 – Painel aeronáutico.	73
Figura 4.22 – Métricas de dano CCD para Diagnóstico 1 – PZT1.	74
Figura 4.23 – Métricas de dano RMSD para Diagnóstico 1 – PZT1.	74
Figura 4.24 – Assinaturas de Impedância do PZT1 sem compensação térmica para Diagnóstico 2 – Painel aeronáutico.	76
Figura 4.25 – Assinaturas de Impedância do PZT1 com compensação térmica para Diagnóstico 2 – Painel aeronáutico.	76
Figura 4.26 – Métricas de dano CCD para Diagnóstico 2 – PZT1.	77
Figura 4.27 – Métricas de dano RMSD para Diagnóstico 2 – PZT1.	77
Figura 4.28 – Assinaturas de Impedância do PZT3 sem compensação térmica para Diagnóstico 1 – Painel aeronáutico.	78
Figura 4.29 – Assinaturas de Impedância do PZT3 com compensação térmica para Diagnóstico 1 – Painel aeronáutico.	79
Figura 4.30 – Métricas de dano CCD para Diagnóstico 1 – PZT3.	79
Figura 4.31 – Métricas de dano RMSD para Diagnóstico 1 – PZT3.	80
Figura 4.32 – Assinaturas de Impedância do PZT3 sem compensação térmica para Diagnóstico 2 – Painel aeronáutico.	81
Figura 4.33 – Assinaturas de Impedância do PZT3 com compensação térmica para Diagnóstico 2 – Painel aeronáutico.	81
Figura 4.34 – Métricas de dano CCD para Diagnóstico 2 – PZT3.	82
Figura 4.35 – Métricas de dano RMSD para Diagnóstico 2 – PZT3.	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Parâmetros estatísticos da métrica RMSD obtidos com os ciclos de aquecimento e resfriamento realizados.....	43
Tabela 3.2 – Redução percentual das métricas de dano conforme o gradiente de temperatura para o ensaio da Viga de Al.	50
Tabela 3.3 – Valores de reduções percentuais das métricas de dano conforme o gradiente de temperatura para o ensaio da Placa de Al.	54
Tabela 4.1 – Avaliação da Largura de Banda na Faixa de Monitoramento da Integridade Estrutural – Viga de Al parafusada.	58
Tabela 4.2 – Deslocamentos frequenciais em torno de três picos de ressonância em função do gradiente de temperatura.	60
Tabela 4.3 – Tabela comparativa de valores de métricas de dano após compensação da temperatura utilizando vários <i>baselines</i>	67
Tabela 4.4 – Dados sobre condições de cada ensaio realizado com o painel de alumínio aeronáutico.	72
Tabela 4.5 – Resultados para os diagnósticos do PZT1.	78
Tabela 4.6 – Diagnósticos do PZT3.	83
Tabela A.1 – Métricas de dano RMSD e CCD comparadas ao baseline medido a 0°C (Diagnóstico 1).	98
Tabela A.2 – Métricas de dano RMSD e CCD comparadas ao baseline medido a 20°C (Diagnóstico 2).	100
Tabela A.3 – Métricas de dano RMSD e CCD PZT1.	102

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOVA	Análise de Variância.
BTHC	<i>Balanced Temperature and Humidity Control.</i>
BW	Largura de Banda (<i>Bandwidth</i>).
CCD	Desvio do Coeficiente de Correlação.
CIMSS	<i>Center for Intelligent Material Systems and Structures.</i>
E/M	Eletromecânica
END / NDE	Ensaaios não Destrutivos / <i>Non Destructive Evaluation</i>
FEMEC	Faculdade de Engenharia Mecânica
FM	Faixa de monitoramento.
FRF	Função de Resposta em Frequência.
ISHM	Monitoramento de Integridade Estrutural baseado em Impedância.
KPCA	Análise de Componentes Principais – Kernel.
LMEst	Laboratório de Mecânica de Estruturas Prof. José Eduardo Tannús Reis.
MFC	Compósito de macro fibras.
PCA	Análise de Componentes Principais
PVDF	Fluorido de Polivinilideno.
PZT	Titanato-zirconato de chumbo.
RMSD	Desvio Médio da Raiz Quadrada.
RNA	Redes Neurais Artificiais.
SHM	Monitoramento de Integridade Estrutural.
STEMP	Sensor eletrônico de Temperatura
SySHM	Impedancímetro desenvolvido pelo time de SHM do LMEst.
UFU	Universidade Federal de Uberlândia

LISTA DE SÍMBOLOS

BW	Largura de banda da faixa de monitoramento de integridade estrutural
C	Capacitância
C_m	Flexibilidade mecânica
D_m	Vetor dos deslocamentos elétricos
d_{ij}	Matriz dos coeficientes piezelétricos
E	Vetor dos campos Elétricos
f	Frequência
F	Força mecânica
H	Vetor dos campos magnéticos
I_o	Corrente elétrica de saída do PZT
j	Unidade imaginária
K	Rigidez mecânica
L	Indutância
M_m	Massa mecânica
m	Matriz de constantes magneto-dielétricas
n	Número total de pontos frequenciais
p	Vetor de constantes piroelétricas
R_m	Amortecimento mecânico
$\text{Re}(Z_{1,i})$	Parte real da impedância da medição <i>baseline</i> em uma frequência i
$\text{Re}(Z_{2,i})$	Parte real da impedância em uma frequência i para uma nova configuração da estrutura
$\text{Re}(\bar{Z}_1)$	Média da parte real da impedância da medição <i>baseline</i>
$\text{Re}(\bar{Z}_2)$	Média da parte real da impedância para uma nova configuração da estrutura
S	Vetor das deformações
s	Matriz de flexibilidade
S_{z_1}	Desvio padrão do sinal de impedância da referência

S_{Z_2}	Desvio Padrão do Sinal de Impedância a ser Comparado
$S_{Z_{1,i}}$	Desvio Padrão de cada Ponto frequencial do Sinal de Referência
T	Vetor das Tensões Mecânicas
V_i	Tensão elétrica de excitação (entrada) ao transdutor de PZT.
$X(t)$	Deslocamento da estrutura ao ser excitada pelo atuador.
$\dot{X}(t)$	Velocidade da estrutura.
X_c	Reatância Capacitiva
X_L	Reatância Indutiva
w_a, l_a e h_a	Constantes Geométricas do PZT
$Y(\omega)$	Admitância Elétrica
\bar{Y}_{22}^E	Módulo de Young do PZT com Campo Elétrico Nulo
Z_a	Impedância Mecânica do PZT
Z_m	Impedância Mecânica
Z_s	Impedância Mecânica da Estrutura
α	Vetor de constantes de expansão térmica
Δ_v	Fator de deslocamento vertical de correção de impedâncias
Δ_f	Fator de deslocamento horizontal de correção de impedâncias
δ	Fator de Perda Dielétrica do PZT
ε	Matriz de Permissividade dielétrica
η	Fator de Perda Mecânica do PZT
θ	Temperatura
ω	Frequência angular

SUMARIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
1.1. Fundamentos de Sistemas de Monitoramento de Integridade Estrutural	2
1.2. Motivação para soluções em Monitoramento de Integridade Estrutural	4
1.3. Objetivo da Dissertação	6
1.4. Estrutura da Dissertação	6
CAPÍTULO II - ESTADO DA ARTE DO MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL BASEADO NA IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA	8
2.1. Introdução	8
2.2. Materiais e Estruturas Inteligentes	8
2.3. Materiais Piezelétricos	10
2.3.1. Os Efeitos Piezelétricos Direto e Inverso ou Reverso	11
2.4. Tipos de Transdutores Piezelétricos	13
2.5. Conceitos de Impedância Mecânica e Elétrica	15
2.5.1. Impedância Mecânica	15
2.5.2. Impedância Elétrica	16
2.6. Técnica do Monitoramento de Integridade Estrutural baseada na Impedância E/M	18
2.7. Parâmetros para teste de impedância	25
2.7.1. Frequência inicial	25
2.7.2. Faixa de frequência e a Região de Sensoriamento	25
2.7.3. Aquisição do sinal	26
2.7.4. Avaliação de Dano	27
2.8. Comparação do Método da Impedância com outras técnicas de END	30
CAPÍTULO III - COMPENSAÇÃO DO EFEITO DE MUDANÇAS DE TEMPERATURA NA TÉCNICA DE MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL BASEADA EM IMPEDÂNCIA	33
3.1. Introdução	33
3.2. Efeitos da Temperatura nos materiais Piezelétricos	34
3.3. Efeitos da Temperatura nas estruturas inteligentes	35
3.3.1. Câmara Climática de Controle de Temperatura e Umidade	36
3.4. Investigação do efeito da Temperatura em uma viga de alumínio	39
3.5. Revisão de trabalhos anteriores relacionados	43
3.6. Procedimento de Compensação da Temperatura – Método do Deslocamento Efetivo em Frequência por Análise de Correlação.	45
CAPÍTULO IV - DISTINÇÃO ENTRE DANOS ESTRUTURAIS E EFEITO DA TEMPERATURA PARA O MÉTODO DA IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA	56
4.1. Introdução	56
4.2. Avaliação da largura de banda na faixa de monitoramento em uma viga de alumínio	56
4.2.1. Compensação de efeitos da Temperatura	61
4.3. Monitoramento da Integridade Estrutural de painel de fuselagem aeronáutico considerando efeitos térmicos	70

CAPÍTULO V - CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS	85
5.1. Perspectivas Futuras	88
CAPÍTULO VI - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	90
Anexo I	98
Anexo II	102

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O processo de implementação de uma estratégia de caracterização e detecção de dano para estruturas de engenharia é referido como Monitoramento de Integridade Estrutural (do inglês, *Structural Health Monitoring – SHM*). Nesse contexto, o dano é definido como mudanças das propriedades dinâmicas de uma estrutura, incluindo mudanças nas condições de contorno, que podem afetar o desempenho do sistema. Assim, danos podem estar associados a diferentes fatores, tais como atrito, fadiga, impacto, concentração de tensão, crescimento de trinca, corrosão, dentre outras razões. Para um funcionamento adequado do sistema, a falha deve ser localizada e reparada, oportunamente. Um dos processos mais ambiciosos da Engenharia atual é o monitoramento da integridade estrutural em tempo real de componentes de elevado custo ou de grande responsabilidade para o sistema considerado.

Assim, este processo de SHM envolve a observação de um sistema usando medições de resposta dinâmica amostradas periodicamente a partir de um conjunto de sensores. Dos sinais de resposta assim obtidos, faz-se a extração de características sensíveis ao dano e, posteriormente, uma análise estatística destas características para se determinar o estado atual da estrutura. O objetivo final do SHM é obter, à saída do processo, informações periodicamente atualizadas em relação à capacidade da estrutura realizar a função para a qual foi designada, tendo em vista o envelhecimento e desgaste resultantes das condições ambientais e de operação da estrutura em questão. Assim, o propósito do SHM é fornecer, em tempo real, informações confiáveis acerca da integridade estrutural.

Vários métodos de ensaios não destrutivos (END) usados para diagnóstico e monitoramento de danos estruturais, tais como inspeção visual, testes radiográficos, ensaios por ultrassom, técnica das ondas de Lamb, líquidos penetrantes, medições de propriedades

dinâmicas e partículas magnéticas podem ser encontrados em trabalhos anteriores, conforme Palomino, (2008), Tsuruta, (2008) e Leucas (2009).

1.1. Fundamentos de Sistemas de Monitoramento de Integridade Estrutural

Existem várias maneiras de descrever um processo de SHM. A descrição apresentada aqui acompanha a literatura sobre o tema observada em (Farrar; Doebling; Nix, 2001) e (Farrar e Worden, 2007). Segundo os autores citados, um processo de reconhecimento de padrões para monitoramento de integridade estrutural consiste de quatro passos sequenciais, a saber:

- Avaliação Operacional;
- Aquisição, normalização e seleção de danos;
- Reconhecimento de padrões e condensação das informações;
- Desenvolvimento de modelo estatístico.

As avaliações operacionais consistem em uma análise prévia que procura responder questões relacionadas à aptidão da implementação da identificação de dano:

- i. Qual é a justificativa para a implementação de um sistema de SHM?
- ii. Qual é a definição de dano ou múltiplos danos para o sistema a ser investigado? E qual caso deverá receber mais atenção?
- iii. Quais são as condições (operacionais e ambientais) em que o sistema será monitorado?
- iv. Quais são as limitações para aquisição de dados nas condições de operação do sistema de SHM?

Já a etapa de aquisição, normalização e seleção de dados consiste em um delicado processo de seleção da cadeia de medição do sistema de SHM, escolha das técnicas que serão abordadas para distinguir ou eliminar dos sinais as influências geradas pelas condições ambientais e de operação do sistema e, finalmente, a definição de técnicas que serão responsáveis pela seleção dos dados destinados ao processo de determinação de padrões. Esta última fase consiste em selecionar, de acordo com critérios de escolha relacionados a experiências adquiridas sobre o sistema, dos sinais que serão destinados à próxima etapa do processo de SHM. Técnicas de processamento de sinais como filtragem e reamostragem podem fazer parte do processo de seleção dos dados.

Deve-se verificar que a etapa de aquisição, normalização e seleção de dados é muito importante e exige uma dinâmica constante de aprendizado de técnicas que vão sendo desenvolvidas ou aprimoradas.

Na etapa de reconhecimento de padrões e condensação das informações são utilizados padrões para correlacionar os sinais, ou as informações extraídas dos sinais, para auxiliar no diagnóstico da estrutura. Como exemplo, quanto aos padrões, deve-se verificar o comportamento da estrutura com dano, sem dano ou ainda a estrutura com danos múltiplos. Essa é uma das áreas do processo de SHM que mais recebe atenção na literatura técnica.

