

JOSÉ DOS REIS VIEIRA DE MOURA JÚNIOR

UMA CONTRIBUIÇÃO AOS SISTEMAS DE
MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL
APLICADA A ESTRUTURAS AERONÁUTICAS E
ESPACIAIS



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
2008

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

JOSÉ DOS REIS VIEIRA DE MOURA JÚNIOR

**UMA CONTRIBUIÇÃO AOS SISTEMAS DE MONITORAMENTO DE
INTEGRIDADE ESTRUTURAL APLICADA A ESTRUTURAS
AERONÁUTICAS E ESPACIAIS.**

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

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos e Vibrações

Orientador: Prof. Dr. Valder Steffen Jr.

UBERLÂNDIA – MG

2008

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

- M929c Moura Júnior, José dos Reis Vieira, 1979-
Uma contribuição aos sistemas de monitoramento de integridade estrutural aplicada a estruturas aeronáuticas e espaciais / José dos Reis Vieira Moura Júnior.- 2008.
268 f. : il.
- Orientador: Valder Steffen Jr.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.
1. Aeronaves - Teses. 2. Materiais inteligentes - Teses. 3. Redes neurais (Computação) - Teses. I. Steffen Junior, Valder. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 629.73

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo que aconteceu e ainda está por vir.

Ao professor, orientador e amigo Valder, por tentar compreender minhas necessidades nos mais diversos momentos, e, apesar de algumas vezes pensar diferente, ainda assim dar apoio. Também, dando seu exemplo para nossa formação humana e científica.

Ao Prof. Daniel J. Inman por ter aberto seu laboratório (*CIMSS-VT*), além de sua atenção e apoio das mais diversas formas para que grande parte deste trabalho se tornasse possível. Estende-se aqui os agradecimentos às empresas que forneceram de forma indireta as estruturas para os trabalhos apresentados aqui: U.S. Air Force, NASA, DARPA, ILC Dover.

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

A minha querida esposa Hada Susan pelo companheirismo, tolerância, dedicação e amor.

Aos amigos da mecânica: Sigeo, João, Karina, Felipe, e todos os outros que não caberiam tantos nomes, mas não menos importantes. Não esquecendo dos que aqui também passaram como Jacomine, Xicão (Embraer), Alexandre (*in memoriam*) e Anthony (o criador de borboletas). Também aos membros do *Center for Intelligent Material Systems and Structures* da *Virginia Tech*, principalmente ao Dan Peairs, Ben Grisso, Pablo Tarazaga, Andy, Eddie Simmers e Seunghee Park da *KAIST* - Coréia do Sul.

Aos professores e funcionários da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) pelo apoio, principalmente os professores Raslan, Domingos e Raquel.

Ao professor e amigo Carlos Augusto de Oliveira, por me transmitir seu conhecimento, confiar e acreditar em minhas capacidades.

Ao CNPq pelo apoio financeiro, fundamental para a realização deste trabalho.

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

Resumo

Este trabalho apresenta uma contribuição para as técnicas de monitoramento de integridade estrutural (*SHM – Structural Health Monitoring*) de componentes aeronáuticos e espaciais. Desta forma, pretende-se apresentar algumas áreas de atuação ainda pouco exploradas, como aplicações em estruturas mecânicas simples, metodologia de acoplamento de tecnologias web para o monitoramento online de estruturas e depósito de informações via banco de dados, além da avaliação e proposta de implantação de técnicas recentes de SHM (Ondas de Lamb e Impedância Eletromecânica) em vários tipos de estruturas reais sob um enfoque prático e focado a aplicações reais em engenharia. É importante ressaltar que, devido à ausência de modelos numéricos precisos, os estudos aqui apresentados partem de uma proposta experimental, utilizando-se técnicas de inovação, métodos de inteligência artificial, análise de sinais, estatística e programação cliente-servidor via internet. Finalmente, os resultados obtidos demonstram o grande potencial de uso destas técnicas de SHM em conjunto com metodologias matemáticas e computacionais já consagradas.

Palavras chave: Monitoramento da integridade estrutural, Monitoramento baseado em impedância, Ondas de Lamb, Metamodelagem, Inteligência artificial.

MOURA JR, J. R. V. **A Contribution to Structural Health Monitoring Systems Applied to Aeronautic and Space Structures**. 2008. PhD. Thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Abstract

This work presents a contribution to SHM (Structural Health Monitoring) techniques devoted to aircraft and space components. This way, it intends to present some fields of application of the above mentioned techniques that have not yet been sufficiently explored, such as simple mechanical structures, methodologies of coupling web technologies and online structural monitoring and storage of information in data bases. Besides, recent SHM techniques (Lamb Waves and Electromechanical Impedance) are applied to various types of real structures under a practical viewpoint, aiming at real engineering applications. It is important to take into account that due to the absence of precise numerical methods, the presented studies are based on an experimental approach, using innovation techniques, artificial intelligence methods, signal analysis, statistics and client-server programming through internet. Finally, the obtained results demonstrate the potential use of the cited SHM techniques together with reliable mathematical and computational methodologies.

Keywords: Structural health monitoring, Impedance-based monitoring, Lambwaves, Metamodeling, Artificial Intelligence.

Lista de símbolos

D – deslocamento no efeito piezoelétrico direto.

E – campo elétrico.

ε – tensor dielétrico do material.

d – tensor de tensão piezoelétrica.

e – deformação no material.

σ – tensão normal aplicada.

s – complacência do material.

f – frequência de inversão da corrente elétrica.

X_L – reatância indutiva.

L – indutância de uma bobina.

C – capacitância de um capacitor.

X_C – reatância capacitiva.

$Y(\omega)$ – admitância de um sensor/atuador piezoelétrico acoplado a uma estrutura.

ω – frequência angular de inversão da corrente elétrica.

V – diferença de potencial aplicado a uma pastilha piezoelétrica.

I – corrente elétrica aplicada a uma pastilha piezoelétrica.

a – constante geométrica da pastilha piezoelétrica.

d_{3x} – constante de acoplamento piezoelétrico.

Y_{xx}^E – módulo de Young.

$\bar{\varepsilon}_{33}^T$ – constante dielétrica complexa do PZT com tensão zero.

Z_a – impedância complexa da estrutura.

Z – impedância complexa da pastilha piezoelétrica.

δ – perda dielétrica tangencial da pastilha piezoelétrica.

Y_P – parte passiva da admitância.

Y_A – parte ativa da admitância.

M – métrica de dano para um monitoramento.

$Z_{i,1}$ – sinal de impedância de referência da estrutura.

$Z_{i,2}$ – sinal de impedância de um monitoramento da estrutura.

a – parâmetro de escala da transformada *wavelet*.

b – parâmetro de translação da transformada *wavelet*.

$x(t)$ – sinal de monitoramento no domínio do tempo.

$\Psi(t)$ – função *wavelet* mãe.

f_{sc} – frequência central para o sinal analisado pela *wavelet*.

$H(t)$ – função de Haar utilizada na transformada wavelet.

\bar{x} – média amostral.

s – desvio padrão amostral.

N – quantidade de amostras.

x_i – i -ésima amostra.

$Cov(x,y)$ – covariância entre as variáveis x e y .

$r(x,y)$ – coeficiente de correlação entre as variáveis x e y .

n_i – número de repetições de um experimento.

m – número de ensaios diferentes.

Y – vetor resposta de interesse num metamodelo baseado em regressão.

X – matriz de valores dos fatores avaliados em um metamodelo baseado em regressão.

B – vetor de coeficientes de regressão em um metamodelo.

MQ – média quadrática.

SQ – soma quadrática.

\hat{y}_i – valor estimado pelo metamodelo para o i -ésimo ponto.

S/N – relação sinal/ruído do robustecimento de Taguchi.

w – peso de um neurônio.

$P(A)$ – probabilidade do evento A .

$P(B|A_i)$ – probabilidade a posteriori de A_i depois de conhecida $P(B)$.

f_{carv} e f_{pinho} – função densidade de probabilidade para o “carvalho” e para o “pinho”.

h_{carv} e h_{pinho} – probabilidade para o “carvalho” e para o “pinho”.

$d(X)$ – decisão sobre o vetor de teste X .

I_a – perda por classificar erroneamente X .

θ_a – classe de A .

V_i – semente do agrupamento.

u_{ij} – probabilidade que o elemento X_j pertença ao grupo com semente V_i .

J – função de otimização para determinação das pertinências Fuzzy.

Sumário

Capítulo I - INTRODUÇÃO	1
1.1. Estrutura da Tese	2
Capítulo II - FUNDAMENTOS TEÓRICOS	5
2.1. Metodologia SHM Baseada em Impedância.....	5
2.2. Metodologia SHM Baseada em Ondas de Lamb.....	14
2.3. Técnicas de Meta-Modelagem Estatística	17
2.4. Redes Neurais Artificiais.....	29
2.5. Análise de Agrupamentos - Fuzzy C-Médias e K-Médias	45
2.6. Princípios de Inovação de Processos	48
2.7. Conexões Sem-Fio e Aplicações para Internet	68
2.8. Algoritmos Genéticos Clássicos	71
Capítulo III - MODELAGEM BÁSICA DE FALHAS VOLTADA PARA SHM	75
3.1. Flanges de Tubos	75
3.2. Soldas em Vigas	83
3.3. Variações de Tensões	93
Capítulo IV - SISTEMA REMOTO DE MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL BASEADA EM IMPEDÂNCIA	103
4.1. Visão Geral do Sistema	103
4.2. Modelagem de Banco de Dados.....	106
4.3. Scripts PHP e o Sistema de Monitoramento Remoto	109
Capítulo V - SHM BASEADO NA IMPEDÂNCIA ELETROMECCÂNICA E NAS ONDAS DE LAMB PARA IDENTIFICAÇÃO DE CORROSÃO.....	119
5.1. Procedimentos de Corrosão	119
5.2. Configuração Experimental e Procedimentos de Ondas de Lamb e Impedância	121
5.3. Resultados Experimentais	122
5.4. Identificação de Falhas	124
5.5. Conclusões	125
Capítulo VI - UTILIZAÇÃO DE METODOLOGIA DE INOVAÇÃO DE PROCESSOS PARA ROBUSTECIMENTO DO PROCESSO DE SHM	127
6.1. Análise C-S do Procedimento de SHM de um Painel Frontal de Aeronave Comercial	127

6.2. Projeto de um sistema SHM baseado em Análise C-S	134
6.3. Monitoramento da Integridade Estrutural no “Barril” da Aeronave	136
6.4. SHM Aplicadas à Identificação de Fissuras no Painel Frontal de uma Aeronave Comercial.....	144
 Capítulo VII - SHM APLICADO A ESTRUTURAS ESPACIAIS	159
7.1. Identificação das Condições Ótimas de Monitoramento para uma Estrutura Espacial Tubular de Carbono	159
7.2. Estrutura Toroidal Gossamer.....	173
 Capítulo VIII - SHM APLICADO A ESTRUTURAS AERONÁUTICAS.....	191
8.1. Avaliação das Condições Ambientais	191
8.1.1. Propriedades da Corrosão e Mudanças Ambientais	192
8.1.2. Resultados para Variações Ambientais	194
8.1.3. Conclusões sobre os Aspectos Ambientais.....	197
8.2 Caracterização de Esforço e Falhas em uma Estrutura de Reforço de Asa de um F-15 ...	198
8.2.1. Condições Ótimas de Monitoramento.....	199
8.2.2. Análise de Tensão versus Sinal de Impedância.....	202
8.2.3. Identificação de Mudanças Estruturais	203
8.2.4. Conclusões dos Experimentos com o Pilone do F-15	205
8.3 Análise de Agrupamentos para Lâminas de Helicópteros	205
 Capítulo IX - CONSIDERAÇÕES FINAIS	233
9.1 Conclusões Sobre o Trabalho	233
9.2 Trabalhos Futuros.....	238
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	241
 ANEXO I - FLUXOGRAMA DE INSTRUMENTAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO	249
ANEXO II - TABELAS DE EXPERIMENTOS DAS PÁS DE HELICÓPTEROS.....	253

Capítulo I

INTRODUÇÃO

Uma das grandes áreas de interesse da engenharia aplicada sempre foi o de manutenção. Desde tempos remotos, antes mesmo do conceito atual de manutenção ser construído, os sistemas de engenharia já impunham, evidentemente, ações corretivas para garantir seu funcionamento. O conceito de manutenção parte inicialmente de programas primitivos de substituição de uma peça que se acha comprometida pelo uso, chegando modernamente a sofisticadas metodologias para predição de “vida útil” ou confiabilidade.

Nesta tese pretende-se focar problemas relacionados a duas áreas cujo crescimento atual é bastante expressivo, a saber: a indústria aeroespacial e as técnicas denominadas por SHM, derivadas do inglês *Structural Health Monitoring* – Monitoramento da Integridade Estrutural (Farrar *et al.* 2003).

Os métodos de monitoramento de integridade estrutural que utilizam o sinal da impedância e aqueles que usam as chamadas *Lamb Waves* (Sohn, 2005; Lemistre *et al.*, 1999) possuem características não destrutivas, de fácil montagem e monitoramento, além de grandes perspectivas de aplicações junto a sistemas inteligentes de controle. Por estes motivos, estas metodologias são adequadas para estruturas com locais de difícil acesso e de elevado custo, tais como as estruturas de monitoramento usadas em plataformas marítimas, navios e submarinos. Entretanto, o maior campo de atuação, devido ao baixo peso da instrumentação e capacidade de ser incorporado à própria estrutura, é o das aplicações aeroespaciais, tais como satélites, veículos lançadores reutilizáveis e aeronaves militares e comerciais.

Assim, através de aplicações práticas de duas metodologias que vêm sendo amplamente estudadas (uma baseada em assinaturas de impedância e baseada nas *Lamb Waves*), busca-se ilustrar um sistema para o monitoramento de falhas voltada para as áreas aeronáutica e espacial.

A aplicação de técnicas estatísticas, tal como a dos planejamentos fatoriais, é crescente na solução de vários problemas de engenharia, como descrito por Barros Neto *et al.* (1995) e por Montgomery (1991). Através destas técnicas é possível compreender o comportamento do sistema usando um número limitado de experimentos. Então, os metamodelos caracterizados por superfícies de resposta podem ser calculados e a configuração ótima é obtida.

Uma metodologia similar de meta-modelagem, porém fundamentada em outras heurísticas, são as chamadas redes neurais artificiais (Anderson, 1995), os métodos de aglomeração (Fuzzy C-Means, K-Means) (Mingoti, 2005) e *wavelets* (Debnath, 2001). Tais metodologias também são descritas e utilizadas ao longo da tese, enquanto voltadas para soluções específicas.

Outro procedimento que se buscou utilizar foi o de realizar o monitoramento da integridade estrutural remota, para aquisição e monitoramento das assinaturas de impedância à distância. Para isto, foi proposta também a possibilidade de um sistema de monitoramento remoto baseado em servidores de internet, FTP e banco de dados (Miller, 2001).

Para tudo isso, é importante também ressaltar a simplicidade de algumas ferramentas que auxiliam na identificação dos parâmetros a serem utilizados no processo de detecção de falhas. Neste sentido, foi utilizada uma metodologia de inovação de produtos (*TRIZ*) (Oliveira, 2003) associada com ferramentas usadas em engenharia da qualidade (Oliveira, 2003).

Desta forma, o objetivo maior desta tese foi o de aplicar alguns conceitos consagrados e outros ainda não experimentados em SHM, revelando as potencialidades da miscelânea de metodologias e ferramentas operando juntas, na tentativa de se construir um sistema de monitoramento de falhas inteligente voltado para o setor aeronáutico e espacial. Para tal fim, foram adotadas diversas estruturas, desde estruturas mais simples (tubos com flanges, barras soldadas, corpos de prova para ensaios de tração, vigas de alumínio) até estruturas mais sofisticadas (painel frontal do EMB 145, fuselagem *barril* do EMB 145 (aeronave comercial desenvolvido pela EMBRAER), piloni de um F15 (caça militar), pá de helicóptero civil e militar, tubo estrutural de satélite e satélite toroidal inflável). Assim, buscou-se aplicar várias ferramentas, procurando adequá-las a uma ampla gama de situações de ocorrência de falhas reais em engenharia aeroespacial.

1.1. Estrutura da Tese

O trabalho foi dividido em capítulos de tal forma que fosse possível uma melhor compreensão dos itens necessários para as formulações, assim como para uma abordagem direta e modular de cada parte do problema.

No capítulo 1 são apresentados os problemas principais tratados no plano da tese e é feita uma explanação da problemática geral relacionada a SHM, assim como a definição da proposta, além de um sumário dos capítulos.

No capítulo 2 são abordados os conceitos fundamentais utilizados nesta tese. Neste sentido, é realizada uma revisão do estado da arte dos métodos de SHM, os conceitos básicos de planejamentos fatoriais, assim como outras técnicas de meta-modelagem (*Fuzzy C-Means*,

Redes Neurais, k-médias e *wavelets*), programação para internet e técnicas de inovação de processos.

O capítulo 3 trata da aplicação do SHM baseado em impedância para estruturas simples, visando compreender o comportamento da variação das assinaturas, dadas as alterações estruturais inseridas nos casos de tensão em juntas flangeadas, ensaios de tração e outras causadas por soldas.

No capítulo 4 é desenvolvido um sistema de monitoramento remoto de medição dos sinais de impedância através da internet. A seguir é proposta uma forma de tornar esses sinais acessíveis remotamente através de um sistema de gerenciamento de sinais utilizando um servidor de internet, com base de dados *mysql* e com *scripts PHP* e *Javascripts*.

No capítulo 5 é apresentada uma junção das duas principais metodologias de SHM (impedância e *Lamb Waves*) para a identificação de corrosão em barras de alumínio.

No capítulo 6 é apresentada a implantação de um modelo de SHM baseado em impedância em uma estrutura mais sofisticada de um avião comercial. Algumas metodologias de inovação de produtos, tal como o uso do modelo inverso de Altshuller (Ruhe, 1999) foi aplicado para o estabelecimento de alguns parâmetros.

O capítulo 7 trata do processo de SHM baseado em impedância aplicado às estruturas espaciais. Para tanto, um componente tubular foi exaustivamente avaliado para geração de um procedimento automático de detecção de condições de monitoramento baseado em algoritmos genéticos. Posteriormente, um satélite toroidal inflável Gossamer foi utilizado para identificação de alteração de características estruturais via monitoramento de sinais de impedância.

No capítulo 8 várias estruturas aeronáuticas reais são utilizadas para identificação de falhas. Em todos os casos explorados neste capítulo a metodologia de SHM baseada em impedância é utilizada. Inicialmente, uma viga de alumínio é monitorada quanto ao processo de corrosão pontual, dentro de uma câmara de variação de pressão atmosférica e temperatura. A intenção desta etapa foi a de avaliar o processo de corrosão em alumínio sob alterações de pressão e temperatura, em ambientes similares aos encontrados em vôo. Depois, no pilone do F-15 foram avaliadas as condições de monitoramento, utilizando a técnica de robustecimento de Taguchi, no qual posteriormente é apresentada a influência dos carregamentos (tensão) nos sinais de impedância adquiridos. Feito isto, é criado um sistema de monitoramento de falhas da estrutura por adição de massa, utilizando quatro pastilhas de cerâmicas piezelétricas (zirconato titanato de chumbo – PZT). Por fim, duas pás, sendo uma de helicóptero civil e outra militar, foram testadas em dois tipos de falhas (cortes e furos) e metamodelos específicos baseados em redes neurais probabilísticas foram criados. Duas técnicas de aglomeração são utilizadas para mostrar a distinção entre os grupos de falhas para a estrutura militar e assim elaborar um procedimento de triagem de falhas antes da avaliação pelo metamodelo apropriado.

O capítulo 9 encerra o trabalho, apresentando as principais idéias e conclusões obtidas. São também apresentadas as perspectivas futuras para este campo de atuação.

Capítulo II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Neste capítulo são abordados os aspectos teóricos necessários para o desenvolvimento do trabalho. Assim, o desenvolvimento de cada técnica ou metodologia utilizada nos capítulos posteriores do trabalho é apresentado, independentemente, nas seções a seguir. Dentre os tópicos abordados encontram-se as formas de meta-modelagem, teorias de aglomeração de dados, vantagens e desvantagens de linguagens de computação utilizadas, etc.

2.1 Metodologia SHM Baseada em Impedância

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 como atuadores que são facilmente incorporados a uma dada estrutura de interesse. Baseados nas características físicas destes componentes, alguns sistemas de controle significativos puderam ser implementados, substituindo, em muitos casos, servomecanismos tradicionalmente utilizados. Estas novas estruturas, denominadas por “estruturas inteligentes”, utilizando-se destes novos materiais, denominados por “materiais inteligentes”, vêm ganhando reconhecidas aplicações na indústria, assim como nos centros de pesquisa em todo o mundo, revolucionando o projeto de sistemas de controle e prometendo um profundo efeito nas técnicas de projeto, no futuro (Banks *et al*, 1996).

Os sensores podem ser colados na superfície ou incorporados na estrutura e devem ser escolhidos de tal forma que não afetem significativamente o comportamento dinâmico do sistema (Banks *et al*, 1996). Assim como os sensores, os atuadores ideais devem possuir um peso mínimo, relativamente desprezível quanto à estrutura, além de possuir um efeito mínimo sobre a dinâmica do sistema. Por fim, os atuadores devem apresentar respostas rápidas de tal forma que sejam afetadas o mínimo possível pelas esperas desestabilizadoras (Banks *et al*, 1996).

Tanto os sensores quanto os atuadores devem ser capazes de operar em ambientes extremos. Assim, componentes para aplicações aeroespaciais, por exemplo, devem ser robustos, de tal forma que suportem com segurança amplos gradientes térmicos e radiações. Já os atuadores utilizados em aplicações envolvendo câmaras de deposição química para crescimento de cristais devem ser aptos a suportar as reações químicas, pressões e

temperaturas extremas. Uma outra característica é que estes atuadores devem ser flexíveis de tal forma que possam ser aplicados em uma variedade de locais e situações. Por exemplo, atuadores e sensores em aplicações aeroespaciais podem ser requeridos por suportarem vibrações, acústica estrutural, influência da camada limite. Neste contexto, podem ser usados para aumentar a resistência à fadiga, viabilizar procedimentos para diagnóstico e detecção de falhas, dentre outras possibilidades de aplicação (Banks *et al*, 1996).

Dos materiais empregados para as estruturas inteligentes, os mais utilizados são as cerâmicas piezoelétricas, os elementos eletroestrutivos e magnetoestrutivos, os fluidos e sólidos eletroreológicos e magnetoreológicos, as ligas com memória de forma e as fibras óticas. Em muitos casos, 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 (Banks *et al*, 1996). Por exemplo, o efeito piezoelétrico foi documentado por Pierre e Jacques Curie em 1880, enquanto os cristais piezoelétricos foram empregados em rádios somente na década de 1940. Outros materiais, como os cabos de fibra ótica e fluidos eletroreológicos, foram somente recentemente desenvolvidos e um número significativo de suas propriedades ainda estão sendo caracterizadas. De qualquer forma, a inserção destes materiais como componentes, como sensores ou atuadores em um sistema inteligente é nova, suas aplicações ainda estão sob intensa investigação, com várias perspectivas possíveis e alguns modelos de sucesso já consolidados.

O estudo dos materiais inteligentes envolve um campo multidisciplinar, incluindo várias áreas de atuação, tais como: ciência dos materiais (compósitos e metalurgia), mecânica aplicada (vibrações, mecânica da fratura, elasticidade, aerodinâmica), eletrônica (sensores, atuadores, controles), fotônica (fibra ótica), produção (processo, microestrutura) e biomimetismo (dispositivos que utilizam estratégias usadas por estruturas naturais).

Os materiais piezoelétricos vêm de uma classe de materiais dielétricos que apresentam deformações em resposta a um campo elétrico aplicado, bem como produzem polarizações dielétricas em resposta a deformações mecânicas. Os sensores e atuadores piezoelétricos são construídos pela polarização de um material, que aplicado a elevados campos elétricos e submetidos a altas temperaturas produzem as características piezoelétricas (Banks *et al*, 1996).

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 dos domínios para produzir uma polarização macroscópica que irá facilitar o acoplamento eletromecânico (Banks *et al*, 1996). Assim, através deste acoplamento, o

material irá deformar-se quando aplicado um campo elétrico (efeito inverso ou direto), devendo ocorrer também o contrário, se for aplicada uma tensão mecânica ao mesmo (efeito inverso ou de sensor).

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 piezoelétricos diretos e inversos (Banks *et al*, 1996). Entretanto, embora a resposta a aplicações estruturais típicas seja muito próxima da linear, ao se trabalhar com níveis de excitação elevados, os elementos piezoelétricos 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 (Banks *et al*, 1996), conforme podem ser observadas pelas equações (2.1) e (2.2) que representam o efeito direto e inverso respectivamente.

$$D_m = \varepsilon_{mn}^T E_n + d_{mkl} \sigma_{kl} \quad (2.1)$$

$$e_{ij} = s_{ijkl} \sigma_{kl} + d_{mij} E_m \quad (2.2)$$

onde D e E representam, respectivamente, o deslocamento e o campo elétrico, ε e d representam o tensor dielétrico do material e o tensor de tensão piezoelétrica, enquanto a deformação no material e é relacionada à tensão σ através da complacência s . Os índices subscritos decorrem da notação indicial.

É importante ressaltar que é utilizado o efeito direto do dispositivo ao utilizá-lo como sensor, já que o efeito inverso é responsável pela descrição do dispositivo como atuador. Assim, é possível perceber a capacidade destes materiais para aplicações de controle e detecção de falhas, através de um único componente, além de sua insensibilidade a variações de temperatura, desde que abaixo da temperatura denominada temperatura de Curie, na qual o material perderia suas propriedades piezoelétricas (Banks *et al*, 1996).

Uma outra vantagem que pode ser observada destes elementos é sua flexibilidade para uso em várias situações. Desta forma, uma ampla faixa de materiais podem ser polarizados para adquirir propriedades piezoelétricas. Dentre os materiais mais utilizados, destacam-se o titanato-zirconato de chumbo (PZT), um piezocerâmico, e o fluorido de polivinilideno (PVDF), um piezopolímero (Banks *et al*, 1996).

Por se tratar de um cerâmico, a rigidez da pastilha PZT geralmente é superior ao da estrutura na qual ele está inserido, resultando numa conversão eletromecânica de grande eficiência, tornando-os eficientes em aplicações como atuadores (Banks *et al*, 1996). Sua aplicação em controle vem sendo muito explorada por ser o PZT efetivo em grandes faixas de

freqüências. O PZT é ainda recomendado como atuador auto-sensível, particularmente no controle e identificação de falhas (Banks *et al*, 1996).

O uso dos filmes PVDFs como atuadores não é recomendado, uma vez que seus coeficientes de acoplamento eletromecânico são bem menores do que os dos PZTs. 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 *et al*, 1996).

Algumas vantagens dos elementos piezoelétricos podem ser verificadas, tais como: relativa insensibilidade a temperaturas, respostas lineares em baixos níveis de excitação, baixo peso e grande flexibilidade como sensores e atuadores, além de exibirem uma resposta em freqüência de banda ampla. Algumas possíveis desvantagens destes elementos são a histerese em campos elétricos elevados, dificuldade de corte para dar forma aos PZTs devido a suas características como cerâmica, fracos coeficientes de acoplamento eletromecânico para os PVDFs e, por fim, o decaimento das características de polarização dos elementos piezoelétricos, reduzindo assim seu desempenho.

A impedância mecânica de um sistema mecânico pode ser descrita como a divisão da força harmônica aplicada a este sistema pela velocidade com que o mesmo se desloca no mesmo ponto (Massoud, 1985).

É denominada por impedância elétrica a oposição que um circuito ou componente oferece a corrente alternada. Ela é uma grandeza bidimensional, e portanto, dividida em duas partes: resistência e reatância. A resistência nos circuitos de corrente alternada é a mesma que a contraparte da corrente contínua e é expressa como um valor ôhmico positivo. Já a reatância pode ser indutiva, ou seja, valor ôhmico não-negativo, ou capacitiva, ôhmico não-positivo (Gibilisco, 2002).

A resistência é um escalar porque ela pode ser representada em uma escala unidimensional. Assim, para um circuito de corrente contínua, a corrente diminui conforme a resistência aumenta, obedecendo a Lei de Ohm. Da mesma forma, esta lei também assegura o mesmo para a corrente alternada em uma resistência. Já para uma indutância ou capacitância, a situação não é tão simples quanto ao cálculo da resistência (Gibilisco, 2002).

A reatância indutiva X_L de um indutor pode variar desde zero, para o caso de um curto circuito, alguns ohms, para uma bobina pequena, chegando a kilohms ou megaohms conforme se vê nas grandes bobinas. Como resistência pura, a reatância indutiva afeta a corrente em um circuito de corrente alternada. Porém, não sendo resistência pura, a reatância muda de acordo com a freqüência. Isto faz com que mude a forma pela qual a corrente flua em relação a tensão (Gibilisco, 2002).

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. (2.3).

$$X_L = 2\pi f L \quad (2.3)$$

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 megaHertz. Inicialmente, a tensão entre as duas placas do capacitor irá acompanhar quase que 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 (Gibilisco, 2002).

Desta forma, a oposição que as duas placas oferecerá 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, ela também possui sua escala em ohms. Entretanto, os valores são negativos ao invés de positivos e o valor de X_C aumenta de modo negativo conforme a frequência diminui (Gibilisco, 2002).

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 (Gibilisco, 2002).

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. (2.4) (Gibilisco, 2002).

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad (2.4)$$

Seja um plano RX que descreve valores complexos. O eixo das abcissas 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 a 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 (Gibilisco, 2002).

Os valores descritos neste plano descrevem um valor genérico $R + jX$ que representam 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 (Gibilisco, 2002).

A admitância é uma medida que representa a facilidade com que um meio conduz corrente alternada e equivale a condutância no caso de uma corrente contínua. Assim como a impedância, este é um valor complexo (Gibilisco, 2002).

Da mesma forma como ocorre em um circuito com corrente contínua, a condutância G aparece em um circuito de corrente alternada. A condutância elétrica é o inverso da resistência e sua unidade é medida em Siemens ou Mho (Gibilisco, 2002).

O inverso da reatância é a susceptância B que também pode ser capacitiva ou indutiva (Gibilisco, 2002). Combinando a condutância e a susceptância, pode-se formar a admitância complexa Y que é descrita similarmente a impedância, por $Y = G + jB$, sendo o plano complexo desta entidade física similar ao da impedância (Gibilisco, 2002).

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

Tem sido mostrado que a impedância elétrica do material PZT pode ser associada diretamente a impedância mecânica da estrutura à qual a pastilha de PZT esteja colada. Utilizar o mesmo elemento tanto como sensor quanto como atuador não somente reduz o número de componentes, como também os fios associados a cada um (Park *et al*, 2003).

O desenvolvimento teórico que propôs o uso da impedância como técnica para o monitoramento estrutural foi inicialmente proposto por Liang *et al* (1994) e posteriormente ampliado por Chaudhry *et al* (1995, 1996), Sun *et al* (1995), Park *et al* (1999a, 1999b, 2000a, 2000b, 2001, 2003), Giurgiutiu and Zagari (2000), Giurgiutiu *et al* (2002, 2003), Zagari and Giurgiutiu (2001), Soh *et al* (2000), Bhalla *et al* (2002a, 2002b), Naidu *et al* (2002) e Moura and Steffen (2004).

Utilizando frequências geralmente acima de 30 KHz, o método utiliza elevadas frequências aplicadas a pastilhas de PZT coladas sobre a superfície de estruturas para a realização do monitoramento da integridade estrutural, ou seja, para avaliação das modificações dos sinais que são capturados pelo sensor. As pastilhas de PZT utilizam uma diferença de potencial muito baixa, menores que 1 V, gerando uma alta frequência de

excitação em determinados pontos da estrutura (Park *et al*, 2003). Entretanto, de acordo com Raju (1997), o valor de 1V apresenta bons resultados para identificação de mudanças estruturais.

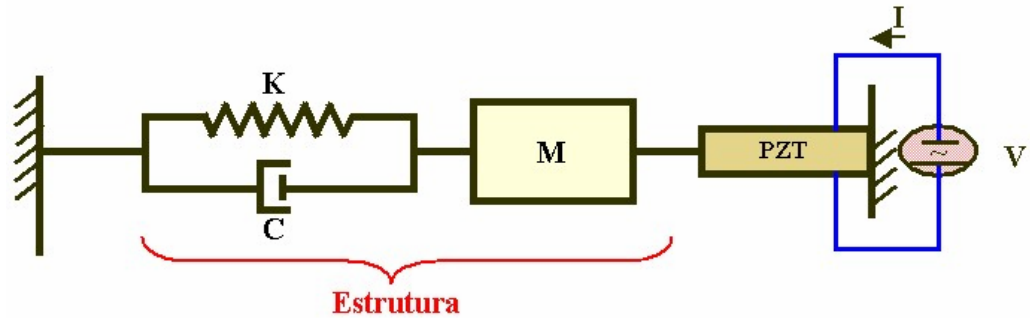


Figura 2.1 - Modelo unidimensional do acoplamento eletromecânico utilizado pelo método baseado em impedância.

Na Fig. 2.1 é apresentada uma representação do modelo unidimensional eletromecânico do sistema de monitoramento de integridade estrutural utilizando os sinais de impedância (Raju, 1997). É considerado que um atuador PZT axial seja posicionado em uma das extremidades do sistema, enquanto a outra está fixa. Liang *et al* (1994) demonstrou que a admitância $Y(\omega)$ do atuador PZT é uma função combinada da impedância mecânica do atuador PZT $Z_a(\omega)$ e da estrutura $Z(\omega)$, assim como mostra a Eq. (2.5).

$$Y(\omega) = \frac{I}{V} = i\omega a \left(\bar{\epsilon}_{33}^T (1 - i\delta) - \frac{Z(\omega)}{Z(\omega) + Z_a(\omega)} d_{3x}^2 \hat{Y}_{xx}^E \right) \quad (2.5)$$

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

Supondo que as propriedades mecânicas do PZT não variem ao longo do tempo utilizado para monitoramento, a Eq. (2.5) mostra que a impedância elétrica do PZT é diretamente relacionada com a impedância mecânica da estrutura, levando a utilização dos sinais de impedância elétrica do PZT para o monitoramento da integridade estrutural do sistema representado pela impedância mecânica da estrutura.

Deve ser notado que a admitância elétrica é basicamente capacitiva, mostrando que a parte imaginária é o termo dominante. Este termo imaginário é mais sensível a variação de temperatura do que a parte real. Desta forma, a parte real do sinal é geralmente utilizada na maioria das aplicações (Raju, 1997).

A técnica basicamente consiste na obtenção de funções de resposta em frequência (FRFs) da estrutura e posterior avaliação da modificação destes sinais, periodicamente. Uma modificação destas FRFs indicaria uma modificação estrutural e, portanto, uma falha (Raju, 1997).

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

Enquanto a maior parte dos trabalhos tem utilizado a parte real da impedância ou da admitância, Bhalla *et al* (2002a) introduz o conceito de assinatura “ativa”, já que é possível utilizar a componente interativa direta do sinal após filtrar a componente “inerte”. Como são conhecidas as propriedades do material PZT, pode-se reescrever a Eq. (2.5) como a Eq. (2.6).

$$Y = i\omega a \bar{\epsilon}_{33}^T - i\omega a \frac{Z(\omega)}{Z(\omega) + Z_a(\omega)} d_{3x}^2 \hat{Y}_{xx}^E = Y_P + Y_A \quad (2.6)$$

onde o termo Y_P denota a parte passiva da admitância e representa a contribuição do PZT. O termo Y_A representa a parte ativa que equivale a interação PZT-estrutura. Como o termo passivo ainda apresenta a parte real do sinal e o termo ativo contém a parte imaginária, basta isolar o termo ativo da soma da Eq. (2.6) para trabalhar tanto com a parte imaginária quanto com a real para identificação de falhas, mantendo toda a informação das condições da estrutura (Park *et al*, 2003).

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

Sobre o material utilizado, o PZT apresenta boas características tal como grandes faixas de linearidade, resposta rápida, baixo custo, elevada eficiência de conversão e estabilidade (Park *et al*, 2003). Os sinais de impedância geralmente são obtidos através do

analisador de impedância. Os dados adquiridos são transferidos para um computador para posterior análise e avaliação. Algumas desvantagens deste procedimento é que o equipamento não é portátil e muito caro, sendo que poucos recursos do mesmo são utilizadas. Como alternativa, Peairs *et al* (2002a) desenvolveram um circuito equivalente para medição da impedância, reduzindo o custo do equipamento de cerca de U\$40,000.00 para um circuito de apenas U\$10.00. Entretanto, este dispositivo necessita ser acoplado a um analisador de sinais digitais com FFT (transformada rápida de Fourier) implementada, mas este é um equipamento comum em laboratórios de pesquisa.

Os gráficos das respostas da impedância fornecem informações qualitativas a respeito da integridade da estrutura, enquanto a informação quantitativa geralmente é fornecida através de um escalar. Este valor escalar é descrito como “desvio da raiz média quadrática” por Sun *et al* (1995) e é descrito pela Eq. (2.7).

$$M = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{[\text{Re}(Z_{i,1}) - \text{Re}(Z_{i,2})]^2}{[\text{Re}(Z_{i,1})]^2}} \quad (2.7)$$

onde M representa a medida da falha, $Z_{i,1}$ representa o PZT medido sob condições saudáveis e $Z_{i,2}$ representa o sinal a ser comparado no intervalo de frequência i .

Tais variações irão representar uma maior aproximação da falha quanto maior seja o valor da medida da falha. Raju (1997) apresenta uma outra alternativa, também escalar, na qual se utiliza a referida “correlação cruzada”, que pode ser utilizada para comparar informações de diferentes grupos de dados. Lopes *et al* (2000) incorporam um procedimento baseado em redes neurais para a análise de falhas quantitativa para o método baseado em impedância.

Algumas comparações entre o método de avaliação da integridade estrutural baseado em impedância com outras técnicas de avaliação não destrutivas podem ser encontradas em Park *et al* (2000a) e Giurgiutiu *et al* (2002).

O método baseado em impedância percebe as variações nas propriedades dinâmicas ou respostas das estruturas como os métodos de resposta estrutural global, embora várias formas diferentes de identificação e localização das falhas tenham sido propostas (Park *et al*, 2003).

Entretanto, para aplicações práticas, esta técnica ainda não tem se mostrado eficiente para identificação de falhas em estados iniciais. Mas, por ser utilizado somente um elemento que combina características tanto de atuador como de sensor, considera-se que o método

ainda é mais prático que a tradicional combinação acelerômetro-*shaker* utilizada pelos métodos baseados nos sinais de vibração (Park *et al*, 2003).

Algumas das outras técnicas não destrutivas avaliadas na seção anterior mostraram que possuem a capacidade de identificar pequenas falhas, mas são necessários conhecimentos específicos para interpretação dos dados, já que requerem instrumentos complexos. Além disto, a maioria requer que a avaliação seja realizada durante paradas do equipamento, podendo ser aplicados em pequenos intervalos, prejudicando ou impossibilitando a realização do procedimento em tempo real (Park *et al*, 2003).

Finalmente, os custos relativos a esta técnica são muito inferiores aos outros métodos que utilizam altas frequências como o ultra-som, além de permitir uma área de sensibilidade maior (Park *et al*, 2003).

2.2 Metodologia SHM Baseada em Ondas de Lamb

Uma metodologia tão amplamente utilizada quanto a baseada em impedância, tem sido aquela que se fundamenta nas chamadas ondas de Lamb (*Lamb waves*) (Farrar *et al*, 2003). A técnica permite detectar, principalmente, possíveis defeitos presentes em estruturas esbeltas que consigam sofrer perturbações do atuador piezelétrico incorporado.

Para a extração de características, podendo associar as falhas aos sinais adquiridos, existem duas abordagens relatadas na literatura. A primeira tem a ver com a modelagem física do fenômeno (Raghavan and Cesnik, 2005) e, a segunda, se concentra na modelagem dos dados (Lemistre *et al.*, 1999; Sohn, 2005). A abordagem utilizada ao longo desse trabalho é a construída sobre a modelagem dos dados, associando os sinais dos experimentos a uma forma de extração de características baseada em transformadas *wavelets* (Debnath, 2002). O processamento do sinal da transformada *wavelet* aplicada a sinais de ondas de Lamb se aplica especialmente aos casos de identificação de delaminações e rupturas de fibras em estruturas compostas com fibras de carbono/epóxi (Lemistre *et al.*, 1999). Embora as aplicações sejam voltadas, em sua maioria, aos materiais compostos, a técnica pode ser igualmente aplicada a estruturas metálicas, como falhas em trilhos de ferrovias, por exemplo (Park, 2006).

Uma abordagem diferente pode ainda ser feita com as ondas de Lamb, utilizando a transformada rápida de Fourier, detectando frequências características (Lemistre *et al*, 1999). Desta forma, o modo mais usual de captura destas características no tempo é o uso das transformadas *wavelets* discretas e contínuas (TWD e TWC) (Lemistre *et al*, 1999).

Os grupos de frequência com largura de banda relativamente constantes podem ser obtidos através da transformada *wavelet* contínua (Lemistre *et al.*, 1999). Algumas aplicações

em ensaios não destrutivos têm sido obtidas através desta técnica (James and Ma, 1997; Hayashi *et al.*, 1999).

A decomposição por *wavelets*, alternativamente ao uso da frequência, cria a noção de escala e mapeia um sinal em um plano no tempo-escala, similar ao plano tempo-freqüência da transformada de Fourier no tempo (Lemistre et al., 1999). Cada escala no plano tempo-escala corresponde a uma determinada faixa de freqüências no plano do tempo- freqüência. Assim, a transformada contínua de *wavelet* fornece uma decomposição do sinal $x(t)$ em um conjunto de funções base que são obtidas através da dilatação de uma *wavelet* "mãe" , $\Psi(t)$, da Eq. (2.8).

$$TWC_x(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2.8)$$

onde as variáveis contínuas a e b são os parâmetros de escala e translação respectivamente. O sinal então é decomposto pela convolução do tempo com um conjunto de *wavelets* elementares, as quais são versões em escala (estendidas ou comprimidas) da *wavelet* mãe $\Psi(t)$. Desta forma, a *wavelet* mãe pode ser compreendida como a resposta do impulso de um sinal de filtro passa banda de referência (Lemistre et al., 1999). Em geral, a *wavelet* utilizada é a de Morlet complexa (Lemistre et al., 1999), a qual fornece informações tanto sobre a amplitude quanto da fase, possibilitando a visualização das discontinuidades do sinal que possam existir. Para a obtenção da *wavelet* de Morlet complexa, dada pela Eq. (2.9), basta realizar o produto de uma função exponencial complexa por uma gaussiana.

$$\Psi(t) = \exp(-ik_0 t) \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.9)$$

A freqüência central f_{sc} que corresponde a cada escala da *wavelet*, ou seja, cada um dos filtros passa banda elementar, são obtidos pela Eq. (2.10).

$$f_{sc} = \frac{1}{\sigma} \frac{f_0}{sc} \quad (2.10)$$

onde σ é o desvio padrão gaussiano da *wavelet*, sc é a escala da *wavelet*, ou seja, a relação da duração de tempo da *wavelet* pela duração do tempo do sinal; f_0 é a menor freqüência obtida pelo inverso da duração do tempo do sinal.

O sistema de referência bidimensional tempo-escala, ou tempo-freqüência criado pela TWC é muito útil na análise de sinais não-estacionários complexos (Lemistre et al, 1999), criando, no entanto, coeficientes redundantes de igual amplitude. Uma forma alternativa para esse processo é a discretização dos parâmetros de escala a e b de tal forma que a base ortonormal das funções $\gamma(t)$ possam ser obtidas, recebendo o nome de Transformada *Wavelet* Discreta (TWD).

Uma família de *wavelets* ortogonais pode ser construída a partir de um número de diferentes bases. Dentre estas, a base mais simples é dada pela função de Haar, descrita pela Eq. (2.11) (Debnath, 2002).

$$H(t) = \begin{cases} 1 & \text{para } t \in \left(0, \frac{1}{2}\right) \\ -1 & \text{para } t \in \left(\frac{1}{2}, 1\right) \\ 0 & \text{para outros casos} \end{cases} \quad (2.11)$$

Dados os problemas inerentes à função de Haar que não possui regularidade do seu decaimento, um aperfeiçoamento da análise pode ser feito com a *wavelet* de Daubechies (Daubechies, 1993). Assim, como mostra a Eq. (2.12), para cada um dos r inteiros, as *wavelets* de Daubechies constroem uma base ortonormal e são definidas na forma de funções com dilatações binárias m e com translações diádicas k (Lemistre et al., 1999).

$$\gamma_{m,k}(t) = 2^{m/2} \gamma_r(2^m t - k) \quad (2.12)$$

Entretanto, nenhuma das *wavelets* de Daubechies pode ser dada em uma forma explícita, podendo ser determinadas recursivamente das funções de escala correspondentes a um filtro de resposta ao impulso finito (Lemistre et al., 1999). Assim, a TWD pode ser descrita de acordo com a Eq. (2.13).

$$TWD_{m,k} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \gamma_{m,k}(t) dt \quad (2.13)$$

De forma análoga à TWC, a forma sintética da TWD pode ser representada pela Eq. (2.14) (Lemistre et al., 1999).

$$x(t) = \sum_m \sum_k TWD_{m,k} \gamma_{m,k}(t) \quad (2.14)$$

Após a decomposição, o sinal analisado pode ser representado como uma soma dos m níveis dados pela Eq. (2.15).

$$x_m(t) = \sum_k TWD_{m,k} \gamma_{m,k}(t) \quad (2.15)$$

onde esses níveis representam o comportamento do tempo do sinal em diferentes bandas de frequência e dão suas contribuições à energia completa do sinal (Lemistre et al., 1999). Este processo é muito útil para aplicações como compressões de sinais, filtragens frequência-tempo reconstruções parciais (Lemistre et al., 1999). Em especial, os procedimentos apresentados sugerem uma boa opção na extração de características dos sinais, podendo modelar os comportamentos de inserção de falhas em metamodelos baseados em ensaios experimentais que utilizem a metodologia de monitoramento de integridade estrutural baseada nas ondas de Lamb.

2.3 Técnicas de Meta-Modelagem Estatística

Nos casos em que é se necessita da criação de um pseudo modelo (Montgomery, 1991) do sistema com grande representatividade, são aplicados os conceitos de meta-modelagem. Geralmente estes metamodelos são gerados devido ao desconhecimento analítico do sistema, ou senão, visando a redução de complexidade do sistema em estudo. Tais metamodelos não são os modelos completos, ou seja, trata-se de uma aproximação. Muitas vezes a representatividade dos dois modelos é aproximadamente a mesma. Entretanto, cabe salientar que normalmente se considera que o metamodelo tem boa representatividade dentro de uma vizinhança bem estabelecida.

É necessário ressaltar que, sendo estas ferramentas de planejamento aplicadas a vários ramos do conhecimento, tais como processos mecânicos, sistemas biológicos, reações químicas, dentre outros, o conhecimento técnico do especialista é indispensável para sua formulação adequada, de forma a aliar conhecimentos da área específica com aqueles próprios da estatística.

Os planejamentos experimentais buscam utilizar técnicas estatísticas (Montgomery, 1991) a fim de se eliminar tempos, operações e custos de experimentos, buscando analisar e analisar os efeitos de todos os fatores sobre todas as propriedades de maior representatividade e importância em tal experimento. Isso significa que procura-se reunir o máximo de informação útil possível.

Antes de prosseguir, torna-se necessário recapitular alguns conceitos de estatística básica para que fiquem mais claros os objetivos a que se destinam neste trabalho. Durante

todo o desenvolvimento a seguir serão utilizados alguns conceitos, integrados à seguinte nomenclatura:

- A propriedade de interesse é denominada de resposta;
- As variáveis que influenciam na resposta são denominadas fatores;
- A função que descreve essa influência é denominada de superfície de resposta.

Durante o processo de avaliação de um dado sistema, é necessária a formulação do problema que o represente, sendo que este modelo pode ser determinístico ou empírico. Um modelo determinístico é um modelo no qual é conhecido o conjunto de regras e leis que caracterizam seu comportamento, ou seja, de posse dos dados iniciais ou dos fatores, é possível aplicar este conjunto de regras e obter o comportamento ou resposta futura do sistema. Por outro lado, existe o modelo empírico, que, ao contrário do modelo determinístico, não são conhecidos ou bem estabelecidos os conjuntos de regras a ele associados. Desta forma, estes modelos são construídos a partir de experimentos que buscam descrever o comportamento do processo estudado. Assim, este modelo somente pode ser avaliado na região experimental investigada e, por tal motivo, enquanto o modelo determinístico pode ser considerado como um modelo global, o modelo empírico é apenas um modelo local.

De acordo com Barros Neto *et al.* (1995), a atividade estatística de maior importância não é a da análise dos dados, mas sim o planejamento de experimentos. Um bom planejamento estatístico é assim considerado quando é capaz de fornecer as informações que são desejadas pelo experimentador. Entretanto, a construção de modelos não basta, sendo também necessário avaliar se os resultados são compatíveis com a situação que se deseja descrever. Em caso positivo, pode-se então extrair e utilizar informações provenientes deste modelo.

A obtenção de dados para análise estatística é feita através de uma série de procedimentos que são realizados de acordo com uma determinada ordem de execução. Os resultados obtidos possuem uma indeterminação acoplada, ou flutuações imprevisíveis, que ocorrem por mais que sejam indesejadas. Estas flutuações, que conhecemos como erros, irão influenciar a análise, e, se forem pequenas, podem ser aceitas, mas se forem elevadas, podem comprometer o processo. Se o erro é fruto de algum procedimento equivocado do experimentador, é denominado de erro sistemático, não sendo este o tipo de erro de que trata a estatística. Por outro lado, como já comentado, os erros são decorrentes de uma grande gama de fatores que variam ao acaso e, por isto, são denominados de erros aleatórios, sendo estes últimos os tratados pela estatística (Barros Neto *et al.*, 1995).

O conjunto total de ocorrências de um dado tipo de informação é conhecido como população. É sobre esta que se deseja inferir algo. Entretanto, em algumas situações isto pode tornar-se impossível. É utilizada uma parte do conjunto total, denominada amostra, que,

com algumas considerações, como intervalos de confiança, pode-se então generalizar estas respostas para toda a população, desde que se respeitem tais considerações. Nos casos determinísticos, não existe nenhum fator aleatório do modelo, já que todas as vezes em que se gerar o modelo por um dado processo, as respostas serão as mesmas. Neste caso, a amostra representa fielmente o processo.

Durante o processo de amostragem, deve-se garantir que a amostra não seja uma representação tendenciosa da população, garantindo de alguma maneira que a amostragem seja rigorosamente aleatória. É considerado como amostragem aleatória o processo em que cada membro da população tem a mesma probabilidade de ser escolhido.

Um conceito importante do qual derivam outros é o da média aritmética, fornecida pela Eq. (2.16).

$$\bar{x} = (1/N) \sum_{i=1}^N x_i \quad (2.16)$$

onde \bar{x} significa que a média considerada é a amostral, x_i é o i -ésimo valor da amostra e N é a quantidade de valores da amostra.

A variância pode ser obtida pela Eq. (2.17) e fornece uma dispersão quadrática de cada amostra em relação à média. Isto indica o quanto a média é significativa para o grupo. Note que a divisão é realizada por $(N-1)$ e não por (N) , pois assim desconsidera-se o erro sistemático ou *bias*, representado pela tendência inerente do sistema em algum processo.

$$V(x) = s^2 = [1/(N-1)] \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (2.17)$$

O desvio padrão s , que é obtido pela Eq. (2.18), é mais utilizado, pois é dimensionalmente mais coerente de ser utilizado, junto com a média, em um mesmo gráfico.

$$s = (V)^{1/2} \quad (2.18)$$

Existem outras características importantes que podem ser extraídas dos modelos, tais como: média quadrática, assimetria (*skewness*) e curtose (*kurtosis*), mas, como não são necessárias neste estudo, não serão aqui apresentadas.

A distribuição dos dados é definida como a função que descreve a probabilidade de ocorrência destes dados em um determinado evento. Esta distribuição pode ser conhecida de duas formas: ou pela Função Densidade de Probabilidades (FDP), ou pela sua integral, para determinar o intervalo analisado, sendo denominada como Função Distribuição de Probabilidade Acumulada (FDPA).

A função densidade pode assumir diversas formas, tais como: Discreta, Uniforme, Normal ou Gaussiana, Rayleigh, Maxwell, Ki-Quadrado, T de Student, Distribuição F , dentre outras. Todas são bastante conhecidas, mas a mais utilizada é a Distribuição Normal ou Gaussiana. Isto ocorre porque, de acordo com o Teorema do Limite Central, é possível afirmar que a soma de um grande número de distribuições de variáveis aleatoriamente independentes tende a convergir para uma distribuição normal (Barros Neto *et al.*, 1995).

Desta forma, a distribuição das variáveis utilizada neste trabalho é a normal. Nos casos onde se deseja fazer uma estimativa de dados, mesmo que grosseira, nas quais não se conhece a distribuição de probabilidades, pode-se aplicar o conceito da desigualdade de Chebyshev (Barros Neto *et al.*, 1995). Com este princípio é possível determinar os limites extremos da distribuição, quando esta não é conhecida.

A distribuição normal de probabilidade é descrita pela Eq. (2.19), onde $f(x)$ é a densidade de probabilidade da variável aleatória x , μ é a média populacional e σ^2 sua variância (Barros Neto *et al.*, 1995).

$$f(x)dx = [1/(2\pi)^{1/2} \sigma] e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (2.19)$$

É indicado por $x \approx N(\mu, \sigma^2)$ a distribuição normal de uma variável x com média μ e variância σ . A forma da função $f(x)$ de uma distribuição normal pode ser vista na Fig. 2.2.

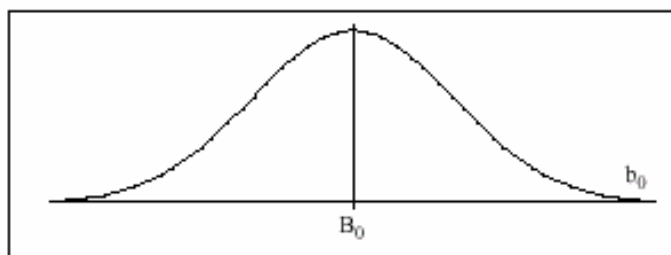


Figura 2.2 - Ilustração de uma distribuição normal.

A probabilidade $P(a < x < b)$ de que uma variável aleatória x seja encontrada em um intervalo $[a, b]$ de uma distribuição de densidade $f(x)$ é dada pela Eq. (2.20).

$$P(a < x < b) = \int_a^b f(x) dx \quad (2.20)$$

Para facilitar o cálculo das probabilidades é comum padronizá-la, criando a variável z , dada pela Eq. (2.21).

$$z = (x - \mu) / \sigma \quad (2.21)$$

Quando duas variáveis aleatórias x e y influenciam uma na outra, ou seja, há uma dependência entre elas, diz-se que estas possuem uma covariância $Cov(x,y)$. Esta covariância, obtida pela Eq. (2.22), é a tendência dos dados de se desviarem de forma mais ou menos conjunta em relação às respectivas médias.

$$Cov(x, y) = [1/(N-1)] \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (2.22)$$

O coeficiente de correlação é entendido como a covariância normalizada, já que a covariância pode tratar com variáveis de escalas diferentes. Desta forma, o coeficiente de correlação $r(x,y)$ está sempre no intervalo $[-1, 1]$ e pode ser calculado pela Eq. (2.23).

$$r(x, y) = [1/(N-1)] \sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x}) / s_x][(y_i - \bar{y}) / s_y] \quad (2.23)$$

Um fato importante é que o coeficiente de correlação mede a associação linear que ocorre entre duas variáveis. Desta forma, variáveis que são estatisticamente independentes possuem tal coeficiente nulo, mas não se pode dizer o contrário. Isto significa que, não havendo uma relação linear, nada se pode afirmar sobre a ocorrência de outros tipos de relação.

Um aspecto importante em otimização e que deve estar bem claro, é que a melhor função objetivo obtida, mínima ou máxima, não é resultado da busca ótima de cada fator independentemente. Isto porque, geralmente, uma variável influencia conjuntamente com outra na obtenção da função objetivo ideal. Este é o denominado efeito de interação.

Desta forma, o sistema a ser estudado pode ser compreendido como uma “caixa preta”, onde se tem os fatores de entrada do sistema e as respostas do mesmo, como pode ser verificado na Fig. 2.3. Assim, alguns casos podem ser considerados desta forma e o objetivo inicial é o de encontrar uma função de pequena complexidade de resolução que seja capaz de representar tal sistema.

Tanto os fatores quanto as respostas podem ser valores quantitativos a qualitativos. Contudo, ao analisar um experimento, é necessário ter-se em mente o tipo de resposta que se deseja analisar, pois, desta forma, serão avaliados os fatores que de fato influenciam na resposta de interesse.

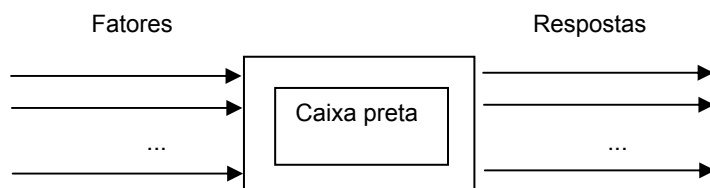


Figura 2.3 - Um sistema do tipo “caixa preta”.

Uma ferramenta importante na análise e planejamento de experimentos é o planejamento fatorial (Montgomery, 1991). Inicialmente, observa-se o experimento, na tentativa de compreender os fatores que podem influenciar nas respostas desejadas. Após o levantamento destas variáveis, aplica-se o Planejamento Fatorial Fracionário (Montgomery, 1991) para uma triagem das variáveis (fatores) que realmente influenciam no processo.

Um planejamento Fatorial Completo (Montgomery, 1991) é realizado em seguida para verificar a influência de cada fator, codificando-os de forma a normalizá-los entre $[-1,1]$, surgindo desta forma as matrizes necessárias para a obtenção do vetor B , que é o vetor que contém os coeficientes angulares da curva de regressão adotada para o modelo. É necessário especificar em primeiro lugar os níveis em que cada fator será estudado, sendo aí determinados os valores que serão adotados para os fatores. No planejamento fatorial completo são realizados experimentos para todas as possíveis combinações dos níveis dos fatores. De uma forma geral, se existirem n_1 níveis do primeiro fator, n_2 para o segundo fator, até n_k para o k ésimo, então o número mínimo de ensaios deve ser de $n_1 \times n_2 \times \dots \times n_k$ experimentos.

Se o sistema avaliado incorrer em experimentos que possam variar suas respostas para um mesmo conjunto de fatores de entrada, um maior número de experimentos deve ser realizado, e os valores das médias correspondentes é que devem ser considerados para manipulações posteriores.

Por conseguinte, o planejamento fatorial de 2 níveis é o mais simples, e este irá requerer $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ experimentos, onde k é o número de fatores.

A matriz de planejamento é montada a partir destas combinações e então são identificados os níveis superior e inferior para cada fator e o efeito de interação entre eles. As representações gráficas para dois e três fatores são válidas para facilitar a compreensão do sistema. De quatro fatores em diante este tipo de análise não é mais possível. As representações gráficas para dois e três fatores são ilustradas nas Figs. 2.4 a) e b).

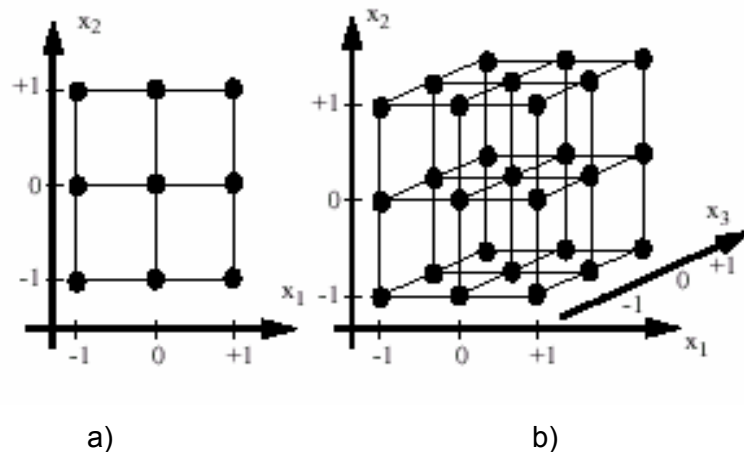


Figura 2.4 - Ilustrações gráficas para planejamentos fatoriais completos de dois e três fatores.

Para evitar erros, a ordem dos experimentos deve ser realizada aleatoriamente e não na seqüência apresentada pela tabela. Para a obtenção da estimativa conjunta da variância experimental, deve-se utilizar a Eq. (2.24), onde n_i é o número de vezes que um ensaio foi repetido, m é o número de ensaios diferentes, $v_i = n_i - 1$ o número de graus de liberdade (gdl) de s_i^2 , que é a estimativa da variância do i -ésimo ensaio.

$$s^2 = (v_1 s_1^2 + v_2 s_2^2 + \dots + v_m s_m^2) / (v_1 + v_2 + \dots + v_m) \quad (2.24)$$

Para uma pequena quantidade de fatores, é possível ao experimentador compreender o efeito de cada um, mas, quando este número aumenta, uma análise direta não se torna tão evidente. Para o cálculo destes efeitos, existe um procedimento que pode ser feito para qualquer número de fatores. Uma matriz X , denominada de tabela de coeficientes de contraste, pode ser construída a partir dos fatores, como mostra a Eq. (2.25).

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{1-} & x_{2-} & \dots & x_n \\ 1 & x_{1+} & x_{2-} & \dots & x_n \\ 1 & x_{1-} & x_{2+} & \dots & x_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{1+} & x_{2+} & \dots & x_n \end{bmatrix} \text{ matriz } (m, n+1) \quad (2.25)$$

onde m é o número de experimentos e n é o número de coeficientes angulares da curva de regressão adotada.

Multiplicando a matriz transposta X^t por y , que é o vetor contendo as respostas dos experimentos, pode-se obter, após dividir o primeiro elemento por n e os demais por 2

(porque estão normalizados entre -1 e $+1$), o vetor contendo o efeito de cada fator, ou seja, a interação de fatores.

Um recurso bastante útil é utilizar os valores dos efeitos para exibir um gráfico onde estes podem ser linearmente acomodados no eixo das abscissas. No eixo das ordenadas podem ser colocadas as probabilidades acumuladas correspondentes ao experimento, em escala logarítmica.

Ao passar o eixo das ordenadas para uma escala logarítmica, será observado que os pontos centrais do gráfico se ajustam muito bem à reta cuja interseção com a probabilidade acumulada de 50% ocorre próximo à origem das abscissas, não tendo estes efeitos nenhum significado físico, podendo, portanto, ser descartados.

Os efeitos mais significativos ao sistema são caracterizados quanto mais afastados estiverem da reta acima mencionada.

Uma característica importante é a operação evolucionária, aplicada quando uma condição favorável é encontrada em um planejamento fatorial. Deve-se realizá-la novamente, modificando os intervalos dos fatores, de forma a tornar o ponto favorável anterior como o centro do novo planejamento fatorial factível, respeitando as restrições laterais de cada fator e com a situação favorável no centro. Este processo, obviamente, é uma forma de tornar ótimo um experimento.

Para criar um modelo, é necessário antes lembrar que o mesmo pode ser realizado de várias formas. Seu nível de complexidade é determinado pelo quanto se pode incorrer em erros ao adotá-lo.

Desta forma, pode-se criar um modelo de regressão do sistema sintetizado por uma equação polinomial como a Eq. (2.26), onde Y é a resposta de interesse, X são os fatores avaliados, B são os parâmetros do modelo e ε é o erro aleatório associado ao fator. Neste caso, para determinação da curva, pode-se utilizar o ajuste por mínimos quadrados, sendo que ε é o valor da distância do valor obtido pelo experimento do valor obtido pela curva de regressão.

$$Y = BX + \varepsilon \tag{2.26}$$

A Eq. (2.27) é muito importante, pois ela permite a obtenção dos coeficientes angulares ou parâmetros do modelo da curva de regressão, utilizando o método dos mínimos quadrados. Nela, X é a tabela de coeficientes de contraste e Y é a matriz de resposta do sistema.

$$B = (X^t X)^{-1} \cdot X^t Y \quad (2.27)$$

Antes de aceitar um modelo como satisfatório, é necessário o exame dos resíduos, pois assim verifica-se se o modelo é bom (resíduos são pequenos) ou ruim (resíduos importantes).

Uma ferramenta útil durante o processo de avaliação é a ANOVA (*Analysis of Variance*) (Montgomery, 1991), que faz uma análise de variância para os ajustes de um modelo. Basicamente, o desempenho de um modelo é avaliado pela análise dos desvios das observações em relação à média global. Estes desvios possuem basicamente duas fontes de variação, sendo uma devida à regressão e a outra devida aos resíduos. A Tab. 2.1 ilustra uma ANOVA.

Tabela 2.1 - Ilustração da forma e como obter uma ANOVA simplificada.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Nº de gdl	Média Quadrática
Regressão	$\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2$	1	$MQ_R = SQ_R$
Resíduos	$\sum (y_i - \hat{y}_i)^2$	n-2	$MQ_r = SQ_r / (n-2) = s^2$
Total	$\sum (y_i - \bar{y})^2$	n-1	

onde n é o número de observações, s corresponde ao desvio padrão, MQ é a média quadrática SQ é a soma quadrática equivalente a cada termo, \hat{y}_i é o valor estimado pelo modelo para o i -ésimo ponto, \bar{y} é a média global, enquanto y_i é o valor real do i -ésimo ponto.

Portanto, da Tab. 2.1 é possível compreender que o termo de variação devido à regressão representa o afastamento da previsão do modelo para o ponto em questão \hat{y}_i , em relação à média global \bar{y} . A variação quanto aos resíduos significa a diferença entre o valor observado e o valor previsto, significando que, num modelo bem ajustado, este valor é pequeno. Assim, uma parcela da variação dos resultados observados em relação à média é devido à equação de regressão, enquanto que uma outra parcela restante é devida aos resíduos. Quanto maior for a parcela devida à regressão, melhor será o ajuste do modelo.

Se o experimento ou ensaio possuir uma repetição para cada arranjo experimental, a ANOVA adquire novas fontes de variação, conforme ilustra a Tab. 2.2, que representa a ANOVA completa. Assim, é possível obter estimativas sobre o erro aleatório, verificando se o modelo é completo o suficiente, ou se é necessário acrescentar novos termos.

Tabela 2.2 - Ilustração da ANOVA completa.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Nº de gdl	Média Quadrática
Regressão	$SQ_R = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (\hat{y}_i - \bar{y})^2$	$p - 1$	$MQ_R = SQ_R / (p - 1)$
Resíduos	$SQ_r = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (y_i - \hat{y}_i)^2$	$n - p$	$MQ_r = SQ_r / (n - p)$
Falta de Ajuste	$SQ_{faj} = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2$	$m - p$	$MQ_{faj} = SQ_{faj} / (m - p)$
Erro Puro	$SQ_{fep} = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2$	$n - m$	$MQ_{ep} = SQ_{ep} / (n - m)$
Total	$SQ_T = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (y_{ij} - \bar{y})^2$	$n - 1$	

onde n_i representa o número de repetições no nível i ; m representa o número de níveis distintos; n é o número total de observações e p é o número de parâmetros do modelo.

A metodologia das superfícies de resposta é uma técnica introduzida por G.E.P. Box na década de 1950, constituindo-se numa técnica de otimização baseada no emprego de planejamentos fatoriais (Barros Neto *et al.*, 1995). Ela é composta por duas etapas bem distintas: modelagem e deslocamento. Estas duas são repetidas constantemente até se atingir a região ótima da superfície em estudo. A fase de modelagem baseia-se no ajuste de suposições de modelos de diferentes ordens a resultados obtidos pelos planejamentos fatoriais. Da mesma forma, os deslocamentos são realizados nos caminhos de máxima inclinação do modelo, obtendo assim a trajetória na qual a resposta varia mais pronunciadamente.

Obviamente, prefere-se utilizar os modelos mais simples, desde que respeitem as condições de representatividade da curva neste intervalo. O planejamento fatorial é realizado num número maior de níveis para que se possa ter um bom ajuste do modelo. Os modelos mais utilizados são o planejamento fatorial com ponto central e o planejamento em estrela. A escolha de cada um vai depender da quantidade mínima de pontos para aquele tipo de

modelo. Como não é possível determinar as estimativas quando há mais parâmetros do que níveis, o planejamento então deve ser ampliado (Barros Neto *et al.*, 1995).

Para se verificar a tolerância a erros dos parâmetros encontrados no modelo, utiliza-se a Eq. (2.28) para obter uma estimativa da variância dos elementos do vetor b . As raízes de cada elemento desta equação é que vão retornar os valores dos erros padrão de cada elemento. Estes são de grande importância para tomar a decisão sobre adotar ou não tal modelo.

$$V(b) = (X^t X)^{-1} \cdot s^2 \quad (2.28)$$

onde s^2 é uma estimativa da variância das observações. A partir deste passo é então levantada a ANOVA para o modelo e, se os valores obtidos pelo resíduo não forem significativos, então se adota ou se despreza o modelo. Desta forma, pode-se então construir por meios gráficos as superfícies de resposta dos modelos, traçando as curvas de mesma intensidade de resposta em relação aos parâmetros. Com base nestas curvas, é decidido qual o caminho de máxima inclinação do modelo, para que seja realizado o deslocamento. Após a realização do deslocamento, deve-se determinar o novo modelo para esta nova região da superfície de resposta. Nem sempre o melhor modelo é da mesma ordem do modelo usado no domínio anterior. Para tanto, todo o processo realizado anteriormente deve ser repetido novamente e assim continuamente, até que se chegue às restrições laterais investigadas ou até que se encontre o máximo da superfície de resposta. Neste sentido, buscar-se-á então encontrar, por algum critério de otimização, a solução ótima dentro deste domínio, determinando o ponto ótimo (máximo ou mínimo) da superfície de resposta. Para facilitar a compreensão, na Fig. 2.5 encontra-se uma superfície de resposta para um modelo hipotético de dois fatores x_1 e x_2 para uma dada resposta.

É importante salientar que, como ocorria no planejamento fatorial, aqui também somente tem sentido a representação da superfície de resposta de um modelo com todos os fatores em um mesmo gráfico, quando este modelo possui apenas um ou dois fatores. Para mais de dois fatores, a superfície de resposta é ilustrada em vários gráficos bidimensionais, ilustrando cada fator com a resposta correspondente.

Os métodos de Taguchi (Fiod Neto, 1997) pertencem a uma classe de modelos que têm por finalidade garantir qualidade através do projeto, identificando e controlando as variáveis críticas, denominadas pela técnica como ruídos e que são as causadoras de desvios na qualidade do processo e/ou produto. Alguns conceitos importantes encontrados em Montgomery (1991), dizem que a minimização do número de experimentos está

relacionada à quantidade de esforço despendido (ou custo do experimento), enquanto que a minimização da variância de coeficientes diz respeito à qualidade do produto e/ou processo.

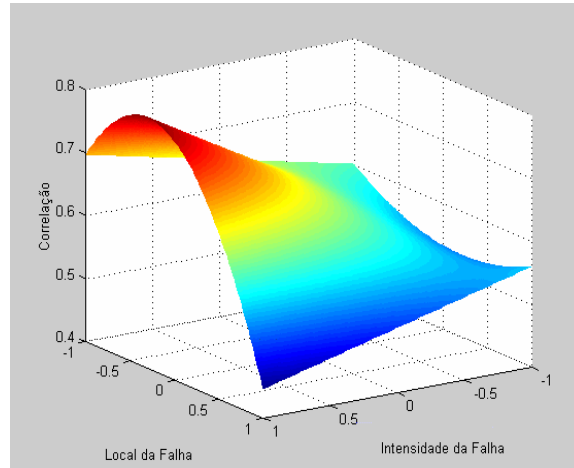


Figura 2.5 - Exemplo de uma superfície de resposta hipotética.

Observando de uma forma abrangente, os métodos de Taguchi representam uma nova filosofia para o controle de qualidade e diminuição de custos, ou seja, a qualidade é mensurada pelo desvio que uma característica funcional apresenta em relação ao valor estabelecido. Ruídos, como fatores ambientais, causam tais desvios e provocam a perda da qualidade. Na função perda de Taguchi, em lugar de remover os ruídos, o que pode ser impossível ou de custo elevado, são removidas as condições responsáveis pelos ruídos mais significativos.

O projeto por tolerância é aplicado após a definição dos parâmetros e busca aperfeiçoar a qualidade a um custo mínimo. Com a redução das tolerâncias dos parâmetros do produto ou processo, a variância no desempenho diminui, e a proposta de Taguchi é realizar isto sem necessariamente utilizar materiais, componentes ou processos de alto custo no produto (Fiod Neto, 1997).

Um produto ou processo considerado robusto e menos sensível às perturbações que ocorrem no ambiente ou na utilização do produto, denominados de ruídos externo e interno, são tanto mais robustos quanto mais se exerce o controle de qualidade fora de linha, ou seja, nos esforços aplicados à qualidade do projeto. Assim, busca-se melhorar a qualidade sem controlar nem eliminar as causas da variação, determinando-se apenas as tolerâncias em torno do valor nominal selecionado (Fiod Neto, 1997).

O ruído externo decorre tanto das condições quanto do ambiente de produção. O ruído interno está diretamente relacionado às próprias características do produto, e busca

estabelecer os níveis dos fatores que têm influência no valor de saída do sistema (Fiod Neto, 1997).

Para contornar a dificuldade do uso da função perda no processo produtivo, Taguchi elabora uma metodologia alternativa, criando a relação sinal-ruído, S/N . Esta relação busca observar simultaneamente duas características importantes e distintas de uma distribuição estatística de dados, ou seja, a média e a variância, agrupando-as em um único valor, para medir o desempenho do produto ou processo. Das várias relações descritas por Taguchi, a utilizada neste trabalho será a situação configurada pela expressão “quanto-maior-melhor”, conforme é descrita pela Eq. 2.29 (Fiod Neto, 1997).

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (2.29)$$

onde os valores de y_i indicam os valores de desempenho amostrados da função.

Desta forma, no projeto de parâmetros, Taguchi (1993) insere a denominada matriz de ruídos externos, na qual simula a utilização forçada de fatores de ruído. Isto quer dizer que, se é aplicado o arranjo externo, a variação no experimento devida ao ruído é estimulada. Assim, a relação S/N concentra em um único valor os efeitos das replicações ou repetições dos ensaios e o efeito dos níveis de ruído. Deve-se escolher a combinação de fatores e níveis que maximizam a relação sinal-ruído, porque esta será a condição de melhor desempenho do processo, tendo a menor variância (Fiod Neto, 1997).

Para concluir estas considerações básicas sobre estes métodos, enquanto a estatística tradicional analisa a média e a variância separadamente (com testes de hipóteses, análise de variância, teoria da regressão e correlação para a avaliação de desempenho funcional de algum produto ou processo), Taguchi propõe a análise da combinação dos dois fatores através de uma transformação logarítmica que é dada pela relação sinal-ruído.

2.4 Redes Neurais Artificiais

As redes neurais, até o início da década de 1980 (Kovács, 1996), somente eram aplicadas em situações acadêmicas e educacionais, salvas raríssimas exceções. A partir da década de 1980, iniciaram-se pequenas aplicações industriais, mas ainda em casos isolados (Masters, 1993). Somente a partir da década de 1990 (Masters, 1993), com a criação e difusão de novas técnicas, é que se observam aplicações industriais variadas.

No mercado financeiro, elas vêm sendo utilizadas para estimativas de riscos, marketing, vendas futuras, indicadores econômicos e detecção de fraudes. Na medicina, são utilizadas

no auxílio ao diagnóstico e análises comportamentais do sistema biológico, acoplada com técnicas de sistemas dinâmicos ou caóticos.

Mas nenhum outro campo pode ter utilizado tanto as redes neurais quanto as ciências exatas. Em vários ramos têm-se encontrado aplicações, como na astronomia (com a construção de telescópios inteligentes), processamento digital de imagens e sinais (reconhecimento de padrões, reconhecimento de caracteres (Lecun *et al*, 1990), impressão digital, reconhecimento de voz (Cimarusti e Ives, 1982) e (Yuhas, 1997)), estudos de genes e moléculas. Na matemática e na física, assim como na biologia, existe uma série de facilidades hoje que somente foram possíveis graças ao uso das redes neurais.

Na engenharia, já foram implementadas ferramentas que auxiliam em determinados casos: na classificação de tipos de dados, memórias associativas e reconhecimento de padrões. Um grande destaque fica para os casos em que são usadas na automação de máquinas tradicionais, como motores e bombas elétricas. Nas telecomunicações (Yuhas, 1997), já se encontram referências sobre roteamentos em problemas de tráfego telefônico desde 1965 (Benes, 1965). Em situações de roteamento de transportes logísticos, encontra-se o tradicional problema do caixeiro viajante, para o qual já foram propostos vários modelos de resolução similares a este.

O Sistema Nervoso é composto pelo encéfalo, nervos e medula, os quais estabelecem ligações entre as partes centrais (encéfalo e medula) e demais partes do corpo, conforme mostrado na Fig. 2.6.

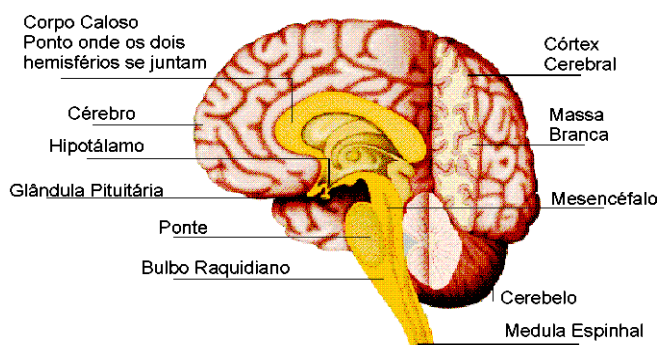


Figura 2.6 - O cérebro humano (Tafner, 2002).

O encéfalo e a medula são designados Sistema Nervoso Central (SNC). Esse sistema recebe informações dos vários órgãos dos sentidos (receptores) através dos nervos denominados sensitivos ou aferentes (Tafner, 2002). Os nervos que enviam informações do sistema nervoso para os músculos e glândulas (efetoras) chamam-se motores ou eferentes. Certos nervos e centros nervosos situados no encéfalo e na medula, por funcionarem de maneira involuntária (inconsciente) são designados em conjunto por Sistema Nervoso

Autônomo (SNA). Controla a atividade das glândulas, dos músculos lisos e do coração (Guyton, 1989).

O Sistema Nervoso Autônomo é constituído por duas partes, denominadas Sistema Simpático e Sistema Parassimpático, que exercem ação antagônica nos órgãos que ambos enervam.

O tecido nervoso se origina do ectoderma do embrião, e nele encontram-se basicamente dois tipos de células, os neurônios e as neuróglia ou glia. Estas desempenham a função de preenchimento e sustentação, são bem menores, mas bem mais numerosas que os neurônios.

O neurônio foi identificado e descrito anatomicamente com detalhes por Ramón y Cajal no século 19 (Guyton, 1989). Os neurônios sofreram seu mais alto grau de diferenciação e, portanto não tem mais a capacidade de reprodução, pois são células permanentes, e de difícil regeneração.

No fim da célula, as entradas tem um número de processos finos chamados dendritos (Guyton, 1989) estes tem este nome derivado de dendros (do grego 'árvore'), o corpo celular é referido como Soma, e pode ser visto na Fig. 2.7.

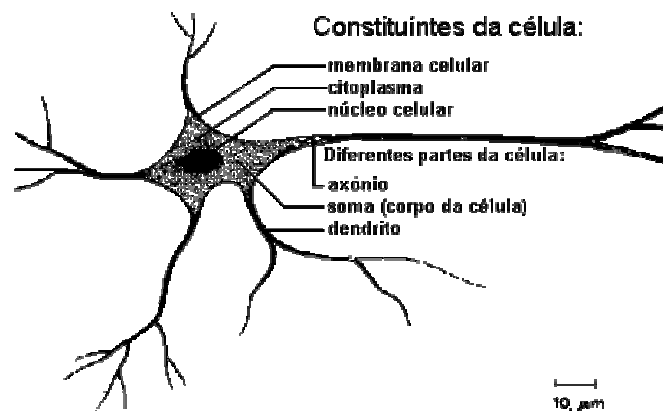


Figura 2.7 - Exemplo de um neurônio biológico (N.C., 2000).

O axônio (axon do grego 'eixo') é a linha transmissora do neurônio. Ele pode atingir até metros de comprimento. Na grande maioria dos vertebrados ele vem envolto a uma capa de um lipídio denominado mielina envolvendo três camadas sobrepostas: bainha de mielina, bainha de Schwann e bainha conjuntiva (Soares, 1992). Esta acelera a transmissão dos dados pelo axônio que, sem a mielina, teria uma velocidade apenas de alguns centímetros por segundo; com ela chega a ser de 150 metros por segundo, reduzindo perdas, semelhantemente aos fios de cobre para transmissão de energia elétrica.

Nos terminais dos axônios são verificadas estruturas complexas (Guyton, 1989), altamente especializadas chamadas sinapses.

De uma forma geral, o panorama é o seguinte: dendritos recebem entradas de outras, o soma e os processos dendríticos e integram as entradas; então a transmissão da informação é feita ao longo dos axônios até as sinapses onde sua saída serve de entrada para outros neurônios ou para órgãos efetivos.

O núcleo e os mecanismos ao redor têm a função de enviar nutrientes, enzimas, e material construtivo pelo axônio até o restante da célula.

Na década de 1940, Paul Weiss demonstrou o Fluxo Axoplásmico por uma constrição simples do axônio e mostrando que ele inchou do lado do núcleo na constrição (Guyton, 1989). O fluxo contrário de materiais de volta ao núcleo também ocorre. Este mecanismo de transporte intracelular pode ter diferentes velocidades e características.

Como toda célula animal, o neurônio é revestido com uma membrana fina com importantes propriedades, onde a principal função é a de separar o material interno do externo. Esta membrana é basicamente composta de lipídios e proteínas, e tem de 60 a 70 Å de espessura. As proteínas flutuam em um verdadeiro “mar” de lipídios.

As proteínas podem estar do lado de dentro ou fora da membrana ou passar através dela. As mudanças de posição das proteínas ou fluxos de íons são reguladas por controle químico ou elétrico. Este mecanismo de condução iônica variável forma a base das propriedades elétricas dos neurônios.

Um neurônio emite um fluxo de informações para outros através de sinapses. Existem dois tipos distintos de sinapse, a elétrica e a química (Guyton, 1989). Sinapses elétricas são mais comuns em invertebrados, enquanto que sinapses químicas ocorrem nos vertebrados superiores. Na sinapse química, o neurônio secreta uma substância química denominada neurotransmissor, a qual age sobre todas as proteínas receptoras na membrana do neurônio seguinte, de forma a inibi-lo, excitá-lo ou modificar sua sensibilidade. Hoje já foram identificadas mais de 30 substâncias diferentes. Na sinapse elétrica, existem canais diretos que conduzem a eletricidade de uma célula para a próxima. Na sinapse química ocorre um evento que a torna desejável, qual seja a condução unidirecional (nas sinapses elétricas os sinais podem correr em ambas direções), onde os sinais são transmitidos em uma só direção (do neurônio pré-sináptico, do que secreta, para o neurônio pós-sináptico, no qual o transmissor age), podendo assim o neurônio ser aplicado para fins específicos.

Existem cerca de 6000 pequenos botões, os terminais pré-sinápticos, que podem ir de alguns até a mais de cem mil na superfície dos dendritos que são cerca de 80 a 90% e no Soma (10 a 20%) (Guyton, 1989). Estes são as extremidades de fibrilas nervosas de outros neurônios, mas apenas alguns derivam de neurônios anteriores.

Os Terminais Pré-Sinápticos mostrados na Fig. 2.8 (Guyton, 1989) são separados do soma neuronal por uma distância chamada de fenda sináptica, de 200 a 300 Å. Neles existem

duas estruturas importantes para as forças inibitórias ou excitatórias da sinapse: mitocôndria e as vesículas sinápticas (que contém substâncias transmissoras) que, ao serem liberadas, inibem ou excitam o neurônio. As mitocôndrias fornecem o trifosfato de adenosina (ATP) necessário à síntese de substâncias transmissoras.

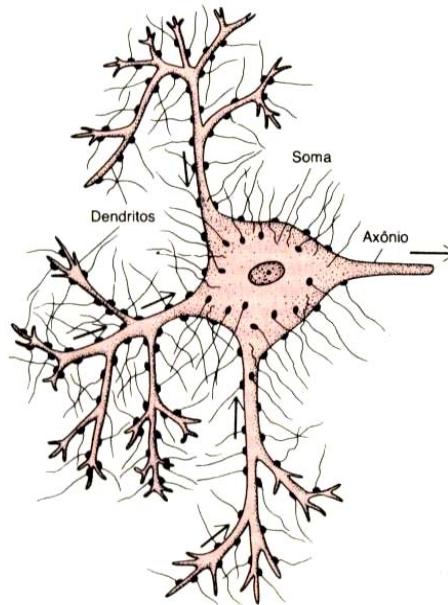


Figura 2.8 - Neurônio típico mostrando terminais pré-sinápticos no soma neuronal e nos dendritos. Observe também o axônio único (Guyton, 1989).

A quantidade armazenada nas vesículas é suficiente apenas na atividade máxima, para duração de alguns segundos a alguns minutos.

Nos Terminais Pré-Sinápticos existe uma grande quantidade de Canais de Cálcio volt-dependentes, o que não ocorre em outras áreas da fibra nervosa, que contém pequena quantidade.

Quando o terminal é despolarizado pelo potencial de ação, uma grande quantidade de íons cálcio em conjunto aos íons sódio que causam o potencial de ação fluem para o interior do terminal. Quando da penetração dos íons de cálcio no terminal, estes se ligam a receptores protéicos na superfície interna da membrana, chamadas locais de liberação. Com isso, as vesículas transmissoras próximas se fixam e fundem à membrana, abrindo ao exterior pelo processo denominado exocitose mostrada na Fig. 2.9.

Do outro lado, na membrana do neurônio Pós-Sináptico (Guyton, 1989), existe um grande número de proteínas receptoras. Elas contêm dois componentes: um componente de Fixação (se fixa ao neurotransmissor do terminal Pré-Sináptico) e um componente Ionofórico (que se inicia da membrana, para o interior do neurônio Pós-Sináptico). Este último pode ser

de dois tipos: um Canal Iônico Quimicamente Ativado ou uma enzima que ativa um Sistema Metabólico Interno da Célula.

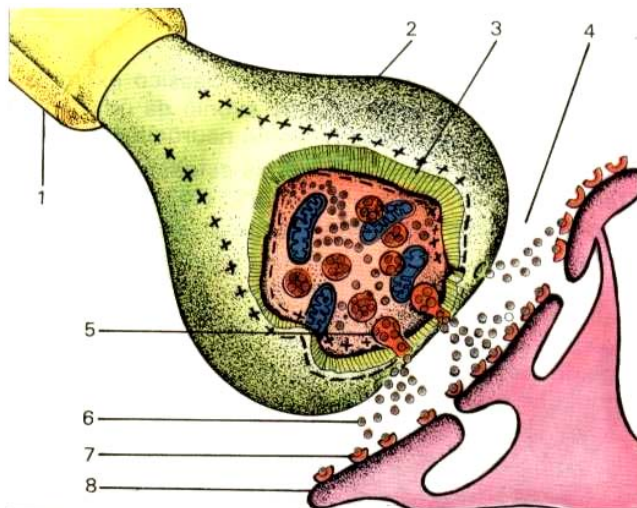


Figura 2.9 - Estrutura da sinapse nervosa. 1. Bainha de mielina; 2. Botão terminal do axônio; 3. Membrana do axônio (mostrando inversão da polaridade); 4. Espaço intra-sináptico; 5. Vesículas com o mediador químico; 6. Mediador químico livre no espaço intra-sináptico; 7. Receptores moleculares pós-sinápticos (já combinados com o mediador químico); 8. Membrana pós-sináptica (Soares, 1992).

Os canais iônicos, no geral, são de três tipos: Canais de Sódio, Canais de Potássio ou Canais de Cloro e seus nomes decorrem dos tipos de íons cuja passagem é permitida. De acordo com a substância transmissora, os efeitos poderão ser de ativar ou inibir o neurônio, ou ainda outras, como a possibilidade de ativar os genes celulares para produzirem outros receptores para a membrana Pós-Sináptica, ou ativar as Quinases Protéicas que diminuem o número de receptores.

A abertura dos canais de sódio excitam o neurônio Pós-Sináptico através de uma substância transmissora denominada transmissor excitatório. A abertura de canais de potássio e de cloro inibe o neurônio (transmissores inibitórios).

No axônio, a concentração de íon de Sódio (Na^+) é 10 vezes maior do lado de fora da célula do que dentro dela. O íon de Potássio (K^+) é igualmente desbalanceado, mas sua concentração é maior dentro da célula. O mecanismo chamado de Bomba Sódio-Potássio expulsa Na^+ e concentra K^+ na célula.

O impulso nervoso, que também é conhecido como potencial de ação, é uma onda gerada no soma que se propaga através do axônio, usando da Bomba Sódio-Potássio na sua membrana. Trata-se de uma onda de despolarização de algumas centenas de microssegundos a um mili-ssegundo. Este potencial de ação ocorre quando a despolarização da

membrana for acima de um valor conhecido como limiar de disparo, que pode ser visualizado na Fig. 2.10. Após isto a membrana é despolarizada em alguns micro-segundos e então tem-se o período de refração absoluta; período de refração relativa; valor normal.

No Soma tem-se a chegada de vários estímulos, sendo inibitórios ou excitatórios, em determinadas freqüências de chegada. Estes então sofrerão uma integração temporal-espacial determinando o que ocorrerá no neurônio.

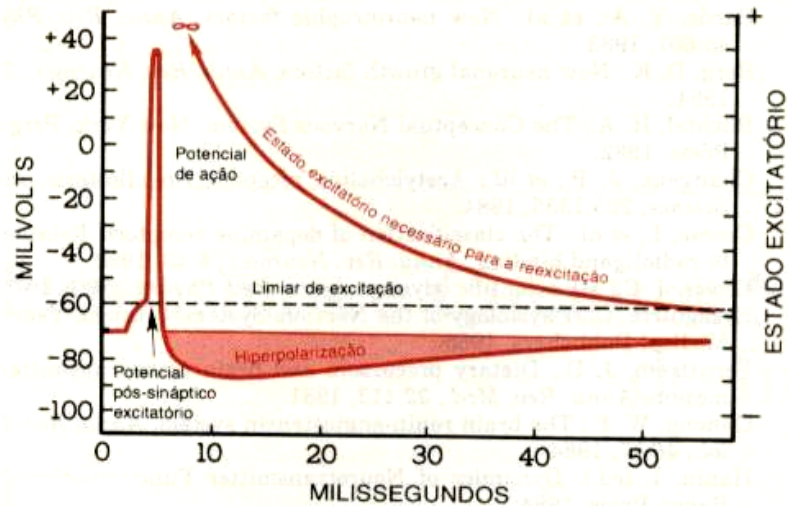


Figura 2.10 - Potencial neuronal seguido por prolongado período de hiperpolarização neuronal (Guyton, 1989).

Assim como o próprio nome já revela, Redes Neurais Artificiais (RNAs) são baseadas nos mesmos princípios de uma rede neural biológica (Fröhlich, 2000) e (Oliveira, 2000), mas com grandes restrições (não podem sequer ser comparadas efetivamente devido à sua capacidade de processamento ser bem mais limitada que a biológica) (Kovács, 1996). Parecem ser muito simples estes modelos neuronais, mas têm mostrado grande capacidade de aplicações, tais como no reconhecimento de imagens, predição de eventos, redução ou cancelamento de ruídos, e outros mais que serão vistos mais a frente. Na verdade, o que estes modelos representam nada mais é do que imitar o comportamento do cérebro humano, interpretando de forma intuitiva os conhecimentos pré-concebidos. Daí a criação da expressão “Técnicas de Inteligência Artificial” (TIA), das quais as RNAs fazem parte e que, em conjunto com outras duas, a Lógica Fuzzy e os Algoritmos Genéticos, são bastante conhecidas atualmente na comunidade científica.

Numa forma mais simples de interpretação das RNAs, pode-se dizer que um neurônio ou nó pode receber vários sinais de entrada e processá-los através das variáveis peso e através de uma função que pode ser uma soma, e enviar somente um sinal de saída através de uma dada função de transferência, como mostra a Fig. 2.11. Isto foi denotado a apenas

um neurônio, sendo que as RNAs são conjuntos de diversos neurônios que, atuando em uma rede, podem explorar várias hipóteses simultaneamente. Assim, são adquiridos vários sinais de entrada por vários neurônios (Masters, 1993), sendo emitida uma única (ou várias) resposta(s), conforme o caso. Pode-se alterar vários neurônios ao mesmo tempo, aplicar comportamentos randômicos, tempos de espera (função de transferência), ou seja, adotar uma infinidade de funções de ativação. Assim, percebe-se que uma RNA não é uma estrutura rígida, e que é um modelo de realização de operações distribuídas ao longo de processadores bastante simples (Kovács, 1996). Devido a esta praticidade operacional, as redes neurais podem ser utilizadas em várias aplicações.

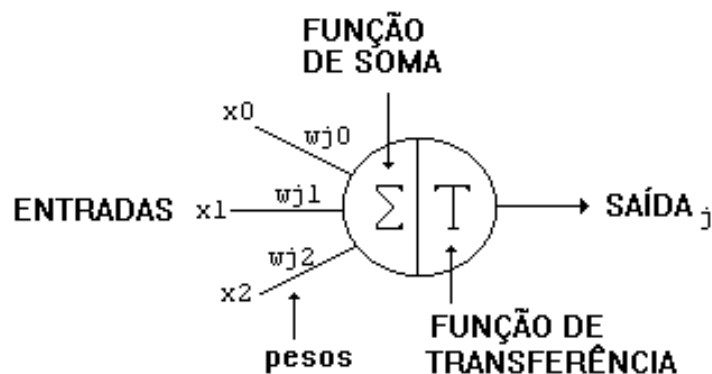


Figura 2.11 - Exemplo de um neurônio artificial (Tafner, 2002).

As formas de implementação desta técnica são bastante variadas e complexas, dependendo da topologia de redes, nós característicos e regras de treinamento ou aprendizado. As conexões entre os neurônios podem ser organizadas em camadas, conforme a Fig. 2.12, similares às sinapses nos neurônios biológicos, nas quais existe o fluxo de informações em um único sentido ou em ciclos padronizados (Anderson, 1995).

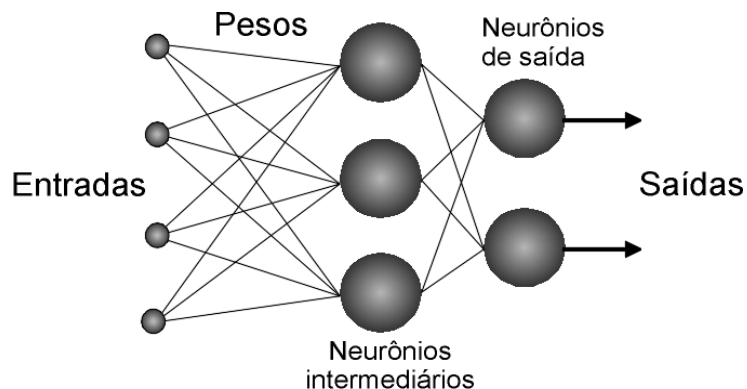


Figura 2.12 - Modelo de RNAs multicamadas (Tafner, 2002).

Mas nem tudo é vantajoso nas RNAs, já que existe uma grande variedade de técnicas e modelos, sendo necessário um amplo estudo antes de definir a melhor configuração para uma dada aplicação. Existem casos em que sua utilização não é viável por exigir memórias e processadores de grande capacidade (Anderson, 1995) e (Kovács, 1996).

Por outro lado, existe uma série de razões que justificam a utilização das RNAs: podem ser construídas de processadores e *hardware* relativamente simples e rápidos, o que não poderia ser implementado em outras técnicas; o próprio nome já promove a idéia, já que seres humanos ficam maravilhados com algo que se assemelha a si mesmos, e que se usem termos como robôs, inteligência artificial, redes neurais, etc; além de dispor de uma imensa gama de técnicas e modelos.

Em 1943 surge a idéia de neurônio artificial, quando o médico McCulloch e o estatístico Pitts (Kovács, 1996) apresentaram o neurônio como um dispositivo binário. O Discriminador Linear, como foi chamado por eles, era um dispositivo no qual se fazia uma soma ponderada de entradas, positivas e negativas, onde, a partir de um dado limiar (valor teto de entrada, ou seja, saturação) estabelecido, este responderia com pulso e não pulso. Este primeiro modelo foi aplicado pelos autores em circuitos elétricos da época, onde o pulso de corrente significava 1 e um não pulso significava 0.

Com estas idéias básicas os dois pesquisadores estabeleceram a ligação entre a inteligência e a atividade nervosa, de uma forma científica. A inteligência pode ser implementada a partir disto, por funções booleanas. A partir de então seria possível classificar padrões e separar aglomerados, mas em contrapartida, eles demonstraram certa ingenuidade ao pensar que poderiam modelar o sistema nervoso usando um número limitado de neurônios.

O Perceptron foi o primeiro modelo de RNAs, causando um grande impacto na comunidade científica, mostrando um real aprendizado de máquina. Muitos modelos complexos foram feitos baseados em extensões do Perceptron. Tal modelo foi desenvolvido pelo fisiologista Frank Rosenblatt, em 1958, na Universidade de Cornell (Kovács, 1996).

O elemento básico é um dispositivo chamado "Unidade Lógica *Threshold*" (Threshold Logic Unit-TLU). Ele tem n entradas, com seus respectivos pesos w_i . Assim o TLU faz uma soma de várias entradas multiplicadas por seus respectivos pesos. A seguir, têm-se as regras do neurônio não linear para o conjunto de elementos mostrado na Fig. 2.13, onde x é o vetor padrão de entrada e θ é o número do *threshold*, que é a função de transferência do neurônio.

$$\text{Saída do TLU} = +1 \quad \text{se} \quad \sum w_i x_i > \theta,$$

$$\text{Saída do TLU} = -1 \quad \text{se} \quad \sum w_i x_i \leq \theta.$$

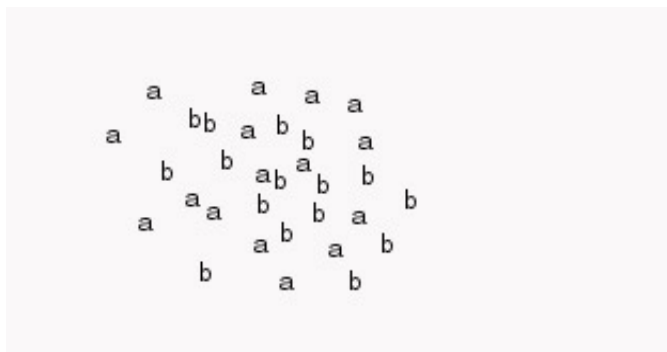


Figura 2.13 - Conjunto separável não-linearmente.

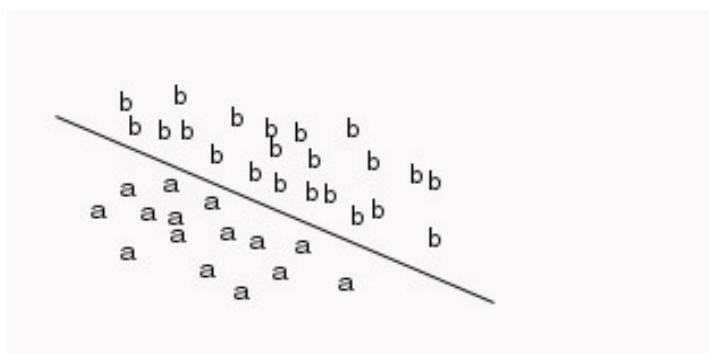


Figura 2.14 - Conjunto separável linearmente.

O Perceptron aprende conceitos respondendo a vetores de entrada, baseando-se em treinamentos (vários exemplos) realizados através dele. O treinamento é feito apresentando vetores e calibrando-se os valores dos pesos e das inclinações até os valores desejados, podendo ser usado para separação de conjuntos como na Fig. 2.14. O nome dado à passagem completa de um vetor é chamado de época. Quando um vetor é passado com erro tolerável, está concluído o treinamento.

Como limitação, pode-se citar o fato de sua resposta ser somente Verdadeiro ou Falso. Um problema apresentado por Minsky e Papert em 1969 (Kovács, 1996), fase esta que trouxe uma era de trevas ao estudo das redes neurais até o início de 1980 com Hopfield (Kovács, 1996). Este se tornou clássico que seria a não possibilidade de implementação do OR (ou) Exclusivo (Fig. 2.15) com um Perceptron, pois se um vetor não for linearmente separável, este então não poderá classificá-lo da forma devida.

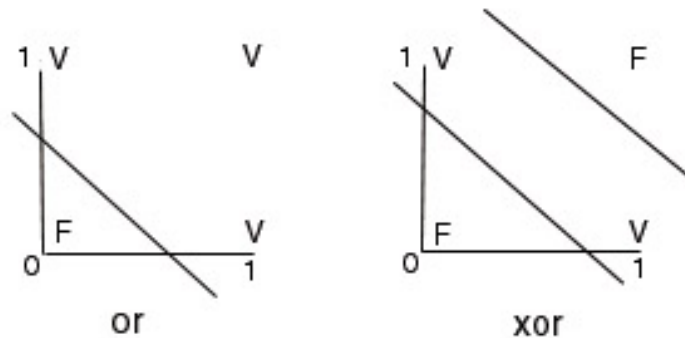


Figura 2.15 - Funções booleanas de duas variáveis (V-Verdadeiro, F-falso).

Estas e outras limitações foram superadas com o desenvolvimento das técnicas de treinamento Perceptron de Multicamadas (uma rede formada por vários perceptrons unitários formando redes com várias camadas).

Com a implementação de vários perceptrons em uma rede, pode-se perceber várias camadas, sendo estas denominadas respectivamente, no sentido da entrada para a saída: camada de entrada (são os primeiros neurônios de aquisição, ou a primeira fila), camadas ocultas (são as camadas intermediárias) e a camada de saída que é (são) o(s) neurônio(s) responsável(eis) pela resposta da rede.

O mais popular algoritmo de treinamento para RNAs é conhecido como *Backpropagation*. Apesar de ser confundido às vezes como um modelo de redes, é importante salientar que se trata somente de um método de treinamento de redes. Ele é usado em Redes Perceptron Multicamadas e em cerca de 70% dos casos reais. São várias as suas formas, mas a mais utilizada é uma versão simples, popularizada por Rumelhart, Hinton e Williams em 1986, ao resolver a limitação de treinamento de redes complexas. Esta versão aplica o algoritmo para resolver problemas de supervisão, aprendendo ou reconhecendo padrões (Kovács, 1996).

De uma forma geral, entre os vários tipos disponíveis, existem duas características comuns:

- *Backpropagation* é um procedimento para calcular eficientemente as derivadas de algumas quantidades de saída de um sistema não linear, de acordo com todas as entradas e parâmetros daquele sistema, através de cálculos realizados no sentido das saídas para as entradas.
- *Backpropagation* é qualquer técnica de ajuste dos pesos ou parâmetros de um sistema não linear, de algum modo, usando as derivadas ou suas equivalentes.

Um outro modelo de rede são as redes de Hopfield. As redes de Hopfield foram criadas por John Hopfield em 1982 (Kovács, 1996). No caso de uma Rede McCulloch - Pitts,

todo neurônio processa suas entradas e determina uma nova saída, em um passo de cada vez. Diferentemente, a Rede Hopfield é uma rede com as características abaixo:

- Pesos Simétricos ($w_{ij} = w_{ji}$) e sem auto-conexões ($w_{ii} = 0$).
- Atualização Assíncrona: s_i denota o estado (0 ou 1) da i -ésima unidade. Atualiza-se uma unidade randomicamente de cada vez. Se a unidade i é escolhida, s_i dará o valor 1 se e somente se $\sum w_{ij}s_j \geq \theta_i$, senão s_i será 0.

Pode-se perceber que é uma Rede Autônoma (livre de entradas): não há entradas (não se considera θ_i como um *threshold*, nós consideramos $-\theta_i$ como uma constante de entrada, também denominada "tendência").

É definida uma medida chamada Energia na Eq. (2.30) que é quantidade matemática que em algumas palavras faz para a Dinâmica Neural, o que o potencial de energia faz para a Mecânica Newtoniana.

$$E = -\frac{1}{2} \times \sum_{ij} s_i s_j w_{ij} + \sum_i s_i \theta_i \quad (2.30)$$

Este modelo tem demonstrado eficiência em aplicações voltadas para problemas de otimização, em algoritmos de visão computacional e para o clássico problema do "caixeiro viajante".

Outros modelos conhecidos são as Adalines e Madalines. Quanto ao Adaline, trata-se de um modelo linear bastante simples conceitualmente (Kovács, 1996), desenvolvido por Widrow na mesma época do Perceptron, podendo ser entendido como um dispositivo similar a um aproximador linear de funções. A saída y da Eq. (2.31) é uma combinação linear das componentes do vetor de entrada x :

$$y = w^2 \times x \quad (2.31)$$

Widrow desenvolveu um princípio de treinamento que foi importantíssimo na área de RNAs, chamado de Regra Delta, que foi adaptado a modelos posteriores e mais complexos. Mais tarde foi criada a sua generalização multidimensional, denominada Madaline (Múltipla Adaline).

A Redes Neurais Probabilísticas (PNNs) foram idealizadas por Donald Specht (Specht, 1990), e ganharam este nome pois foram inspiradas na Teoria dos Classificadores Bayesianos da probabilidade. Specht mostrou que, pela organização do fluxo de operações em "camadas", e assegurando operações primitivas para "neurônios" individuais em cada camada, o algoritmo pode ser utilizado para atuar como uma rede *feedforward* de quatro

camadas com função de ativação exponencial. Tanto as PNNs quanto os Classificadores Bayesianos são utilizados com sucesso em problemas de classificação.

As vantagens das PNNs sobre o tradicional *backpropagation* são o fato delas possuírem um aprendizado rápido e, com um número suficiente de dados, convergir para o Classificador Bayesiano, que é definido como ótimo. Assim, ela classifica tão bem, ou melhor, que uma *backpropagation*. Além disso, as PNNs possuem um treinamento incremental e uma indicação de confiança, informando o grau de evidência sobre o qual se baseia a sua decisão.

Apesar dessas diferenças, as PNNs possuem algumas características similares ao Backpropagation, características estas que representam vantagens adicionais aos métodos, tais como o mapeamento não linear ou *learning*, o tratamento de dados ruidosos, ou seja, caráter de generalização e paralelismo, ou seja, suporte à concorrência. As desvantagens das PNNs são a sua relativa lentidão para classificar e o grande espaço de memória requerido.

Para se compreender melhor as PNNs, são necessários alguns conceitos sobre Classificadores Bayesianos.

Desta forma tem-se o Teorema de Bayes: considera-se $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$, um conjunto de n eventos mutuamente exclusivos, tais que $A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_n = S$. Considerando $P(A_i)$ as probabilidades já conhecidas dos eventos e também conhecidas todas as probabilidades condicionais $P(B|A_i)$, sendo B um evento qualquer de S (Fonseca, 1982). Para cada i , será obtida a Eq. (2.32).

$$P(A_i | B) = \frac{P(A_i) \cdot P(B | A_i)}{P(A_1) \cdot P(B | A_1) + P(A_2) \cdot P(B | A_2) + \dots + P(A_n) \cdot P(B | A_n)} \quad (2.32)$$

O resultado obtido pela Eq. (2.32) relaciona probabilidades “a priori”, $P(A_i | B)$, ou seja, probabilidade de A_i depois que ocorrer B .

Para ilustração de um exemplo do Teorema de Bayes, suponha este dado a seguir (ICA, 2001). Seja $P(C_k)$ a probabilidade a priori, ou seja, a fração dos padrões de entrada que pertencem à classe k ; $P(C_k, X^l)$ como a probabilidade conjunta, ou seja, a probabilidade que o padrão possui a característica X^l e pertence também a classe C_k ; $P(X^l | C_k)$ como a probabilidade condicional, ou seja, a probabilidade que uma observação seja na coluna X^l dado que ela pertence à classe C_k .

Neste caso, serão consideradas duas classes C_1 , e C_2 , distribuídas de acordo com a Fig. 2.16 com relação às características X^l . O número total de amostras é de 45, sendo 27 da classe 1 e 18 da classe 2.

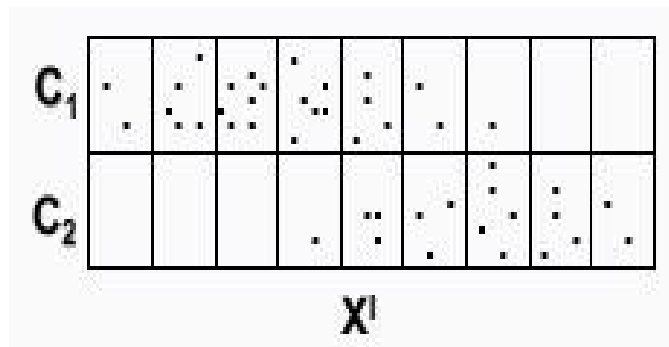


Figura 2.16 - Exemplo de uso do Teorema de Bayes (ICA, 2001).

$$P(C_k, X^l) = P(X^l | C_k) \cdot P(C_k) = P(C_k, X^l) = P(C_k | X^l) \cdot P(X^l) \quad (2.33)$$

Da Fig. 2.16 e da Eq. (2.33) pode-se estabelecer os valores:

$$P(C_1) = 27/45 = 0,6;$$

$$P(X^l | C_1) = 2/27 = 0,0740740;$$

$$P(C_1, X^l) = 2/45 = 0,0444444444.$$

$$P(C_k | X^l) = \frac{P(X^l | C_k) \cdot P(C_k)}{P(X^l)} \quad (2.34)$$

Da Eq. (2.34) pode-se perceber $P(C_k | X^l)$ como sendo a probabilidade a *posteriori* encontrada utilizando o normalizador $P(X^l)$ no denominador do outro lado da igualdade, de forma que este termo assegure que a *posteriori* soma 1.

Os Classificadores Bayesianos nos mostram como classificar um novo exemplo, com a máxima probabilidade, para uma quantidade suficiente de informação fornecida. Por serem baseados no Teorema de Bayes, que fornece um método para efetuar classificações consideradas ótimas, ele é também utilizado como padrão para a avaliação de outros métodos.

Além deste seu grande potencial de uso, o Classificador Bayesiano é conceitualmente intuitivo e simples.

Para ilustrar um exemplo de um Classificador Bayesiano, é dado um problema (ICA, 2001) de classificação de madeira baseada na medida de sua densidade. A partir de dados históricos foi considerado: a fração de peças que são carvalho e pinho, possuindo probabilidades a priori h_{carv} e h_{pinho} ; a probabilidade que a peça tenha a densidade medida, possuindo uma função densidade de probabilidade (*pdf*) f_{carv} e f_{pinho} .

A partir destas considerações são calculadas $h_{carv} \times f_{carv}$ e $h_{pinho} \times f_{pinho}$, de onde a classificação é feita designando à peça a classe equivalente com maior produto.

Entretanto, é necessário ressaltar que, em alguns casos, decisões erradas podem causar conseqüências diferentes, pois ao calcular-se $h_{carv} \times f_{carv} \times I_{carv}$ e $h_{pinho} \times f_{pinho} \times I_{pinho}$, pode ocorrer uma perda em I_{carv} , por exemplo, devido a uma classificação errada de carvalho como pinho. Da mesma forma, a classificação é feita designando a peça a classe com maior valor $h \times f \times I$.

É importante lembrar que a abordagem desenvolvida até este ponto pode ser expandida para problemas que envolvam mais de duas classes, como poderia ser o problema anterior de carvalho, pinho e pau-brasil e/ou mais de uma característica, como densidade e dureza. Com isto, pode-se elaborar o seguinte critério para elaboração dos Classificadores Bayesianos (ICA, 2001):

- Duas classes

Em um dado problema, em que: $d(X)$ é a decisão sobre o vetor teste X , θ_a é a classe A , sendo a probabilidade de ocorrência de vetores de treinamento da classe A , I_a a perda por classificar erradamente o vetor X da classe A como da classe B e por fim $f_a(X)$ equivalendo à função densidade de probabilidade da classe A , vale a relação dada pelas equações (2.35) e (2.36).

$$d(X) = \theta_a \Rightarrow h_a \cdot I_a \cdot f_a(X) > h_b \cdot I_b \cdot f_b(X) \quad (2.35)$$

$$d(X) = \theta_b \Rightarrow h_a \cdot I_a \cdot f_a(X) < h_b \cdot I_b \cdot f_b(X) \quad (2.36)$$

- Múltiplas classes

Para múltiplas classes, o resultado obtido $d(X)$ pode ser dado pela Eq. (2.37), tendo como h_r o valor obtido pela Eq. (2.38).

$$d(X) = \theta_r \Rightarrow h_r \cdot I_r \cdot f_r(X) > h_s \cdot I_s \cdot f_s(X) \rightarrow \forall r \neq s \quad (2.37)$$

$$h_a = \frac{n_a}{n_{total}} \quad (2.38)$$

Como para cada classe, no geral, tem-se um I diferente para cada outra classe, pode-se obter $d(X)$ de acordo com a Eq. (2.39).

$$D(X) = \theta_r \Rightarrow I_r \sum \exp \left[\frac{-(X - Y_{ri})^2 \cdot (X - Y_{ri})}{2 \cdot \sigma^2} \right] \geq I_s \sum \exp \left[\frac{-(X - Y_{si})^2 \cdot (X - Y_{si})}{2 \cdot \sigma^2} \right] \rightarrow \forall r \neq s \quad (2.39)$$

Assim, pode-se agora introduzir as Redes Neurais Probabilísticas (PNNs). A criação das PNNs é a recriação dos Classificadores Bayesianos utilizando redes neurais (Masters, 1993). A relação entre as PNNs e as outras redes neurais tradicionais pode ser vista claramente se os vetores de entrada forem normalizados conforme dadas na Eq. (2.40) e na Eq. (2.41) com os vetores normalizados.

$$(X - X_{Ri})^t \cdot (X - X_{Ri}) \Rightarrow X^t \cdot X - 2 \cdot X^t \cdot X_{Ri} + X_{Ri}^t \cdot X_{Ri} \quad (2.40)$$

$$2 - 2 \cdot X^t \cdot X_{Ri} = -2 \cdot (X^t \cdot X_{Ri} - 1) \quad (2.41)$$

Por fim, a Eq. (2.42) define a classificação para o tipo r em estudo.

$$D(X) = \theta_r \Rightarrow \sum \exp \left[\frac{(X^t \cdot X_{Ri} - 1)}{\sigma^2} \right] \geq \sum \exp \left[\frac{(X^t \cdot X_{Si} - 1)}{\sigma^2} \right] \rightarrow \forall r \neq s \quad (2.42)$$

Supõe-se agora um dado exemplo de Redes Neurais Probabilísticas com duas classes (ICA, 2001). Este exemplo pode ser ilustrado conforme a Fig. 2.17. Nela encontram-se a camada de entrada na camada de distribuição onde são inseridos os valores do vetor X .

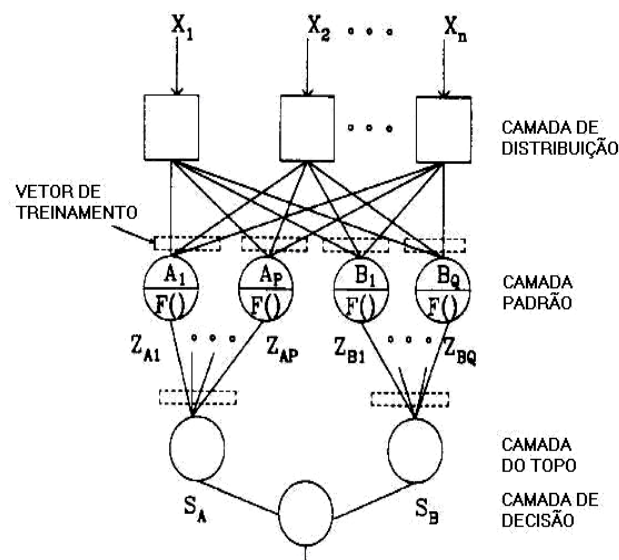


Figura 2.17 - Exemplo de uma PNN de duas classes de classificação (ICA, 2001).

Na Fig. 2.17 é mostrado um processador da camada de padrões para cada vetor de treinamento, onde existem p amostras da classe A , mais uma quantidade de q amostras da classe B . As respostas dos processadores são dadas pela Eq. (2.43).

$$F(.) = \exp\left[\frac{(X^t \cdot X_{Ri} - 1)}{\sigma^2}\right] \quad (2.43)$$

Na próxima camada, na camada do topo, ocorre a soma de todos os padrões de entradas de certa classe, obedecendo à Eq. (2.44).

$$S_c = \sum \exp\left[\frac{(X^t \cdot X_{Ri} - 1)}{\sigma^2}\right] \quad (2.44)$$

Por fim, na última camada, também denominada de camada de decisão, ocorre a comparação com a saída 1 para Sa e 0 para Sb.

Como pôde ser observado, este modelo possui um treinamento instantâneo, apresentando-se robusto na presença de ruídos, pois trabalha probabilisticamente, e, com um conjunto de treinamento suficientemente grande, este se aproxima do classificador Bayesiano.

O modelo PNN é intrinsecamente um classificador e pode, através de algumas modificações, interpolar entre decisões, tornando-se um aproximador de funções universal, apesar desta alternativa não ser tão elegante. Ele é grandemente especializado, não possuindo a larga aplicabilidade de outros modelos como o de Hopfield e o backpropagation. Entretanto, em situações em que o problema central tem a ver com uma classificação e o conjunto de treinamento é tão grande que em outros modelos se tornaria impraticável, sua aplicação é bastante recomendável.

A principal vantagem da PNN é que usualmente o tempo de treinamento requerido é bastante pequeno. Suas desvantagens têm a ver com a necessidade de grandes conjuntos de treinamento, grandes espaços de memória e execução de baixa velocidade, fatores estes que devem ser levados em conta quando se optar pelo seu uso. Este modelo é raramente utilizado em aplicações em tempo real, a não ser que um conjunto de processadores em paralelo esteja disponível.

2.5 Análise de Agrupamentos - Fuzzy C-Médias e K-Médias

Na análise de conglomerados ou de agrupamentos, também denominados classificação ou *cluster*, objetiva-se a divisão dos componentes de um conjunto amostral ou a própria população, em uma quantidade definida de grupos, utilizando-se a similaridade entre variáveis deste conjunto de observações (Mingoti, 2005).

Em vários campos do conhecimento já são aplicados os conceitos de análise de agrupamentos. Dentre eles pode-se citar a psicologia (Speece et al., 1985) que utiliza estas

técnicas para classificação de perfis de personalidade. Existem aplicações em segmentações ou pesquisas de mercado (Stewart and Love, 1968; Berry, Linoff, 1997; 2000) que se destinam a agrupar perfis de consumo para a identificação de posicionamento de produtos ou serviços. Aplicações em Geografia Política para agrupamentos entre regiões e aspectos sócio-econômicos e principalmente em mecanismos de *Data Mining* (Mineração de Dados) que buscam extrair conhecimento de conjuntos gigantes de dados (Hand, 1998; Diniz e Louzada Neto, 2000). Este último tem sido muito aplicado junto a SGBDs (Sistemas Gerenciadores de Bancos de Dados) comerciais que passaram a implementar rotinas computacionais na extração de conhecimento.

Dentre as técnicas de agrupamentos, existe uma distinção entre técnicas de agrupamento hierárquicas e as não hierárquicas (Mingoti, 2005). Neste trabalho, como se dá ênfase nas técnicas não hierárquicas, serão comentadas apenas estas últimas, apresentando também uma breve diferenciação entre os dois tipos.

As técnicas não hierárquicas basicamente buscam encontrar diretamente os n elementos que pertençam aos k *clusters* ou grupos, de tal forma que estas partições obedeçam dois critérios: similaridade ou coesão interna e isolamento ou separação dos grupos formados (Mingoti, 2005). Algumas distinções existem entre os métodos hierárquicos e os não hierárquicos (Mingoti, 2005). Primeiro, ao contrário das técnicas hierárquicas, as técnicas não hierárquicas solicitam inicialmente ao usuário a quantidade de k grupos para a discriminação. Depois, a cada nova iteração, novos grupos podem surgir através da junção ou separação de grupos anteriores. Assim, os métodos não hierárquicos em geral são iterativos e possuem uma melhor capacidade de avaliação de conjuntos de dados de maior porte, com um grande número de amostras. As técnicas mais aplicadas à análise de agrupamentos são os métodos *Fuzzy C-Médias* e as *K-Médias* assim como as técnicas de redes neurais para classificação (Mingoti, 2005).

Sem dúvida, um dos algoritmos mais utilizados é o método das *K-Médias* ou *K-Means* (Hartigan e Wong, 1979) para análise de agrupamentos. De maneira simples, cada elemento é alocado a cada agrupamento k que esteja mais próximo do seu centróide.

Originalmente, o método possui quatro etapas:

- 1- Adotam-se os k centróides, denominados sementes, para se iniciar o processo de partição;
- 2- Cada elemento é avaliado por uma distância Euclidiana, sendo agrupado ao grupo k cuja distância seja menor;
- 3- Após o cálculo de cada n elemento da amostra, recalcula-se os centróides de todos os k grupos e assim repete-se a etapa 2 novamente considerando os novos centróides;

- 4- As etapas 2 e 3 são repetidas até que nenhuma realocação de grupos seja necessária, ou seja, que cada elemento n esteja adequadamente alocado a um grupo k .

Um aspecto importante que deve ser ressaltado é que a escolha inicial das sementes tem um efeito significativo no agrupamento final. Existem várias abordagens que auxiliam nesse processo (Mingoti, 2005). Entretanto, para simplificação, o que a maioria dos métodos faz é um procedimento de aleatorização das sementes baseadas em escolhas arbitrárias de pontos da amostra para a inicialização.

Uma outra forma de aglomeração é o Método *Fuzzy C-Médias* ou *Fuzzy C-Means*. Assim como o *k-Médias*, ele exige como entrada o número de grupos a serem agrupados os dados (Mingoti, 2005).

O método *Fuzzy* busca uma partição que minimiza a função objetivo dada pela Eq. (2.45).

$$J = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n (u_{ij})^m d(X_j, V_i) \quad (2.45)$$

onde V_i é a semente do agrupamento i , $i = 1, 2, \dots, c$; $m > 1$ é o parâmetro *Fuzzy*, u_{ij} é a probabilidade que o elemento X_j pertença ao grupo com semente V_i ; $d(\cdot)$ é a distância adotada, que em geral é a Euclidiana.

Desta forma, a função J é minimizada quando as probabilidades u_{ij} são escolhidas como nas equações (2.46).

$$u_{ij} = \left[\sum_{k=1}^c \left(\frac{d(X_j, V_i)}{d(X_j, V_k)} \right)^{\frac{2}{m-1}} \right]^{-1} \quad (2.46)$$

no qual,

$$V_i = \frac{\sum_{j=1}^n (u_{ij})^m X_j}{\sum_{j=1}^n (u_{ij})^m} \quad (2.47)$$

O processo ocorre para todo $i = 1, 2, \dots, c$ e $j = 1, 2, \dots, n$. A solução final é obtida tendo como entrada as sementes e as probabilidades u_{ij} iniciais. Em softwares, geralmente os valores de u_{ij} são geradas de uma distribuição uniforme no intervalo $[0, 1]$ (Mingoti, 2005). O algoritmo funciona alterando as sementes até o ponto em que a distância seja menor que um

erro admissível adotado. Este erro é comparado com base na distância entre duas iterações consecutivas $d(V_t, V_{t+1})$.

Diferente ao que ocorre com o método das k-Médias, o *Fuzzy c-Médias* não atribui um elemento a um único grupo. Em contrapartida ele estima a probabilidade de que cada elemento pertença a cada um dos c-grupos da partição, como se fossem graus de pertinência a cada um.

2.6 Princípios de Inovação de Processos

Por se tratar de um assunto que ainda está em desenvolvimento inicial, o do monitoramento de integridade estrutural para aplicações aeronáuticas, foi proposto o uso das técnicas de inovação de produtos para avaliação dos parâmetros para a aplicação da técnica.

Muitas ferramentas já utilizadas ao longo do tempo, como fluxogramas e SWOTs são também auxiliares no processo de avaliação da inovação tecnológica de produtos. Sendo assim, uma breve descrição de algumas destas ferramentas será realizada.

A primeira ferramenta auxiliar é o fluxograma. Os fluxogramas podem assumir diversas formas, dependendo do objeto de estudo que se deseja representar, desde o tratamento da informação até os processos. Para se fazer as modelagens computacionalmente, diversos softwares são indicados, sendo um deles: o *Process Modeler* (Fitarelli, 2006). Este software é livre (grátis) e serve para confecção de fluxogramas. Na Fig. 2.18 tem-se uma visão da tela desta ferramenta.

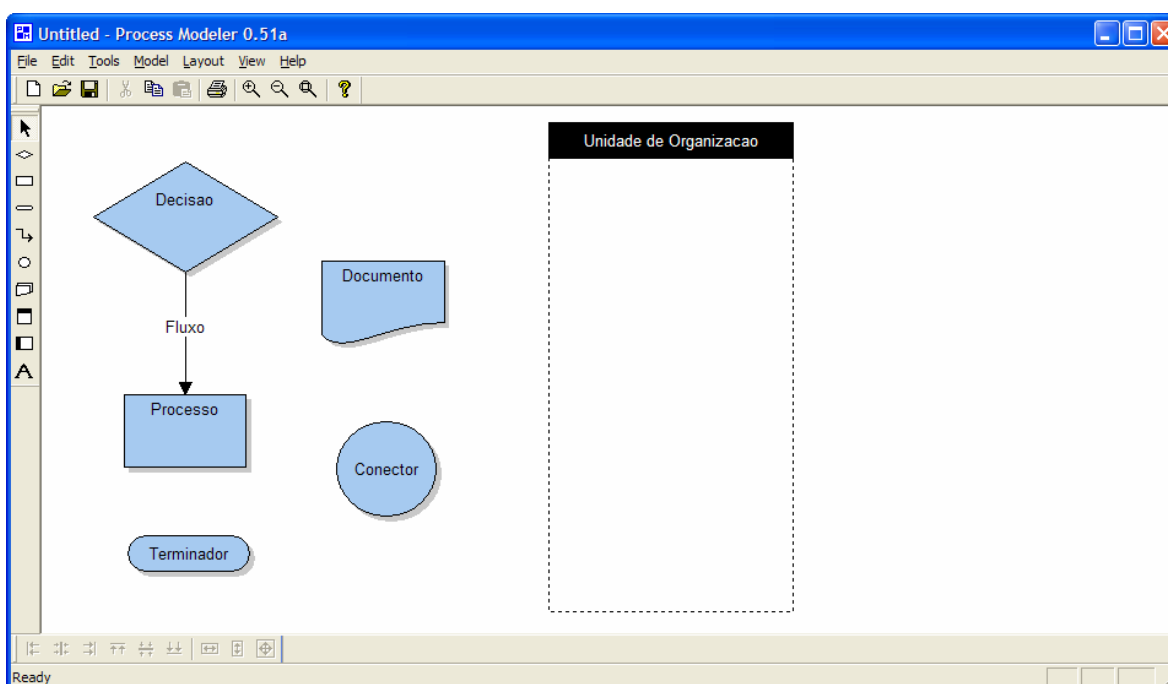


Figura 2.18 - Tela com vários componentes utilizados para elaboração de fluxogramas.

Da Fig. 2.18 se pode extrair os símbolos essenciais para a confecção de um fluxo de um dado processo que se deseja modelar. Na Fig. 2.19 é ilustrado um modelo simples de ações para caracterizar um fluxograma.

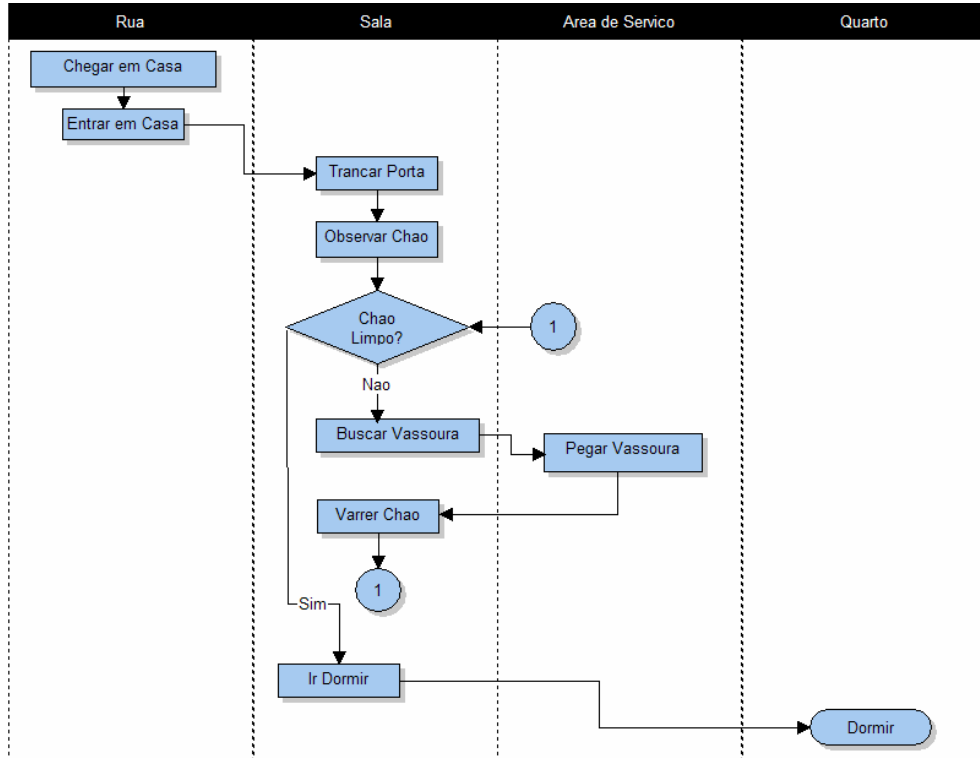


Figura 2.19 - Exemplo de um fluxograma

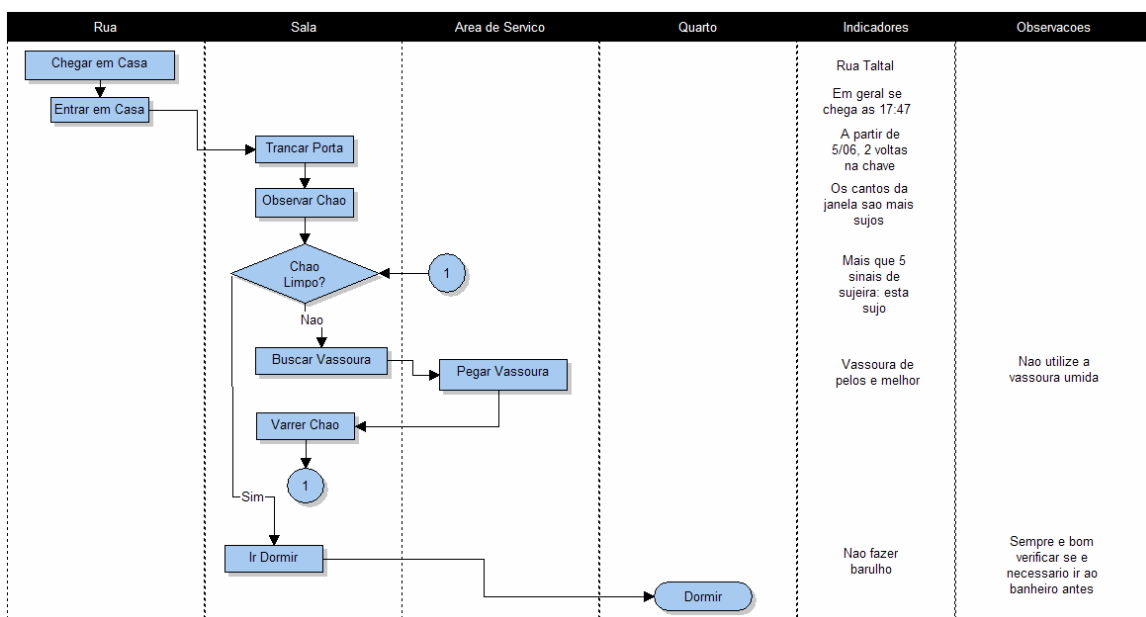


Figura 2.20 - Mapa de processo do fluxograma da Fig. 2.19.

Na Fig. 2.20, ao se adicionar duas colunas da direita, o fluxograma passa a ser considerado um mapa de processo por estar agora intimamente mais relacionado ao processo de análise/avaliação do processo. A Fig. 2.21 ilustra um exemplo genérico de um mapa de processo. No campo indicadores, cartas de controle e estatísticas descritivas enunciando as metas desejadas podem ser de grande auxílio na compreensão dos “gargalos” do processo (geralmente comentados no campo Comentários ou Observação). Este ponto de estrangulamento, num procedimento de identificação de falhas, pode indicar ações críticas que necessitam de cuidados especiais para o planejamento da instrumentação, medição ou análise.

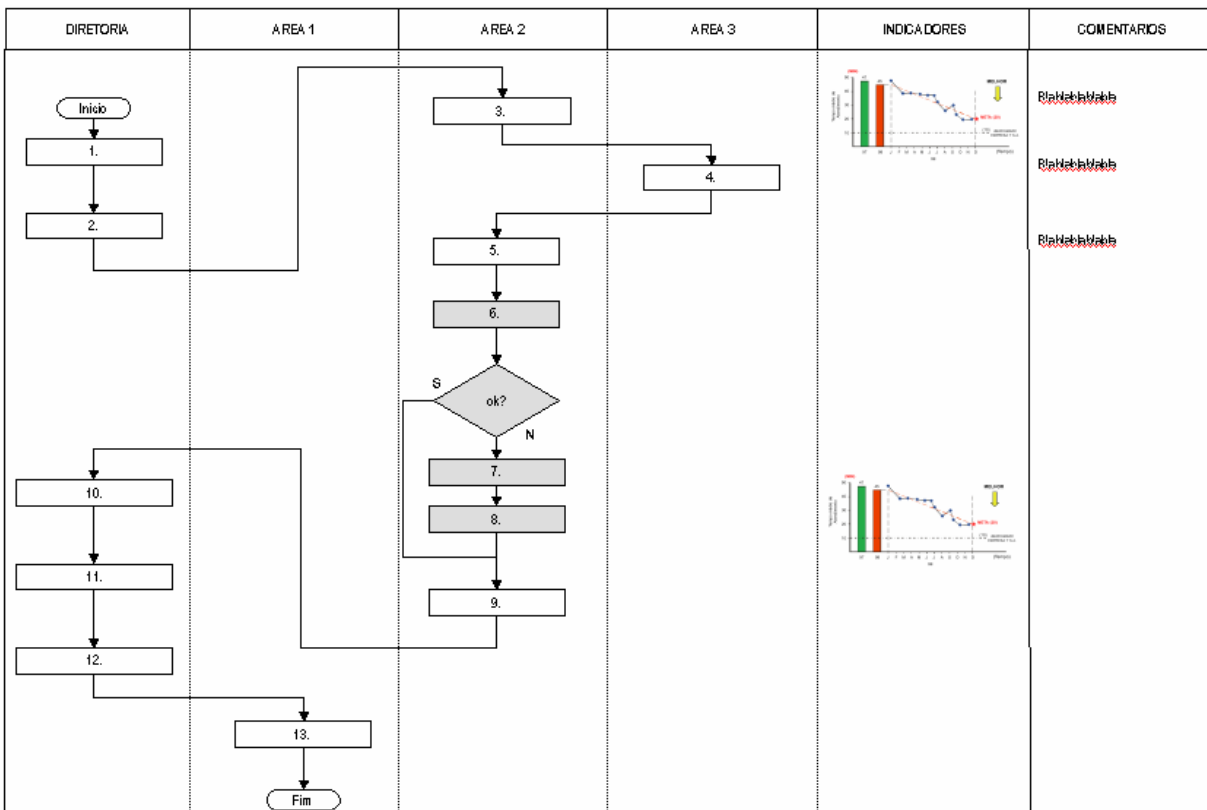


Figura 2.21 - Ilustração de um mapa de processo genérico.

O IGOE é a próxima ferramenta auxiliar, sendo geralmente um dos primeiros diagramas aplicados para a análise e inovação de processos. Neste diagrama (*Inputs – Entradas; Guides – Regras; Outputs – Saídas; Enablers – Habilitadores*) é possível, como em um primeiro contato com o sistema, definir melhor os objetos de entrada e saída que devem ser devidamente discutidos para que o trabalho não seja realizado com um foco diferente do que realmente deve ocorrer. As entradas e saídas, raras vezes são complexas de serem definidas e são poucas as variáveis bem distintas e claramente definidas. Um outro aspecto importante que é contemplado pelo IGOE é a definição de regras necessárias para se cumprir

o que se pretende. Assim, nesta fase inicial já podem ser previstas regras mais complexas como manuais e desenhos técnicos que serão utilizados durante uma fase de montagem, operação, manutenção, etc. Se já forem identificadas as necessidades dessas regras, pode-se, a partir desta fase, iniciar o estudo levando-se em conta a importância destes, assim como elaborar um esboço de atividades para o plano de ação. Por fim, os habilitadores são essenciais nesta fase inicial para se identificar os responsáveis/executores das atividades que serão desenvolvidas, podendo-se alocar ou providenciar contingentes para o desenvolvimento pleno da tarefa/atividade. Esta última variável do IGOE é capaz de auxiliar na construção do Organograma que descreve as competências e responsabilidades de cada tarefa.

Para se “desenhar” um IGOE, deve-se centralizar uma caixa ao centro, e dentro, descrever a seqüência das tarefas que compõem os passos para que a saída real seja a desejada do processo. Resumindo, IGOE é um diagrama utilizado na fase inicial da análise do sistema para compreender do que irá se necessitar (lista de compras, pessoal qualificado em quais atividades e quais qualificações) e com o que será influenciado. Nesta fase é que se toma consciência do envolvimento do projeto e, portanto, poderá ser formulado o organograma. Cada um dos componentes do IGOE pode ser entendido como: Entradas – são materiais ou produtos que serão consumidos ou transformados no processo; Regras – são os dispositivos que definem as condições (receitas, manuais, desenhos) para o funcionamento do processo; Saídas – são os produtos ou resultados do processo; Habilitadores – são quaisquer pessoas, instalações, sistemas, ferramentas, equipamentos ou outro recurso não consumível, para a execução das atividades dos processos. É interessante esclarecer que um macro fluxograma geralmente pode aparecer na parte central do diagrama, facilitando a montagem do mesmo. Na Fig. 2.22 são ilustradas as partes que compõem um diagrama IGOE.

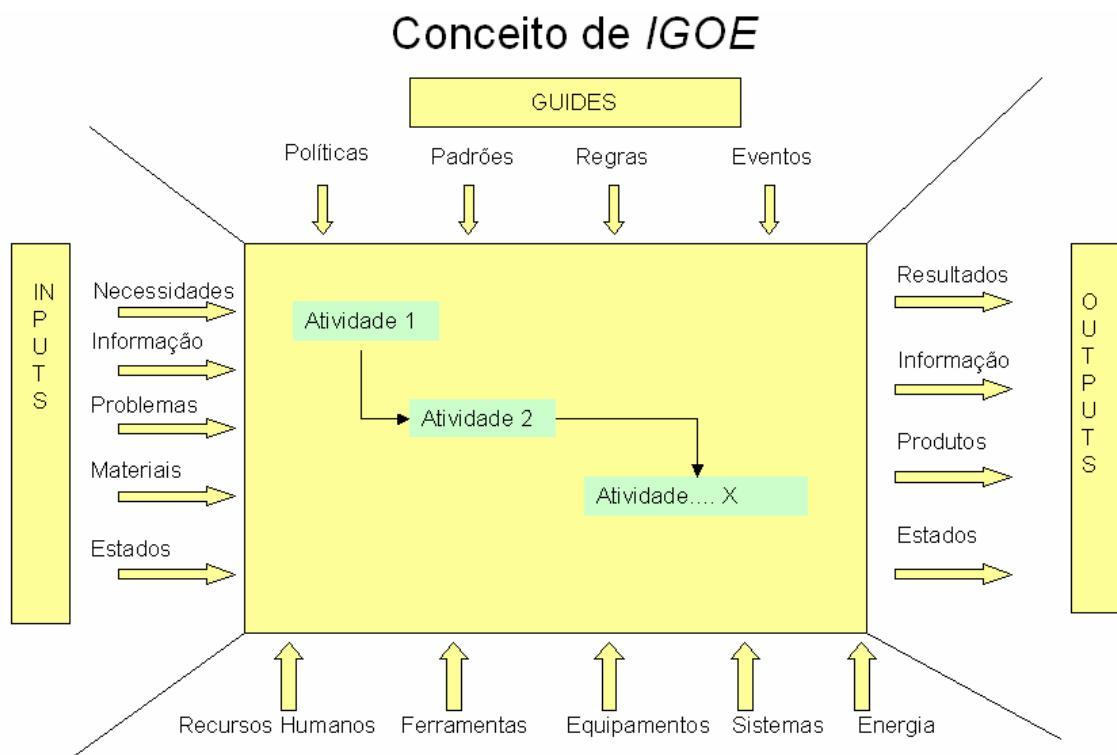


Figura 2.22 - Ilustração esquemática de um diagrama IGOE.

Na Fig. 2.22 é possível perceber as várias formas que cada componente (entradas, saídas, habilitadores e regras) pode assumir em um modelo.

IGOE

processo	codigo	pcorn 05
	nome do processo	fazer pipoca
	responsável	jose
	data	1/23/03

processo em estudo	elementos do processo		
	posição no IGOE	descrição do elemento	processo interface
pcorn 05	I	pedido do cliente	venda 01
pcorn 05	I	milho	compra 01
pcorn 05	I	manteiga	compra 01
pcorn 05	E	panela	invest 01
pcorn 05	E	fogão	manut 23
pcorn 05	G	licença prefeitura	buroc 12
pcorn 05	G	receita	mamae 07
pcorn 05	O	pipoca pronta	embalagem 01
pcorn 05			
pcorn 05			

Figura 2.23 - Proposta alternativa para inicializar um IGOE.

Conforme a Fig. 2.23, pode-se perceber que um IGOE pode ser rascunhado inicialmente através do que já se conhece do sistema, a partir do que posteriormente se classificam os tipos de cada grupo. Esta etapa pode se tornar desnecessária com o uso constante da ferramenta.

Exemplo IGOE: Processo de Manutenção



Figura 2.24 - Exemplo de um IGOE para um processo de manutenção.

Na Fig. 2.24 é apresentado um modelo de um IGOE de um processo de manutenção hipotético.

Na Fig. 2.25 pode-se perceber um IGOE completo, dada a descrição macro de atividades no centro do diagrama. Esta etapa nem sempre é necessária, já que muitas vezes um mapa de processo já foi elaborado. É importante ressaltar que o IGOE irá ajudar tanto no processo de análise o quanto for o nível de detalhamento usado em sua elaboração. Comentários do tipo da Fig. 2.25: ferramental adequado (*enablers*), pode por vezes confundir mais do que auxiliar na análise. Sendo assim, é mais adequado descrever uma lista o mais completa possível dos recursos.

A seguir, pode-se aplicar o diagrama FAST (Oliveira, 2003). O diagrama FAST (*Functional Analysis System Technique*) é utilizado, como o próprio nome revela, para a análise funcional do sistema. Ou seja, é uma ferramenta que busca esclarecer e evidenciar as funcionalidades que um dado sistema ou subsistema executa para o estabelecimento dos objetivos. Desta forma, o diagrama é elaborado na seqüência da esquerda para a direita, no qual o primeiro quadro representa a função primária ou básica do processo a ser estudado. É importante ressaltar que esta função básica se refere ao que se está planejando executar. Por

exemplo, se o objeto de estudo é uma bicicleta, podem-se realizar várias abordagens envolvendo: fabricação da bicicleta, montagem, manutenção, como utiliza-la com veículo de locomoção, etc.

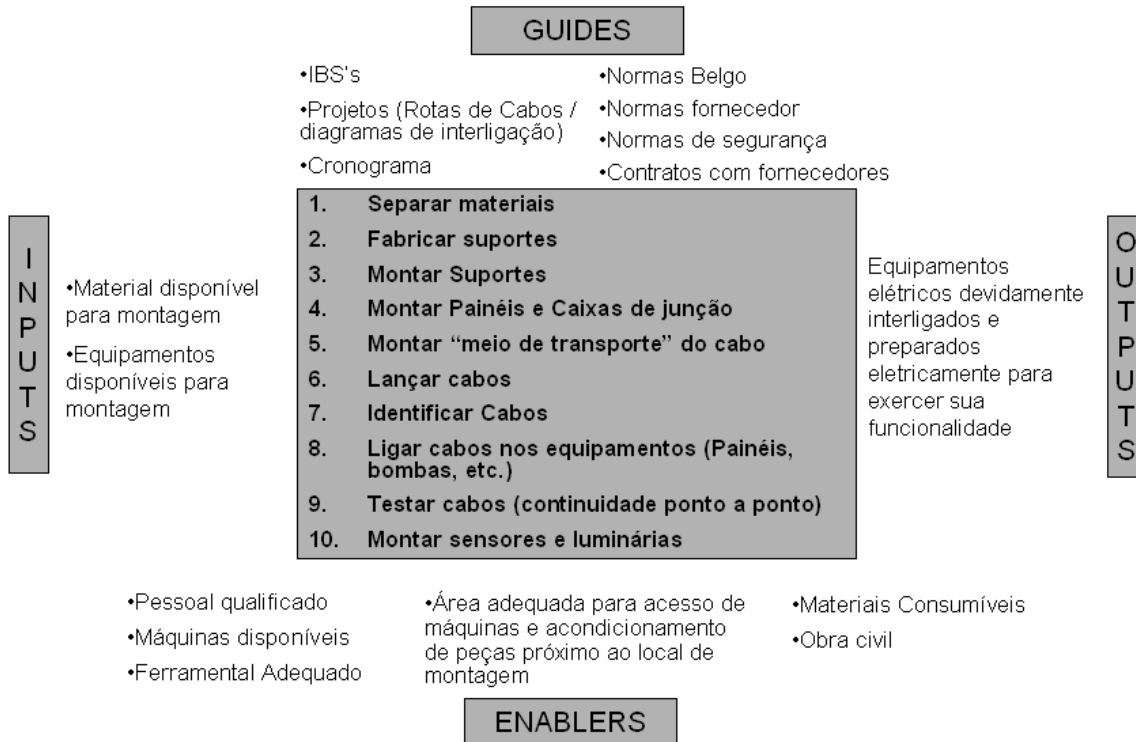


Figura 2.25 - Diagrama IGOE de um processo de montagem.

Na última coluna do FAST são descritos os itens de controle e de verificação de atividades que foram desdobradas ao longo do diagrama. Uma função que existe por si só e não se pode ser subdividida, deve possuir um medidor capaz de representar a qualidade ou quantidade da atividade executada. Este medidor será o parâmetro de controle, ou como o próprio nome diz, um item de verificação. Desta forma, fica claro que, ao se desdobrar todas as atividades de um componente, estas irão herdar responsabilidades da função “pai” e assim distribuir entre suas “irmãs” a capacidade de, em se satisfazendo todas, contemplar a função “pai” que se desdobrou. Portanto, considerando o diagrama FAST como um grafo, e avaliando-se os nós terminais, ou seja, somente as funções que não se desdobram, a certificação da execução destas tarefas fiscalizadas pelos itens de verificação garantem o completo funcionamento da função básica. Na Fig. 2.26 está ilustrado um exemplo de um FAST de liberação de um processo. É importante ressaltar que do FAST pode-se extrair os fatores de controle para o sucesso da sua atividade, como revela a última coluna, que muitas vezes também pode ser denominada por “itens de controle”.

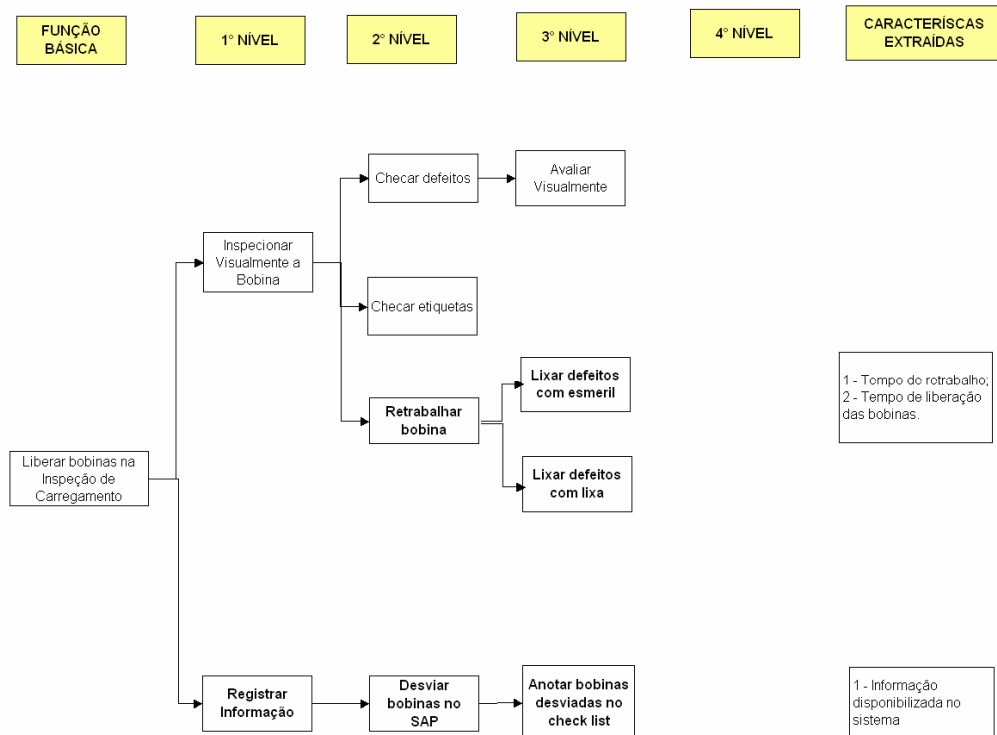


Figura 2.26 - exemplo hipotético de um diagrama FAST completo de um processo de liberação de produto.

No entanto, um diagrama FAST, assim como o fluxograma, mapa de processo ou IGOE, pode assumir dimensões exageradas, dificultando o processo de documentação. Isto pode ser feito subdividindo o conjunto em sub-componentes ou mecanismos do equipamento ou sistema que está sendo avaliado. Por exemplo, um processo maior, como um laminador que possui vários componentes, pode ser desdobrado pelas funcionalidades de cada um dos subsistemas que o compõe. Na Fig. 2.27 está um diagrama FAST de um desses componentes, denominado por “Controlador de Laço”, e sua função básica é a de controlar a tensão no cabo que está sendo empurrado/puxado ao longo das cadeiras de laminação. Desta forma, a descrição completa das funcionalidades essenciais de um sistema pode ser feita adequadamente. Ainda na Fig. 2.27 pode-se observar os nós terminais com seus respectivos itens de controle na primeira coluna à direita. Na última coluna à direita estão relacionados os impactos, ou seja, as características da qualidade (ruídos) que cada função pode inserir no processo.

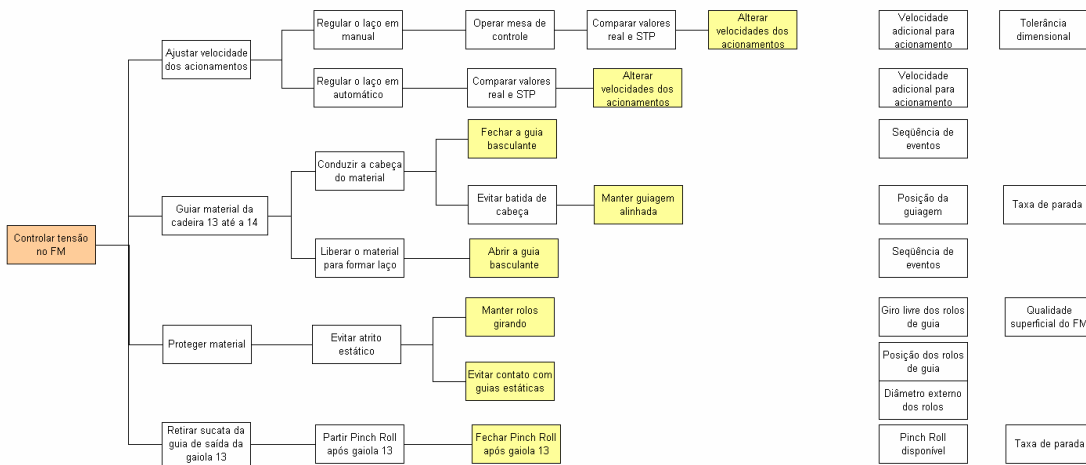


Figura 2.27 - exemplo hipotético de um processo de controle de laço.

Os diagramas FAST podem ser utilizados para visualização das necessidades e estabelecimento de qual variável pode ser considerada para medir o desempenho das funções. Neste diagrama, quando comparado com o sistema real em estudo, pode-se observar a ausência de componentes para execução de determinadas atividades, além de re-trabalho e possíveis componentes que possam efetuar ações simultâneas (um componente que execute mais de uma função), podendo ser utilizada como ferramenta para renovação tecnológica de componentes. A análise FAST pode ser ideal para a análise de requisitos e muitas vezes antecede ao processo de utilização da ferramenta de inovação TRIZ que será abordada à frente.

Outro diagrama igualmente útil e amplamente utilizado por gestores é o diagrama SWOT. O diagrama SWOT (*Strength* – Forças; *Weakness* – Fraquezas; *Opportunities* – Oportunidades; *Threats* – Ameaças) é utilizado tanto para identificação das características boas (Forças e Oportunidades), assim como para localizar pontos negativos (Fraquezas e Ameaças) do sistema. As variáveis intrínsecas ao processo (internas) são as Forças e as Fraquezas, enquanto que as extrínsecas (externas) são as Oportunidades e Ameaças. Das Forças e Oportunidades podem ser retiradas as próprias soluções para as Fraquezas e Ameaças. Uma forma interessante de geração de estratégias é o cruzamento das variáveis internas com as externas, a fim de que se possam assumir posturas diferentes, frente a estratégias de sobrevivência (piores casos, cruzando Ameaças e Fraquezas) até estratégias de desenvolvimento (melhores casos, cruzando Forças e Oportunidades). Assim, cada um dos pontos críticos avaliados em uma análise anterior (nos casos em que são retirados os processos críticos de um diagrama de Ishikawa (Moura Jr, 2006) - assim definida pelos seus seis campos que devem estar discriminados nas linhas: Meio, Medição, Método, Máquina,

Material e Mão-de-obra). Cada uma destas unidades críticas previamente levantadas devem ser uma a uma observadas dos seguintes pontos de vista: Força, Oportunidade, Fraqueza e Ameaça. Esta análise que geralmente é realizada para um processo de decisão estratégica, marketing ou finanças, pode ser plenamente visualizada para análises físicas de sistemas. Por exemplo, uma possível Ameaça para a área de marketing que se refere à falta de público alvo, redução do poder de compra do consumidor, ou falta de matéria-prima, na análise física de sistemas pode ser considerada como uma variação de temperatura, pequena sensibilidade do sensor, área de cobertura do sinal baixa, custo elevado de instrumentação, etc. O diagrama é facilmente elaborado e apenas é a disposição de cada campo apresentado conforme o caso hipotético da Fig. 2.28. Nesta figura, um diagrama SWOT para a mesma situação da Fig. 2.26 foi elaborado.

	FORÇAS	FRAQUEZAS
INSPECIONAR CARREGAMENTO	Funcionários qualificados Garantia de expedição de material sem defeitos	Definição do horário de carregamento Risco de acidente Condições ergonômicas de trabalho Tempo elevado de espera do caminhão Retrabalho Disponibilização de funcionários Concorre com outros exames liberatórios
Definir programa de carregamento Inspeccionar bobinas Dar disposição para material Disponibilizar para carregamento		
	OPORTUNIDADES	AMEAÇAS
	Sistema de proteção das bobinas e pistons	Aumento do mercado de aços mola Condição de estocagem e manuseio de bobinas Antecipação da laminação de steel cord Expansão da Usina Tempo de estoque elevado

Figura 2.28 - Exemplo de um diagrama SWOT hipotético do processo de liberação

Na Fig. 2.29 é apresentado o equivalente diagrama SWOT do sistema ilustrado na Fig. 2.27, onde se evidencia que, devido a maior complexidade, os fatores físicos ponderadores também são em maiores quantidades.

Strengths (Forças)	Weaknesses (Fraquezas)
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Elevação guia basculante via PLC ▪ Operadores com conhecimento deste tipo de equipamento (qualificado) ▪ Boa visibilidade do operador sobre o formador de laço 1 ▪ Baixo turn over de mão-de-obra ▪ Controle de refrigeração dos rolos de guias ▪ Controle lançamento (receita) diâmetro roletes no supervisor ▪ Controle operacional para ajustes do set point e altura real do laço 1 ▪ Sistemática de lubrificação com sistema ar-óleo ▪ Aumento da mesa do laço 1 absorverá variação na altura do laço sem variação da velocidade do Bloco e MFM ▪ Pessoal da manutenção elétrica tem conhecimento do funcionamento de sistemas de controle de laço 	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de um programa de manutenção preventiva do sistema de lubrificação / refrigeração dos rolos de guia / guias do formador de laço 1
Opportunities (Oportunidades)	Threats (Ameaças)
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Modo de controle de laço já foi testado e aprovado em outros laminadores ▪ Fornecedores elétrico e mecânico têm know-how neste tipo de controle 	<ul style="list-style-type: none"> • Interferência de água de resfriamento nos equipamentos eletro-eletrônicos • Desconhecimento dos operadores em relação ao comportamento do perfil no laço 1 • Desgaste excessivo dos rolos devido curva acentuada após gaiola 13 • Travamento dos rolos devido oxidação e falha de lubrificação • Perda de contato entre rolo e barra laminada devido excesso de abertura dos rolos • Desgaste excessivo das guias devido curva acentuada após gaiola 13 e desgaste prematuro dos rolos

Figura 2.29 - Exemplo do SWOT hipotético de um processo de controle de laço

Uma outra ferramenta auxiliar na análise, é a matriz GOUF. A matriz de priorização GOUF é utilizada, em geral, após a aplicação do diagrama SWOT para identificar os itens prejudiciais que mais devem ser explorados. GOUF é a sigla utilizada formada pelas primeiras letras de cada item a ser priorizado: “G” (gravidade), “O” (ocorrência), “U” (urgência) e “F” (facilidade de detecção). Desta forma, cada item prejudicial (ameaça ou fraqueza) previamente obtido pelo SWOT é agora ponderado para indicar as prioridades de ação. Gravidade implica no quão grave tal fenômeno poderia ser para o processo estudado como um todo. O termo Ocorrência está relacionado ao número de ocasiões em que tais fraquezas ou ameaças foram previamente ou historicamente identificadas. Urgência indica a verdadeira necessidade da correção do problema, caso esse venha a ocorrer. Facilidade de detecção muitas vezes podem ter seus pesos alternados de forma a serem considerados como “dificuldade de detecção”, ou seja, de se ponderar tão maior ou quanto mais complexo for o processo de detecção. Estes critérios são multiplicados e obtem-se o valor “Críticidade” do componente. Essa criticidade assume assim uma nota que foi obtida através da análise subjetiva de várias formas de influência no sistema como um todo. Ele é utilizado visto que não é possível a denominação de todos os itens como os mais críticos. Em um ambiente normal, após o levantamento subjetivo e ponderação dos itens, uma regra de Pareto (80-20) é aplicada para a identificação dos 20% dos itens do sistema que correspondem a aproximadamente 80% dos resultados esperados. Obviamente, em um sistema que visa o monitoramento de falhas, e em especial, aeronáuticas e espaciais, deve-se ter um rigor

superior (acima dos 80%) ao tratado em geral. A Fig. 2.30 ilustra o processo de priorização por GOUF do sistema da Fig. 2.29.

MATRIZ DE PRIORIZAÇÃO								
UCP	ITEM	FRAQUEZA OU AMEAÇA	CRITICIDADE				RESULTADO	RANK
			G	O	U	F		
Controle de Laço	1	Falta de um programa de manutenção preventiva do sistema de lubrificação/refrigeração dos rolos de guia/guias do formador de laço 1	1	3	3	1	9	7
	2	Interferência de água de resfriamento nos equipamentos eletro-eletrônicos	3	3	5	1	45	6
	3	Desconhecimento dos operadores em relação ao comportamento do perfil no laço 1	3	9	9	5	1215	1
	4	Desgaste excessivo dos rolos devido curva acentuada após a gaiola 13	5	9	5	5	1125	3
	5	Travamento dos rolos devido oxidação e falha de lubrificação	3	3	5	3	135	5
	6	Perda de contato entre rolo e barra laminada devido excesso de abertura dos rolos	3	3	5	3	135	4
	7	Desgaste excessivo das guias devido curva acentuada após gaiola 13 e desgaste prematuro dos rolos	5	9	5	5	1125	2

FRAQUEZAS
AMEAÇAS

Figura 2.30 - Exemplo do GOUF hipotético de um processo de controle de laço

Por outro lado, a priorização pode assumir vários critérios, como por exemplo: GUT (Gravidade, Urgência, Tendência), GUF, etc. O importante é que, para todos os itens que serão avaliados, os itens que serão ponderados tenham significado físico. Em geral, os pesos atribuídos variam de 0 (o menor valor) a 10 (valor máximo), e a criticidade do item é a multiplicação direta de todos os pesos obtidos pelos critérios adotados.

Em geral, um projeto pode ser analisado e sintetizado, sugeridas alterações, mas se nenhuma ação é tomada efetivamente, nenhum resultado é alcançado. Assim, uma das atividades, senão a mais essencial, é a especificação do plano de ação. O plano de ação pode assumir diversas formas, mas em geral, ele tem assumido um formato denominado por 5Ws2Hs. Este nome se deve às iniciais dos campos da tabela que forma o plano de ação em língua inglesa: *What* (O que), *Who* (Quem), *Where* (Onde), *When* (Quando), *Why* (Por que), *How many* (Quantos) ou *How much* (Quanto - custo) ou *How long* (Quanto tempo) e *How* (Como).

Com todos esses campos é possível especificar as ações que deverão ser tomadas. Entretanto, a maioria das pessoas reduz, conforme a necessidade e o hábito, os 5Ws2Hs para uns 3 ou 4Ws1H, eliminando o *Where*, *Why* e o *How many*. Um exemplo pode ser visto na Tab.2.3.

Tabela 2.3 - Exemplo de um plano de ação utilizando 4W1H

What	Who	When	Why	How
Colocar tampa de óleo	Auxiliar	10/10/2006 – 10:00	Evitar perda de óleo e sujeira	Com uma alavanca, apóie na estrutura e coloque os pinos
Parafusar mecanismo	Mecânico	10/10/2006 – 11:00	Para que reduza a vibração e desbalanceamento	Apóie o mecanismo até o fim e depois aperte o parafuso

É importante repetir que um trabalho de planejamento e gestão bem executado garante bons resultados práticos. E os resultados práticos somente serão bons se as descrições de atividades estiverem bem definidas, claras, distintas, com tempos e gastos previamente discutidos e calculados ao mesmo tempo em que tenta ser sucinta para não gerar conflitos ou confusões.

Nas Tabs. 2.4 e 2.5 estão os possíveis planos de ação para a resolução dos problemas críticos levantados na Fig. 2.30.

Acabadores Laço

Função Básica: Controle de Laço

1.Desconhecimento dos operadores em relação ao comportamento do perfil no laço.

Tabela 2.4 - Solução do item 1.

O QUE	QUEM	QUANDO	POR QUE	COMO
Dar treinamento antecipado para operação/manutenção com foco em acionamentos, controle de tração, controle de velocidade, operação de painéis (mesa e supervisor), modo de controle dos laços.	Eu mesmo	Até quando puder	Reduzir a margem de erro operacional durante o start up das novas funcionalidades do controle do laço	Elabora os manuais de operação e repassando a todos os operadores da operação e manutenção

2.Desgaste excessivo das guias devido curva acentuada após gaiola 13 e desgaste prematuro dos rolos.

3.Desgaste excessivo dos rolos devido curva acentuada após a gaiola 13.

Tabela 2.5 - Soluções dos itens 2 e 3.

O QUE	QUEM	QUANDO	POR QUE	COMO
Ação antecipada. Revisar plano de inspeção/manutenção com foco nas novas características do formador de laço.	Eu mesmo e toda equipe	Até quando puder	Para que as guias sejam mais adequadas ao novo formador	Verificar junto com equipe, no plano de inspeção/manutenção, possíveis alterações
Redimensionar o conjunto guia/rolo de maneira a aproximar os rolos reduzindo o desgaste.	Eu mesmo e equipe de engenharia	Até quando puder	Para que as guias sejam mais adequadas ao novo formador	Auxiliado pela equipe de engenharia, recalculando o conjunto guia/rolo

Finalmente, após uma revisão sobre as ferramentas auxiliares no processo de análise para inovação, são apresentadas as idéias básicas de Altshuller (Carvalho, 2006). O processo de inovação muitas vezes é considerado como um processo de tentativas e erros. Entretanto, algumas metodologias (Altshuller, 1969, 1974, 1979, 1980, 1984, 1989) surgiram para tornar o processo de inovação mais racional e tem a cada dia ganho mais espaço, sendo adotado por empresas como Boeing (Boeing, 2004), NASA (Steinetz and Hendricks, 2000; Zakrajsek *et al*, 2005), Ford, General Motors, Chrysler, Eastman Kodak, Exxon, Rockwell International, Procter & Gamble, Digital Equipment, Xerox, Hewlett Packard (Ruhe, 2006) e Motorola (aitriz, 2006).

Hoje em dia a metodologia baseada em TRIZ é a líder mundial como metodologia em inovação no mundo. A organização de pesquisa líder no Japão, o Instituto de Pesquisa Mitsubishi, o qual agrega 50 das principais empresas japonesas, investiu US\$14 milhões para levar o TRIZ e softwares relacionados ao Japão. A Motorola comprou 2000 pacotes do software TRIZ, enquanto que a Unilever revelou o investimento de US\$1,2 milhões em compras de softwares para sua implementação. Em 1998, a Associação TRIZ foi formada na França, envolvendo participantes como Renault, Peugeot, EDF, Legrand. Em 2004, a Samsung Corporation reconheceu o TRIZ como a melhor prática para a inovação após inúmeros projetos com sucesso, resultando em benefícios econômicos totais na ordem de 1,5 bilhões de euros durante três anos. No ano 2000, a Associação Européia TRIZ foi criada, com coordenação global, com um grupo de 26 países incluindo representantes do Japão, Coréia do Sul e EUA (Carvalho, 2006).

TRIZ é um acrônimo russo para "*Teoriya Resheniya Izobretatelskikh Zadatch*" (*Теория решения изобретательских задач*), uma Teoria de Solução de Problemas Inventivos, desenvolvida por Genrich Altshuller e seus colegas do escritório de patentes da marinha russa desde 1946. Por fatores políticos (Altshuller, ao iniciar seus estudos, foi afastado para

um escritório na Sibéria no qual passou algumas décadas), aliado ao baixo intercâmbio científico entre países ocidentais e ex-países comunistas, esses estudos passaram a ser conhecidos na América apenas posteriormente à década de 1980, tornando-se mais populares a partir de 1995 (Carvalho, 2006). A principal diferença entre as técnicas de Altshuller com seus antecessores, foi que ele focalizou sua técnica nos registros do produto criativo das áreas técnicas, ou seja, as patentes.

Altshuller avaliou mais de 2.000.000 de registros de patentes de diferentes campos da engenharia. Ele estudou aquelas patentes com as soluções mais efetivas (Intel, 2004). Seus estudos empíricos revelaram leis ou tendências específicas na evolução dos sistemas técnicos. Assim, ele formulou o principal postulado: a evolução dos sistemas de engenharia não é um processo aleatório, mas obedece a determinadas regras. Dessas regras, foram formulados seus oito Padrões de Evolução dos sistemas técnicos (Intel, 2006). Esses sistemas podem ser utilizados para o desenvolvimento de sistemas complexos inovadores. Em 2006 foi lançado o que foi denominado como sendo o primeiro mestrado em TRIZ no mundo, pelo INSA de Strasbourg (INSA, 2005).

A estrutura da TRIZ clássica é ilustrada pela Fig. 2.31 (Carvalho, 2006).

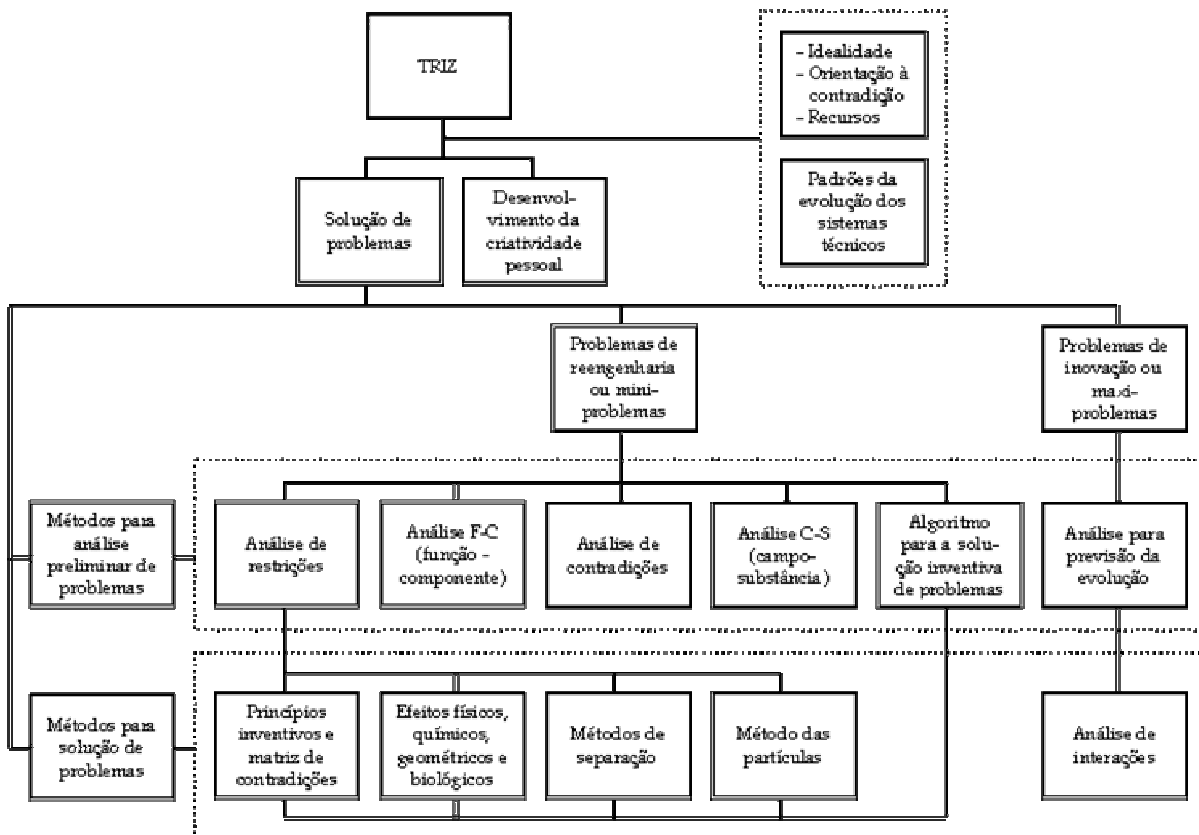


Figura 2.31 - Estrutura clássica do TRIZ

Neste trabalho, se dará mais ênfase nos itens “Análise C-S” e nos “Princípios Inventivos e Matriz de Contradições”.