Por fim, a fase de desenvolvimento do modelo estatístico associado consiste na implementação de algoritmos que irão auxiliar na tomada de decisão, ou seja, se as mudanças nas características selecionadas (para identificar os sistemas danificados) são estatisticamente significativas. Outra finalidade é a implementação das métricas de dano que operam sobre os dados extraídos para quantificar os danos na estrutura.

Na literatura, são propostas cinco categorias que podem ser representadas pelas seguintes questões:

1. Existência. O dano existe no sistema?
2. Localização. Onde o dano está no sistema?
3. Tipo. Qual o tipo de dano presente?
4. Severidade. Quão severo é o dano?
5. Prognóstico. Qual é o tempo de vida útil remanescente da estrutura?

Modelos estatísticos também são utilizados para minimizar a ocorrência de falsos alarmes, que consistem em indicar, equivocadamente, a presença de dano, conhecido como falso-positivo. Ou, por outro lado, estes são usados para minimizar a ocorrência de falhas de detecção, que consistem em não indicar a presença de dano quando o mesmo existe. Esta ocorrência também é conhecida como falso-negativo (Gonzales, 2012).

A partir dos estados de danos apresentados acima, um sistema de SHM pode ser classificado em níveis, diretamente relacionados à capacidade do mesmo, conforme a clássica referência de (Doebling; Farrar; Prime, 1998):

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

Incorporando Materiais Inteligentes no sistema de detecção, foram posteriormente propostos 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;

Nível 7 – Combina o nível 1 com Controle Ativo e Estruturas Inteligentes para obtenção de um sistema simultâneo de controle e monitoramento.

1.2. Motivação para soluções em Monitoramento de Integridade Estrutural

A integridade estrutural está diretamente relacionada ao desempenho estrutural e, neste quesito, ela é um dos principais aspectos que se relacionam com a segurança de operação. Este aspecto de integridade estrutural é particularmente relevante para sistemas de transporte. Uma alteração na integridade estrutural pode afetar o desempenho a tal ponto que ações de manutenção corretiva tornam-se necessárias. Para reduzir os custos dos reparos e da manutenção, a ação corretiva deve ser empreendida logo na fase inicial do aparecimento do dano (dano incipiente). Alternativamente, no caso de estruturas aeronáuticas, pode-se decidir por fazer o reparo apenas quando a aeronave for retirada do serviço para manutenção programada de maior amplitude. Neste contexto, essencialmente os sistemas de monitoramento de integridade estrutural têm como objetivos principais a redução de custos de manutenção e a melhoria da segurança de operação das estruturas monitoradas. (Staszewski; Boller; Tomlinson, 2004).

Obviamente, a sensibilidade e a confiabilidade são medidas de desempenho quantitativas importantes. Estas são determinadas, por um lado, pelas leis da física, mas, por outro lado, na prática, também pela qualidade do *hardware* e *software* do equipamento de inspeção e, por último, mas não menos importante, pelo operador de inspeção. Neste ponto, fatores humanos como a perda de atenção em caso de raras ocorrências de dano e cansaço do operador no caso de inspeções longas e tediosas são razões importantes para se considerar soluções inteligentes para a inspeção, através de um sistema inteligente de monitoramento de integridade estrutural.

Geralmente, os materiais usados em sistemas de engenharia podem apresentar algum defeito inicial (como trincas incipientes). Sob determinado carregamento, estas falhas crescem até o ponto em que acarretam uma falha em componentes estruturais. Esforços mecânicos adicionais comprometem estes componentes, levando a estrutura a falhar. Existem casos em que esta evolução é longa no tempo (ex.: corrosão, crescimento de trincas de fadiga). Em outros casos, esta evolução é rápida (ex.: carregamento provocado por terremotos, danos provocados por impactos).

Uma das notícias de danos imprevistos mais comentadas é a que se refere ao ocorrido em 1988, com a aeronave da *Aloha Airlines*, Modelo Boeing 737-297. Em pleno voo, uma parte da fuselagem se separou da estrutura da aeronave (observar a Figura 1.1), provocando uma aterrissagem de emergência. Um dos desafios do prognóstico de falha, neste caso, é avaliar os danos causados pelo crescimento de trincas (falhas incipientes) devido à fadiga e agravadas pela corrosão e, através destas informações, estimar a vida útil remanescente da aeronave (Farrar; Lieven; Bement, 2005).



Figura 1.1 – Separação da fuselagem do avião devido a fadiga metálica.

Dentre as técnicas de SHM existentes, a técnica de Monitoramento de Integridade Estrutural baseada na Impedância (*Impedance-based Structural Health Monitoring* - ISHM) tornou-se uma ferramenta atrativa e promissora para identificação de danos no conjunto das técnicas de avaliação não destrutivas (*Non-Destructive Evaluation* - NDE). Este método leva em conta as variações da Impedância Eletromecânica da estrutura causadas pela presença de dano, utilizando transdutores piezelétricos colados à estrutura (ou nela incorporados). Os sensores-atuadores mais apropriados neste contexto são os de PZT (titanato-zirconato de chumbo) e o MFC (*macrofiber composite*). Através destes sensores-atuadores piezocerâmicos, a impedância eletromecânica, que está diretamente relacionada à impedância da estrutura, é obtida como uma resposta dinâmica no domínio da frequência. Com base na variação dos sinais de impedância, a presença de dano pode ser detectada. No entanto, os sinais de impedância também são sensíveis a condições ambientais variantes no tempo, particularmente, a temperatura (Palomino *et al.*, 2012).

1.3. Objetivo da Dissertação

O objetivo geral da dissertação é a implementação de uma metodologia para compensar o efeito da variação da temperatura na técnica da impedância eletromecânica para o Monitoramento de Integridade Estrutural. São previstas aplicações experimentais visando aproximar situações reais de operação dos sistemas de SHM e, desta forma, explorar a técnica de impedância eletromecânica no contexto das variações ambientais.

Tais variações ambientais (em particular a temperatura) podem causar alarmes falsos. Para o sucesso do diagnóstico da estrutura, o sistema de medição precisa ser robusto o suficiente em relação a estas influências ambientais de fontes distintas, de modo que decisões corretas e confiáveis possam ser tomadas, com base nas medições realizadas. Em aplicações aeronáuticas, onde condições ambientais severas são frequentemente encontradas, esta influência torna-se crítica sob certas circunstâncias. O método de SHM baseado na impedância é o escolhido para nortear este trabalho, sendo que o tema central desta dissertação diz respeito à influência da temperatura no desempenho da técnica.

1.4. Estrutura da Dissertação

No capítulo 1 é feita uma introdução do tema Monitoramento de Integridade Estrutural e são apresentadas as motivações e objetivos do trabalho realizado desta dissertação.

O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento do trabalho, introduzindo os materiais e estruturas inteligentes, os fundamentos da piezeletricidade, o efeito piez elétrico e alguns transdutores piez elétricos. Em seguida o estado da técnica de Monitoramento de Integridade Estrutural baseado em Impedância é apresentado.

O capítulo 3 inicia a abordagem do efeito da variação da temperatura na técnica da impedância eletromecânica, buscando apresentar este efeito tanto nos transdutores piez elétricos, como na estrutura monitorada. Em seguida, é realizada uma revisão bibliográfica de trabalhos anteriores realizados com o intuito de selecionar uma técnica de compensação da temperatura para ser implementada e estudada com mais detalhes. A técnica escolhida é então apresentada e, após ser incorporada na lógica de pós-processamento do sistema de detecção de danos, a técnica de compensação é avaliada em uma viga simples de alumínio sob três ciclos de aquecimento e resfriamento, com o intuito

de verificar a ocorrência de histerese no diagnóstico do sistema. Ao final do capítulo o desempenho da técnica de compensação é avaliado numa faixa ampla de temperatura a partir de uma placa retangular de alumínio testada dentro de uma câmara climática.

No capítulo 4, a técnica de compensação da temperatura escolhida é investigada em maiores detalhes com relação à faixa de temperatura e à faixa de frequência utilizada no monitoramento, usando primeiramente uma viga de alumínio. Além disto, um painel de fuselagem de aeronave foi instrumentado e a técnica foi testada em uma estrutura de engenharia considerada complexa, com a temperatura controlada dentro da câmara climática. Este teste é feito como prova-conceito de aplicação da técnica, simulando seu uso em condições normais de operação, sujeitas a variação da temperatura.

O capítulo 5 encerra o trabalho, apresentando as principais ideias e conclusões obtidas. São também apresentadas as perspectivas futuras para este campo de pesquisa.

CAPÍTULO II

ESTADO DA ARTE DO MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL BASEADO NA IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA

2.1. Introdução

Neste capítulo apresentam-se alguns conceitos básicos referentes aos chamados materiais inteligentes e estruturas inteligentes, dando foco, dentre estes, aos materiais piezelétricos, além de introduzir os conceitos de impedância mecânica e elétrica. Em seguida, apresenta-se o estado da técnica de monitoramento de integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica, fazendo ao final uma comparação desta técnica com outras técnicas de identificação de danos estruturais.

2.2. Materiais e Estruturas Inteligentes

Devido a algumas necessidades especiais de projeto em engenharia, aliadas ao desenvolvimento de novos materiais, foram criados dispositivos e materiais que vêm sendo utilizados com sucesso como sensores e/ou atuadores que são facilmente incorporados a uma dada estrutura de interesse. Baseados nas características físicas destes componentes, alguns sistemas de controle importantes puderam ser implementados, substituindo, em muitos casos, servomecanismos tradicionalmente utilizados. Estas novas estruturas, denominadas “estruturas inteligentes”, utilizando-se destes novos materiais, denominados “materiais inteligentes”, vêm ganhando reconhecidas aplicações na indústria. Investigações científicas e tecnológicas realizadas em centros de pesquisa em todo o mundo vêm

revolucionando o projeto de sistemas estruturais e prometendo novas aplicações em muitas áreas da engenharia (Banks; Smith; Wang, 1996).

A comunidade de engenharia cunhou a expressão “Estruturas Inteligentes” ao longo das últimas três décadas e, atualmente, esta denota a capacidade extraordinária de algumas estruturas ou componentes estruturais em modificar suas propriedades. Inteligência, neste contexto, pode ser interpretada como:

- i) A habilidade de componentes estruturais em sentir, diagnosticar e atuar de forma a manter sua funcionalidade;
- ii) Um projeto que melhore a integridade estrutural por meio do monitoramento de seus dados, como temperatura, pressão, carregamentos, etc., permitindo diagnosticar a natureza e dimensão do problema, para provocar alguma ação de controle do mesmo e, também, armazenar a informação que leve o sistema a “aprender” para poder agir em situações semelhantes no futuro.

Alguns atributos desta “inteligência” seriam o auto-diagnóstico, o reparo, a recuperação funcional e o “aprendizado”. Assim, as estruturas ditas inteligentes visam atender a um dos requisitos críticos de qualquer estrutura que é sua preservação ou ainda a melhora das condições de monitoramento. Nesse sentido, tais características podem ser observadas pelo aumento da vida útil da estrutura e pelo prognóstico (avaliação da vida residual). Trata-se então de um assunto interdisciplinar, incluindo várias áreas de atuação, tais como: engenharia de materiais, mecânica aplicada (vibrações, mecânica da fratura, elasticidade, aerodinâmica), eletrônica (sensores, atuadores, controladores), fotônica (fibras óticas), produção (processos de fabricação, fabricação de microestruturas) e biomimetismo (dispositivos que utilizam estratégias usadas por estruturas naturais).

Os sensores podem ser colados na superfície ou inseridos no interior da estrutura e devem ser escolhidos de tal forma que não afetem significativamente o comportamento dinâmico do sistema. Assim como os sensores, os atuadores ideais deveriam possuir um peso mínimo, relativamente desprezível quanto ao peso da estrutura, além de possuir um efeito mínimo sobre o comportamento dinâmico do sistema. Por fim, os atuadores devem apresentar respostas rápidas, de tal forma que sejam pouco afetadas pelas esperas (atrasos) que têm efeito desestabilizador sobre o sistema. Tanto os sensores quanto os atuadores devem ser capazes de operar em ambientes extremos. Outra característica desejável é que estes atuadores possuam propriedades flexíveis, de tal forma que possam ser aplicados em uma variedade de locais e situações, contemplando curvaturas.

Dos materiais empregados para as estruturas inteligentes, os mais utilizados são as cerâmicas piezelétricas, os eletroestritivos e magnetoestritivos, os fluidos e sólidos eletroreológicos e magnetoreológicos, as ligas com memória de forma e as fibras óticas. As

propriedades destes materiais já são conhecidas há muito tempo, mas apenas mais recentemente é que estas têm sido refinadas para aplicações em estruturas inteligentes. De todo modo, a inserção destes materiais em um sistema inteligente é nova, suas aplicações ainda estão sob intensa investigação, com várias perspectivas possíveis e algumas experiências de sucesso já consolidados (Moura Jr., 2008).

Para citar um exemplo da importância das estruturas inteligentes no setor aeronáutico, estudos recentes mostram que os requisitos de inspeção para uma aeronave militar (caça) contendo tanto partes metálicas como materiais compostos em sua estrutura, podem ter 40% ou mais de redução do tempo de inspeção utilizando sistemas inteligentes de monitoramento. O monitoramento contínuo da saúde estrutural juntamente com o monitoramento do uso levam à redução do número de manutenções programadas e não programadas, diminuindo o tempo desta atividade. Especialistas consideram que o custo de manutenção/inspeção pode ser reduzido da ordem de 20% na aviação civil e militar quando se adotam soluções de monitoramento de dano integradas e *on-line* (Staszewski; Boller; Tomlinson; 2004).