O método dos princípios inventivos e matriz de contradições foram o primeiro dos métodos para solução de problemas criados por Altshuller (1969), envolvendo o uso de parâmetros de engenharia e princípios inventivos (Carvalho, 2006). Os parâmetros de engenharia representam a generalização de grandezas envolvidas (criação de grupos) em problemas técnicos de várias áreas. De acordo com o problema, essas variáveis podem ser minimizadas, maximizadas ou direcionadas em torno de um valor alvo. Os 39 parâmetros de engenharia são apresentados na Tab. 2.6 (Carvalho, 2006).

Tabela 2.6 - Os 39 parâmetros de engenharia propostos por Altshuller (Altshuller, 1969).

1	Peso do objeto em movimento	2	Peso do objeto parado	3	Comprimento do objeto em movimento	4	Comprimento do objeto parado
5	Área do objeto em movimento	6	Área do objeto parado	7	Volume do objeto em movimento	8	Volume do objeto parado
9	Velocidade	10	Força	11	Tensão ou pressão	12	Forma
13	Estabilidade da composição	14	Resistência	15	Duração da ação do objeto em movimento	16	Duração da ação do objeto parado
17	Temperatura	18	Brilho	19	Energia gasta pelo objeto em movimento	20	Energia gasta pelo objeto parado
21	Potência	22	Perda de energia	23	Perda de substância	24	Perda de informação
25	Perda de tempo	26	Quantidade de substância	27	Confiabilidade	28	Precisão de medição
29	Precisão de fabricação	30	Fatores externos indesejados atuando no objeto	31	Fatores indesejados causados pelo objeto	32	Manufaturabilidade de
33	Conveniência de uso	34	Mantenabilidade	35	Adaptabilidade	36	Complexidade do objeto
37	Complexidade de controle	38	Nível de automação	39	Capacidade ou produtividade		

Os princípios podem ser considerados como sugestões às soluções do problema, que foram obtidos também através do agrupamento e generalização de várias situações de registros em patentes. Os 40 princípios de Altshuller são ilustrados pela Tab. 2.7.

Tabela 2.7 - Os 40 Princípios Inventivos de Altshuller (Altshuller, 1969).

1	Segmentação ou fragmentação	2	Remoção ou extração	3	Qualidade localizada	4	Assimetria
5	Consolidação	6	Universalização	7	Aninhamento	8	Contrapeso
9	Compensação prévia	10	Ação prévia	11	Amortecimento prévio	12	Equipotencialidade
13	Inversão	14	Recurvação	15	Dinamização	16	Ação parcial ou excessiva
17	Transição para nova dimensão	18	Vibração mecânica	19	Ação periódica	20	Continuidade da ação útil
21	Aceleração	22	Transformação de prejuízo em lucro	23	Retroalimentação	24	Mediação
25	Auto-serviço	26	Cópia	27	Uso e descarte	28	Substituição de meios mecânicos
29	Construção pneumática ou hidráulica	30	Uso de filmes finos e membranas flexíveis	31	Uso de materiais porosos	32	Mudança de cor
33	Homogeneização	34	Descarte e regeneração	35	Mudança de parâmetros e propriedades	36	Mudança de fase
37	Expansão térmica	38	Uso de oxidantes fortes	39	Uso de atmosferas inertes	40	Uso de materiais compostos

Basicamente, os Princípios Inventivos e Matriz de Contradições é uma matriz que indica os princípios mais promissores para solucionar as contradições de processos (efeitos colaterais) (Oliveira, 2003).

A seqüência do método é a seguinte (Oliveira, 2003):

1. Identificar a característica a melhorar associada a função básica do processo
2. Identificar a contra função presente no caso e o resultado indesejável
3. Identificar os princípios de inovação no cruzamento da característica a melhorar com o resultado indesejável na matriz de Altshuller
4. Aplicar os princípios de inovação para o problema real e identificar soluções práticas
5. Verificar se a solução elimina ou minimiza a contra função e promove a função

Um algoritmo também é proposto por Altshuller, seguindo a seqüência proposta da Fig.

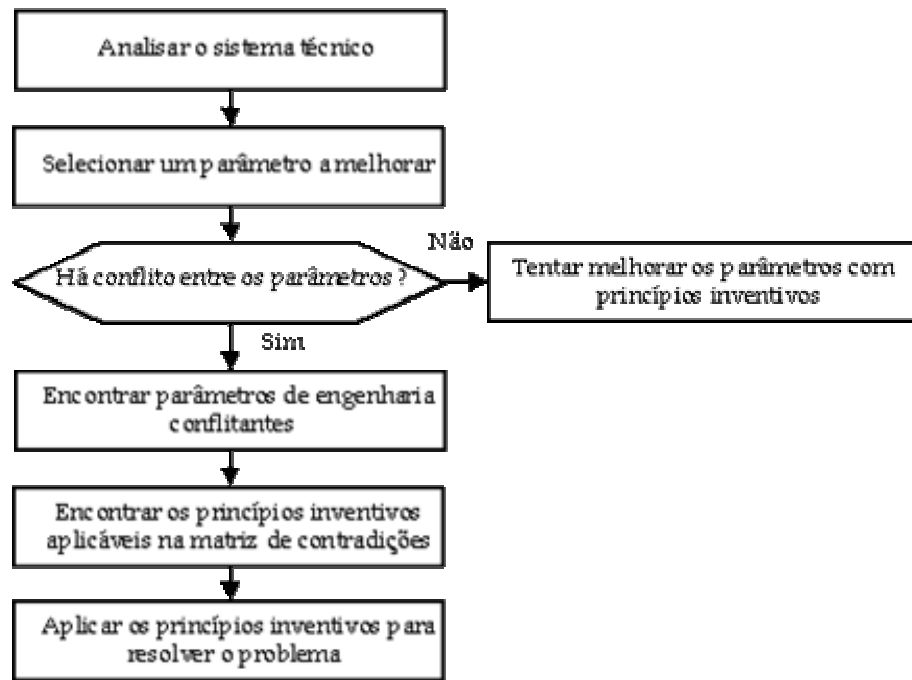


Figura 2.32 - Solução de Problemas Inventivos com os 40 princípios (Altshuller, 1974).

Outra grande contribuição de Altshuller que será utilizada no trabalho é a criação da Análise C-S (Campo-Substância). A análise C-S pode ser muito útil na geração de dispositivos no que diz respeito aos “mecanismos sem falhas”. As ferramentas usuais para análise de riscos, tais como FMEA (*Failure Modes and Effects*), Árvore de Falhas e Análise HAZOP (*Hazard and Operations*) trabalham na linha de respostas à questão: “Dado um estado ou evento conhecido, o que pode dar errado?” (Ruhe, 2006). Por outro lado, o método de antecipação de falhas proposto por Altshuller trabalha com a ideologia: “Dado o sistema, como posso mais efetivamente, inventar falhas?”, de onde partem as teorias de Determinação de Falhas Prematuras (Zlotin et al., 1999).

Altshuller originou a idéia de Análise C-S para sistemas, no qual um modelo C-S simples é dado por um par de funções como os da Fig. 2.33.

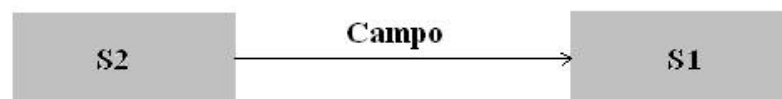


Figura 2.33 - Modelo simples C-S.

Assim, neste modelo, S_2 é a ferramenta, substância ou componente que transfere uma ação a um objeto S_1 . O Campo representa o meio ou a energia de transferência entre as duas substâncias. Alguns tipos de campos podem ser mecânicos, eletromagnéticos, gravitacionais, térmicos e nucleares fortes (Ruhe, 2006). Desta forma, se a transferência de energia é realizada dentro dos limites de amplitude e duração, a Função “Útil” é desempenhada.

Criando situações nas quais as Funções Úteis não são desempenhadas, a análise C-S pode ser utilizada como ferramentas de auxílio na predição de falhas. Ruhe (2006) se baseia nas 76 Soluções Padrões de Altshuller para Problemas Inventivos para propor uma análise de seis pseudo-modelos básicos. Cada um desses pseudo-modelos apresenta uma técnica de proposta de solução para um caso de “transferência de energia indesejada” produzindo uma “função indesejada”. Esses princípios podem ser utilizados para a geração de conceitos de soluções. Para facilitar o processo de compreensão, o método será apresentado por um exemplo hipotético que mostra um sistema simples: uma mão que torce uma chave de fenda que aperta um parafuso. A Fig. 2.34 ilustra o problema com suas nomenclaturas.



Figura 2.34 - Exemplo de uma análise C-S de um aperto de parafuso

O correspondente modelo para a análise C-S é dado pela Fig. 2.35.

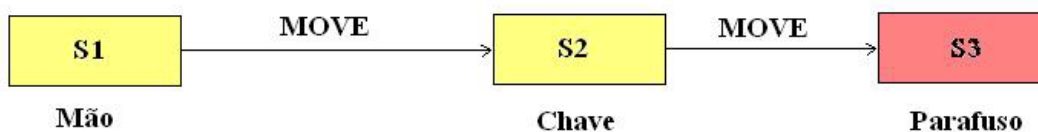




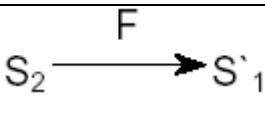
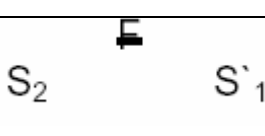


Figura 2.35 - Modelo C-S referente ao exemplo abordado.

No caso em estudo, pretende-se avaliar as formas de falha que poderão ocorrer na transição de S2 para S3, ou seja, problemas que possam ocorrer na transferência do movimento da chave de fenda para o parafuso. A Tab. 2.8 apresenta a Análise Inversa para Antecipação de Falhas como o modelo proposto por Ruhe (2006) para o exemplo.

Tabela 2.8 - Antecipação de falhas para o modelo C-S da chave-parafuso

Caso	Solução	Descrição	Aplicação em Estudo
1		S3 é isolado ou bloqueado por Sx de S2	1. A chave está travada porque a haste é “quadrada” e não gira no furo onde está o parafuso
2		Contra-ação da ação útil por uma substância de segurança Sx que atrai a ação por si mesma	1. O parafuso já gira no mesmo sentido do “aperto” (movimento rotacional) 2. O parafuso não encontra o “fim de curso” (movimento vertical)
3		Proteção de S3 da ação útil por uma substância de segurança Sx que atrai a ação por si mesma	1. Graxa ou sujeira na cabeça do parafuso que impede de “gitar” o parafuso
4		Modifique a fonte S2 da ação para desabilitar a função útil	1. O material da haste é flexível e retorça 2. O cabo está solto da haste 3. A ponta da chave não tem “cunha”
5		Modifique S3 para ser insensível a ação útil	1. A cabeça do parafuso está espanado 2. Não tem rosca no parafuso 3. Material do parafuso frágil ou de baixo módulo de elasticidade
6		Altere o conjunto da zona de ação, sua duração ou ambos para decair ou eliminar completamente a ação útil	1. Pequeno esforço 2. Movimento na chave de pequeno ângulo

Após a construção da Tab. 2.8, é realizada uma análise subjetiva sobre as formas de falhas mais graves para o sistema, podendo ser sugeridas formas alternativas para a solução do mesmo, sempre com o objetivo de minimizar a ocorrência de falhas.

2.7 Conexões Sem-Fio e Aplicações para Internet

Um assunto importante que deverá ser tratado no trabalho será o uso de tecnologias de transmissão de dados sem fios. Duas tecnologias são bastante utilizadas hoje em dia: *Wi-fi* e *Bluetooth*.

Wi-fi é uma especificação para redes sem fio conforme promulgada pela Associação de Padrões IEEE (Davis and Mansfield, 2002). A IEEE utiliza números para designar padrões ao invés de nomes. Dentro do esquema da IEEE, o número 802 é utilizado para designar redes de áreas locais e metropolitanas (LANs e WANs). Para especificar redes LAN sem fio, utiliza-se o 802.11, e o 802.11b para a versão que trabalha no espectro de 2,4GHz em altas velocidades (acima de 11Mbps).

Em contrapartida ao *Wi-fi*, que utiliza equipamentos mais especializados e que comunica a centenas de metros, a tecnologia *Bluetooth* possui apenas capacidade de comunicação até no máximo de 100 metros, além de uma transferência de dados bem menor (Miller, 2001).

Uma outra ferramenta a ser utilizada diz respeito à comunicação de dados utilizando a Internet. A utilização da Internet (*world wide web*) é feita por computadores utilizando o protocolo *Hyper Text Transfer Protocol* (HTTP) (Tansley, 2002). Este método permite a interpretação de documentos tipo hipertexto, ou seja, páginas HTML, num método baseado em cliente-servidor. Resumidamente, ao utilizar o HTTP, ocorre a seqüência dos seguintes passos (Tansley, 2002):

- O cliente através de um navegador (*browser*), abre uma conexão com um servidor web;
- Através de um envio, o cliente faz uma solicitação;
- O cliente é respondido pelo servidor;
- A conexão é desfeita.

Através do navegador, o usuário acessa o endereço através de um localizador de recurso uniforme (URL), que pode ser algum nome do tipo `www.teste.com.br/meusprogs/prog1.cgi`, no qual este URL é composto pelo seguinte: protocolo, nome do domínio, caminho até o recurso, nome do recurso e por fim, caso exista, informações de consulta.

Algumas linguagens foram programadas especificamente para o desenvolvimento em ambiente Internet. Um dos casos mais populares é o PHP. Diferentemente de outras linguagens, como C e Java, PHP é utilizada exclusivamente para Internet. O código, ou programa PHP, fica hospedado no servidor de internet. Assim, o usuário realiza uma chamada, a processa no servidor, e então, estas informações são enviadas de volta para o navegador do cliente (Tansley, 2002).

As páginas de Internet podem ser consideradas estáticas ou dinâmicas. As páginas estáticas são documentos que não são alterados, enquanto que as dinâmicas são reestruturadas de acordo com as solicitações dos clientes, sendo então gerada uma página personalizada que é retornada ao cliente. As páginas feitas em PHP são capazes de gerar páginas dinâmicas, trabalhando ao mesmo tempo com conceitos de classes (orientação a objetos) e bancos de dados. É importante relembrar que todas as ações são realizadas na máquina servidor, protegendo assim o código do aplicativo, diferentemente de aplicativos como Java *applets*. Toda vez que um navegador tenta executar um *script* ou PHP embutido em um documento HTML, o código em PHP é analisado pelo respectivo módulo no servidor e então é executado. Este processo pode ser compreendido pela Fig. 2.36.

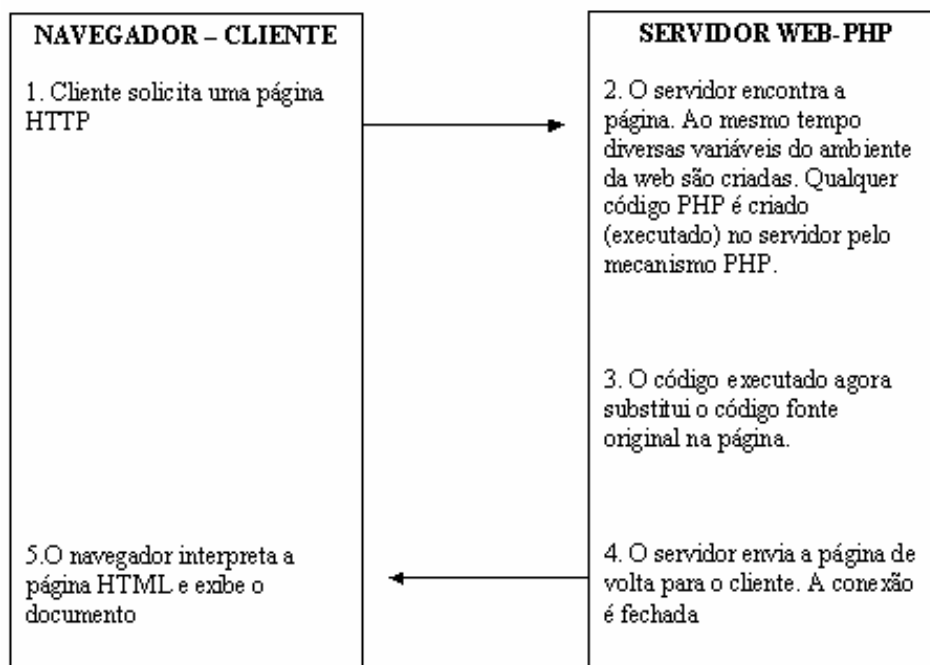


Figura 2.36 - Cliente-servidor com PHP (Tansley, 2002).

Uma grande vantagem do PHP é que, além de ser um código aberto, podendo ser utilizado para aplicações tanto privadas quanto comerciais, ele é independente da plataforma em que é instalado, trabalhando tanto em ambientes Linux como em ambientes Windows.

Por outro lado, um sistema que precise manipular dados, como é capaz o PHP, necessita armazenar informação de alguma forma. O modo básico seria a utilização de arquivos com dados. Entretanto, tratando-se de um grande volume de movimentações e tipos de dados, é mais conveniente a utilização de um SGBD (Sistema Gerenciador de Banco de Dados). O SGBD, desta forma, pode ser considerado como um programa capaz de armazenar e gerenciar informações. Mais do que isso, para ser considerado um sistema SGBD, é necessário que o sistema, ou programa, seja capaz de gerenciar informações entre tabelas, não tornando o conjunto completo de informações inconsistente. Uma tabela é uma unidade básica capaz de armazenar informações relativas a um grupo específico de variáveis, campos ou propriedades de um objeto. Cada linha, ou instância de uma tabela é denominada registro. Os controles entre as tabelas, representando suas associações, são denominados por chaves primárias e estrangeiras.

O SGBD mais utilizado para Internet, voltado para pequenas aplicações, em geral é o MySQL. O MySQL apresenta as vantagens de ser pequeno, robusto (amplamente testado em diferentes abordagens), além de ser gratuito. Um esquema é ilustrado na Fig. 2.37 para mostrar o uso do MySQL associado ao desenvolvimento PHP.



Figura 2.37 - Relacionamentos entre navegador cliente e banco de dados (Tansley, 2002).

Para mostrar a simplicidade dos scripts PHP e sua facilidade de conexão com bancos de dados, é apresentado a seguir um exemplo simples, no qual uma conexão é realizada na base de dados “Teste”, fazendo a seguir uma consulta na mesma base, como mostra a Listagem 2.1.

No código apresentado pela listagem 2.1, é realizada uma conexão no banco de dados MySQL com usuário e senha iguais a “usuario” e “senha”. A base de dados para ser realizada a consulta foi alterada para a base “Teste”. A tabela a ser consultada foi “minhatabela” e possui duas colunas “nome” e “profissao”. O script apenas conecta à base e lista todos os registros contidos nos dois campos da tabela, imprimindo cada um em uma linha separada num arquivo que retorna ao cliente no formato HTML. É importante lembrar que para o cliente, a única informação que poderá ser vista será o documento HTML mostrando as linhas da consulta à base de dados. Caso o cliente opte em exibir o código

fonte do documento, o script não é apresentado, mostrando apenas os códigos do HTML resultante.

Listagem 2.1 – Testebanco.php

```
<HTML>
<BODY>
<?php
#Este é o programa Testebanco.php que conecta ao MySQL e faz uma consulta
$conexão = mysql_connect("localhost","usuario","senha");
if(!$conexao)
{ echo "Não pôde se conectar ao MySQL" ;
  exit;}
$db = mysql_select_db("Teste",$conexão);
if(!$db)
{ echo "Não pôde selecionar a base de dados" ;
  exit;}
$sql = "SELECT * FROM minhatabela";
$resultado = mysql_query($sql,$conexão);
$num_linhas = mysql_num_rows($resultado);
if($num_linhas == 0)
{ echo "Desculpe, não existe informação"; }
else {
while($linha = mysql_fetch_array($resultado))
  {$nome = $linha["nome"];
   $profissao = $linha["profissao"];
   echo "$nome : $profissao <BR>"; }
mysql_close($conexão); ?>
</BODY>
</HTML>
```

2.8 Algoritmos Genéticos Clássicos

O Algoritmo Genético (AG) é o ramo mais conhecido da Computação Evolutiva, e tiveram origem nos anos 60 com os trabalhos de J.H. Holland, que estudava os chamados "Sistemas Adaptativos", que eram modelados como Sistemas de "Aprendizagem de Máquina".

Ao contrário da Estratégia Evolutiva (EE) e da Programação Evolutiva (PE), os AG possuem mais aplicações do que o simples uso em Otimização. Sua origem, como já comentado, surgiu de modelos de aprendizado automático, chamados sistemas classificadores, e mais tarde, em 1989, com a publicação do livro “Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning” por D.E. Goldberg, orientado de J.H. Holland, é que o principal uso dos AGs passou a ser a otimização. No entanto, Holland já introduzia o assunto em 1975 no âmbito da genética, economia, teoria dos jogos, pesquisa e reconhecimento de padrões e inferência estatística, controle e otimização de funções, e estudo do funcionamento do sistema nervoso central.

Um ponto interessante é o uso dos operadores de mutação e recombinação nos AGs, enquanto que, por exemplo, a PE utiliza somente a mutação. Quanto a recombinação, o uso de uma reprodução sexuada, que “a priori” teria um maior custo devido a ter que existir mais de um tipo de indivíduo na espécie, gastando mais tempo e energia buscando parceiros para reproduzirem-se, possui a vantagem de combinar novas características positivas, que não poderiam ocorrer somente através da mutação.

Podem ocorrer dois eventos indesejáveis nos AGs. O primeiro caso é o da ocorrência de um “superindivíduo”, que tem uma adaptação muito maior que os demais, e assim acaba monopolizando as seleções, motivando uma convergência precoce, caracterizada por um máximo local. O segundo caso é a ocorrência de um grupo de indivíduos com avaliações muito baixas, tendo portanto baixas probabilidades de serem escolhidos para gerarem descendentes, eliminando assim características que poderiam ser boas, dependendo de uma combinação adequada. Ou seja, é a diversidade que gera as melhores soluções.

Uma técnica eficaz é denominada Hibridização, e sua base consiste na integração de uma técnica convencional ao uso de AGs. O resultado costuma ser melhor que o obtido com qualquer uma das duas técnicas isoladamente (Assis, and Steffen, 2003).

Originalmente os AGs utilizavam valores binários para os genes dos cromossomos ou variáveis, mas depois surgiram técnicas que utilizavam parâmetros contínuos, adotando então valores reais ao invés de bits (Michalewicz, 1996).

Se um cromossomo possui n variáveis, então sua estrutura será composta por um vetor de N posições, sendo então:

Para as variáveis:

V_1, V_2, V_3

O cromossomo será:

$Cromossomo = [V_1, V_2, V_3]$

Para uma dada função de custo C haverá então uma relação:

$$C = f(\text{cromossomo}) = f(V1, V2, V3)$$

É com base nesta função e nas restrições laterais que se decidirá sobre a sobrevivência ou não de indivíduos.

Para a geração da população inicial é aplicada a relação randômica, Eq. (2.48) que estabelece um conjunto de M cromossomos de ordem $1 \times N$, onde M é o tamanho da população e N é o número de variáveis. Os valores de lo e hi são respectivamente os valores das restrições laterais inferiores e superior.

$$IPOP = (hi - lo) \cdot \text{random}\{M, N\} + lo \quad (2.48)$$

Após a geração inicial, o valor de cada cromossomo é avaliado de acordo com sua função custo, e assim ordenado em ordem crescente para efetuar a seleção natural.

Na seleção natural são descartados os piores indivíduos, liberando espaço para os descendentes, permitindo que a população de cromossomos evolua de acordo com sua geração, ajustando os membros de acordo com sua função custo.

Depois da seleção e descarte dos piores, ocorre o emparelhamento, onde são aleatoriamente separados em pares os indivíduos bons para o cruzamento.

No cruzamento são gerados os descendentes que possuem características dos pais, obedecendo a Eq. (2.49).

$$p_{new} = \beta \cdot p_{mn} + (1 - \beta) \cdot p_{dn} \quad (2.49)$$

onde β é um número randômico no intervalo $[0;1]$; p_{mn} o n -ésimo parâmetro do cromossomo mãe; p_{dn} o n -ésimo parâmetro do cromossomo pai.

Na Fig. 2.38 é ilustrado um fluxograma simplificado de um AG com parâmetros contínuos.

Os procedimentos de seleção e cruzamento são efetuados repetidamente, até que aconteça a convergência do resultado.

Se por acaso o valor convergir para um máximo local, o operador mutação, que possui uma baixa probabilidade de convergência, irá atuar, alterando um cromossomo aleatoriamente e direcionando o resultado para convergir para o máximo global.



Figura 2.38 - Fluxograma simplificado de um AG com parâmetros contínuos.

CAPÍTULO III

MODELAGEM BÁSICA DE FALHAS VOLTADA PARA SHM

Inicialmente, o estudo do monitoramento de integridade estrutural (SHM) baseado em impedância foi feito em estruturas de pouca complexidade. As primeiras estruturas observadas pelos sinais de impedância na UFU, pelo grupo de pesquisa da área de Dinâmica, é descrita em Moura Jr (2004). Neste trabalho citado, apesar de se trabalhar em dois capítulos com uma estrutura mais complexa, como é a empenagem vertical de um veículo aéreo não tripulado, foi estudada uma primeira forma de otimização de parâmetros usados no monitoramento via impedância eletromecânica. Além disso, metamodelos simplificados para a compreensão de uma falha simulada pela adição de massa conhecida foram construídos. Neste caso, a falha é compreendida apenas como uma alteração estrutural.

Entretanto, como este trabalho de doutorado visa incorporar várias metodologias e técnicas associadas para um sofisticado sistema de monitoramento, este capítulo apresenta estudos prévios de monitoramento da integridade estrutural em campos que possam ser emergentes para a técnica, ou seja, apresenta-se uma primeira visão do potencial de aplicação desta técnica. Para facilitar a compreensão dos fenômenos associados aos sinais de impedância, estruturas de pequeno porte e com os fenômenos de falha bem localizados foram utilizadas para reduzir possíveis erros de experimentação. Por outro lado, procurou-se configurar aqui situações concretas de grande relevância na engenharia.

A seguir, são então apresentados os seguintes experimentos: avaliação de tensão em parafusos de flanges de tubos, análise da qualidade de soldas em vigas e, finalmente, análise de tensões em corpos de prova de ensaios de tração.

3.1 Flanges de Tubos

Um grande problema na engenharia de manutenção, principalmente em parques industriais de grande porte, é a possibilidade de vazamentos de líquidos ou gases que sejam inflamáveis ou tóxicos. Para facilitar a manutenção destes dutos, ao mesmo tempo em que se favorece a colocação de válvulas temporárias, é o uso de tubos com flanges, que é capaz de suportar junções com tubos que suportam grande pressão interna.

Assim, uma aplicação importante dos métodos de SHM poderia ser feita em indústrias petroquímicas, de alimentos, de celulose e papel, de cigarros, etc, promovendo uma maior

segurança à planta, ao mesmo tempo em que pode ser utilizada como aliada em paradas programadas e na manutenção de equipamentos e tubulações.

Na Fig. 3.1 é apresentada uma estrutura simples de tubos flangeados utilizados aqui para fins de monitoramento do torque nos parafusos da flange.

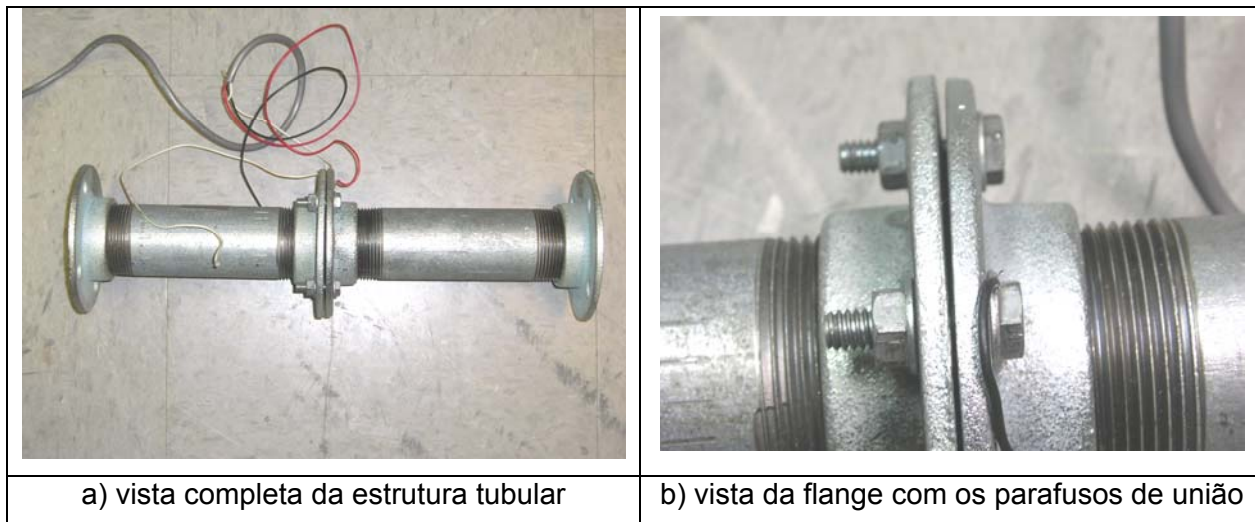


Figura 3.1 - Ilustração de uma estrutura tubular com flanges

Para se garantir o mesmo torque para diversas situações, além de se definir um valor de referência, foi incluído um torquímetro, conforme apresentado pela Fig. 3.2.



Figura 3.2 - Torquímetro utilizado durante o experimento de junção por flanges

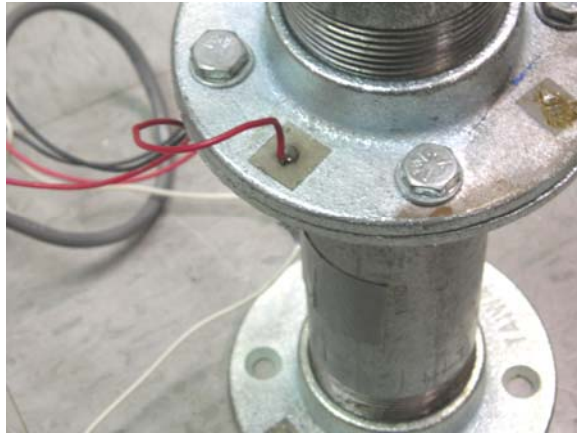


Figura 3.3 - Pastilhas de PZT coladas na estrutura tubular

Para fazer o monitoramento da estrutura tubular, uma pastilha de PZT foi colada na face da junta flangeada como ilustra a Fig. 3.3. Os quatro parafusos presentes na flange foram utilizados para o monitoramento, sendo aplicados os mesmos torques sobre cada um deles.

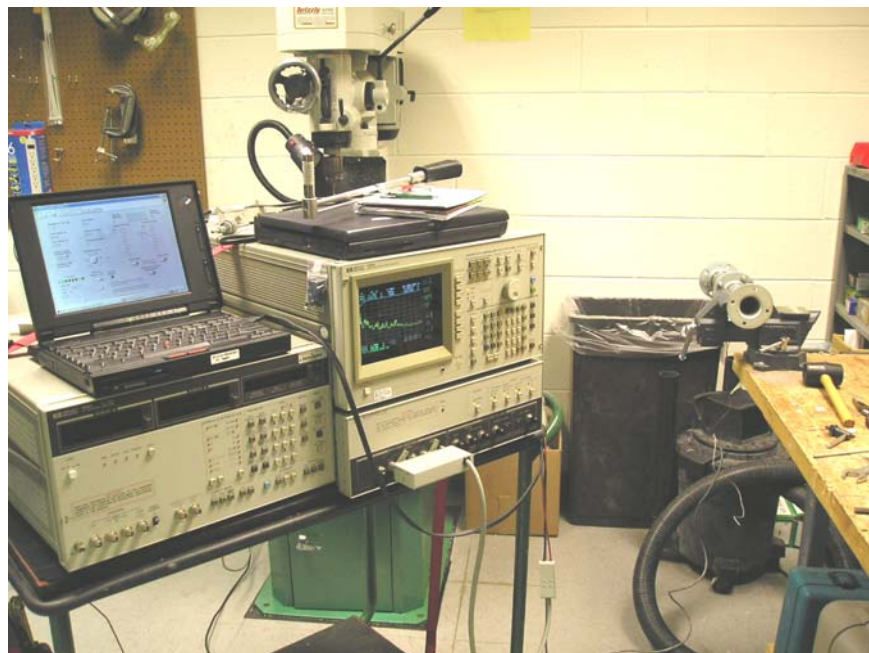


Figura 3.4 - Esquema de montagem do sistema de monitoramento e aquisição dos sinais

Para realizar o monitoramento e adquirir os sinais, foi utilizado um analisador de impedância HP4194A, associado a um laptop através de uma interface GPIB. Após uma etapa inicial de observação da sensibilidade dos sinais de impedância, foi adotada para o monitoramento a faixa de 115 a 125 kHz. Foram configurados também 1 Volt RMS de tensão, um conjunto de 16 médias para cada amostragem e um intervalo de integração médio do sinal.

Os ensaios descritos na Tab. 3.1 foram os utilizados para demonstrar a viabilidade de utilização da técnica de monitoramento da integridade eletromecânica em estruturas tubulares flangeadas.

Tabela 3.1 - Experimentos do ensaio com a tubulação flangeada.

Torque (Nm)	Repetição 1	Repetição 2	Repetição 3	Repetição 4
0	1	5	9	13
10	2	6	10	14
20	3	7	11	15
30	4	8	12	
18	Ensaio Teste 1			
22	Ensaio Teste 2			

Ao observar a Tab. 3.1, pode-se verificar que os ensaios foram feitos variando-se o torque nos quatro parafusos de 0 Nm até 30 Nm. Devido a uma melhor abordagem observada durante a fase de análise, foram adotados apenas os ensaios que foram grifados na tabela, excluindo-se os experimentos números 8 e 12. Isto se deve ao fato de inicialmente ter sido adotado o torque de 0 Nm como sinal de referência para cada caso. Após uma nova avaliação, foi percebido que o sinal de referência deveria ser o da estrutura em operação, isto é, aquele cujo torque corresponde a 30 Nm. Neste caso, considerou-se apenas um sinal de referência (experimento 4) na tentativa de se observar como todas as outras repetições se comportariam quando utilizado apenas um sinal de referência. Isto foi feito por dois motivos: primeiro, para caracterizar um coeficiente único que pudesse ser utilizado para várias configurações do sistema em estudo (assim cada repetição está associada a uma estrutura diferente); e, em segundo lugar, para representar o comportamento temporal da estrutura, uma vez que as repetições foram feitas em intervalos de tempo diferentes. Isto porque, num caso de aplicação real, o sinal de referência não deve ser reajustado a todo o momento.

Na Fig. 3.5 são apresentadas as métricas de tensão do sinal de impedância (parte real do sinal) para os experimentos da Tab. 3.1. É importante ressaltar que o termo métrica de tensão é uma adaptação da terminologia internacional utilizada por Moura Jr, Steffen Jr e Inman (2006) para representar a variação da tensão estrutural monitorada através da variação da impedância eletromecânica. Sua obtenção e análise é bastante semelhante à da métrica do dano, havendo apenas uma adequação ao uso da técnica em análise de tensões.

Com as barras da Fig. 3.5 fica óbvia a relação e a repetibilidade entre o torque aplicado nos parafusos e a parte real do sinal de impedância monitorado.

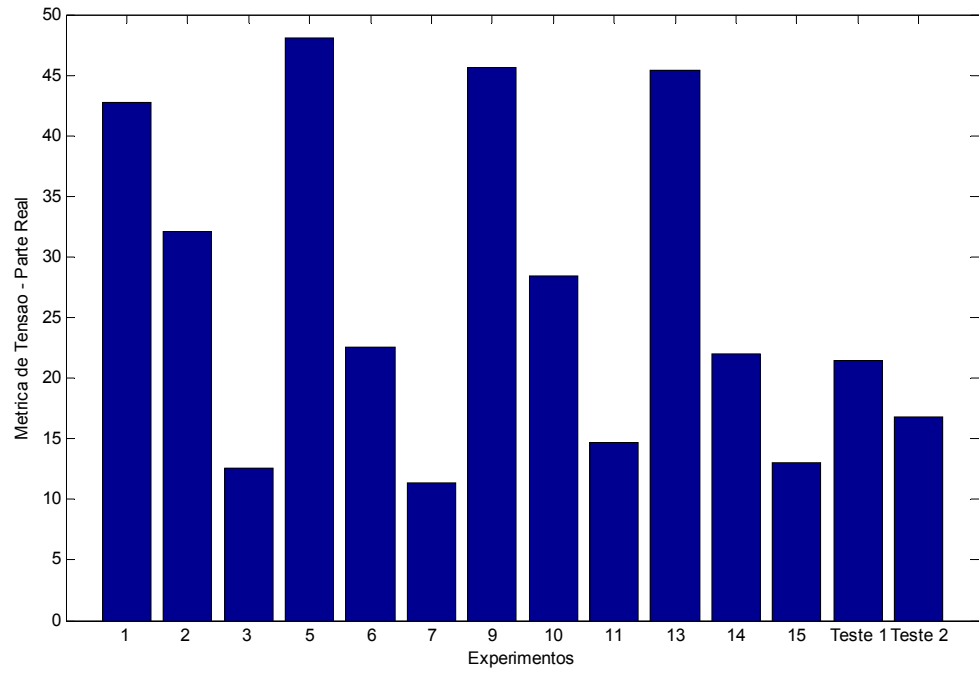


Figura 3.5 - Métrica da tensão da parte real da impedância da estrutura flangeada.

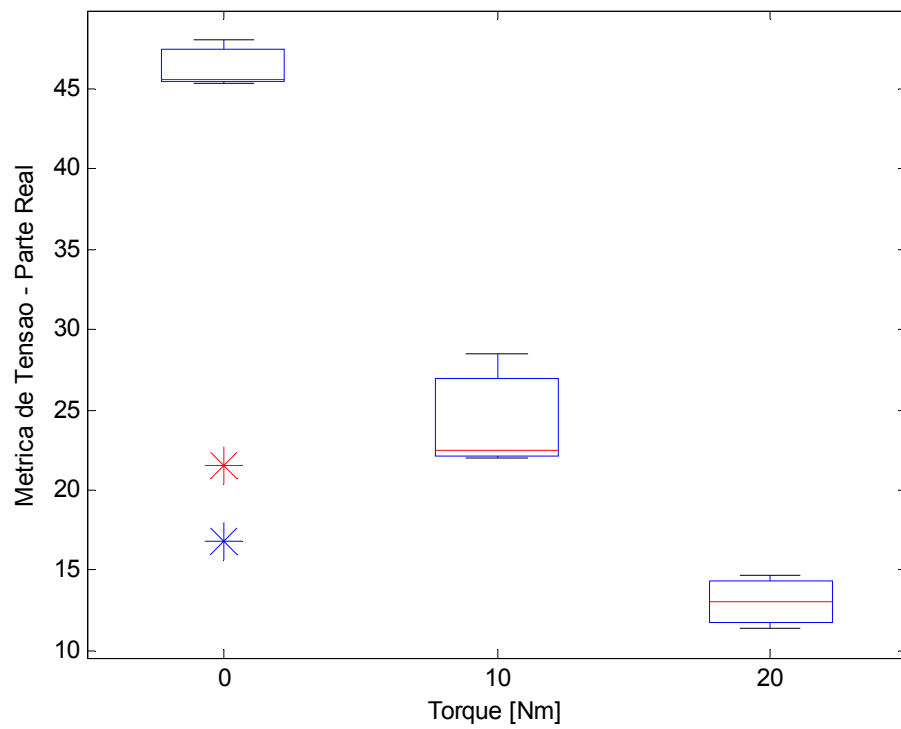


Figura 3.6 - Diagrama de caixa dos experimentos da estrutura flangeada – parte real.

Numa primeira avaliação, para facilitar o agrupamento das repetições dos experimentos, pode-se observar através do diagrama de caixa da Fig. 3.6, que as métricas de tensão para a parte real são independentes e, portanto, não podem ser confundidas entre si. Isto pode ser afirmado ao se observar que cada um dos grupos avaliados trabalha em uma faixa restrita e bem definida associada à parte real da impedância eletromecânica.

Os dois asteriscos mostrados no diagrama são os casos relacionados aos testes 1 (o de cima) e 2 (o de baixo). Nesta etapa, nenhum comentário será realizado quanto aos testes propriamente ditos.

A fim de que se possa ter mais informações sobre a impedância eletromecânica da estrutura em estudo, também foram adquiridos os sinais da parte imaginária. A Fig. 3.7 apresenta o gráfico de barras respectivo à métrica de tensão da parte imaginária do sinal de impedância.

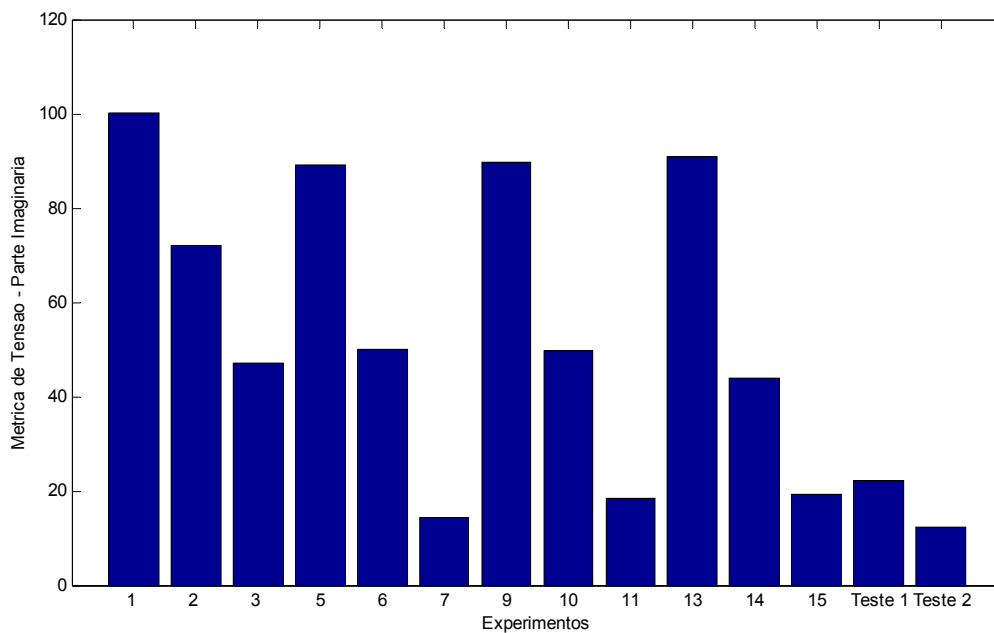


Figura 3.7 - Métrica da tensão da parte imaginária da impedância da estrutura flangeada.

O mesmo procedimento realizado para a parte real da impedância foi repetido para a parte imaginária para se visualizar as interfaces entre os torques e suas respectivas métricas de tensão. Novamente, os casos estudados obedecem à mesma representação e posições mostradas na Fig. 3.6.

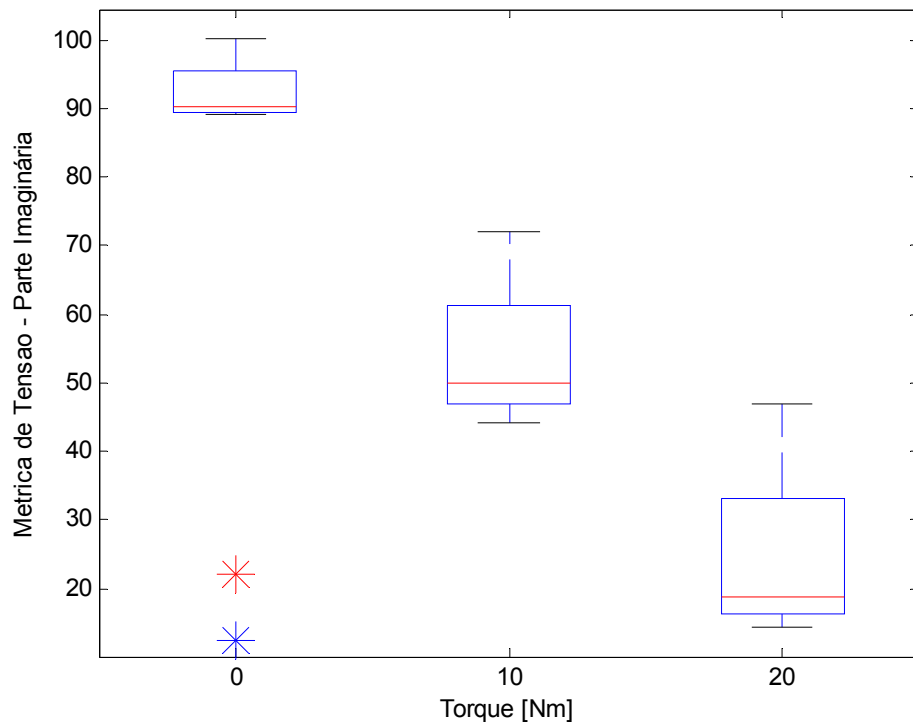


Figura 3.8 - Diagrama de caixa dos experimentos da estrutura flangeada – parte imaginária.

Ao se observar os diagramas de caixa da parte imaginária do sinal, percebe-se que uma variação de torque aplicado no flange de 10 Nm pode-se confundir com a de 20 Nm, por causa dos desvios elevados destes dois níveis quando se considera a parte imaginária. Entretanto, ao se observar o mesmo gráfico para a parte real, esta confusão não pode ser feita. Assim, pode-se especular numa primeira avaliação, que os sinais associados à parte real são mais aptos a serem utilizados para fins de monitoramento.

Entretanto, ao se interpretar as posições dos casos de teste para ambos os diagramas de caixa (partes real e imaginária, Figs. 3.6 e 3.8), pode-se perceber que, no caso do sinal real, uma confusão pode ser feita ao atribuir os dois casos de teste entre os torques de 10 e 20 Nm, tendendo principalmente ao de 10 Nm. Todavia, conforme observado na Tab. 3.1, isto não é verdade, pois os dois casos tratam, respectivamente, de 18 e 22 Nm. Ao se observar o diagrama de caixa para a parte imaginária, os dois casos de teste tendem ao caso de 20 Nm de torque, como esperado.

Com isto, procurou-se ilustrar um caso no qual, embora um tipo de sinal seja adequado para separar os casos amostrados para modelagem e reduzir os possíveis conflitos de divisão dos lotes de experimentos necessários para modelagem, o outro tipo de sinal pode ser ideal para auxiliar na tomada de decisões de casos de avaliação ou predição. É sempre importante lembrar que, quanto aos metamodelos experimentais, uma maior quantidade de informações

coerentes em termos dos experimentos e do mecanismo físico do objeto de estudo, sempre facilita o processo de diagnóstico e aumenta o potencial de representação adequada do problema.

Para finalizar a demonstração do uso da técnica do monitoramento estrutural via impedância eletromecânica em uma tubulação flangeada, foi feita uma metamodelagem dos sinais através de uma rede neural de base radial. Foram utilizadas as duas partes (real e imaginária) dos sinais de impedância para cada experimento. É importante salientar que, nestes casos, utiliza-se como parâmetros de entrada na rede as métricas de tensão, e não o sinal obtido diretamente através do experimento. A Fig. 3.9 apresenta a arquitetura da rede, onde são mostrados os dois parâmetros de entrada: a métrica da tensão das partes real e imaginária. Como são utilizados 12 experimentos para treinamento da rede, o número de neurônios na camada intermediária é 12. Por fim, como a resposta fornecida pela rede é apenas um valor de torque, o número de neurônios da camada de saída é apenas um.

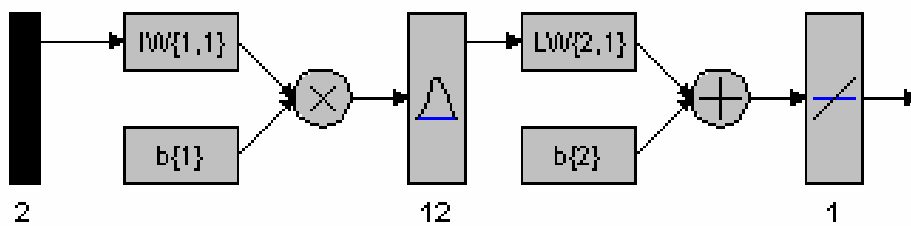


Figura 3.9 - Rede neural de base radial exata para a modelagem do sistema tubular.

Na Fig. 3.10 é apresentada a correlação entre o que foi medido experimentalmente e o que foi obtido através da previsão por rede neural de base radial. Os sinais marcados por “+” são os utilizados para a geração do modelo, ou seja, os casos repetidos da Tab. 3.1. Os pontos marcados por “*” representam os casos de teste. Com isto pode-se perceber que, utilizando a rede de base radial, a previsão para o torque em ambos os casos é de 20 Nm. Isto evidencia uma aproximação importante em relação aos valores reais. Isso significa que este metamodelo pode ser utilizado para previsão de torques nesta estrutura.

Com base nos experimentos realizados, nos procedimentos e nos seus resultados e em suas respectivas análises, pode-se concluir que a técnica de monitoramento estrutural baseado em impedância eletromecânica possui capacidade, ao menos em casos simplificados como o estudado aqui, de monitoramento do torque. Além disso, ao se aliar com técnicas de metamodelagem, configura-se a possibilidade de monitorar e prever o comportamento do sistema através de uma análise em tempo real.

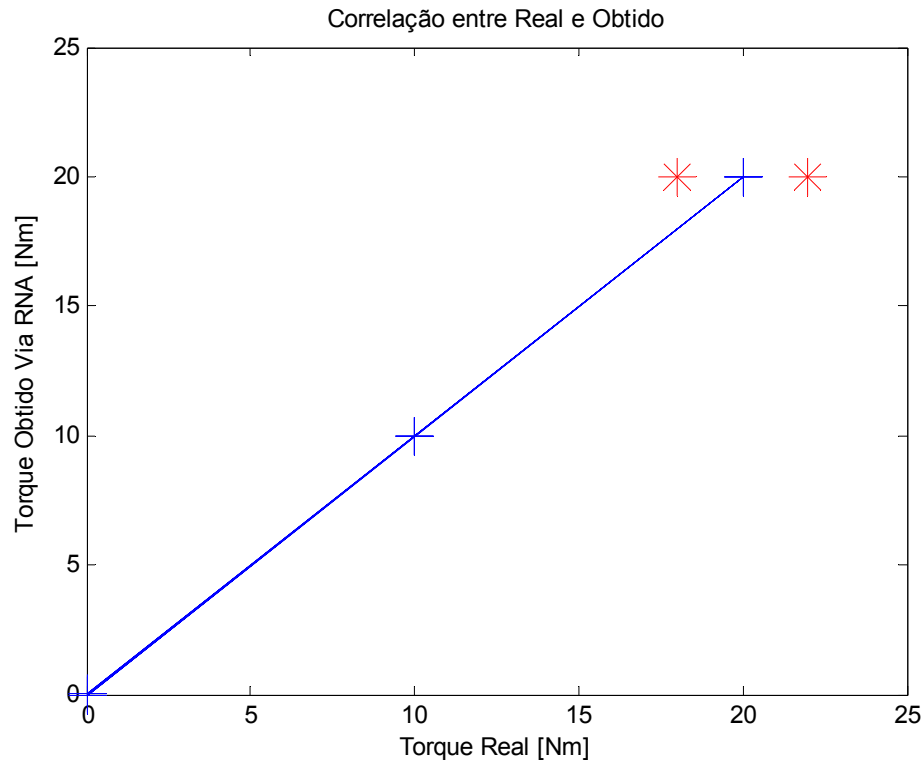


Figura 3.10 - Correlação entre o torque real e o obtido pela rede de base radial.

3.2 Soldas em Vigas

A soldagem, atualmente, é o método mais importante para junção permanente de metais (Marques, 1991). Isto se evidencia nas indústrias devido ao desenvolvimento de novas ligas mais fáceis de serem soldadas. Conseqüentemente, o processo de montagem passa a ser mais rápido, seguro e econômico, devido à redução de material.

A soldagem é a operação que busca a junção de peças, enquanto a solda é o resultado da operação (Marques, 1991). Existem várias denominações de junções de peças, sendo basicamente relacionadas à descrição da disposição topológica das mesmas. A Fig. 3.11 ilustra os tipos de junções geralmente utilizados. Neste trabalho, por se tratar apenas de uma análise de viabilidade de aplicação do monitoramento de integridade estrutural baseado em impedância eletromecânica, foi adotada apenas a junção de topo envolvendo duas vigas de aço.

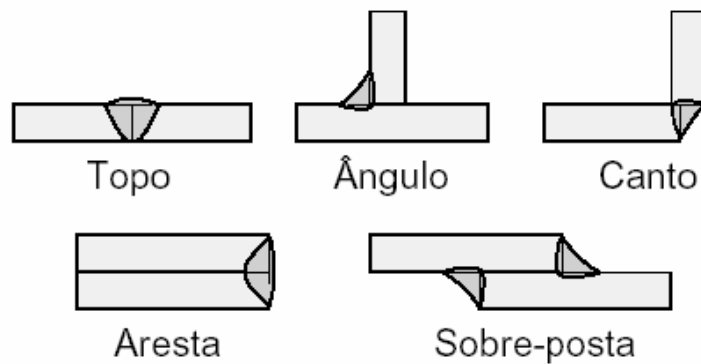


Figura 3.11 - Tipos de junções de peças (Marques, 1991).

Por vezes, são necessárias aberturas ou sulcos na superfície das peças a serem unidas, determinando o espaço a ser preenchido com o material da solda. Estas aberturas são denominadas chanfros. O tipo de chanfro utilizado é escolhido em função do processo de soldagem, a espessura das peças, dimensões e facilidade de remoção e dificuldade de acesso à região de soldagem (Marques, 1991). A Fig. 3.12 ilustra os principais tipos de chanfros utilizados. Neste trabalho, o tipo de chanfro utilizado foi o tipo I.

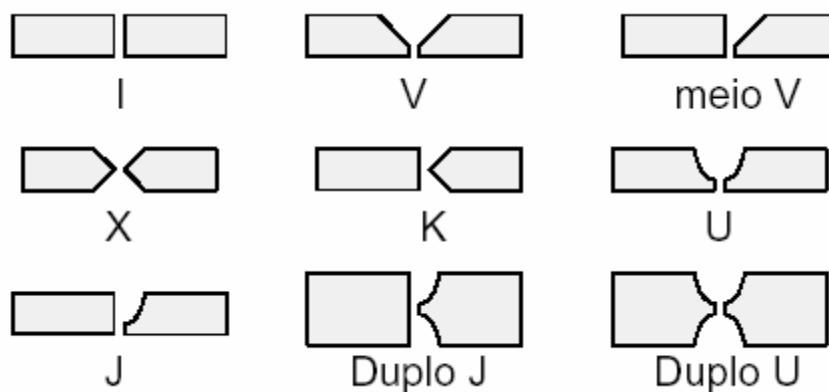


Figura 3.12 - Principais tipos de chanfros (Marques, 1991).

Um outro detalhe importante que pode influir na qualidade de uma solda é a forma do cordão de solda. Considerando que nos dois casos que serão avaliados aqui será utilizado a solda de topo, os principais tipos de cordões podem ser conforme ilustrado por Marques (1991) na Fig. 3.13. Nos dois casos realizados, o tipo I simples foi o adotado.

Quanto às posições para se realizar a soldagem, estas são apresentadas na Fig. 3.14 (Marques, 1991). Neste estudo optou-se pela soldagem plana.

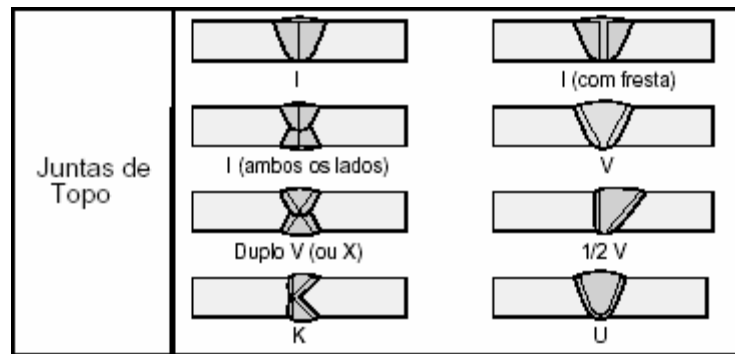


Figura 3.13 - Cordões de solda em juntas de topo (Marques, 1991).

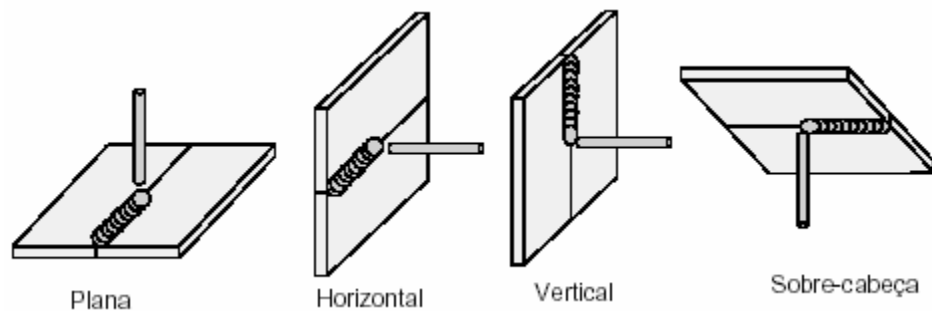


Figura 3.14 - Posições de soldagem (Marques, 1991).

Por se tratar de uma tecnologia que avança a cada dia, a soldagem possui várias metodologias, nas quais, a filosofia, o processo e os equipamentos se distinguem completamente ou, em alguns casos, as diferenças se mostram de forma bem sutil. No estudo em questão foi abordado o processo de soldagem TIG, uma vez que não se utiliza material de adição na soldagem, o que permite avaliar a variação do comportamento dinâmico estrutural sem ter que considerar mudanças de massa consideráveis. Um outro fato que levou à escolha desse processo foi o deste possuir características adequadas para aplicações nos segmentos aeronáutico e espacial, como será visto posteriormente.

Apesar da operação do processo TIG ser geralmente manual, o dispositivo utilizado é mecanizado, facilitando a homogeneidade da velocidade de deposição do cordão de solda.

O processo denominado GTAW (Gas Tungsten Arc Welding – Soldagem a Arco com Eletrodo não Consumível de Tungstênio e Proteção Gasosa), ou mais comumente, por TIG (Tungsten Inert Gas) é um processo de soldagem que visa a junção de peças metálicas através do aquecimento e fusão das partes, utilizando um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de tungstênio, não consumível, e as partes a serem unidas (Marques, 1991). Em alguns casos, o metal de adição pode também ser inserido no sistema. Ao mesmo tempo, uma proteção do arco e da poça de fusão contra a contaminação ambiental é feita por uma mistura de gases inertes. Uma figura esquemática desse processo é apresentada na Fig. 3.15.

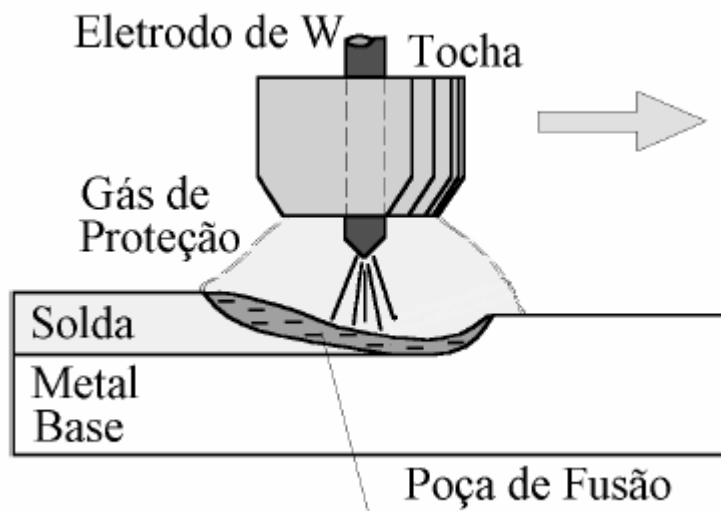


Figura 3.15 - Processo de soldagem TIG (Marques, 1991).

Este processo é bastante adequado para peças de pequenas espessuras, ao mesmo tempo em que também é indicado para materiais de baixa soldabilidade devido à proteção contra contaminação (Marques, 1991).

O conjunto de dispositivos utilizados para a soldagem TIG basicamente consiste de: fonte de energia elétrica, tocha apropriada para a soldagem, fonte de gás protetor, dispositivo ignitor para abertura do arco, além de cabos e mangueiras. A associação destes elementos pode ser vista na Fig. 3.16.

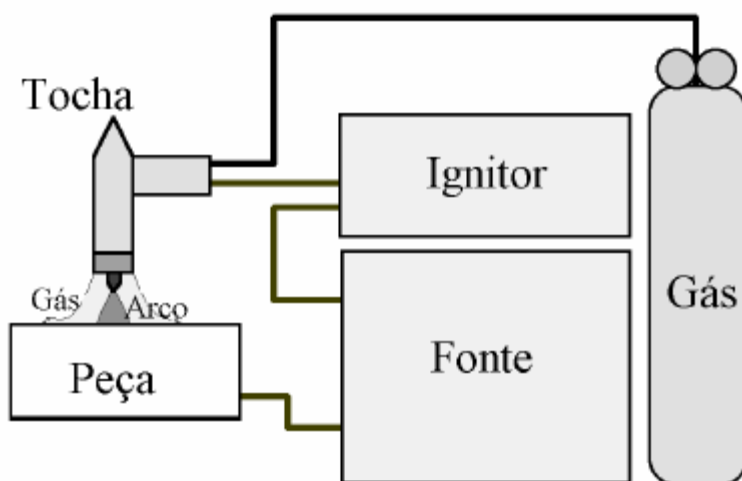


Figura 3.16 - Conjunto de dispositivos para o processo TIG (Marques, 1991).

A fonte de corrente elétrica pode ser do tipo corrente constante, ajustável, sendo contínua, alternada ou pulsada (Marques, 1991).

O principal consumível na soldagem TIG é o gás ou mistura de gases de proteção. Tais gases de proteção são inertes, principalmente o argônio, o hélio e suas misturas (Marques, 1991).

Para o processo de soldagem, algumas dicas podem ser obedecidas. A primeira, recomenda que se inicie a vazão de gás inerte alguns segundos antes da abertura do arco (pré-purga). Após essa ação, abre-se o arco com um ignitor de alta frequência ou substituto. Assim, aguarda-se um determinado tempo sem movimentar a tocha, a fim de se formar a poça de fusão. Ao atingir um tamanho adequado, dá-se início ao movimento de translação da tocha ao longo da junta. Ao terminar o comprimento da junta a ser soldada, extingue-se o arco pela abertura do circuito de soldagem, interrompendo a passagem de corrente. Entretanto, ainda com a tocha sobre a peça, mantém-se o fluxo de gás inerte por até 30 segundos (pós-purga). Isto reduz a contaminação do cordão pela atmosfera (Marques, 1991).

A posição da tocha durante a soldagem mecanizada é perpendicular ao plano da peça que é soldada. Porém, algumas variáveis surgem para cada caso de soldagem TIG. Estas variáveis operatórias são: comprimento do arco, corrente elétrica, velocidade de soldagem e vazão do gás de proteção (Marques, 1991).

Apesar de lento, o processo TIG é ainda dos poucos a soldar alguns tipos de ligas e algumas espessuras de peças. O processo apresenta controle rigoroso de calor cedido à peça, com uma produção relativamente lenta e cara, representando uma baixa produtividade (Marques, 1991).

Assim, as principais aplicações industriais deste processo são encontradas na união e costura de tubos de aços inoxidáveis, peças de alumínio, magnésio e titânio, principalmente em estruturas leves e de precisão, portanto, de maiores aplicações em campos como a aeronáutica e o aeroespacial (Marques, 1991).

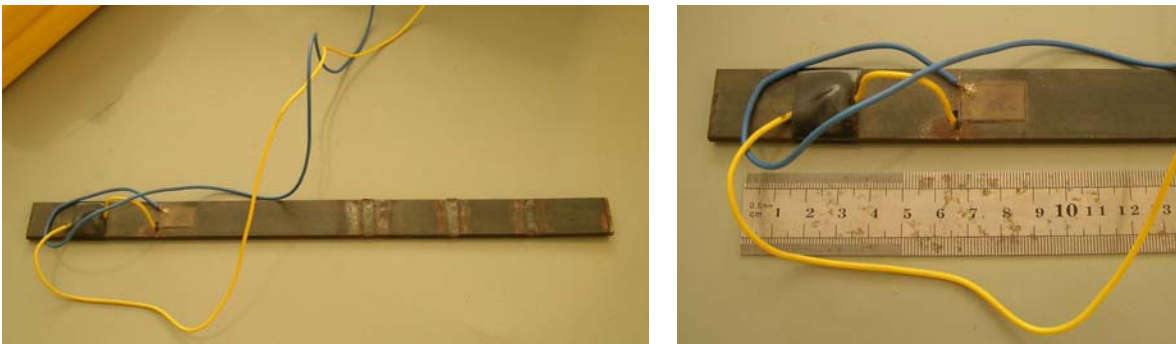
Utilizando os conceitos apresentados neste tópico, a idéia de aplicação da técnica da impedância eletromecânica é a de verificar se as respectivas assinaturas são diferentes em uma mesma estrutura que tenha sido soldada usando um mesmo processo de soldagem, porém com um parâmetro distinto do processo. Como parâmetro utilizado para distinguir entre duas soldas foi adotado o critério de se espaçar diferentemente as duas peças a serem unidas. Uma solda considerada “boa” foi feita sem espaçamento entre as peças, enquanto a solda “ruim” foi obtida quando as peças foram espaçadas de aproximadamente 1 mm.

Os parâmetros de monitoramento dos sinais de impedância foram: 32 médias internas do dispositivo, parte real do sinal de impedância, um Volt de amplitude RMS, tempo de integração *Short*.

As estruturas utilizadas nesta avaliação foram duas vigas de aço de baixo carbono, com geometrias de 340x25x5 mm.

Foi utilizado como sensor, uma pastilha de PZT com dimensões de 20x13x0,3 mm, que foi colada a 80 mm da ponta oposta em relação ao local onde foi realizada a solda. Dessa forma, a junção de solda foi feita a 200 mm do centro da pastilha de PZT, e feito um corte na barra, de forma transversal ao comprimento. A ponta separada foi restaurada pelo processo TIG.

A Fig. 3.17 apresenta uma das estruturas utilizadas nos experimentos.



a) Vista da estrutura

b) Detalhe de dimensão e pastilha PZT

Figura 3.17 - Viga utilizada para o processo de monitoramento de parâmetros de solda via impedância.

Para criar uma repetição de experimentos, visto que a soldagem é um processo irreversível, foram adotadas três faixas de frequência para o monitoramento das estruturas. Isto não significa que, necessariamente, nas três faixas o comportamento seja o mesmo e de mesma amplitude, mas serão utilizadas as repetições para reforçar comportamentos que possam ser observados em mais de uma região do espectro de frequência. As regiões observadas são as seguintes: 45 a 57 kHz, 58 a 68 kHz, e 58 a 77 kHz. Uma quarta faixa de frequência (40 a 50 kHz) foi avaliada para fins de constatação e validação do fenômeno, visto que, se para as séries anteriores apresenta-se um dado comportamento, o mesmo deverá ser obedecido também nesta faixa.

Os ensaios realizados para a compreensão do comportamento das estruturas após o processo de soldagem são apresentados na Tab. 3.2.

As Figs. 3.18 a 3.21 ilustram a parte real dos sinais de impedância, tanto para a solda considerada boa quanto para a ruim, comparando-as com as duas estruturas sem solda.

Tabela 3.2 - Experimentos para o processo de monitoramento de qualidade de soldas

Número do Ensaio	Banda de Frequência Amostrada [45-57/58-68/58-77] [kHz]	Estrutura [Viga 1/Viga 2]	Viga Soldada [Sim/Não]
1	45-57	Viga 1	Não
2	58-68	Viga 1	Não
3	58-77	Viga 1	Não
4	45-57	Viga 2	Não
5	58-68	Viga 2	Não
6	58-77	Viga 2	Não
7	45-57	Viga 1	Sim
8	58-68	Viga 1	Sim
9	58-77	Viga 1	Sim
10	45-57	Viga 2	Sim
11	58-68	Viga 2	Sim
12	58-77	Viga 2	Sim
Aux1	40-50	Viga 1	Não
Aux2	40-50	Viga 1	Sim
Aux3	40-50	Viga 2	Sim

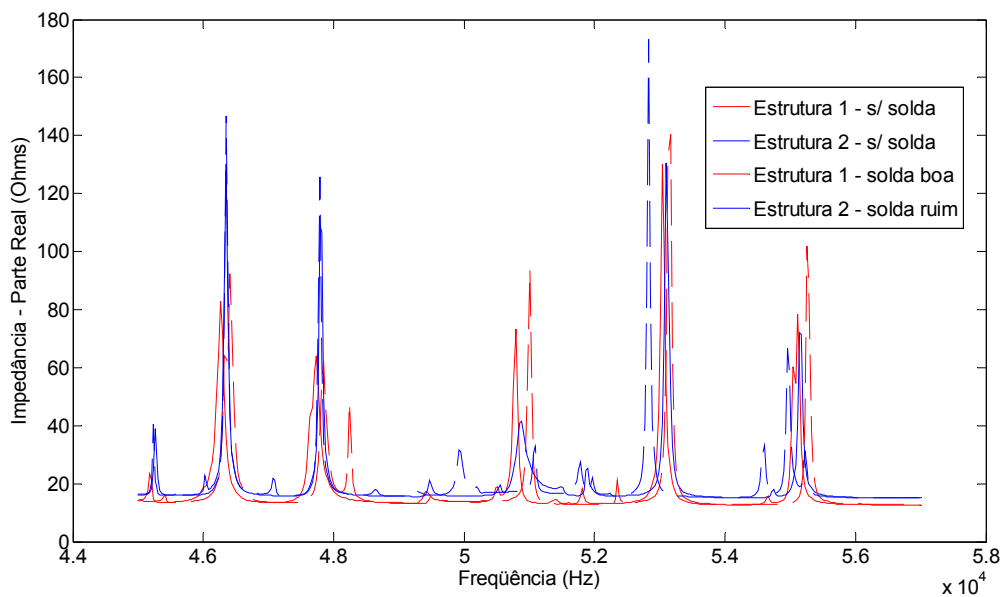


Figura 3.18 - Faixa de frequência de 45 a 57 kHz.

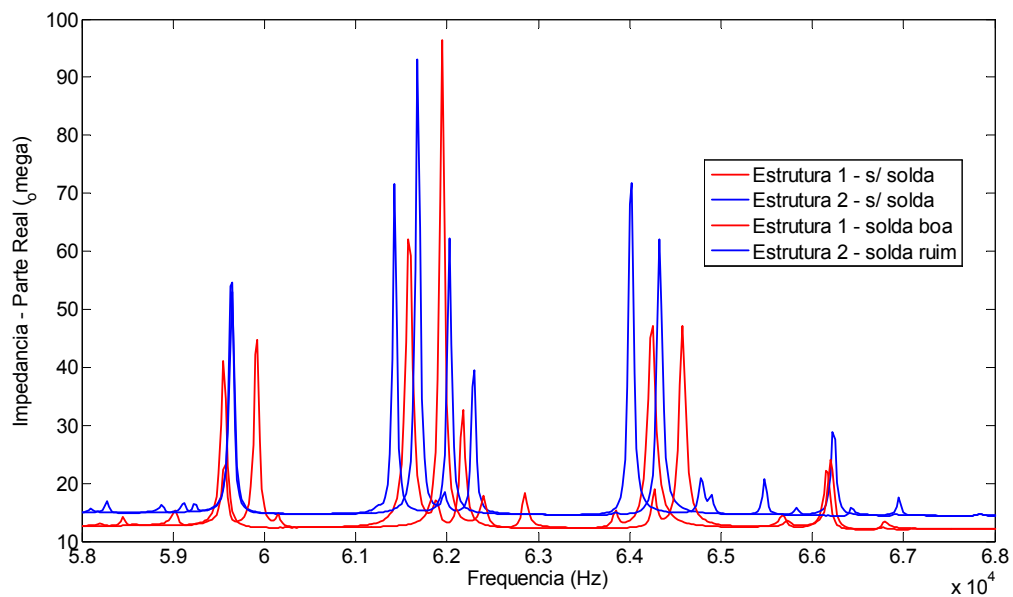


Figura 3.19 - Faixa de frequência de 58 a 68 kHz.

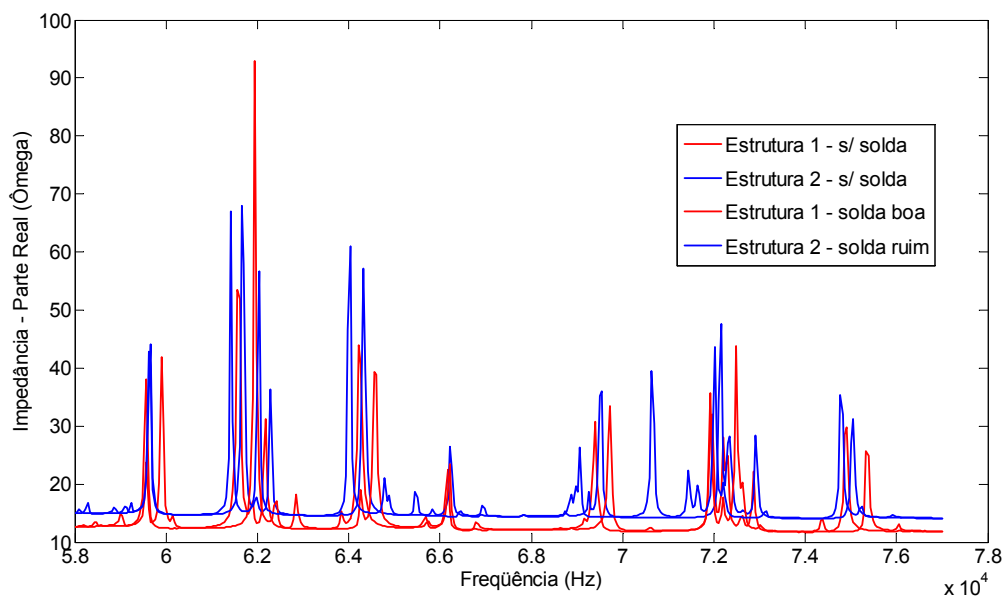


Figura 3.20 - Faixa de frequência de 58 a 77 kHz.

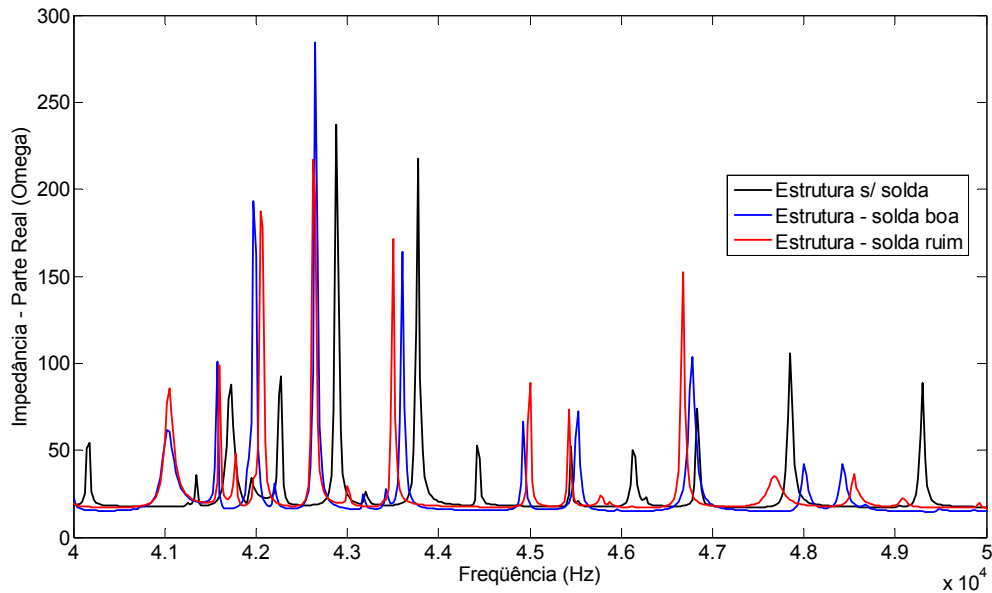


Figura 3.21 - Faixa de frequência de 40 a 50 kHz para os ensaios auxiliares.

Ao se observar a Fig. 3.21, pode-se ter dificuldade em identificar os diferentes sinais relacionados à estrutura com e sem solda. Para facilitar a compreensão do fenômeno em estudo, sejam considerados os três valores abaixo das métricas utilizadas:

$$\text{Maux2} = 1.833012288208466\text{e}+002$$

$$\text{Maux3} = 1.742745170415215\text{e}+002$$

$$\text{Maux2e3} = 1.314156429876355\text{e}+002$$

Maux2 é a métrica de tensão que compara o sinal da solda boa com a estrutura sem solda, Maux3 é a métrica de tensão que compara o sinal da solda ruim com a estrutura sem solda, e Maux2e3 é a métrica de tensão que compara o sinal da solda boa com a solda ruim. Pode-se perceber, pelo decaimento dos valores mostrados, que embora a solda boa apresente um sinal com diferença mais visível do sinal relacionado à solda ruim, a diferença entre os dois sinais com as estruturas soldadas ainda é o menor. Isto indica que facilmente uma estrutura poderia ser identificada como soldada ou não pelo simples monitoramento de sua impedância eletromecânica.

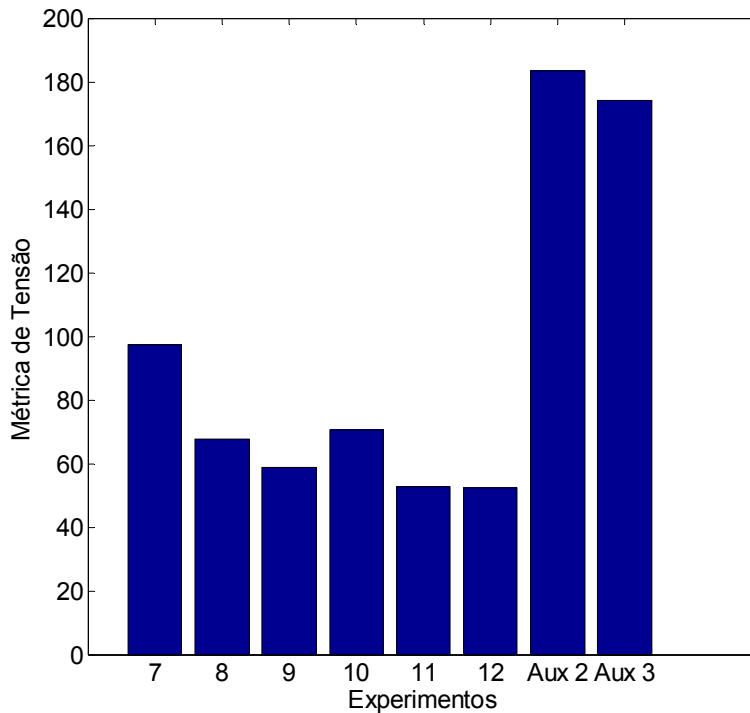


Figura 3.22 - Métrica de tensão para os ensaios de soldagem.

Após terem sido realizados os experimentos, foi adotado o critério já consagrado da obtenção da métrica do dano apresentado no capítulo 2. Entretanto, como não se trata propriamente de um dano, mas de uma alteração estrutural, tem sido utilizado o termo métrica de tensão, assim como na seção anterior.

Ao serem avaliadas as métricas de tensões apresentadas na Fig. 3.22, pode-se observar claramente o efeito de redução desta métrica, em todas as faixas de frequência, quando a distância entre as peças a serem unidas são iguais a 1,0 mm. Isto significa que, para todas as faixas de frequência, o sinal da estrutura íntegra é se assemelha mais ao da solda ruim do que da solda considerada boa. Fisicamente, este processo ainda não possui uma explicação, mas pode-se especular que isso tem a ver com a variação da tensão residual na estrutura. Ou seja, no caso da solda boa, como não há espaço vazio para acomodar as deformações devido à variação de temperatura, seu aumento de volume acaba provocando uma variação de tensão superior ao encontrado na estrutura soldada para o caso com solda ruim (1mm de espaçamento entre as partes). Esta se deforma mais facilmente e evita o aumento da tensão provocada pela soldagem. Este ponto merece estudos posteriores.

Para comprovar este processo de reconhecimento que pode ser feito ao observar a Fig. 3.22, foi construída uma rede neural de base radial para representação do sistema e reconhecimento do padrão de solda, como ilustra a Fig. 3.23. Entretanto, é necessário ressaltar

que, neste caso, um conjunto de dados muito pequeno foi utilizado, o que poderia ser naturalmente ampliado no caso de uma aplicação real.

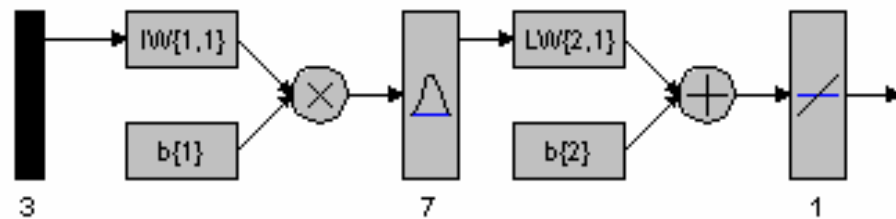


Figura 3.23 - Rede neural de base radial para identificação da qualidade de solda

Como mostrado na Fig. 3.23, a camada de entrada é composta por três neurônios (frequência de início da banda, largura da banda de frequência e métrica de tensão) que representam as variáveis independentes do metamodelo. Os sete neurônios da camada oculta apresentam os sete casos considerados para o treinamento da rede, sendo os seis primeiros do gráfico de barras da Fig. 3.22. Na camada de saída, o neurônio retorna a distância, em milímetros, entre as duas peças que foram soldadas.

Foi desta forma testado o último experimento apresentado na Fig. 3.22, para o qual foram fornecidos como parâmetros de entrada na rede: frequência inicial – 40 kHz; largura de banda – 10 kHz; métrica de tensão - $1.742745170415215e+002$. O retorno da rede, para o qual se esperava o valor de 1.0, foi de 1.00000000000335 mm, ou seja, um erro da ordem de $3.346e-10\%$. Trata-se, evidentemente, de um erro cujo valor numérico é desprezível.

Com isto, espera-se ter demonstrado o potencial de utilização da técnica de monitoramento de integridade estrutural, associada à metamodelos, como o utilizado aqui, baseado em redes neurais de base radial de precisão exata, para a investigação de padrões de qualidade de cordões de soldas nas indústrias de grande responsabilidade, principalmente para os setores aeronáutico e espacial. Entretanto, não é este o foco principal deste trabalho. Procurou-se apenas revelar algumas possíveis aplicações da técnica. Modelos mais sofisticados contemplando outras características do processo de soldagem, assim como um conjunto estruturado com várias repetições e exemplos, devem ser considerados, com a intenção de promover um estudo mais detalhado e específico.

3.3 Variações de Tensões

Um importante tópico para o monitoramento de integridade estrutural é o de monitorar, através do sinal de impedância, tensões aplicadas em peças e componentes estruturais. Com isto, pode-se, por exemplo, avaliar se um trem de pouso de uma aeronave sofreu um choque tão brusco durante uma aterrissagem que seu limite de escoamento tenha sido alcançado. Um

outro importante aspecto do monitoramento de tensão em estruturas pela análise de impedância é o de se associar as matrizes de danos ao sinal de impedância eletromecânica, permitindo assim avaliar a evolução do dano em uma estrutura até a fratura. Um trabalho inicial e interessante sobre este tópico é apresentado em Pereira Jr (2004).

Neste trabalho será apresentada uma visão inicial sobre o processo de monitoramento da impedância em corpos de prova de alumínio usados em ensaios de tração. A intenção é poder relacionar os dois parâmetros (sinal de impedância e tensão), tornando possível acompanhar a variação da tensão pela análise da impedância eletromecânica.

A estrutura monitorada pode ser vista na Fig. 3.24, que representa um corpo de prova padrão (lâmina) para ensaio de tração de alumínio.

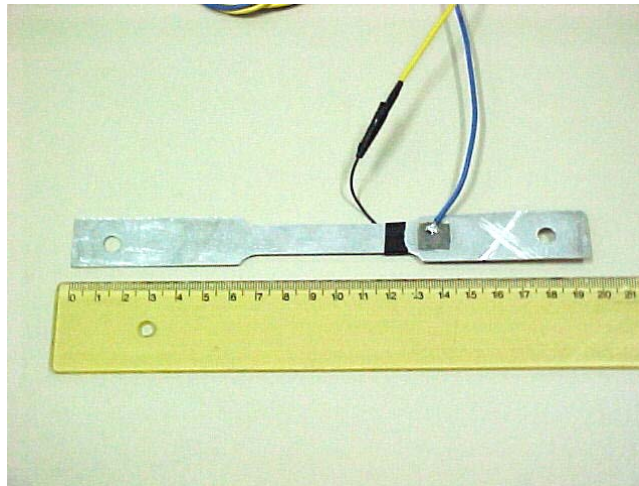
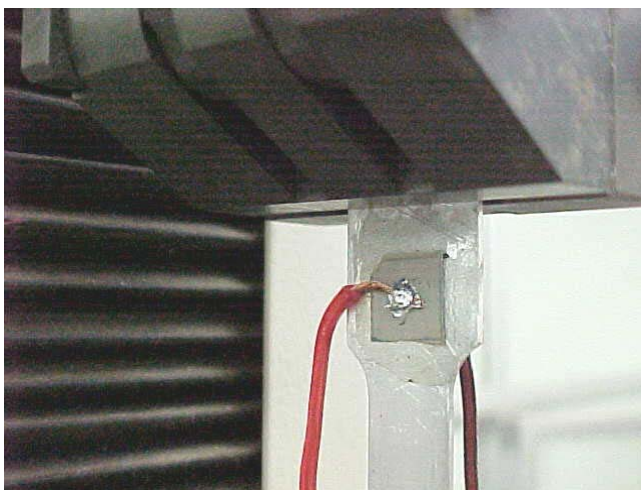
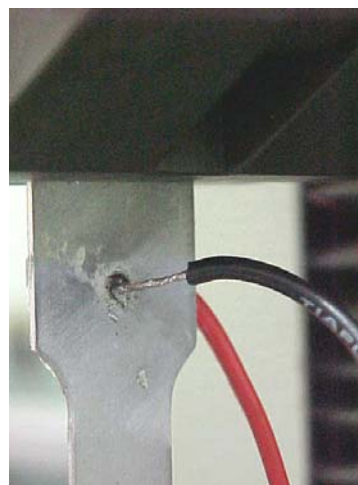


Figura 3.24 - Corpo de prova de alumínio utilizado nos ensaios.



a) detalhe do sensor e do início da ruptura



b) detalhe da solda inferior da pastilha

Figura 3.25 - Detalhes da pastilha de PZT colada nos corpos de prova.