2.3. Materiais Piezelétricos

Os materiais piezelétricos exibem *acoplamento eletromecânico*, que útil para o projeto de dispositivos como sensores e/ou atuadores. O acoplamento se dá baseado no fato que os materiais piezelétricos produzem um deslocamento elétrico quando uma tensão mecânica é aplicada, tal efeito é chamado de efeito direto (ou efeito sensor). Do mesmo modo, podem produzir deformação mecânica sob a aplicação de um campo elétrico, tal efeito é chamado de efeito inverso (ou efeito atuador). Também é sabido que materiais piezelétricos exibem um acoplamento termoelétrico chamado de efeito piroelétrico (Leo, 2007).

Os sensores e atuadores piezelétricos são obtidos pela polarização do material que, submetido a campos elétricos elevados adquire as características piezelétricas. Entretanto, em altas temperaturas, acima da temperatura de Curie, o material é despolarizado (Banks, *et al*, 1996).

Nesta seção serão estudados o efeito piezelétrico direto e reverso para se chegar às equações constitutivas da piezeletricidade. As equações constitutivas são fundamentais para compreender o funcionamento dos materiais piezelétricos, bem como as variáveis que influenciam em sua resposta.

2.3.1. Os Efeitos Piezelétricos Direto e Inverso ou Reverso

Os compostos ou substratos, anisotrópicos e geralmente ortotrópicos, são devidamente escolhidos devido a suas estruturas reticuladas poliméricas, cerâmicas ou cristalinas, diferenciando suas estruturas atômicas no mínimo em uma direção, em relação aos outros eixos de coordenadas. A polarização possui a capacidade de alinhar parcialmente os eixos polares nos domínios para produzir uma polarização macroscópica que irá facilitar o acoplamento eletromecânico. Assim, através deste acoplamento, o material irá deformar-se quando aplicado a um campo elétrico, devendo ocorrer também o contrário, se for aplicada uma tensão mecânica ao mesmo (Moura Junior, 2004).

Utilizando o formalismo termodinâmico proposto por Devonshire (1954), é possível encontrar as relações constitutivas como procedentes da energia total do sistema, ou seja, compreender as relações fenomenológicas dos efeitos piezelétricos diretos e inversos. Entretanto, embora a resposta a aplicações estruturais típicas seja muito próxima da linear, ao se trabalhar com níveis de excitação mecânicos ou elétricos elevados, os elementos piezelétricos revelam um efeito de histerese (não linear). Desta forma, os trabalhos que geralmente são desenvolvidos utilizando estes elementos são restritos às leis lineares formuladas por Voigt em 1910, conforme podem ser observadas pelas equações (2.1) e (2.2) que representam o efeito direto e inverso respectivamente. Estas equações são comumente conhecidas como as equações constitutivas da piezeletricidade. Informações complementares para um melhor entendimento destas equações podem ser encontradas em livros texto, como (Leo, 2007).

$$S_\alpha = s_{\alpha\beta}^E T_\beta + d_{\beta m} E_m \quad (2.1)$$

$$D_m = d_{m\beta} T_\beta + \varepsilon_{mk}^T E_k \quad (2.2)$$

onde:

- S_α representa o vetor das deformações [mm/mm];
- $s_{\alpha\beta}^E$ representa a matriz de flexibilidade do material na ausência de campo elétrico [m²/N]
- T_β representa o vetor das tensões mecânicas [N/m²];
- $d_{\beta m}$ representa a matriz dos coeficientes piezelétricos [C/N];
- E_m representa o vetor dos campos elétricos [V/m];
- D_m representa o vetor dos deslocamentos elétricos [C/m²];

- ε_{mk}^T representa a matriz da permissividade dielétrica para tensão mecânica nula [F/m];

Os índices subscritos decorrem da notação indicial.

A equação (2.1) descreve o efeito piezelétrico reverso (ou efeito de atuador) pelo qual a aplicação de um campo elétrico E_m causa uma deformação mecânica S_α correspondente. No efeito piezelétrico direto (ou efeito de sensor), descrito pela equação (2.2), a tensão mecânica aplicada T_β causa um deslocamento elétrico D_m .

Como citado anteriormente, materiais piezelétricos apresentam também um efeito piroelétrico. O efeito piroelétrico é a habilidade de certos materiais em gerar uma tensão elétrica temporária quando estes são aquecidos ou resfriados. A mudança na temperatura modifica levemente as posições dos átomos dentro da estrutura cristalina, de modo que a polarização dos materiais é alterada.

A partir da energia livre de Gibbs do material, pode-se obter as seguintes equações constitutivas, também em notação indicial (Busch-Vishniac, I.J., 1998):

$$D_m = d_{m\beta}^{H,\theta} T_\beta + \varepsilon_{mk}^{T,H,\theta} E_k + m_{mk}^{T,\theta} H_k + p_m^{T,H} d\theta \quad (2.3)$$

$$S_\alpha = s_{\alpha\beta}^{E,H,\theta} T_\beta + d_{\beta m}^{H,\theta} E_m + d_{\beta m}^{E,\theta} H_m + \alpha_\alpha^{E,H} d\theta \quad (2.4)$$

onde as variáveis adicionais:

- m : representa a matriz de constantes magneto-dielétricas;
- p : representa o vetor de constantes piroelétricas;
- α : representa o vetor de constantes de expansão térmica;
- H : representa o vetor das componentes de campo magnético;
- θ representa a Temperatura;

Nas equações (2.1) a (2.4) os índices sobrescritos E, H, θ e T mostram que o campo elétrico, o campo magnético, a temperatura e a tensão mecânica são constantes. Onde por simetria, $\alpha, \beta = 1, 2, \dots, 6$, e $m, k = 1, 2$ e 3.

As equações constitutivas são importantes para o desenvolvimento de sistemas de medição de impedância eletromecânica com transdutores piezelétricos para a detecção de danos estruturais

Cabe ressaltar que a temperatura dos materiais piezelétricos não devem ultrapassar a chamada temperatura de Curie, na qual o material perderia suas propriedades piezelétricas. As cerâmicas piezelétricas têm uma temperatura de Curie em geral superior a 200°C.

2.4. Tipos de Transdutores Piezelétricos

Devido ao tempo decorrido desde a descoberta do efeito piezelétrico (final do século XIX) pelos irmãos Curie, dezenas de sensores/atuadores baseados neste princípio vêm sendo propostos, assim como inúmeras aplicações já foram imaginadas. Estas aplicações incluem microfones, alto-falantes, sistemas de ultrassom, micro dispositivos para som, sistemas de controle de vibração e de ruído, dentre muitas outras.

Entretanto, em se tratando de aplicações envolvendo mecânica de estruturas, alguns tipos de sensores e atuadores são mais utilizados. São eles, o PZT (Titanato zirconato de chumbo), o PVDF (fluoreto de polivinilideno) e, mais recentemente, o MFC.

Uma grande vantagem dos transdutores piezelétricos é sua flexibilidade para uso em várias situações, podendo ser moldados na forma e tamanho desejados para monitorar uma estrutura (Banks; Smith; Wang, 1996).

Em geral, os transdutores piezelétricos mais utilizados em SHM são constituídos por discos ou anéis de cerâmicas de PZT revestidas, em ambas as faces, por um filme metálico que serve como eletrodo. Um dos motivos para tal popularidade se deve à sua capacidade de se deformar, gerando uma força suficiente para atuar em estruturas flexíveis como vigas, barras e placas. Isto faz com que seja possível sua utilização eficiente tanto como atuador e como sensor. Uma alternativa tecnológica interessante é a geração de uma malha de pastilhas de PZT sobre a estrutura, garantindo o mapeamento da superfície onde se observa a integridade estrutural, garantindo redundância e eficiência para o procedimento (Moura Jr. e Steffen Jr., 2006).

Como exemplo ilustrativo, a Figura 2.1 mostra cerâmicas de PZT produzidas pela MPI *Ultrasonics*. Essas cerâmicas são fornecidas em vários tamanhos, diversas espessuras e formas. Já os filmes PVDFs são mais utilizados em outras aplicações, como nos sensores, devido a seu baixo coeficiente de acoplamento eletromecânico (Banks; Smith; Wang, 1996).



Figura 2.1 – Exemplos de cerâmicas piezelétricas produzidas pela MPI *Ultrasonics*. Imagens retiradas do site: www.mpi-ultrasonics.com.

Esses transdutores são cortados na forma e tamanho desejados e colados/incorporados na estrutura a ser monitorada. Com o acoplamento eletromecânico obtido, pode-se obter uma relação entre a impedância do transdutor com a impedância da estrutura monitorada. Assim funciona o princípio básico da técnica da impedância eletromecânica.

Diversos tipos de materiais exibem propriedades piezelétricas. Dentre os mais utilizados, pode-se citar:

- Cerâmicas piezelétricas, em particular as cerâmicas de PZT. Por se tratar de um material cerâmico, sua rigidez é geralmente superior ao da estrutura na qual está inserido, resultando numa conversão eletromecânica de grande eficiência, tornando-os eficientes em aplicações como atuadores. Sua aplicação em controle vem sendo muito explorada por ser o PZT efetivo em grandes faixas de frequências. O PZT é ainda recomendado como atuador auto-sensível, particularmente no controle e identificação de falhas (Banks; Smith; Wang, 1996).
- Polímeros piezelétricos, como o PVDF (Fluorido de Polivinilideno), cujo uso como atuador não é recomendado, uma vez que seus coeficientes de acoplamento eletromecânico são bem menores do que os das pastilhas de PZT. Em contrapartida, o potencial dielétrico dos PVDFs é cerca de vinte vezes superior ao dos PZTs, podendo ser expostos a campos elétricos muito maiores (Banks; Smith; Wang, 1996). Estes são utilizados comumente como sensores, lembrando ainda que seu custo é bem inferior ao do observado para as pastilhas de PZT.

2.5. Conceitos de Impedância Mecânica e Elétrica

2.5.1. Impedância Mecânica

A impedância mecânica é dada pela razão entre a força aplicada num ponto e a velocidade resultante medida no mesmo ponto, conforme a Eq. (2.5) (Massoud, 1985).

$$Z_m = \frac{F}{\dot{X}(t)} \quad (2.5)$$

onde Z_m é a impedância mecânica, F é Força e $\dot{X}(t)$ é a velocidade. A impedância mecânica, após passagem ao domínio de Fourier, é uma quantidade complexa e expressa o quanto a estrutura resiste ao movimento quando se aplica uma força, sendo o recíproco da mobilidade (ou admitância). A impedância mecânica de uma estrutura varia com a frequência. Nas frequências de ressonância, a impedância é baixa, o que significa que menos força é necessária para movimentar uma estrutura em uma dada velocidade. Nos sistemas mecânicos, três grandezas básicas são relacionadas com a impedância mecânica (Palomino, 2008):

- Amortecimento Mecânico (R_m): está associado à parte real da impedância, sendo responsável por dissipar a potência mecânica entregue ao sistema. Um dispositivo mecânico se comporta como uma resistência mecânica quando, ao ser acionado por uma força, esta é proporcional à velocidade que o dispositivo adquire, Eq. (2.6).

$$f(t) = R_m \dot{X}(t) \quad (2.6)$$

No Sistema Internacional de Unidades, o amortecimento mecânico é dado por Ns/m .

- Massa Mecânica (M_m): está associada com a parte imaginária positiva da impedância complexa. Um dispositivo mecânico comporta-se como uma massa mecânica quando, ao ser acionado por uma força, resulta uma aceleração diretamente proporcional à força, Eq. (2.7).

$$f(t) = M_m \frac{d\dot{X}(t)}{dt} \quad (2.7)$$

Sua unidade é o kg.

- Flexibilidade Mecânica (C_m): está relacionada com a parte imaginária negativa da impedância complexa. Um dispositivo mecânico se comporta como uma flexibilidade mecânica quando, ao ser acionado por uma força, se desloca proporcionalmente à força, Eq. (2.8).

$$x(t) = C_m f(t) \quad (2.8)$$

Na maioria dos casos, entretanto, prefere-se não trabalhar com a flexibilidade, ou seja, usa-se seu inverso, a rigidez. Assim, define-se a rigidez como o inverso da flexibilidade mecânica, Eq. (2.9).

$$K = \frac{1}{C_m} \quad (2.9)$$

2.5.2. Impedância Elétrica

É denominada como impedância elétrica a oposição que um circuito ou componente eletroeletrônico oferece à passagem da corrente alternada. Trata-se de uma grandeza complexa, e, portanto, dividida em duas partes: resistência (parte real) e reatância (parte imaginária) elétrica. A resistência nos circuitos de corrente alternada se comporta de maneira similar nos circuitos de corrente contínua e é expressa como um valor ôhmico positivo. Já a reatância pode ser indutiva, ou seja, é dada por um valor ôhmico não-negativo, ou capacitiva, representada por um valor ôhmico não-positivo (Gibilisco, 2002).

A resistência é um valor escalar. Assim, para um circuito de corrente contínua, a corrente diminui conforme a resistência aumenta, obedecendo a conhecida Lei de Ohm. O mesmo comportamento é observado num circuito de corrente alternada. Já para uma indutância ou capacitância, a situação não é tão simples quanto à observada para a resistência.

A reatância indutiva X_L de um indutor pode variar desde zero, para o caso de um curto circuito, 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. Isto faz com que se modifique a forma pela qual a corrente flui em relação à tensão.