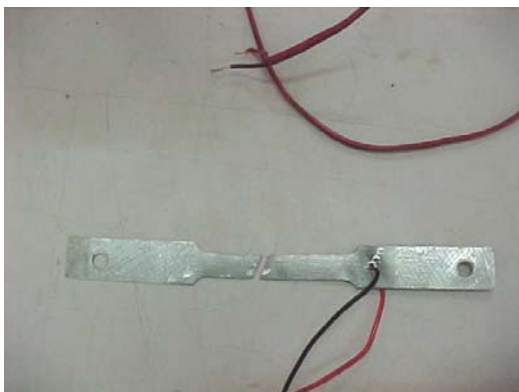
Foram utilizados como sensores pastilhas de PZT com dimensões de 10x10x0,3 mm, sendo colados um em cada corpo de prova, fora da região de ruptura do ensaio, como pode ser visto no detalhe da Fig. 3.25a, onde se observa o início da ruptura em local próximo ao estreitamento do corpo de prova. Os detalhes da soldagem podem ser vistos nas Figs. 3.25a e 3.25b.

A Fig. 3.26 apresenta um corpo de prova sendo tracionado pela máquina de ensaios, demonstrando o sentido de aplicação dos esforços.



Figura 3.26 - Máquina de ensaios de tração e corpo de prova em condições de teste

Conforme pode ser observado nas Figs. 3.27a e 3.27b, os ensaios foram realizados com sucesso, mostrando o efeito do rompimento dos corpos de prova de uma forma dúctil. Este aspecto fica mais evidente na Fig. 3.27b, ao observar-se a forma de cálice na região de ruptura.



a) visão geral de uma ruptura do corpo de prova



b) detalhe sobre a ruptura dúctil do corpo de prova

Figura 3.27 - Detalhes da ruptura do corpo de prova de alumínio.

Quanto ao monitoramento dos sinais de impedância, foi utilizado um analisador de impedância HP4194A conectado diretamente aos corpos de prova conforme ilustra a Fig. 3.28.



Figura 3.28 - Montagem do sistema de monitoramento de impedância durante ensaios de tração.

O sistema foi configurado na faixa de frequência de 10 a 25 kHz, sinal Re (parte real da impedância), um Volt RMS, 16 médias internas e intervalo de aquisição *Short*. A partir da deformação de 2.8mm foi aumentado o número de médias para 64 devido ao aumento de ruído no experimento.

Foram feitos aproximadamente 20 experimentos, sendo porém avaliados apenas dois destes, conforme será visto a seguir. O motivo de uso de apenas dois destes experimentos será apresentado posteriormente.

Os experimentos foram realizados iniciando com uma pré-carga sem deformação e prosseguindo até a completa ruptura da estrutura. A cada 0,2 mm de deformação uma aquisição do sinal de impedância foi realizada. Em ambos os casos percebeu-se um deslocamento nos picos máximos de frequência na banda avaliada, sendo que, ao aumentar-se a tensão, os picos se deslocavam para a direita, isto é, as frequências também aumentavam.

Para o primeiro corpo de prova, a Fig. 3.29 apresenta a deformação aplicada pela variação das posições dos picos de máxima amplitude.

Assim, como mostra a Fig. 3.29, como no início do ensaio (valores de deformação menores que 0.6 mm) os valores encontrados não podem ser considerados, assim como ocorre na parte final do teste (ruptura da estrutura), pode-se obter uma curva usando apenas o restante dos pontos. Esta curva representa a evolução dos sinais de impedância ao longo dos ensaios de tração.

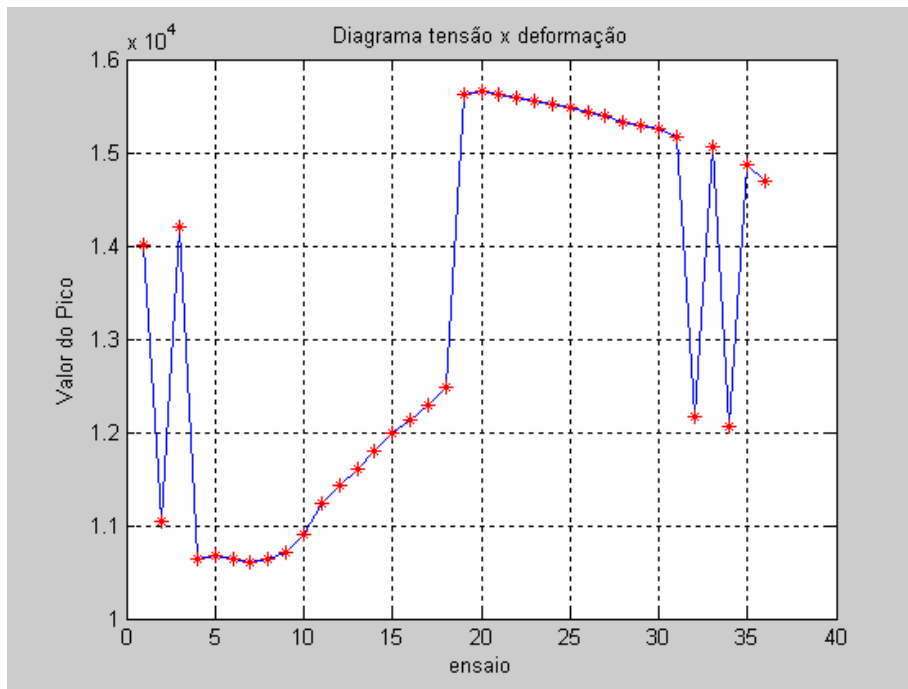


Figura 3.29 - Diagrama da deformação x valor de pico para o corpo de prova 1.

Portanto, este gráfico nos informa que ao longo da evolução do ensaio de tração, de 0 a 7.0 mm de deformação, desprezando os termos iniciais e finais, como já comentado, a impedância aumenta com o acréscimo da tensão. Quando se chega na fase plástica, ocorre o início da ruptura (com o correspondente decréscimo da tensão), sendo que o mesmo ocorre com a frequência (o valor do pico máximo que estava se deslocando para a direita, ou seja, aumentando, começa a reduzir, caminhando agora para a esquerda).

Para se fazer uma análise direta da medição do pico de impedância de um determinado objeto (no caso em análise, trata-se do corpo de prova de alumínio e, para outras estruturas, deve-se realizar o mesmo procedimento de avaliação da evolução da tensão), e determinar-se a sua tensão equivalente de uma forma imediata através de um gráfico, por exemplo, é necessário se associar aos pontos válidos da impedância as tensões equivalentes, como mostra a Fig. 3.30.

Na Fig. 3.30 pode-se perceber a evolução inicial do deslocamento (fase elástica possui uma grande variação da tensão) entre os picos de impedância. Por outro lado, na região plástica (os 4 pontos que estão marcados no gráfico entre aproximadamente 1.2 e 1.3), o deslocamento das frequências para os picos máximos de impedância não é grande (o deslocamento é pequeno). Ao final de uma tensão contínua no gráfico, pode-se perceber a regressão da tensão devido à estrição do corpo de prova. Nesta figura estes pontos também invertem o sentido de evolução (os valores das frequências dos picos de impedância estavam aumentando, mas começam então a diminuir), devido ao decréscimo do sinal de tensão.

Nestes pontos, uma curva é obtida talvez pelo fato da estrição reduzir a área e a tensão não ser a tensão real neste corpo de prova nestas situações. Para melhorar a análise, uma sugestão seria a de tratar cada uma destas regiões de forma separada. Assim, serão realizadas regressões independentes para estas duas regiões, visando obter curvas ou metamodelos para cada uma destas regiões ou domínios de análise, separadamente.

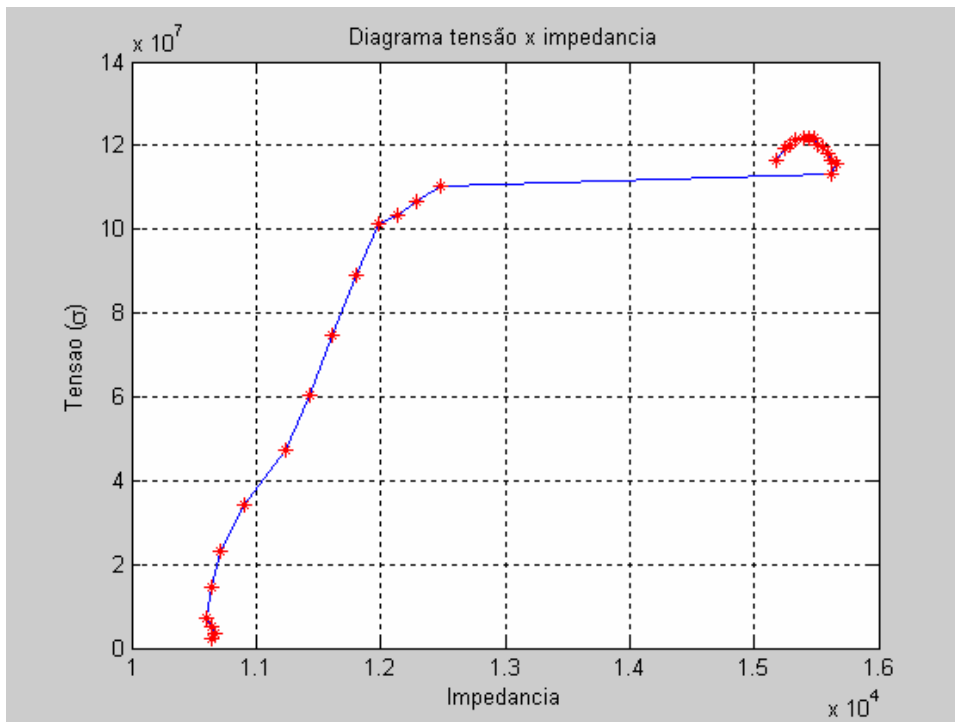


Figura 3.30 - Diagrama da frequência do pico máximo da impedância x tensão aplicada.

Tudo que foi realizado para o corpo de prova # 1 também o foi para o # 2. O mesmo comportamento foi observado nos dois, apesar das escalas não serem as mesmas, não permitindo, assim, que um modelo global direto, envolvendo os dois experimentos, seja construído. Apesar disso, pelo mesmo comportamento, pode-se fazer modelos para cada experimento e assim, fazer-se uma observação de forma qualitativa, já que o comportamento é assintótico. Para se chegar a alguma conclusão para um modelo geral sobre o alumínio, devem ser realizados uma variedade de experimentos (valor que poderia ser estipulado via teste de hipóteses ou levantamento do número de amostras baseado no desvio padrão destes dois experimentos).

Assim, a Fig. 3.31 apresenta a variação da deformação pela frequência do pico máximo para o corpo de prova # 2. Como observado, o comportamento é similar ao apresentado pelo corpo de prova # 1.

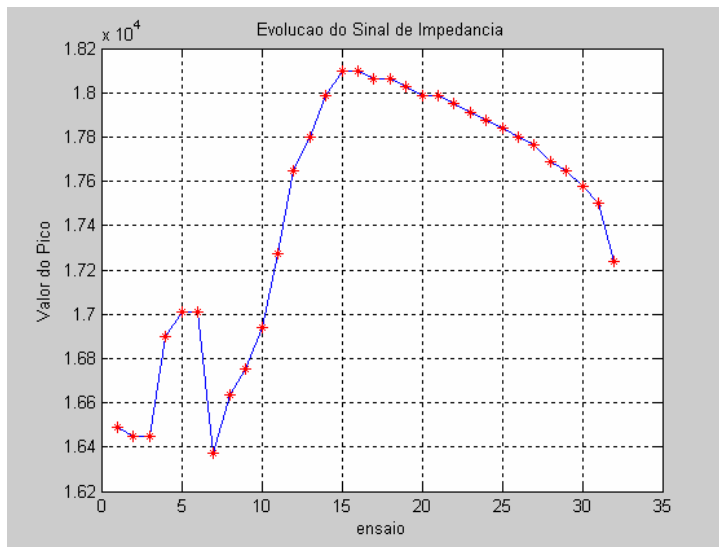


Figura 3.31 - Diagrama da deformação x valor de pico para o corpo de prova # 2.

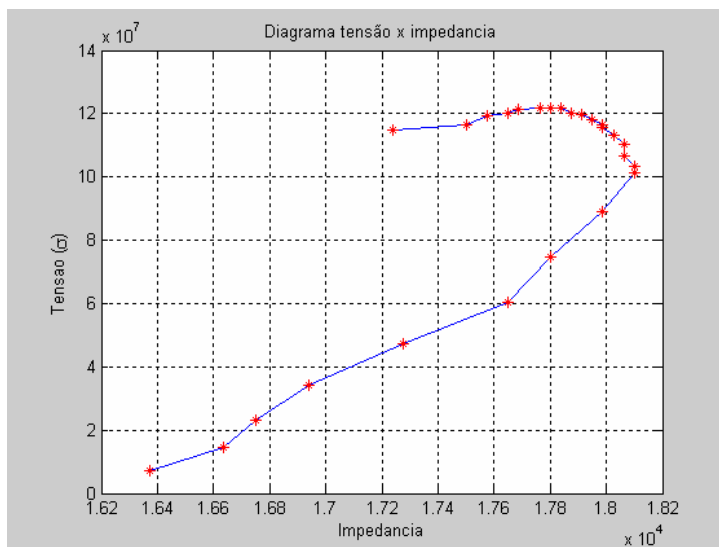


Figura 3.32 - Diagrama da frequência do pico máximo da impedância x tensão aplicada do corpo de prova # 2.

Ao se associar os valores dos picos máximos para cada ensaio com os valores de tensão aplicados ao corpo de prova # 2, obtém-se a Fig. 3.32, configurando um resultado similar ao encontrado para o corpo de prova # 1.

Para se gerar metamodelos representativos do comportamento do sistema, foi adotado o método das superfícies de resposta, devido à simplicidade de construção, baixo número de pontos necessários e comportamento de baixa ordem (linearidade). Além disso, o metamodelo usado neste caso possui apenas uma variável independente.

Os ensaios de cada corpo de prova foram divididos em duas regiões, a saber: linear (região elástica) e curva (região plástica), gerando-se então os metamodelos correspondentes para cada condição.

A Fig. 3.33 apresenta a região elástica para o primeiro corpo de prova. A notação utilizada aqui é que a linha azul contínua, com asteriscos em cada ponto amostrado, representa a tensão obtida pelo metamodelo, enquanto que a linha vermelha tracejada contém os valores reais obtidos pelo experimento.

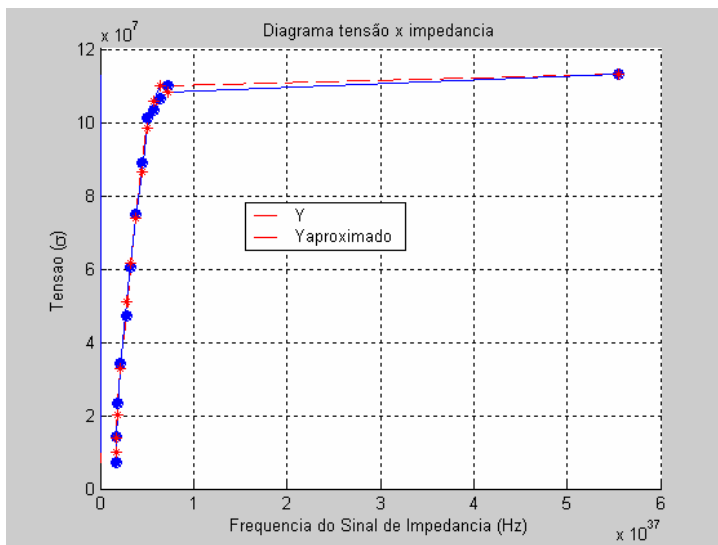


Figura 3.33 - Metamodelagem da região elástica do corpo de prova # 1.

Para a segunda região do corpo de prova # 1, as duas curvas representando os valores reais e do metamodelo podem ser observadas na Fig. 3.34.

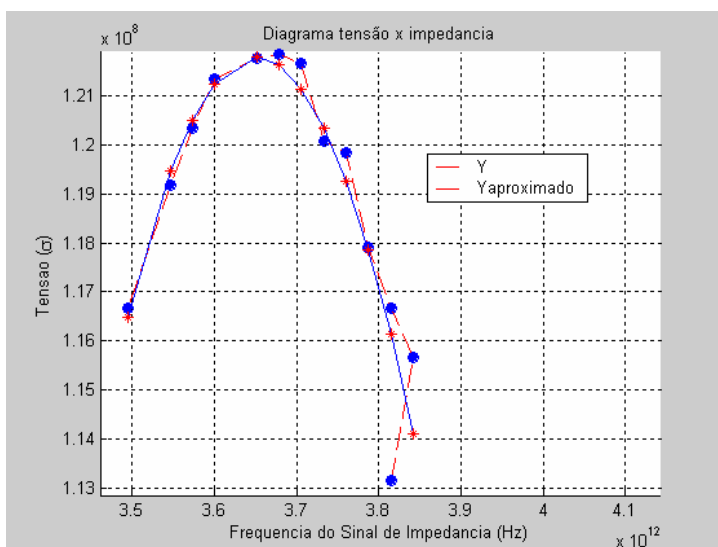


Figura 3.34 - Metamodelagem da região plástica do corpo de prova # 1.

Da mesma forma que realizado para o corpo de prova # 1, o mesmo foi feito para o corpo de prova # 2. Como pode ser verificado nas Figs. 3.35 e 3.36, a aproximação dos valores obtidos pelo metamodelo em relação aos valores reais obtidos nos ensaios é bastante satisfatória, tanto para a fase elástica como para a fase plástica.

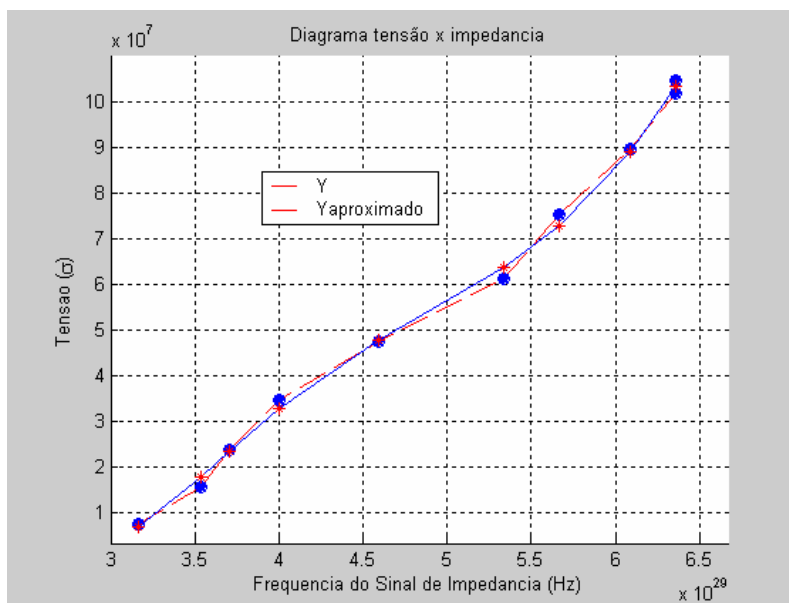


Figura 3.35 - Metamodelagem da região elástica do corpo de prova # 2.

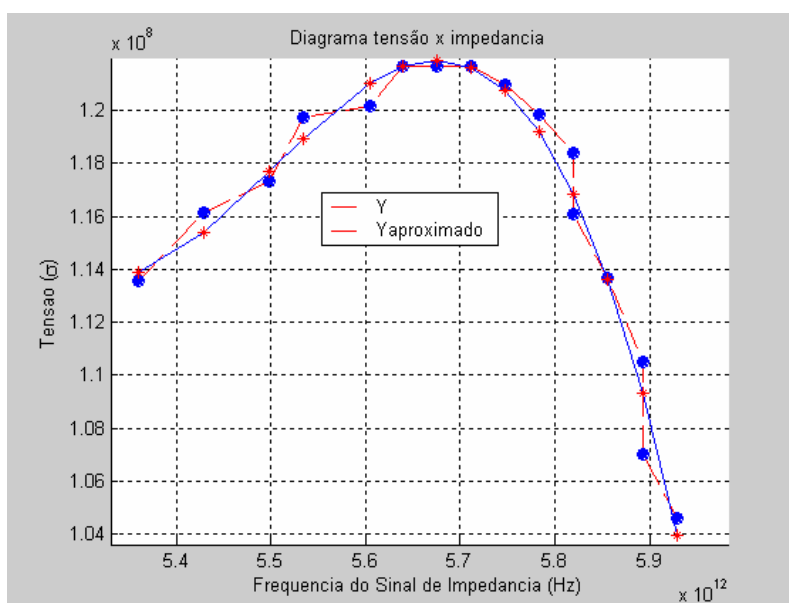


Figura 3.36 - Metamodelagem da região plástica do corpo de prova # 2.

Neste capítulo foi apresentada uma modelagem do monitoramento dos ensaios de tensão via monitoramento da impedância eletromecânica observando-se o deslocamento dos picos máximos de frequência. Uma outra abordagem que pode ser utilizada é a de se trabalhar com métricas de tensão, como realizado nas duas últimas seções. Neste caso, o sinal de

referência da estrutura seria a própria condição com pré-carga. Esta nova abordagem será explorada no capítulo 6, quando do estudo do monitoramento da tensão estrutural, usando sinais de impedância, de uma estrutura aeronáutica.

Sobre os experimentos realizados, é importante comentar que um problema que merece especial atenção foi observado. Em muitos casos estudados, houve descolamento das pastilhas de PZT antes do término do ensaio (ruptura). Isto se deve ao fato da deformação da estrutura ser capaz de provocar descolamento por cisalhamento do sensor, inserindo uma grande quantidade de ruído ao se aproximar da zona de ruptura. Alguns experimentos foram também realizados com materiais compósitos, que, apesar de apresentarem comportamentos semelhantes aos aqui mostrados, não foram mostrados uma vez que não são objeto deste trabalho.

Capítulo IV

SISTEMA REMOTO DE MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL BASEADA EM IMPEDÂNCIA

O objetivo maior deste capítulo é o de apresentar uma abordagem ainda em caráter experimental de monitoramento remoto utilizando uma das técnicas mais viáveis para esse fim, qual seja, aquela baseada em sinais de impedância eletro-mecânica. Neste estudo de caso foi utilizado o analisador de impedância HP4194A, mas outros dispositivos, especialmente os portáteis, poderiam ser adaptados para a transmissão de sinais e avaliação remota. O caso em questão elabora uma oportunidade de se criar um *benchmarking* da área de SHM e proporcionar melhores especulações futuras em um ambiente variável para múltiplas estruturas e situações de uso.

O modelo inicial proposto neste trabalho também pode ser modificado quanto à tecnologia empregada, podendo alterar desde os fundamentos, trabalhando com linguagens orientadas a objeto, até com algumas tecnologias com grande potencial de aplicação. Como exemplo disso, pode-se citar a possível substituição dos sinais *wi-fi* por *bluetooth*, ou ainda, a utilização de ondas de rádio para a comunicação simples utilizando o DTMF (*Dual Tone Multifrequencial*) que equivale aos telefones de tons atuais. Entretanto, a imensa possibilidade de combinações não será aqui explorada para não perder o objetivo deste capítulo que é simplesmente o de fazer a proposição de um mecanismo de monitoramento remoto para uso no monitoramento de integridade estrutural.

4.1 Visão Geral do Sistema

Para o desenvolvimento do sistema de monitoramento remoto baseado em sinais de impedância eletro-mecânica, várias tecnologias em conjunto são utilizadas para que se torne o processo como um todo viável e funcional. Assim, uma visão geral do sistema pode ser observada na Fig. 4.1. A situação apresentada a seguir representa um caso real.

Inicialmente, o processo de monitoramento tem início no Bloco 10 do campus Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia. O primeiro passo para a construção de um sistema remoto de monitoramento é o de adquirir o sinal de uma estrutura em avaliação. Para a aquisição do sinal, foi utilizado um analisador de impedância HP4194A com interface GPIB-

USB para se comunicar com um *laptop* local, no mesmo ambiente onde a estrutura se encontra.

Para realizar a comunicação com o equipamento, um programa em linguagem C foi criado, utilizando a interface GPIB (protocolo IEEE 488). Parte do código em linguagem C utilizado para a aquisição dos dados está apresentada na Listagem 4.1, como ilustração.

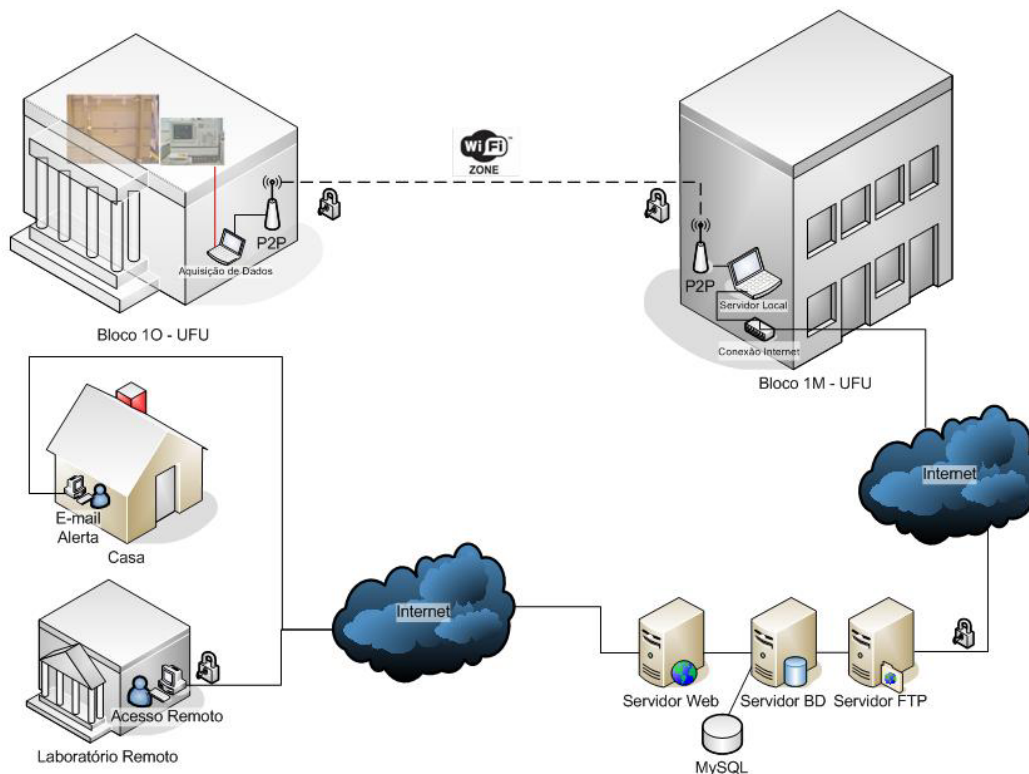


Figura 4.1 - Esquema do Sistema Remoto de Monitoramento baseado em Impedância.

Conforme observado na Listagem 4.1, o arquivo é salvo em Z:\CANAL_A.dat. O que se torna diferente do usual neste processo de gravação de arquivos é que se tem um diretório compartilhado no *laptop* servidor local que está no bloco 1M. A comunicação entre os *laptops* dos blocos 1O e 1M é feita ponto-a-ponto (*peer-to-peer*) por um meio sem fio (*wi-fi*) através do protocolo IEEE 802.11g. É importante ressaltar que, para o acesso ponto-a-ponto, uma chave criptografada é solicitada para realizar a validação do usuário. Depois da identificação do usuário, o diretório Z: (na verdade uma pasta no *laptop* do bloco 1M, ou seja, o servidor local) é tratado pelo *laptop* do bloco 1O, ou seja, por aquele que faz as aquisições dos dados, como se fosse um diretório qualquer, desde que os dois permaneçam ligados.

No *laptop* servidor local (bloco 1M) está configurado um servidor Apache com *scripts* PHP que possibilitam a comunicação automatizada por *scripts* PHP com o servidor remoto através da *internet* (protocolo FTP). Em termos de segurança, uma chave criptográfica também é solicitada pelo servidor remoto para autenticar o usuário automático do servidor local. Através

desta comunicação entre servidores, o servidor local apenas copia o arquivo “CANAL_A.dat” para o servidor remoto.

Listagem 4.1 – parte do código de aquisição via GPIB.

```
#include <windows.h>
#include <ni488.h>
#include <stdio.h>
int Device = 0;          /* Descritor do dispositivo          */
int BoardIndex = 0;     /* Índice da interface (GPIB0=0,GPIB1=1,etc.) */

void main() {
    int PrimaryAddress = 17; /* Endereço Primário do Dispositivo */
    int SecondaryAddress = 0; /* Endereço Secundário do Dispositivo */
    char Buffer[8000];      /* Buffer de leitura                  */
    FILE *datafile1, *datafile2; /* Arquivos de transferência        */
    ...
    ibwrt(Device, "A?", 5); /* Envia a solicitação do canal A ao equipamento*/
    ibrd(Device, Buffer, 8000); /* Lê até 8000 bytes do canal A */
    Buffer[ibcntl] = '\0'; /* 'Null' é a referência de que terminou a 'String' */
    datafile1 = fopen ("Z:\CANAL_A.dat", "w"); /* Abrindo arquivo para escrita */
    fprintf (datafile1, "%s\n", Buffer); /* Escrevendo o 'Buffer' no arquivo */
    fclose (datafile1); /* Fechando o arquivo de escrita */
    ibonl(Device, 0); /* Tornar o dispositivo 'offline' */
    ...
}
```

No servidor remoto estão configurados um servidor de FTP, um servidor Web Apache com *scripts* PHP, um servidor de banco de dados MySQL com uma base de dados denominada SHM. Neste servidor remoto existem alguns *scripts* PHP:

- um responsável por abrir o arquivo “CANAL_A.dat” que foi depositado, ordena calcular a métrica do dano em observação, usando a equação correspondente vista no capítulo 2, atualizar a base de dados SHM no servidor MySQL e, se o valor calculado estiver acima do esperado, ordena gerar um e-mail para o responsável da estrutura mostrando a situação verificada;
- um *script* que valida o acesso remoto via internet de algum usuário;
- um *script* que cadastra novos usuários;
- um *script* que apresenta a condição atual da estrutura.

Todo esse processo de aquisição de sinais local, transferência do arquivo para o servidor local, transferência para o servidor remoto e atualização no banco de dados é realizado periodicamente, por exemplo, a cada 10 minutos. Evidentemente, o tempo pode ser

estabelecido conforme o tipo de falhas que se deseja analisar, pela simples alteração nos códigos do intervalo de tempo entre operações.

4.2 Modelagem e Banco de Dados

Para a modelagem de sistemas como o que é aqui considerado, atualmente a UML 2.0 é a referência mais utilizada (Guedes, 2005 e Teorey *et al*, 2007), pois permite várias visões sob determinados aspectos considerados relevantes ao projeto e análise de sistemas, utilizando diagramas que facilitam a compreensão deste procedimento. Neste trabalho serão apresentados os dois diagramas necessários para a modelagem do sistema de monitoramento remoto, a saber, o Diagrama de Caso de Uso e o Diagrama de Classe.

O Diagrama de Caso de Uso, conforme o próprio nome já induz, representa as funcionalidades que o sistema deve possuir, assim como os interfaceamentos com os usuários. Este diagrama é apresentado na Fig. 4.2.

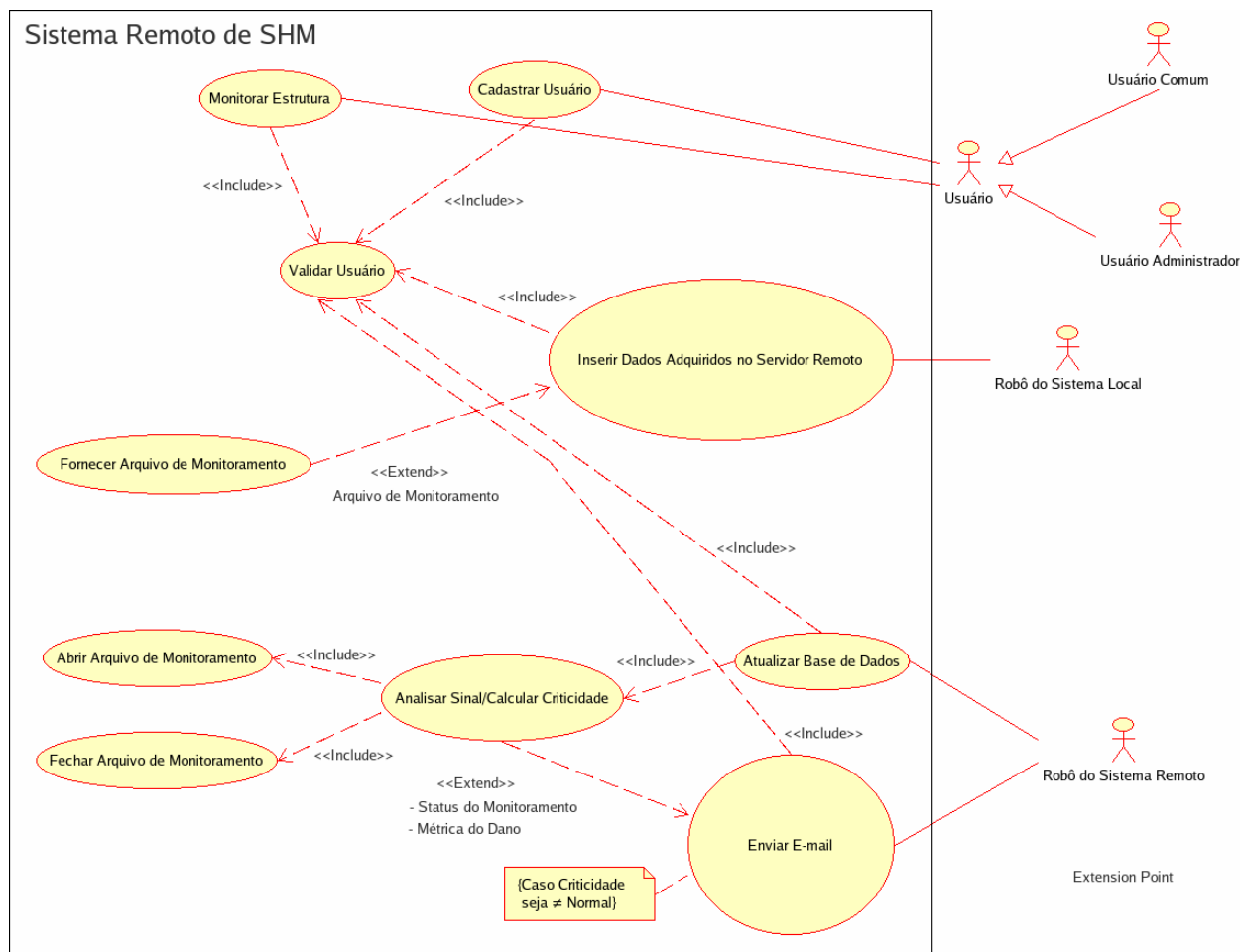


Figura 4.2 - Diagrama de Caso de Uso do sistema remoto de monitoramento.

O outro diagrama, o de Classes, é importante para modelar as classes necessárias, assim como as variáveis de instância necessárias para cada uma, a fim de que o diagrama represente de maneira correta (com integridade relacional e respeitando as formas normais) o sistema a ser construído. O diagrama de classes é apresentado na Fig. 4.3. Nele, podem-se perceber as classes, ou entidades necessárias para o sistema de monitoramento. Para cada classe definida no diagrama de classes, uma tabela é gerada no servidor remoto de banco de dados MySQL. No diagrama fica evidente a necessidade de uma classe denominada *Monitoramento* pois, se esta não fosse declarada, uma associação *muitos-para-muitos* (*..*) ocorreria, o que mostra incoerência no banco de dados. Isto pode ser compreendido como um *usuário* que pode ter várias *estruturas* para monitorar, assim como a recíproca. Em problemas deste tipo utiliza-se uma tabela ou classe intermediária para contornar a dificuldade. A Fig. 4.3 apresenta o diagrama final, após terem sido aplicadas todas as formas de normalização (Teorey *et al*, 2007) para transformação do modelo conceitual numa instrução SQL.

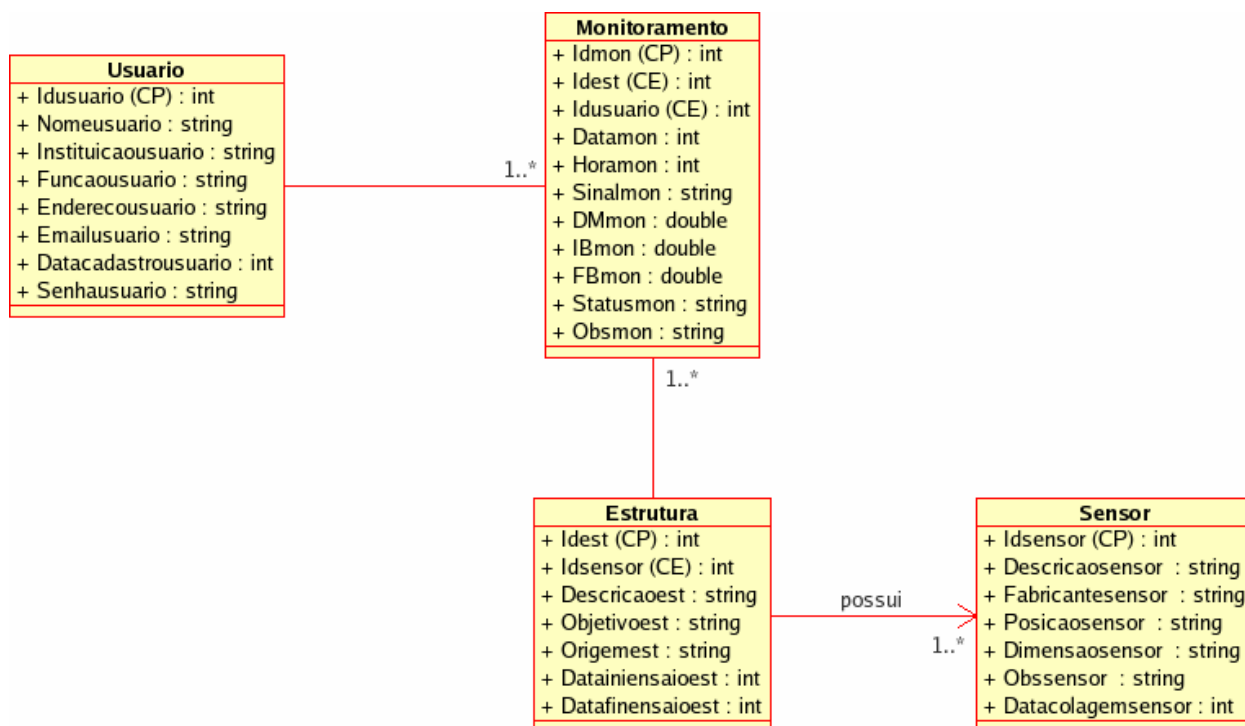


Figura 4.3 - Diagrama de Classes do sistema de monitoramento remoto.

A Listagem 4.2 apresenta os códigos SQL respectivos às gerações das tabelas da base de dados SHM descritas na Fig. 4.3.

Listagem 4.2 – Códigos SQL para a base de dados SHM.

```
CREATE TABLE `Estrutura` (
  `Idest` int(10) unsigned NOT NULL auto_increment COMMENT 'Identificador-chave primaria',
  `Descricaoest` varchar(30) NOT NULL default 'viga' COMMENT 'Descricao da estrutura',
  `Objetivoest` varchar(30) NOT NULL default '' COMMENT 'Objetivo do ensaio estrutural',
  `Origemest` varchar(30) NOT NULL default 'FEMEC-UFU' COMMENT 'Origem da estrutura',
  `Datainiensaioest` date NOT NULL default '0000-00-00' COMMENT 'Data de inicio do ensaio',
  `Datafinensaioest` date NOT NULL default '0000-00-00' COMMENT 'Data do final do ensaio',
  `Idsensor` int(11) NOT NULL default '0' COMMENT 'Identificador do Sensor',
  PRIMARY KEY (`Idest`),
  KEY `Idsensor` (`Idsensor`)
) ENGINE=MyISAM DEFAULT CHARSET=latin1 COMMENT='Tabela sobre informacoes das estruturas' AUTO_INCREMENT=1 ;
```

```
CREATE TABLE `Monitoramento` (
  `Idmon` int(10) unsigned NOT NULL auto_increment COMMENT 'Chave primaria da tabela monitoramento',
  `Idest` int(10) unsigned NOT NULL default '1' COMMENT 'Chave primaria da tabela Estrutura',
  `Idusuario` int(10) unsigned NOT NULL default '1' COMMENT 'Chave primaria da tabela Usuario',
  `Datamon` date default NULL COMMENT 'Data do monitoramento',
  `Horamon` time default NULL COMMENT 'Hora do monitoramento',
  `Sinalmon` text COMMENT 'Sinal do monitoramento',
  `DMmon` double default NULL COMMENT 'Metrica do Dano do monitoramento',
  `IBmon` double default NULL COMMENT 'Inicio da banda de monitoramento',
  `FBmon` double default NULL COMMENT 'Final da banda de monitoramento',
  `Statusmon` varchar(10) default 'Normal' COMMENT 'Status do monitoramento',
  `Obsmon` varchar(30) default NULL COMMENT 'Observação do monitoramento',
  PRIMARY KEY (`Idmon`)
) ENGINE=MyISAM DEFAULT CHARSET=latin1 COMMENT='Tabela sobre informacoes dos monitoramentos' AUTO_INCREMENT=23 ;
```

```
CREATE TABLE `Sensor` (
  `Idsensor` int(10) unsigned NOT NULL auto_increment COMMENT 'Identificador-chave primaria',
  `Descricaoosensor` varchar(30) NOT NULL default '' COMMENT 'Descricao do sensor e funcionalidade',
  `Fabricantesensor` varchar(30) NOT NULL default '' COMMENT 'Fornecedor do sensor-atuador',
  `Posicaoosensor` varchar(30) NOT NULL default '' COMMENT 'Descricao da posicao do sensor na estrutura',
  `Dimensaoosensor` varchar(15) NOT NULL default '' COMMENT 'Descricao das dimensoes do sensor na forma [YYxYYxYY m]',
  `Obssensor` varchar(30) NOT NULL default '' COMMENT 'Alguma observacao pertinente ao sensor. Ex: mal colado, colado muito na extremidade, etc',
  `Datacolagemosensor` date NOT NULL default '0000-00-00' COMMENT 'Data da colagem do sensor na estrutura',
  PRIMARY KEY (`Idsensor`)
) ENGINE=MyISAM DEFAULT CHARSET=latin1 AUTO_INCREMENT=1 ;
```

```
CREATE TABLE `Usuario` (
  `Idusuario` int(10) unsigned NOT NULL auto_increment COMMENT 'identificador-chave primaria',
  `Nomeusuario` varchar(40) NOT NULL default '' COMMENT 'nome do usuario',
  `Instituicaousuario` varchar(40) NOT NULL default 'FEMEC-UFU' COMMENT 'nome da instituicao de origem',
  `Funcaoosuario` varchar(15) NOT NULL default 'estudante' COMMENT 'funcao do usuario',
  `Enderecosuario` varchar(40) NOT NULL default 'Campus Sta Monica-1M-Uberlandia-MG-Brasi' COMMENT 'endereco do usuario',
  `Emailusuario` varchar(30) NOT NULL default '' COMMENT 'email do usuario',
  `Datacadastrousuario` date NOT NULL default '0000-00-00' COMMENT 'data do cadastro do usuario',
  `Senhausuario` varchar(15) NOT NULL default '' COMMENT 'Senha do usuario',
```

```
PRIMARY KEY (`Idusuario`)  
) ENGINE=MyISAM DEFAULT CHARSET=latin1 COMMENT='Tabela sobre os informacoes dos usuarios' AUTO_INCREMENT=2 ;
```

4.3 Scripts PHP e o Sistema de Monitoramento Remoto

As telas do sistema remoto de SHM baseado em impedância são apresentadas nas Figs. 4.4 a 4.7. Na Fig. 4.4 é apresentada a tela inicial do sistema que faz a autenticação do usuário. Na Fig. 4.5 está apresentada a tela que encaminha o usuário que faz acesso ao sistema a duas opções, a saber, cadastro de novos usuários ou monitoramento de estruturas.

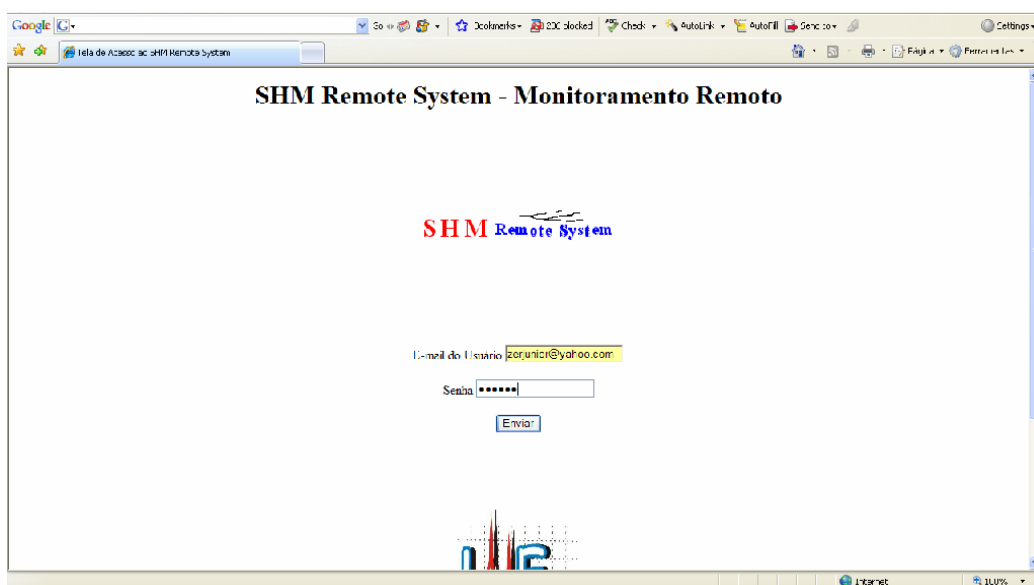


Figura 4.4 - tela de autenticação do usuário do sistema remoto.

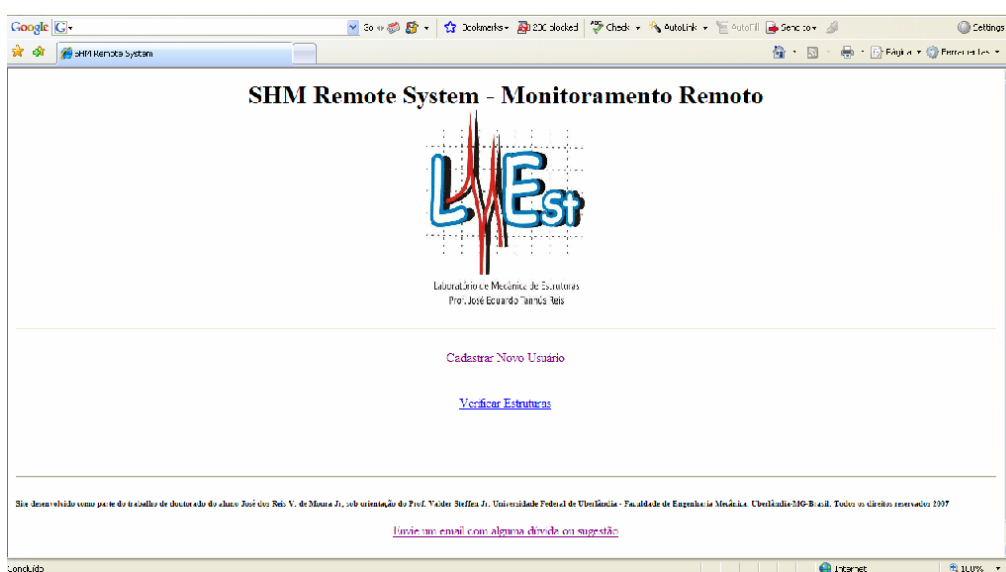


Figura 4.5 - tela de encaminhamento do sistema.

Até o momento, como o sistema ainda contempla poucos usuários, não se promove o

direcionamento direto à tela de monitoramento, a menos que o usuário seja considerado um “administrador” do sistema. Por esse motivo, no diagrama de casos de uso da Fig. 4.2 existe a caracterização do *Usuário* em *Usuário Comum* e *Usuário Administrador*.

Nesta etapa atual o sistema foi desenvolvido apenas com as funcionalidades básicas para sua operação. Assim, não existe acesso, *a priori*, para cadastro de novas estruturas ou sensores. Conforme apresenta a Fig. 4.5, apenas duas possibilidades são oferecidas ao usuário: cadastrar novo usuário ou verificar as estruturas monitoradas.

Na Fig. 4.6 apresenta-se a tela de cadastro de novos usuários. Na Fig. 4.7 tem-se a tela de monitoramento que, até o momento, é realizado de forma textual.

The image shows a web browser window with the title 'CADASTRO DE NOVOS USUÁRIOS'. The page content is as follows:

Cadastro de Novos Usuários

Favor **informar** os campos abaixo

Nome do Usuário:

Instituição do Usuário:

Função do Usuário:

Endereço do Usuário:

E-mail do Usuário:

Senha do Usuário:

Figura 4.6 - tela de cadastro de novos usuários.

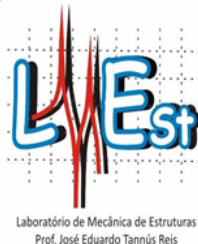
Futuras modificações estão sendo feitas para adequar a apresentação usando um formato de gráficos de barras que torne o sistema mais amigável. Os campos apresentados na tabela representam o monitoramento de uma estrutura-exemplo.

Os tempos de acesso foram modificados para contemplar os testes que estão sendo realizados.

No último campo da tabela de monitoramento da Fig. 4.7 pode ser visto o *Status* da estrutura em avaliação. Caso o *Status* seja *CRÍTICO*, um e-mail é enviado ao usuário informando esta condição.

Um exemplo do e-mail enviado nestas condições é apresentado na Fig. 4.8.

SHM Remote System - Monitoramento Remoto



As Estruturas atualmente monitoradas são:

Número de registros de Monitoramento encontrados: 12

Id Monitoramento	Id Estrutura	Id Usuario	Data	Hora	Métrica do Dano	Inicio Banda	Fim Banda	Status
1	1	1	2007-07-13	07:21:14	33	15	20	Normal
2	1	1	2007-07-13	07:35:09	40	15	20	Normal
3	1	1	2007-07-20	02:31:30	265.771186957	15	20	CRITICO
4	1	1	2007-07-20	11:47:36	265.771186957	15	20	CRITICO
5	1	1	2007-07-20	15:05:19	265.771186957	15	20	CRITICO
6	1	1	2007-07-20	15:09:50	265.771186957	15	20	CRITICO
7	1	1	2007-07-20	15:10:06	265.771186957	15	20	CRITICO
8	1	1	2007-07-20	15:10:21	265.771186957	15	20	CRITICO
9	1	1	2007-07-20	15:10:37	265.771186957	15	20	CRITICO
10	1	1	2007-07-20	15:10:53	265.771186957	15	20	CRITICO
11	1	1	2007-07-20	15:11:09	265.771186957	15	20	CRITICO
12	1	1	2007-07-20	15:11:25	265.771186957	15	20	CRITICO

São desenvolvidas como parte do trabalho de doutorado do aluno José do: Reis V. de Moura Jr, sob orientação do Prof. Valdir Soffka Jr, Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Mecânica. Todos os direitos reservados: 2007.

[Envie um email com alguma dúvida ou sugestão](#)

Figura 4.7 - tela de verificação das estruturas (monitoramento).

[Previous](#) | [Next](#) | [Back to Messages](#)

This message is not flagged. [[Flag Message](#) - [Mark as Unread](#)]

To: zerjunior@yahoo.com
Subject: ALERTA: ESTRUTURA COM FALHA CRÍTICA!
From: mour@data4.nspmanaged.com [Add to Address Book](#) [Add Mobile Alert](#)
Date: Fri, 20 Jul 2007 02:35:18 -0300

SISTEMA REMOTO DE SHM,

SUA MÉTRICA DE DANO ESTÁ EM 265.771186957.

ISTO INDICA QUE SUA ESTRUTURA ESTÁ EM NÍVEL CRÍTICO!!

Figura 4.8 - e-mail alerta sobre o estado crítico da estrutura.

Para a execução das atualizações dos arquivos de monitoramento, conforme vistos anteriormente (CANAL_A.dat), e que são periodicamente salvos no servidor local, um *script* PHP foi desenvolvido para que, do servidor local, este seja conectado ao servidor remoto e atualize o arquivo texto de nome "arquivotransf.dat". A mudança de nomes favorece o

encapsulamento das informações, dificultando o acesso de terceiros. Outro motivo da implementação usando esta arquitetura é que, utilizando o protocolo ftp, o servidor local só possui autorização de acesso a apenas um diretório do servidor remoto, além de autorização de escrita em um arquivo previamente definido para esta finalidade, sem a necessidade de possuir um IP válido fixo. Assim, é possível utilizar um grande número de servidores locais, além de modificá-los de posição física de conexão, sem comprometer o funcionamento do sistema como um todo. Ou seja, basta apenas que o servidor local tenha acesso à internet e os dados serão atualizados no servidor remoto. O *script* que gera esta funcionalidade é apresentado na Listagem 4.3. Deve-se lembrar que, para fins de proteção da informação, os campos de “meudomínio”, “basededados”, “usuario” e “senha” foram alterados.

Listagem 4.3 – *script* PHP para atualização via FTP de arquivo de monitoramento.

```
<?php
$conn_id = ftp_connect("www.meudominio.com");
$login_result = ftp_login($conn_id, "usuario@meudominio.com", "senha");

if ((!$conn_id) || (!$login_result)) {
echo "Conexao FTP falhou!";
exit;
} else {
echo "\n Conectado";
}

$source_file="c:\\CANAL_A.dat";
$destination_file="arquivotransf.dat";

while(1==1)
{
// carrega o arquivo
$upload = ftp_put($conn_id, $destination_file, $source_file, FTP_BINARY);

// confere o upload do arquivo
if (!$upload) {
echo "O upload FTP falhou!";
} else {
echo "\n Carregado o arquivo $source_file no servidor como $destination_file";
}

//sleep eh em segundos... $tempo eh em minutos
$tempo=0.2;
sleep($tempo*60);
echo "\n atualizado pela $iter vez";
}

ftp_close($conn_id);
echo "\n FINAL DA CONEXAO";
?>
```

Da listagem 4.3 pode-se perceber um *loop* infinito que é o *while(1==1)*. Isto ocorre para que o sistema fique permanentemente atualizando o servidor remoto, a menos que o *browser*

no qual o *script* esteja operando no servidor local seja fechado. Novamente, o tempo descrito aqui foi o utilizado para testes. Desta forma, o intervalo de monitoramento foi reduzido.

Um outro *script* interessante de ser comentado é o que verifica o monitoramento, conforme apresentado na Fig. 4.7. Parte do *script* é mostrada na listagem 4.4, retirando-se algumas formatações html da página a fim de torná-la mais resumida aqui.

Listagem 4.4 – *script* PHP para verificar estruturas (monitoramento).

```
<?
#FAZENDO A CONEXAO COM O BANCO DE DADOS
$conexao=mysql_connect("localhost", "usuario", "senha");
if (!$conexao)
{
    echo "Não foi possível se conectar ao Servidor MySQL!";
    echo "Tente novamente mais tarde.";
    exit;
}
$db=mysql_select_db("basededados");
if (!$db)
{
    echo "Não foi possível acessar Base de Dados";
    exit;
}
$sql="SELECT * FROM `Monitoramento`";
$result=mysql_query($sql);
$num_results=mysql_num_rows($result);
if ( $num_results == 0 )
{
    echo "<h2><p align='center'>Lamento, mas não existem estruturas sendo monitoradas no momento!</p></h2><BR>";
}
else
{
    echo "<h2><p align='center'>As Estruturas atualmente monitoradas são:</p></h2><BR>";
    echo '<p> Número de registros de Monitoramento encontrados: '.$num_results.'</p>';
    echo '<table border="1" width="100%">';
    echo '<tr><strong> <td>Id Monitoramento</td> <td>Id Estrutura</td> <td>Id Usuario</td>';
    echo '<td>Data</td> <td>Hora</td>';
    echo '<td>Metrica do Dano</td> <td>Inicio Banda</td> <td>Fim Banda</td> <td>Status</td>';
    echo '</strong></tr>';
    for ($i=0; $i <$num_results;$i++)
    {
        $row = mysql_fetch_array($result);
        echo '<tr><td>'.htmlspecialchars(stripslashes($row['Idmon'])).'</td>';
        echo '<td>'.htmlspecialchars(stripslashes($row['Idest'])).'</td>';
        echo '<td>'.htmlspecialchars(stripslashes($row['Idusuario'])).'</td>';
        echo '<td>'.htmlspecialchars(stripslashes($row['Datamon'])).'</td>';
        echo '<td>'.htmlspecialchars(stripslashes($row['Horamon'])).'</td>';
        echo '<td>'.htmlspecialchars(stripslashes($row['DMmon'])).'</td>';
        echo '<td>'.htmlspecialchars(stripslashes($row['IBmon'])).'</td>';
        echo '<td>'.htmlspecialchars(stripslashes($row['FBmon'])).'</td>';
        echo '<td>'.htmlspecialchars(stripslashes($row['Statusmon'])).'</td>';
        echo '</tr>';
    }
    echo '</table>';
}
?>
```

Entretanto, deve-se salientar que a tarefa mais importante do sistema é a atividade do servidor remoto de abrir o arquivo "arquivotransf.dat, comparar o sinal deste com o caso de referência (*baseline*), calculando a métrica de dano, atualizar a base de dados com mais este caso adquirido, e, se for o caso da estrutura encontrar-se em situação *CRÍTICA*, enviar e-mail ao usuário, alertando-o. Este *script* é apresentado na listagem 4.5.

Listagem 4.5 – script no servidor remoto que atualiza os dados na base de dados.

```
<HTML>
<HEAD>
<TITLE>Robô do Sistema Remoto</TITLE>
<SCRIPT LANGUAGE="JavaScript">
<!-- function redirect()
      {parent.location.href="http://meudominio.com/espera.html"      }
-->
</SCRIPT>
</HEAD>
<BODY>
<?
#ADQUIRE O SINAL BASELINE NA BASE DE DADOS
$conexao=mysql_connect("localhost", "usuario", "senha");
if (!$conexao)
{ echo "Não foi possível se conectar ao Servidor MySQL!";
  echo "Tente novamente mais tarde.";
  exit;  }
$db=mysql_select_db("basededados");
if (!$db)
{ echo "Não foi possível acessar Base de Dados";
  exit;  }
$sql="SELECT * FROM `Monitoramento` WHERE idmon='1'";
$result=mysql_query($sql);
$num_results=mysql_num_rows($result);
for ($i=0; $i <$num_results;$i++)
{ $row = mysql_fetch_array($result);
  $sinal1 = (stripslashes($row['Sinalmon']));
  $ldest = (stripslashes($row['ldest']));
  $ldusuario = (stripslashes($row['ldusuario']));
  $lBmon = (stripslashes($row['lBmon']));
  $lFBmon = (stripslashes($row['lFBmon']));  }
#ABRE O ARQUIVO QUE FOI DEPOSITADO NO SERVIDOR REMOTO
#ARQUIVO --> arquivotransf.dat
if(! $arquivo = fopen("arquivotransf.dat","r"))
{ echo "O arquivo não pode ser aberto"; }
$sinal2 = fgets( $arquivo, 5214);
fclose($arquivo);
#MONTANDO O VETOR DE SINAL 1 - BASE DE DADOS - BASELINE
# E O VETOR DE SINAL 2 - MEDIDO DO ARQUIVO - SINAL A VERIFICAR DM
$i=0;
$j=0;
while ($i<5214)
{
$baseline[$i]=$sinal1[$i].$sinal1[$i+1].$sinal1[$i+2].$sinal1[$i+3].$sinal1[$i+4].$sinal1[$i+5].$sinal1[$i+6].
$sinal1[$i+7].$sinal1[$i+8].$sinal1[$i+9].$sinal1[$i+10].$sinal1[$i+11];

$sinalmedido[$j]=$sinal2[$i].$sinal2[$i+1].$sinal2[$i+2].$sinal2[$i+3].$sinal2[$i+4].$sinal2[$i+5].$sinal2[$i
+6].$sinal2[$i+7].$sinal2[$i+8].$sinal2[$i+9].$sinal2[$i+10].$sinal2[$i+11];
```

```

    $i=$i+13;
    $j=$j+1; }
#CALCULA O VALOR DA METRICA DO DANO $DM
$DM = 0;
echo "<BR>CALCULANDO METRICA DO DANO E ATUALIZANDO BASE<BR>";
for ($i=0; $i<401; $i++)
{ #CALCULO DA METRICA DO DANO DEFINIDA POR PARK E ANTES POR SUN...
$DMaux = sqrt( pow($baseline[$i]-$sinalmedido[$i],2) / pow($baseline[$i],2) );
$DM = $DM + $DMaux; }
echo "<br>$DM";
#SE O VALOR DA METRICA DO DANO FOR MAIOR QUE 50, ENVIA E-MAIL
#ENVIAR E-MAIL SE DM > 50
if($DM>50)
{ $Statusmon="CRITICO";
$sendto = "email@dominio.com";
$subject = "ALERTA: ESTRUTURA COM FALHA CRÍTICA!";
$message = "SISTEMA REMOTO DE SHM, \n\n SUA MÉTRICA DE DANO ESTÁ EM $DM. \n\n
ISTO INDICA QUE SUA ESTRUTURA ESTÁ EM NÍVEL CRÍTICO!!";
mail($sendto, $subject, $message); }
#CADASTRA NA BASE DE DADOS MAIS ESTA MEDIDA
$conexao2=mysql_connect("localhost", "usuario", "senha");
$db2=mysql_select_db("basededados");
$sql2="INSERT INTO `basededados`.`Monitoramento` (`Idmon`, `Idest`, `Idusuario`, `Datamon`,
`Horamon`, `Sinalmon`, `DMmon`, `IBmon`, `FBmon`, `Statusmon`, `Obsmon`) VALUES (null, '$Idest',
'$Idusuario', CURDATE(), CURTIME(), '$sinal2', '$DM', '$IBmon', '$FBmon', '$Statusmon', ' ') ";
$result2=mysql_query($sql2);
if($result2)
echo mysql_affected_rows( ).'Dado Inserido corretamente';
#REDIRECIONANDO PARA A PAGINA DE ESPERA
echo "<BR><BR>ENCAMINHANDO PARA PAGINA DE ESPERA";
?>
<SCRIPT LANGUAGE="JavaScript">
<!-- espera na pagina por 5 segundos
setTimeout("redirect()",5000)

//-->
</SCRIPT>
</BODY>
</HTML>

```

Como se pode observar nas linhas de comentário (#), as atividades seqüenciais que o *script* executa periodicamente são as seguintes: adquirir o sinal de referência na base de dados; abrir arquivo recebido em formato texto; formatar os dois sinais que estão armazenados como texto (por exemplo: $4.5433E+2$) na forma numérica; calcular a métrica do dano; dado um nível de *threshold*, considerado aqui como maior do que 50, considerar a estrutura em nível crítico e enviar e-mail alertando o usuário; atualizar novo registro na base de dados; redirecionar o site para o site “espera.html”. O modelo adotado para este *script* que é executado no servidor remoto poderia ser similar ao *loop* utilizado no servidor local. Entretanto, dada a quantidade de conexões à base de dados, além das operações matemáticas contempladas, optou-se por executar todas estas atividades, redirecionar o *site* para um outro que apenas aguarda um intervalo de tempo (“espera.html”), e então este outro entra em *loop*

de redirecionamentos com este, alternando duas situações, a saber, “aguardando atualização do arquivotransf.dat” (“espera.html”) e “calculando e atualizando base” (“inserirresinal.php”).

As técnicas utilizadas para redirecionamento de *sites* de internet podem ser realizadas através de código *html* puro ou de *php*. Entretanto, estas duas abordagens apenas permitem um redirecionamento automático de *sites*, não autorizando que este processe alguma informação anterior ao redirecionamento, como é o caso em questão. Para essa configuração apresentada, optou-se por adicionar uma função *javascript* para que a atualização dos dados no mesmo *site* de redirecionamento fosse possível (veja as *Tags <SCRIPT>* na listagem 4.5).

A página de espera (espera.html) é apresentada na Fig. 4.9, assim como seu *script* simples na listagem 4.6.

Página de Espera:

AGUARDE ENQUANTO O SERVIDOR ATUALIZA O ARQUIVO DE MONITORAMENTO

Figura 4.9 - simples aviso da tela de espera.html.

Listagem 4.6 – script de espera.html

```
<HTML>
<HEAD>
<TITLE>Esperando Novo Arquivo</TITLE>
<SCRIPT LANGUAGE="JavaScript">
<!-- function redirect()
    {parent.location.href="http://meudominio.com/inserirresinal.php" }
-->
</SCRIPT>
</HEAD>
<BODY>
<p align="center">Página de Espera:</p>
<BR> <BR>
<h1><p align="center">AGUARDE ENQUANTO O SERVIDOR ATUALIZA O ARQUIVO DE
MONITORAMENTO</p></h1>
<SCRIPT LANGUAGE="JavaScript">
<!-- aguarda 10 segundos para chamar inserresinal.php
        setTimeout("redirect()",10000)
-->
</SCRIPT>
</BODY>
</HTML>
```

Através do estudo preliminar apresentado neste capítulo, torna-se possível compreender os recursos essenciais para o desenvolvimento de um sistema de monitoramento remoto. É importante lembrar que o estudo aqui proposto é apenas um protótipo para demonstrar a viabilidade de um sistema de monitoramento remoto baseado em sinais de

impedância eletro-mecânica. Algumas fragilidades podem ser encontradas no sistema, assim como possíveis alterações já estão sendo testadas na seqüência deste trabalho. Entretanto, com este conjunto de aplicações já em andamento, um modelo básico de monitoramento remoto cobrindo alguns robustecimentos de conexões e garantias de integridade foi desenvolvido e pode ser inicialmente aplicado na área de SHM, sem nenhum prejuízo.

Capítulo V

SHM BASEADO NA IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA E NAS ONDAS DE LAMB PARA IDENTIFICAÇÃO DE CORROSÃO

Duas técnicas têm sido especialmente utilizadas para o processo de monitoramento de integridade estrutural nos últimos anos (Farrar et al., 2003). A primeira e mais difundida tem sido a do monitoramento baseado em sinais de impedância eletromecânica (Bhalla et al., 2000a and 2000b; Liang et al., 1994; Moura Jr and Steffen, 2004a and 2004b; Naidu et al., 2002; Park et al., 1999a, 1999b, 2000a, 2000b, 2001, 2003; Sun et al., 1995), enquanto que, a segunda, se refere ao uso de Ondas de Lamb (Lemistre et al., 1999; Sohn, 2005) para identificação de falhas incipientes. Neste capítulo buscou-se associar os dois mecanismos de monitoramento em conjunto para uma melhor capacidade de extração de características da estrutura, viabilizando, assim, a construção de um metamodelo com maior potencial de representação do sistema. Tem-se, desta forma, uma melhor resolução no sistema de identificação das falhas. A estrutura utilizada como referência foi uma viga de alumínio. As falhas inseridas foram corrosões superficiais em diferentes posições e intensidades.

5.1 Procedimentos de Corrosão

A estrutura adotada para este experimento foi uma viga de alumínio com comprimento próximo de 80 cm (Fig. 5.1a).



a) Viga de alumínio com as pastilhas MFC coladas



b) Exemplo de corrosão leve

Figura 5.1 - Viga de Al utilizada para identificação de falhas

Para o processo de inserção de danos sobre a superfície da viga foi acrescentado ácido clorídrico (HCl) na forma concentrada (sem adição de outros elementos). Foram realizadas duas intensidades de corrosão, *leve* e *grave*, considerando o nível de agressividade dado pela quantidade de aplicações com o ácido (12 e 24 aplicações). Um exemplo de corrosão leve é apresentado na Fig. 5.1b. Para o processo de aplicação de ácido e, desta forma, inserção da corrosão, foi utilizado o procedimento descrito por Simmers Jr (2005).

Para realizar o monitoramento estrutural foram utilizados dois elementos piezelétricos do tipo MFC (Micro Fiber Composite) que foram colados nas extremidades da viga, do mesmo lado em que foram inseridas as corrosões, como mostrado na Fig. 5.1a.

A Fig. 5.2 apresenta as configurações de corrosão utilizadas neste experimento, sendo estas descritas como segue:

- Corrosão 1: corrosão leve a 15 cm do MFC #1;
- Corrosão 2: corrosão grave a 15 cm do MFC #1;
- Corrosão 3: corrosão leve a 15 cm do MFC #2;
- Corrosão 4: corrosão grave a 15 cm do MFC #2;
- Corrosão 5: corrosão leve no meio da viga;
- Corrosão 6: corrosão grave no meio da viga;
- Corrosão 7: corrosão leve a 6,25 cm do MFC #1;
- Corrosão 8: corrosão grave a 6,25 cm do MFC #1;
- Corrosão 9: corrosão leve a 6,25 cm do MFC #2.

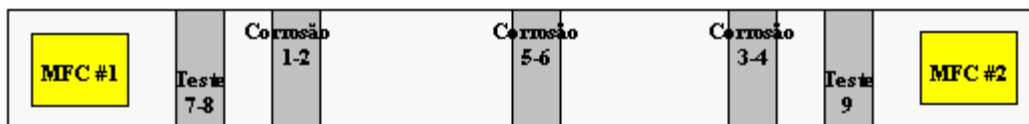


Figura 5.2 - Esquema da estrutura e das respectivas posições de corrosão

Desta forma, a Tab. 5.1 ilustra os experimentos realizados, considerando tanto o método baseado nas ondas de Lamb quanto o baseado na impedância eletromecânica. A linha em cor diferente (corrosão 8) foi utilizada como teste de validação do metamodelo.

Para transformar a situação em estudo num caso mais real, foram considerados os ensaios posteriores à Corrosão 2, simulando uma condição para a qual se deseja avaliar uma estrutura que já venha sendo utilizada. Em assim sendo, os casos sem falhas e o que corresponde à Corrosão 1 não foram considerados. Então, a primeira medição feita foi a da Corrosão 2, tomando seu sinal como referência para o estudo. A Corrosão 8 foi considerada como teste para avaliar o metamodelo construído para identificação de falhas.

Na coluna referente ao Método de Impedância – MFC #1 da Tab. 5.1, os sinais correspondentes foram obtidos pela medição do sinal da impedância no MFC #1. O mesmo ocorreu para o MFC #2.

Tabela 5.1 - Experimentos utilizados para a construção do metamodelo.

Nome do Exp.	Posição da Falha	Severidade da Falha	Ondas de Lamb - MFC #1 para MFC #2	Método de Impedância - MFC #1	Método de Impedância - MFC #2
<i>Sem falhas</i>	-	-	-	-	-
Corrosão 1	1	1	-	-	-
Corrosão 2	1	2	d2	d21	d22
Corrosão 3	2	1	d3	d31	d32
Corrosão 4	2	2	d4	d41	d42
Corrosão 5	3	1	d5	d51	d52
Corrosão 6	3	2	d6	d61	d62
Corrosão 7	4	1	d7	d71	d72
Corrosão 8	4	2	d8	d81	d82
Corrosão 9	5	1	d9	d91	d92

5.2 Configuração Experimental e Procedimentos de Ondas de Lamb e Impedância

O esquema experimental utilizado para aplicação do método baseado em ondas de Lamb é apresentado na Fig. 5.3. É importante ressaltar que não foi utilizado um amplificador de sinais para permitir que o gerador de sinais aplicasse energia suficientemente capaz para excitar a estrutura pelo fato da estrutura em estudo ser esbelta. A amplitude do gerador de sinais foi configurada para 10 volts na frequência de 10 kHz. Em todos os casos, foi utilizada a pastilha MFC #1 somente como atuador e a MFC #2 somente como sensor.

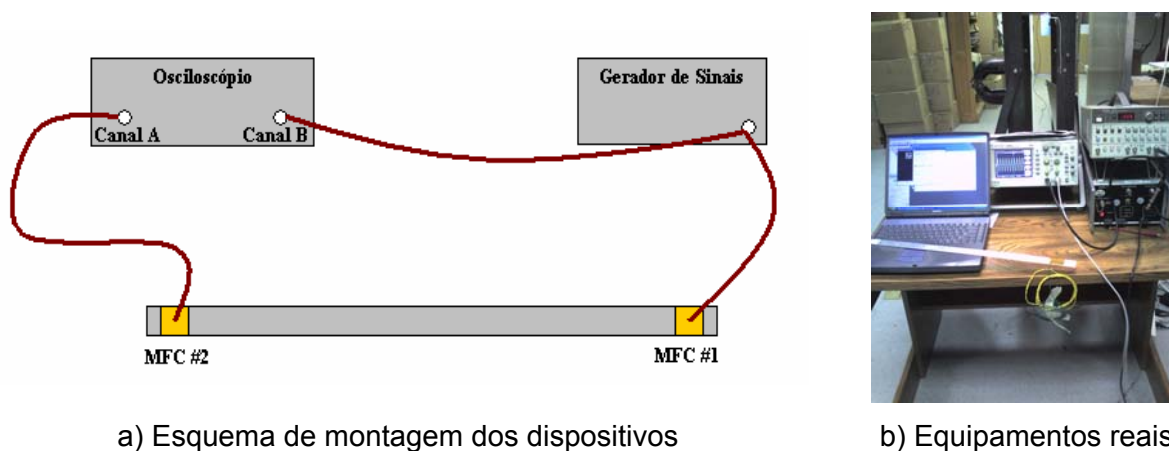


Figura 5.3 - Configuração experimental do método das ondas de Lamb

Como apresentado na Tab. 5.1, os sinais no tempo foram gravados e utilizados junto com os sinais de impedância para a identificação de falhas, utilizando um critério baseado em duas redes neurais diferentes.

Os sinais de impedância foram medidos através de um analisador de impedância modelo HP 4194A, gravando cada pastilha MFC separadamente. Os sinais medidos do MFC #2 para o MFC #1 para o caso de ondas de Lamb também foram gravados, mas não serão utilizados ao longo deste trabalho por se tratar de repetições do já se encontra aqui. Um volume de dados considerável usando cinco repetições para cada ensaio foi realizado, mas que se, tratadas de forma adequada, representam o mesmo aqui apresentado. Desta forma, foi adotado o procedimento aqui descrito para facilitar o acompanhamento do procedimento e redução em análise.

Todos os experimentos, corrosões e medições foram realizados no laboratório do CIMSS-VT (Center for Intelligent Material Systems and Structures – Virginia Tech), e desta forma, utilizando a infraestrutura daquela instituição.

5.3 Resultados Experimentais

Primeiramente, no procedimento utilizando ondas de Lamb, foram realizados ensaios obtendo um sinal para cada corrosão no domínio do tempo, como ilustra a Fig. 5.4, na qual todos os sinais são apresentados juntos.

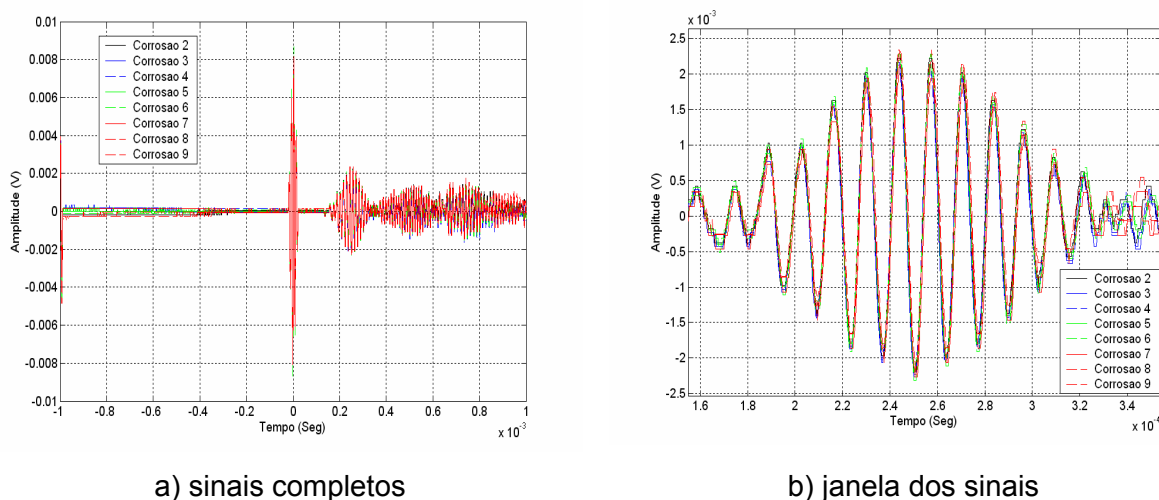
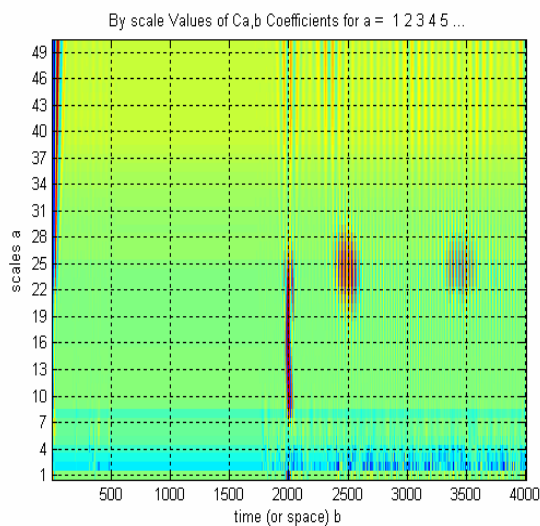


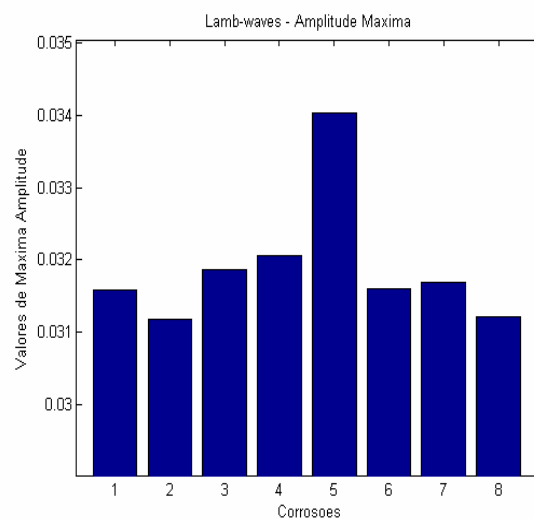
Figura 5.4 - Sinais obtidos pelos experimentos com ondas de Lamb

Desta forma, todos os sinais no domínio do tempo foram separados em escalas diferentes, gerando uma família de funções. Isto foi feito utilizando a TWC (transformada de Wavelet contínua), como mostra a Fig. 5.5a.

Assim, foi utilizada uma destas funções (escala $a = 17$) gerada a partir da TWC a qual existem diferentes amplitudes do sinal para cada caso de corrosão, como mostrado na Fig. 5.5b. Esta escala foi adotada por ser a maior amplitude da família.

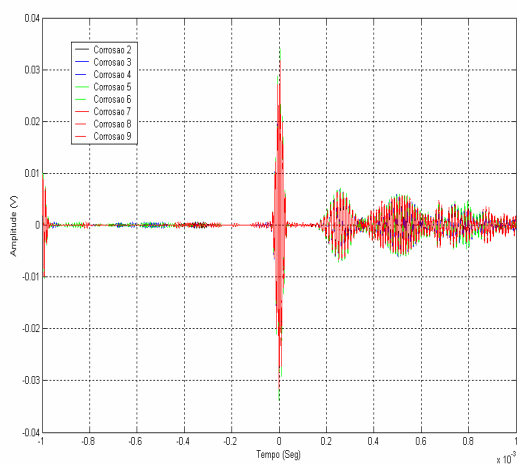


a) TWC de um sinal (Corrosão 9)

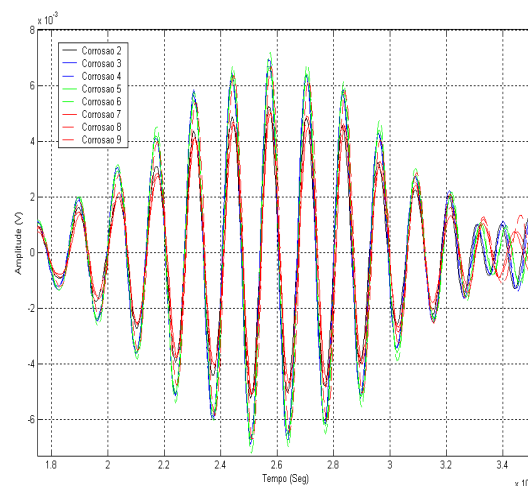


b) amplitude máxima para cada caso de corrosão para a escala = 17

Figura 5.5 - TWC em todos os casos de corrosão



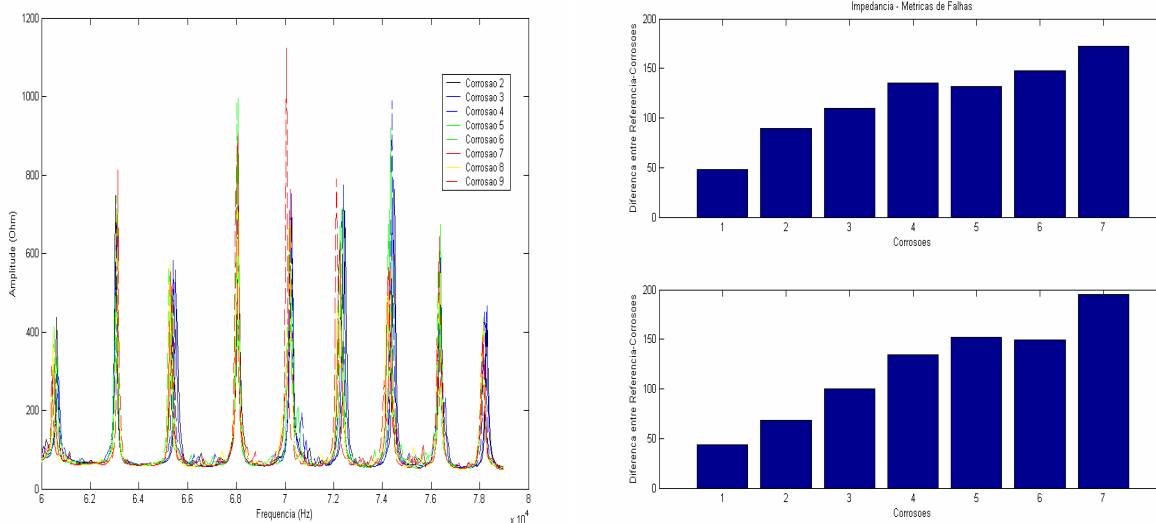
a) sinais completos



b) janela dos sinais

Figura 5.6 - Todos os sinais de corrosão para a escala $a = 17$

Ao se observar as funções no domínio do tempo para a escala $a = 17$ é possível identificar uma diferença visual entre as amplitudes para cada caso de corrosão como ilustra a Fig. 5.6.



a) Sinais de impedância do MFC #1

b) Métricas de Falhas dos dois MFCs

Figura 5.7 - Sinais de impedância

O método baseado em impedância também foi realizado para obter as métricas de falhas correspondentes a cada caso de corrosão para cada um dos MFCs. A Fig. 5.7a mostra os sinais de impedância para todos os casos medidos com o MFC #1. A Fig. 5.7b mostra as métricas de falhas para os dois MFCs considerando a corrosão 2 como sendo o caso sem falhas.

5.4 . Identificação de Falhas

Para identificar completamente uma falha é necessário determinar a posição e a severidade da falha. Neste trabalho, dois metamodelos diferentes foram construídos para incrementar a precisão e o tornar mais robusto.

O primeiro metamodelo utiliza os experimentos das ondas de Lamb (o maior valor de amplitude de cada caso de corrosão) e os experimentos baseados em impedância (métrica de falha referente a cada caso de corrosão de ambos os MFCs). Este metamodelo foi construído utilizando uma GRNN (General Regression Neural Network – Rede Neural de Regressão Geral) para identificar a posição da corrosão, considerando o MFC #1 como referência: Corrosão 2 – posição 2; corrosões 3 e 4 – posição 4; corrosões 5 e 6 – posição 3; corrosões 7

e 8 – posição 1 e, finalmente, corrosão 9 – posição 5. A Fig. 5.8 apresenta a rede neural de regressão generalizada para o caso em estudo.

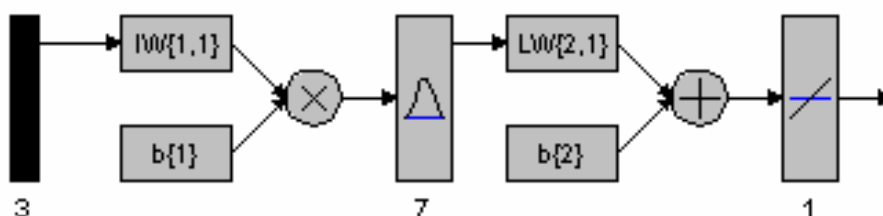


Figura 5.8 - modelo para previsão da posição de falha.

Da mesma forma, utilizando somente os experimentos baseados em impedância, uma RBF (Radial-Basis Function – Rede Neural de Funções de Base Radial) foi construída para identificar a severidade da corrosão baseando-se nos sinais de ambos os MFCs. Esta rede neural encontra-se representada pela Fig. 5.9.

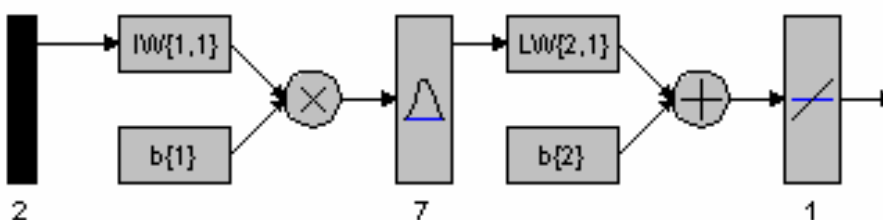


Figura 5.9 - Rede neural de base radial para previsão de severidade da falha.

5.5 Conclusões

Com este trabalho foi apresentada a utilização de duas metodologias trabalhando juntas em processos de identificação de falhas em vigas de alumínio. É importante ressaltar a contribuição com que cada tipo de análise participou da elaboração dos metamodelos, resultando uma forma mais robusta de detecção de falhas.

Diferentes modelos de redes neurais foram testadas, mas a GRNN e a RBF foram as mais adequadas aos processos de detecção de posição e severidade, respectivamente. Como neste caso abordado a posição da falha era de determinação mais complexa que a severidade (cinco posições em contraposição a duas severidades), um metamodelo mais elaborado foi utilizado com base nas duas metodologias. É importante ressaltar que em uma condição diferente da estudada aqui, na qual um número de casos de severidade mais amplo estivesse sendo utilizado, em relação à quantidade de posições avaliadas, os mesmos tipos de redes

neurais poderiam sofrer diferentes avaliações, e, portanto, outras arquiteturas de redes poderiam ser investigadas.

Por fim, por uma questão de maior simplicidade e melhor compreensão, evitou-se repetir a análise apresentada acima com número maior de repetições. Considera-se que o material apresentado é suficiente para a compreensão da metodologia utilizada.

Finalmente, cabe salientar que, no caso de aplicações reais desta técnica para monitoramento de corrosão, é prudente introduzir na metodologia uma etapa intermediária de avaliação do desgaste provado na estrutura pelo processo corrosivo. Como sugestão, isso poderia ser feito através de um rugosímetro.

Capítulo VI

UTILIZAÇÃO DE METODOLOGIA DE INOVAÇÃO DE PROCESSOS PARA ROBUSTECIMENTO DO PROCESSO DE SHM

Conforme observado no capítulo 2, algumas técnicas de inovação de processos, descritas por Altshuller, podem ser úteis ao se considerar a abertura de novas possibilidades de funcionamento de algum mecanismo através do TRIZ e análise C-S. Também foi visto, aplicando a análise C-S inversa, ou seja, avaliando um mecanismo do ponto de vista de que sua função útil seja a de “quebrar” ou “falhar”, pode-se determinar mecanismos de ocorrências de erros ou falhas que não haviam ainda sido previstos. Durante o processo de monitoramento da integridade estrutural, existem diversos componentes ou situações que podem levar o experimento a um completo insucesso. Ainda, após ser estudada a viabilidade do monitoramento de um dado processo, o conjunto de equipamentos e dispositivos pode sofrer alterações quanto a seu correto funcionamento, o que pode levar, num caso extremo, a um sistema de monitoramento que faz análises equivocadas. Assim, a proposta deste capítulo é inicialmente aplicar a análise C-S em uma estrutura de fuselagem aeronáutica comercial real durante o processo de SHM pelo método da impedância. Em seguida, pretende-se avaliar os pontos chave levantados na análise C-S para que o processo de SHM se torne mais robusto. Depois, são criados dois metamodelos, sendo um deles baseado em redes neurais artificiais e , o outro, em superfícies de resposta, ambos associados ao monitoramento do crescimento de uma trinca.

6.1 Análise C-S do Procedimento de SHM de um Painel Frontal de Aeronave Comercial

Antes da aplicação da Análise C-S, busca-se tratar a informação sobre o processo que será realizado a fim de se levantar variáveis e fatores que irão influenciar em todo o processo de SHM. Em assim sendo, esta etapa inicial de aplicações de ferramentas como Mapa de Processo, IGOE e FAST se torna bastante importante. Para ilustrar a seqüência de passos, assim como o objetivo relacionado à aplicação de cada ferramenta, é apresentado um *banner* das metodologias utilizadas neste trabalho, conforme mostrado na Fig. 6.1.

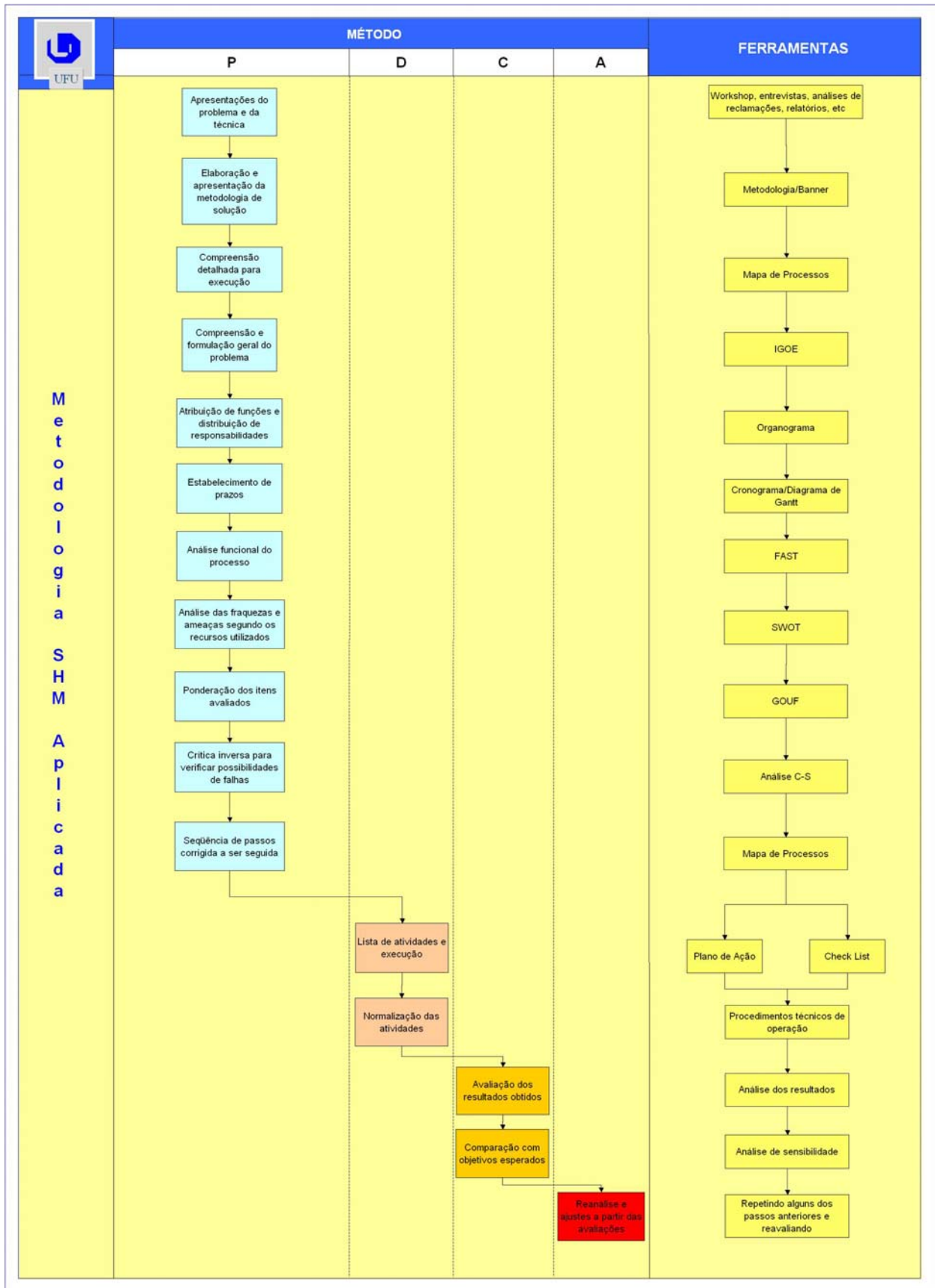


Figura 6.1 - Banner do trabalho de implantação de SHM no painel frontal de uma aeronave.

Por questões de restrição, itens avaliados como o diagrama Pert/CPM e o Organograma das atividades de implantação do sistema de monitoramento, não serão contemplados neste trabalho acadêmico, lembrando que estes, em uma aplicação real, devem ser bem definidos e as responsabilidades entre os membros da equipe de execução devem ser transmitidas claramente. Em assim sendo, o papel de cada membro da equipe estará bem definido, facilitando a implementação da metodologia de SHM.

Desta forma, seguindo cuidadosamente os passos da Fig. 6.1, pode-se dizer que a implantação das normas para o correto monitoramento da integridade estrutural de um componente ou sistema foi realizada.

A primeira etapa foi a de avaliar, junto ao fabricante do componente em estudo, os dados necessários para a implantação de SHM, tais como dimensões estruturais, tipos de falhas possíveis e suas respectivas posições, etc.

No segundo passo é feito o desenvolvimento do *banner* propriamente dito, isto é, a elaboração das etapas para contemplar a implantação do monitoramento da estrutura.

O terceiro passo consta da confecção de um mapa de processos inicial descrevendo a metodologia (ou fluxograma) proposta para o monitoramento da estrutura. Por razões de espaço e redundância, este não será apresentado aqui. Como pode ser constatado através do *banner*, um mapa de processo modificado será criado. Para fins de ilustração, será apresentado apenas o mapa de processo final.

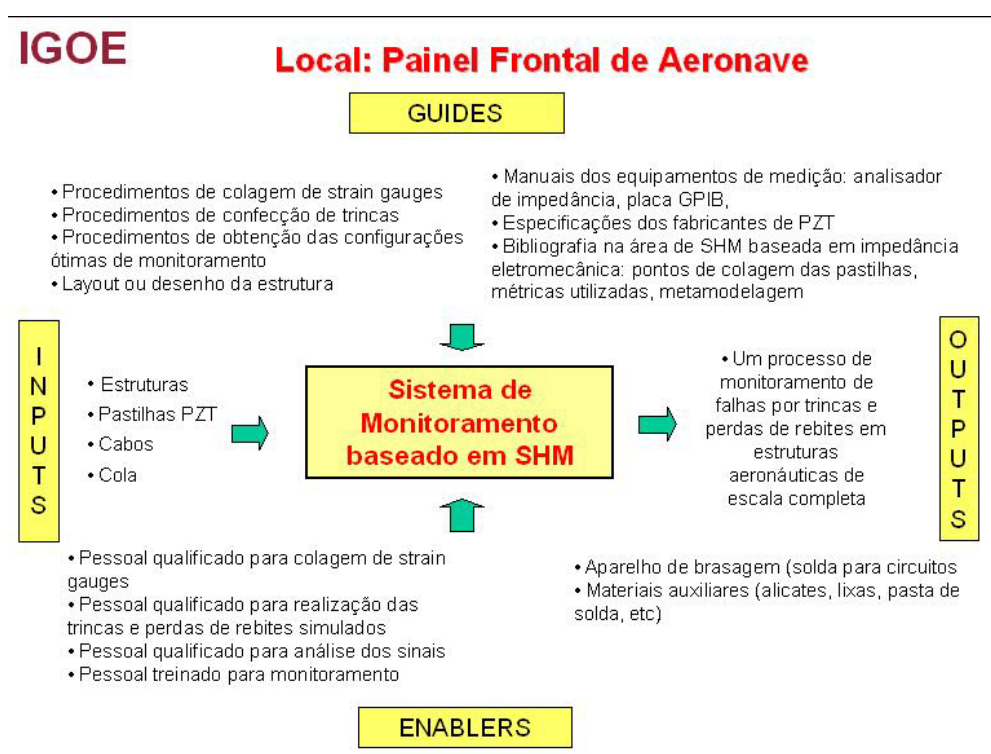


Figura 6.2 - IGOE da implantação do sistema de SHM.

Após isto, é montado o IGOE para se verificar os recursos que serão necessários para a implantação do sistema, envolvendo bens transformados (ou não) e os recursos consumíveis (ou não). O IGOE do sistema em tela pode ser observado na Fig. 6.2.

Conforme já dito, o Organograma e o Cronograma não são de interesse acadêmico neste instante e, portanto, não são considerados nesta tese, embora numa aplicação real sejam de suma importância a definição e a atribuição de responsabilidades, assim como o estabelecimento de prazos para o projeto.

No próximo item, a Análise FAST, avalia-se o funcionamento do sistema, procurando enfocá-lo em termos das funções que o mesmo deve exercer. Assim, é possível observar no extremo esquerdo da Fig. 6.3 a função primária executada pelo sistema (monitorar falhas), enquanto no extremo direito se acham os itens com os quais se deve preocupar para a execução correta da função primária estabelecida (características extraídas).

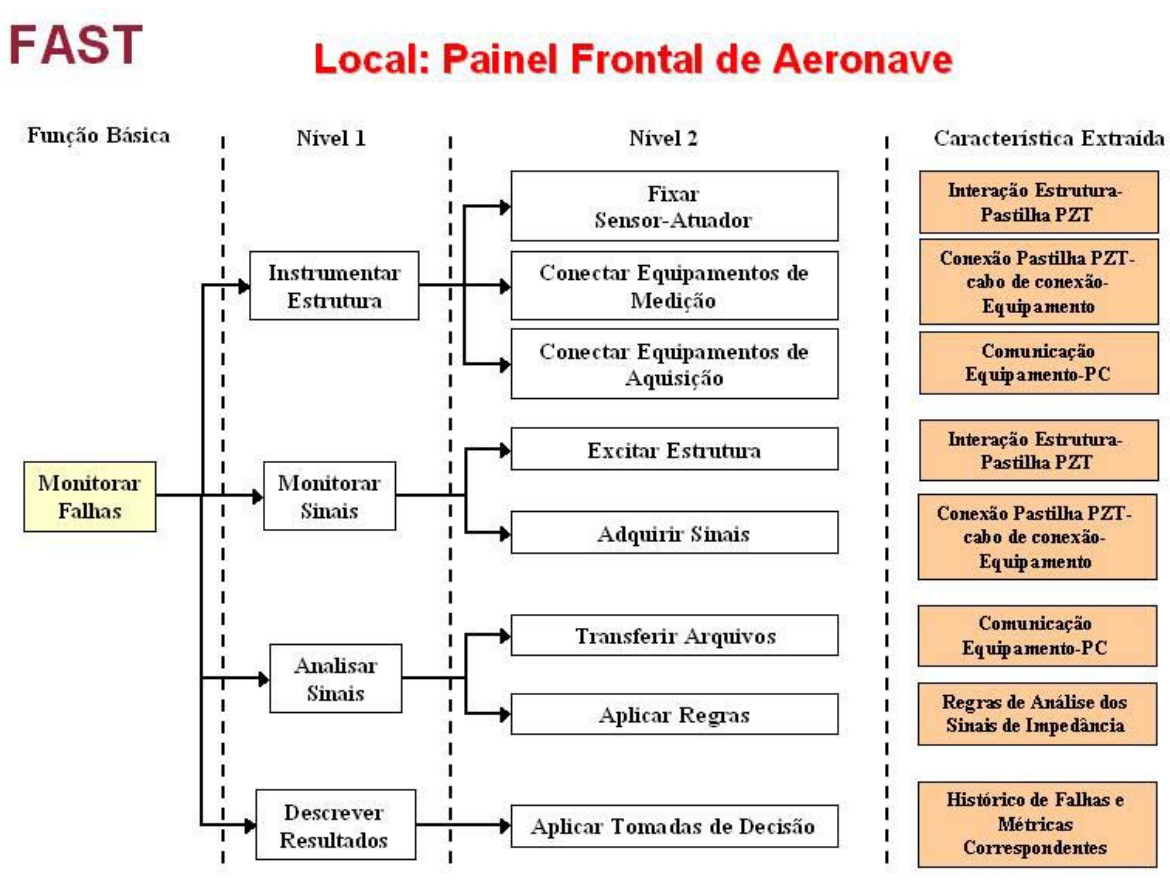


Figura 6.3 - FAST do processo de SHM.

Após a aplicação do FAST, é feita a análise SWOT das características extraídas, concentrando-se nos itens Fraqueza e Ameaças. Esta matriz é apresentada na Fig. 6.4, distinguindo-se características do sistema que são positivas, negativas, as inerentes ao próprio sistema ou aquelas causadas por um fator externo.

SWOT

Local: Painel Frontal de Aeronave

	Aspectos Positivos	Aspectos Negativos
Item devido ao próprio sistema	<p>Forças</p> <ul style="list-style-type: none"> • Regras dos Sinais de Impedância consistem de técnicas bem embasadas e consistentes derivadas da matemática, física e análise de sinais. • A Comunicação Equipamento-PC consiste na aplicação de programas ou desenvolvimento destes com base em bibliotecas comerciais amplamente utilizadas pela indústria e academia. 	<p>Fraquezas</p> <ul style="list-style-type: none"> • A Interação Estrutura-Pastilha PZT pode ser o item de maior inserção de erros internos do próprio sistema devido a um procedimento de colagem ou solda inadequada. • Os cabos inadequados ou com terminais mal conectados (mal soldados ou conectores ruins) podem prejudicar a Conexão Pastilha PZT-cabo de conexão-Equipamento.
Item advindo de característica externa	<p>Oportunidades</p> <ul style="list-style-type: none"> • Com o uso do Histórico de Falhas pode-se compreender alguns fenômenos ainda não observados para análise de falhas estruturais • Da Comunicação Equipamento-PC podem surgir novos meios de acesso aos dados da integridade estrutural do sistema, como feito no capítulo 4. 	<p>Ameaças</p> <ul style="list-style-type: none"> • Baseado no Histórico de Falhas, pode-se tirar conclusões que sejam tendenciosas ao estudo de caso específico. • Sistemas de Comunicação Equipamento-PC podem ser advindos de empresas não confiáveis e assim, não possuem confiabilidade adequada. • A Interação Estrutura-Pastilha PZT sem dúvida é a que mais é afetada por efeitos externos, ou seja, por fenômenos de temperatura, radiação, etc.

Figura 6.4 - Matriz SWOT do processo de SHM.

Após a realização da matriz SWOT, quando necessário, busca-se a ponderação dos itens avaliados para auxiliar na tomada de decisão quanto àqueles que são considerados como críticos. Neste caso, como poucos itens foram levantados na matriz SWOT, não seria necessária sua ponderação, sendo então todos os itens considerados como críticos. Entretanto, apenas para fins didáticos, será feita uma avaliação da criticidade dos itens pelo GOUF. Esta matriz GOUF é mostrada na Fig. 6.5, e apresenta as características negativas do sistema, de forma que, ponderando-as de acordo com sua relevância, possa-se então criticar o processo de monitoramento e torná-lo mais robusto.

Conforme observado na matriz GOUF da Fig. 6.5, os itens que mais podem causar problemas durante o processo de SHM são relacionados à “Interação Estrutura-Pastilha PZT”. Assim, para o correto monitoramento da integridade estrutural de um sistema, deve-se avaliar as possíveis dificuldades relacionadas à “Interação Estrutura-Pastilha PZT”.

A seguir, foi realizada a análise C-S para o procedimento de SHM de uma estrutura denominada painel frontal de uma aeronave comercial. Ao se observar as atividades descritas no *banner*, têm-se uma ampla compreensão do procedimento de SHM e, assim, um mapa descrevendo todas as atividades que devem ser contempladas, considerando todas as formas críticas de erros. Após o mapa de processos, o *banner* apenas apresenta a realização das atividades, guiado pelo *check-list* e plano de ação (vindos do mapa de processos). Por se tratar

de pontos eminentemente práticos e ser este um trabalho de cunho acadêmico, tais aspectos do *banner* serão desconsiderados neste trabalho, lembrando que, quando da aplicação da técnica em situações concretas, todos os itens devem ser obedecidos rigorosamente. O mapa de processos final é apresentado no Anexo I.

GOUF

Local: Painel Frontal de Aeronave

Aspectos Negativos





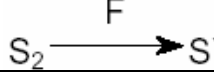
	Gravidade	Ocorrência	Urgência	Facilidade de Detecção*	Criticidade
Fraquezas					
• A Interação Estrutura-Pastilha PZT pode ser o item de maior inserção de erros internos do próprio sistema devido a um procedimento de colagem ou solda inadequada.	9	3	9	5	1215
• Os cabos inadequados ou com terminais mal conectados (mal soldados ou conectores ruins) podem prejudicar a Conexão Pastilha PZT-cabo de conexão-Equipamento.	3	3	1	3	27
Ameaças					
• Baseado no Histórico de Falhas, pode-se tirar conclusões que sejam tendenciosas ao estudo de caso específico.	9	1	1	3	27
• Sistemas de Comunicação Equipamento-PC podem ser advindos de empresas não confiáveis e assim, não possuem confiabilidade adequada.	9	1	3	1	27
• A Interação Estrutura-Pastilha PZT sem dúvida é a que mais é afetada por efeitos externos, ou seja, por fenômenos de temperatura, radiação, etc.	9	5	3	3	405


* Entende-se aqui Facilidade de Detecção como "Dificuldade de Detecção" – *Itens ponderados em: 1, 3, 5 ou 9*

Figura 6.5 - Matriz GOUF do processo de SHM.

Desta forma, este trabalho considerou a análise funcional envolvendo a Pastilha de PZT e a Estrutura. Foi considerada a Estrutura como sendo S_2 e a Pastilha de PZT como S_1 . A ação útil resultante é a vibração da estrutura atuando sobre a pastilha PZT. Qualquer outro tipo de medição (vibração ou outro) na condição em tela pode ser considerado como erro do sistema de monitoramento, devido ao dispositivo/ambiente/metodologia. As variações observadas na medição devido ao comportamento da estrutura são aquelas que nos interessam para fins de monitoramento.

Tabela 6.1 - Antecipação de falhas para o modelo C-S da Estrutura-PZT

Caso	Solução	Descrição	Aplicação em Estudo
1		S1 é isolado ou bloqueado por Sx de S2	1. A camada de cola não está “boa”, e o PZT está descolando. Então grande parte da vibração não é transferida ao PZT
2		Contra-ação da ação útil por uma substância de segurança Sx que atrai a ação por si mesma	2. Algum mecanismo que atenua drasticamente a vibração. Ex: ADV próximo do sensor.
3		Proteção de S1 da ação útil por uma substância de segurança Sx que atrai a ação por si mesma	3. O cabo dos eletrodos aumenta a rigidez do PZT, dificultando sua vibração 4. A camada de cola está excessiva, fazendo com que a excitação do PZT pela estrutura seja baixa. Sx é a camada de cola. 5. Alguma junção robusta próximo ao PZT, ou elemento de fixação está amortecendo a vibração e evitando que o PZT “sinta” a estrutura.
4		Modifique a fonte S2 da ação para desabilitar a função útil	6. Uma trinca causada na estrutura pode modificar a vibração do PZT. 7. A perda de um elemento de fixação (rebite) pode modificar a vibração do PZT. 8. Uma deformação considerável pode alterar a vibração do PZT. 9. As variações das tensões de carregamento sobre a estrutura podem modificar sua vibração
5		Modifique S1 para ser insensível a ação útil	10. O PZT pode estar quebrado ou trincado.

			<p>11. Os eletrodos podem estar mal soldados, ou as soldas podem estar oxidadas.</p> <p>12. A temperatura do ambiente pode modificar o comportamento do PZT.</p> <p>13. Emissões de ondas eletromagnéticas fortes podem afetar o PZT.</p> <p>14. Uma elevada temperatura (acima da temperatura de Curie do PZT) é capaz de inutilizar o PZT (despolarização)</p> <p>15. A estrutura possui uma grande massa ou rigidez no local que não consegue excitar o PZT, o que inviabiliza o uso da técnica.</p>
6	S_2  S_1	<p>Altere o conjunto da zona de ação, sua duração ou ambos para decair ou eliminar completamente a ação útil</p>	<p>16. Freqüência de excitação da estrutura fora da região de aplicação da técnica.</p> <p>17. Pequeno intervalo de tempo para a excitação do PZT (inviável para entrar em regime estacionário).</p> <p>18. Intensidade de vibração de pequena amplitude.</p>

6.2 Projeto de um sistema SHM baseado em Análise C-S

Como pode ser observado na Tab. 6.1, existem no mínimo 18 pontos a serem considerados no projeto de SHM baseado em impedância eletromecânica. Assim, foram criados metamodelos para identificar danos em uma estrutura do painel frontal de uma aeronave comercial considerando estes 18 pontos.

Para evitar o efeito do ponto (1), testes utilizando vários tipos de cola foram realizados. Foi utilizada a mesma cola aplicada para fixação de extensômetros elétricos (*strain gauges*). A

sensibilidade foi avaliada após as pastilhas de PZT terem sido coladas usando procedimento de adição de massa.

O ponto (2) foi ignorado aqui por causa do tipo da estrutura estudado. Não existe nenhum ADV (Absorvedor Dinâmico de Vibração) ou dispositivos similares ou ainda componentes que atuem de forma parecida.

O ponto (3) foi considerado pelo uso de cabos de rigidez baixa (mesmos cabos utilizados para extensômetros elétricos).

Quando avaliada a pertinência do ponto (1), o ponto (4) foi conseqüentemente avaliado também.

O ponto (5) foi ignorado porque a estrutura é um painel frontal de uma aeronave, e assim, trata-se de um componente flexível.

Os pontos (6-9) se referem aos procedimentos de identificação de falhas. Neste trabalho somente os pontos (6) e (7) foram avaliados. O ponto (6) demanda uma análise mais aprofundada, enquanto que o ponto (7) não foi tratado nesta tese, sendo relacionado ao rebite.

O ponto (10) pode ser evitado pelo monitoramento contínuo da integridade superficial da pastilha de PZT. Este ponto pode ser monitorado antes e após a colagem da pastilha na estrutura.

O ponto (11) pode ser evitado quando o procedimento de soldagem for executado por um profissional experiente e que utilize pasta antioxidante, como se pode observar na Fig. 6.6. Para o monitoramento contínuo da estrutura, cuidou-se de garantir boa fixação dos cabos, conforme se vê nesta mesma figura.

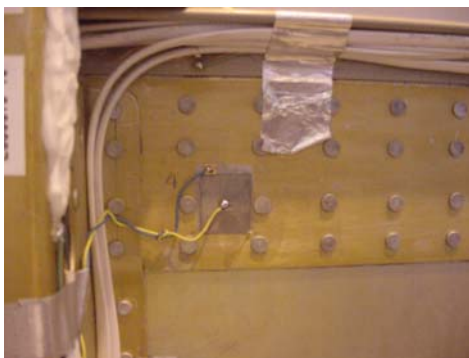


Figura 6.6 - Detalhe da solda dos eletrodos e fixação dos cabos.

O ponto (12) foi considerado, sendo que um estudo preliminar enfocando mudanças ambientais foi realizado, como será visto no próximo tópico deste capítulo.

Por causa do ambiente onde os experimentos foram realizados (hangar), não havia nenhuma razão para considerar emissões de radiações e, assim sendo, nenhum monitoramento foi realizado, permitindo ignorar, portanto, o ponto (13).

O ponto (14) não foi considerado porque as faixas de temperatura consideradas neste estudo correspondem a condições normais do local de ensaio.

O ponto (15) não foi considerado porque a estrutura em estudo é um painel frontal, situação já caracterizada também pelo ponto (5).

O ponto (16) foi evitado pelo estudo prévio da avaliação da banda de frequência da estrutura.

O ponto (17) foi evitado pela correta configuração do equipamento, adequada às atividades de monitoramento em condições de regime permanente.

Novamente, como considerado no ponto (17), o ponto (18) pode ser igualmente evitado pelo uso da configuração correta, aplicando a voltagem adequada pelo analisador de impedância, de forma a excitar convenientemente a pastilha de PZT.

6.3 Monitoramento da Integridade Estrutural no “Barril” da Aeronave

Na estrutura do tipo “barril” da aeronave comercial foi realizado um estudo para verificar a possível ocorrência de alteração nos sinais de impedância eletromecânica ao longo do tempo, de forma a poder observar variações ao longo de um dia de medições, sendo estas associadas a mudanças térmicas ou a quaisquer outros fatores. De uma maneira geral é desejável que uma estrutura não varie seu sinal de impedância ao longo do tempo, e conseqüentemente permita a utilização desta técnica para aplicações em situações reais de engenharia. Por outro lado, simultaneamente, a técnica deve obviamente permitir a detecção de uma variação significativa do sinal de base quando comparado com aquele devido a uma massa adicional (representativa de uma modificação estrutural conhecida). Em outras palavras, a metodologia neste caso deverá avaliar a robustez e a repetibilidade dos testes, ao mesmo tempo em que se observa sua sensibilidade, percebendo variações estruturais impostas na proximidade do sensor/atuador. A Fig. 6.7 ilustra a estrutura a ser monitorada, com a pastilha de PZT colada sobre sua superfície. A pastilha de PZT possui dimensões de 0,8x2 cm.



Figura 6.7 - Estrutura tipo “barril” de uma aeronave comercial com uma pastilha de PZT colada em sua superfície.

A Fig. 6.8 mostra a estrutura com a massa adicionada (uma porca de 3/8”) colada. A massa adicional foi instalada a uma distância de 7,5 cm (centro a centro) da pastilha de PZT.

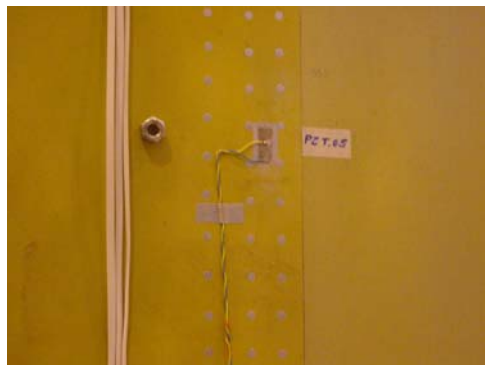


Figura 6.8 - Estrutura tipo “barril” de uma aeronave comercial com uma pastilha de PZT e massa adicional.

Inicialmente, com o analisador de impedância HP4194A, foram realizados os ensaios descritos pela Tab. 6.2.

Tabela 6.2 - Ensaio experimentais para a estrutura aeronáutica tipo “barril”

Banda de Frequência	Hora do Ensaio			
	12:40	14:30	15:40	17:00
	Normal			Com Porca
27 – 40 KHz	1	7	13	19
54 – 62 KHz	2	8	14	20
158 - 220 KHz	3	9	15	21
260 - 330 KHz	4	10	16	22
350 - 417 KHz	5	11	17	23
417 - 478 KHz	6	12	18	24
100 KHz – 40 MHz	G1	G2	G3	G4

Legenda:	
Ensaio realizado	
Ensaio não realizado	

Os números que estão nas tabelas correspondem aos ensaios do barril e aos arquivos adquiridos pelo analisador de impedância. O analisador foi configurado com 1Volt RMS, 401 pontos, 128 médias e *short time* de integração (entre cada amostragem). Os tipos de sinais adquiridos correspondem às partes real (Re) e imaginária (Im) do sinal de impedância.

Devido a algumas restrições do tempo alocado para os ensaios de campo aqui apresentados, alguns ensaios tiveram que ser excluídos dos testes, sendo estes marcados em vermelho na Tab. 6.2.

Na Fig. 6.9 são apresentados os resultados da parte real para a primeira linha da Tab. 6.2. Nela é possível observar o grande desvio gerado pela adição de massa adicional colada

próximo ao sensor. O comportamento desse sinal se revela bem diferenciado dos outros nesta faixa de frequências e, portanto, considera-se esta faixa como sendo ótima para o monitoramento. Assim, foi observada uma pequena variação do sinal ao longo do tempo (estabilidade da técnica), porém permitindo verificar uma grande variação decorrente da adição de massa. Vê-se, também, uma variação significativa na forma do sinal. Além disso, esse mesmo sinal se revela muito ruidoso. Uma possível explicação para esse fato tem a ver com a redução do número de médias para esse caso em particular motivado pela grande quantidade de ensaios a serem realizados. Este experimento foi acrescentado posteriormente à fase de planejamento da bateria de testes realizados.

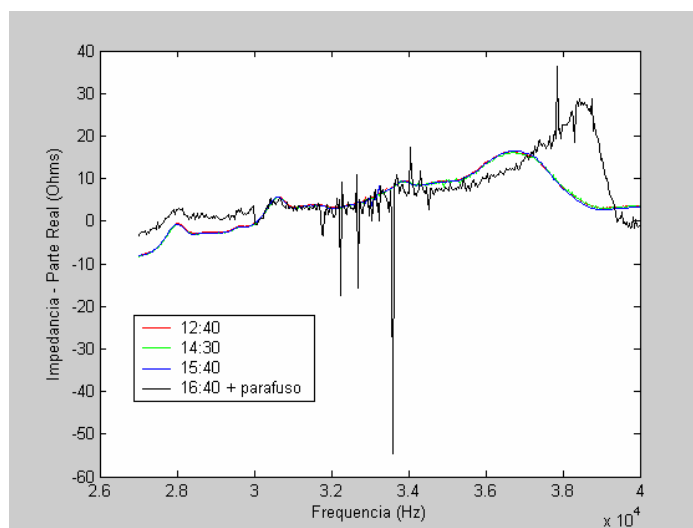


Figura 6.9 - Sinal de impedância (parte real) para a primeira faixa de frequências do ensaio do barril.

Na Fig. 6.10 são apresentados as métricas de danos (*damage metrics*) correspondentes aos ensaios realizados. Estas métricas equivalem à soma quadrática das diferenças entre os sinais de referência e aqueles da estrutura danificada (Park et al, 2003).

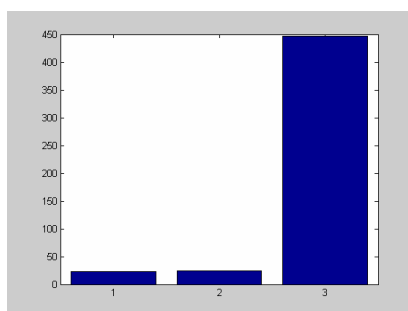


Figura 6.10 - Métricas de danos para o sinal de impedância (parte real) para a primeira faixa de frequências do ensaio do barril.

Na Fig. 6.10 pode-se observar uma grande variação decorrente da comparação entre os sinais iniciais (sem adição de massa) e o último (com adição de massa). Entretanto, uma grande parcela desta variação é devida, também, ao erro inserido pelo ruído gerado no ensaio.

Realizando o mesmo procedimento para a quarta linha da Tab. 6.2 (quarta faixa de freqüências) , apresentam-se os sinais de impedância – parte real – conforme a Fig. 6.11.

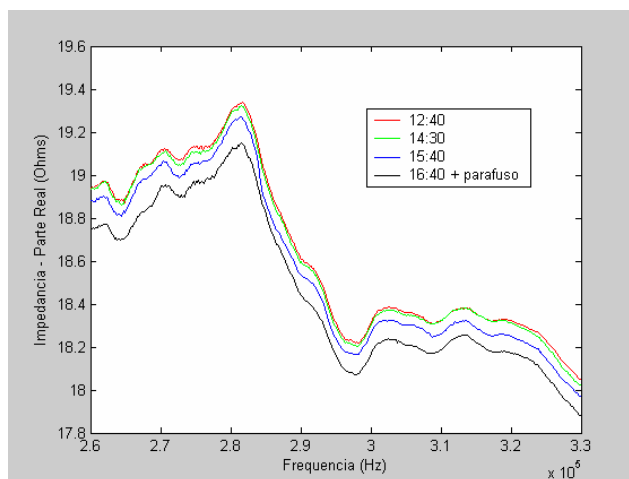


Figura 6.11 - Sinal de impedância (parte real) para quarta faixa de freqüências do ensaio do barril.

Para esta banda de freqüências, o primeiro comentário a ser feito tem a ver com a não alteração da forma do sinal medido, quando comparados os vários sinais de impedância antes e após a adição da massa. Este fato é possivelmente explicado pelo fato da banda de freqüências utilizada ser considerada “alta”. Uma banda de freqüências padrão, conforme citado por Park (2003), ocorre na faixa de freqüência entre 20 e 60 kHz. Observe que esta quarta faixa ocorre entre 260 e 330 kHz, sendo bastante alta para o caso abordado. Este procedimento foi conduzido tendo em vista que, desconhecendo a estrutura e seu comportamento, buscou-se ampliar as faixas de medição procurando identificar melhores “janelas” de amostragem. Ao se trabalhar em faixas de freqüências elevadas tem-se em muitos casos uma redução de efeitos de ruído, como observado anteriormente no caso da primeira faixa utilizada. Estruturas de grande porte também são comumente avaliadas em freqüências elevadas para melhor observação da ocorrência de falhas.

As métricas de dano representativas do quarto ensaio estão mostradas na Fig. 6.12, onde se observa uma variação bastante nítida entre as colunas. Porém, quando comparada com a Fig. 6.10, pode-se perceber uma grande diferença, conforme apresentada ao longo do eixo y (observe a escala usada nas duas figuras).

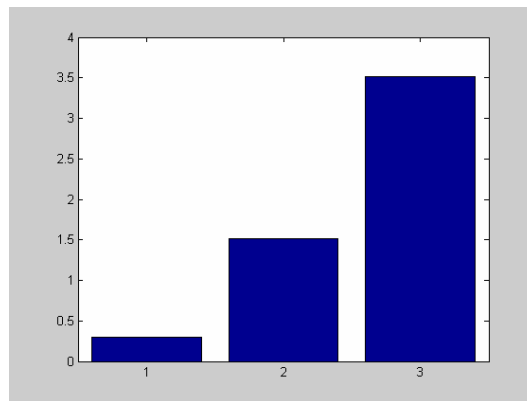


Figura 6.12 - Métricas de dano para os sinais de impedância (parte real) para a quarta faixa de freqüências do ensaio do barril.

Avaliando-se agora a quinta faixa de freqüências para o ensaio do barril, obtém-se a Fig. 6.13. Nesta quinta faixa de freqüências (350 a 420 kHz) também é observado o mesmo comportamento do caso anterior, podendo-se constatar uma baixa (quase inexistente) variação na forma do sinal. Entretanto, como foi mostrado na Fig. 6.12, mesmo que a diferença em relação aos sinais da primeira faixa de freqüências seja pequena, existe uma variação significativa entre os sinais de impedância (medida de dano) entre as primeiras medidas (variando-se o tempo, sem adição de massa) e a última (com adição de massa).

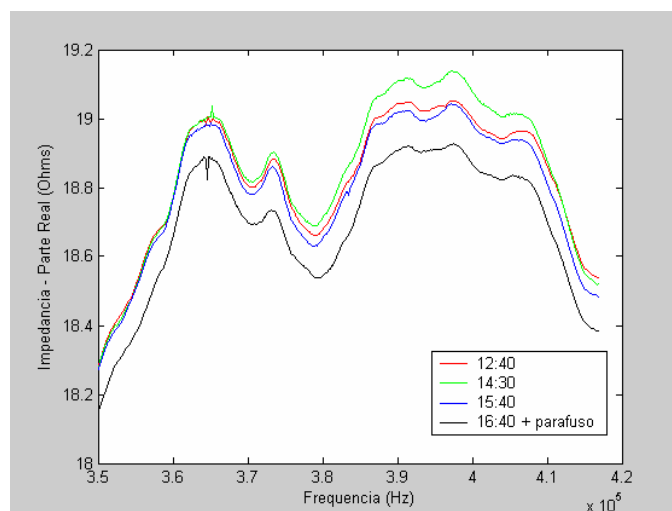


Figura 6.13 - Sinal de impedância (parte real) para quinta faixa de freqüências do ensaio do barril.

Esse desvio importante é observado na Fig. 6.14, assim como na Fig. 6.12, notando-se a diferença entre os resultados mostrados nas colunas 1 e 2 do gráfico quando comparadas com a coluna 3. Neste caso, um procedimento recomendável seria a repetição destes experimentos, já que são não destrutivos, ao longo de vários dias, gerando-se um conjunto de

repetições que seja capaz de ilustrar as variâncias e as médias em um gráfico do tipo “caixa” (*boxplots*).

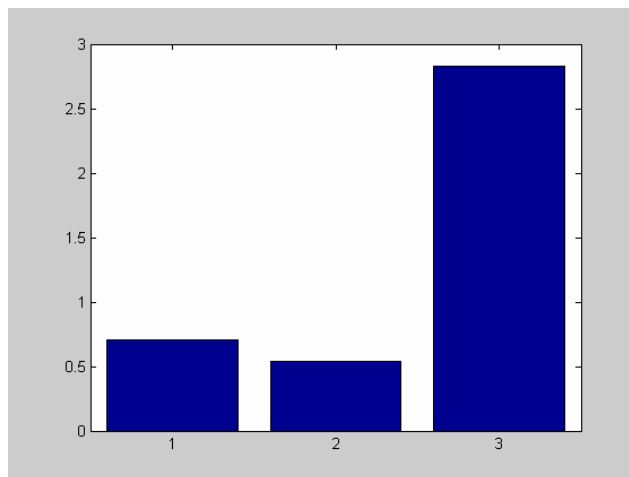


Figura 6.14 - Métricas de danos para o sinal de impedância (parte real) para a quinta faixa de freqüências do ensaio do barril.

A Fig. 6.15 apresenta o conjunto de sinais obtidos a partir da sexta linha da Tab. 6.2. Também aqui não foram realizadas todas as possíveis medições devido a restrições de tempo. Assim, para esta sexta faixa de freqüências são obtidos resultados análogos ao caso anterior, não tendo sido considerado o caso com adição de massa.

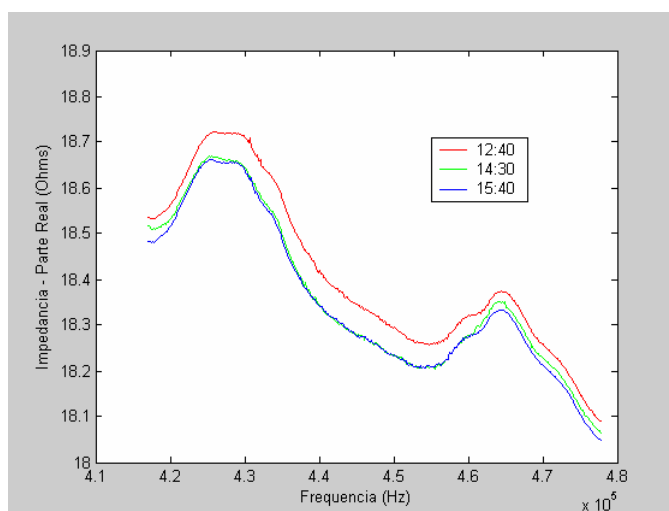


Figura 6.15 - Sinal de impedância (parte real) para a sexta faixa de freqüências do ensaio do barril.

Na faixa de freqüências utilizada, também elevada, não são observadas distorções devido a ruídos, resultando um comportamento muito similar aos últimos casos relatados

acima. Para fins ilustrativos, a métrica de danos obtida pela Fig. 6.15 é apresentada na Fig. 6.16. Esta figura apresenta valores considerados muito pequenos e, de certa forma, correspondem mais a variações normais entre duas medições do que realmente a alguma alteração estrutural significativa no sistema em estudo.

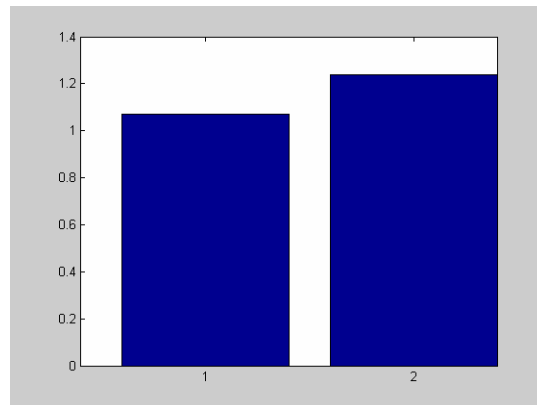


Figura 6.16 - Medidas de danos para o sinal de impedância (parte real) da sexta faixa de frequências do ensaio do barril.

Na Fig. 6.17 é apresentada a sétima linha (sétima faixa de frequências) da Tab. 6.2 correspondente à parte de altas frequências do sinal. Nesta faixa é possível se observar pequena variação dos sinais ao longo do dia.

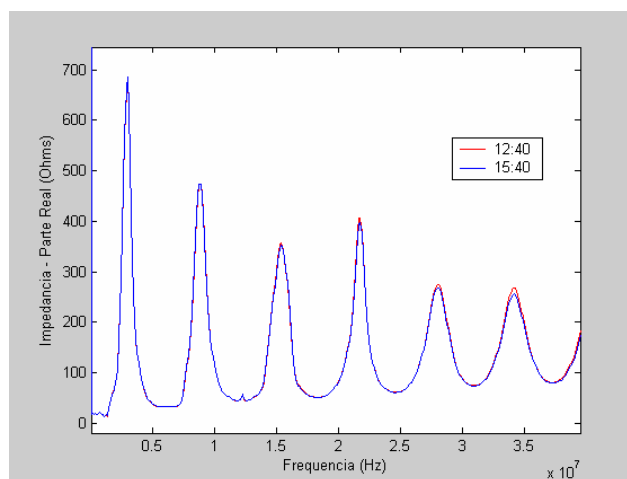


Figura 6.17 - Sinal de impedância (parte real) para a sétima faixa de frequências do ensaio do barril.

Na Fig. 6.18 é apresentada a mesma faixa de frequências para uma região de até 100 kHz. Nesta figura pode-se observar uma variação expressiva entre os sinais, principalmente na faixa que vai até 70 kHz. Isto mostra que, para a estrutura em estudo, uma faixa de frequências

até 70 kHz poderia ser aplicada com boas possibilidades de êxito para fins de SHM. Faixas muito baixas de frequência, apesar de apresentarem uma grande sensibilidade a variações estruturais, também possuem a desvantagem de serem mais sensíveis a ruídos externos ao sistema, devendo a faixa ideal ser adotada buscando uma solução de compromisso entre sensibilidade a modificações estruturais e influência de ruídos externos.

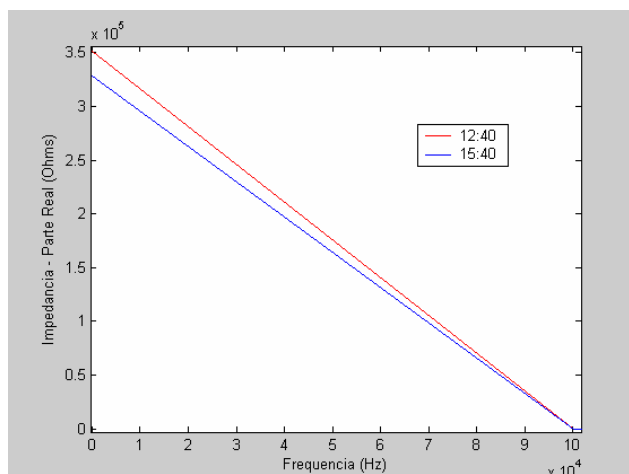


Figura 6.18 - Sinal de impedância (parte real) para a sétima faixa de frequências do ensaio do barril.

A sétima linha da Tab. 6.2 representa uma medição da estrutura em uma faixa de frequências que engloba toda a faixa possível de ser mensurada pelo equipamento. Mesmo com uma variação mais sensível na parte inferior da faixa de frequências, as diferenças entre os sinais não são tão significativas, pois não existe variação estrutural entre eles, mas apenas defasagem no tempo. Isso pode ser observado pela Fig. 6.19 que apresenta um valor extremamente baixo da métrica de dano entre os dois casos, já que são considerados também os sinais nas frequências de 100 Hz a 8 kHz, ou seja, fora da região de aplicação da técnica de monitoramento da integridade estrutural baseada na impedância eletromecânica.

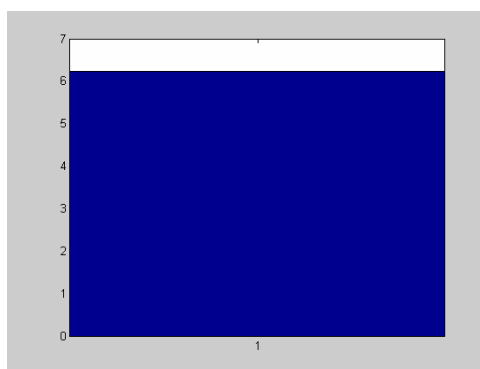


Figura 6.19 - Medidas de danos para sinal de impedância (parte real) para a sétima faixa de frequências do ensaio do barril.

É possível concluir desta etapa do trabalho que a estrutura possui um comportamento adequado para monitoramento da integridade estrutural a partir da impedância eletromecânica, pelo menos para falhas similares à induzida neste trabalho. Faixas de frequências elevadas não representaram um comportamento adequado para o monitoramento, enquanto que a primeira faixa de frequências apresentou um comportamento próximo aos estudos realizados anteriormente na área.

6.4 SHM Aplicadas à Identificação de Fissuras no Painel Frontal de uma Aeronave Comercial

Nesta segunda etapa experimental, demonstrada a viabilidade da metodologia de monitoramento de integridade estrutural baseada em impedância eletromecânica apresentada na seção anterior, foi avaliado um procedimento para identificação do crescimento de trincas em um painel frontal de uma aeronave comercial. A estrutura e as posições dos sensores/atuadores do tipo PZTs podem ser observadas na Fig. 6.20.

A numeração das pastilhas de PZT mostrada na Fig. 6.20 se dá de forma crescente no sentido da altura do painel, ou seja, a pastilha inferior corresponde ao PZT #1, enquanto que o que está posicionado na extremidade superior é o PZT #4.



Figura 6.20 - Estrutura do painel frontal da aeronave com pastilhas de PZT coladas para simulação do crescimento de trincas.

O trabalho consistiu em inserir inicialmente uma trinca de tamanho conhecido em uma região próxima a um dos reforços, como apresentado nas Figs. 6.21a e 6.21b, vistas interna e externa do painel, respectivamente. Esta trinca inicial está posicionada entre as pastilhas de PZTs centrais, ou seja, entre o PZT #2 e o PZT #3.



(a) – vista interna do painel e da trinca (b) – vista externa do painel e da trinca

Figura 6.21 - Vistas interna e externa do painel com uma trinca inicial

Os experimentos realizados para a verificação da viabilidade da metodologia de monitoramento da integridade estrutural através do monitoramento de sinais de impedância estão apresentados na Tab. 6.3.

Tabela 6.3 - Ensaio para monitoramento do crescimento da trinca

# PZT	Banda de Frequência	condição							teste com fita de alumínio
		sem carga	com carga	fissura de 15 mm	fissura de 16 mm	fissura de 17 mm	fissura de 18 mm	fissura de 23 mm	
1	11 - 15,5 KHz	1	18	35	52	69	86	103	t1
1	18,5 - 26 KHz	2	19	36	53	70	87	104	
1	29 - 33,5 KHz	3	20	37	54	71	88	105	t2
1	80 - 96,5 KHz	4	21	38	55	72	89	106	t3
1	104 - 116,5 KHz	5	22	39	56	73	90	107	
1	143 - 160 KHz	6	23	40	57	74	91	108	
1	100 Hz - 40 MHz	g1	g5	g9	g13	g17	g21	g25	
2	15 - 22 KHz	7	24	41	58	75	92	109	t4
2	22 - 30 KHz	8	25	42	59	76	93	110	t5
2	103 - 118 KHz	9	26	43	60	77	94	111	t6
2	118 - 128 KHz	10	27	44	61	78	95	112	
2	128 - 138 KHz	11	28	45	62	79	96	113	
2	139 - 150 KHz	12	29	46	63	80	97	114	
2	100 Hz - 40 MHz	g2	g6	g10	g14	g18	g22	g26	
3	256 - 300 KHz	13	30	47	64	81	98	115	
3	256 - 380 KHz	14	31	48	65	82	99	116	
3	256 - 438 KHz	15	32	49	66	83	100	117	
3	100 Hz - 40 MHz	g3	g7	g11	g15	g19	g23	g27	
4	137 - 186 KHz	16	33	50	67	84	101	118	
4	388 - 444 KHz	17	34	51	68	85	102	119	
4	100 Hz - 40 MHz	g4	g8	g12	g16	g20	g24	g28	

Foi primeiramente realizado um ensaio da estrutura sem a aplicação de nenhum carregamento, como é apresentado na Tab. 6.3, na primeira coluna. Logo em seguida, uma pequena carga considerada para a estrutura foi aplicada para obter-se o efeito do carregamento sobre os sinais de impedância. A intenção foi a de se representar realisticamente um caso de monitoramento estrutural de trinca de uma estrutura sujeita a esforços, ou seja, um caso bastante próximo da realidade de uma estrutura aeronáutica. Posteriormente, foi adicionada uma fissura de 15 mm acima do reforço entre as pastilhas de PZT números 3 e 4 (Fig. 6.20), como pode ser visto na Fig. 6.21. Assim, foram realizados todos esses ensaios e foi-se ampliando o comprimento da fissura a partir dos dois lados da mesma. Alguns testes preliminares foram implementados sem a aplicação de carregamento, adicionando apenas uma fita de alumínio no painel, como mostra a Fig. 6.22. A massa da fita equivale a 0,630 g.



Figura 6.22 - Ensaio inicial com adição de massa feita apenas com uma fita de alumínio.

O analisador de impedância HP4194A foi utilizado com as seguintes configurações: 1 Volt RMS, 401 pontos de amostragem, 64 médias para cada ponto e tempo médio de integração entre dois pontos amostrados. Alguns resultados iniciais referentes ao ensaio com a fita de alumínio são apresentados na Fig. 6.23.

Assim, na Fig. 6.23 são apresentados os sinais da primeira faixa de frequências para o monitoramento com a fita de alumínio, medidos pela pastilha PZT #1, para a primeira condição de teste t1, conforme definida na Tab. 6.3.

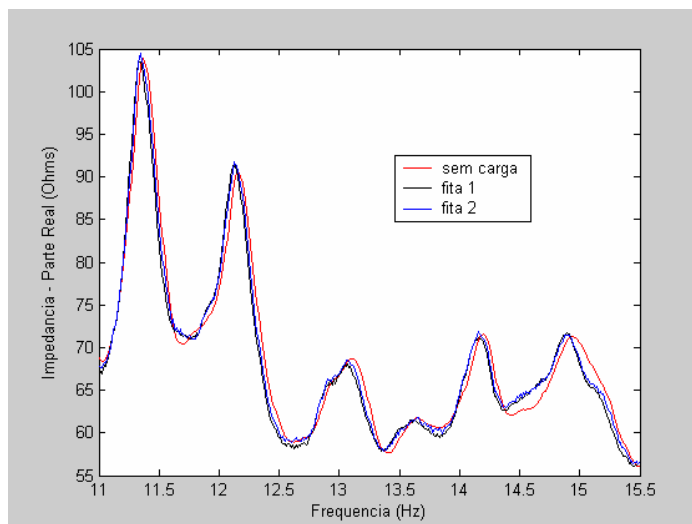


Figura 6.23 - Sinal de impedância (parte real) para a condição de ensaio t1 do ensaio do painel frontal.

De acordo com o obtido por esse primeiro ensaio, pode-se verificar a repetibilidade do processo ao se refazer o ensaio com a fita, conforme ilustrado pelas linhas “fita 1” e “fita 2” na

Fig. 6.23. O sinal sem a fita apresenta-se defasado, com um pequeno deslocamento dos picos. Isto pode ter ocorrido devido à variação de massa gerada pela adição da fita, fazendo com que localmente essa massa modificada altere ligeiramente as frequências naturais relativas a efeitos localizados.

Na Fig. 6.24 são apresentados os resultados equivalentes ao processo de teste t2.

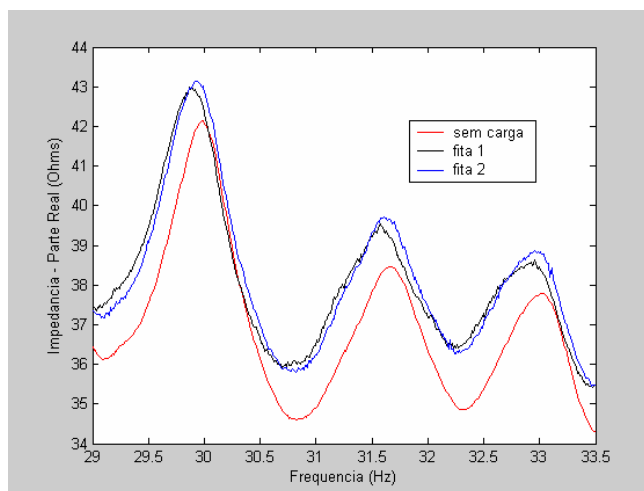


Figura 6.24 - Sinal de impedância (parte real) para a condição de ensaio t2 do ensaio do painel frontal.

Aqui também se nota a repetibilidade dos sinais com a massa adicionada. O efeito causado pela adição de massa para essa condição foi o deslocamento ao longo do eixo y do sinal de impedância. Esse mesmo efeito permanece e vai sendo observado para a mesma pastilha PZT #1 na condição de teste t3, como mostra a Fig. 6.25, onde o sinal da condição “sem carga” sofre um desvio ainda maior no deslocamento ao longo do eixo y.

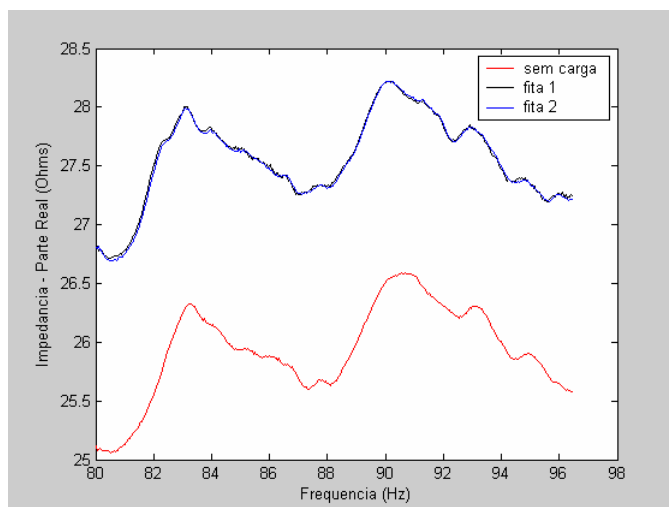


Figura 6.25 - Sinal de impedância (parte real) para a condição de ensaio t3 do ensaio do painel frontal.

Com isto, acredita-se que o efeito ao longo da frequência seja que, quanto maior a faixa de frequência analisada, maior será a defasagem entre os sinais, embora uma melhor verificação ocorra nas frequências mais baixas, por implicarem modificação tanto das amplitudes, como da forma do sinal.

Para confirmar essa observação, verifica-se o mesmo para os testes realizados medindo-se com a pastilha PZT #2. Na Fig. 6.26 é apresentada a condição t4 da Tab. 6.3.

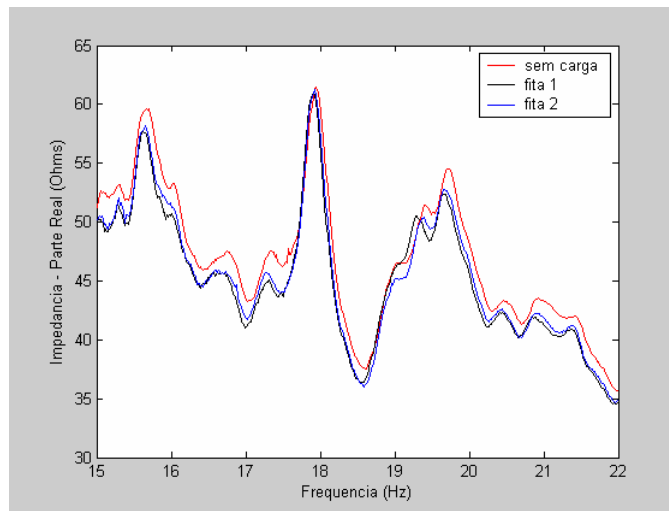
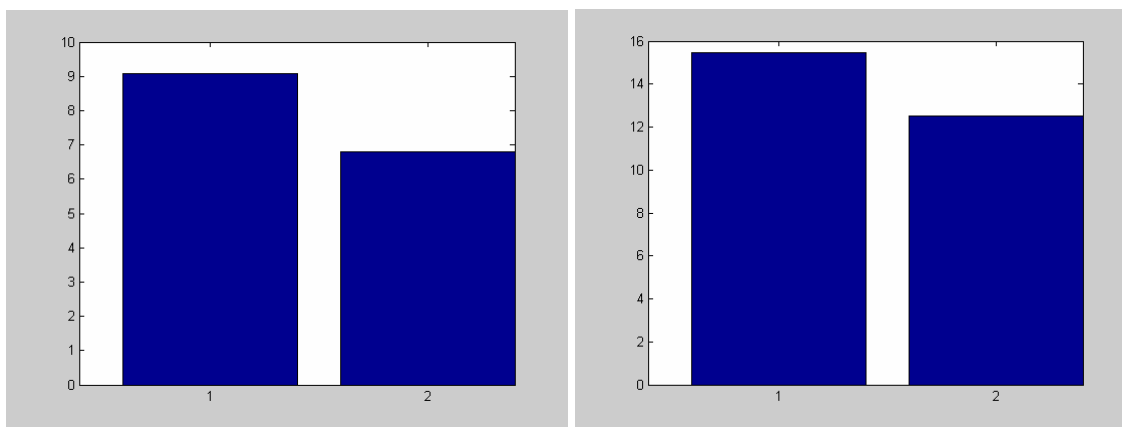


Figura 6.26 - Sinal de impedância (parte real) para a condição de ensaio t4 do ensaio do painel frontal.

Para verificar o efeito da distância do sensor à fita colada, basta recorrer-se às Figs. 6.27a e 6.27b que ilustram as métricas de dano correspondentes, respectivamente, aos sinais medidos pelas pastilhas PZT #1 e PZT #2 para as frequências mais baixas (ensaios t1 e t4).



a) – medidas de danos para o PZT #1

b) – medidas de danos para o PZT #2

Figura 6.27 - Métricas de danos para os dois PZTs utilizando o sinal “sem carga” como referência.

Na Fig. 6.27 pode-se observar uma maior sensibilidade para a pastilha PZT #2 devido a sua maior proximidade da fita colada como massa adicional (Fig. 6.22). As duas colunas correspondem, respectivamente, às primeira e segunda repetições para o caso de uma fita de alumínio colada, utilizando o sinal “sem carga” como referência.

Para se ilustrar que o efeito do deslocamento em y é maior quando se desloca o eixo das frequências no sentido crescente, basta observar como este comportamento aparece com nitidez na Fig. 6.28.

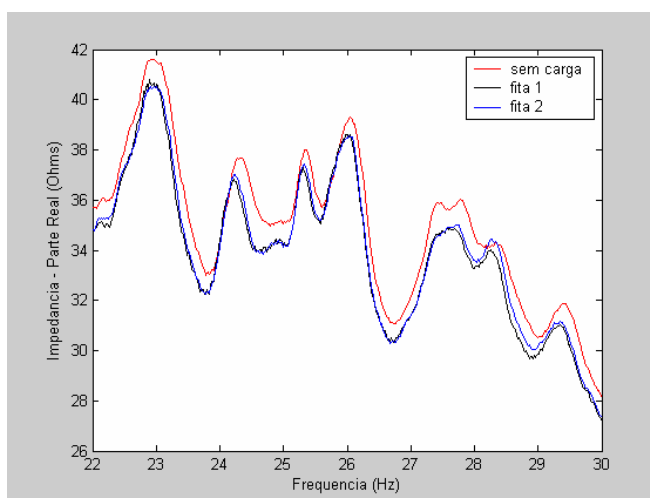


Figura 6.28 - Sinal de impedância (parte real) para a condição de ensaio t5 do ensaio do painel frontal.

Nesta figura é mostrado que o mesmo efeito que ocorre para a pastilha PZT #1, ocorre também para o PZT #2. Entretanto, esse deslocamento é pequeno para essas faixas de frequência utilizadas, sendo ainda adicionado o efeito de variação da forma do sinal devido ao acréscimo de massa. No pico da região próxima à frequência de 28 kHz, isto se torna bastante evidente, semelhantemente ao que ocorre com sinais no domínio da frequência de sistemas com absorvedores dinâmicos de vibração.

Concluída esta fase de avaliação da técnica, utilizando uma fita adesiva de alumínio, buscou-se a elaboração de um modelo que ajude a estabelecer critérios para avaliação do crescimento de trincas simuladas (fissuras) na placa do painel frontal da aeronave. Para isso, foram executados os experimentos ilustrados na Tab. 6.3 com a finalidade de identificar bandas de frequências possíveis para o monitoramento. As bandas de monitoramento não foram previamente otimizadas, como é habitual em trabalhos similares já desenvolvidos anteriormente, uma vez que se deseja estudar dois efeitos conjuntamente utilizando os mesmos sensores, além de limitações de tempo para execução dos trabalhos aqui apresentados. Para as mesmas pastilhas de PZT utilizadas, buscou-se obter o maior conjunto

de informações possível para a determinação de modelos de representação de fissuras e seus crescimentos, assim como lesões nos furos onde estão localizados rebites. Este trabalho tratará apenas do estudo de fissura no painel. O efeito de lesões na base de rebites foi estudado pelo autor, porém não será apresentado aqui para não estender demasiadamente o texto.

Inicialmente, durante a fase de levantamento por tentativa e erro das bandas de frequência de monitoramento, foi detectado um problema relativo à baixa sensibilidade das pastilhas PZT #3 e #4. Isto foi demonstrado pela incapacidade de reprodução de sinais devido a uma grande quantidade de erros aleatórios em baixas frequências (abaixo de 100 kHz). Esses resultados podem ter sido gerados em decorrência de uma distribuição de tensões não homogênea na estrutura devido ao carregamento, ou por algum efeito da colagem ou solda dos eletrodos. É importante ressaltar que as pastilhas utilizadas neste trabalho são pastilhas “brutas”, ou seja, cortadas e coladas nas dimensões desejadas. Além disso, a soldagem dos eletrodos é realizada pelo operador e não possui camada protetora para o sensor/atuador. Algumas opções de PZTs industrialmente “preparados” reduziriam em muito os efeitos de montagem, mas acarretaria em custos elevados para a fase em que se encontra o atual estudo, que é simplesmente a de se promover um levantamento da viabilidade tecnológica da metodologia em tela. Entretanto, acredita-se ser possível monitorar a estrutura em frequências mais elevadas para estes dois sensores/atuadores, aplicando-se alguns critérios de seleção.

Após realizar um trabalho exaustivo de análise dos dados dos experimentos, foram adotados os conjuntos de dados relativos aos primeiros experimentos com cada sensor, ou seja, os experimentos relativos às linhas 1, 7, 13 e 16 da Tab. 6.3. Partindo do princípio que para o monitoramento da integridade estrutural foram medidos os sinais da parte real e também da parte imaginária, tem-se para cada condição de falha (ou tamanho de fissura), um conjunto de 8 sinais equivalentes, sendo 4 sensores/atuadores para dois tipos de sinais (real e imaginário).

Para cada sinal foi calculada sua métrica de dano, tomando como referência (baseline) o primeiro caso com carregamento para cada faixa de frequência (quarta coluna da Tab. 6.3). Para evitar algum possível ruído de deslocamento ao longo do eixo y dos sinais ao longo do tempo, como investigado na primeira parte deste capítulo, foi realizado um procedimento de normalização, ou seja, aplica-se todos os sinais sobre suas médias e considera-se uma mesma referência, como já realizado por Moura Jr (2003).

Nas Figs. 6.29 a 6.32 são apresentados vários sinais com suas respectivas falhas para os quatro sensores/atuadores.

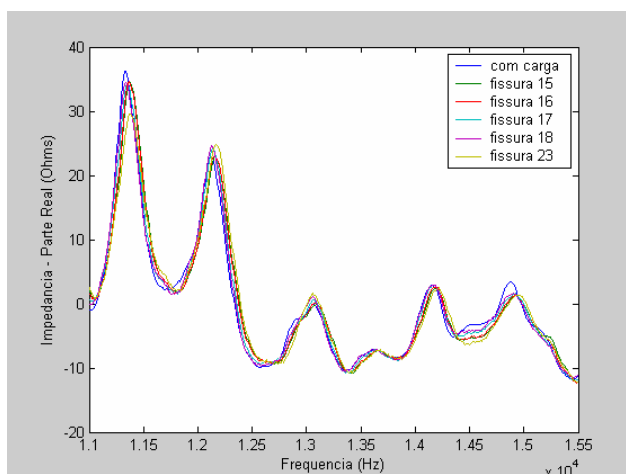


Figura 6.29 - Sinal de impedância (parte real) para a condição de ensaio 1 do ensaio do painel frontal.

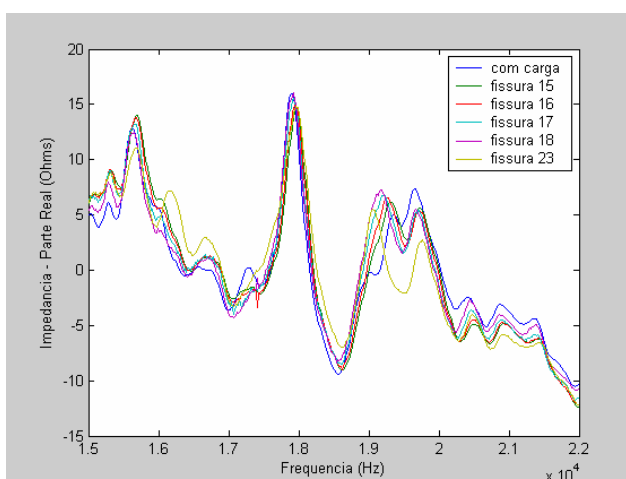


Figura 6.30 - Sinal de impedância (parte real) para a condição de ensaio 7 do ensaio do painel frontal.

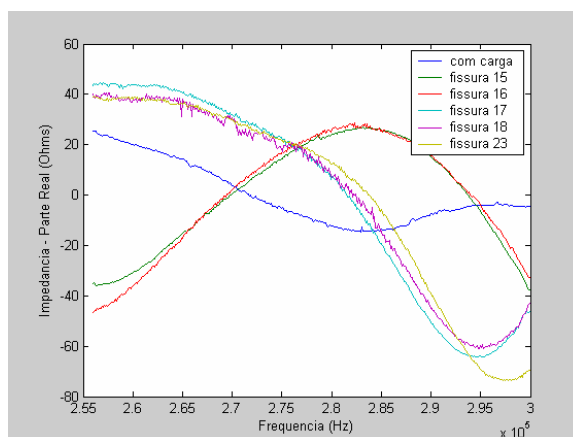


Figura 6.31 - Sinal de impedância (parte real) para a condição de ensaio 13 do ensaio do painel frontal.

Para a Fig. 6.31, foi apresentada uma variação grande entre os sinais de monitoramento. Como este comportamento foi igualmente observado nas demais faixas de frequência avaliadas para esta pastilha de PZT, os valores obtidos neste experimento também foram considerados.

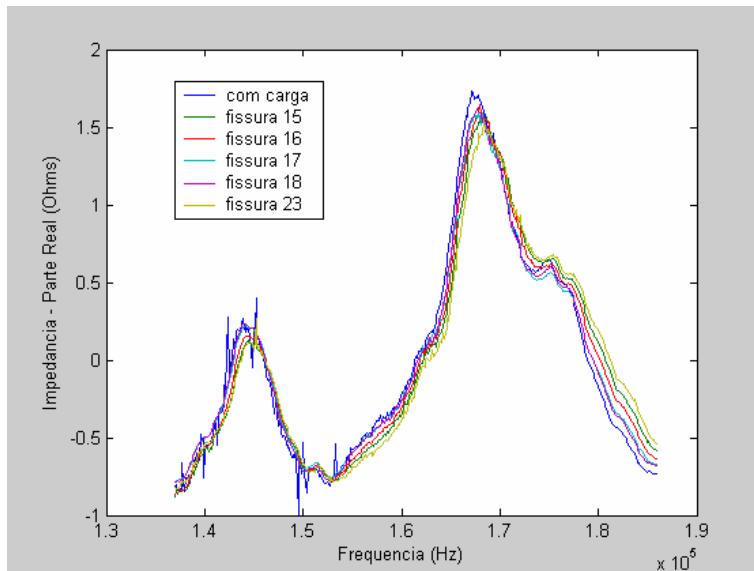


Figura 6.32 - Sinal de impedância (parte real) para a condição de ensaio 16 do ensaio do painel frontal.

Para a Fig. 6.32 foi encontrado um nível elevado de ruído. Isto era de se esperar, pois, como observado anteriormente para a estrutura de barril, quando se utilizam as menores bandas de frequências possíveis para o sensor/atuador, assim também se aumenta o nível de ruído produzido pelo sistema.

Entretanto, o uso de uma banda superior a essa, ou seja, o experimento da linha 17, implicaria uma perda importante de informações por se tratar de uma banda muito extensa. Como comentado anteriormente, para os dois últimos sensores/atuadores de PZTs não foram obtidos bons resultados para o monitoramento, mas como apresentam comportamento coerente, embora muito fora da faixa recomendável de monitoramento, eles foram mantidos para a modelagem.

A Fig. 6.33 apresenta os valores das métricas de dano para a pastilha PZT #2.

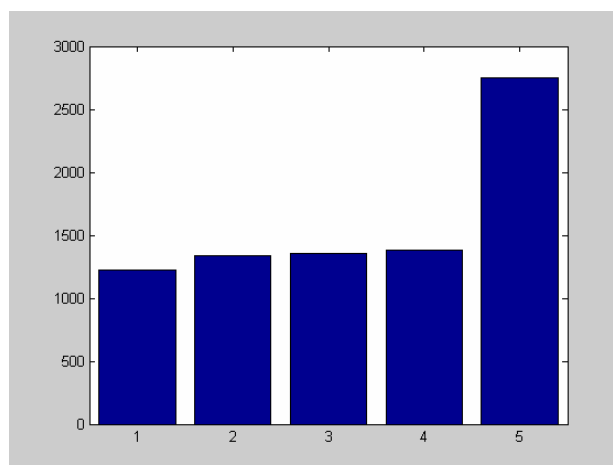


Figura 6.33 - Métricas de dano para a pastilha PZT #2

O mesmo ocorre para a parte imaginária do sensor/atuador PZT #3, como mostra a Fig. 6.34. Apesar da parte real desta pastilha não apresentar grandes contribuições, a parte imaginária do sinal oriundo deste sensor é capaz de distinguir o tipo de fissura que está ocorrendo na estrutura.

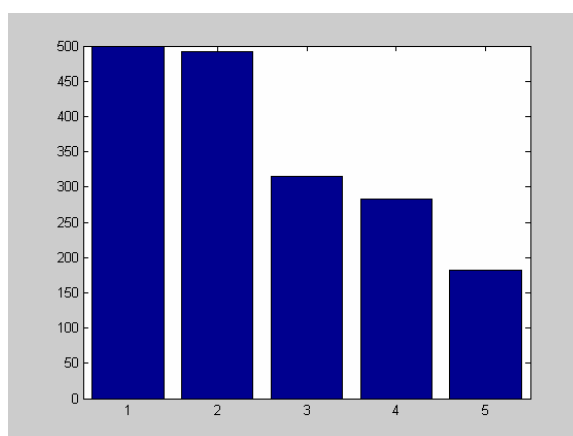


Figura 6.34 - Métricas de dano para a pastilha PZT #3

Com base nas métricas de dano, foi projetada uma rede neural probabilística com oito parâmetros de entrada, sendo os sinais reais e imaginários provenientes dos quatro sensores/atuadores PZTs, visando a identificação de qual tipo de fissura ocorreu na estrutura. A arquitetura da rede adotada é ilustrada pela Fig. 6.35.

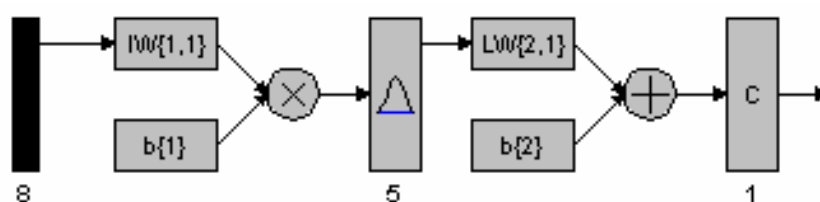


Figura 6.35 - Ilustração do modelo de rede neural probabilístico construído

As matrizes de pesos utilizadas foram:

iw= [296.6434 1220.5 1238.2 1238.2 23.2292 33.2424 499.0748 57.651;
 253.3044 1338.4 1304.7 1304.7 21.3521 18.8374 491.4723 43.281;
 190.5489 1355.2 2676.6 2676.6 12.9678 32.3936 314.3986 37.32;
 148.8273 1378.2 2410 2410 10.1238 46.809 283.1709 30.6473;
 410.0567 2748 2704.5 2704.5 28.6191 73.8176 182.0867 70.965]

LW=[15 16 17 18 23]

B= [0.83255;
 0.83255;
 0.83255;
 0.83255;
 0.83255]

De acordo com o observado nos experimentos, uma seleção cautelosa da banda de frequências é de fundamental importância para que o modelo seja capaz de representar a realidade. Por outro lado, o número limitado de repetições dos testes para coleta de dados torna a meta-modelagem um processo complexo, reduzindo em muitos casos a possibilidade de geração de alguns tipos de modelos, uma vez que demandariam uma quantidade maior de repetições para garantir representatividade estatística. Uma vantagem do uso das redes neurais é sua grande versatilidade que, aliada a uma arquitetura simples, torna o processo de meta-modelagem viável mesmo nos casos em que ocorrem limitações de dados disponíveis e variação do número de parâmetros de entrada. Nota-se que, no caso em tela, foi possível obter um modelo, mesmo com o pequeno número de experimentos disponíveis. Assim, apesar do pequeno número de experimentos usados no treinamento, são consideradas oito características independentes que permitem a identificação de forma bastante fácil e confiável. Entretanto, é recomendável, para estudos desta natureza, um maior número de repetições, já que a extração de conhecimento baseada na experimentação parece ser a única forma de se trabalhar com as técnicas de monitoramento de integridade estrutural baseadas na impedância.

Foi gerado um outro modelo utilizando estes mesmos dados, partindo dos princípios de modelagem por superfícies de resposta. Neste modelo não foi considerada a fissura de 23mm para construção do metamodelo baseado em superfícies de resposta. Tal modelo é apresentado a seguir, tendo sido desprezados os sinais do sensor PZT #3. Ao serem avaliados um a um os modelos, retirando e adicionando termos, aplicando o teste F e fazendo a análise de variância (ANOVA), encontrou-se o modelo linear descrito a seguir. Foi considerado um

modelo de regressão simples no qual a resposta y é o comprimento da fissura, enquanto que os valores x_1 , x_2 , x_3 e x_4 representam, respectivamente, os valores das métricas de danos obtidas das pastilhas PZT #1, #2, #3 e #4. Obteve-se uma reta dada pela equação abaixo:

$$y = 16.0242 - 0.0244x_1 + 0.0037x_2 + 0.0051x_4$$

O sinal monitorado por x_3 foi desprezado na construção do modelo devido à falta de informação sobre o ruído elevado nele observado. Os valores dos resíduos são apresentados na Fig. 6.36. Pela figura, pode-se perceber o valor desprezível dos resíduos para as quatro variáveis, sendo estes da ordem de 10^{-11} .

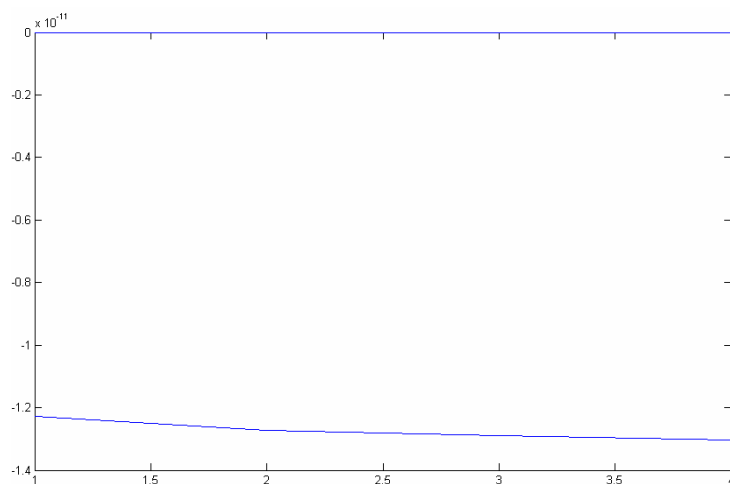


Figura 6.36 - Distribuição dos resíduos para o modelo linear de representação da fissura

Isto quer dizer que, a priori, o comprimento da fissura pode ser identificado com o uso de uma calculadora simples, se os sinais dos sensores/atuadores PZTs #1,#2 e #4 forem conhecidos. Entretanto, é necessário ressaltar que, também para esse caso, nenhuma repetição foi realizada. Casos envolvendo aplicações reais precisam ser mais bem explorados adicionando experimentos que garantam maior confiabilidade ao metamodelo. A ANOVA deste modelo é representada pela Tab. 6.4.

Tabela 6.4 - ANOVA do modelo linear de regressão de caracterização de falhas

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Nº de gdl	Média Quadrática
Regressão	5	1	5
Resíduos	6,4978e-022	2	3,2489e-022
Total	5	3	

A superfície de resposta correspondente ao modelo linear descrito, é apresentada pela Fig. 6.37.

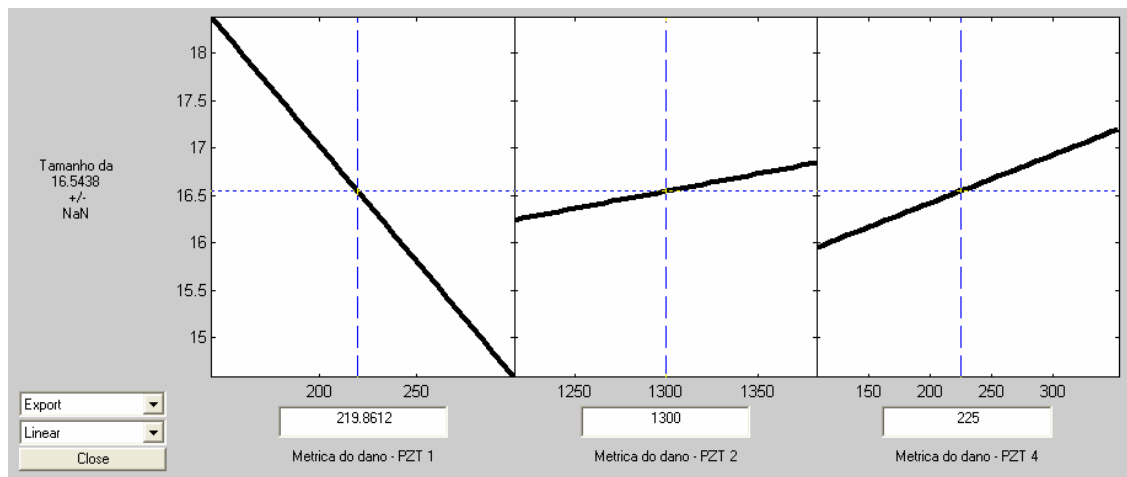


Figura 6.37 - Ilustração da superfície de resposta do modelo linear de caracterização de fissuras.

Assim, pela Fig. 6.37, pode-se perceber o efeito causado por cada métrica de dano proveniente de cada um dos sensores, menos o terceiro, que não está sendo considerado no modelo. A relação entre as variáveis não deve ser desprezada.

Uma distribuição normal foi testada junto aos coeficientes do metamodelo linear adotado para a superfície de resposta para verificar o quanto é possível a variação de cada termo devido a alguma flutuação de variáveis aleatórias. Isto quer dizer que, quão mais distante está cada um dos coeficientes (indicados por asteriscos pretos na Fig. 6.38) da reta de distribuição de probabilidades normal, menos chances existem de esta variável ser apenas uma variação aleatória. Como cada uma delas se distanciou da reta, conclui-se que nenhuma delas é considerada apenas como uma fonte de erro aleatório no metamodelo.

Através deste último metamodelo foi possível exemplificar a utilização de meta modelos estatísticos aliados ao método da impedância eletro-mecânica para monitoramento de variações estruturais, tais como crescimento de fissuras, em estruturas aeronáuticas. Um caso simples foi estudado, entretanto, trabalhos adicionais deverão ser realizados, garantindo-se repetibilidade do procedimento, visando construir uma técnica confiável. Entretanto, considera-se do exposto que foi possível evidenciar uma gama de possibilidades e de metodologias que permitem a compreensão dos fenômenos de falhas em estruturas, com base em medições experimentais. Para o crescimento de fissuras, o metamodelo baseado em superfícies de resposta se apresentou simples e com um grau de confiabilidade satisfatório.

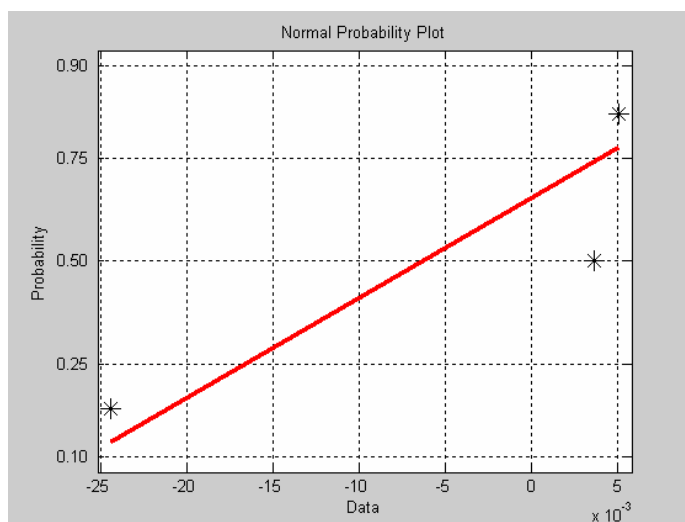


Figura 6.38 - Teste de distribuição normal para o estudo da fissura

Para o correto funcionamento de um sistema de monitoramento, sua implantação deve ser realizada de forma a se prever os inconvenientes mais críticos. Neste trabalho buscou-se inicialmente avaliar aspectos críticos que podem surgir da implantação de um sistema de monitoramento de integridade estrutural baseado em impedância eletromecânica. Para tal, o projeto de SHM utilizando a análise C-S de uma estrutura real do painel frontal de uma aeronave comercial foi feita e, a partir disso, os pontos chaves para a ocorrência de insucesso da técnica de SHM foram avaliados. Assim, procurou-se evidenciar a possibilidade de associação de metodologias distintas, Análise Funcional/C-S e SHM, para a elaboração de um sistema de monitoramento eficiente.