Para uma fonte de corrente alternada, se a frequência é dada por f em hertz e a indutância da bobina é L em Henrys, então a reatância indutiva X_L em ohms é dada pela Eq.(2.10):

$$X_L = 2\pi f L \quad (2.10)$$

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. Inicialmente, a tensão entre as duas placas do capacitor irá acompanhar quase exatamente a reversão de polaridade condicionada pela corrente alternada. Ao aumentar-se a frequência, a carga não ficará bem estabelecida em cada ciclo. Quando a frequência tornar-se muito elevada, o conjunto das placas irá se comportar como um curto-circuito.

Desta forma, a oposição oferecida pelas duas placas para a corrente alternada é denominada por reatância capacitiva, X_C , que irá variar com a frequência. Assim como a reatância indutiva e a resistência, esta 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.

Muitas vezes os valores da reatância capacitiva são descritas de forma absoluta, retirando-se o sinal negativo. Em cálculos de impedância complexa, entretanto, este valor é sempre considerado uma grandeza não-positiva, evitando confusão com a reatância indutiva.

Assim, a reatância capacitiva é possível de 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 Eq. (2.11):

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad (2.11)$$

Seja um plano RX que descreve grandezas complexas. 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. Similarmente, o plano para RX_C corresponde ao quadrante inferior a direita dos números complexos. As resistências são representadas por números reais não-negativos, enquanto que a reatância

pode ser indutiva, ou seja, valores positivos, ou senão capacitiva, 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.

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

A admitância é uma medida que representa a facilidade com que um meio conduz corrente alternada e equivale à condutância no caso de uma corrente contínua. Assim como a impedância, este é uma grandeza complexa.

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.

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 de forma similar à impedância por $Y = G + jB$, sendo o plano complexo desta entidade física semelhante ao da impedância (Gibilisco, 2002).

2.6. Técnica do monitoramento de integridade estrutural baseada na impedância E/M

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

A técnica utiliza transdutores piezelétricos para captar alterações em propriedades dinâmicas estruturais (rigidez, amortecimento e massa). Esta técnica se beneficia de ambos os efeitos piezelétricos, direto e inverso (sensor e atuador), simultaneamente para obter uma assinatura de impedância para a estrutura. Quando uma pastilha de PZT colada (ou incorporada) a uma estrutura é acionada por um campo elétrico alternado com frequência de excitação elevada (do ponto de vista dos ensaios típicos de análise modal), uma pequena deformação é produzida na pastilha e na estrutura monitorada. A resposta desta região às vibrações mecânicas de alta frequência é transferida de volta à pastilha de PZT na forma de uma resposta elétrica. Quando uma trinca ou dano causa uma mudança na resposta

dinâmica (alteração de fase, frequência ou magnitude), isto se manifesta na resposta elétrica do PZT. De modo geral, o tamanho do dano detectável em um material é inversamente proporcional à faixa de frequência do sinal adquirido. Portanto, esta técnica é recomendada para detecção de danos incipientes (Park e Inman, 2005).

O uso do mesmo elemento como sensor e atuador não somente reduz o número de componentes, assim como a quantidade de cabos associados a cada um. (Park *et al*, 2003).

O desenvolvimento teórico que propôs o uso da impedância como técnica para 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), Park; Cudney; Inman(1999b, 2000a, 2000b, 2001); Park *et al* (2003), Giurgiutiu e Zagrai (2000, 2002), Giurgiutiu; Zagrai; Bao (2002), Giurgiutiu *et al* (2003), Soh *et al* (2000), Bhalla; Naidu; Soh (2002), Bhalla *et al* (2002), Moura e Steffen (2004), Peairs(2006), Moura(2008), Raghavan e Cesnik (2008), Liu e Paurobally (2009), Grisso e Inman (2010), Baptista; Filho; Inman (2010) e Finzi Neto *et al* (2011).

O modelo que quantifica e descreve o processo de medição é visto na Figura 2.2 para um sistema de 1 g.d.l. As cerâmicas de PZT de tamanho usualmente menor que 25x25x0,1mm, são coladas na estrutura a ser monitorada por meio de um adesivo de alta rigidez, podendo ser uma cola instantânea ou uma resina de epóxi, para garantir uma melhor interação mecânica. O PZT colado à estrutura (ou incorporado a ela) é considerado como uma barra fina em vibração axial devido a uma voltagem alternada aplicada. Uma extremidade da barra é considerada fixa, enquanto a outra extremidade é conectada à estrutura. Esta suposição a respeito da interação em dois pontos discretos é consistente com o mecanismo de transmissão de força do transdutor de PZT colado à estrutura.

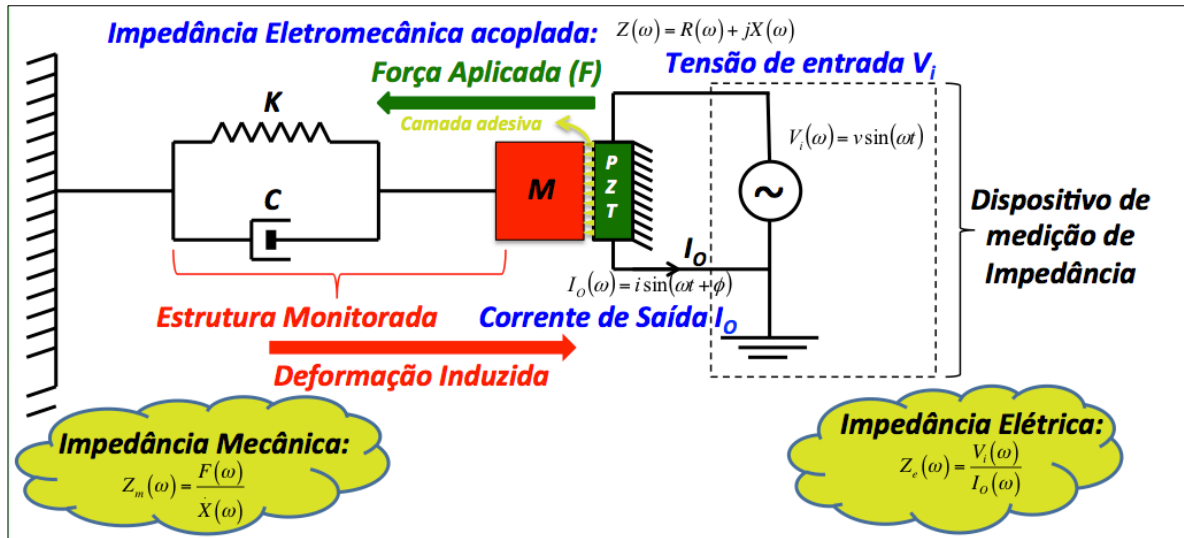


Figura 2.2 – Modelo eletromecânico do método de integridade estrutural baseado em impedância eletromecânica.

Na Figura 2.2 as propriedades dinâmicas da estrutura monitorada são: M , a massa; K , a rigidez; e C , o coeficiente de amortecimento. O transdutor é excitado por uma fonte de tensão senoidal $V_i(\omega)$ com amplitude v e frequência angular ω . Pelo efeito atuador, o transdutor aplica uma força à estrutura que, em resposta, sofre uma deformação induzida. Pelo efeito sensor, esta deformação induzida produz uma corrente de saída $I_o(\omega)$ com amplitude i e fase ϕ . Considerando-se que as propriedades do transdutor sejam invariáveis no tempo, qualquer mudança na estrutura irá afetar o valor da impedância do sistema. A impedância mecânica da estrutura monitorada é dada pela razão entre a força aplicada na estrutura $F(\omega)$ e a velocidade $\dot{X}(\omega)$ com que a mesma se desloca. Numa analogia com um circuito elétrico, a força corresponde à tensão elétrica e a velocidade corresponde à corrente de saída, resultando assim na impedância elétrica correspondente. A impedância elétrica é então medida por um dispositivo de medição apropriado.

Supondo que as propriedades do PZT não variem com o tempo, pode-se demonstrar que a admitância $Y(\omega)$ do sistema é uma função combinada da impedância mecânica do atuador, $Z_a(\omega)$, e da estrutura $Z(\omega)$, sendo dada por (Liang; Sun; Rogers, 1994):

$$Y(\omega) = \frac{I_o(\omega)}{V_i(\omega)} = j\omega \frac{w_a l_a}{h_a} \left[\varepsilon_{33}^{-T} (1 - j\delta) - \frac{Z_s(\omega)}{Z_s(\omega) + Z_a(\omega)} d_{3x}^2 \bar{Y}_{22}^E (1 + j\eta) \right] \quad (2.12)$$

onde, $Y(\omega)$: admitância elétrica do PZT (inverso da impedância); $Z_a(\omega)$ e $Z_s(\omega)$: impedâncias mecânicas do PZT e da estrutura, respectivamente; $V_i(\omega)$: tensão elétrica de

entrada no atuador PZT; $I_o(\omega)$: corrente de saída do PZT; w_a, l_a e h_a : largura, comprimento e espessura da pastilha de PZT; \bar{Y}_{22}^E : módulo de Young do PZT com campo elétrico nulo; d_{3x} : constante de acoplamento piezelétrico; $\bar{\epsilon}_{33}^{-T}$ constante dielétrica do PZT com tensão mecânica nula; δ : fator de perda dielétrica do PZT; η : fator de perda mecânica do PZT; j é a unidade imaginária $\sqrt{-1}$.

Logo, a impedância eletromecânica acoplada é escrita como:

$$Z_E(\omega) = \frac{V_i(\omega)}{I_o(\omega)} = \frac{h_a}{j\omega w_a l_a} \left[\bar{\epsilon}_{33}^{-T} (1 - j\delta) - \frac{Z_s(\omega)}{Z_s(\omega) + Z_a(\omega)} d_{3x}^2 \bar{Y}_{22}^E (1 + j\eta) \right]^{-1} \quad (2.13)$$

Cabe ressaltar que no modelo de 1g.d.l. proposto por Liang *et al.* (1994) a influência da camada de adesivo entre o transdutor e a estrutura não é considerada. Em contrapartida, Xu e Liu (2002) propõem um modelo de impedância eletromecânica considerando a camada de adesivo (Figura 2.3). Neste modelo modificado, conclui-se que, com a queda da qualidade de colagem, pode-se notar um deslocamento nas frequências de ressonância.

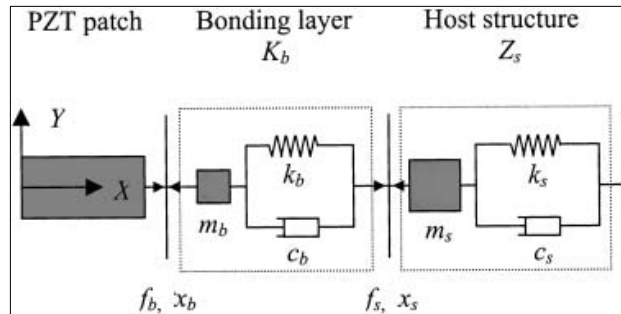


Figura 2.3 – Modelo 1-D do sistema E/M considerando a camada de adesivo.
Fonte: Xu e Liu (2002).

A Eq. 2.13 mostra que a impedância elétrica do PZT é diretamente relacionada com a impedância mecânica da estrutura. Danos eventuais ocasionam mudanças na impedância mecânica da estrutura, alterando características dinâmicas locais. Por isso, os sinais de impedância elétrica do PZT são utilizados para o monitoramento da integridade estrutural do sistema representado pela impedância mecânica da estrutura. Uma extensa investigação sobre os mecanismos de diversos tipos de danos estruturais e sua influência na resposta estática ou dinâmica pode ser encontrada em (Adams, 2007).

Assim, a função de impedância é uma função complexa da frequência. Sua aquisição é feita com o auxílio de equipamento experimental apropriado, denominado analisador de impedância ou impedancímetro, que gera o sinal de excitação, adquire o sinal

de resposta e processa numericamente os dois sinais para a obtenção da função de impedância na faixa de frequências de interesse.

Os analisadores de impedância convencionais, no entanto, não são portáteis e são muito caros, além de serem grandes e pesados, o que impõe dificuldades tanto na pesquisa da técnica em condições de laboratório como em sua implementação prática. Para eliminar estes problemas, a equipe de pesquisa em SHM do LMEst, da FEMEC/UFU desenvolveu um impedancímetro com tecnologia inovadora, de baixo custo, versátil e de processamento rápido, denominado doravante por impedancímetro SySHM (Finzi Neto *et al*, 2010). Trata-se do resultado de projeto de desenvolvimento tecnológico e industrial realizado em parceria com uma grande empresa do setor aeronáutico. Deve-se destacar que as pesquisas com esta técnica de SHM realizadas hoje pelo LMEst foram iniciadas em 1999 através de uma cooperação com a *Virginia Polytechnic Institute (Virginia Tech)*, com a participação do Prof. Dr. Daniel J. Inman, então diretor do CIMSS naquela instituição.

O impedancímetro usado pela equipe SHM do LMEst é capaz de realizar um número muito maior de medidas para o cálculo de médias em um tempo total menor (aproximadamente 10k medições realizadas em 5 min) quando comparado a um analisador de impedância convencional. O sistema é capaz de gerar sinais a uma taxa de até 2,86 MS/s e adquirir a uma taxa de até 1,25 MS/s. A magnitude dos sinais de excitação e resposta são medidas e calculadas diretamente no *hardware*, através de simples manipulações matemáticas. Assim, as características dos sinais são extraídas pelo *hardware* sem que seja necessário adquiri-los primeiramente no domínio do tempo.

A Figura 2.4 ilustra um resultado típico de medição do sinal da impedância quando a estrutura sofre alguma alteração estrutural, tal como um dano. O primeiro sinal, obtido na condição da estrutura intacta, é geralmente denominado de *baseline*, que servirá como referência para comparação com a assinatura adquirida na condição de teste.