A partir desses passos, procurou-se na presente etapa, tanto determinar as melhores condições de teste, como gerar um modelo capaz de representar as falhas introduzidas. Estes dois passos são geralmente realizados em fases diferentes.

Foram ensaiados neste capítulo dois componentes de uma aeronave comercial, a saber: uma estrutura tipo “barril” (parte da fuselagem) e um painel frontal. Conforme apresentado, procurou-se inicialmente verificar se a metodologia de monitoramento estrutural baseada em sinais de impedância se constitui numa técnica confiável do ponto de vista da repetibilidade dos testes, conforme verificado no ensaio com o “barril”. Observou-se que, ao longo do tempo, os sinais obtidos permanecem coerentes.

Uma segunda preocupação foi a de se observar a sensibilidade do método com relação à capacidade de identificação de uma variação estrutural localizada, conforme caracterizada pela adição de uma massa conhecida.

Continuando, foi testada uma estrutura constituída por um painel frontal, situação em que se procurou determinar o potencial da metodologia para identificação de fissuras de

diferentes tamanhos. Neste caso, viu-se que dois dos sensores instalados na estrutura não responderam bem aos ensaios (seu desempenho mostrou-se inferior ao dos demais sensores utilizados).

Uma metodologia utilizando-se superfícies de resposta foi também avaliada, mostrando resultados satisfatórios, embora os resultados tenham que ser considerados apenas como preliminares, pela pequena quantidade de casos de falha analisados e nenhuma repetição foi realizada. Obviamente, alguns casos extras seriam necessários para uma melhor análise de variância, além da consideração de casos testes para validação de modelos.

Finalmente, foi estudada a influência de uma fissura na posição de fixação de um rebite do painel frontal, sendo que os resultados não foram conclusivos, uma vez que os dois sensores mais próximos do local da falha foram justamente aqueles que não apresentaram o desempenho esperado.

Concluindo, pode-se dizer que a metodologia apresentada é, em princípio, aplicável para o monitoramento de falha de estruturas aeronáuticas pelo método da impedância, podendo certamente ser explorada sua extensão a outras estruturas semelhantes às utilizadas, desde que sejam feitos testes numa quantidade maior, garantindo assim maior repetibilidade e confiabilidade ao processo de monitoramento. É sabido que, para garantir representatividade estatística, o número de testes assume posição de extrema importância. No caso em tela, a intenção foi a de simplesmente se verificar o funcionamento dos princípios básicos da metodologia, o que foi comprovado de maneira satisfatória.

Cabe salientar, entretanto, que estudos intensivos devem ser empreendidos até que seja possível a efetiva implementação da metodologia apresentada para identificação de falhas em estruturas aeronáuticas. Na presente etapa não foram realizados ensaios em condições em vôo, sendo que, conforme mencionado anteriormente, todos os ensaios foram realizados em um hangar.

Capítulo VII

SHM APLICADO A ESTRUTURAS ESPACIAIS

Sem dúvida, os melhores casos de aplicação das técnicas de SHM são encontrados indiscutivelmente no campo das ciências espaciais, já que orçamentos elevados são cumpridos nos projetos e pequenas falhas podem comprometer todo o sistema. Em casos de falhas reparáveis, em alguns casos existe a possibilidade de manutenção, embora o valor de custo da recuperação muitas vezes torna o procedimento inviável.

Estruturas espaciais, mais especificamente estruturas de satélites, normalmente se diferenciam das estruturas aeronáuticas devido ao meio inerte a que se submetem quando em operação. Estas estruturas, além de possuírem peso baixo em relação às estruturas aeronáuticas, geralmente possuem uma composição estrutural muito diferente. Neste capítulo são experimentadas duas estruturas de satélites, sendo a primeira um tubo estrutural de fibra de carbono e, o outro, um satélite toroidal do tipo Gossamer. No primeiro caso, serão investigados os efeitos de ajuste automático de faixa de frequência de monitoramento para condições ótimas baseando-se em variações estruturais por adição de massa. Na segunda estrutura, apenas uma breve descrição referente ao uso do método de monitoramento estrutural baseado em impedância é feito, com vistas a futuras aplicações a este tipo de satélite.

7.1 Identificação das Condições Ótimas de Monitoramento para uma Estrutura Espacial Tubular de Carbono

Um grande problema ao se tratar de SHM baseado na impedância tem a ver com a identificação da melhor faixa de frequência de monitoramento, sendo que esta varia muito devido ao tipo de falha introduzida e à estrutura supervisionada. Park (2003) sugere que a faixa de frequência deve ser obtida por tentativa e erro, em torno dos 30kHz. Um procedimento descrito por Moura Jr and Steffen Jr (2004) visa a identificação das melhores condições de monitoramento baseado na impedância, levando-se em conta o tipo do sinal (parte real, módulo, etc), largura de banda e início da banda de frequência. Entretanto, este procedimento impõe a realização de vários ensaios para o levantamento das superfícies de respostas a serem otimizadas e, assim, determinar as melhores condições para identificação de falhas. Este procedimento, além de lento, prevê a realização de experimentos antecipados, além de uma metamodelagem do sistema (feita, então, de forma manual), além de que os sinais

deveriam ser monitorados somente para as condições ótimas referentes aos tipos de falhas analisados. Se outro mecanismo de falha fosse apresentado, ou se o mesmo mecanismo apresentasse configurações diferenciadas, a metodologia não apresentava vantagens, e poderia até mesmo camuflar as falhas escondidas em pequenas variações (quase imperceptíveis) do sistema.

Fatores que dificultam a escolha das condições ótimas de monitoramento são: falta de modelos físicos consistentes que permitam prever o comportamento associado à inserção de falhas; o trabalho em faixas de frequências elevadas torna os sinais de monitoramento de cada estrutura facilmente modificados por aspectos relacionados à fabricação ou por defeitos posteriores, tais como variações bruscas de temperatura, etc. Um outro ponto que merece atenção neste contexto tem a ver com as inúmeras formas de danificar estruturalmente um componente (algumas delas imprevisíveis), podendo inclusive aparecer processos mistos de falha, como, por exemplo, a corrosão junto com trincas devidas a solicitações dinâmicas. Peairs (2006) apresenta uma forma aproximada de modelagem numérica de uma viga através do método de elementos espectrais, tornando possível, através do modelo, uma melhor compreensão do sinal de impedância para o sistema sem falhas. Entretanto, até o momento, apenas estruturas bem simples são possíveis de serem modeladas por tal processo, dificultando aplicações em casos reais.

À vista de tudo que foi acima exposto, a identificação das condições ótimas de monitoramento ainda é um desafio para grupos de pesquisa que atuam na área de SHM. Isso porque, do ponto de vista da implementação das técnicas de monitoramento, busca-se facilitar a supervisão das estruturas de tal forma que, mesmo não sendo definidas as condições ótimas, ainda assim estas tem que ser observadas considerando o aparecimento de possíveis falhas. Ou seja, a definição de condições ótimas de monitoramento devem necessariamente ser estudadas, pensando em melhorar o processo de monitoramento como um todo.

Neste capítulo não se pretende definir uma forma concreta de obtenção das condições ótimas de monitoramento, mas, como descrito em Moura Jr and Steffen Jr (2004), pretende-se apenas estabelecer uma alternativa para obtenção de tais condições. Novamente, é importante salientar que uma demonstração formal das condições ótimas não é possível de ser apresentada, uma vez que o processo se baseia em metaheurísticas.

Uma dúvida pode surgir na leitura deste trabalho, ao se questionar por que, somente no capítulo 7, se trata da otimização da região ótima de monitoramento. Outra questão importante que pode ajudar a responder à primeira é: por que simplesmente não se adquire toda a quantidade de pontos possível e se trabalha com todos eles, reduzindo o trabalho de se encontrar a melhor região? Primeiramente, ao se trabalhar com estruturas locais e estáticas, como as tubulações do capítulo 3, por exemplo, ou senão com estruturas que permitem que

suas informações sejam “descarregadas” após um ciclo de operação, como as estruturas aeronáuticas (onde as informações são monitoradas durante o voo e, após o pouso, os dados são anexados a bases extensas de dados e armazenadas em local próprio), a supervisão dos sinais não precisa ser considerada crítica, pois um grande número de pontos e sinais podem ser registrados e armazenados (com discretização em toda a faixa possível de monitoramento). Desta forma, nestes casos, os sinais podem ser adquiridos com uma resolução de poucos hertz sem que isso se torne problema. Entretanto, por outro lado, em um satélite cujo monitoramento estrutural pode ser de extrema importância, existe um fator complicador que é o de espaço de memória para acúmulo de informações sobre sua integridade estrutural em um dispositivo de SHM nele residente. Lembrando que o mesmo não poderá ser “descarregado” localmente em solo, a única alternativa é o de envio destes sinais através de canais de comunicação existentes entre o satélite e as bases em terra. Entretanto, estes canais devem ser ocupados o mínimo possível para efeito de envio de sinais de integridade, já que o propósito do satélite é o de fornecer informações à distância, e o acúmulo de sinais a serem transferidos aumentaria o peso global do equipamento, com um acréscimo de dispositivos para remessa de sinais dedicados a SHM. Igualmente, resultaria um aumento do tempo gasto com o envio de sinais de integridade pelos canais já disponíveis pelo satélite. Outro ponto também relevante para a redução de pontos e discutido por Peairs (2006) é que, ao se obter uma grande quantidade de pontos de amostragem, a independência dos resíduos dos sinais amostrados é diminuída, dificultando a aplicação das teorias de regressão estatística.

Assim, as questões anteriormente levantadas são esclarecidas. Evidentemente, no caso de estruturas espaciais, a identificação de condições ótimas de monitoramento é um fator necessário e não opcional, enquanto não seja possível se pensar em SHM para aplicação em satélites, se não houver um passo anterior de otimização da região de monitoramento.

O desenvolvimento de estruturas espaciais tem sofrido algumas alterações nos últimos anos. Neste contexto, a busca de formas alternativas de acrescentar rigidez, ao mesmo tempo em que se reduz o peso tem gerado novas formas de estruturas que não seriam viáveis em ambientes não espaciais. Um projeto recente de Sarles *et al* (2006a e 2006b) apresenta um procedimento de cura através do aquecimento por efeito Joule de estruturas de carbono para aplicação em estruturas espaciais. Assim, fios de carbono (1-2 mm de largura) com partículas de termofixos que são a priori flexíveis, são transportados até o local de trabalho (espaço) e colocados na sua forma de utilização para sofrerem o enrijecimento através do aquecimento. Assim, as partículas termoplásticas contidas na estrutura do carbono se fundem e tornam a estrutura pronta para uso. As Figs. 7.1a e 7.1b apresentam, respectivamente, a fibra de carbono e uma possível aplicação deste componente associado a estruturas infláveis espaciais.



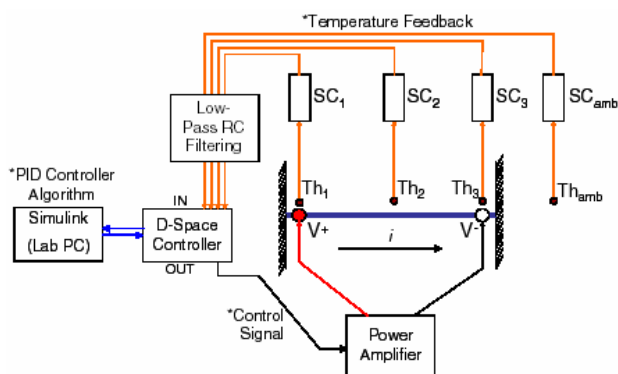
a) fita de carbono



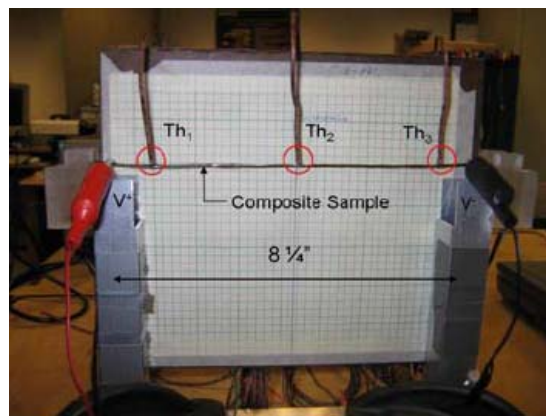
b) componente inflável com fita

Figura 7.1 - Fita de carbono utilizada para enrijecimento de estruturas infláveis

Sarles *et al* (2006a e 2006b) propõem um mecanismo de controle para o aquecimento no espaço destas fibras de carbono como mostram respectivamente as Figs. 7.2a e 7.2b, destacando o esquema de controle e o experimento realizado.



a) Esquema de controle



b) Experimento realizado

Figura 7.2 - Esquema de controle do aquecimento para enrijecimento das fibras de carbono (Sarles *et al*, 2006a)

Trabalhos desenvolvidos pela ILC Dover Inc tem se direcionado a construções de estruturas espaciais que utilizam este mecanismo, como pode ser verificado na Fig. 7.3, no tubo isogrado de Lin *et al* (2002). Esta estrutura ultraleve foi desenvolvida para enrijecer estruturas do tipo Gossamer que são estruturas infláveis desenvolvidas pela NASA e DoD para futuras missões espaciais (Lin *et al*, 2002).



Figura 7.3 - Tubo enrijecedor ultraleve para estruturas Gossamer (Lin *et al*, 2002).

Os benefícios deste tipo de estrutura são: o pequeno volume de embalagem, baixa complexidade, pequena massa e, assim, torna possível o desenvolvimento de grandes antenas, velas e escudos solares, que não seriam viáveis através da tecnologia convencional (Lin *et al*, 2002). Este tubo desenvolvido por Lin *et al* (2002) é construído em grafite com um polímero com memória de forma. Este material atua como um termoplástico, no qual consecutivos processos de aquecimento e resfriamento transformam a forma do tubo e sua respectiva alteração de rigidez, testando a estrutura antes que ela seja enviada ao espaço.

Um modelo de meia escala do projeto ISIS (Inflatable Sunshield In Space - Sapna *et al*, 2000), com um escudo solar inflável desenvolvido na ILC Dover é apresentado na Fig. 7.4.



Figura 7.4 - Modelo de meia escala do projeto ISIS (Sapna *et al*, 2000).

Outro formato de possível utilização espacial envolve estruturas de carbono desenvolvidas pela ILC Dover, conforme apresentado por Tarazaga *et al* (2006).



Figura 7.5 - Estrutura tubular apresentada por Horta *et al* (2006).

No trabalho de Tarazaga *et al* (2006), assim como neste capítulo, uma estrutura tubular de carbono desenvolvida pela ILC Dover é utilizada. Uma aplicação envolvendo uma estrutura similar é apresentada por Horta *et al* (2006), como mostra a Fig. 7.5. Outra aplicação deste tipo de estrutura é apresentada por Tarazaga (2006), como mostrado na Fig. 7.6, onde as estruturas de treliça são montadas com tubos de fibras de carbono.

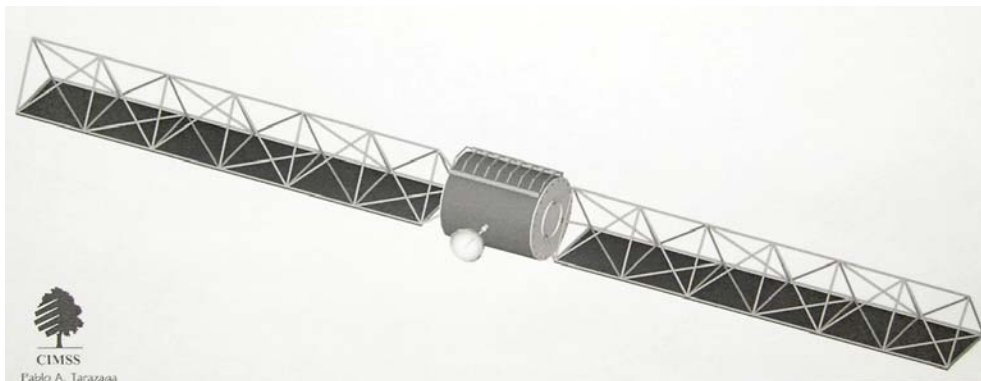


Figura 7.6 - Esquema de painéis solares de um satélite utilizando treliças de fibras de carbono (Tarazaga, 2006).

A estrutura tubular usada neste trabalho é apresentada na Fig. 7.7a.



a) Estrutura tubular



b) Pastilha MFC colada na estrutura

Figura 7.7 - Estrutura tubular de fibra de carbono utilizada nos experimentos.

Na Fig. 7.7b é mostrada umas das pastilhas de MFC utilizadas para o monitoramento da estrutura. Simetricamente, do outro lado do tubo e na mesma extremidade, existe outra pastilha colada, porém de dimensões diferentes. Seus eletrodos (fios) aparecem na imagem mostrada na Fig. 7.7b. A Tab. 7.1 apresenta as características gerais do tubo.

Tabela 7.1 - Propriedades da estrutura tubular.

Comprimento	1,7335m
Massa	360g
Diâmetro Interno	97,87mm
Espessura	0,45mm
Densidade	1501 Kg/m ³

Para a primeira etapa deste capítulo, é identificada a melhor condição de monitoramento para a estrutura tubular utilizando a técnica dos algoritmos genéticos. Para isso, foram feitos alguns experimentos como os apresentados nas Tabs. 7.2 e 7.3 para os estudos de identificação de região ótima de monitoramento, assim como para a obtenção de metamodelos associados a falhas. Todos os ensaios foram realizados varrendo da frequência de 10 kHz até 297,990 kHz, com resolução de 10 Hz.

Um dos inconvenientes desta tarefa é ilustrado na Fig. 7.8. Cada pastilha de MFC possui uma dimensão distinta, possibilitando que cada uma possua uma região distinta no domínio da frequência considerada ótima para o monitoramento.



a) MFC 1 utilizado no monitoramento



b) MFC 2 utilizado no monitoramento

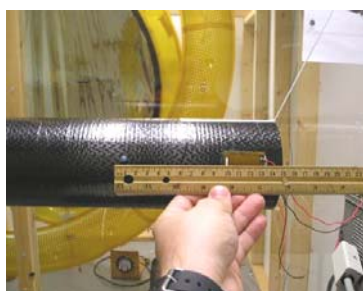
Figura 7.8 - Pastilhas de MFC utilizadas para o experimento com o tubo espacial.

A Tab. 7.2 apresenta a relação dos experimentos realizados para obtenção dos sinais de referência sem falhas de ambos os sensores/atuadores.

Tabela 7.2 - Experimentos de referência para o tubo espacial.

Nome do Experimento	Medição na pastilha MFC
baseline1	1
baseline2	2
baseline3	1
baseline4	1
baseline5	2
baseline6	1
baseline7	2

Na Tab. 7.3 são apresentados os experimentos por adição de massa realizados para a avaliação em questão. A Fig. 7.9 apresenta algumas condições de falhas utilizadas conforme a Tab. 7.3.



a) Experimento 1



b) Experimento 3



c) Experimento 1b



d) Experimento 18



e) Experimento 19b

Figura 7.9 - Vários casos de falhas por adição de massa.

Tabela 7.3 - Experimentos com adição de massa para o tubo espacial.

# do Experimento na Pastilha MFC 1	# do Experimento na Pastilha MFC 2	Massa Adicionada (g)	Posição da Massa (cm)
1	1b	0.036	10
2	2b	0.036	20
3	3b	0.036	30
4	4b	0.036	40
5	5b	0.072	10
6	6b	0.072	20
7	7b	0.072	30
8	8b	0.072	40
17	17b	0.072	50
18	18b	0.072	100
19	19b	0.072	150
9	9b	0.108	10
10	10b	0.108	20
11	11b	0.108	30
12	12b	0.108	40
20	20b	0.108	50
21	21b	0.108	100
22	22b	0.108	150

O procedimento para identificação da condição ótima de monitoramento, que prevê a faixa de frequência adequada ao monitoramento, é cumprido de acordo com os seguintes passos:

- 1- Capturar todos os sinais considerados da estrutura íntegra (sinais de base);
- 2- Quando os sinais de base para o treinamento forem adquiridos, ou seja, quando o sistema tiver feito a aquisição de todos os sinais utilizados para a referência (isto pode ser realizado sob solicitação externa, como um botão no equipamento, ou ainda internamente, transcorrido um período de tempo ou certo número de iterações), calcular o sinal médio da estrutura, descartando sinais que tenham variação muito diferenciada dos demais (aqui é utilizada a média e desvio padrão do sinal completo);
- 3- Com o sistema treinado com o caso padrão de monitoramento, fazer aquisições periódicas do sinal completo;
- 4- Comparar com a média e desvio padrão do sinal de referência;
- 5- Se o sinal estiver dentro do desvio de tolerância, desconsiderar esta possível falha;
- 6- Se o sinal estiver fora do desvio tolerável, a passa a ser considerada. Então, o sinal que foi adquirido por completo é avaliado para obtenção da melhor faixa de frequência de monitoramento;
- 7- A partir deste momento, o sinal será adquirido e armazenado neste novo intervalo de frequência para fins de previsão de falhas;
- 8- Se o sinal modificar criticamente, ou então, após um determinado ciclo de

monitoramentos, é refeita uma aquisição de toda a faixa inicial de freqüência e um novo intervalo de freqüência deve ser obtido, similar ao que foi feito no passo 6.

Para a realização da extração da melhor faixa de freqüência, um método baseado em algoritmos genéticos é utilizado, no qual a função de adaptação é a própria métrica de dano, enquanto as variáveis a serem otimizadas (variáveis de projeto ou genes) são as variáveis i e j que correspondem, respectivamente, aos índices de início e término do vetor da parte real da impedância medida. Obviamente que, aplicando apenas este procedimento, o maior valor da métrica do dano seria para os valores de i igual a 1 (um) e j igual ao último elemento do vetor, pois, em se tratando de uma soma, obtém-se uma acumulação de valores. Para evitar isso, duas restrições foram adicionadas, ou seja, i deve ser menor que j mais 50; e j menos i deve ser maior que 2000. Com estas duas restrições, e considerando que o vetor completo varia de 10KHz a 298KHz, em intervalos de 10 em 10 Hz, o mínimo intervalo que se pode capturar é de 500Hz e o maior é de 20KHz. Neste caso não se considera “saltos” entre elementos de um vetor, ou seja, evita-se a ocorrência de uma variável do modelo de otimização que poderia representar a resolução de amostragem, ou intervalos de pontos diferentes de 10 Hz.

A priori, na prática, este procedimento poderia ser utilizado para se trabalhar com diversas bandas de freqüência de uma mesma estrutura que possa sofrer diversos conjuntos de falhas incipientes, na qual cada avaliação contribuiria no processo de monitoramento. Entretanto, por se tratar de um estudo introdutório de aplicação da metodologia, apenas uma região é utilizada por vez, considerando apenas uma determinada falha.

A Fig. 7.10 apresenta os sinais de referência que foram obtidos para a análise, contemplando toda a faixa de monitoramento e apenas o primeiro sinal com falha. Percebe-se que, para este primeiro caso de falha, uma pequena diferença entre os dois sinais é detectada.

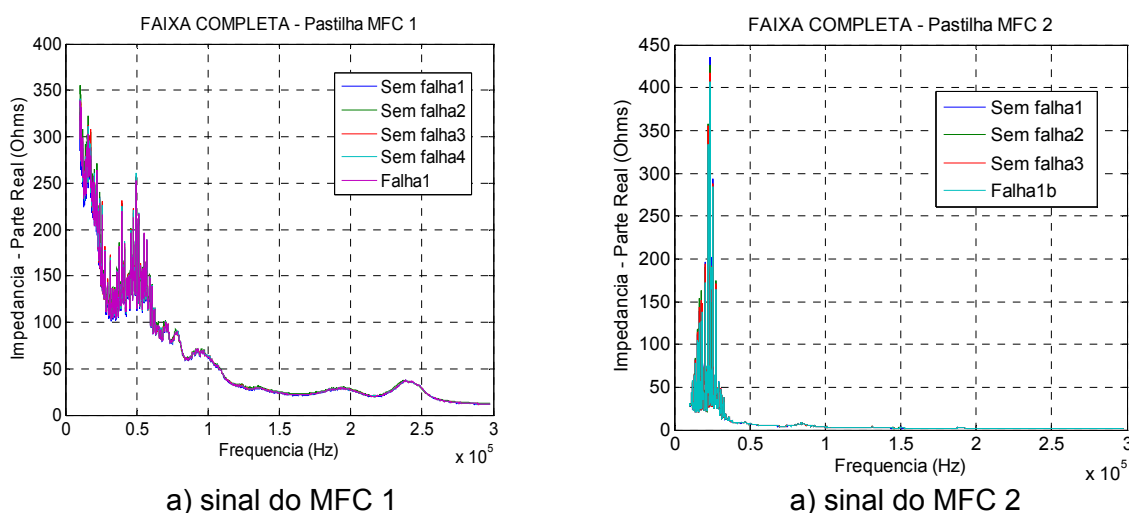


Figura 7.10 - Faixa completa de monitoramento das duas pastilhas de MFC.

Após determinar a melhor faixa de monitoramento através de algoritmos genéticos, a faixa de melhor identificação para a primeira falha (experimento número 1 da Tab. 7.3), considerando a pastilha MFC 1, foi de 15437 a 17436, com 2000 pontos, o que corresponde à faixa de frequência de 164360 Hz a 184350 Hz. O mesmo foi realizado para a pastilha MFC 2, tendo sido encontrada a melhor região para monitoramento da falha 1 (comparando com o experimento número 1b da Tab. 7.3) de 1 a 2000, com 2000 pontos, o que equivale à faixa de 10000 Hz a 29990 Hz. As duas regiões ótimas de monitoramento, sem normalização, podem ser observadas nas Figs. 7.11a e 7.11b.

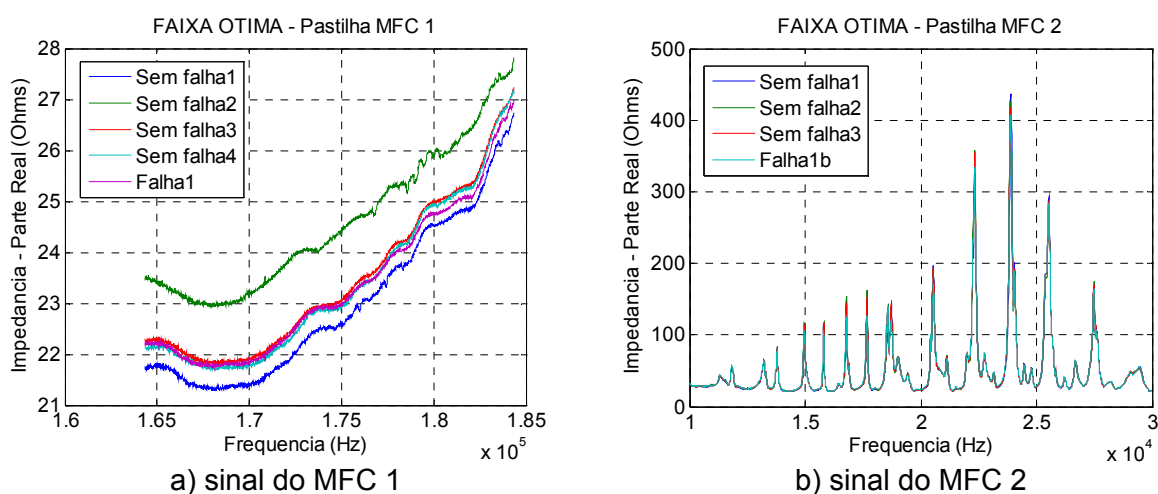


Figura 7.11 - Regiões ótimas de monitoramento para o tubo espacial sem a normalização.

Após os sinais serem normalizados pela média, os mesmos são mostrados na Fig. 7.12.

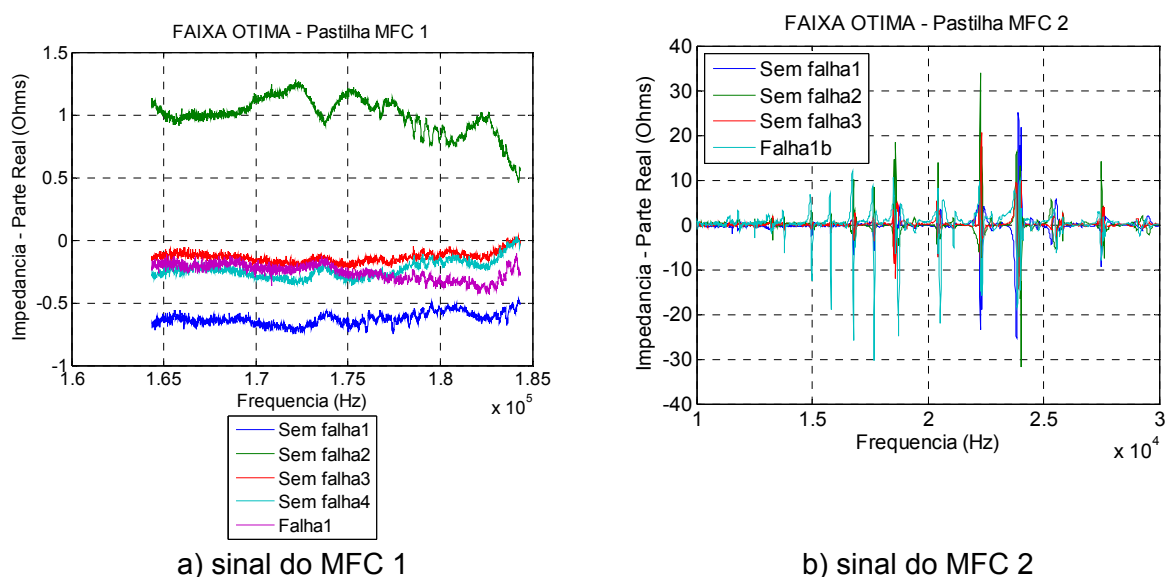


Figura 7.12 - Regiões ótimas de monitoramento para o tubo espacial (sinais normalizados).

Conforme pode ser verificado nas Figs. 7.11a e 7.12a, os casos de referência sem falhas estavam bem diferentes uns dos outros. Por este motivo, foram adotados apenas os dois últimos casos sem falha para a avaliação das métricas de dano para o MFC 1, enquanto que para o MFC 2 foram mantidos todos os casos de referência. A Fig. 7.13 apresenta as duas métricas de dano para as duas pastilhas de MFC, considerando toda a faixa de frequência adquirida, isto é, todos os 28800 pontos, varrendo, portanto, de 10 a 298kHz.

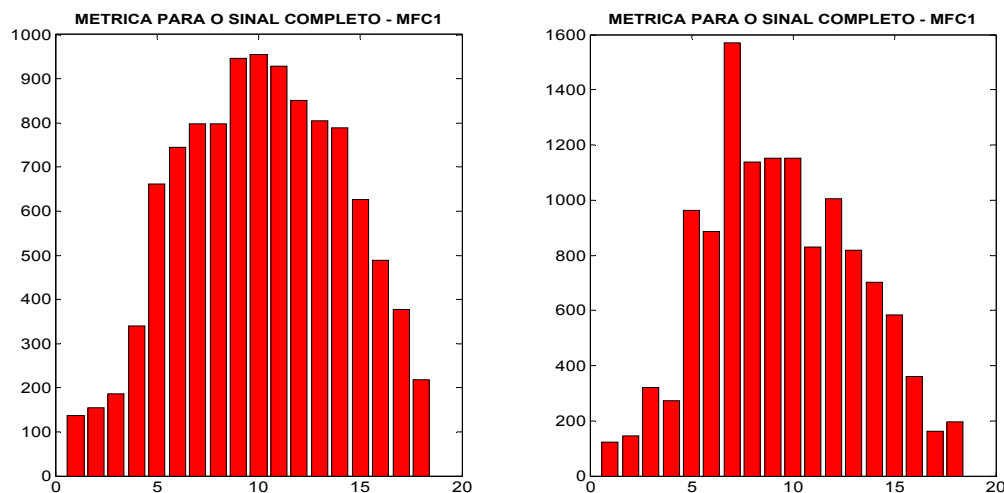


Figura 7.13 - Métricas de dano para a faixa de frequência completa.

Nas Figs. 7.14 e 7.15 são apresentadas as métricas de dano ao longo de quase toda a faixa de frequência adquirida (de 10 a 289,990kHz, isto é, 28000 pontos ao invés dos 28800 pontos adquiridos). O motivo de não se utilizar toda a faixa de frequências é que objetiva-se utilizar a mesma escala da faixa ótima obtida pelo algoritmo genético, ou seja, 2000 pontos. Como o valor de 28800 pontos não é múltiplo inteiro de 2000 pontos, optou-se por utilizar o menor valor abaixo deste, ou seja, 28000. Isto foi feito para se ter a percepção do efeito das métricas de dano das múltiplas bandas monitoradas ao longo de toda a faixa, comparando-as com a obtida usando algoritmos genéticos.

A Fig. 7.14 apresenta o sinal do MFC 1 ao longo de toda a faixa de amostragem e abaixo dele as métricas de dano referentes às mesmas faixas de frequências dispostas no sinal do gráfico superior. É importante lembrar que para cada faixa de 2000 pontos consecutivos no gráfico superior, as métricas de dano equivalentes no gráfico inferior compreendem 18 barras respectivas à Tab. 7.3 dos experimentos realizados.

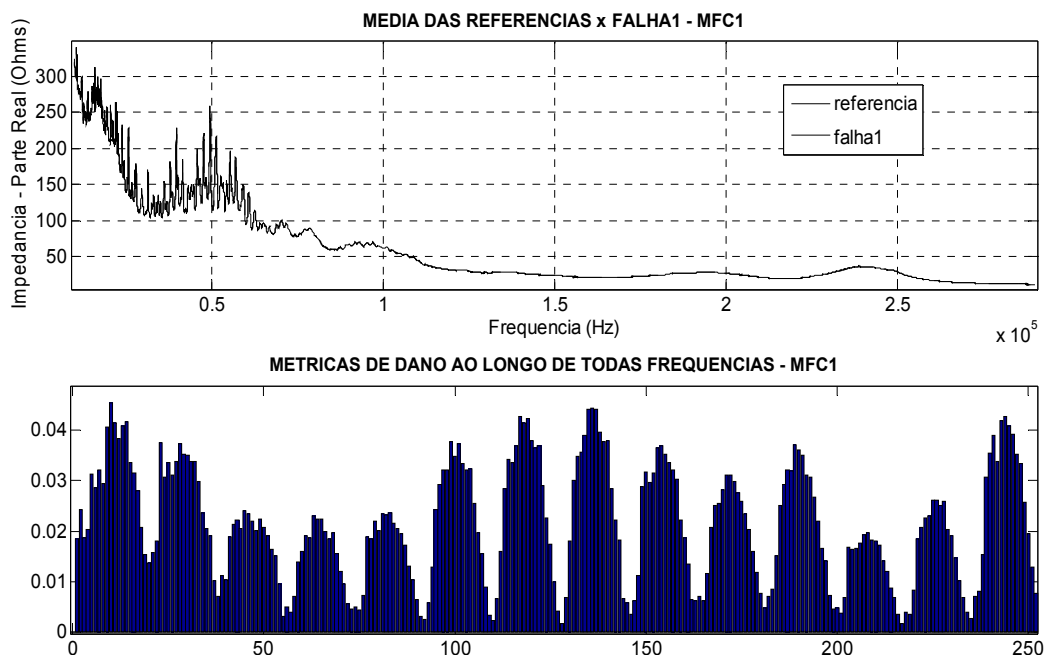


Figura 7.14 - Métricas de dano das 14 regiões (2000 pontos cada) da banda total – MFC 1.

Semelhantemente, a Fig. 7.15 apresenta o sinal do MFC 2 ao longo de toda a faixa de amostragem e abaixo dele as métricas de dano referentes às mesmas faixas de frequências dispostas no sinal do gráfico superior. É importante lembrar que para cada faixa de 2000 pontos consecutivos no gráfico superior, as métricas de dano equivalentes no gráfico inferior compreendem 18 barras respectivas à Tab. 7.3 dos experimentos realizados.

Assim como na Fig. 7.14, fica claro que os 14 grupos de métricas de dano equivalentes às 14 faixas de frequência que foram discretizadas de 2000 em 2000 pontos até o valor total de 28000. Percebe-se que, no geral, os 14 grupos apresentam um comportamento similar (com poucos pontos distintos) em ambos os casos.

Comparando os valores obtidos pelo método dos algoritmos genéticos, obteve-se, para o MFC 1, a faixa de frequência equivalente de 164360 Hz a 184350 Hz, isto é, observando a Fig. 7.14 vê-se uma região na qual as métricas de dano apresentaram picos importantes. A principal diferença, neste caso, deve-se ao fato de que o método utilizando algoritmos genéticos encontrou uma faixa com 2000 pontos varrendo-se a banda amostrada completa. Neste caso de agrupamentos, os 2000 pontos foram pré-fixados em regiões e então as métricas de dano foram obtidas. Porém, ambas apresentam a necessária coerência para análise.

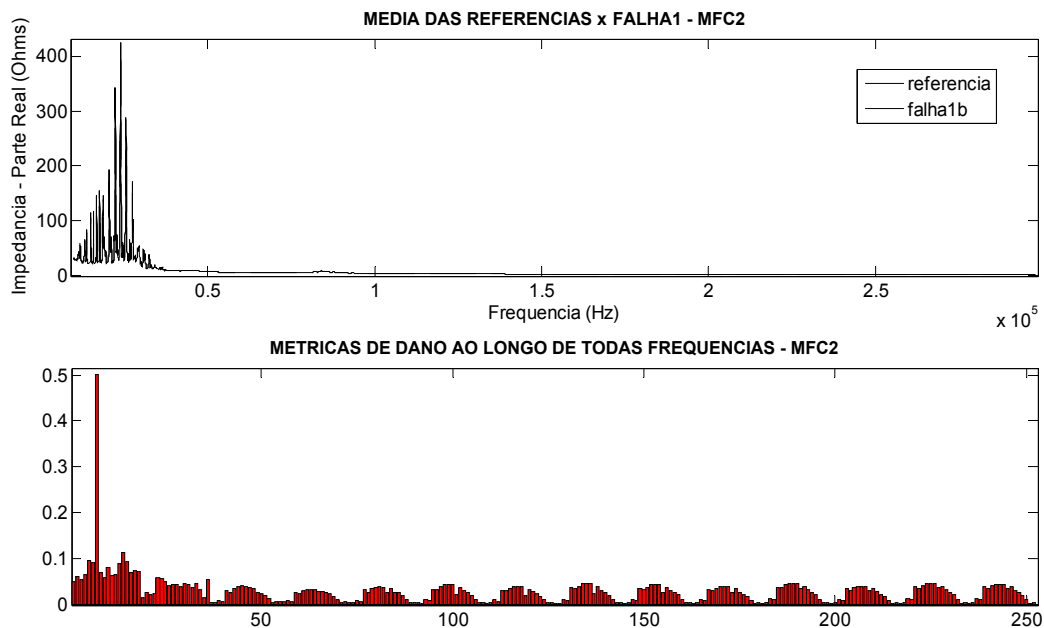


Figura 7.15 - Métricas de dano das 14 regiões (2000 pontos cada) da banda total – MFC 2.

Para a Fig. 7.15, semelhantemente ao encontrado para o MFC 1, o MFC 2 apresenta uma semelhança entre os grupos de métricas de dano. Neste caso, ocorreu uma coincidência entre o obtido pelo método com algoritmos genéticos e com a discretização em faixas de frequência. Isto se deve ao fato do algoritmo genético ter retornado o mesmo valor do primeiro grupo discretizado (primeiros 2000 pontos). Neste caso, ao observar-se a Fig. 7.15 inferior, fica evidente a obtenção de maiores níveis de métricas de dano para o MFC 2.

Desta forma, pretende-se confirmar o uso dos algoritmos genéticos para a obtenção de uma região de frequência ótima para o monitoramento baseado em impedância. Entretanto, para o caso do MFC 2, a sétima métrica de dano apresentou valores inesperados e, para evitar prejuízos aos modelos, será desconsiderada em análises futuras.

Uma possível explicação para esse fato, já que para as outras faixas de frequência não foi identificado nenhum problema semelhante, é que, como esta faixa de frequência equivale ao início da aquisição do sinal, algum erro de estado estacionário pode ter ocorrido, tanto devido a cabos ou ainda à instabilidade de tensão do equipamento.

A Fig. 7.16 apresenta as métricas de dano para os dois MFCs para a região ótima de monitoramento, conforme obtidas pelo método dos algoritmos genéticos e confirmada através da discretização da faixa completa de monitoramento.

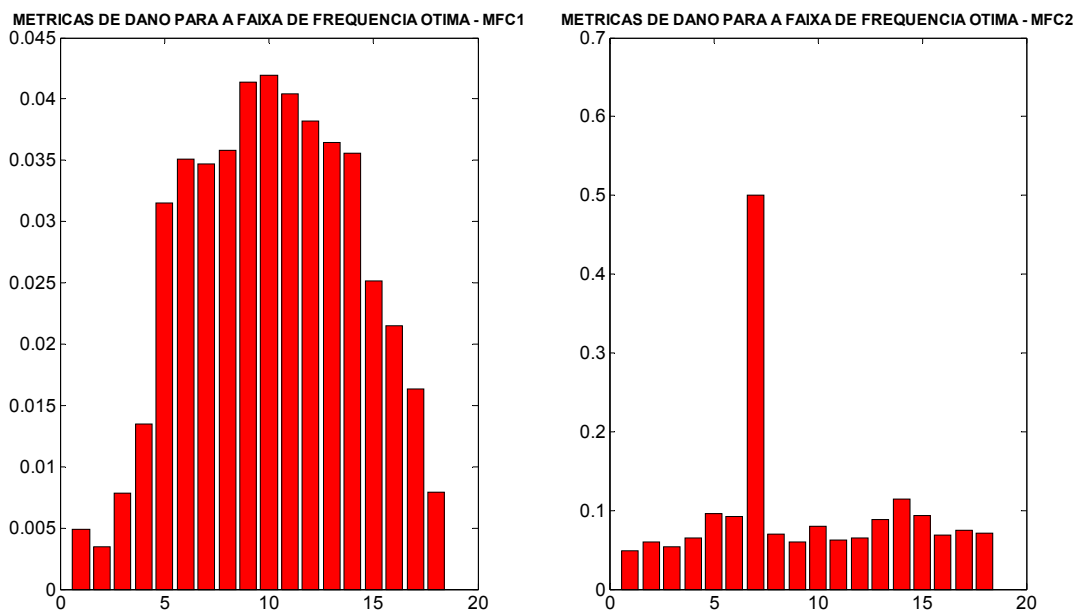


Figura 7.16 - Métricas de dano para as duas pastilhas de MFC na região ótima de monitoramento.

Após a identificação da região ótima de monitoramento, um metamodelo similar aos desenvolvidos nos outros capítulos desta tese poderia ter sido construído para cada uma das pastilhas de MFC, para caracterização da falha por massa adicionada. Entretanto, para se evitar repetições, este procedimento não é apresentado novamente aqui.

7.2 Estrutura Toroidal Gossamer

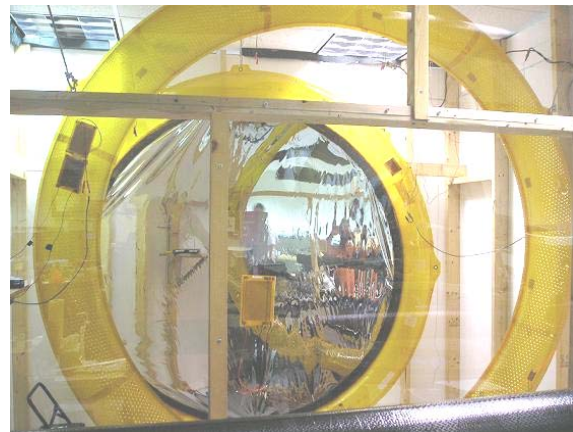
Conforme visto na seção anterior, o desenvolvimento de satélites infláveis e de baixo peso tem se tornado uma tendência, e futuras aplicações de monitoramento estrutural são de grande importância tanto para o desenvolvimento tecnológico do primeiro, como para consolidação do segundo como uma tecnologia viável.

Assim, nesta seção busca-se apresentar um estudo inicial do monitoramento da integridade estrutural de um satélite toroidal inflável do tipo Gossamer. Para tanto, foi utilizado um modelo utilizado por Ruggiero (2002) para os testes. Neste caso, optou-se por variar estruturalmente o satélite de duas formas, a saber: satélite pressurizado e não pressurizado e técnica de adição de massa para caracterização da falha.

A Fig. 7.17 apresenta o satélite utilizado, que tem forma toroidal (Fig. 7.17b). Na Fig. 7.17a apresenta as pastilhas MFCs coladas nas bordas do satélite.



a) Satélite com as pastilhas MFC nas bordas



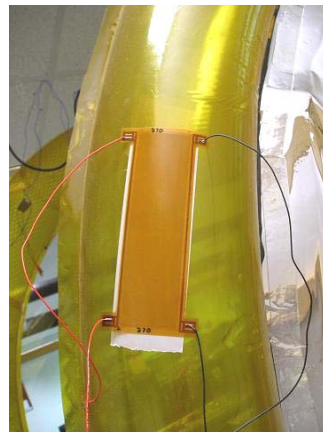
b) Vista mais ampla do sistema

Figura 7.17 - Satélite inflável toroidal Gossamer.

A Fig. 7.18 apresenta as pastilhas de MFC que são utilizadas neste experimento.



a) Pastilha MFC 1



b) Pastilha MFC 2



c) Pastilha MFC 3

Figura 7.18 - Pastilhas MFC utilizadas no experimento.

As posições das pastilhas, considerando a Fig. 7.17a como referência, são assim definidas: MFC 1 – a pastilha do lado esquerdo; MFC 3 – a pastilha do lado direito; MFC 2 – a pastilha localizada no lado esquerdo, assim como o MFC 1, porém, do lado de trás, como pode ser observado na Fig. 7.18a.

A Tab. 7.4 apresenta os ensaios que foram realizados com o satélite Gossamer. Cada coluna indica a pastilha equivalente à aquisição do sinal.

Os experimentos *cheio1*, *cheio2* e *cheio3* se referem a um sinal de referência de cada um dos três sensores com o satélite pressurizado, ou seja, com pressão interna. Os experimentos *vazio1*, *vazio2* e *vazio3* se referem aos sinais das pastilhas com o compressor desligado, isto é, com o satélite despressurizado.

Tabela 7.4 - Lista de ensaios realizados com o satélite.

MFC 1	MFC 2	MFC 3
cheio1	cheio2	cheio3
vazio1	vazio2	vazio3
cheio1a	cheio2a	cheio3a
falha1	-	falha3
falha4	falha5	-
falha6	falha7	-
falha8	falha9	-
falha10	falha11	-
teste1	teste2	-

Os experimentos *cheio1a*, *cheio2a* e *cheio3a* se referem a uma segunda coleta de sinais de referência com o sistema pressurizado, após o sistema ter sido religado. Os casos de falha, assim como os de teste, são devidamente explicados pela Tab. 7.5.

Tabela 7.5 - Descrição das condições de falhas no satélite Gossamer.

Falha	Falha	Massa Adicionada	Posição
falha1	falha3*	40g	Centro superior
falha4	falha5	40g	Distante do MFC 1 de 15cm
falha6	falha7	40g	Distante do MFC 1 de 30cm
falha8	falha9	20g	Distante do MFC 1 de 15cm
falha10	falha11	20g	Distante do MFC 1 de 30cm
teste1	teste2	30g	Distante do MFC 1 de 20cm

*único experimento da coluna correspondente ao sensor MFC 3. Os dados restantes da coluna se referem ao MFC 2.

Para facilitar a visualização das informações da Tab. 7.5 quanto ao posicionamento das massas adicionadas, é apresentada a Fig. 7.19.

Os experimentos da Tab. 7.4 foram realizados e são apresentados separadamente para cada pastilha de MFC.

A Fig. 7.20 apresenta o sinal dos experimentos para a pastilha MFC 1 varrendo toda a faixa de frequências, para todos os casos medidos por este sensor.

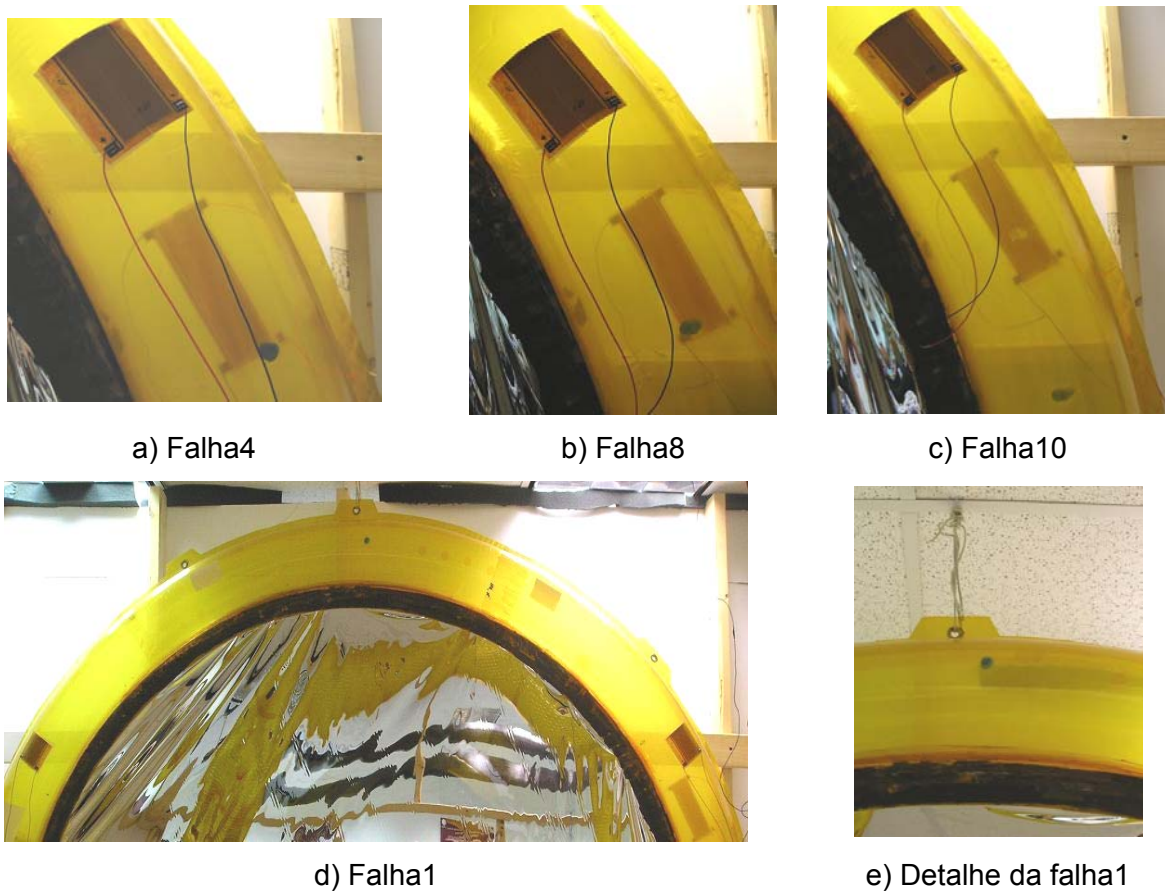


Figura 7.19 - Posições das massas adicionadas para os diferentes casos de falha estudados.

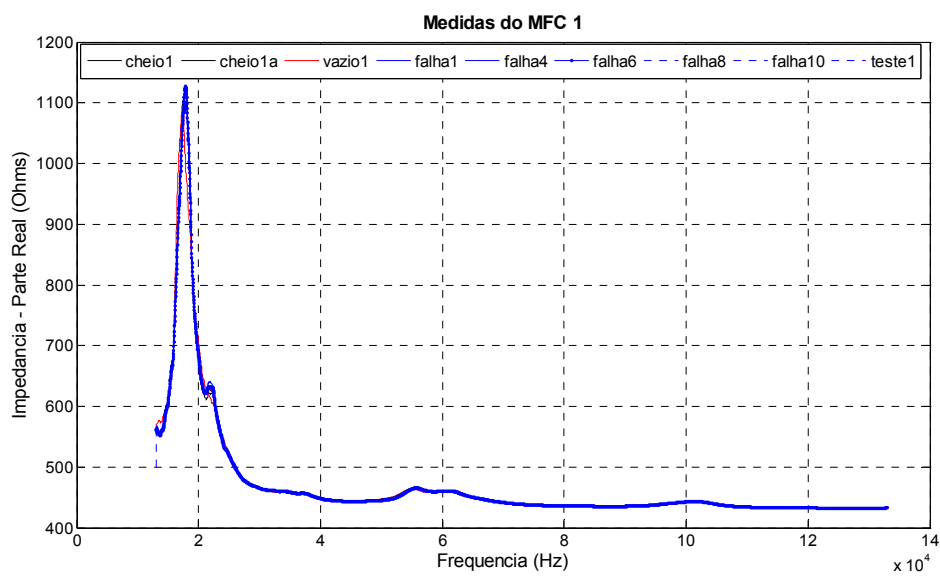


Figura 7.20 - Faixa completa para a pastilha MFC 1.

Usando o mesmo procedimento realizado para a pastilha MFC 1, as Figs. 7.21 e 7.22 apresentam os resultados dos ensaios para as faixas de frequência completa, para as pastilhas MFC 2 e 3, respectivamente.

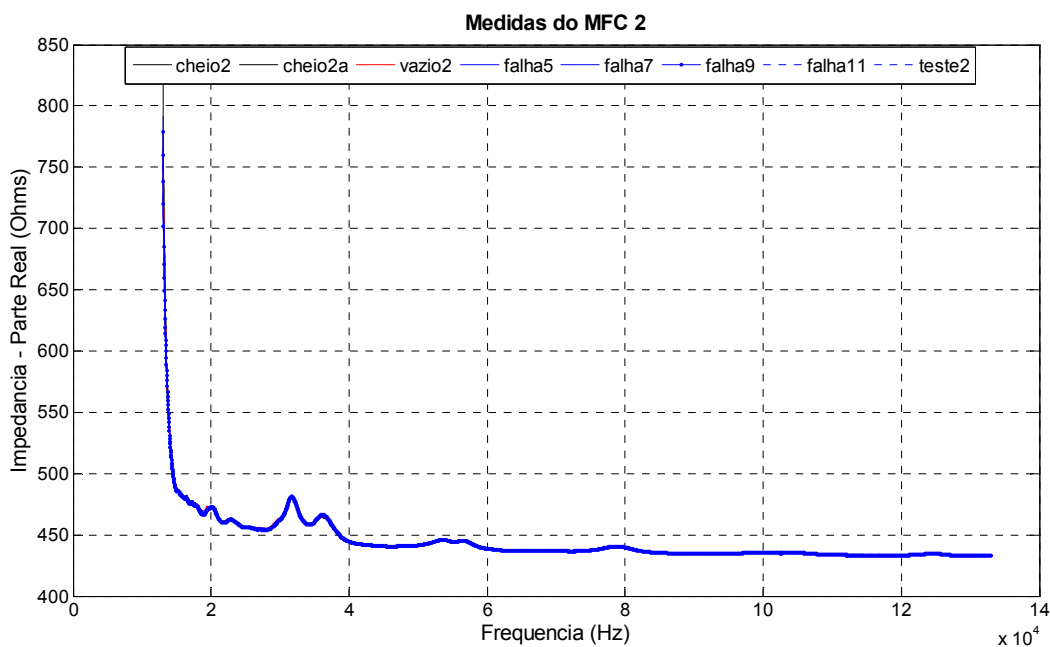


Figura 7.21 - Resultado para a faixa de frequência completa para a pastilha MFC 2.

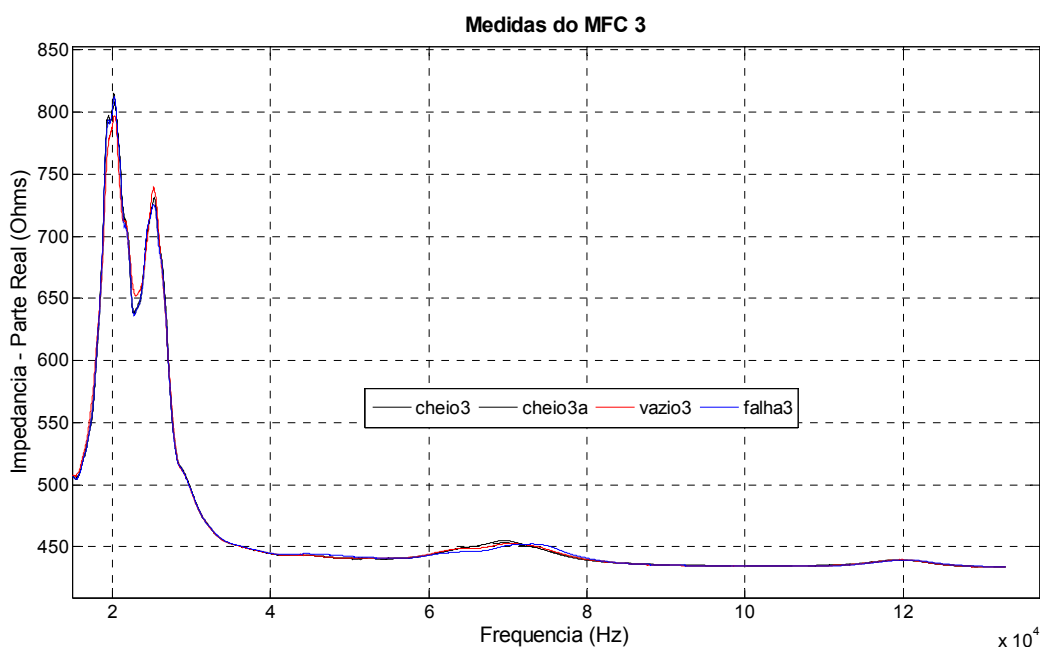


Figura 7.22 - Resultado para a faixa de frequência completa para a pastilha MFC 3.

Tomando como referência os sinais completos, foram levantadas as métricas de dano para as três pastilhas de MFC considerando todos os 4000 pontos amostrados. Os resultados para os MFC 1, 2 e 3 são apresentados nas Figs. 7.23, 7.24 e 7.25, respectivamente.

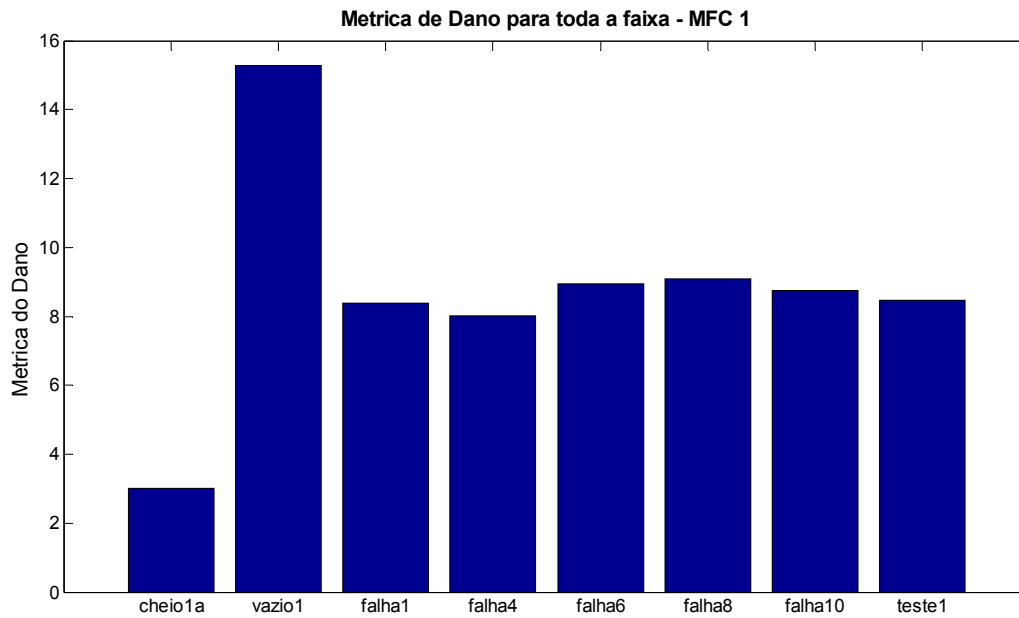


Figura 7.23 - Métrica de falha para a faixa completa – MFC 1.

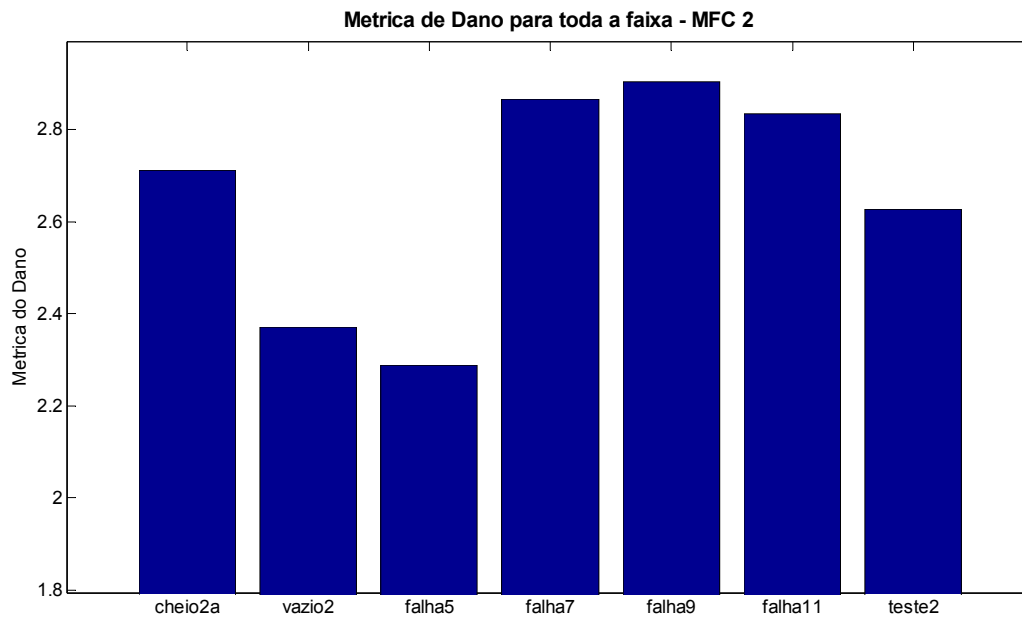


Figura 7.24 - Métrica de falha para a faixa completa – MFC 2.

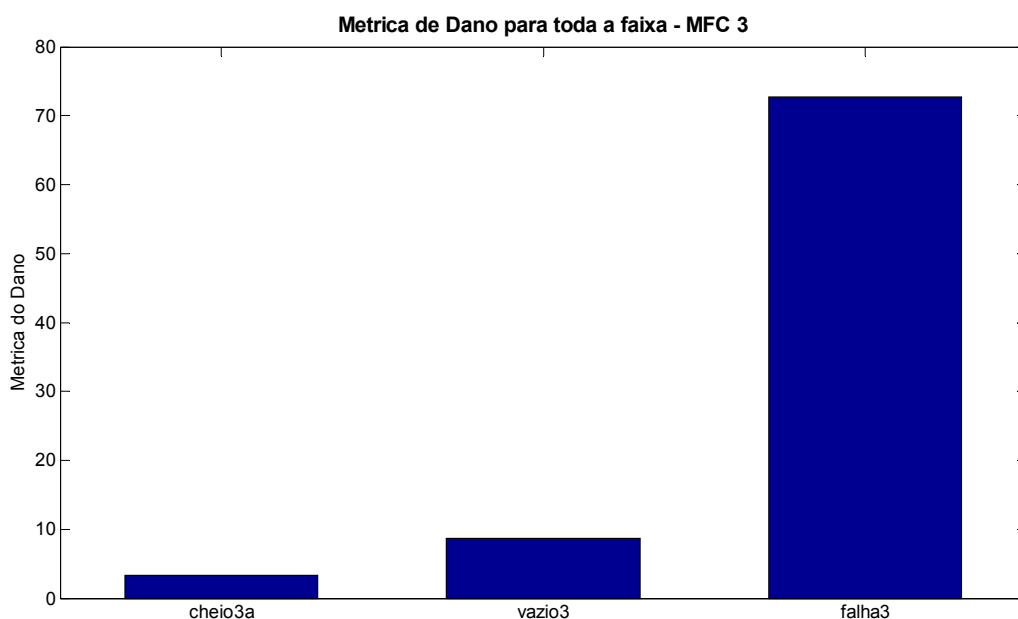


Figura 7.25 - Métrica de falha para a faixa completa – MFC 3.

Entretanto, conforme pode ser constatado através das Figs. 7.23 a 7.25, as métricas de dano não apresentam um comportamento assintótico, devido ao excesso de pontos amostrados, favorecendo o aparecimento de ruído ao longo do sinal amostrado, além de características indesejáveis inerentes ao comportamento do sistema em estudo.

Para tentar reduzir este efeito, como realizado na seção anterior, foi proposta uma divisão dos sinais em duas regiões contendo 2000 pontos cada. Essas duas regiões foram divididas em:

- I- Primeiros 2000 pontos (de 10 a 70 kHz);
- II- Últimos 2000 pontos (acima de 70 até 149 kHz).

Na Fig. 7.26 são apresentados os sinais de referência (satélite inflado) e o sinal com o satélite vazio, assim como os dois grupos de métricas de danos de cada caso de falha investigado, para a pastilha MFC 1.

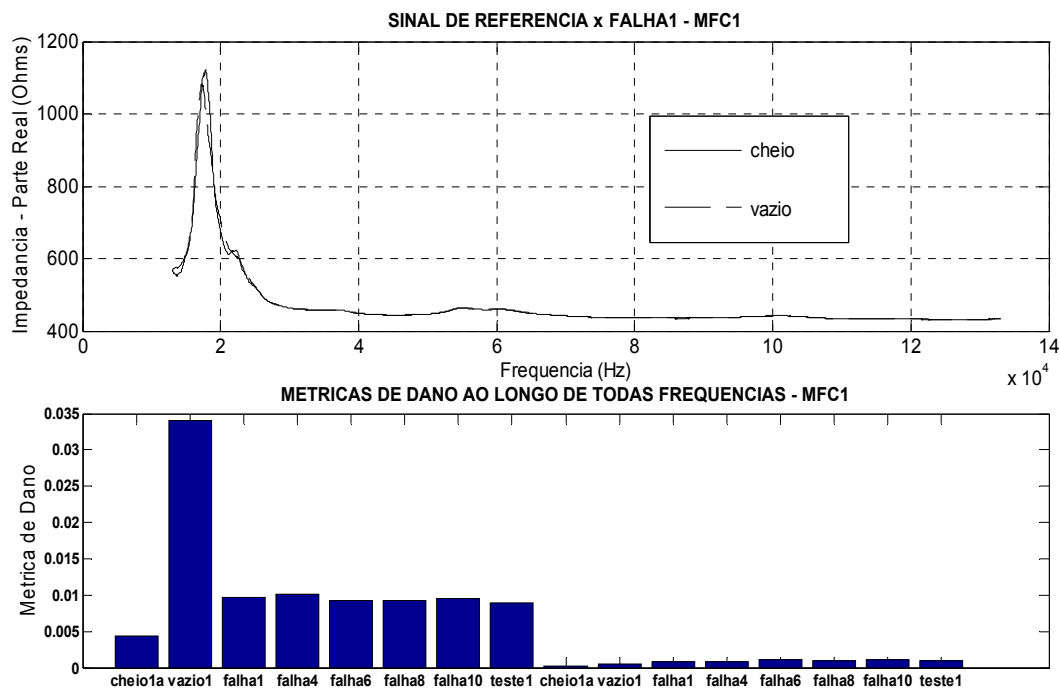


Figura 7.26 - Divisão da faixa em duas bandas (regiões I e II) – MFC 1.

Neste caso, fica evidente a diferença entre os sinais para as faixas de freqüência inferiores a 70 kHz, onde as métricas de falha se apresentam bem mais elevadas.

O mesmo procedimento é apresentado nas Figs. 7.27 e 7.28 para as pastilhas MFC 2 e 3, respectivamente.

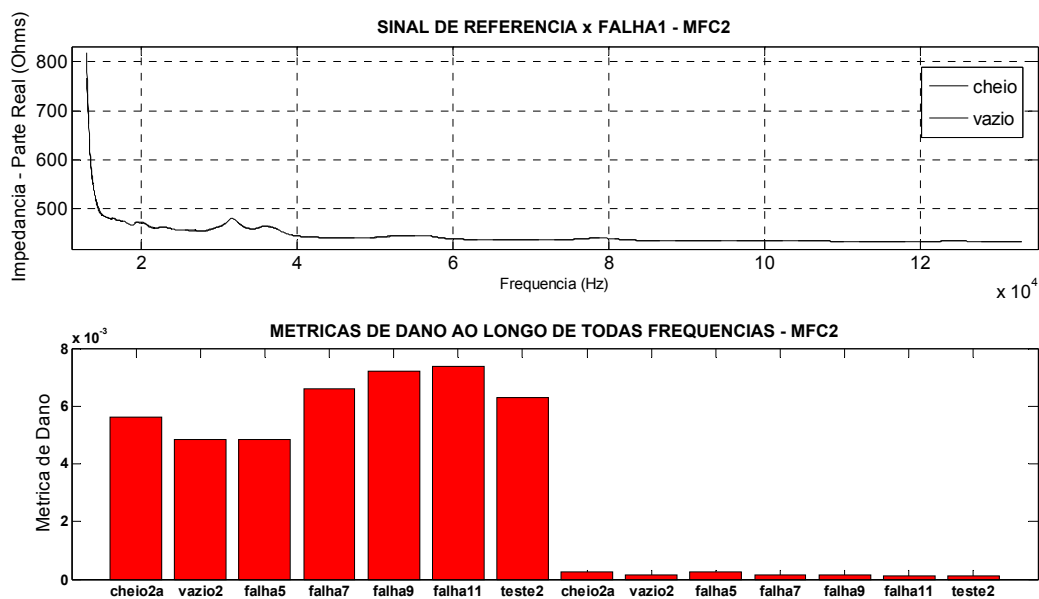


Figura 7.27 - Divisão da faixa em duas bandas (regiões I e II) – MFC 2.

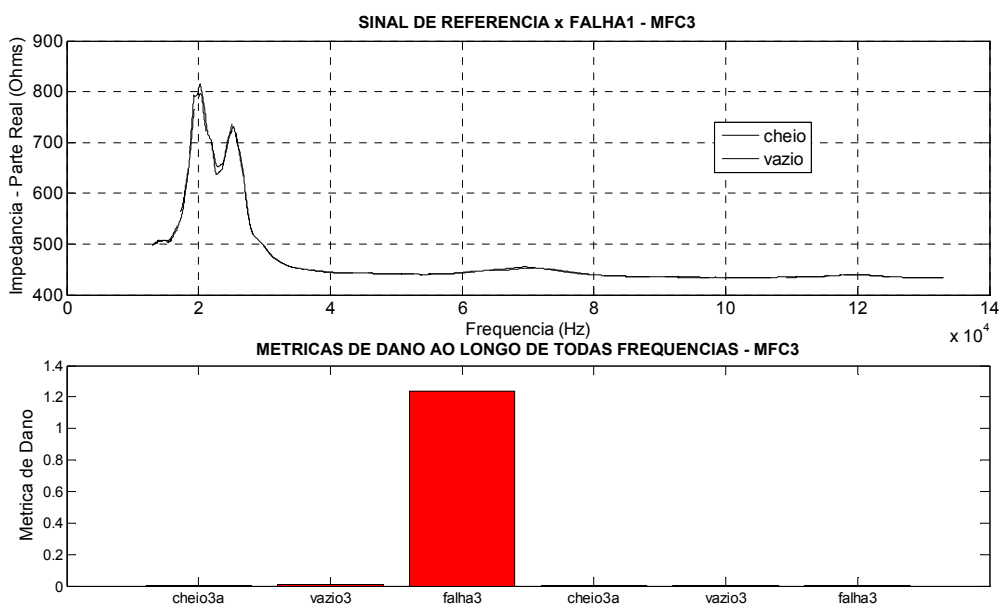


Figura 7.28 - Divisão da faixa em duas bandas (regiões I e II) – MFC 3.

Da mesma forma como já observado para a Fig. 7.26, nas Figs. 7.27 e 7.28 fica evidente, ao se analisar as métricas de dano, que as diferenças são mais evidentes quando são consideradas abaixo de 70 kHz.

Assim, foi adotado um procedimento baseado numa busca visual de uma região ótima de monitoramento para estas três pastilhas de MFC. As Figs. 7.29 a 7.30 apresentam as regiões consideradas visualmente como adequadas e suas respectivas métricas de dano para o respectivo intervalo.

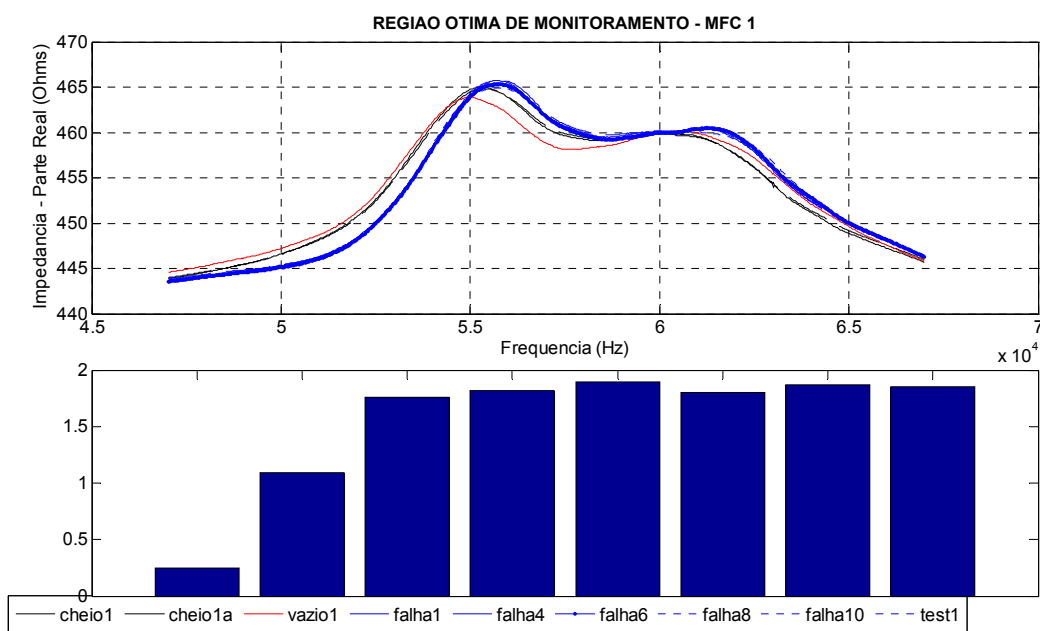


Figura 7.29 - Região ótima de monitoramento – MFC 1.

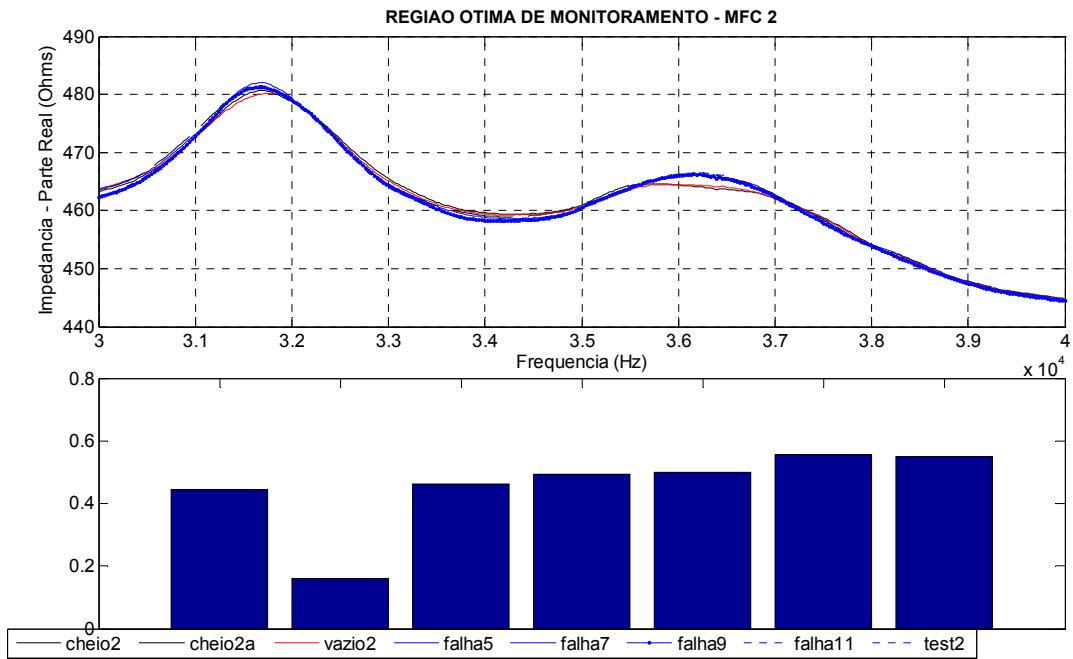


Figura 7.30 - Região ótima de monitoramento – MFC 2.

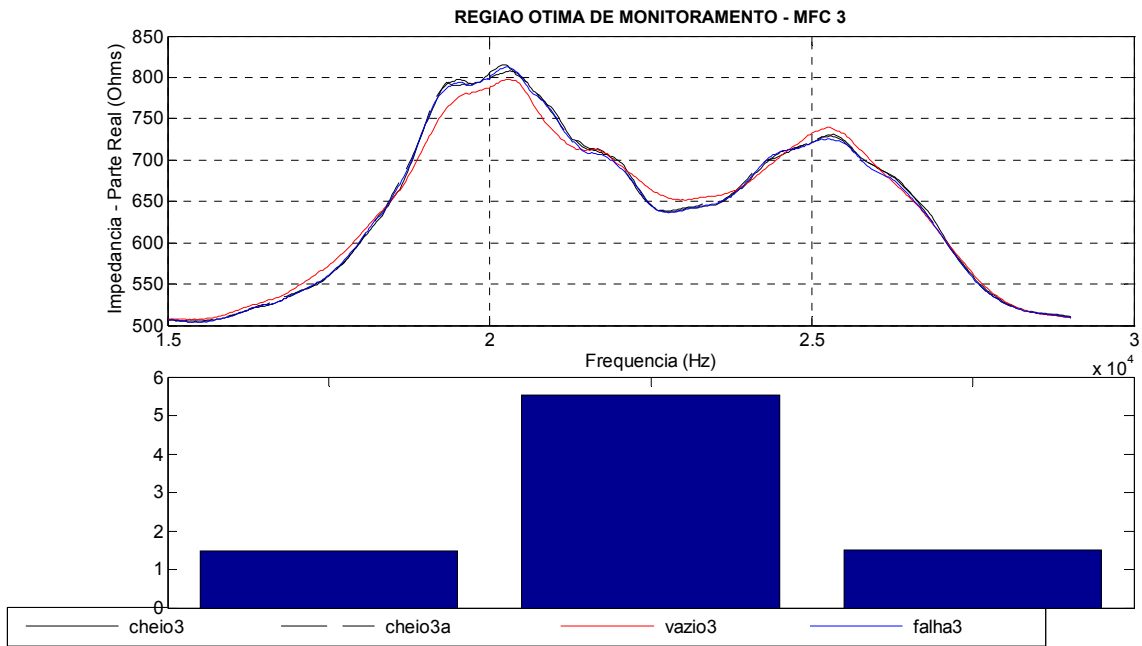


Figura 7.31 - Região ótima de monitoramento – MFC 3.

Para facilitar a visualização, os sinais das métricas de dano para as pastilhas MFC 1 e 2 foram reajustados e, nas Figs. 7.32 e 7.33 (com zoom) são novamente mostradas de forma mais nítida, permitindo observar as diferenças entre os casos de falhas.

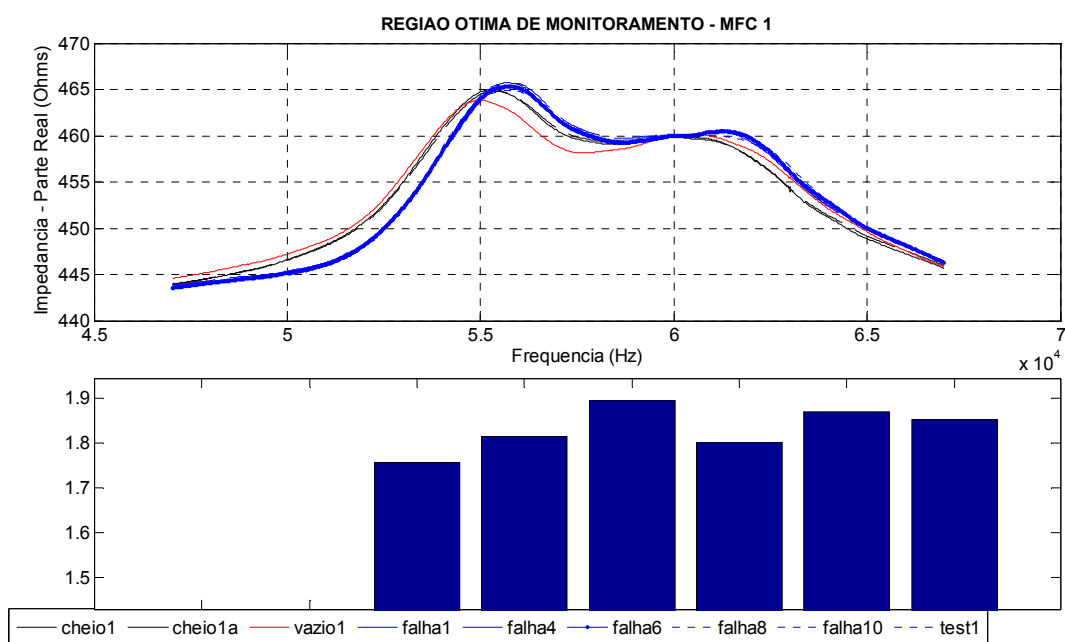


Figura 7.32 - Zoom das métricas de dano na região ótima – MFC 1.

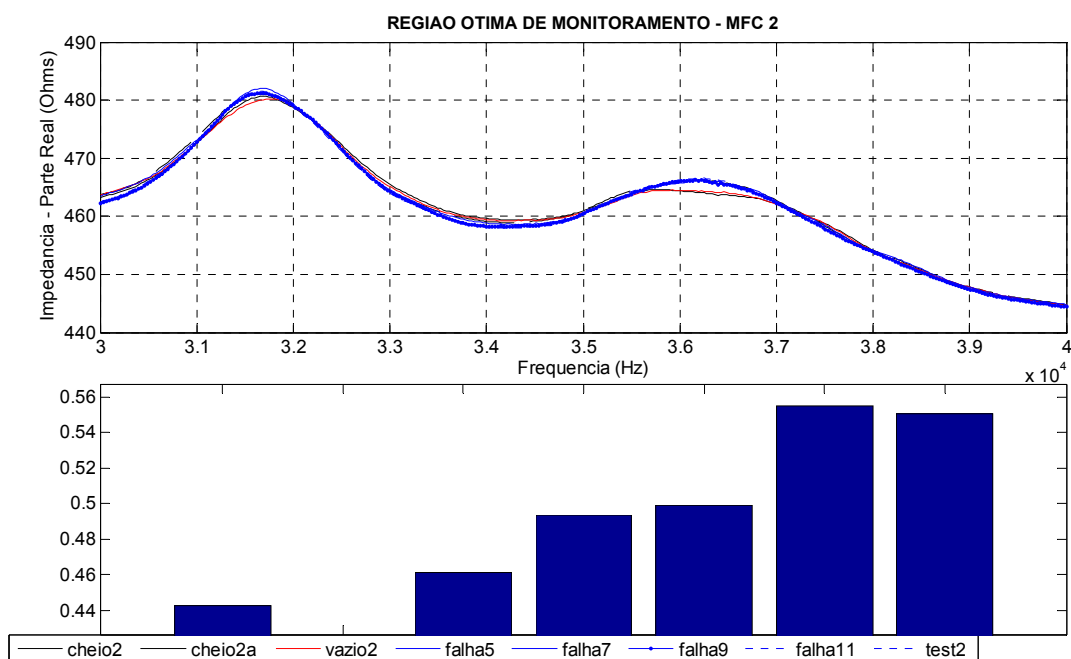


Figura 7.33 - Zoom das métricas de dano na região ótima – MFC 2.

O procedimento adotado para a identificação de mudanças estruturais para este sistema atribuiu à pastilha MFC 3 a responsabilidade de identificar se o sistema estava ou não despressurizado (caso “vazio3”). Assim sendo, basta observar a métrica de dano da pastilha MFC 3 e compará-la ao exibido pela métrica equivalente (central) na Fig. 7.31.

Após a avaliação do sistema, e o *status* considerado “pressurizado”, serão utilizadas as métricas de dano das demais pastilhas (MFC 1 e 2) para identificação da massa adicionada e da posição da mesma.

Como o experimento relativo à “falha2” não foi realizado, o que corresponderia a uma adição de massa central na estrutura, mas medido pela pastilha MFC 2, não foi possível a construção de um modelo que utilizasse as métricas de dano dos casos “falha1” e “falha3”. Na realidade, quando da realização do experimento “falha2” os dados do arquivo correspondente foram corrompidos, tornando-se impossível de repetir o experimento.

Desta forma, ainda considerando o pequeno número de casos realizados, dois metamodelos baseados em redes neurais do tipo *perceptron* multicamadas *feedforward* foram construídos para o processo de mapeamento envolvendo os sinais das métricas de dano medidas pelos MFC 1 e 2 e para a identificação da massa adicionada juntamente com sua posição.

Este tipo de metamodelo, embora com uma reduzida quantidade de pontos, conforme já mencionado, foi adotado, uma vez que os modelos de baixa ordem baseados em regressão são de difícil convergência. O metamodelo baseado em redes neurais torna este tipo de abordagem mais favorável. Assim, os casos inicialmente considerados para testes, “teste1” e “teste2”, foram também utilizados para a construção do modelo (devido ao pequeno número de experimentos e nenhuma repetição disponível).

O primeiro metamodelo construído utiliza somente as métricas de dano da pastilha MFC 2 para realizar a previsão da massa adicionada. As características da rede são as seguintes:

- Número de Camadas: 3 (camada de apresentação, 1 camada oculta, camada de saída);
- Quantidades de Neurônios: {1, 12, 1} (12 neurônios na camada oculta);
- Função de Transferência da Camada Oculta: tangente sigmóide;
- Taxa de Aprendizagem: 15%;
- Taxa de Momentum: 70%;
- Número de Épocas: 5000;
- Erro Tolerável: 10^{-5} ;
- O método de atualização dos pesos durante o treinamento foi o *Backpropagation*.

Uma figura ilustrativa da arquitetura da rede neural para a identificação da massa adicionada pode ser observada na Fig. 7.34.

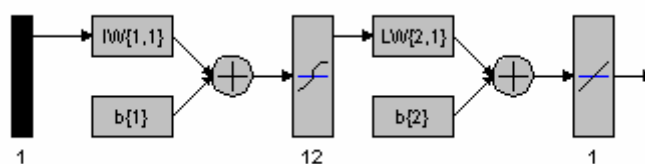


Figura 7.34 - Rede neural multicamadas para a identificação da massa adicionada.

As Figs. 7.35 e 7.36 apresentam o treinamento da rede e os resíduos do metamodelo obtido.

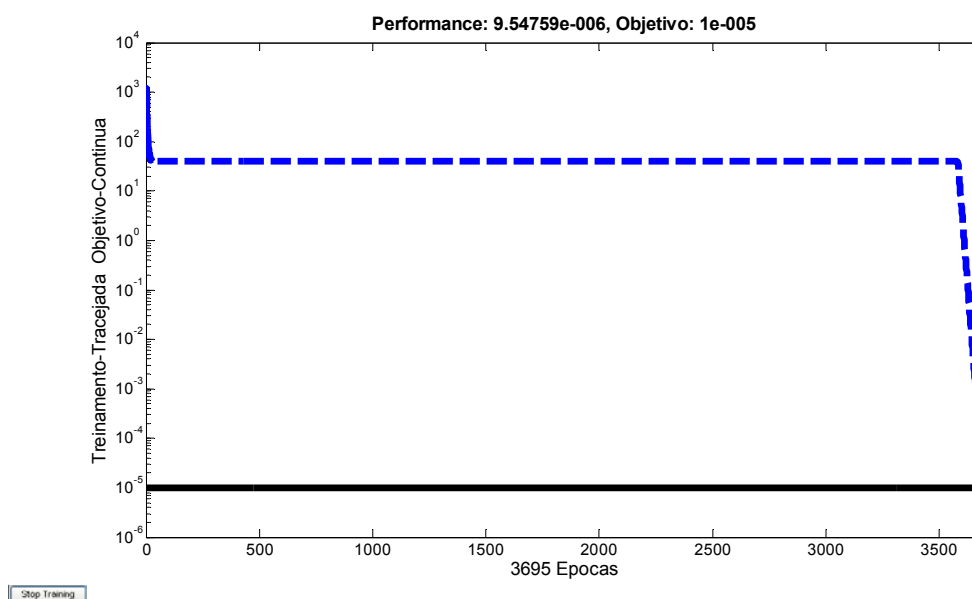


Figura 7.35 - Treinamento da rede neural para identificação da massa adicionada.

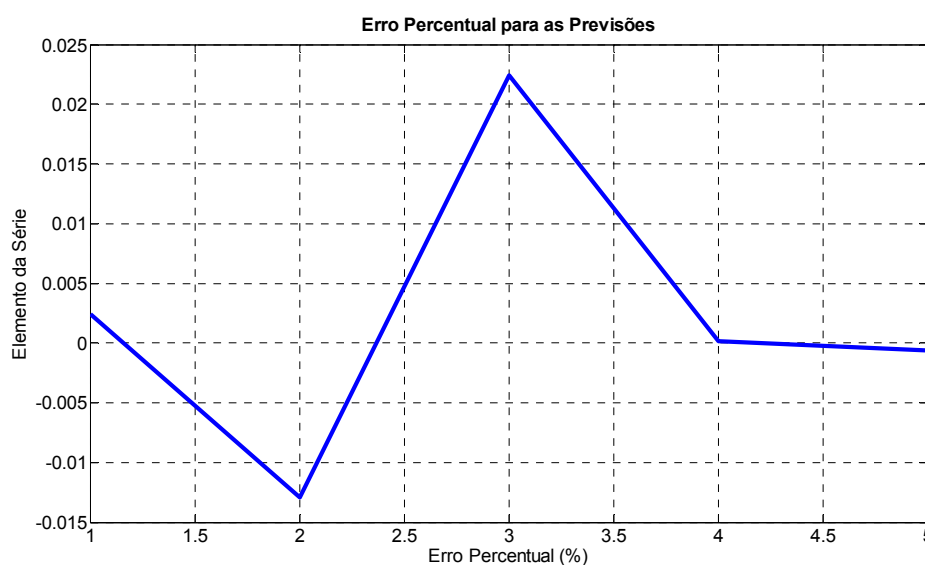


Figura 7.36 - Resíduos do metamodelo de identificação da massa adicionada.

Por fim, na Fig. 7.37 é apresentado o gráfico dos resultados calculados pela rede neural *versus* os valores reais obtidos pelo experimento. Conforme pode ser observado por este gráfico, apesar de um pequeno número de elementos amostrados, os resultados foram bem ajustados.

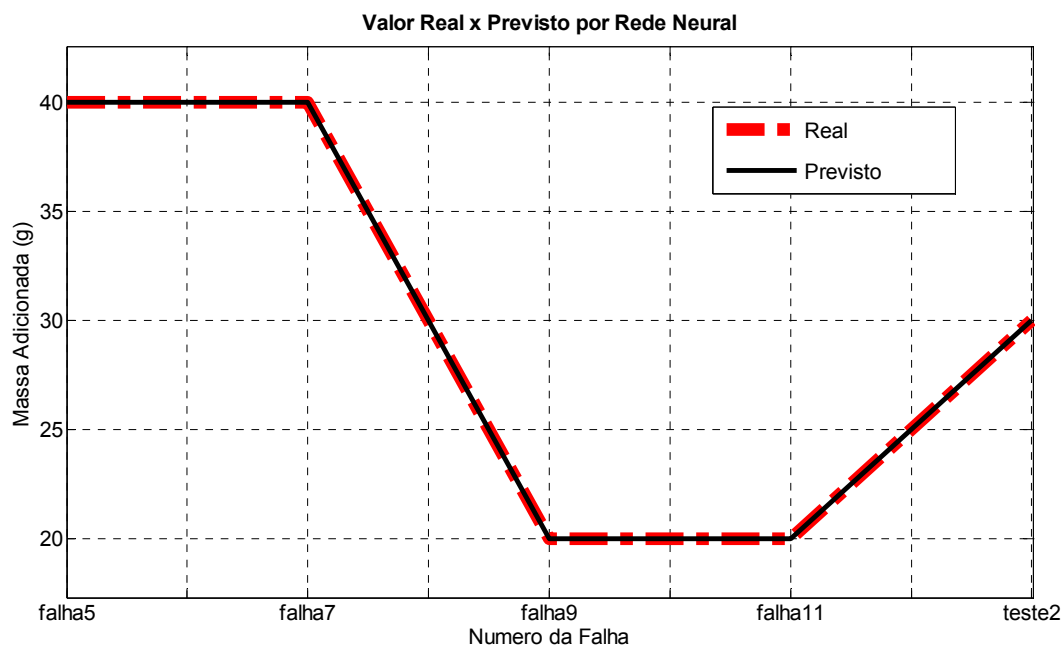


Figura 7.37 - Valores obtidos por rede neural *versus* valores reais.

Da mesma forma que o realizado para a obtenção da massa adicionada, foi construído um metamodelo, igualmente baseado em uma rede neural do tipo *perceptron* multicamadas *feedforward*, para realizar o mapeamento entre as métricas de dano obtidas pelas pastilhas MFC 1 e 2 e a posição de ocorrência da massa adicionada.

As características desta nova rede neural são as seguintes:

- Número de Camadas: 3 (camada de apresentação, 1 camada oculta, camada de saída);
- Quantidades de Neurônios: {2, 15, 1} (15 neurônios na camada oculta);
- Função de Transferência da Camada Oculta: tangente sigmóide;
- Taxa de Aprendizagem: 10%;
- Taxa de Momentum: 70%;
- Número de Épocas: 5000;
- Erro Tolerável: 10^{-5} ;
- O método de atualização dos pesos durante o treinamento foi o *Backpropagation*.

Uma figura ilustrativa da arquitetura da rede neural para a previsão da massa adicionada pode ser observada na Fig. 7.38.

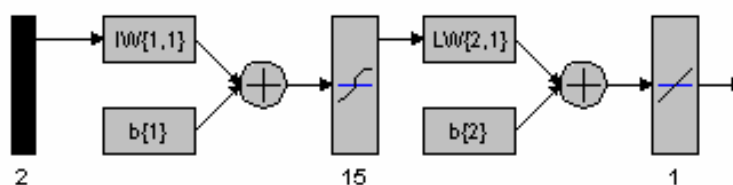


Figura 7.38 - Rede neural multicamadas para a previsão da posição da massa adicionada.

Diferentemente da rede neural para a identificação da massa adicionada, este metamodelo possui dois neurônios na camada de entrada relativa às informações das métricas de dano das pastilhas MFC 1 e 2.

As Figs. 7.39 e 7.40 apresentam o treinamento da rede e os resíduos do metamodelo obtido.

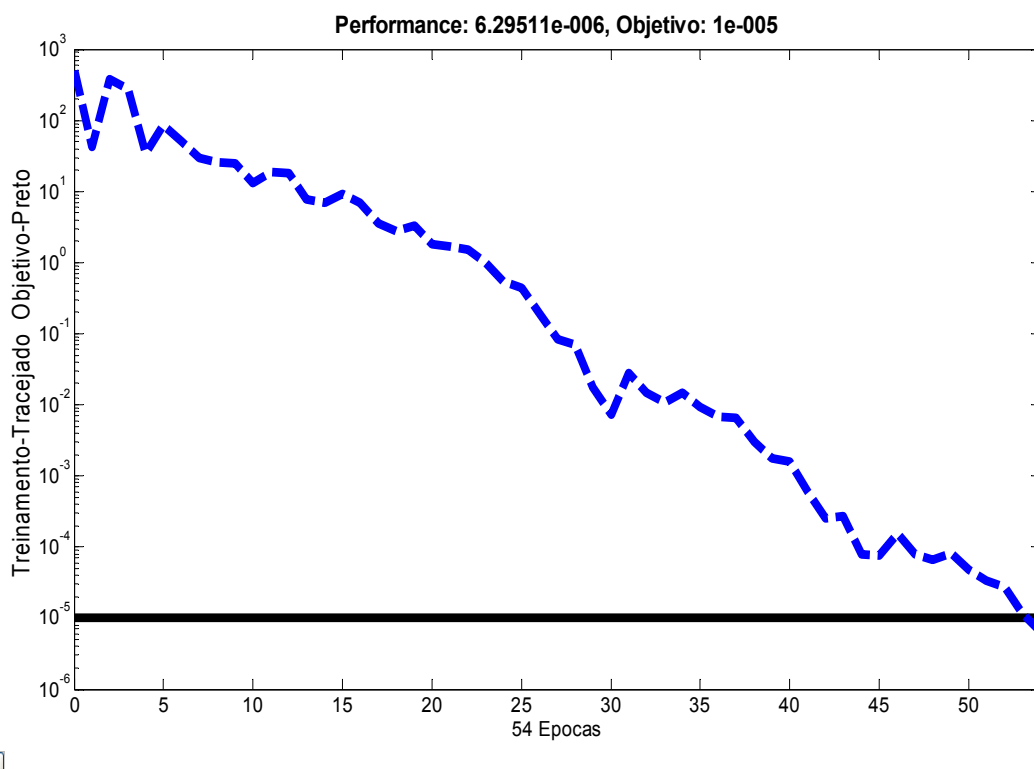


Figura 7.39 - Treinamento da rede neural para identificação da posição da massa adicionada.

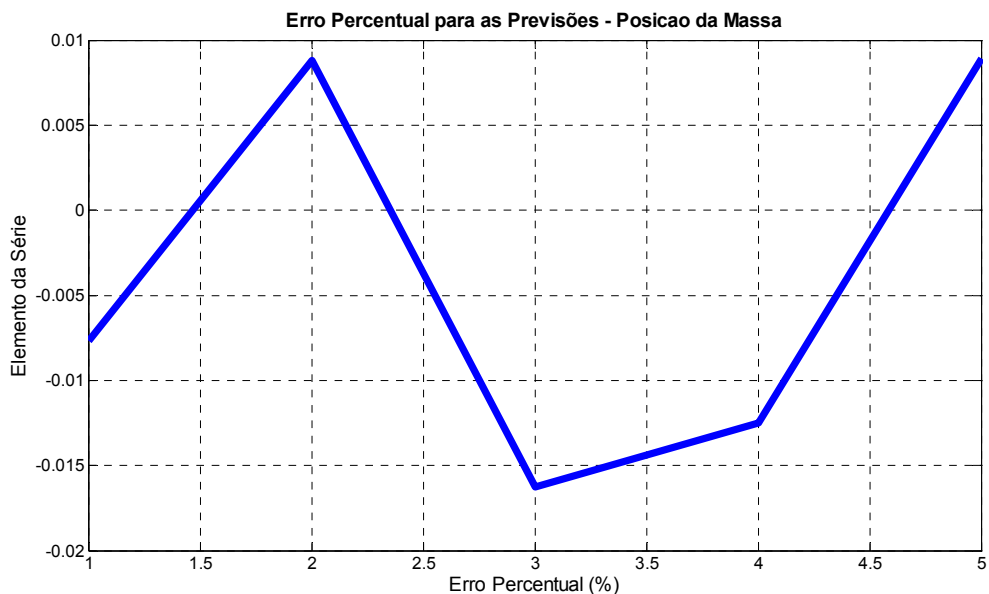


Figura 7.40 - Resíduos do metamodelo para identificação da posição da massa adicionada.

Conforme se poderia esperar, os resultados para este segundo metamodelo são tão representativos quanto os obtidos para o primeiro, já que este considera as métricas de dano para as duas pastilhas de MFC, o que torna o processo ainda mais eficiente. Isto se deve ao fato de que, em uma modificação estrutural, é bastante importante obter a posição de ocorrência da modificação. A intensidade da modificação, embora também importante, tem um caráter menos essencial do que a posição, do ponto de vista do monitoramento de falhas. Os resultados reais comparados com os obtidos pela rede neural estão ilustrados na Fig. 7.41.

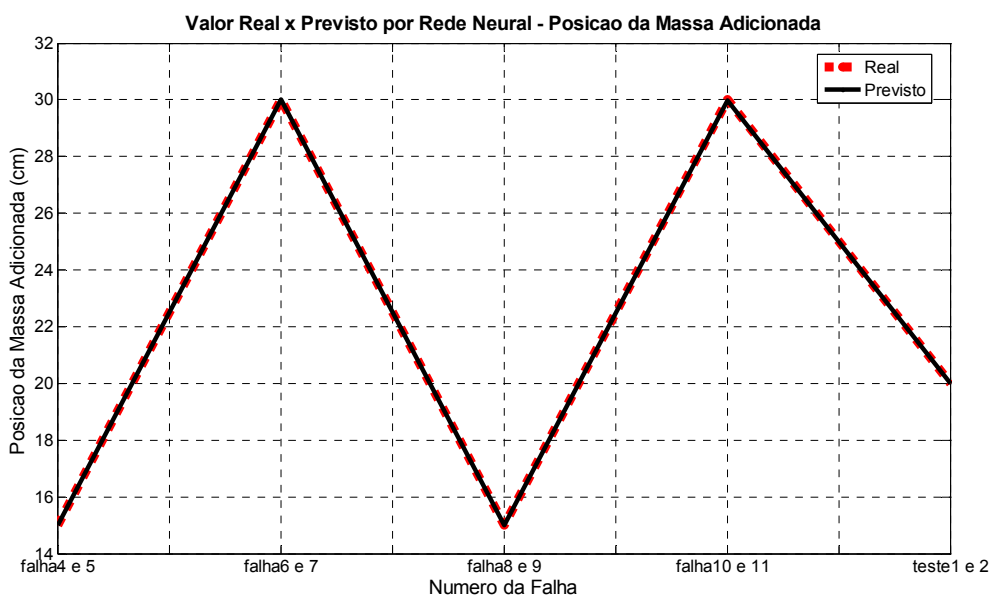


Figura 7.41 - Valores obtidos por rede neural versus valores reais para a identificação da posição da massa adicionada.

Este capítulo apresentou algumas abordagens possíveis à vista do interesse na investigação das regiões consideradas ótimas para monitoramento em estruturas espaciais. Como se pode observar, o processo de metamodelagem de uma estrutura não é o processo mais complexo em um monitoramento de integridade estrutural.

Podem aparecer dificuldades, como por exemplo a determinação da melhor região de monitoramento dos sinais de impedância no domínio da frequência. Entretanto, existem alternativas para contornar este problema através de várias abordagens distintas, desde algumas mais simples, baseadas em tentativa e erro e realizadas visualmente, até aquelas em que são utilizadas técnicas mais complexas envolvendo otimização com algoritmos genéticos.

Vale ressaltar que estes inconvenientes se tornam ainda mais complexos em estruturas espaciais. Por esta razão, neste capítulo, procurou-se explorar este tipo de sistema, tendo em vista o desafio de se desenvolver uma metodologia de monitoramento de integridade estrutural para tais estruturas. Assim, verificou-se que as abordagens usando tentativa e erro não são suficientes para garantir bons resultados. Apesar dos inconvenientes com o tempo de processamento, metodologias baseadas em otimização numérica constituem um melhor processo de automatização para implementação de casos reais de monitoramento neste segmento. Outro aspecto que merece atenção é que as estruturas espaciais são essencialmente leves e construídas com os mais diferentes materiais, principalmente os materiais compostos, onde pequenas alterações ambientais podem resultar em algum tipo de ruído do ponto de vista da análise estrutural, já que a metodologia opera através do acoplamento eletromecânico entre a estrutura e o sensor/atuador.

Apesar de facilitar, ou mesmo automatizar o processo de busca e determinação de regiões ótimas de monitoramento, o método usando algoritmos genéticos possui o inconveniente de consumir recursos e tempo de processamento numérico em computador. Neste sentido, testes (não apresentados neste trabalho) estão sendo realizados para reduzir o tempo de processamento e facilitar a convergência dos resultados, seja usando pré-processamento ou mesmo metodologias alternativas.

Capítulo VIII

SHM APLICADO A ESTRUTURAS AERONÁUTICAS

Assim como visto no capítulo anterior, neste capítulo enfoca-se os principais tipos de estruturas aeronáuticas que podem ser objeto de aplicação das técnicas de SHM, levando-se em conta a relação custo/benefício.

Não tão críticas em relação a seu custo quanto às estruturas espaciais, as estruturas aeronáuticas possuem a grande responsabilidade de garantir a segurança de vidas humanas numa escala bastante significativa. Existem aeronaves em operação que acomodam várias centenas de passageiros. Isto faz com que estruturas, muitas vezes similares às produzidas pelas indústrias automotivas, tenham seus equivalentes aeronáuticos com custos muito superiores. Como visto em vários capítulos precedentes, o monitoramento via impedância eletro-mecânica visa avaliar falhas incipientes. Mesmo nos casos em que seja possível a imediata manutenção do componente, pelo menos permite maximizar sua utilização segura, sem haver perda de funcionalidade. Neste contexto, aparece o conceito de vida residual, tema ainda em estudo por várias equipes de pesquisa ao redor do mundo.

Neste capítulo serão estudados quatro tipos de estruturas, a saber: viga de alumínio, estrutura de reforço da asa de uma aeronave militar modelo F-15, pá de um helicóptero civil e pá de um helicóptero de transporte militar. Primeiramente, um estudo sobre a influência da pressão e da temperatura na metodologia de identificação de falhas baseada em impedância é realizado. Posteriormente, é feito um estudo sobre o monitoramento dos esforços em uma estrutura da asa do F-15 e a capacidade de detecção da metodologia desenvolvida, para caracterização de falhas por adição de massa. Por fim, duas estruturas de pás de helicóptero, construídas de material composto são estudadas quanto à predição de falhas dos tipos “furos” e “rasgos”. Para a pá militar, um metamodelo preliminar baseado em técnicas de agrupamento, é responsável por fazer a triagem do sinal em um dos tipos de falha, e, assim, o metamodelo especializado para caracterização da falha é então aplicado.

8.1 Avaliação das Condições Ambientais

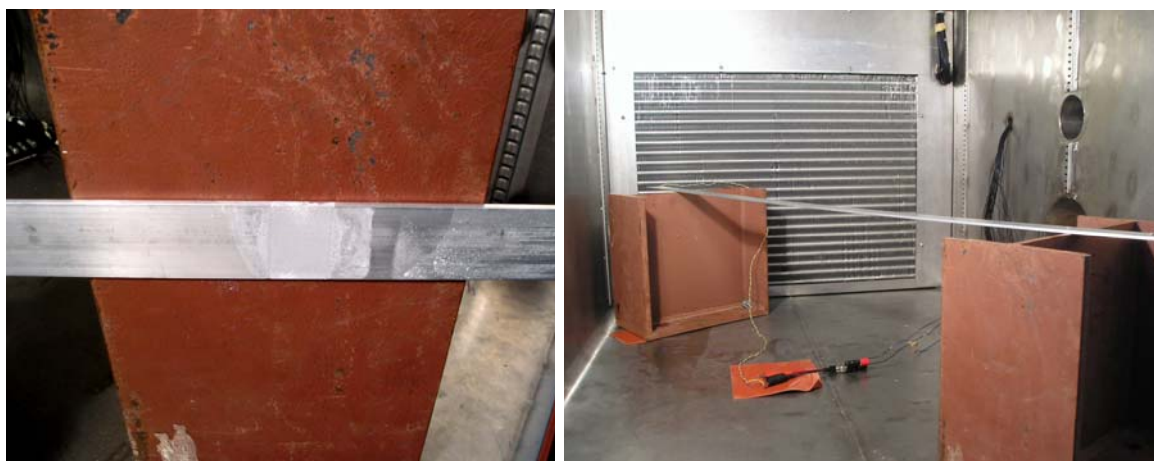
No estágio de desenvolvimento de novas técnicas para aplicações do mundo real em engenharia, é necessário levar-se em conta efeitos de condições ambientais. No caso do SHM, sinais de impedância eletro-mecânica podem vir a ser utilizados como técnica para monitorarem falhas em estruturas aeronáuticas sob condições de voo. Entretanto, a influência

das condições ambientais deve ser avaliada criteriosamente. Neste sentido, uma viga de alumínio é monitorada quanto à corrosão em um ambiente de condições ambientais controladas. Simmers (2005) realizou estudos prévios utilizando o processo de corrosão controlada em vigas e placas de alumínio. Igualmente, trabalhos anteriores de utilização da técnica de impedância para ambientes com modificações de temperatura são apresentados por Park *et al.* (1999a e 1999b).

O propósito deste estudo de caso é compreender o comportamento dos sinais de impedância de uma viga de alumínio sob diferentes condições ambientais (temperatura e pressão) em um caso de dano devido à corrosão.

8.1.1. Propriedades da Corrosão e Mudanças Ambientais

A estrutura utilizada foi uma viga de alumínio de aproximadamente um metro de comprimento (Fig. 8.1). Para inserir o dano na superfície da estrutura foi utilizado HCl (ácido clorídrico) para uma corrosão leve (12 aplicações) localizada a uma distância de 30,5 cm da pastilha PZT, como mostra a Fig. 8.1. O procedimento utilizado aqui é o mesmo proposto por Simmers Jr (2005).



a) corrosão na viga de Al

b) Viga de Al utilizada no estudo

Figura 8.1 - Viga de Al utilizada nos experimentos

Para alterar as condições ambientais, uma câmara especial de ambiente controlado foi utilizada de tal forma que a temperatura (-60°C , 0°C e $+60^{\circ}\text{C}$) e pressão (760 Torr, 179 Torr e 8 Torr) pudessem ser variadas. A condição ambiental do laboratório (próximo a 20°C e 1 atmosfera) foi considerada como sinal de referência. A Fig. 8.2 ilustra a câmara utilizada



a) vista externa da câmara

b) vista interna da câmara

Figura 8.2 - Câmara utilizada para variação e temperatura

Para a medição dos dados foi utilizado um analisador de impedância HP4194A e 64 médias foram utilizadas nas coletas das amostras. A banda de frequências utilizada foi de 40,5 kHz a 112 kHz com 12 Hz de resolução.

A seqüência dos experimentos está apresentada na Tab. 8.1, sendo que a última coluna mostra as cinco repetições feitas para cada teste.

Tabela 8.1 - Tabela dos experimentos

Número do Experimento	Posição do Dano (pol)	Profundidade do Dano (Número de aplicações de ácido)	Temperatura (°C)	Pressão (Torr)	Número de Repetições
1	-	-	-60	760,21	5
2	-	-	-60	179,5827	5
3	-	-	-60	8,29470	5
4	-	-	0	760,21	5
5	-	-	0	179,5827	5
6	-	-	0	8,29470	5
7	-	-	60	760,21	5
8	-	-	60	179,5827	5
9	-	-	60	8,29470	5
10	12	12x	-60	760,21	5
11	12	12x	-60	179,5827	5
12	12	12x	-60	8,29470	5
13	12	12x	0	760,21	5
14	12	12x	0	179,5827	5
15	12	12x	0	8,29470	5
16	12	12x	60	760,21	5
17	12	12x	60	179,5827	5
18	12	12x	60	8,29470	5

A Fig. 8.3 apresenta os sinais de impedância (parte real) de todos os experimentos em duas faixas de frequências selecionadas. Pode-se observar que algum ruído pode ser encontrado nestas faixas. Antes que os efeitos fossem analisados para todos os fatores considerados, o ruído foi eliminado.

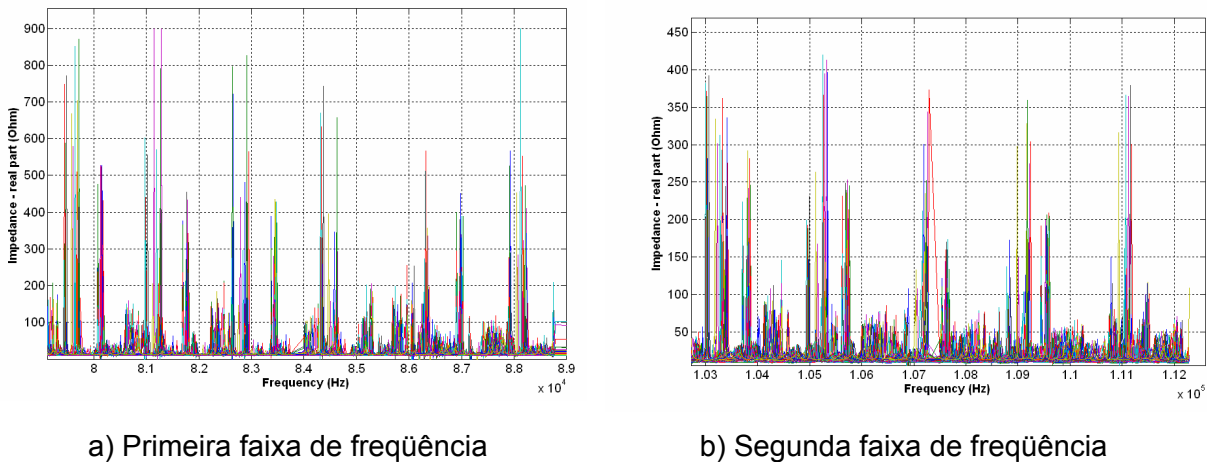
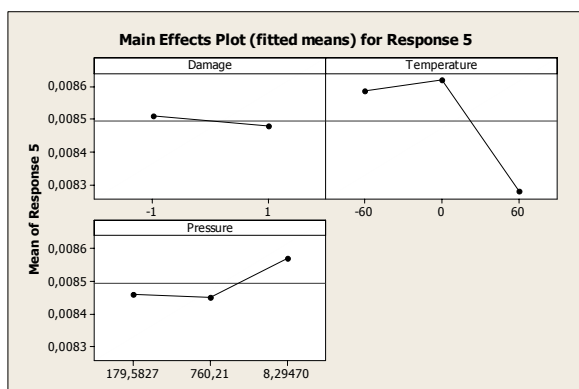


Figura 8.3 - Faixas de frequência observadas

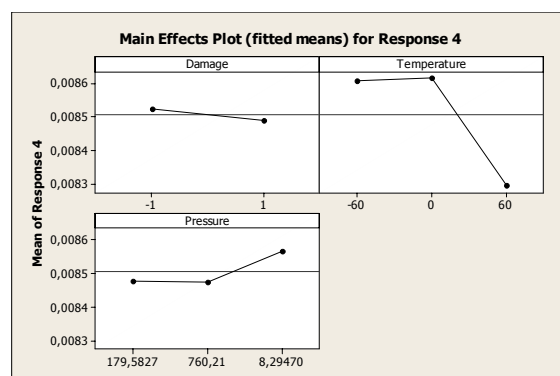
8.1.2. Resultados para Variações Ambientais

Um planejamento fatorial completo baseado na Tab. 8.1 foi realizado considerando os seguintes fatores: dano, pressão e temperatura. O objetivo deste procedimento é compreender a influência de cada fator na resposta do sinal de impedância. Para este fim, tanto os efeitos principais (dano, temperatura e pressão) quanto a interação destes efeitos (efeitos cruzados) foram levados em consideração. Foi realizado um procedimento para exclusão de *outliers*, para evitar a geração de um metamodelo pouco representativo. O conjunto final de dados é baseado em 80 observações.

Como podem ser observados na Fig. 8.4 (respostas 4 e 5), os efeitos principais são estáveis e mostram a influência de cada fator na métrica do dano das respostas correspondentes. Destes gráficos pode-se observar que, quando um dano foi inserido, a métrica de dano correspondente foi reduzida. O efeito da temperatura exhibe um comportamento assimétrico em torno de 0° C. Entretanto, o efeito do fator pressão é tal que a métrica de dano correspondente cresce para valores menores de pressão, ou seja, para maiores altitudes (pensando nas condições de vôo).



a) Resposta 5



b) Resposta 4

Figura 8.4 - Efeitos principais dos fatores nas respostas

O gráfico das interações, Fig. 8.5, mostra como as interações entre os fatores podem modificar as métricas de dano do experimento. Neste caso, pode-se perceber que o efeito cruzado envolvendo temperatura e pressão, acima de 0 °C, é mais significativo do que para baixas temperaturas.

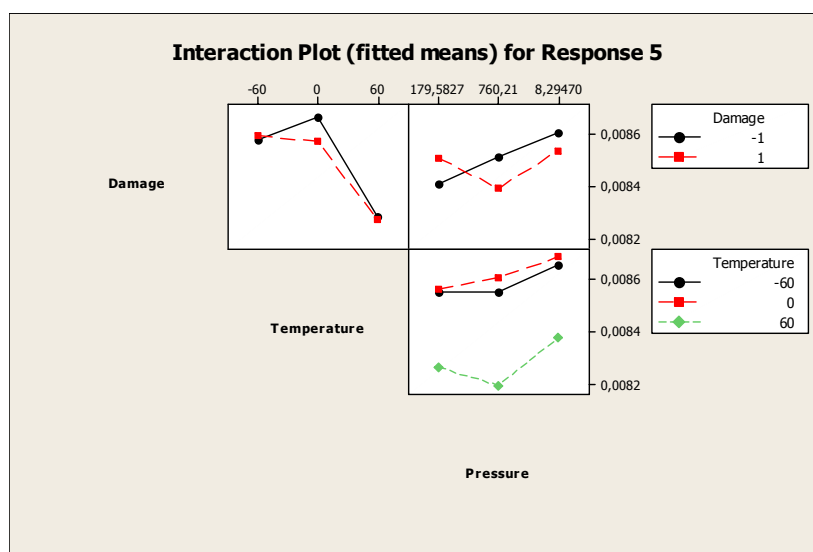
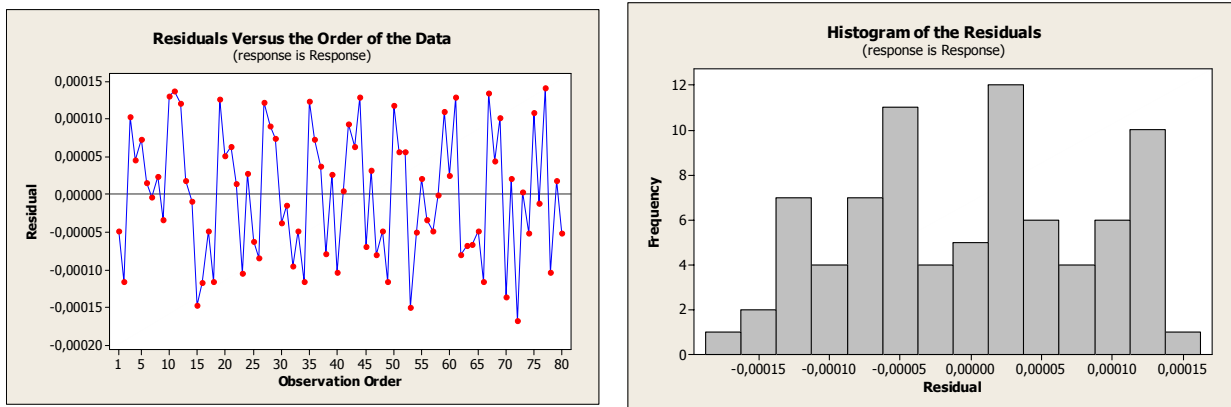


Figura 8.5 - Efeitos de interação da resposta 5

Os resíduos obtidos pelo metamodelo de regressão podem ser observados na Fig. 8.6a). O histograma equivalente dos resíduos é apresentado na Fig. 8.6b). Como podem ser observados, os resíduos são distribuídos uniformemente ao longo dos experimentos, correspondendo ao comportamento encontrado para um ruído com distribuição normal.



a) Resíduos do metamodelo

b) Histograma dos resíduos

Figura 8.6 - Análise residual dos ensaios para a análise da influência ambiental.

Baseado nos experimentos realizados, um metamodelo foi construído utilizando o software MINITAB ®. Primeiro, foram eliminados os dados inconsistentes. Então, uma base de dados com 80 casos de mudanças ambientais foi utilizada e obteve-se uma curva de regressão com as técnicas de planejamento fatorial conforme mostrado a seguir:

A equação de regressão é

$$\text{Response} = 0,00857 - 0,000041 \text{ Damage} - 0,000003 \text{ Temperature} - 0,0000001 \text{ Pressure}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Constant	0,00856507	0,00001348	635,50	0,000	
Damage	-0,00004051	0,00000970	-4,18	0,000	1,0
Temperature	-0,00000288	0,00000020	-14,09	0,000	1,0
Pressure	-0,00000010	0,00000003	-3,45	0,001	1,0

$$S = 0,0000864478 \quad R\text{-Sq} = 74,9\% \quad R\text{-Sq}(\text{adj}) = 73,9\%$$

Análise de Variância

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	1,69805E-06	5,66017E-07	75,74	0,000
Residual Error	76	5,67965E-07	7,47323E-09		
Total	79	2,26602E-06			

Source	DF	Seq SS
Damage	1	1,13314E-07
Temperature	1	1,49554E-06
Pressure	1	8,91931E-08

Ao se observar a última coluna VIF (*Variance Inflation Factors* – Fatores de Inflação de Variância) do programa de saída, deve-se lembrar que VIF igual a 1 significa que não existe associação linear entre as variáveis independentes (dano, temperatura e pressão). R-Sq representa o coeficiente de determinação, que é responsável por definir a contribuição dada à métrica de dano por cada variável independente.

A ANOVA (Análise de Variância) é apresentada para mostrar que o metamodelo pode ser usado para inferências sobre o ensaio realizado e extrair conhecimento sobre o procedimento geral. A ANOVA apresenta um baixo nível de fonte de variação ($5,68 \text{ E-}07$) devido ao Erro Residual.

Finalmente, pode-se dizer que o dano tem a maior influência relativa na curva de regressão, sendo esta muito maior que o efeito da temperatura. Isto significa que, embora a temperatura tenha um forte efeito sobre a métrica do dano, a inserção de dano, ainda que pequeno tal como o caracterizado por uma corrosão, é ainda mais importante para a métrica de dano. Conseqüentemente, tudo indica que influência dos efeitos ambientais (temperatura e pressão) pode ser considerada em detecção de falhas e prognóstico utilizando a abordagem do monitoramento da integridade estrutural baseado na técnica da impedância eletro-mecânica.

8.1.3. Conclusões sobre os Aspectos Ambientais

Nesta seção foi realizado o estudo dos efeitos ambientais associados aos sinais de impedância eletro-mecânica em propostas de monitoramento para detecção de falhas. Foi considerada uma corrosão leve localizada a 30,5 cm da pastilha de PZT e foram considerados três fatores de influência: o próprio dano, a temperatura e a pressão.

Observando os coeficientes de regressão, pode-se concluir que o efeito da pressão não é importante, uma vez que o valor deste coeficiente é muito baixo. A representação do modelo por um metamodelo linear é satisfatória, desde que o Coeficiente de Determinação Ajustado (CDA) seja próximo de 75%, significando que 75% da variação da métrica do dano podem ser explicadas somente pelos fatores principais.

Como esperado, a influência da temperatura é significativa e varia fortemente para temperaturas elevadas. Entretanto, o mesmo não ocorre para baixas temperaturas. Isto significa que, para altas temperaturas, é necessário normalizar os sinais de impedância, enquanto este procedimento não é necessário para baixas temperaturas. Por outro lado, uma detecção de danos equivocada pode ocorrer devido à influência da temperatura, aspecto este que merece atenção. A pressão não possui grande importância na técnica apresentada para valores inferiores a 1,0 atm. Trabalhos futuros deverão considerar valores mais elevados de pressão.

8.2 Caracterização de Esforço e Falhas em uma Estrutura de Reforço de Asa de um F-15

Esta seção utiliza critérios estatísticos para obter informações relativas a esforços de tensão e falhas por adição de massa em uma estrutura pilone de um jato militar modelo F-15, cedido pela *USAF (United States Air Force)* conforme apresenta a Fig. 8.7. Conforme mencionado por Martin (2004), esta estrutura falha quando em operação, devido a mecanismos de fadiga que ocorrem em seu furo central, como mostrado na Fig. 8.8.

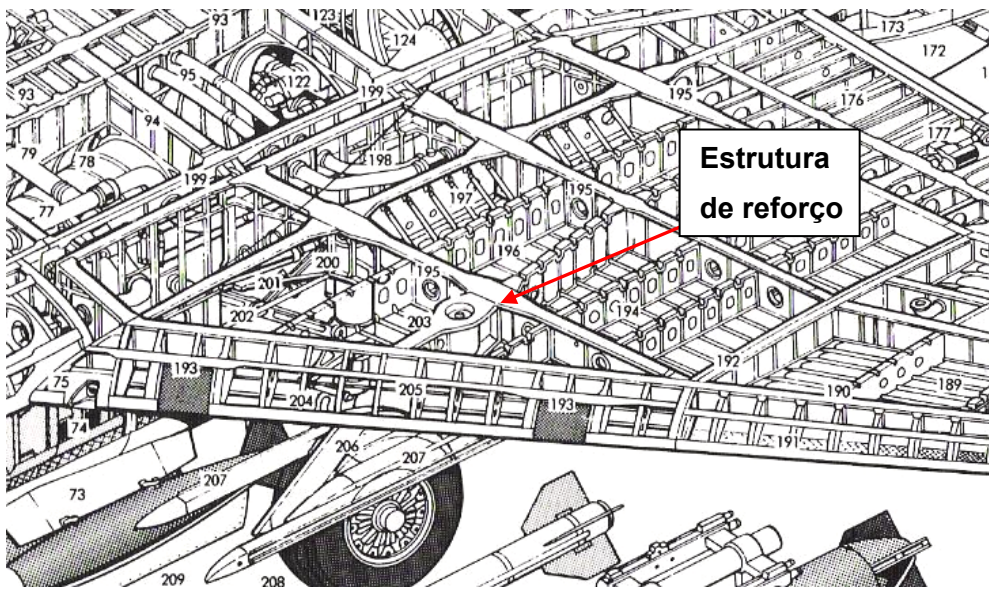


Figura 8.7 - Esquema da asa do F-15 contendo a estrutura pilone (adaptado de Crickmore, 1992).

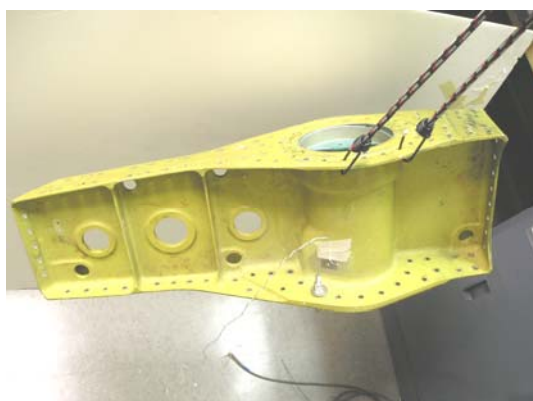


Figura 8.8 - Falha típica que ocorre no pilone do F-15 (Martin, 2004).

Utilizando um analisador de impedância HP4194A, todos os dados experimentais relativos a este experimento foram coletados no CIMSS – Virginia Polytechnic Institute and State University, EUA.

8.2.1. Condições Ótimas de Monitoramento

Baseado em estudos anteriores relativos ao pilone (Martin, 2004), primeiramente a configuração ótima de monitoramento foi avaliada, como mostra a Tab. 8.2. Foi necessário determinar as melhores condições de monitoramento de tal forma que os sinais de impedância fossem sensíveis ao processo de fadiga (diferença entre os sinais em relação ao sinal de referência), enquanto as demais variáveis foram consideradas como sendo ruído, sem interferência sobre o sistema. As variáveis tidas ruído são as seguintes: posição da estrutura durante o teste (condições de contorno, como mostrado na Fig. 8.9) e as condições iniciais (situações sem vibração e vibração livre).



a) nível -1



b) nível +1

Figura 8.9 - Condições de contorno da estrutura.

Para incluir uma modificação estrutural uma massa adicional foi fixada na proximidade do PZT (pastilha PZT 1).

O analisador de impedância foi configurado para 32 médias, tempo de integração curto e 1 Volt RMS.

Usando os dados da Tab. 8.2, a métrica de dano foi obtida, como mostrado na Fig. 8.10, permitindo extrair as melhores condições para os propósitos de monitoramento (experimentos #7 e #19).

Tabela 8.2 - Tabela de experimentos para obter a melhor configuração de monitoramento.

Número do Experimento	Fatores		Ruído		Resposta
	Tipo do Sinal	Banda de Frequência (kHz)	Posição da Estrutura (Efeitos das condições de contorno)	Vibrações (Condições Iniciais)	
1	R	8 a 13	-1	-1	2,63E+01
2	R	50 a 60	-1	-1	1,04E+01
3	R	150 a 160	-1	-1	4,60E+00
4	X	8 a 13	-1	-1	1,46E+00
5	X	50 a 60	-1	-1	1,58E+00
6	X	150 a 160	-1	-1	9,11E-01
7	R	8 a 13	1	-1	3,44E+01
8	R	50 a 60	1	-1	1,62E+01
9	R	150 a 160	1	-1	8,56E+00
10	X	8 a 13	1	-1	2,12E+00
11	X	50 a 60	1	-1	2,52E+00
12	X	150 a 160	1	-1	1,01E+00
13	R	8 a 13	-1	1	2,65E+01
14	R	50 a 60	-1	1	1,14E+01
15	R	150 a 160	-1	1	4,49E+00
16	X	8 a 13	-1	1	1,35E+00
17	X	50 a 60	-1	1	1,60E+00
18	X	150 a 160	-1	1	8,37E-01
19	R	8 a 13	1	1	3,45E+01
20	R	50 a 60	1	1	1,54E+01
21	R	150 a 160	1	1	8,45E+00
22	X	8 a 13	1	1	2,05E+00
23	X	50 a 60	1	1	2,38E+00
24	X	150 a 160	1	1	9,60E-01
25	R	8 a 13	Sem danos para referência (também, sem ruído)		
26	R	50 a 60			
27	R	150 a 160			
28	X	8 a 13			
29	X	50 a 60			
30	X	150 a 160			

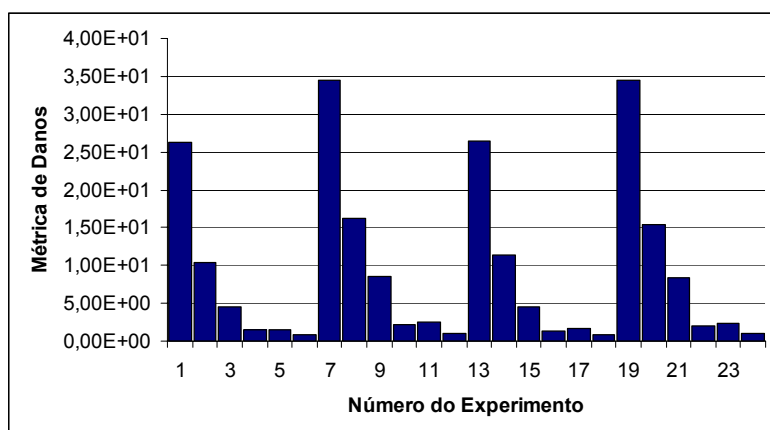


Figura 8.10 - Métricas de dano para a Tab. 8.2.

Da Fig. 8.10 pode-se concluir que a influência das condições iniciais é mínima. Isto se deve ao fato de que o PZT excita a estrutura apenas localmente ao longo da banda de frequência de teste e a influência do martelo de impacto não é significativa.

Baseado nestes experimentos, um procedimento de robustecimento de projetos segundo Taguchi foi desenvolvido para determinar as melhores condições de teste de acordo com a Tab. 8.3. Também, o conceito de “o maior o melhor” foi utilizado no sentido de que um valor de média elevado associado a um baixo desvio padrão (Sinal/Ruído) é desejado, pois significa alta sensibilidade em relação à modificação estrutural e baixa influência do ruído. Os resultados são apresentados na Fig. 8.11.

Tabela 8.3 - Projeto de Parâmetros segundo Taguchi.

Configurações Possíveis	Fatores		Resposta	Resposta	Resposta	Resposta	Resultados
	Tipo do Sinal	Banda de Frequência (kHz)	#1	#2	#3	#4	
A	R	8 a 13	2,63E+01	3,44E+01	2,65E+01	3,45E+01	2,94E+01
B	R	50 a 60	1,04E+01	1,62E+01	1,14E+01	1,54E+01	2,20E+01
C	R	150 a 160	4,60E+00	8,56E+00	4,49E+00	8,45E+00	1,51E+01
D	X	8 a 13	1,46E+00	2,12E+00	1,35E+00	2,05E+00	4,34E+00
E	X	50 a 60	1,58E+00	2,52E+00	1,60E+00	2,38E+00	5,50E+00
F	X	150 a 160	9,11E-01	1,01E+00	8,37E-01	9,60E-01	-6,91E-01

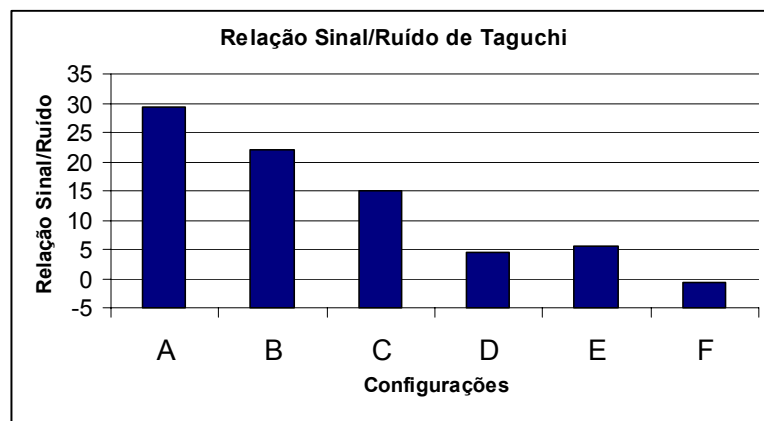


Figura 8.11 - Resultados do Projeto de Parâmetros segundo Taguchi.

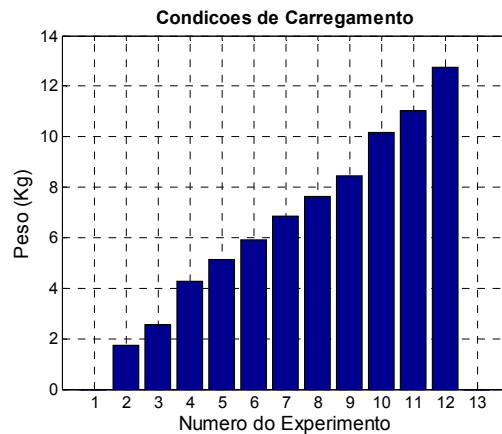
Como apresenta a Fig. 8.11, a configuração ótima de monitoramento corresponde à primeira apresentada na Tab. 8.3 (Configuração A). Esta foi então a condição utilizada para todos os outros experimentos.

8.2.2. Análise de Tensão versus Sinal de Impedância

Nesta altura do trabalho, procura-se caracterizar a relação existente entre a análise de tensão e os sinais de impedância. Não foi possível utilizar uma máquina de teste padrão para os resultados obtidos das variações de tensão. Então, a estrutura foi montada no padrão “viga em balanço” (Fig. 8.12a) e as massas foram adicionadas (Fig. 8.12b) na extremidade livre, para fazer variar as solicitações na ponta engastada.



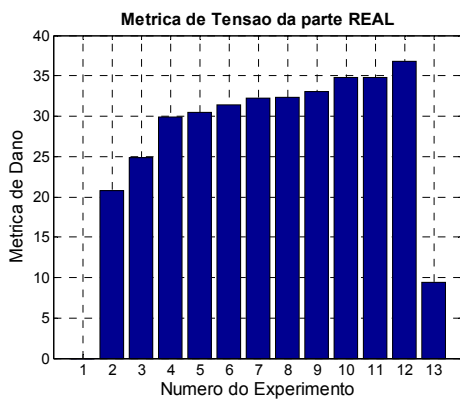
a) Pilone como uma “viga em balanço”



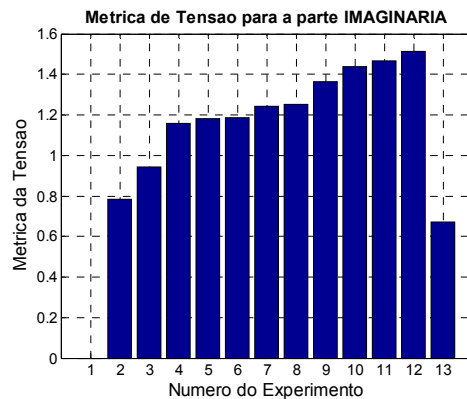
b) Condições de carregamento

Figura 8.12 - Experimentos de análise de tensão para o pilone.

Treze condições de carregamento foram testadas com 18 repetições para cada teste (a primeira e a última são as mesmas). Pontos extras foram usados para testar e validar o modelo. A Fig. 8.13 ilustra tanto a parte real quanto a imaginária dos sinais de impedância resultantes das métricas de tensão (obtidas de forma similar às métricas de danos) para um dos casos estudados.



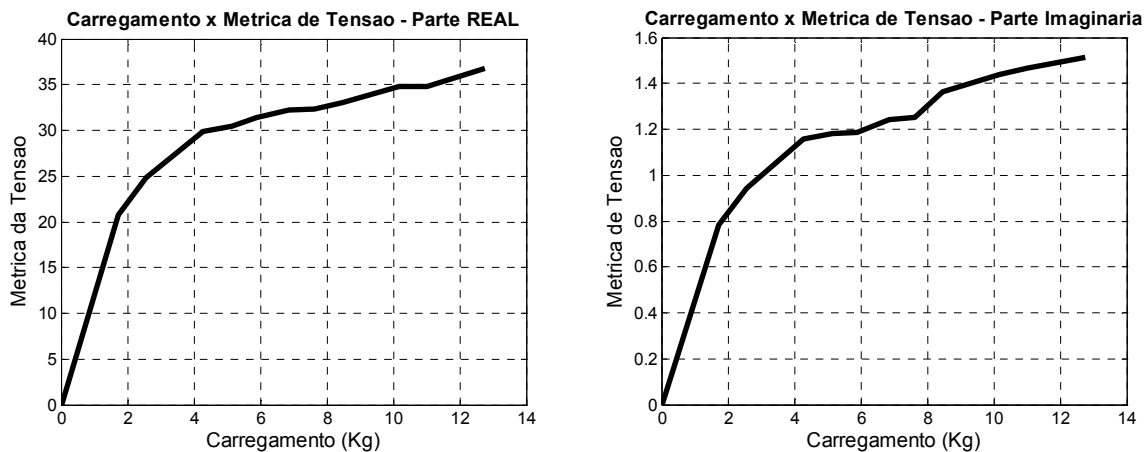
a) Parte real do sinal de impedância



b) Parte imaginária do sinal de impedância

Figura 8.13 - Resultados correspondentes a uma métrica de tensão típica.

Usando as métricas de tensão e os casos de carregamento convenientes, dois modelos de regressão foram construídos, como mostrado na Fig. 8.14.



a) Modelo de regressão – Parte Real

b) Modelo de regressão – Parte Imaginária

Figura 8.14 - Modelos de regressão para a métrica de tensão versus carregamento.

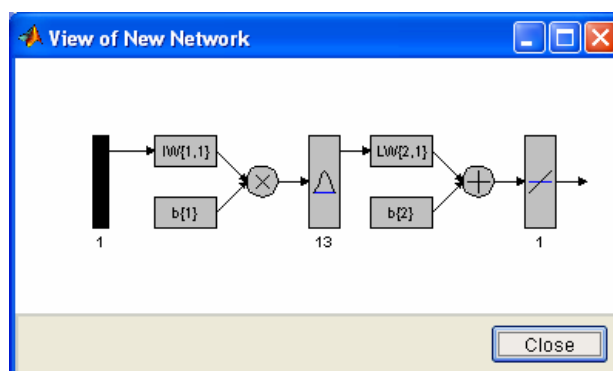


Figura 8.15 - Função de base radial para o modelo de tensão para a impedância

Baseado nos modelos de regressão apresentados acima, uma rede neural com função de base radial foi construída para identificar a condição de carregamento do sinal de impedância da estrutura (Fig. 8.15). Dois modelos foram construídos, sendo que o primeiro usa somente a parte real da assinatura; o segundo utiliza tanto as partes reais quanto as partes imaginárias dos sinais medidos para obter melhores resultados. O segundo modelo pode ser considerado para incluir mais informação, considerando o comportamento geral da estrutura em relação ao primeiro metamodelo, com apenas uma entrada.

8.2.3. Identificação de Mudanças Estruturais

Por fim, para a estrutura pilone da aeronave modelo F-15, cinco repetições de 84 experimentos foram implementadas, juntamente com os pontos extras (usados para propósitos

de validação e testes). As variáveis do metamodelo de modificação estrutural são as seguintes: métricas de dano equivalentes às pastilhas de PZT (4 PZTs foram colados na estrutura de uma forma simétrica, conforme indica a Fig. 8.16a).

As saídas dos metamodelos são as massas adicionadas (62g e 89g – a maior é mostrada na Fig. 8.16b) e a posição da massa adicionada (10 posições na proximidade do furo central, Fig. 8.16c).



a) Posições dos PZTs

b) Massa adicionada

c) Posição de falha

Figura 8.16 - Procedimento de detecção de falhas no pilone do F-15.

Usando os resultados dos experimentos de identificação de mudanças estruturais, uma rede neural foi construída para determinar o tipo de falha que ocorreu. A rede neural usa os sinais disponibilizados pelas pastilhas de PZT coladas na estrutura. A Fig. 8.17 ilustra uma métrica de danos típica, correspondente a um dos cinco testes desenvolvidos.

Como pode ser observado na Fig. 8.17, alguns dados não são consistentes. Entretanto, usando técnicas de estatística, os dados podem ser tratados tomando-se em conta as repetições restantes, levando a um modelo representativo da estrutura modificada.

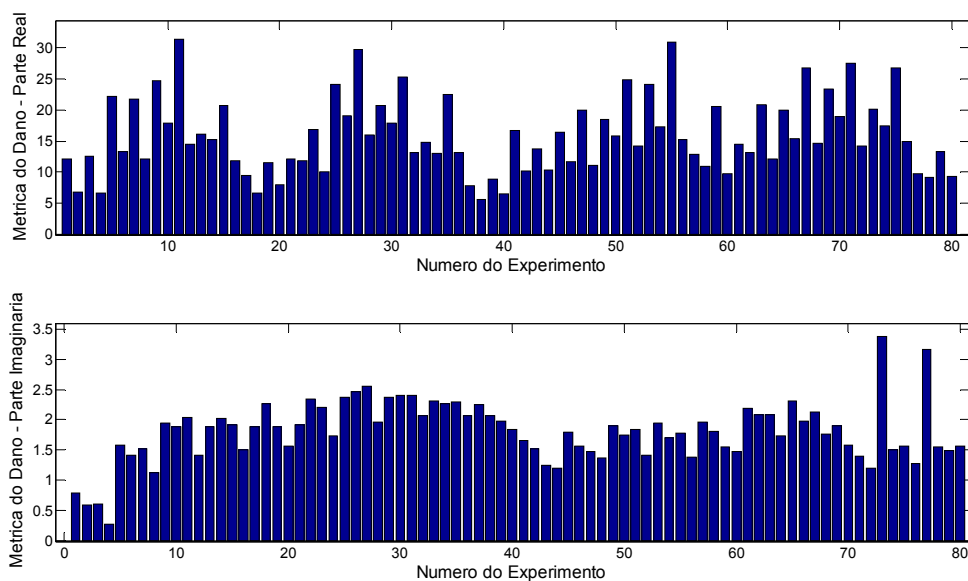


Figura 8.17 - Métrica de danos das partes reais e imaginárias.

8.2.4. Conclusões dos Experimentos com o Pílole do F-15

Com esta seção espera-se apresentar uma aplicação direta da técnica de SHM para estruturas reais, tanto para detecção de danos como para análise de tensão. Estudos futuros, envolvendo simulações numéricas, podem colaborar com estudos sobre a análise de tensões de estruturas. Entretanto, condições de contorno são muito difíceis de serem adequadamente representadas para o processo de validação.

O projeto de parâmetros de Taguchi é uma importante ferramenta para obter condições robustas de monitoramento. Esta abordagem considera as próprias variáveis, bem como as variáveis de ruído envolvidas. Como observado, uma vibração livre obtida com o teste de martelo de impacto não é adequada para obter mudanças significativas nos sinais de impedância. Isto significa que a influência localizada da excitação da pastilha de PZT é predominante. Conforme já observado, as condições de contorno não influenciam significativamente os sinais obtidos.

É importante também apontar que a metodologia desenvolvida pode ser usada para estudar esforços aerodinâmicos em condições de laboratório.

Por fim, duas redes neurais (a primeira, de bases radiais e, a segunda, probabilística) foram muito efetivas na obtenção de modelos de impedância representativos tanto para a análise de tensão como para a localização de falhas.

8.3 Análise de Agrupamentos para Lâminas de Helicópteros

Foram analisados para esta seção duas estruturas de lâminas de helicópteros, sendo uma delas de aplicação civil e, outra, de uma aeronave de transporte militar.

As duas estruturas podem ser consideradas completamente diferentes, já que para a estrutura civil a análise é realizada na estrutura como um todo; já para aquela de uso militar apenas parte dela, próxima da região de acoplamento ao rotor, é utilizada.

Além disto, as dimensões e materiais distintos fazem com que cada estrutura apresente características mecânicas também distintas (Figs. 8-18 e 8-19).



a) Pá civil bi-apoiada



b) Vista da ponta da pá

Figura 8.18 - Estrutura de pá de helicóptero civil.



a) Vista frontal



b) Vista da outra face

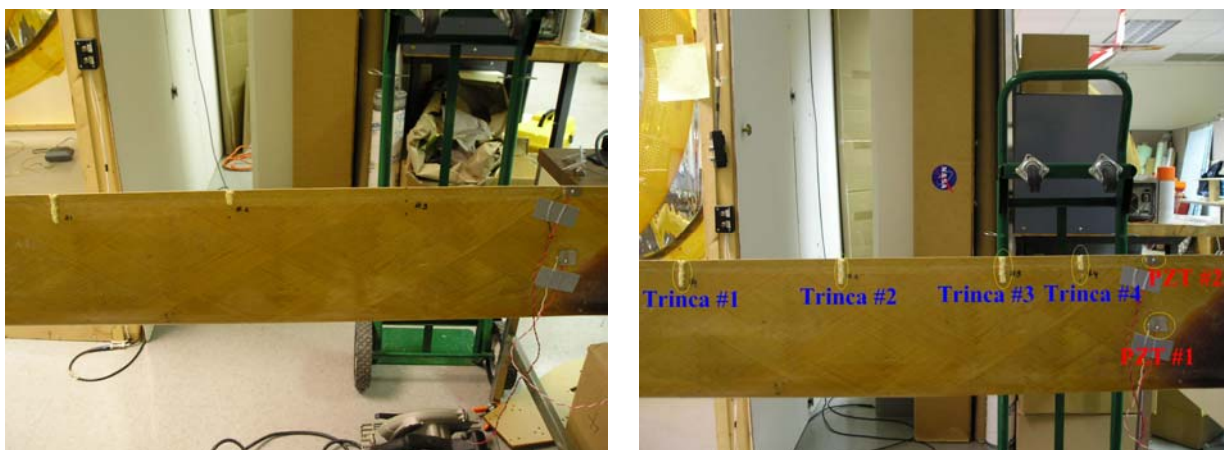


c) Vista lateral

Figura 8.19 - Estrutura de pá de helicóptero militar de transporte.

Para a primeira estrutura são avaliados dois metamodelos, buscando dotar o sistema SHM de capacidade de representação de dois tipos de falhas distintas, a saber: trincas e furos.

Assim, quatro trincas foram geradas na região da borda de fuga da pá sendo que as respectivas profundidades foram aumentadas de 1,5 cm para 3,0 cm, resultando três configurações distintas (sem falhas, com profundidade de 1,5 cm e, finalmente, com profundidade de 3,0 cm) -Fig. 8.20.

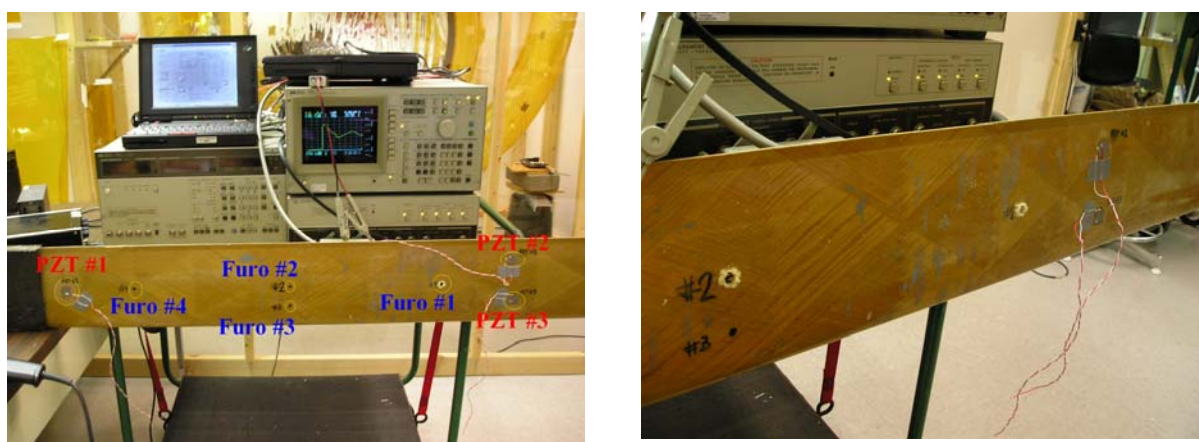


a) Falha 2-1 (posição 2 e profundidade 1)

b) Falha 4-1 (posição 4 e profundidade 1)

Figura 8.20 - Falhas associadas a trincas na pá de aplicação civil.

Para a avaliação dos furos, quatro furos foram realizados em duas profundidades (até a metade da estrutura e furo passante), conforme apresenta a Fig. 8.21.



a) Definição dos furos

b) Falha 2 – 1 (posição 2 e profundidade 1)

Figura 8.21 - Falhas associadas a furos na pá de aplicação civil.

A tabela referente aos experimentos de ambas as estruturas, devido à grande quantidade de informações que contém, foram colocadas no Anexo AII. As Tabs. AII.1 e AII.2 são referentes respectivamente às análises de trincas e furos para a pá do helicóptero civil. Já as Tabs. AII.3 e AII.4 são referentes, respectivamente, às análises de trincas e furos para a pá do helicóptero de transporte militar.

Inicialmente, foi avaliada a possibilidade de se representar, através de um metamodelo, a adição de trincas na pá civil. Observando a Tab. AII.1 pode-se perceber que foram consideradas três regiões de frequência para este fim (25-31kHz, 32-44kHz e 45,5-58kHz). Poucos resultados foram obtidos para a pastilha PZT 2 devido ao fato desta aparentemente ter

vido danificada durante o processo de colagem. Este fato ficou evidenciado ao serem coletados os pontos apresentados na tabela. Os sinais de impedância (parte real) deste experimento demonstram esta hipótese, já que o comportamento aparece bastante ruidoso, de elevada amplitude e bastante acentuado à vista das pequenas falhas introduzidas (Fig. 8.22), aspectos estes considerados fora do comportamento esperado.

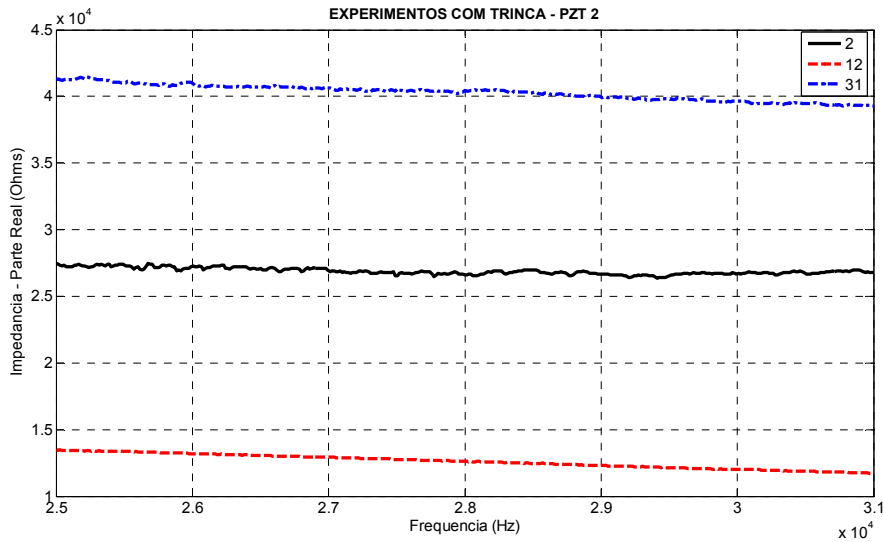


Figura 8.22 - Sinal da parte real da impedância para o PZT 2 para trincas.

Com isto, a pastilha PZT 2 foi descartada durante o processo de análise e avaliação de falhas.

A segunda etapa se dedica à avaliação da capacidade de variação do sinal para as modificações de posicionamento da estrutura enquanto eram realizados os experimentos. Para isto adotaram-se três posicionamentos:

- Estrutura na horizontal, tal como é montada no helicóptero (Fig. 8.18a);
- A estrutura na vertical (Fig. 8.21a);
- Novamente a estrutura na horizontal, como no primeiro caso.

Para esta verificação são apresentados os sinais associados a estas três condições na Fig. 8.23, considerando a primeira faixa de frequência adotada (25-31kHz).

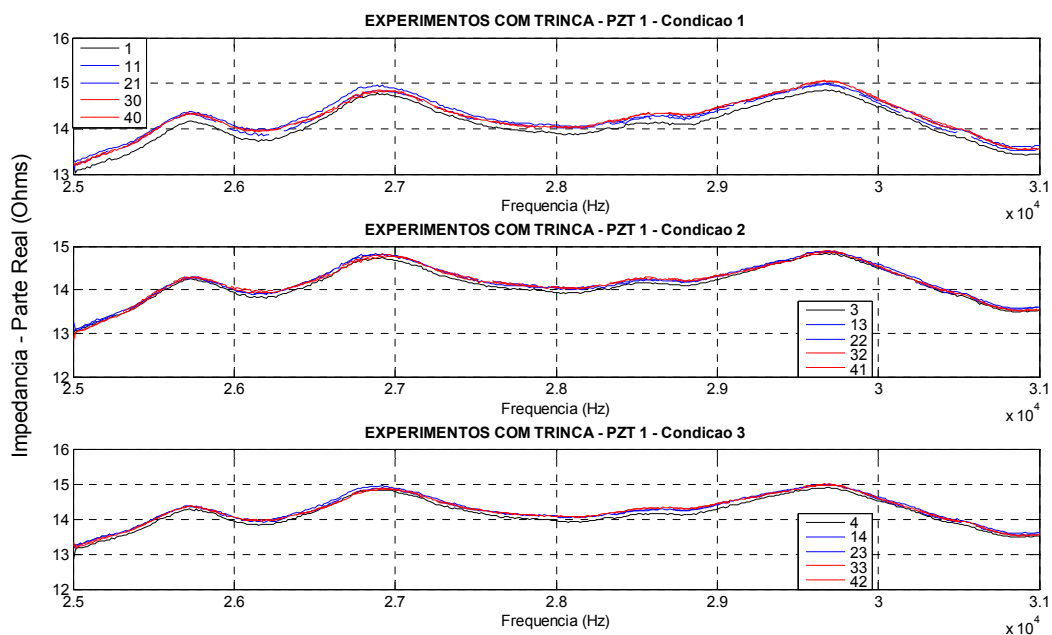


Figura 8.23 - Primeira faixa de frequência para as três condições – Trincas.

Conforme pode ser visto na Fig. 8.23, os sinais, embora medidos sob condições diferentes da estrutura, não se alteram significativamente. O mesmo pode ser evidenciado pelas métricas de dano levantadas para cada caso, como mostra a Fig. 8.24.

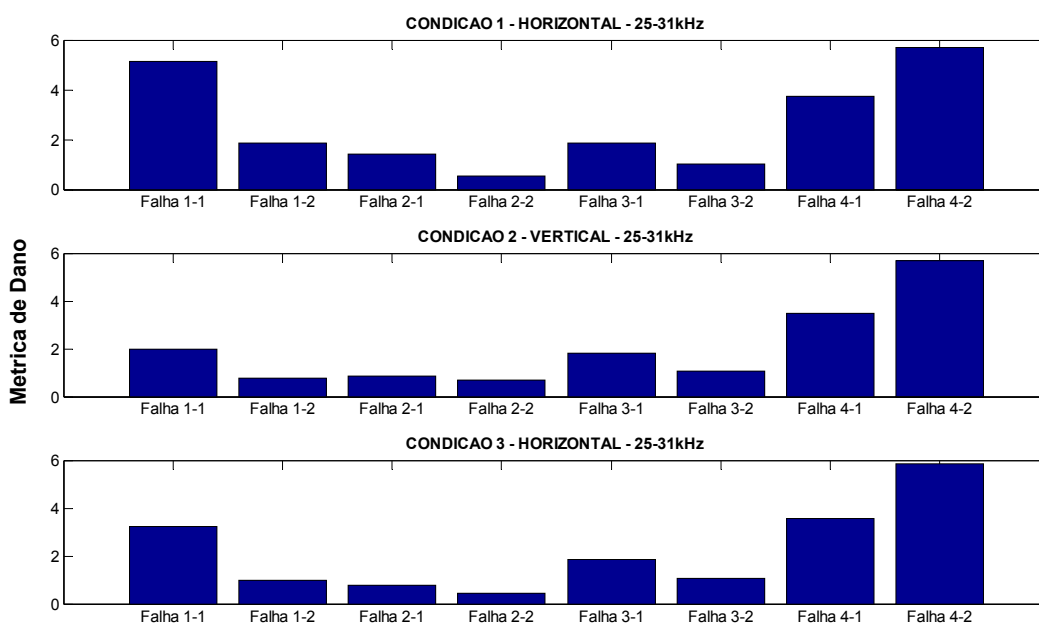


Figura 8.24 - Métricas de dano para a primeira faixa de frequência para as três condições – Trincas.

É importante ressaltar neste ponto que para todos os ensaios com ambas as pás consideradas a métrica de dano utiliza sempre como referência o sinal imediatamente anterior, pois, como se trata de ensaios destrutivos, as métricas de dano devem ser comparadas com as configurações de falhas imediatamente anteriores. Caso este procedimento não fosse adotado, haveria um acúmulo das modificações nos sinais adquiridos, resultando numa métrica de falha que inclui o somatório de todos os ensaios realizados.

Para a segunda e terceira faixas de frequências foram omitidos os experimentos para a condição 3. Lembra-se que a configuração da estrutura não levou a grandes modificações no monitoramento. Entretanto, como apenas as condições 1 e 3 representam aproximadamente a condição de operação da pá, estes foram considerados.

A Fig. 8.25 apresenta os sinais para as condições 1 e 3 para a segunda faixa de monitoramento (32-44kHz).

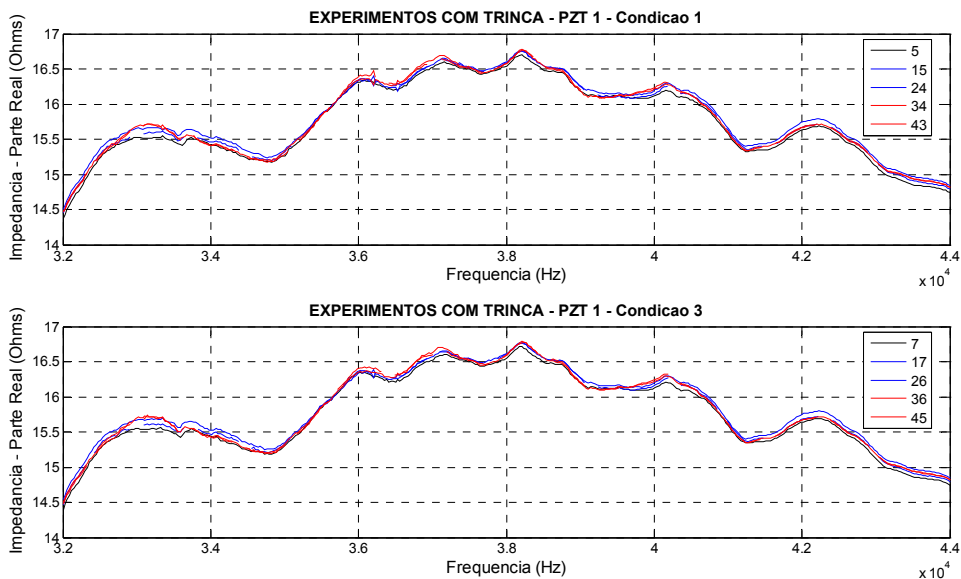


Figura 8.25 - Segunda faixa de frequência para as duas condições horizontais – Trincas.

A Fig. 8.26 apresenta as respectivas métricas de dano destes monitoramentos.

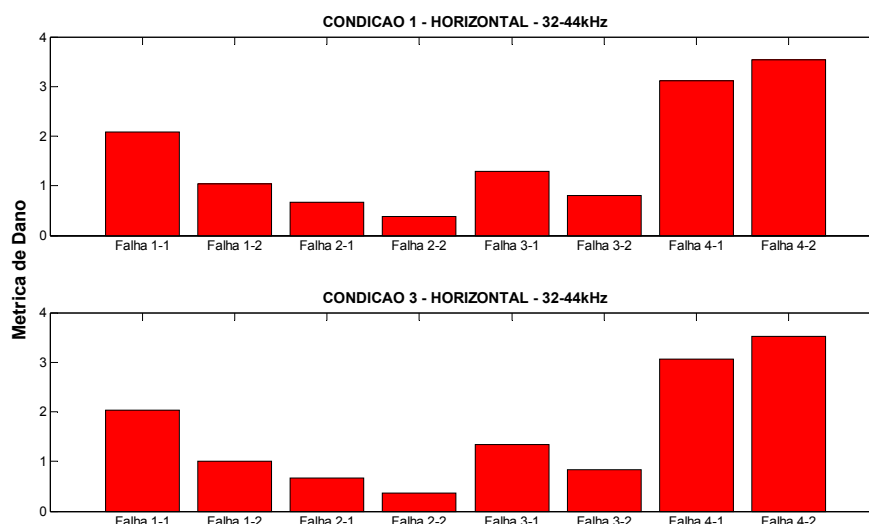


Figura 8.26 - Métricas de dano para a segunda faixa de frequência para as duas condições – Trincas.

Para a terceira banda de frequências foi mantida a tendência já observada para os casos anteriores, como ilustra a Fig. 8.27. Isso se observa também para suas respectivas métricas de dano (Fig. 8.28).

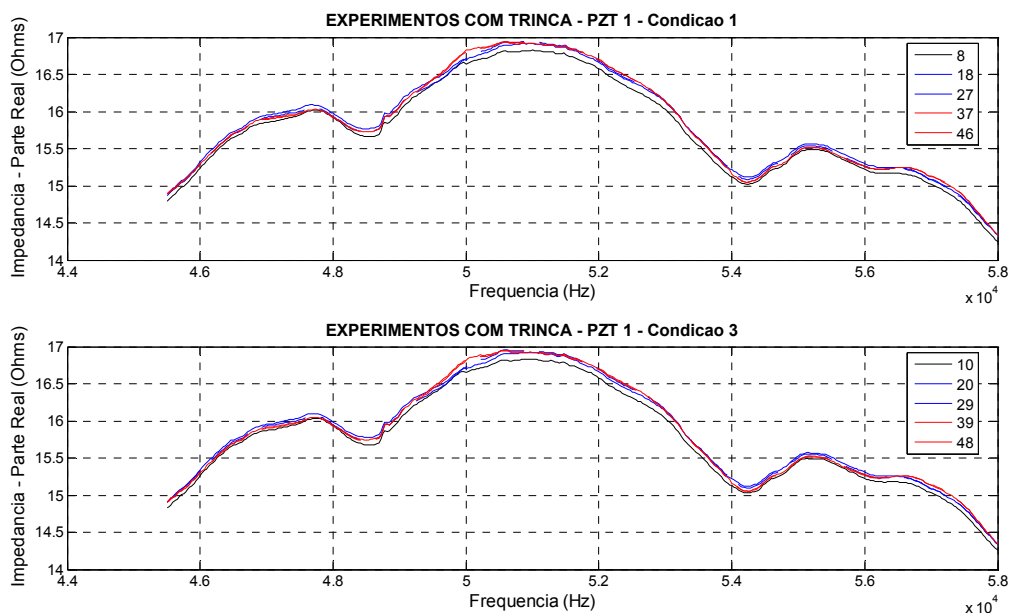


Figura 8.27 - Terceira faixa de frequência para as duas condições horizontais – Trincas.

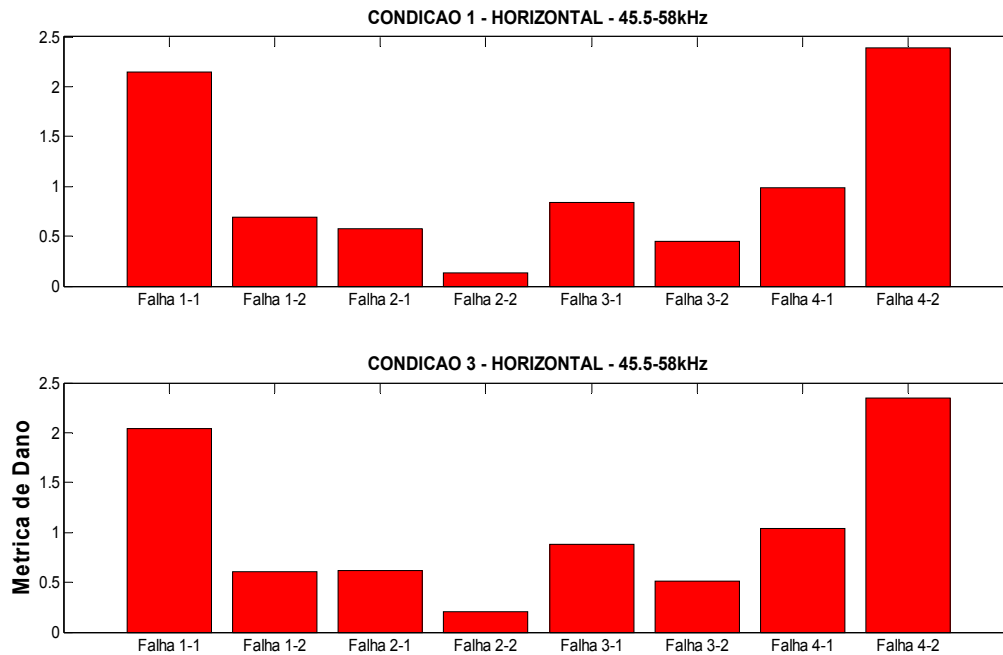


Figura 8.28 - Métricas de dano para a terceira faixa de freqüência para as duas condições – Trincas.

Após as análises dos sinais das duas condições horizontais de monitoramento para as três bandas de freqüência analisadas foi utilizado um procedimento baseado em análise de agrupamentos, utilizando duas técnicas distintas: *Fuzzy C-Means* e *K-Means*.

Como os sinais da pastilha PZT 2 não podem ser utilizados, foi adotado um critério para distinguir os tipos de trincas usando dois parâmetros apenas, a saber, a métrica de dano para a primeira faixa (25-31kHz) e a métrica do dano para a segunda faixa (32-44 kHz). Estas duas análises de agrupamentos são apresentadas na Fig. 8.29.

Conforme pode ser observado na Fig. 8.29, os centróides obtidos por ambas as técnicas são capazes de distinguir os oito tipos de falhas com alguns erros.

As falhas 1-2 e 3-2 são confundidas facilmente, assim como um dos casos falha 1-1 se confunde com as falhas 4-1. Assim, optou-se por não criar metamodelos para identificação do tipo de falha através da técnica de análise de agrupamentos.

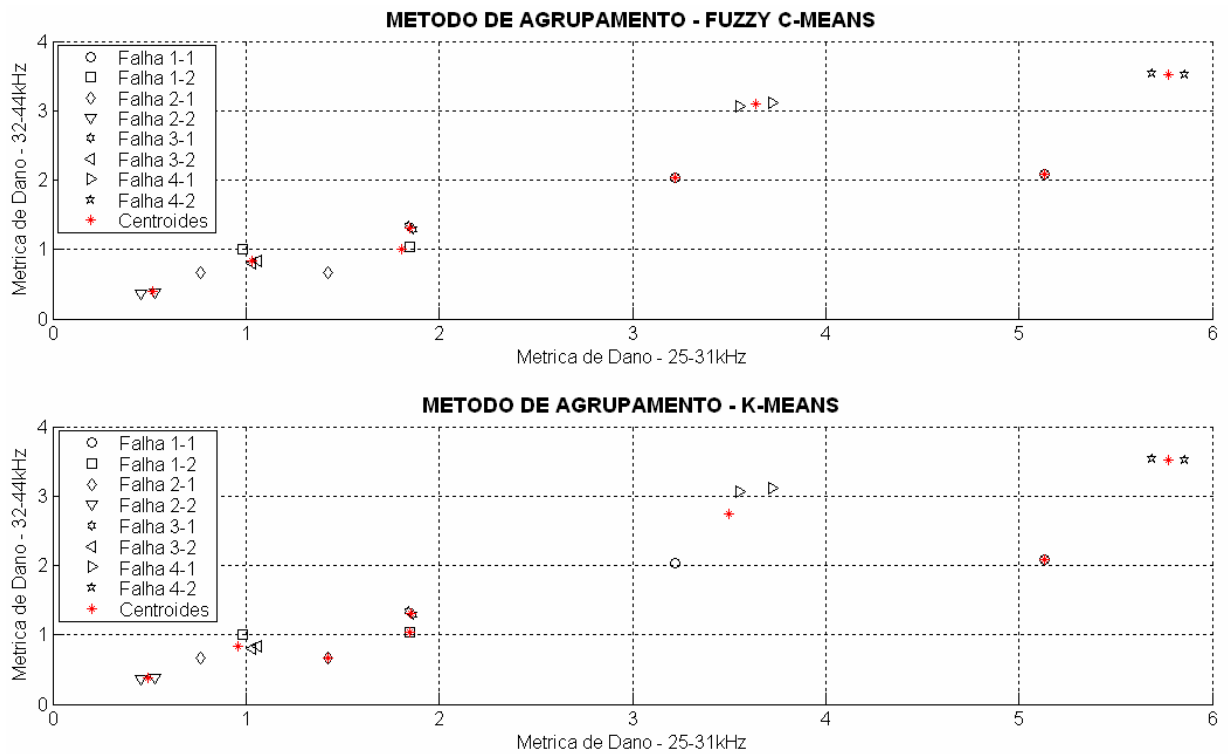


Figura 8.29 - Análise de agrupamentos para as trincas possíveis.

Como segunda alternativa, visto o cenário não linear dos casos de falhas em relação às suas métricas de dano, foi realizada uma metamodelagem baseada em redes neurais probabilísticas, numa tentativa de classificar o caso de falha quando são fornecidas as métricas de dano para duas bandas de frequência. Isto pode ser visto na Fig. 8.30.

Conforme pode ser observado na Fig. 8.30, o primeiro gráfico apresenta os casos de falhas e os respectivos rótulos reais. As três figuras seguintes apresentam os metamodelos baseados em rede neural probabilística com três configurações do parâmetro “dispersão”.

Com a dispersão=1,0 seria necessário um conjunto de pontos bem mais espaçados entre si. Por este motivo, os quatro erros que são observados pela identificação da rede tornam-se evidentes com a quantidade de falsos “Falha 31” (Falha 3-1 significa: na posição 3, profundidade 1). Por este motivo, foi construído um segundo modelo com uma dispersão=0,5. Com este modelo observa-se também a ocorrência de três pontos falsamente classificados.