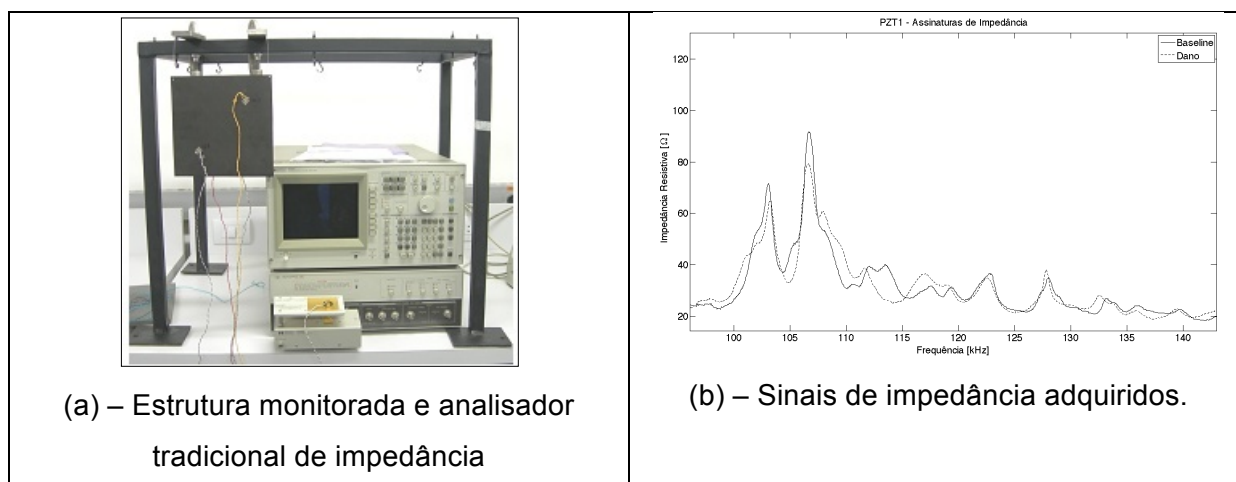


Figura 2.4 – Exemplo do sinal obtido com o método de impedância eletromecânica.

As assinaturas de impedância fornecem uma informação qualitativa acerca da integridade estrutural. Para se quantificar a diferença entre os sinais, convém o uso das *métricas de dano* que serão detalhadas na próxima seção deste capítulo. A impedância do elemento de PZT é predominantemente capacitiva, conforme se verifica na parte imaginária do sinal de impedância. Este termo é muito mais sensível a variações de temperatura se comparado com a parte real do sinal (Raju, 1997). Assim sendo, a parte real do sinal é geralmente utilizada na maioria das aplicações.

Nas últimas duas décadas vários trabalhos têm sido desenvolvidos para demonstrar a potencialidade da técnica de monitoramento de integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica. Vários exemplos de aplicações podem ser encontrados na literatura científica. Dentre esses, alguns trabalhos que revisam o estado da arte da técnica de SHM baseado em impedância podem ser encontrados em: Park, *et al* (2003), Gyekenyesi *et al* (2005) e Annamdas e Soh (2010).

Algumas aplicações desenvolvidas na Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU são ilustradas na Figura 2.5 a seguir. Vale destacar que algumas das aplicações abaixo foram desenvolvidas em parceria com o *Center for Intelligent Material Systems and Structures (CIMSS)*, Virginia Tech, nos Estados Unidos da América.

 <p>(a) – Monitoramento de viga com fissuras.</p>	 <p>(b) – Monitoramento de adição de massas.</p>
 <p>(c) – Estrutura tubular flangeada para monitoramento de tensão.</p>	 <p>(d) – Detecção de furos em pá de rotor de helicóptero civil.</p>
 <p>(e) – Detecção de furos e fissuras em pá de rotor de helicóptero militar.</p>	 <p>(f) – Monitoramento de fissuras e perda de rebites em painel aeronáutico.</p>
 <p>(g) – Monitoramento de um pilone de um avião militar F-15.</p>	 <p>(h) – Monitoramento de estrutura inflável de satélite.</p>

Figura 2.5 – Ilustração de várias aplicações da técnica de monitoramento de integridade estrutural baseada em impedância (Fontes: Moura Jr., 2004; Moura e Steffen, 2005; Moura Jr., 2008).

2.7. Parâmetros para teste de impedância

2.7.1. Frequência inicial

A sensibilidade da técnica em detectar danos estruturais está relacionada com a banda de frequência selecionada. Um dano muito pequeno na estrutura não provoca mudanças significativas de rigidez, massa e amortecimento da estrutura. Portanto, é necessário um comprimento de onda de excitação suficientemente pequeno de forma que consiga detectar o dano. De modo geral, a faixa de frequência tipicamente usada no método de impedância varia de 20 kHz a 250 kHz. Assim sendo, a frequência inicial de varredura é um parâmetro importante.

2.7.2. Faixa de frequência e a Região de Sensoriamento

A faixa de frequência a ser analisada depende de como a estrutura responde à excitação. Desta forma, ela é determinada geralmente por algum método de tentativa e erro onde várias faixas são candidatas. São características desejáveis de uma faixa de frequência de análise: grande densidade de picos, baixa variação da curva em medidas sequenciais sem dano e alta sensibilidade ao dano verificada pelo manuseio da peça.

Embora seja um método bastante eficaz, Moura Jr. e Steffen Jr. (2004) apresentam ainda um procedimento estatístico que pode ser utilizado para obtenção das melhores configurações para os ensaios de impedância eletromecânica. No método baseado em impedância as faixas de frequência que contém de 20 a 30 picos são geralmente as escolhidas, pois o número de picos implica numa resposta dinâmica mais rica ao longo da faixa de frequência. Como exemplo, pode-se observar a Figura 2.6, onde se apresenta a resposta dinâmica na faixa de frequência entre 10kHz e 250kHz medida em uma viga de alumínio. Destacam-se duas faixas onde um maior número de picos é verificado (10kHz a 45kHz e 100kHz a 175kHz).

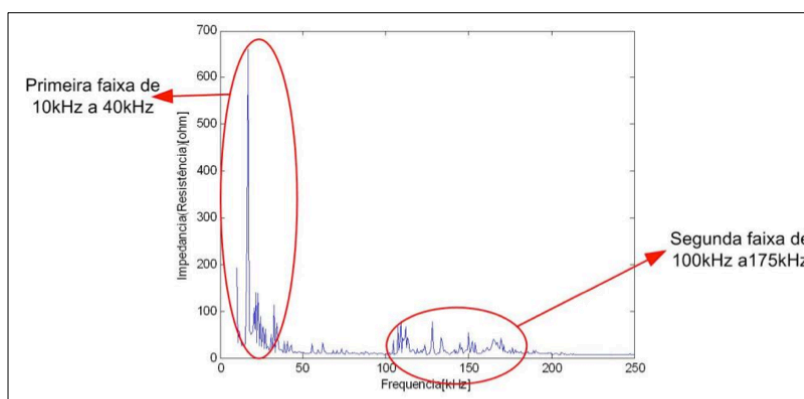


Figura 2.6 – Exemplo de método para escolha da faixa de frequência. Fonte: (Palomino, 2012)

As faixas de frequência mais baixas cobrem uma região de sensoriamento maior, enquanto que faixas de frequência mais altas podem localizar um dano (Sun *et al.*, 1995). Uma das vantagens da resposta em alta-frequência é que, nestas frequências, o comprimento de onda do sinal de excitação é suficiente para detectar até trincas pequenas ou incipientes, que podem potencialmente crescer e causar falhas catastróficas em estruturas aeronáuticas (Park e Inman, 2005). Nas frequências mais altas a influência das condições de contorno é minimizada, priorizando as alterações localizadas.

Quanto à região sensível para identificação de mudanças, Park *et al* (2003) dizem que, para um simples PZT, o mesmo pode identificar uma falha até uma distância (radial) de 0,4 m em estruturas compósitas e até 2 m em simples vigas metálicas.

As medições da impedância elétrica não devem confundir os dois tipos de picos que aparecem no espectro de frequência: um tipo tem a ver com as frequências de ressonância da estrutura; outro tipo é encontrado para a frequência de ressonância da pastilha de PZT. Para estruturas leves, é melhor evitar a ressonância da pastilha de PZT quando selecionar a faixa de frequência. Isso porque a magnitude da resposta é muito maior, quando comparada com a da ressonância da estrutura. (Park, 1999a).

2.7.3. Aquisição do sinal

Como foi explicado na seção 2.6, a impedância resistiva do sinal é geralmente utilizada na maioria das aplicações.

O modo mais tradicional para medir a impedância eletromecânica de uma estrutura inteligente é empregando um analisador como o HP4194A (ver Figura 2.4a). No entanto, como esse equipamento tem custo muito elevado e pesa cerca de 30kg, pesquisadores têm buscado por formas alternativas para se realizar esta tarefa. Por este motivo, um

impedancímetro portátil e de baixo custo foi desenvolvido para as medições de impedância no laboratório LMEst da FEMEC/UFU.

Antes de se medir os sinais de resposta em frequência, deve-se informar ao sistema de medição alguns parâmetros de configuração, tais como:

- Número de Sensores: Definido conforme a quantidade de sensores que são utilizados.
- Frequência inicial e Frequência final: Determinadas conforme a metodologia de escolha da faixa de frequências. Estes dois parâmetros definem a *Largura de Banda* (*BW:Bandwidth*) da medição.
- Número de pontos (*N*): irá definir a resolução em frequência da assinatura de impedância. A resolução em frequência df é dada por:

$$df = \frac{BW}{N} \quad (2.14)$$

- Nível de oscilação: Geralmente em torno de 1V;
- Número de médias: Em um analisador de impedâncias como o HP4194A, pode-se configurar até 8 médias. No entanto, utilizando-se o circuito medidor de impedâncias desenvolvido pela equipe do LMEst, pode-se obter em curto tempo sinais com mais de 2 mil médias para cada ponto frequencial. Esta técnica é útil para reduzir níveis de ruído de medição.

Caso a estrutura possua mais de um tipo de transdutor, pode-se configurar no software de aquisição diferentes níveis de excitação para cada tipo de transdutor conforme suas características específicas de acoplamento eletromecânico.

2.7.4. Avaliação de Dano

Enquanto os gráficos das assinaturas de impedância servem para fornecer uma abordagem qualitativa para a análise, a avaliação quantitativa de dano é feita através do uso de *métricas de dano* escalares, também chamadas de *índices de dano*.

Para se quantificar um dano usando o método da impedância, os dados são adquiridos antes que qualquer dano tenha ocorrido numa estrutura. Esta medição é chamada de *baseline*. Periodicamente, a impedância do sensor é medida e então comparada com a impedância do *baseline* para determinar possível alteração estrutural na vizinhança deste sensor (Sun, *et al.*, 1995). Esta determinação é quantificada em uma *métrica de dano*, frequentemente através de uma equação estatística. Desta forma,

juntamente com um valor limiar para o dano que pode ser previamente definido através de técnicas estatísticas, pode-se afirmar se ocorreu ou não um dano estrutural.

No trabalho realizado por Palomino (2008) são encontradas várias métricas de dano, de forma comparativa. O presente trabalho utilizará as métricas de dano conhecidas como RMSD (Desvio Médio da Raiz Quadrada) e algumas de suas variantes, bem como a CCD (Desvio do Coeficiente de Correção), por serem as mais utilizadas na literatura e por apresentarem resultados de interesse, especialmente no que diz respeito às influências de variação de temperatura na técnica de SHM baseado em impedância.

O modelo estatístico mais utilizado na literatura é o desvio médio da raiz quadrada (RMSD). Sua definição é descrita pela Eq. (2.15):

$$RMSD = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left\{ \frac{[\text{Re}(Z_{1,i}) - \text{Re}(Z_{2,i})]^2}{n} \right\}} \quad (2.15)$$

onde $\text{Re}(Z_{1,i})$ é a parte real da impedância da medição sem dano em uma frequência i , $\text{Re}(Z_{2,i})$ é a parte real da impedância em uma frequência i para uma nova configuração da estrutura, e n é o número total de pontos frequenciais usados na comparação. O cálculo é feito na faixa de frequência previamente definida. A métrica RMSD mede a variação da impedância em cada ponto frequencial e em seguida procede a soma do resultado.

Entre as variantes desta métrica, destacam-se: RMSD1, RMSD2, RMSD3, RMSD4 e RMSD5 (Palomino, 2008). Suas definições são descritas pelas Eqs. (2.16) a (2.20):

$$RMSD1 = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left\{ \frac{[\text{Re}(Z_{1,i}) - \text{Re}(Z_{2,i})]^2}{\text{Re}(Z_{1,i})^2} \right\}} \quad (2.16)$$

$$RMSD2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\text{Re}(Z_{1,i}) - \text{Re}(Z_{2,i})]^2}{\sum_{i=1}^n \text{Re}(Z_{1,i})^2}} \quad (2.17)$$

$$RMSD3 = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{[\text{Re}(Z_{1,i}) - \text{Re}(Z_{2,i})]^2}{\text{Re}(Z_{1,i})^2}} \quad (2.18)$$

$$RMSD4 = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left\{ \frac{[(\text{Re}(Z_{1,i}) - \text{Re}(\overline{Z}_1)) - (\text{Re}(Z_{2,i}) - \text{Re}(\overline{Z}_2))]^2}{n} \right\}} \quad (2.19)$$

$$RMSD5 = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left\{ \frac{\left[\frac{\text{Re}(\bar{Z}_{1,i}) - \text{Re}(Z_{2,i})}{S_{Z_{1,i}}} \right]^2}{n} \right\}} \quad (2.20)$$

onde $\text{Re}(\bar{Z}_1)$ e $\text{Re}(\bar{Z}_2)$ são as médias das medições para as duas condições analisadas; $S_{Z_{1,i}}$ é o desvio padrão para cada ponto frequencial do sinal de referencia.

As métricas RMSD4 e RMSD5 foram propostas, inicialmente, como alternativa para compensar efeitos de variações nas assinaturas de impedância provenientes de mudanças da temperatura ou possíveis resistências elétricas dos cabos de conexão do sensor ao analisador de impedância (Palomino, 2008). Entretanto, os efeitos da temperatura afetam diretamente as medições de *baselines*, sendo que, sem uma compensação apropriada, pode ocorrer falso diagnóstico mesmo com o uso destas métricas.

Uma outra métrica muito utilizada na literatura é o desvio do coeficiente de correlação (CCD). Sua definição, Eq. (2.21), envolve a diferença entre um coeficiente de correlação entre uma medição e a referência (Giurgiutiu; Zagari, 2005).

$$CCD = 1 - CC \quad (2.21)$$

onde CCD é o desvio do coeficiente de correlação e CC é o coeficiente de correlação, dado pela Eq. (2.22):

$$CC = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\left\{ \left[\text{Re}(Z_{1,i}) - \text{Re}(\bar{Z}_1) \right] \left[\text{Re}(Z_{2,i}) - \text{Re}(\bar{Z}_2) \right] \right\}}{S_{Z_1} S_{Z_2}} \quad (2.22)$$

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 CC .

Em seu trabalho, Palomino (2008) utiliza estas métricas além de outras, tais como, a diferença média quadrática (ASD), o desvio percentual da média absoluta (MAPD) e a somatória da diferença média (M). No trabalho referenciado, ao fazer a análise das métricas de dano, recomenda-se testar todas as métricas e identificar as mais sensíveis para o tipo de dano específico que está sendo monitorado. Influências externas, tais como a variação

da temperatura, por exemplo, são frequentes, tornando imprescindível a implementação de técnicas de compensação. Ao fazê-lo, resulta um procedimento mais robusto e confiável.

2.8. Comparação do Método da Impedância com outras técnicas de END

Algumas comparações entre o método de avaliação da integridade estrutural baseado em impedância eletromecânica com outras técnicas de avaliação não destrutivas podem ser encontradas em Park *et al* (2000a) e Giurgiutiu *et al* (2003).

O método baseado na impedância percebe as variações nas propriedades estruturais a partir das alterações nas respostas dinâmicas das estruturas, tal como se faz tradicionalmente nos métodos baseados na análise modal, para os quais diferentes formas de identificação e localização de falhas têm sido propostas (Park *et al*, 2003). Deve-se salientar que, de uma forma geral, as técnicas de análise modal não são capazes de detectar falhas incipientes. A maior diferença entre estas técnicas e a que se baseia na impedância eletromecânica se encontra principalmente na faixa de frequência utilizada para detectar as alterações estruturais decorrentes das falhas. Deve-se lembrar que, dependendo do modelo global de baixa ordem, uma frequência baixa não é suficientemente sensível a uma falha em seu estado inicial. Porém, as altas frequências são sensíveis a mudanças na integridade da estrutura, o que justifica o procedimento adotado pela técnica da impedância eletromecânica.

Por ser utilizado somente um elemento que combina características tanto de atuador como de sensor, a quantidade necessária de cabeamento é menor, simplificando a montagem experimental. Considera-se, portanto, que o método utilizado nesta dissertação é mais prático que a tradicional combinação acelerômetro-*shaker* utilizada pelos métodos baseados nos sinais de vibração (Park *et al*, 2003).

Algumas outras técnicas de END citadas no Capítulo 1 mostram que possuem a capacidade de identificar pequenas falhas, mas são necessários conhecimentos específicos para interpretação dos dados, já que requerem instrumentos bastante complexos. Além disto, a maioria requer que a avaliação seja realizada durante paradas do equipamento, prejudicando ou impossibilitando a realização do procedimento em tempo real (Park *et al*, 2003).

No ensaio por ultrassom dos componentes estruturais, um transdutor piezelétrico é usado para produzir uma onda acústica. Baseado no tempo de atraso da transmissão da onda, alterações no comprimento (deformação) e/ou na densidade do componente estudado pode(m) ser determinado(s). Este método, entretanto, não se presta para uso autônomo, tal

como o método de impedância. Além disso, técnicos experientes são necessários para avaliar os dados dos ensaios de ultrassom para discernir o possível dano (Park e Inman, 2005).

O método de emissão acústica usa as ondas elásticas geradas por danos incipientes. Este método é geralmente usado nas mesmas aplicações que o método de impedância. Ambos os métodos são ideais para monitorar partes críticas da estrutura. Deve-se lembrar, entretanto, que o método da Emissão Acústica requer uma fonte de potência que produza emissão acústica, enquanto a técnica da impedância é baseada simplesmente no conceito de sensor-atuador (Dosch; Inman; Garcia, 1992).

Para o método que funciona a partir do ensaio por impacto, um pulso de tensão é introduzido na estrutura a partir de um impacto, sendo as ondas de tensão resultantes medidas e analisadas por um transdutor. O pulso se propaga pela estrutura e é refletido devido a trincas encontradas na estrutura. O método requer também uma fonte externa de excitação, e não é sensível a pequenas trincas (incipientes) na estrutura (Park e Inman, 2005).

Finalmente, os custos relativos à técnica da impedância são muito inferiores aos outros métodos que utilizam altas frequências como o ultrassom, além de serem capazes de monitorar uma área maior, devido a sua sensibilidade (Park *et al*, 2003).

As principais vantagens do método de impedância eletromecânica em comparação com outros métodos são:

- A técnica não é baseada em nenhum modelo, por isso pode ser usada em estruturas complexas;
- A técnica usa pequenos atuadores para monitorar locais de difícil acesso;
- Os transdutores de PZT mostram excelentes características em condições normais de trabalho: têm uma ampla faixa de linearidade, resposta rápida, pouco peso, alta eficiência de conversão de energia e boa estabilidade a longo prazo;
- Por operar em altas frequências, a técnica é muito sensível a pequenas alterações locais (danos incipientes);
- Os dados das medições são de fácil interpretação;
- A técnica pode ser implementada para o monitoramento de integridade *on-line*;
- A técnica é adaptada para o monitoramento contínuo, que pode reduzir o número de paradas para manutenção.

Em um trabalho recente, (Palomino *et al.*, 2011) investigaram a influência de parâmetros geométricos e ambientais na técnica da impedância eletromecânica. Neste estudo, investigou-se a influência da geometria dos sensores utilizados, a influência do

campo magnético, meio iônico, temperatura e pressão. Dentre os aspectos investigados, aqueles que mostraram influência significativa sobre a técnica são a temperatura e o meio iônico. Já a pressão, a geometria dos sensores e o campo magnético mostraram pouca influência nas assinaturas de impedância. Para compensar o efeito do meio iônico, pode-se aplicar uma camada isolante para fornecer uma proteção ao sensor. Já para o efeito da temperatura, faz-se necessário o uso de técnicas de compensação para evitar a ocorrência de falsos diagnósticos. Isto evidencia uma limitação atual da técnica da impedância eletromecânica, motivando o tema central desta dissertação.

Em resumo, a técnica baseada na impedância eletromecânica, embora ainda requeira aperfeiçoamentos, é capaz de fornecer meios eficientes de detectar danos incipientes em estruturas complexas. Enquanto cada uma das técnicas de identificação de dano existentes tem seu valor e mérito, a técnica baseada na impedância é considerada nova e promissora; sendo assim, a pesquisa descrita nesta dissertação vai ao sentido de explorar seu potencial à vista de um sistema de monitoramento completamente autônomo e robusto.

CAPÍTULO III

COMPENSAÇÃO DO EFEITO DE MUDANÇAS DE TEMPERATURA NA TÉCNICA DE MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL BASEADA EM IMPEDÂNCIA

3.1. Introdução

Em aplicações de engenharia, deseja-se que a estrutura em questão seja monitorada periodicamente, estando sujeita a mudanças climáticas e operacionais que são consideradas normais em sua rotina operacional. Exemplos de tais fatores envolvem o carregamento da estrutura, seu comportamento dinâmico e as alterações da temperatura ambiente. Estes fatores não afetam apenas propriedades físicas da estrutura em questão, mas também as da camada de cola e da cerâmica de PZT, modificando assim a leitura final do sistema de medição de impedância. Isto pode implicar em um falso diagnóstico emitido pelo sistema de monitoramento. Os efeitos destes fatores são de suma importância para o funcionamento adequado da técnica aqui proposta, qual seja a de poder distinguir se uma alteração na assinatura de impedância foi devida à variação de temperatura, por exemplo, ou realmente à presença de um dano estrutural.

Os efeitos da variação da temperatura têm sido reportados na literatura como um dos problemas práticos mais críticos e desafiadores da técnica de SHM baseada em impedância. Por isso, surge assim a necessidade de implementar-se um método para compensação destes efeitos para se obter sistemas de SHM mais robustos, com capacidade de emissão de diagnósticos mais confiáveis. Esta é a motivação principal deste trabalho, buscando fazer com que o desenvolvimento contínuo desta técnica possa se tornar em um produto de uso efetivo por vários setores industriais no futuro.

3.2. Efeitos da Temperatura nos materiais Piezelétricos

Sabe-se que os materiais piezelétricos dependem fortemente da temperatura com relação a suas propriedades básicas. Entre as constantes de propriedades dependentes da temperatura em materiais piezelétricos, a constante dielétrica, ε_{33}^T , exibe o efeito mais significativo na impedância elétrica. Esta modifica o primeiro termo da Eq. 2.13, a impedância capacitiva, causando um deslocamento do *baseline* da impedância elétrica. Além desta constante, o fator de qualidade Q e a constante de acoplamento piezelétrico d_{3x} sofrem influência significativa da temperatura. Um estudo mais aprofundado sobre as limitações dos materiais piezelétricos (envelhecimento natural, instabilidade das propriedades em função de variações de temperatura e limites de excitação elétricos e mecânicos) pode ser encontrado em (ATCP Engenharia Física, 2004).

As Eqs. 2.3 e 2.4 mostram que os sensores também são dispositivos piroelétricos e magneto-elétricos, isto é, o deslocamento elétrico D do efeito piezelétrico direto e a deformação mecânica S do efeito piezelétrico inverso são dependentes tanto do campo magnético H como da temperatura θ . Na formulação das equações constitutivas da piezeletricidade (Eqs. 2.1 e 2.2) estes dois efeitos são normalmente desprezados.

Embora seja seguro desprezar o efeito do campo magnético, os materiais piezelétricos também são significativamente piroelétricos, isto é, a distribuição das cargas elétricas nesses materiais depende não só da deformação mecânica, mas também da temperatura. Assim, mudanças de temperatura causam variações correspondentes na impedância elétrica do sensor (Baptista, 2010), (Palomino *et al.*, 2011).

Em um dos primeiros trabalhos relacionados, (Park *et al.*, 1999), mostra-se que a parte real da impedância elétrica é mais reativa a um dano estrutural, além de ser menos influenciada por variações de temperatura, quando comparada ao módulo ou parte imaginária da impedância elétrica. Assim, a parte real da impedância (impedância resistiva) é em geral mais utilizada na detecção de danos. A Figura 3.1 mostra a mudança da parte real da impedância resistiva de um PZT PSI 5A com a mudança de temperatura. Assim, como as alterações na parte real da impedância são menos sensíveis às variações de temperatura, o método de monitoramento de integridade estrutural baseado em impedância utiliza em geral a impedância resistiva para a detecção de danos, buscando minimizar os efeitos da temperatura nos sinais medidos.

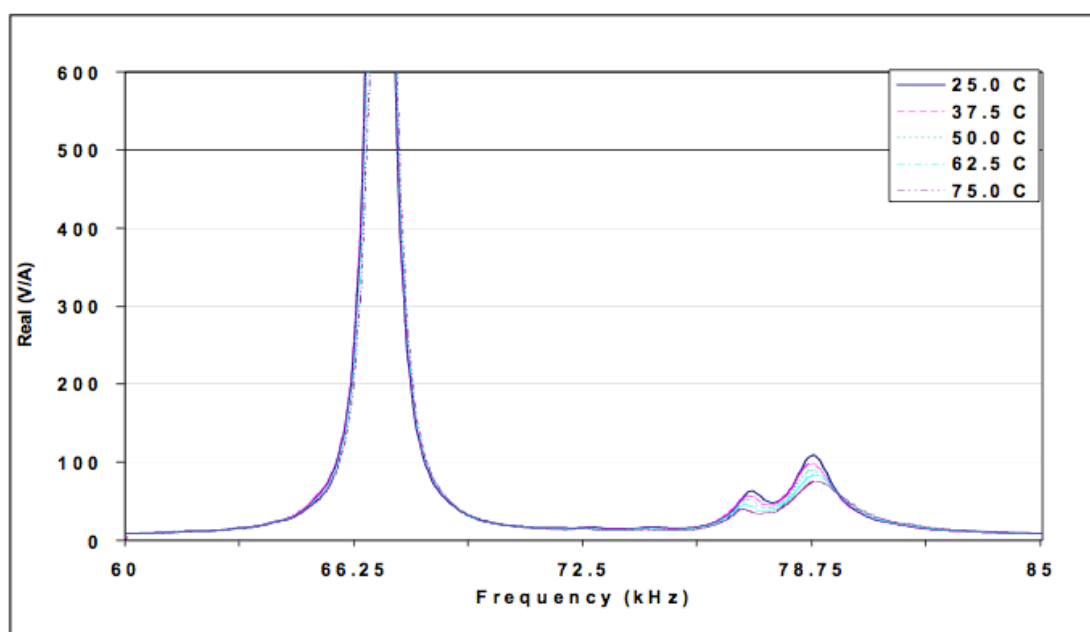


Figura 3.1 - Para um PZT PSI 5-A livre, um aumento na temperatura leva a uma pequena mudança de magnitude na impedância resistiva (Fonte: Park, 1999a).

3.3. Efeitos da Temperatura nas estruturas inteligentes

Quando as cerâmicas de PZT são acopladas a uma estrutura, sua impedância elétrica, tanto a parte real como imaginária são sujeitas a mudanças com a temperatura, conforme a Eq. 2.13. À medida que a temperatura muda, as propriedades físicas da estrutura, da camada de cola e da cerâmica de PZT também vão mudar.

O módulo de Young da estrutura, e consequentemente a impedância da estrutura, varia levemente 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 devido aos complexos modelos termoeletromecânicos constitutivos da interação estrutura-PZT. Por esta razão, uma abordagem empírica é geralmente 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. A variação da temperatura provoca alteração da 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 deveriam ser evitadas (Yang; Lim; Soh, 2008).

Na assinatura da impedância elétrica medida de uma estrutura monitorada isto se manifesta como um deslocamento dos picos de ressonância. Experimentos mostram que esta variação com a temperatura poderia resultar em valores para métricas de dano da mesma ordem de uma alteração proveniente de um dano estrutural, mesmo em condições de laboratório. Este deslocamento térmico pode facilmente levar a conclusões errôneas em relação à integridade estrutural.

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 causam, ao mesmo tempo, um deslocamento na direção do eixo das frequências (horizontal), 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 causada por um dano estrutural é de certa forma “local e abrupta”, mudando a forma da assinatura. Esta característica permite isolar e reduzir o efeito da temperatura, através de modificações nas lógicas de pós-processamento (Sun *et al.*, 1995).

Neste trabalho, para investigar o efeito da variação da temperatura na técnica de SHM baseado na impedância, foi adquirida pelo LMEst da FEMEC/UFU uma Câmara Climática capaz de controlar a temperatura e umidade, da empresa ESPEC *North America*. Desta forma, ensaios envolvendo a variação da temperatura puderam ser realizados, não sem antes efetuar todos os preparativos e adequações físicas no laboratório, para a devida instalação da Câmara.

3.3.1. Câmara Climática de Controle de Temperatura e Umidade

A Câmara EPL-4H da série *Platinous* (Figura 3.2) emprega um sistema BTHC de controle de temperatura e umidade. “BTHC” significa *Balanced Temperature and Humidity Control*.



Figura 3.2 - Ilustração da câmara usada para testes com temperatura e umidade controlada.

As características operacionais principais da câmara climática são listadas a seguir:

- Volume de Trabalho: 900 L;
- Faixa de Temperatura: -35°C a 180°C;
- Flutuação de Temperatura: $\pm 0.5^\circ\text{C}$;
- Taxa de aquecimento: $5.2^\circ\text{C}/\text{min}$;
- Taxa de resfriamento: $1.4^\circ\text{C}/\text{min}$;
- Faixa de Umidade: 10 a 98% UR;
- Flutuação de Umidade: $\pm 3\%$;
- Dimensões de Trabalho ($L \times P \times H$): 100 x 90 x 100 cm.

O sistema BTHC balanceia a temperatura e umidade dentro da câmara para reproduzir as condições desejadas. 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. A Figura 3.3 mostra o princípio do sistema de controle de temperatura e umidade.

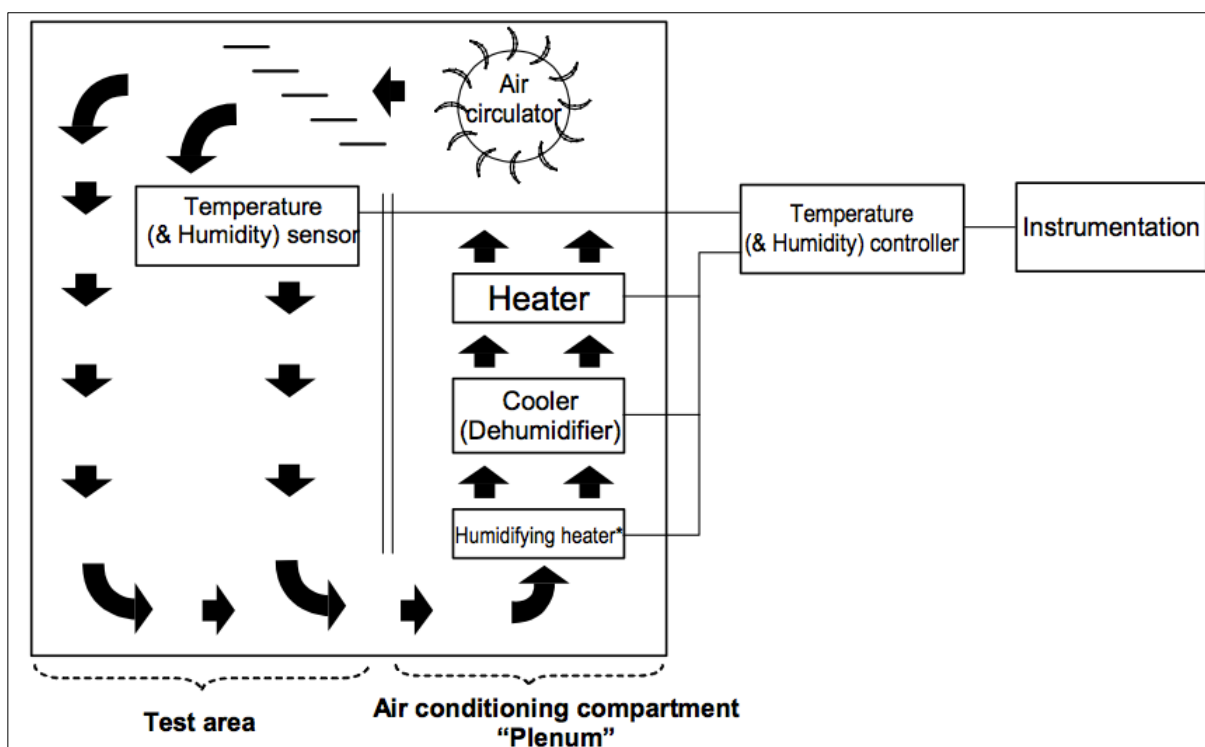


Figura 3.3 - Princípio do sistema de controle de temperatura e umidade.

Para instalação da câmara nas dependências do LMEst foram necessários os seguintes dispositivos e equipamentos:

- ✓ Ponto de fornecimento de energia elétrica de 220V 3Φ 60Hz;
- ✓ Disjuntor de desconexão: 70A;
- ✓ Pontos de entrada e saída de água;
- ✓ Filtro de carvão ativado para pré-filtragem da água;
- ✓ Deionizador de leito misto para purificação da água.

Todos estes itens foram providenciados pelo laboratório antes da chegada do equipamento.

As seguintes recomendações de instalação e posicionamento de amostras são sumarizadas a seguir:

Local: Instalação em piso plano, nivelamento da Câmara antes de ligar o equipamento. Local sujeito às mínimas vibrações mecânicas possíveis. Não exposição à luz solar, porém bem ventilado. Temperatura ambiente externa de +10 a 35°C.

Posicionamento de amostras: Espaçar amostras das paredes de modo que não seja bloqueada a circulação de ar na área de teste. A uniformidade de temperatura e umidade cai caso o ar não possa fluir livremente, o que irá invalidar os resultados dos testes. A Figura 3.4 ilustra boas práticas para posicionamento de amostras dentro da área de testes:

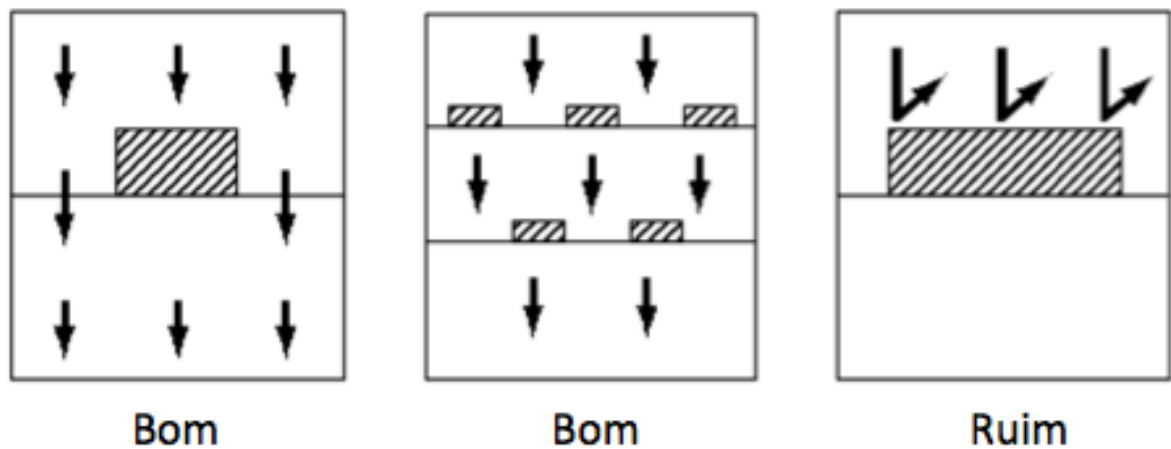


Figura 3.4 - Orientação do posicionamento das amostras.

3.4. Investigação do efeito da Temperatura em uma viga de alumínio

Nesta seção, o efeito da temperatura sobre a impedância elétrica de uma cerâmica de PZT colada em uma viga de alumínio é investigado experimentalmente. A Figura 3.5 mostra a viga de dimensões (3 mm x 25 mm x 360 mm), com uma cerâmica de PZT 5H colada em sua superfície (diâmetro 15 mm x 1 mm de espessura) numa posição aleatória. O adesivo utilizado para colagem do transdutor é a base de resina epóxi (Hysol EA 9320NA), cujo desempenho foi aprovado para uso industrial na faixa de temperatura de -55°C a $+82^{\circ}\text{C}$.



Figura 3.5 - Viga de Alumínio com uma cerâmica de PZT acoplada.

A viga com o sensor piezelétrico foi colocada em repouso dentro da Câmara Climática, suspensa por blocos de borracha. A faixa de temperatura foi de 10°C a 50°C, com incrementos de 10°C. Tomou-se como referência o sensor de temperatura interno da câmara climática, de modo que, para cada ponto de temperatura, esperou-se 30 minutos, garantindo que a temperatura no interior da câmara fosse uniforme. Foi utilizado o impedancímetro SySHM (descrito na seção 2.6) para a aquisição de dados.

Os objetivos deste ensaio inicial foram os seguintes: verificação do efeito da variação da temperatura nas assinaturas de impedância, além de observar se existe algum efeito de histerese associado ao ciclo de aquecimento/resfriamento da câmara. A faixa de frequência escolhida para monitoramento foi de 60-100 kHz, com resolução de 40 Hz.

A Figura 3.6 mostra as assinaturas de impedância medidas experimentalmente em diferentes temperaturas para a cerâmica de PZT colada na viga de alumínio.

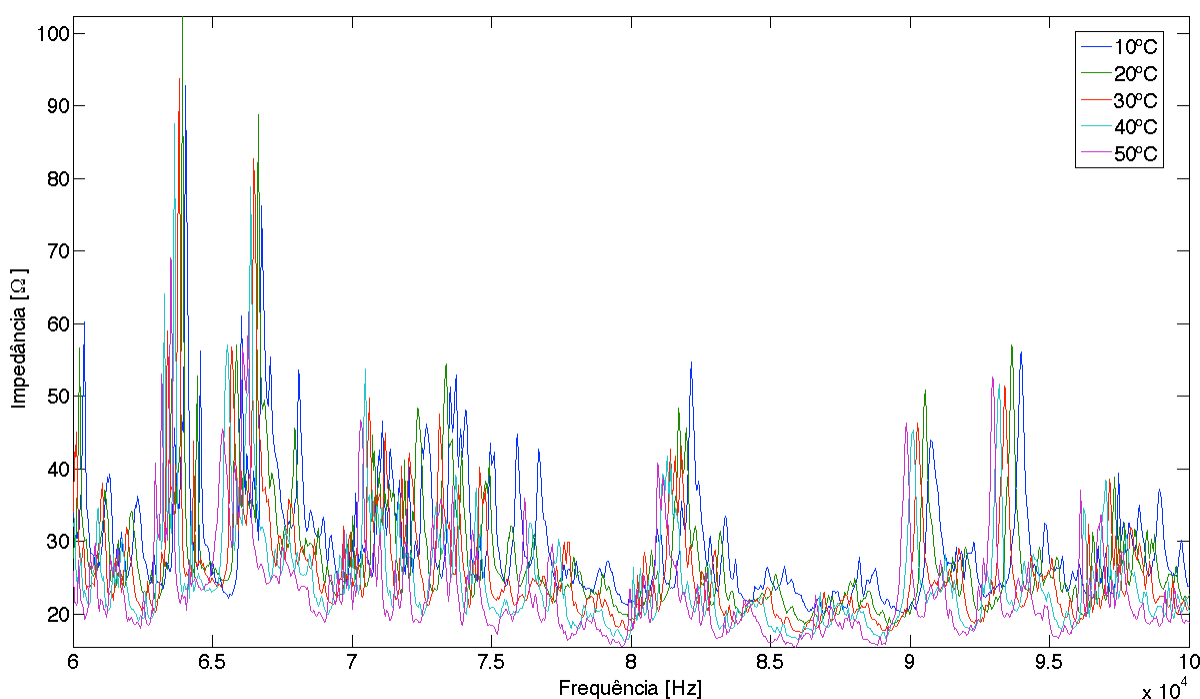


Figura 3.6 - Assinaturas de impedância da viga de alumínio em função da temperatura.

De acordo com a Figura 3.6, nota-se um deslocamento vertical do *baseline*, em parte devido à mudança da capacitância do sensor piezelétrico, bem como um deslocamento horizontal dos picos de impedância devido à mudança nas frequências de ressonância do sistema estrutura-PZT. Caso a temperatura aumente, este deslocamento horizontal será para a esquerda no eixo das frequências; de modo análogo, se a temperatura diminuir, o deslocamento será para a direita. Além disso, a amplitude da maioria dos picos diminui sua

amplitude à medida que a temperatura aumenta, porém alguns picos não seguem esta tendência.

Assim, é aconselhável que um sistema de SHM possa medir a temperatura local para que haja compensação do efeito da temperatura, evitando que falsos diagnósticos ocorram e, conseqüentemente, que as aplicações práticas da técnica possam ser implementadas com sucesso.

Existem dois tipos principais de falsos diagnósticos, conhecidos como falso positivo e o falso negativo. O falso positivo é aquele em que o sistema acusa a presença de dano estrutural, embora esse não exista na realidade. O falso negativo corresponde ao caso em que existe dano, no entanto o sistema falha em detectar o problema, sendo portanto mais grave ao se considerar as decisões tomadas com o falso diagnóstico.

Na próxima etapa, desejou-se investigar se o efeito da temperatura apresenta algum efeito significativo de histerese. Para isso, a viga de alumínio previamente citada foi posicionada na câmara climática na condição bi apoiada sobre blocos de borracha, conforme mostra a Figura 3.7. A temperatura na câmara climática de 10°C a 50°C, com incrementos de 10°C, realizando 3 ciclos de aquecimento e resfriamento. Estes foram realizados em dias diferentes, conforme ilustra a Figura 3.8.



Figura 3.7 – Viga de Alumínio posicionada na câmara climática.

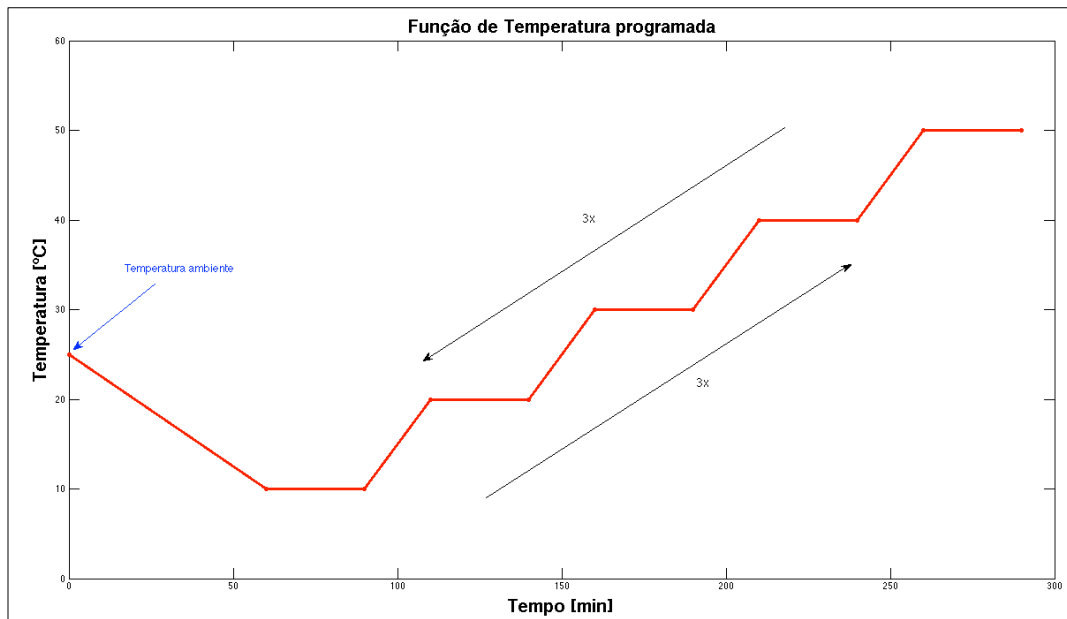


Figura 3.8 – Função de Temperatura Programada na Câmara Climática.

As métricas de dano são mostradas na Figura 3.9. Neste caso, optou-se pelo uso da métrica RSMD, sendo uma das mais utilizadas (juntamente com a CCD) nos testes de SHM baseados na impedância eletromecânica.

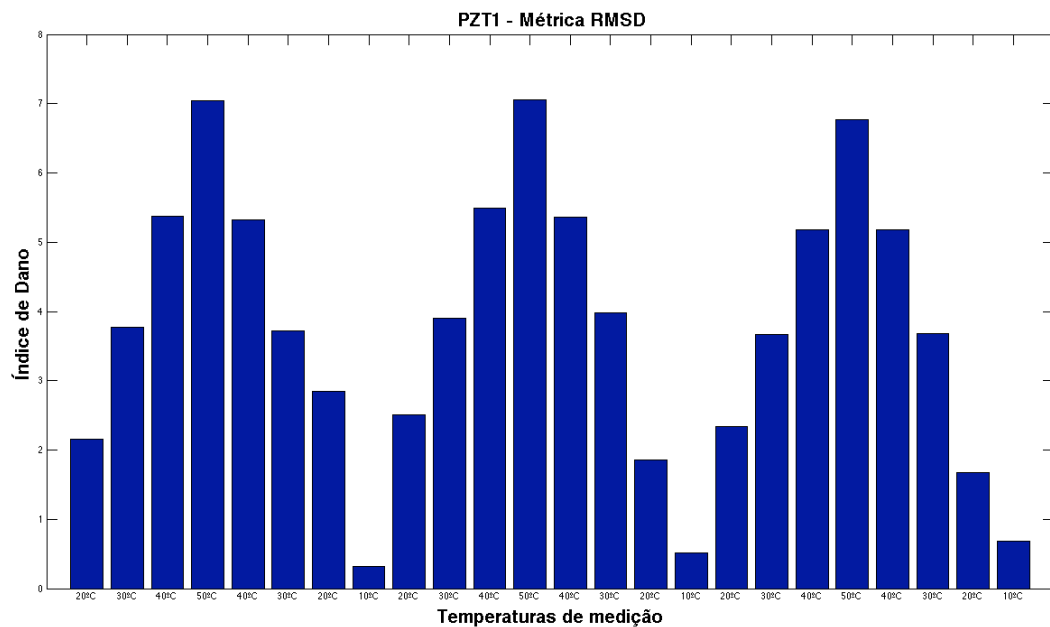


Figura 3.9 – Métricas de dano (RSMD) no teste de histerese.

Todas as assinaturas de impedância foram comparadas com o *baseline* obtido a 10°C na primeira medição. A Tabela 3.1 mostra as médias das métricas, desvios padrão e coeficientes de variação (CV) para cada ponto de temperatura.

Tabela 3.1 - Parâmetros estatísticos da métrica RMSD obtidos com os ciclos de aquecimento e resfriamento realizados.

Temperatura	Média RMSD (μ)	Desvio Padrão RMSD (σ)	CV = $\frac{\sigma}{\mu}$ [%]
10°C	0,5104	0,1820	35,61
20°C	2,2288	0,4304	19,31
30°C	3,7888	0,1283	3,38
40°C	5,3203	0,1217	2,29
50°C	6,9531	0,1628	2,34

As medições na temperatura de 20°C apresentaram maior desvio padrão com relação às outras medidas, porém o CV mostrou boa precisão do experimento à medida que a temperatura aumenta. Embora este teste tenha sido realizado com somente 3 ciclos, os resultados indicam que as assinaturas de impedância apresentam as mesmas tendências tanto na ida (aquecimento), como na volta (resfriamento).

3.5. Revisão de trabalhos anteriores relacionados

Vários estudos têm sido reportados sobre os efeitos da variação da temperatura na medição da impedância, bem como sobre métodos para compensar o efeito da temperatura.

Krishnamurthy *et al.*, (1996) sugeriram uma técnica de correção que busca eliminar os efeitos da temperatura no sensor de PZT livre. Porém esta técnica, além de requerer várias medições de impedância do sensor livre, não considera os efeitos da temperatura na estrutura monitorada.

Bhala *et al.*, (2002) investigaram a influência das interações estrutura-transdutor com a temperatura nas assinaturas de impedância, propondo o uso da chamada *impedância ativa*.

Zhou *et al.*, (2009) usaram um conjunto de *baselines* em algumas temperaturas e estimaram assinaturas de impedância para uma dada temperatura através de técnicas de interpolação matemática.

Sepehry *et al.*, (2011) propõem o uso de redes neurais artificiais (RNAs) como estratégia para se estimar o *baseline* a ser comparado com a temperatura medida da

estrutura monitorada. Park *et al.*, (2008) propuseram o uso da análise de componentes principais (PCA – *Principal Component Analysis*), juntamente com o algoritmo de agrupamentos *k-means* como alternativa de pré-processamento dos dados. A PCA é usada com o objetivo de se extrair características que sejam sensíveis às vibrações essenciais da estrutura, porém eliminando ruídos indesejáveis através de uma compressão de dados, melhorando a capacidade de detecção de danos do sistema de SHM. Já o algoritmo de agrupamentos *k-means* é usado com o objetivo de reconhecimento de padrões para o diagnóstico final. O algoritmo *k-means* usa as componentes principais identificadas como as mais sensíveis para a avaliação do dano na estrutura. Lim *et al.*, (2011) desenvolveram uma técnica de detecção de dano também usando normalização de dados baseado em uma análise de componentes principais não linear (KPCA – *Kernel Principal Component Analysis*). Entretanto, da mesma forma, como as RNAs, a técnica desenvolvida requer uma enorme quantidade de dados de treinamento para funcionamento adequado. Caso contrário, falsos diagnósticos podem ocorrer se os dados de treinamento não incluírem uma condição específica ou faixa de temperatura.

Bastani *et al.*, (2012) desenvolveram uma técnica de compensação usando uma matriz de sensores. Neste método, uma matriz de sensores e parâmetros estatísticos são usados para identificar mudanças causadas por dano, variação de temperatura e vibrações ambientais. A frequência de excitação é muito alta, portanto, o dano estrutural tem um efeito significativo sobre o sensor mais próximo, diferentemente de mudanças de condições ambientais, que afetam todos os sensores quase que de maneira uniforme independentemente de onde estejam localizados ao longo da estrutura. Assim, os efeitos de dano podem ser separados dos efeitos ambientais nas assinaturas de impedância. Porém, este método requer uma grande quantidade de sensores para uma operação eficaz, e o dano estrutural deve estar perto de um dos sensores. Hong *et al.*, (2012) desenvolveram uma técnica similar usando um esquema de detecção de dano híbrido, onde acelerômetros foram usados para fazer o monitoramento global de dano (que foi associado a efeitos de temperatura), e o monitoramento local de dano era feito pelo método convencional de SHM baseado na impedância.

Assim, pode-se dizer que as técnicas apresentadas acima são particularmente eficientes para aplicações e condições específicas. Sun *et al.*, (1995) usaram a correlação cruzada entre o *baseline* e a medição de teste para compensar deslocamentos frequenciais. Park *et al.*, (1999) compensaram tanto os deslocamentos frequenciais como de amplitude usando uma métrica RMSD modificada. Koo *et al.*, (2009) modificaram o método desenvolvido por Park *et al.*, (1999) para desenvolver um deslocamento efetivo em frequência para compensar os efeitos da temperatura. O método é baseado no

deslocamento das assinaturas de impedância com relação ao *baseline* de modo a maximizar o coeficiente de correlação entre a assinatura de medição e a assinatura *baseline*. Este método tem sido continuamente usado em estudos recentes (Baptista *et al.*, 2011). Por esse motivo, optou-se por utilizar a princípio este método para entender seu funcionamento e, oportunamente incorporar melhorias na técnica, à vista das aplicações pretendidas (monitoramento da integridade estrutural de aeronaves).

3.6. Procedimento de Compensação da Temperatura – Método do Deslocamento Efetivo em Frequência por Análise de Correlação.

Baseando-se nas observações do experimento anterior, os deslocamentos verticais e horizontais do padrão de impedância devidos às variações na temperatura podem ser considerados uniformes para uma faixa de frequência estreita. Por outro lado, a variação de impedância devida à ocorrência de um dano estrutural é de certa forma irregular. Esta característica nos permite reduzir os efeitos da temperatura.

Inicialmente, o deslocamento vertical é feito simplesmente corrigindo a diferença média global dos valores dos dois padrões de impedância analisados, conforme a Eq. (3.1):

$$\Delta_v = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n \text{Re}(Z_{2,i}) - \sum_{i=1}^n \text{Re}(Z_{1,i}) \right] \quad (3.1)$$

onde Δ_v é o deslocamento vertical, $\text{Re}(Z_{1,i})$ é a parte real da impedância da medição do *baseline* em uma frequência i , $\text{Re}(Z_{2,i})$ é a parte real da impedância da medição de teste em uma frequência i , e n é o número de pontos de medição.

Em seguida, para se determinar matematicamente a extensão do deslocamento horizontal da assinatura de impedância, usa-se o coeficiente de correlação, que é obtido através da Eq. (3.2):

$$CC_{Z_1 Z_2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{[\text{Re}(Z_{1,i}) - \text{Re}(\bar{Z}_1)][\text{Re}(Z_{2,i}) - \text{Re}(\bar{Z}_2)]}{S_{Z_{1,i}} S_{Z_{2,i}}} \right\} \quad (3.2)$$