Por fim, um último modelo foi construído, agora com parâmetro de dispersão=0,2, resultando finalmente um modelo mais confiável. Novamente, este fator tão baixo é justificado pela distinção não tão afastada dos pontos nas regiões das falhas 32 (3-2) e 21 (2-1).

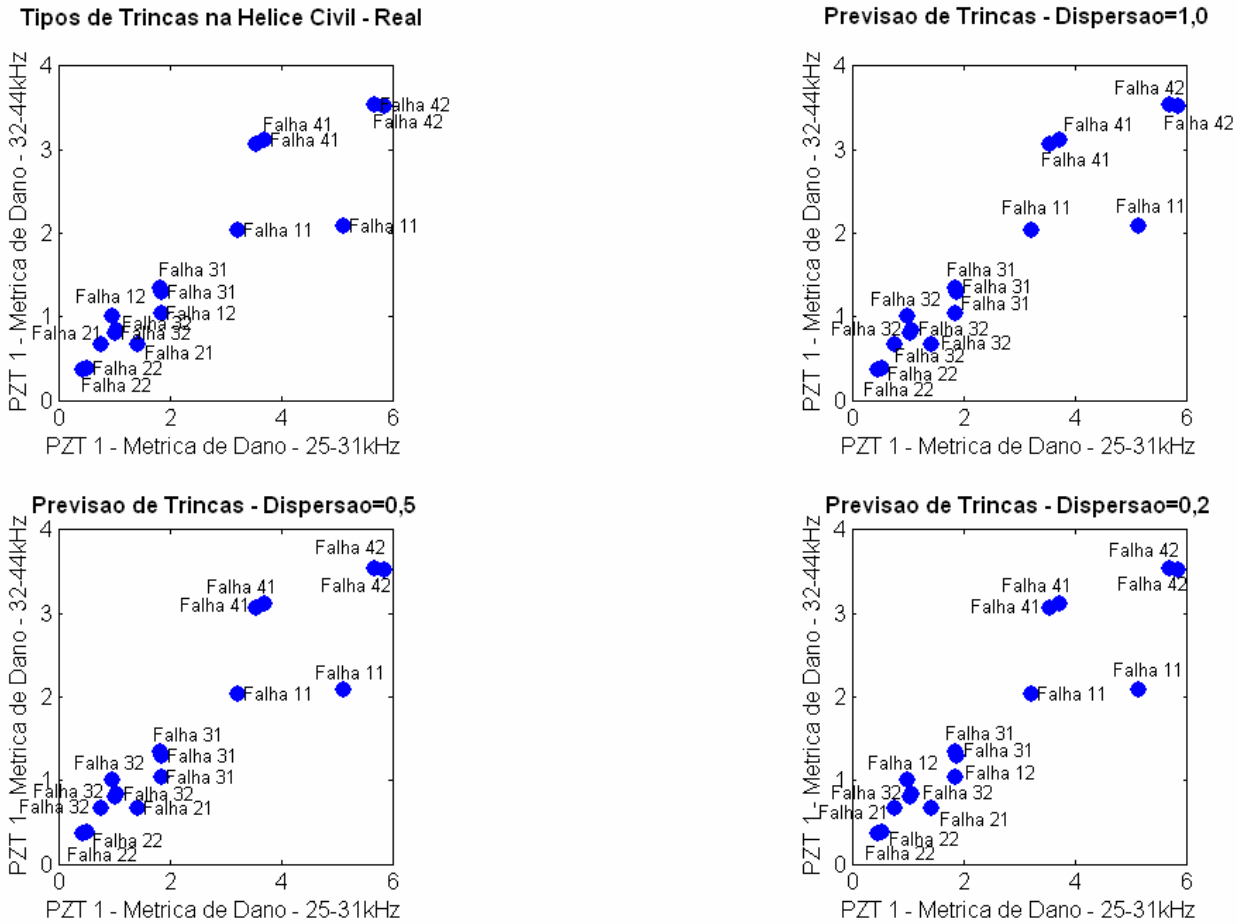


Figura 8.30 - Metamodelos baseados em redes neurais probabilísticas para a pá de aplicação civil – trincas.

A próxima etapa neste processo de identificação de falhas da estrutura da pá de aplicação civil foi a realização dos metamodelos de falhas para as condições contendo falhas caracterizadas por furos.

As Figs. 8.31 e 8.32 apresentam, respectivamente, os sinais da parte real da impedância e as métricas de dano para as três condições de monitoramento para a pastilha PZT 1 na primeira faixa de frequências de monitoramento.

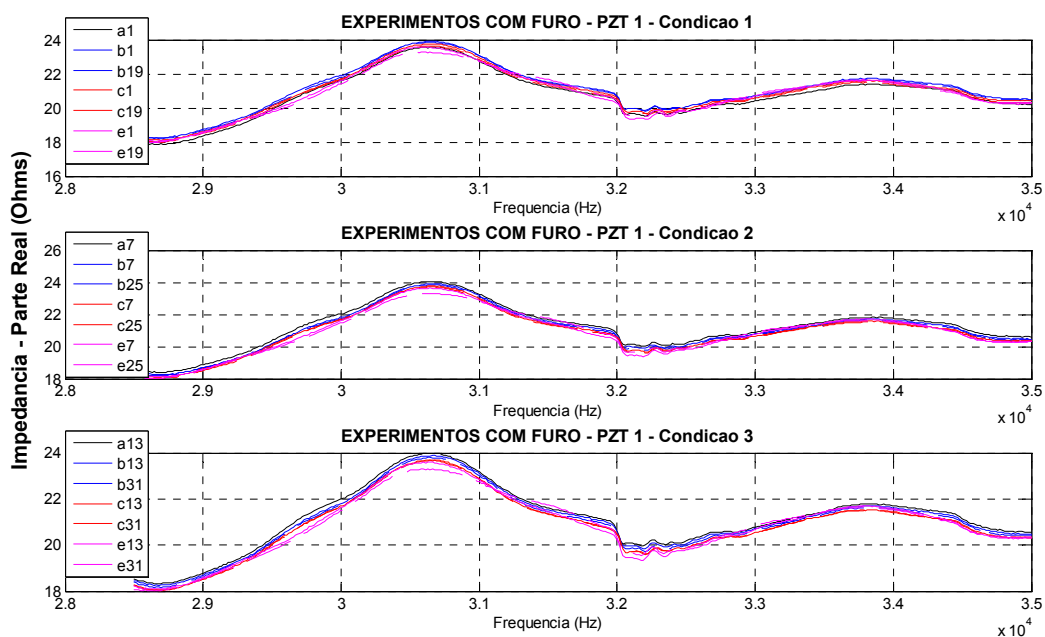


Figura 8.31 - Primeira faixa de frequência para as três condições – Furos.

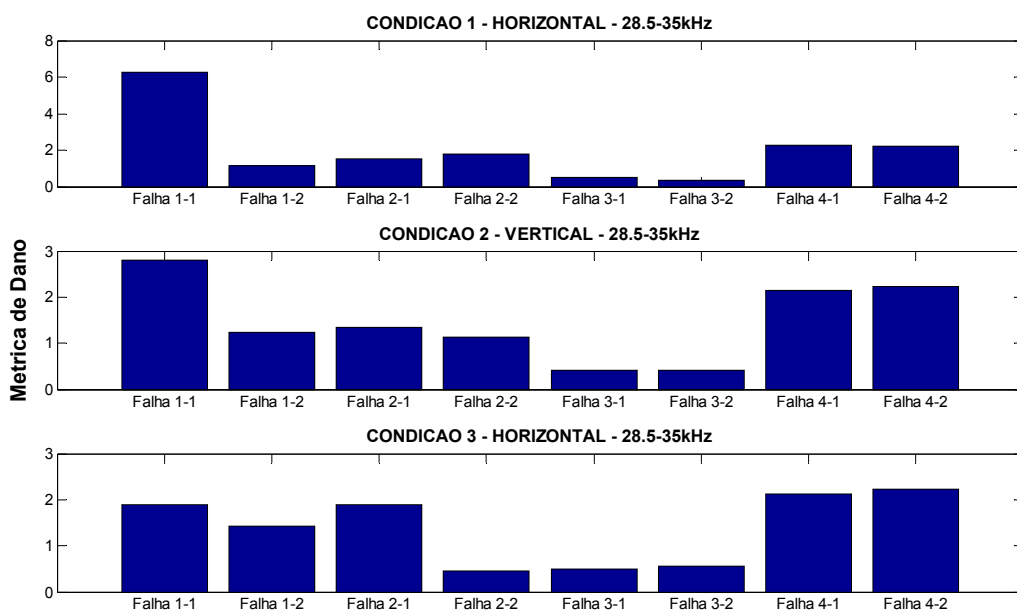


Figura 8.32 - Métricas de dano para a primeira faixa de frequência para as três condições – Furos.

As Figs. 8.33 e 8.34 apresentam, respectivamente, os sinais e as métricas de danos para a pastilha PZT 1 para as três condições de monitoramento para a segunda faixa de frequência (36-46kHz).

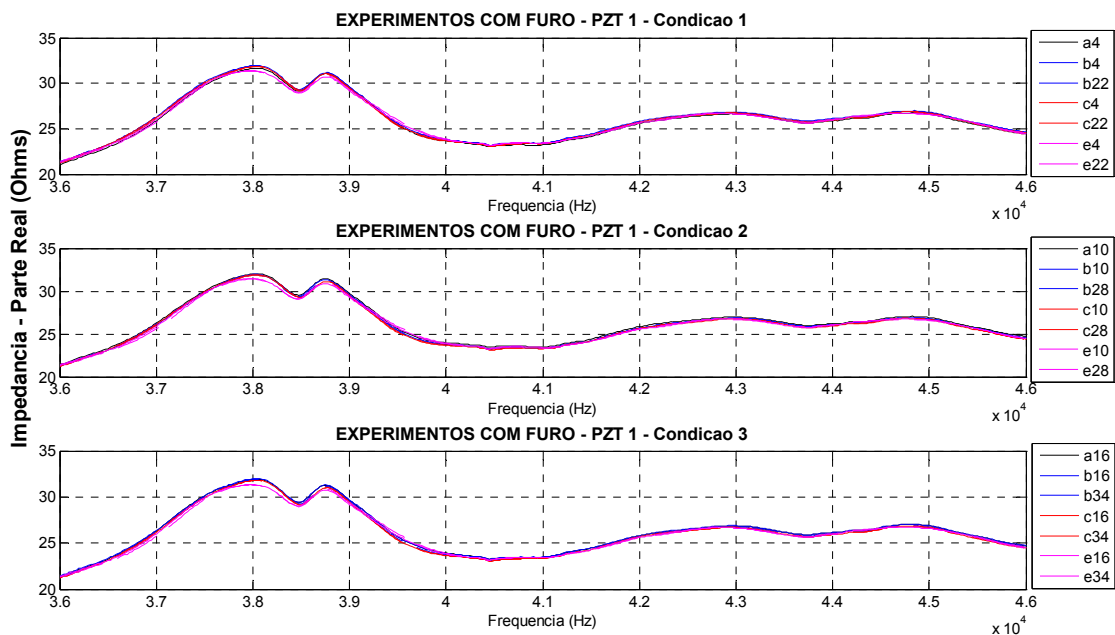


Figura 8.33 - Segunda faixa de frequência para as três condições – Furos.

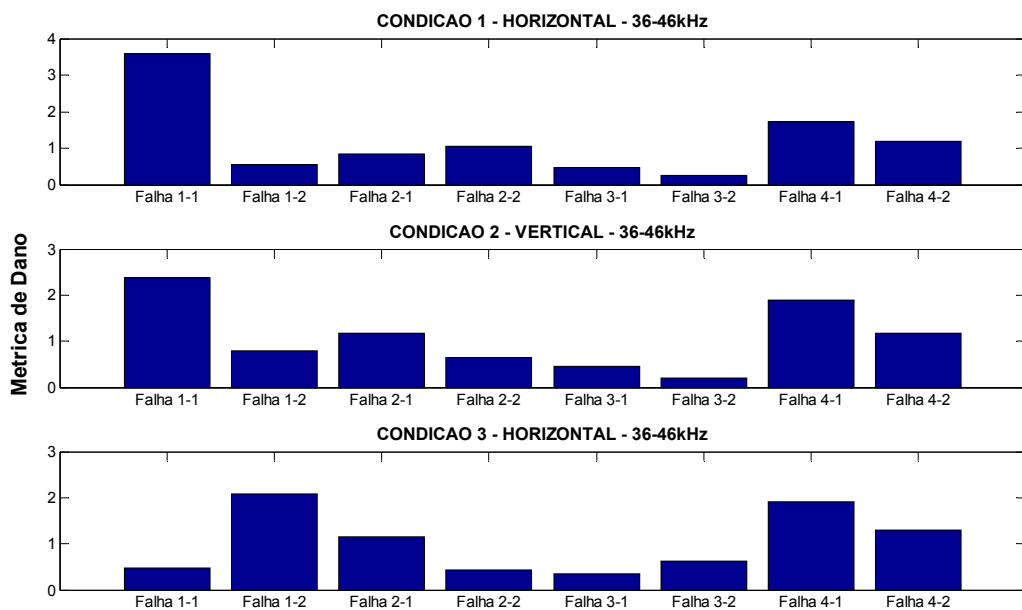


Figura 8.34 - Métricas de dano para a segunda faixa de frequência para as três condições – Furos.

Da mesma forma que o realizado para a pastilha PZT 1, foram efetuados os cálculos das métricas de danos para a pastilha PZT 2 para ambas as faixas de frequências. Isto é ilustrado pelas Figs. 8.35 e 8.36.

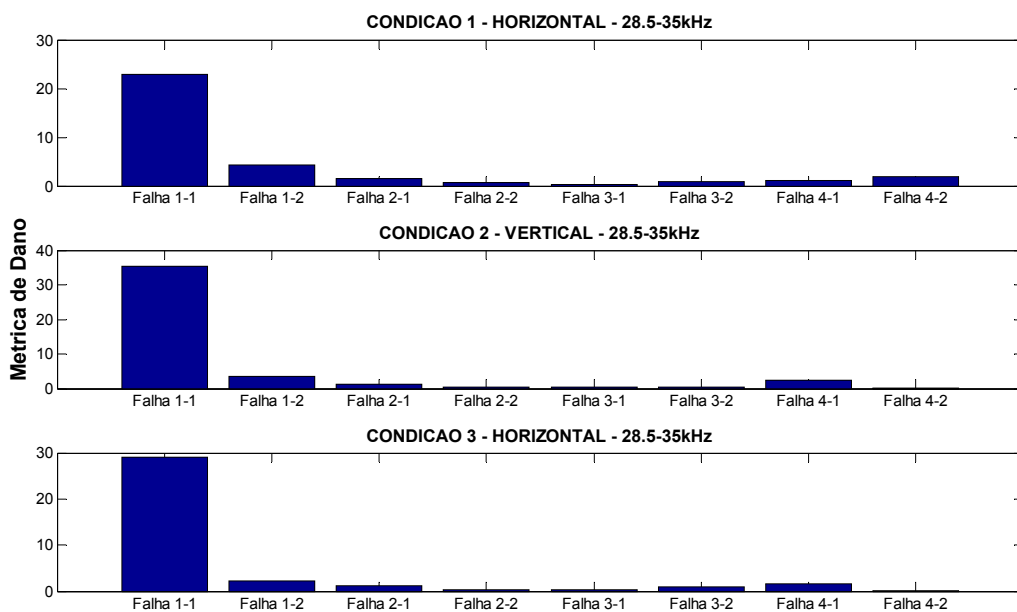


Figura 8.35 - Métricas de dano para a primeira faixa de frequência para as três condições – Furos.

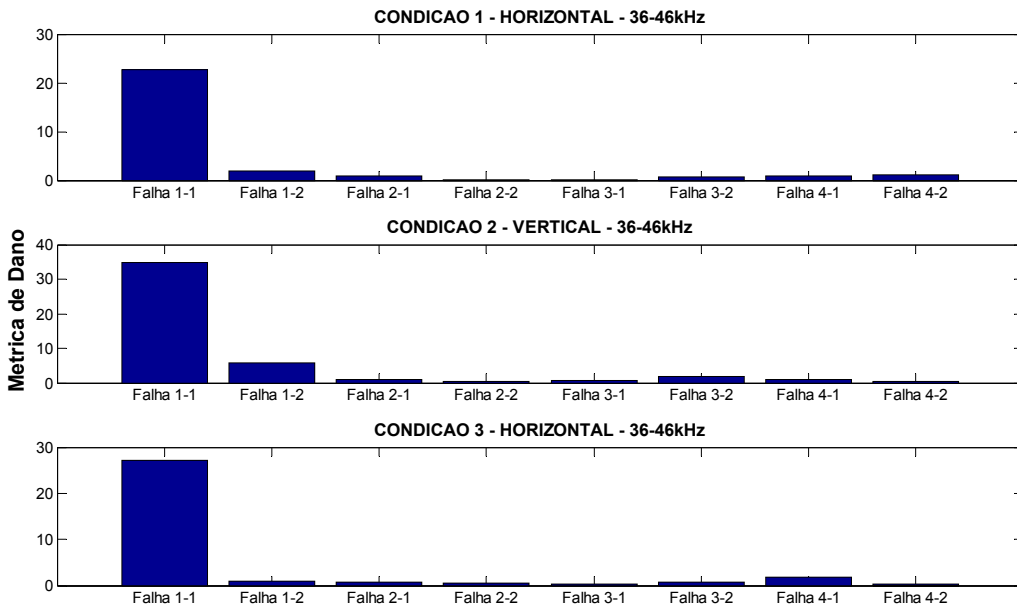


Figura 8.36 - Métricas de dano para a segunda faixa de frequência para as três condições – Furos.

As Figs. 8.37 e 8.38 apresentam as métricas de dano para as duas faixas de frequência para a pastilha PZT 3.

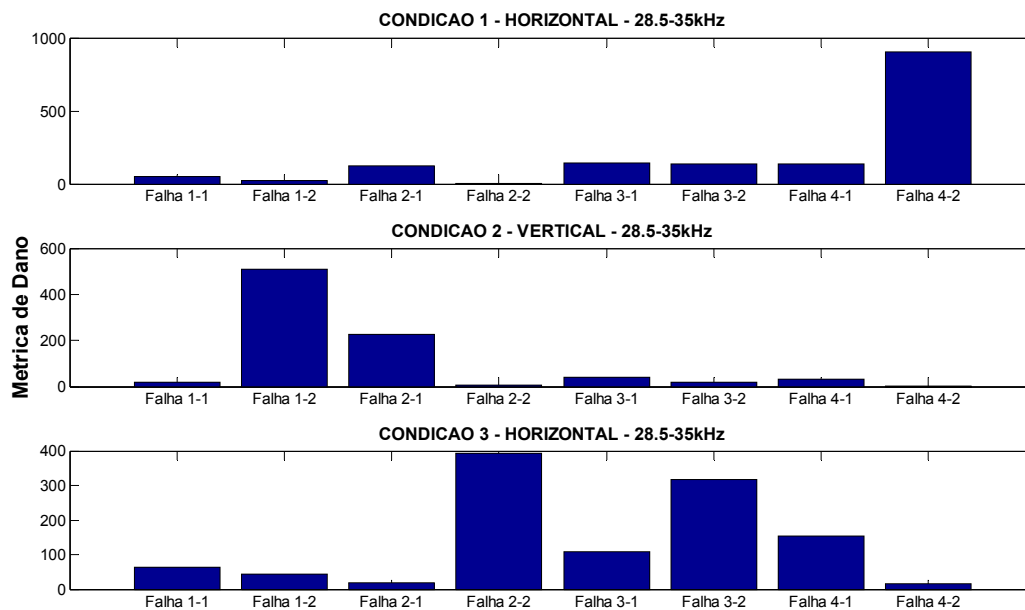


Figura 8.37 - Métricas de dano para a primeira faixa de frequência para as três condições – Furos.

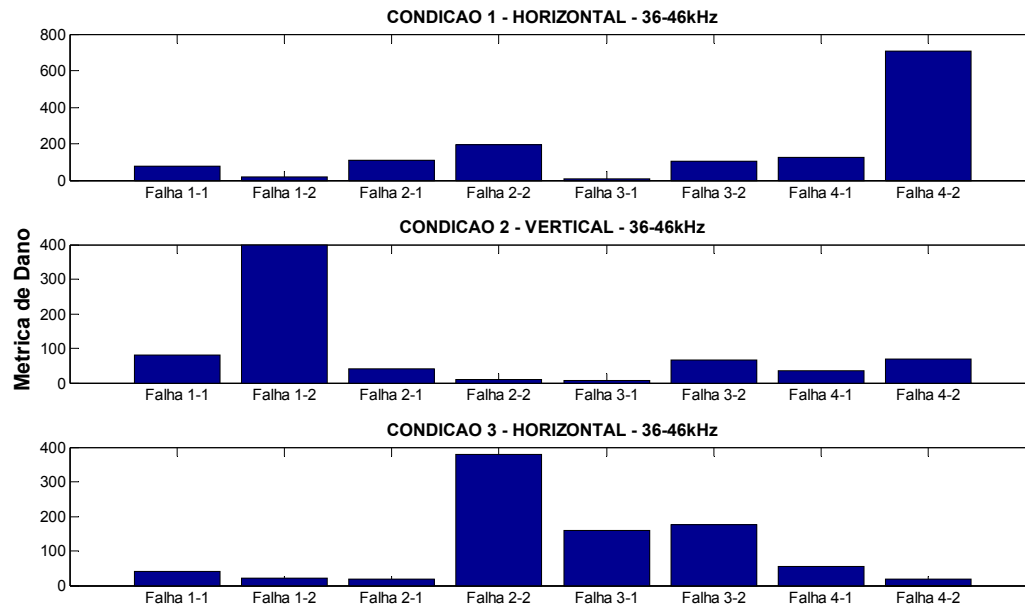


Figura 8.38 - Métricas de dano para a segunda faixa de frequência para as três condições – Furos.

Baseado nas métricas de danos para as três pastilhas de PZT e considerando as duas faixas de frequência foi construído um modelo de rede neural probabilística com quatro parâmetros de entrada, a saber: métricas de dano dos PZT 1, 2 e 3 e banda de frequência em

que são calculadas as métricas de dano. A Fig. 8.39 apresenta os pontos utilizados para a representação através da rede neural probabilística. O resultado apresentou 100% de acerto baseado nos pontos utilizados.

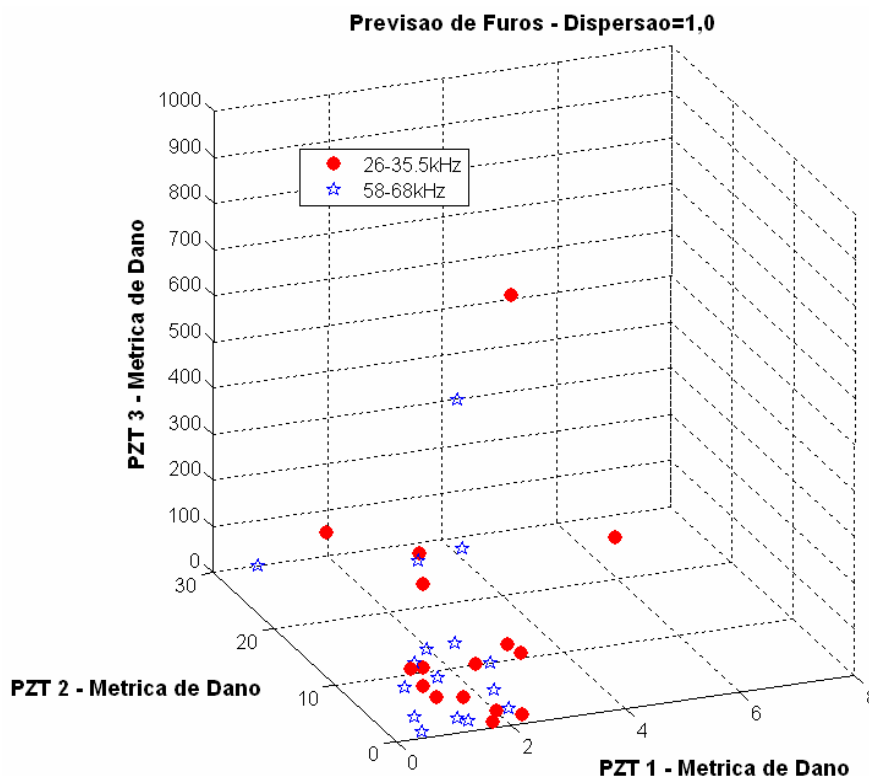


Figura 8.39 - Pontos utilizados para a construção da rede neural probabilística para previsão de falhas – furos.

Desta forma, fica demonstrada a forma de se representar dois tipos de falhas distintos em uma pá de helicóptero civil (trincas e furos). Para isto, foram construídos os metamodelos baseados em redes neurais probabilísticas.

Na próxima etapa, procedimentos semelhantes são adotados para a construção de dois metamodelos para a identificação de dois tipos de falhas em uma estrutura de pá de helicóptero de transporte militar. Entretanto, diferentemente do caso com a pá de aplicação civil, as pastilhas de PZT utilizadas para monitorar tanto os furos quanto as trincas são as mesmas. Além disto, a quantidade de pastilhas utilizadas, conforme se pode observar nas Tabs. AII.3 e AII.4 são sete, superiores portanto ao que foi utilizado para a pá de aplicação civil.

O motivo de se utilizar as mesmas pastilhas de PZT é que se pretende aqui criar um procedimento de distinção entre métricas de danos causadas por furos e por trincas através de um procedimento de análise de agrupamentos, tanto pela técnica de *Fuzzy C-Means* quanto por *K-Means*. Este procedimento pode ser mais bem compreendido ao se observar a Fig. 8.40.

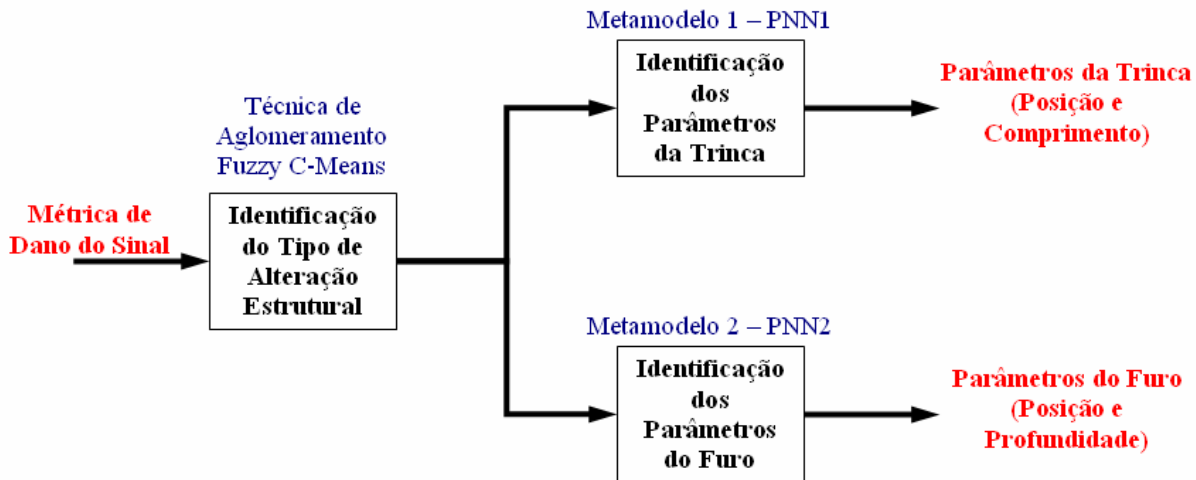


Figura 8.40 - Processo de triagem e caracterização de falhas para a pá de helicóptero de transporte militar.

Conforme também pode ser observado pela Fig. 8.40, após o processo de triagem, identificando o tipo de falha que compromete a estrutura, a métrica de dano da falha processada é então fornecida ao metamodelo específico para sua precisa caracterização.

Isto acontece principalmente porque, em estruturas mais complexas, inúmeras possibilidades de falhas podem ocorrer, como, por exemplo, trincas, deformações localizadas, tensões residuais, furos, corrosões, delaminações. Em se tratando de um estudo de caso pioneiro, apenas dois tipos de falhas, furos e trincas, são considerados para análise neste trabalho. Para cada tipo de falha considerada, dois parâmetros distintos são observados, ou seja, assim como para a trinca o comprimento é um fator importante para sua determinação, para o furo este é substituído por sua profundidade. A posição da falha é importante para ambos os casos.

Foram consideradas apenas duas condições de posicionamento da estrutura (horizontal e vertical, com vibração livre), ao invés das três do caso anteriormente considerado para a pá de aplicação civil. O martelo utilizado excitar a estrutura durante o monitoramento da condição 2 está ilustrado na Fig. 8.41.



Figura 8.41 - Martelo de impacto para excitar a estrutura.

O aparato utilizado para a coleta dos sinais incluindo o analisador de impedância, o microcomputador portátil para aquisição dos dados e a estrutura são mostrados na Fig. 8.42.



Figura 8.42 - Aparato experimental para ensaios com a pá de aplicação militar.

A Fig. 8.43 apresenta as posições das sete pastilhas de PZT coladas na estrutura da pá de helicóptero de transporte militar.



a) Vista frontal da pá militar



b) Vista de trás da pá militar

Figura 8.43 - Posição das pastilhas PZT na estrutura da pá de aplicação militar.

As falhas introduzidas para este estudo de caso (assim como já feito para a pá civil), são consideradas como ensaios destrutivos, sendo então avaliadas as métricas de dano sempre em relação ao último sinal de falha obtido para se evitar o erro de acúmulo dos efeitos de várias falhas.

As falhas inseridas na pá são ilustradas pela Fig. 8.44 e podem ser comparadas com a Tab. All.3.



a) Vista frontal da pá

b) Vista de trás da pá

Figura 8.44 - Falhas inseridas na pá de helicóptero de transporte militar.

Para a metamodelagem foram utilizados os experimentos para as duas condições de contorno do sistema (condições 1 e 2) e apenas a primeira faixa de frequência para as pastilhas PZT 1, 2, 3, 4, 5 e 7. Conforme se vê na Fig. 8.43a, a pastilha PZT 6 é muito próxima da pastilha PZT 5, não auxiliando muito neste caso em que vários sensores/atuadores já são utilizados. Os sinais das partes reais das impedâncias nas condições 1 e 2 são apresentados para as pastilhas PZT 1, 5 e 4, apenas para fins de ilustração dos sinais (Figs. 8.45, 8.46 e 8.47).

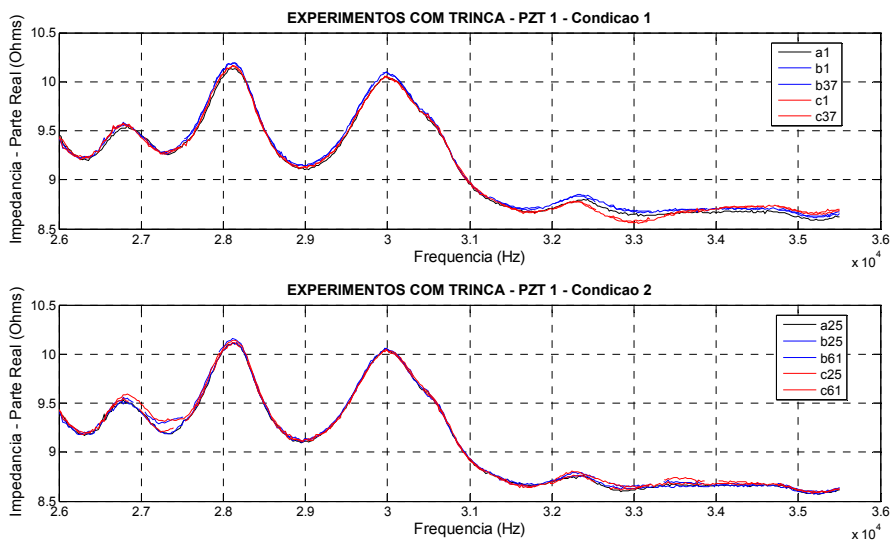


Figura 8.45 - Primeira faixa de frequência para as duas condições horizontais do PZT 1 – Trincas.

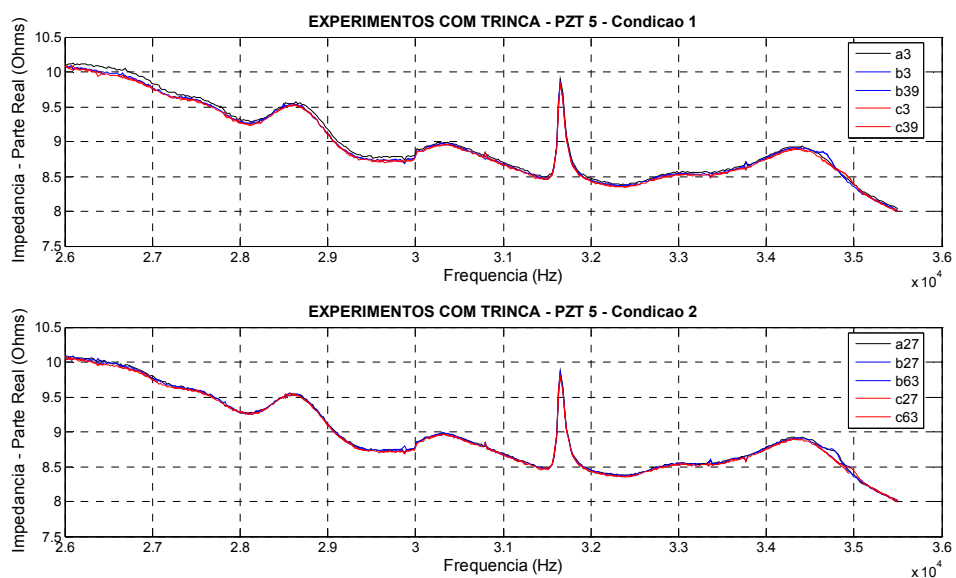


Figura 8.46 - Primeira faixa de frequência para as duas condições horizontais do PZT 5 – Trincas.

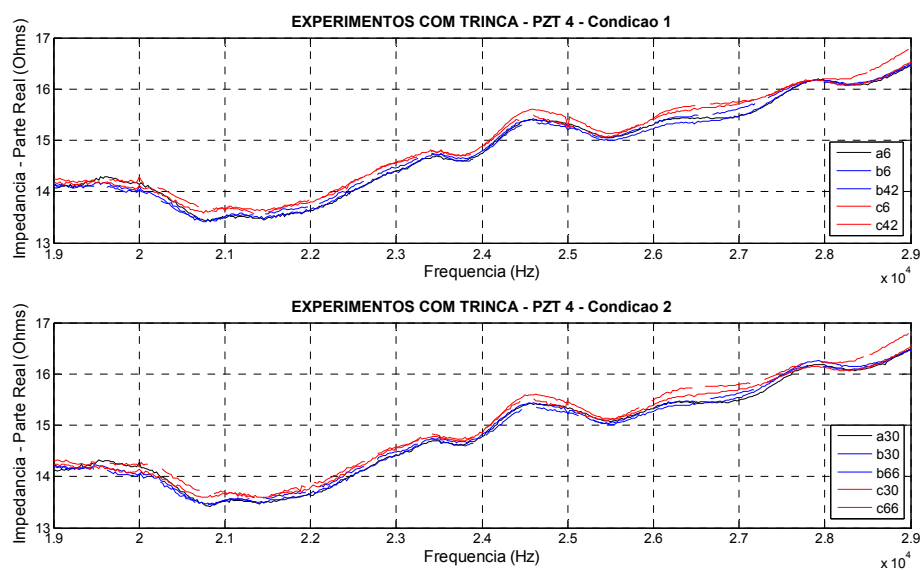


Figura 8.47 - Primeira faixa de frequência para as duas condições horizontais do PZT 4 – Trincas.

Desta forma, considerando as pastilhas PZT 1, 2, 3, 4, 5, e 7, para as duas condições e apenas a primeira faixa de frequência, foram calculadas as métricas de dano para cada condição, conforme ilustram as Figs. 8.48 e 8.49.

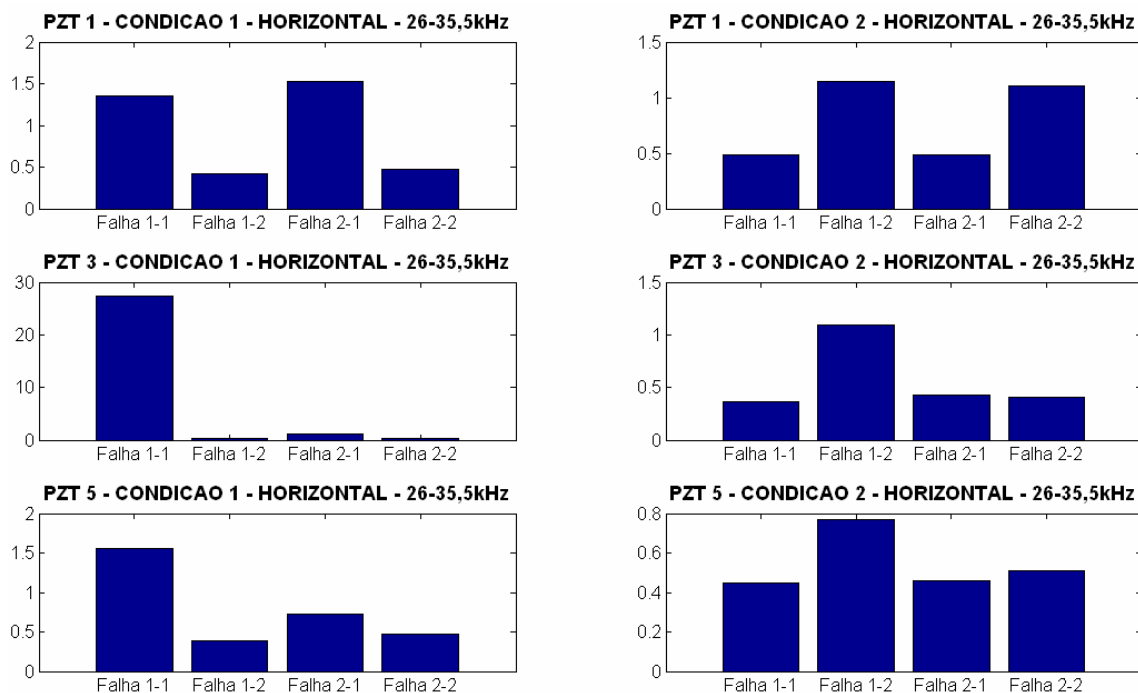


Figura 8.48 - Métricas de dano para primeira faixa de frequência para as duas condições – pastilhas de PZT 1, 3 e 5 – Trincas.

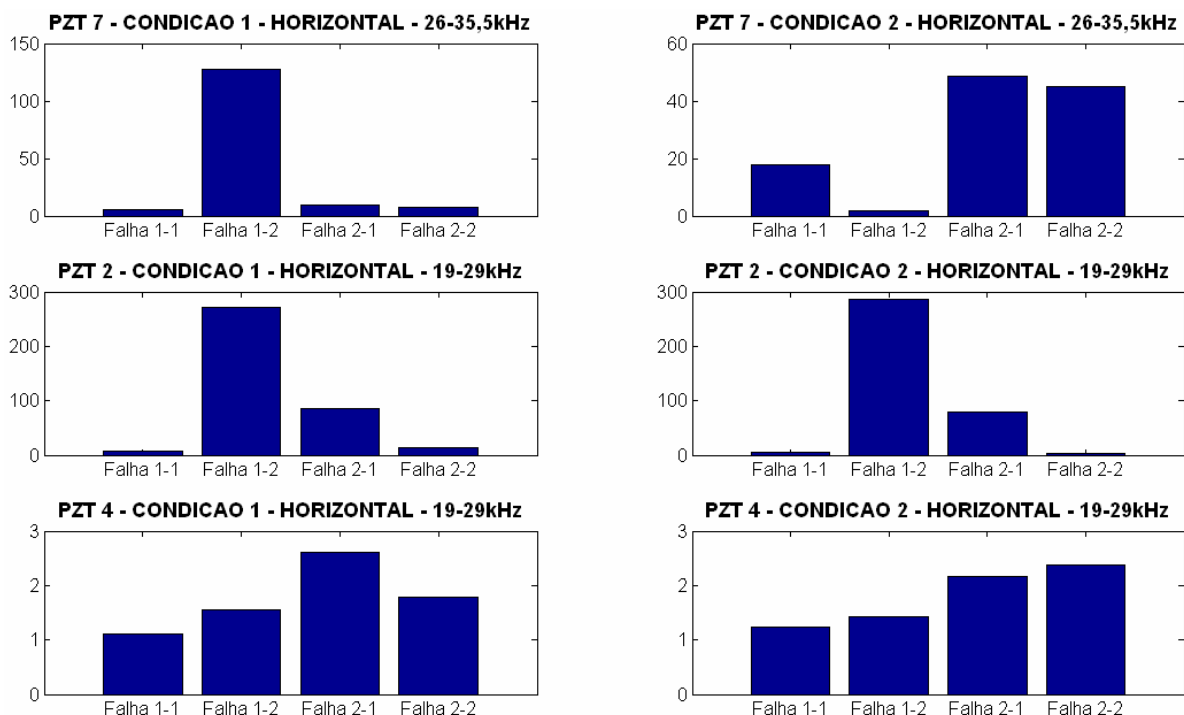
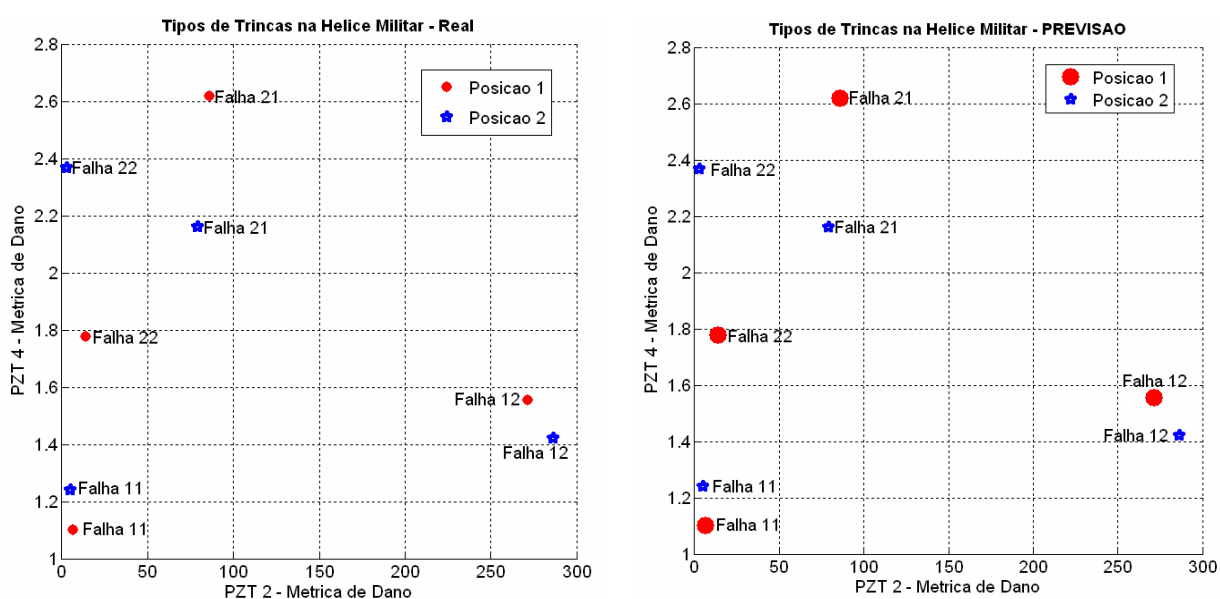


Figura 8.49 - Métricas de dano para primeira faixa de frequência para as duas condições – pastilhas de PZT 7, 2 e 4 – Trincas.

Semelhantemente ao que foi realizado para a análise de trincas da pá de aplicação civil, uma rede neural probabilística foi construída e validada, conforme mostra a Fig. 8.50. A Fig.

8.50a apresenta os valores reais e a Fig. 8.50b apresenta os valores previstos pela rede. Conforme se pode observar, a rede apresentou os valores corretos para todos os casos. Os parâmetros utilizados para a construção da rede foram as métricas de todos os sensores/atuadores considerados.

A Fig. 8.50 destaca apenas dois eixos, ou seja, somente dois parâmetros foram utilizados para construir a figura devido à dificuldade de visualização de gráficos com mais de três dimensões (no caso são seis). Os valores, conforme apresentados, se mostram bem dispersos e isolados, tornando possível o uso da rede com um parâmetro de dispersão=1,0.



a) Valores reais

b) Valores previstos

Figura 8.50 - Rede neural probabilística para a metamodelagem das trincas na pá militar.

O mesmo procedimento realizado para as trincas foi repetido para os furos na pá de helicóptero militar.

Assim, apenas a primeira faixa de frequência foi considerada para as duas condições de contorno, ou seja, para a estrutura apoiada na condição horizontal, com e sem vibração livre (condição 1 e 2, respectivamente).

As Figs. 8.51 a 8.53 apresentam os sinais da parte real da impedância para as pastilhas denominadas PZT 1, 5 e 4 para ambas as condições de monitoramento e apenas a primeira faixa de frequência.

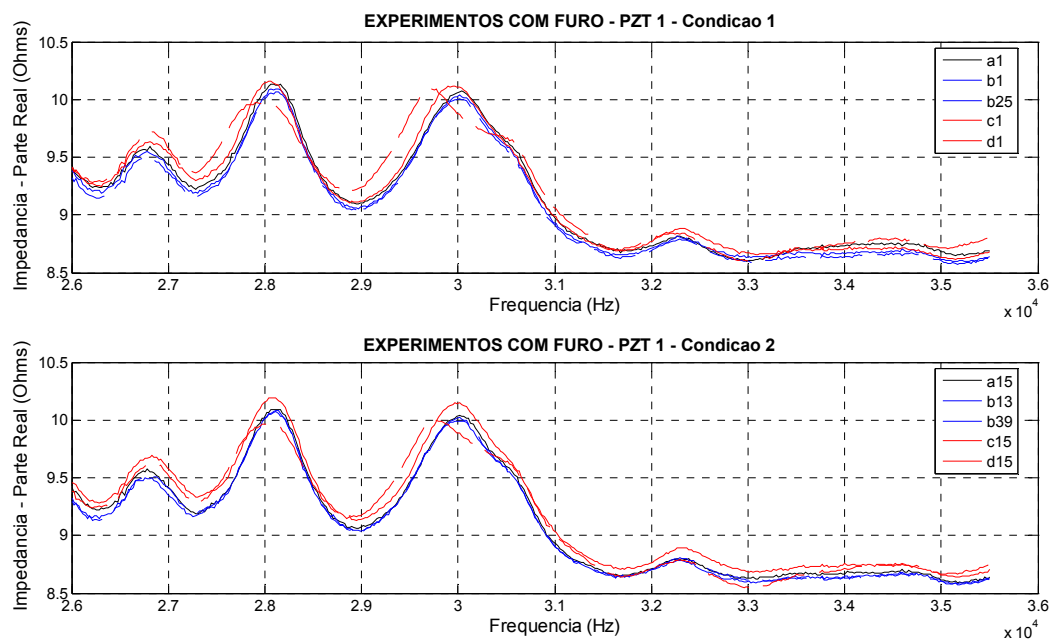


Figura 8.51 - Primeira faixa de frequência para as duas condições horizontais do PZT 1 – Furos.

A Fig. 8.51 evidencia as mudanças significativas do sinal de impedância para os casos “c15” e “d15” que representam, respectivamente, as falhas 2-1 e 3-1. Estas falhas, conforme era de se esperar, são bem mais acentuadas devido à sua proximidade da pastilha PZT 1.

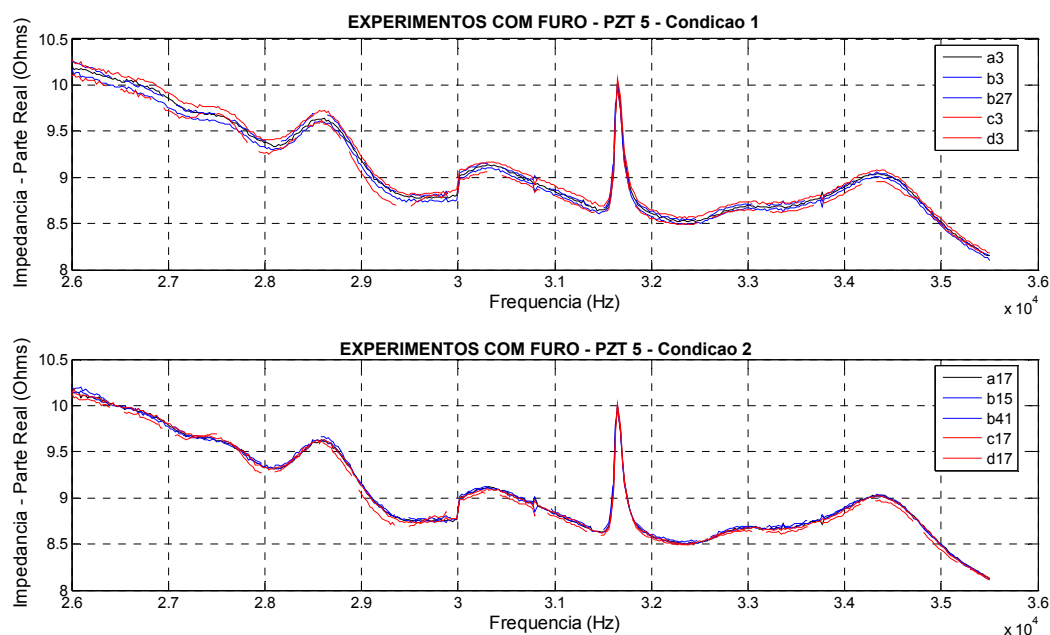


Figura 8.52 - Primeira faixa de frequência para as duas condições horizontais do PZT 5 – Furos.

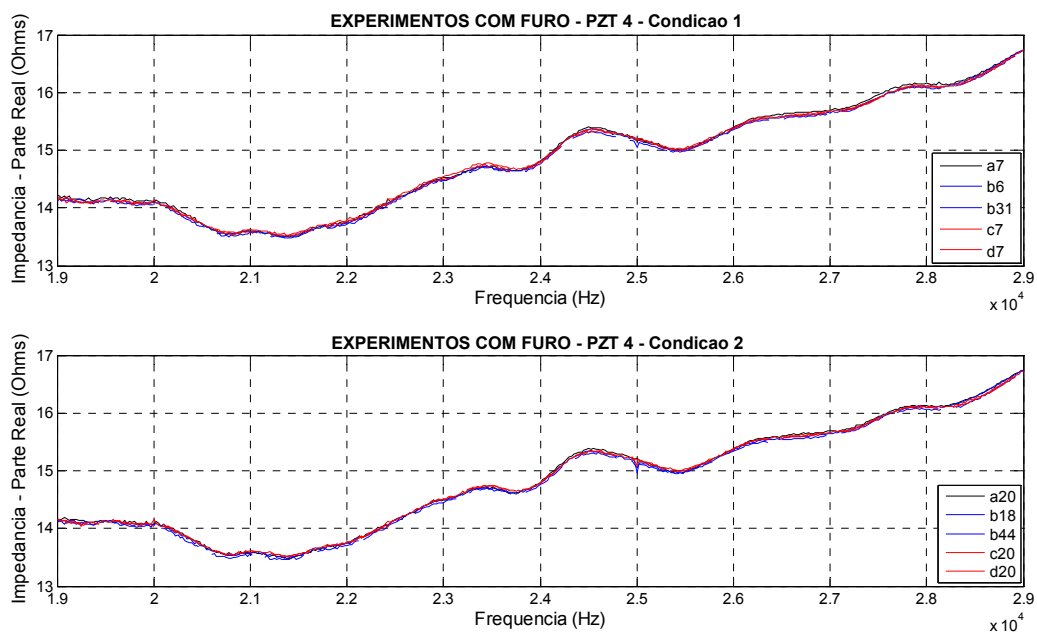


Figura 8.53 - Primeira faixa de frequência para as duas condições horizontais do PZT 4 – Furos.

Considerando todas as seis pastilhas de PZT, as duas condições de contorno e a primeira faixa de frequência, foram determinadas as métricas de danos para tais condições. Tais métricas de danos podem ser observadas nas Figs. 8.54 e 8.55.

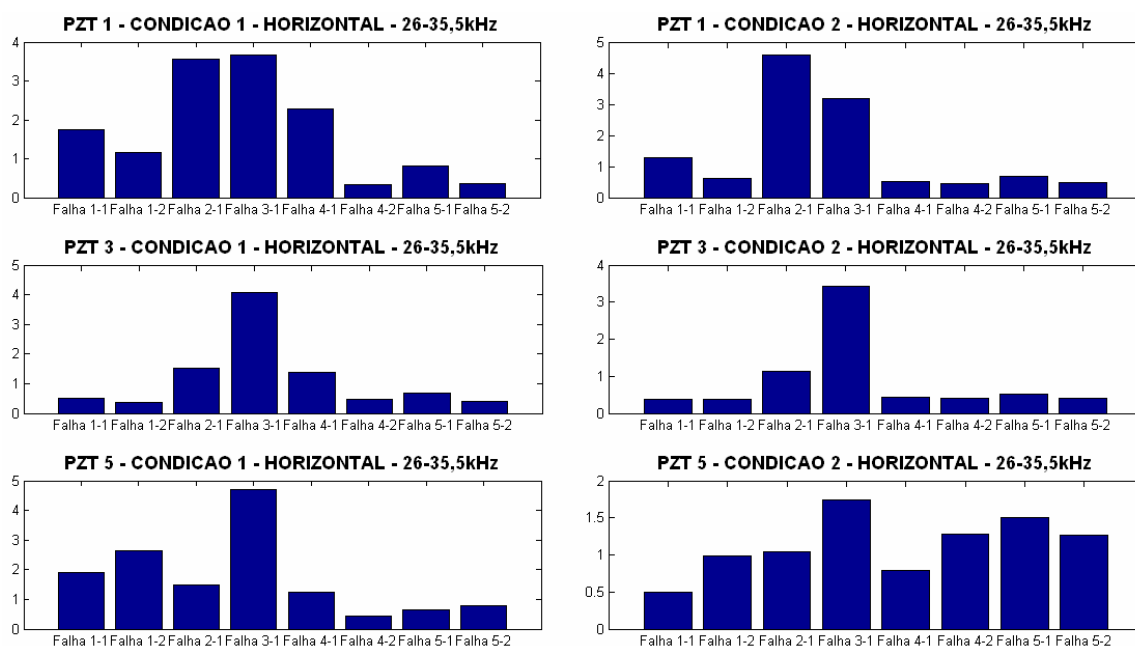


Figura 8.54 - Métricas de dano para primeira faixa de frequência para as duas condições – PZTs 1, 3 e 5 – Furos.

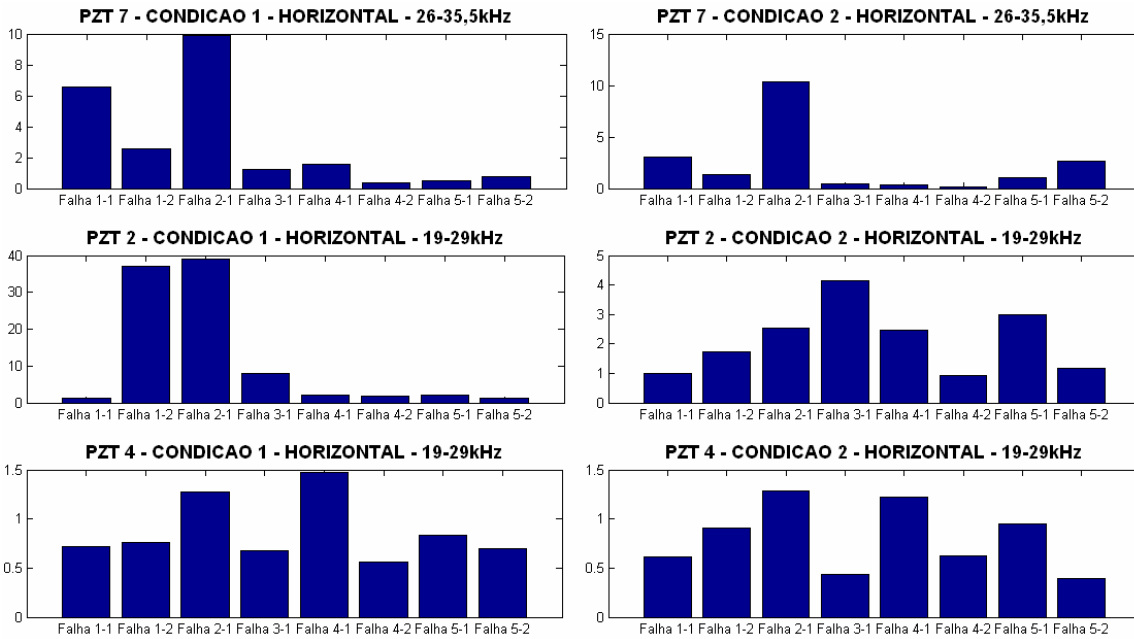


Figura 8.55 - Métricas de dano para primeira faixa de frequência para as duas condições – PZTs 7, 2 e 4 – Furos.

A partir destas métricas de danos, foi possível construir um metamodelo, também fundamentado em redes neurais probabilísticas, para a classificação do tipo de furo efetuado na pá.

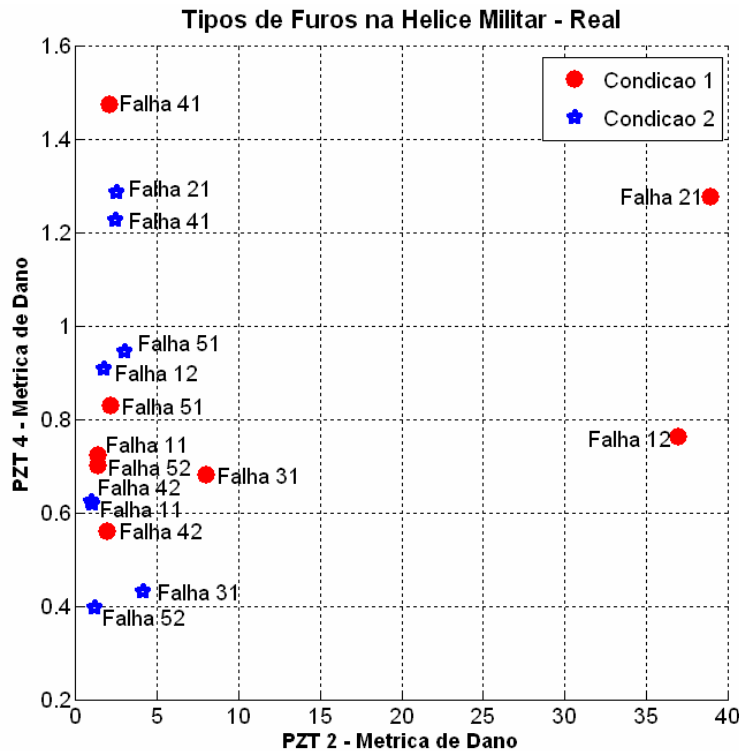


Figura 8.56 - Valores reais para treinamento da rede neural probabilística para a metamodelagem dos furos na pá militar.

Novamente, pela dificuldade visual de representar seis graus de liberdade (seis métricas de danos como parâmetros de entrada da rede), é apresentada a Fig. 8.56, que é um gráfico dos tipos de falhas em função de duas métricas de danos (das pastilhas PZT 2 e 4). Nela, também, são discriminados os ensaios obtidos através dos experimentos nas condições 1 e 2.

A Fig. 8.57 mostra duas redes neurais probabilísticas para a classificação do tipo de falhas por furos na pá de helicóptero militar. A Fig. 8.57a possui o parâmetro de dispersão = 1,0, enquanto na Fig. 8.57b utilizou-se o valor dispersão = 0,5.

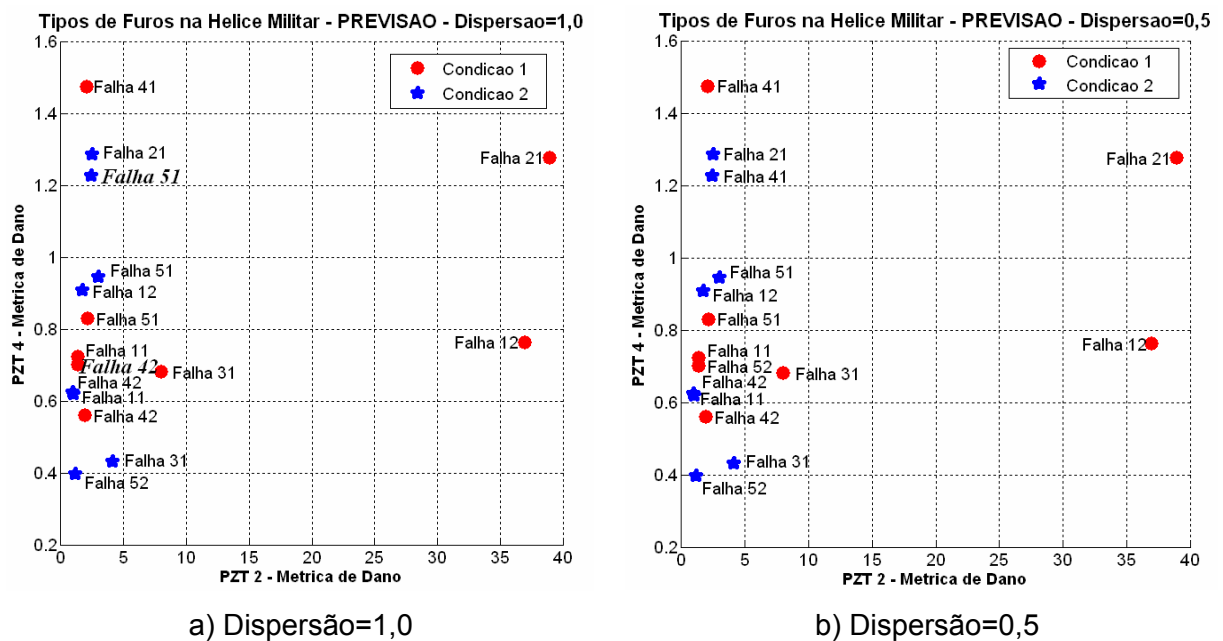


Figura 8.57 - Rede neural probabilística para a metamodelagem dos furos na pá militar.

Como pode ser observado na Fig. 8.57a e, se comparado com a Fig. 8.56, existem dois casos de falha classificados de forma errada. Isto se deve ao fato do parâmetro “dispersão” ser elevado, e, na região em que os casos errados foram processados, existe um grande aglomerado de tipos diferentes de falhas, contribuindo para a falsa classificação. Alterando-se o parâmetro de dispersão para 0,5 (Fig. 8.57b), a rede consegue distinguir perfeitamente os casos próximos, e assim, este novo metamodelo consegue realizar uma correta classificação para todos os tipos de furos.

Assim, após a elaboração dos dois metamodelos usando redes neurais probabilísticas para representar cada um dos dois tipos de falhas (trincas e furos), foi desenvolvida a metodologia apresentada na Fig. 8.40.

Inicialmente, com as seis métricas de danos dos dois tipos de falhas (trincas e furos), foi feita uma análise de aglomerados pela técnica de *Fuzzy C-Means*. Esta análise inicial é apresentada na Fig. 8.58.

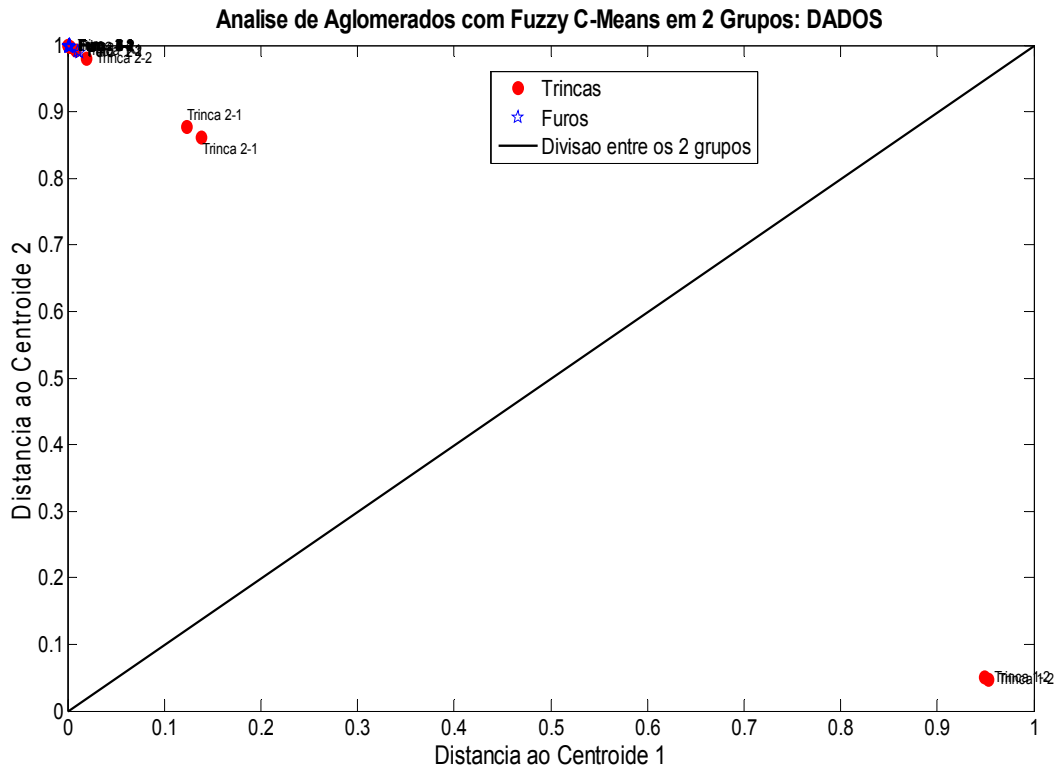


Figura 8.58 - Análise de aglomerados por *Fuzzy C-Means* dos dados das falhas por trincas e furos para a pá militar.

De acordo com esta análise, pode-se verificar a incapacidade inicial do modelo de distinguir adequadamente as métricas de danos para as seis pastilhas de PZT, separando trincas e furos. Em uma primeira análise seria impossível realizar com sucesso o trabalho de monitoramento de falhas com base nos dados apresentados.

Entretanto, após fazer uma simples mudança de escala nos dados (seis métricas de danos dos PZTs) através da aplicação do logaritmo natural sobre cada métrica, técnica permite fazer uma avaliação com uma melhor chance de acerto. Foram identificados dois casos de forma errada para o modelo *Fuzzy C-Means* com o “log(dados)” conforme apresenta a Fig. 8.59. Isto equivale a um acerto de 91,6% dos casos, resultado considerado bastante satisfatório.

Os dois eixos dos gráficos são os centróides obtidos pelas análises de aglomerados correspondendo aos centros dos grupos denominados “furos” e “trincas”.

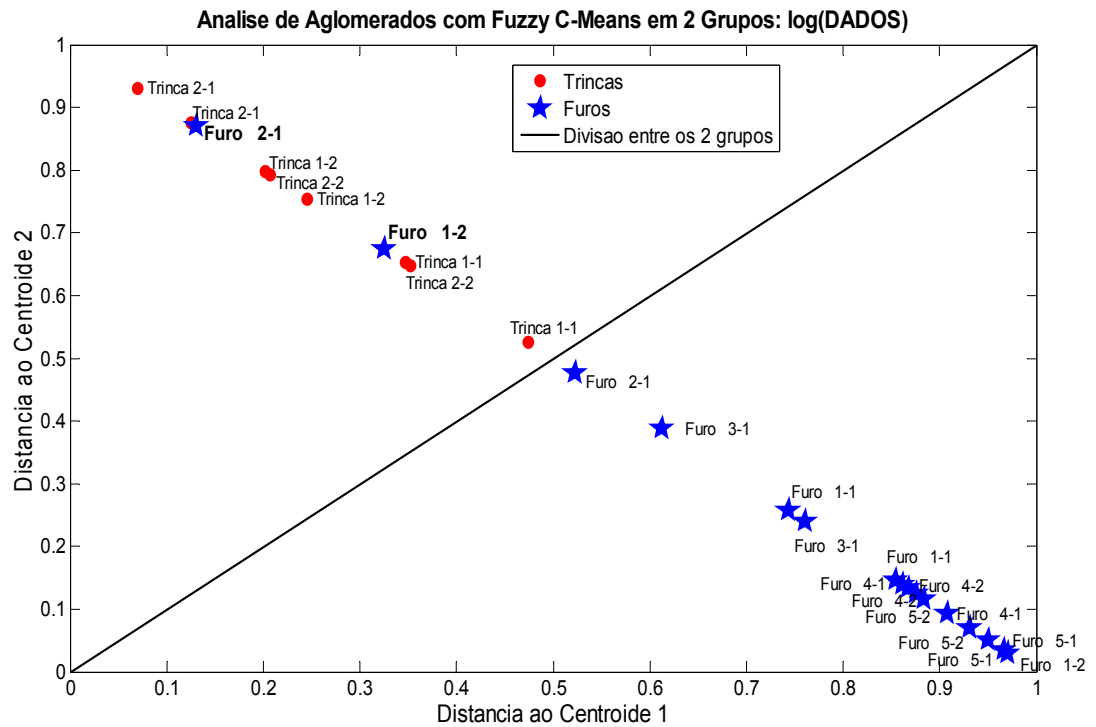


Figura 8.59 - Análise de aglomerados por *Fuzzy C-Means* de $\log(\text{dados})$ das falhas por trincas e furos para a pá de aplicação militar.

A Fig. 8.60 apresenta uma mesma análise de aglomerados do “ $\log(\text{dados})$ ”, porém utilizando a técnica *K-Means* que é uma metodologia bem mais simplificada do que a anterior. Entretanto, dos casos avaliados, apenas três foram classificados de forma equivocada.

Na Fig. 8.60 são apresentadas duas linhas que dividem os dois grupos. A primeira é a encontrada diretamente pelo próprio método *K-Means* e, a segunda, é uma alternativa proposta a partir de uma análise visual dos resultados. Nesta última divisão, apenas duas classificações de falhas se mostram erradas, fazendo com que este modelo apresente precisão igual à encontrada pelo modelo baseado em *Fuzzy C-Means*.

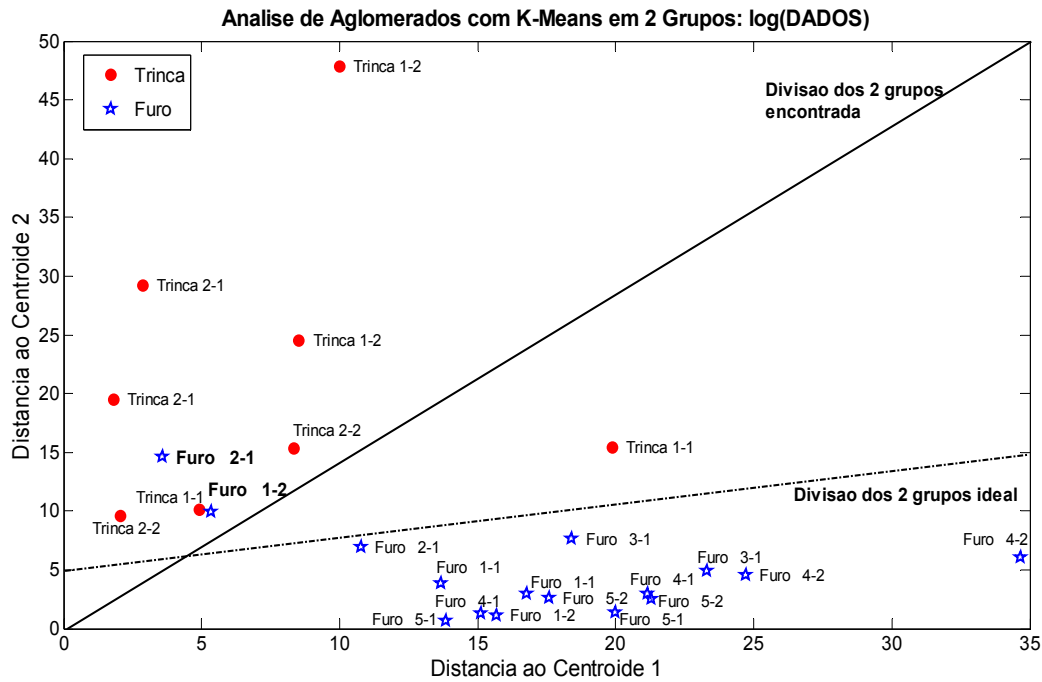


Figura 8.60 - Análise de aglomerados por *K-Means* de $\log(\text{dados})$ das falhas por trincas e furos para a pá militar.

Por fim, espera-se com esta seção ter apresentado uma nova metodologia para realizar a triagem e determinação do tipo de falha baseado nas métricas de danos de vários sensores/atuadores distribuídos na estrutura. Assim, pode-se determinar o metamodelo específico a ser utilizado para a determinação dos parâmetros associados à falha previamente caracterizada.

Tipos diferentes de casos de falhas podem ser testados a fim de se elaborar um procedimento mais robusto capaz de representar condições reais de determinação e caracterização de falhas. Para tanto, novos experimentos são exigidos de forma a se aumentar a confiabilidade dos resultados, permitindo o estabelecimento de *benchmarking*.

Capítulo IX

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as considerações finais deste trabalho, além de perspectivas de continuidade do mesmo. Como o trabalho envolveu vários temas de desenvolvimento distintos, abrangendo algumas áreas de conhecimento e propostas específicas, estas considerações serão apresentadas na forma de itens separados.

Além disso, futuras contribuições ou aprimoramentos são também propostos para cada tópico desenvolvido.

9.1 Conclusões Sobre o Trabalho

Considerando-se que o tema proposto é considerado novo, com muitas áreas de investigação ainda não suficientemente exploradas, principalmente no que diz respeito à ausência de modelos numéricos para auxílio e validação, esta tese apresenta tendências de aplicações das metodologias descritas. Nem sempre técnicas bem sucedidas em condições de laboratório são diretamente aplicadas em condições de campo.

A apresentação de estudos de caso de caráter mais aplicados dos que os comumente encontrados na bibliografia tem a ver com a tentativa de formular procedimentos de monitoramento de falha que possam ser mais diretamente transferidos a setores da indústria interessados, especialmente à indústria aeronáutica e aeroespacial. Este aspecto é considerado um ponto forte desta contribuição.

A dificuldade de provocar danos permanentes em estruturas complexas fez com que em alguns casos os danos fossem representados por adição de massas. A motivação desta estratégia tem a ver com o fato de o autor considerar que as alterações estruturais assim obtidas se comportam de forma semelhante às falhas.

No capítulo 1 foi apresentada apenas a motivação inicial desta tese. Neste sentido, pode-se dizer que a intenção de desenvolver técnicas de monitoramento de falhas (SHM) com vistas a aplicação especialmente na indústria aeronáutica foi atendida.

O capítulo 2 apresentou os fundamentos teóricos básicos para o desenvolvimento de todo o trabalho. Pode-se considerar que foram abordados os fundamentos mais importantes, permitindo que o leitor interessado possa iniciar-se nesta ciência.

Já no capítulo 3 procurou-se dar os contornos do trabalho em si, ou seja, foram

apresentadas três possibilidades de uso da técnica do monitoramento estrutural baseado na impedância eletromecânica: junções em tubos flangeados; identificação da qualidade de soldas TIG e análise de esforços estruturais. Para o primeiro caso, verificou-se que a simples observação da métrica de dano é capaz de avaliar o torque aplicado no flange. Para a automatização deste processo, um meta-modelo baseado em redes neurais foi utilizado com sucesso. No segundo caso, duas condições de soldas foram testadas, apresentando comportamentos distintos. Foi proposto um procedimento para validação da qualidade de componentes soldados. Evidentemente, uma maior quantidade de testes para o estudo de peças soldadas precisaria ser implementada para se chegar a resultados capazes de inferir sobre padrões de qualidade. Deve-se lembrar que na engenharia da soldagem existem inúmeras aplicações cuja identificação de um padrão de “qualidade” é indispensável e que, em muitos casos, isso é realizado de uma forma que consome tempo de produção, consumindo esforços, elevando os custos. Na terceira aplicação, demonstrou-se que os sinais de impedância também podem ser aplicados para o monitoramento dos esforços aplicados em componentes mecânicos. Em particular, isto foi evidenciado posteriormente, no capítulo 8, ao se tratar da análise de esforços em um pilone de uma aeronave militar modelo F-15, quando foram identificadas as condições de carregamento da estrutura utilizando os sinais de impedância eletromecânica e criando-se o conceito de *métrica de tensão*. Na identificação de esforços/tensões, tudo indica que a técnica pode ser amplamente empregada, podendo ser substituída ou associada a padrões de medição já utilizados como aqueles que usam extensômetros elétricos. Os casos críticos, como pontes rolantes ou estruturas espaciais e aeronáuticas (capítulo 8), representam candidatos fortes de aplicação da técnica, especialmente ao se considerar a possibilidade de se preverem falhas catastróficas devido a esforços estáticos e dinâmicos aplicados, em tempo real. Evidentemente, os três casos apresentados são estruturas simples, mas os conceitos podem ser desdobrados para diversos segmentos industriais.

No capítulo 4 foi apresentada uma metodologia de monitoramento de integridade estrutural tendo em vista o monitoramento remoto. Isto facilitaria a criação de base de dados comum de vários componentes aeronáuticos, assim como o intercâmbio de informações. Posteriormente, técnicas de extração de conhecimentos como, por exemplo, o *data mining*, poderiam ser utilizadas para obter padrões de monitoramento, configurações de monitoramento, além de permitir comparações entre casos similares, para fins estatísticos. É importante salientar que os processos de criptografia utilizados para a comunicação local são os já embarcados no protocolo IEEE 802.11, ou seja, o WPA (*Wi-fi Protected Access*) e o WPA2, sendo que ambos não apresentam limitações conhecidas que favoreçam o acesso indevido. Entretanto, ao se acessar remotamente o servidor, pode-se aproveitar de

oportunidades que não foram contempladas no momento do estabelecimento da segurança no servidor, favorecendo ataques. Isto quer dizer que muitas vezes os dados são transmitidos de forma segura ao servidor local pela rede wi-fi, mas a conexão com o servidor remoto seja a conexão “servidor local - servidor remoto”, seja a que relaciona “cliente – servidor remoto”, pode apresentar falta de segurança devido a fraquezas introduzidas pela configuração do próprio servidor. Os cuidados decorrentes deste problema devem ser contemplados na instalação dos servidores de FTP e WEB, assim como o uso de *firewalls* (softwares que auxiliam no bloqueio de acessos) e *sniffers* (softwares que decodificam os pacotes de dados e analisam a rede) são pertinentes ao caso.

O capítulo 5 apresenta o processo de identificação de corrosão em uma viga de alumínio. O processo utilizado para a identificação buscou utilizar duas metodologias de SHM consideradas recentes, a saber: as ondas de Lamb e o Método baseado em Impedância Eletro-Mecânica. Assim, dois meta-modelos baseados em redes neurais de base radiais foram construídos, utilizando-se as informações provenientes das duas técnicas citadas para a caracterização da falha. É importante ressaltar que meta-modelos que utilizam as duas técnicas associadas, se constitui numa iniciativa inédita desta tese, segundo a bibliografia consultada pelo autor.

No capítulo 6 foram apresentadas metodologias de Inovação de Processos e Produtos já consagrados pela indústria, visando sua incorporação à técnica de monitoramento baseado em impedância. Assim, procurou-se introduzir na técnica de monitoramento uma metodologia de eficiência já comprovada e testada na indústria, com a intenção de favorecer a identificação de possíveis fatores críticos que possam impactar de forma negativa a implementação da técnica de monitoramento em uma estrutura aeronáutica real. Os ensaios realizados foram feitos em um ambiente próprio (hangar) de uma indústria aeronáutica. A principal contribuição deste capítulo é a descrição dos procedimentos acima citados através de ferramentas de gestão utilizadas na indústria, de forma a representar informações técnicas relevantes ao processo, devendo ser entendida como uma leitura introdutória aos que está iniciando-se na aplicação da metodologia. Ainda, o processo de antecipação de falhas pela análise C-S é uma importante associação das técnicas de inovação (usadas no âmbito industrial) com os conceitos da técnica de monitoramento baseado em impedância (ainda em desenvolvimento no âmbito acadêmico).

O capítulo 7 descreveu possíveis casos de sucesso da aplicação da técnica de monitoramento baseado em impedância. Neste caso, estruturas bastante leves e flexíveis foram utilizadas para este propósito, sendo constituídas de materiais ainda não tão explorados por boa parte da comunidade acadêmica. Neste sentido, estudou-se a possibilidade de uso da técnica da impedância no monitoramento de uma estrutura espacial, no caso satélite

Gossamer. Deve-se salientar que metodologias de controle ativo que utilizam os mesmos sensores/atuadores já estão sendo desenvolvidas para este equipamento. Desta forma, pode-se imaginar uma tecnologia capaz de prover tanto a identificação e caracterização de falhas, como a capacidade de “auto-reparação”, que nada mais é do que adaptar a estrutura de forma que a falha identificada tenha seus efeitos minimizados. Outra contribuição do capítulo 7 se refere às possibilidades de identificação das melhores regiões de frequência de monitoramento. No primeiro caso apresentado foi utilizada uma varredura em uma ampla faixa de frequências e, então, um modelo baseado em algoritmos genéticos foi empregado para a identificação da melhor região de monitoramento. Uma continuação deste estudo com a finalidade de se obter um procedimento robusto, permitindo a identificação da região para vários tipos possíveis de falhas, exigiria a disponibilidade de outras estruturas similares e, também, a necessidade de realização de ensaios destrutivos. Tais exigências impediram a continuidade deste estudo.

No capítulo 8 foram apresentadas algumas aplicações voltadas especificamente para estruturas aeronáuticas. O primeiro estudo de caso evidenciou preocupação com fatores ambientais (temperatura e pressão). Assim, foi realizado um ensaio em uma câmara de pressão e temperatura controláveis. Desta forma, ficou evidente a partir de uma análise de sensibilidade do meta-modelo obtido, que a contribuição da inserção da falha é mais importante, sendo que a influência dos fatores ambientais considerados (ruído) têm menor sensibilidade, uma vez avaliados os coeficientes correspondentes na superfície de resposta. Ensaio desta natureza ainda não haviam sido relatados para a identificação das potencialidades da metodologia, num contexto em que as variações ambientais (pressão e temperatura) fossem levadas com conta simultaneamente. Ficou evidente, também, a maior influência da temperatura em relação à pressão, conforme já era esperado. No segundo experimento realizado neste capítulo, envolvendo a estrutura pilone da aeronave militar modelo F-15, foi estudada inicialmente a capacidade da estrutura de identificar os esforços aplicados frente ao carregamento solicitado na estrutura. Como se verificou, a técnica pode ser utilizada também para a análise de esforços em estruturas (como também se havia verificado primeiramente no capítulo 3). A estrutura foi então avaliada quanto à melhor configuração de monitoramento pelo princípio de robustecimento de projetos de Taguchi. Ao contrário do primeiro estudo de caso apresentado neste capítulo, fatores ambientais que influenciam no processo, mas não são monitorados, foram incluídos como variáveis no meta-modelo. Estas mesmas variáveis foram utilizadas no processo de robustecimento do monitoramento baseado em impedância, ou seja, procurou-se identificar as configurações de monitoramento que sofriam menor influência dos parâmetros ambientais. Neste caso, os parâmetros ambientais considerados foram as condições de contorno da peça (livre-livre, mas em posições distintas) e

as condições iniciais (com ou sem vibração livre inicial). Por fim, duas estruturas de pás de helicóptero (aeronaves de uso militar e de uso civil) foram avaliadas por meta-modelos construídos através de redes neurais, visando a classificação de falhas. Para a estrutura militar espera-se ter contribuído de forma significativa ao apresentar um procedimento preliminar de triagem das métricas de dano para inserir os sinais em meta-modelos específicos de cada tipo de falha. Isto foi realizado utilizando duas técnicas de análise de agrupamentos bem conhecidas, a saber: *K-Means* e *Fuzzy C-Means*. Outros tipos de falhas poderiam ser investigados, mas tornaria o trabalho por demais repetitivo, não acrescentando muito ao procedimento desenvolvido nesta tese. Repetições deveriam ser feitas nos ensaios, mas levando-se em conta que não somente neste estudo de caso, mas na maioria daqueles descritos nesta tese, foram feitas 32 médias para cada aquisição, pode-se considerar que os sinais utilizados já contemplam forte evidência de realidade.

Deve-se também ressaltar que neste trabalho uma quantidade significativa de técnicas utilizando meta-modelos baseados em redes neurais artificiais foi implementada. Isso deve ser visto dentro do contexto em que a tese foi desenvolvida. O autor utilizou extensivamente meta-modelos baseados em superfícies de resposta desde seu trabalho de mestrado. Assim, quando da realização dos estudos enfocados no trabalho de doutorado, optou-se por dar ênfase aos meta-modelos baseados em redes neurais artificiais. Conforme observado pela comunidade científica, o uso destas metodologias constitui uma ferramenta poderosa, desde que utilizada criteriosamente, a partir de conjunto amostral significativo, e dentro de um espaço de projeto bem definido. Assim, considerando a grande descontinuidade dos pontos e o elevado número de médias para os sinais adquiridos, as técnicas de meta-modelos baseados em redes neurais artificiais aplicadas ao monitoramento baseado em impedância podem apresentar muitas vezes uma solução única com grande capacidade de representação.

Como conclusão final, fica evidente a carência de desenvolvimento de modelos numéricos para o auxílio na obtenção de sinais de referência para as estruturas. Isto se deve ao fato da complexidade do acoplamento eletro-mecânico, além das elevadas frequências utilizadas no monitoramento de falhas incipientes. Ainda, considerando que os modelos numéricos mais precisos baseiam-se em técnicas de análise espectral e que os casos avaliados se restringem apenas a vigas unidimensionais, as técnicas experimentais aparecem como a única alternativa para monitoramento de estruturas complexas, contemplando situações reais. Neste sentido, esta tese buscou apresentar alternativas capazes de responder aos grandes desafios hoje enfrentados pela indústria no monitoramento de falhas ainda incipientes. Muitos estudos aqui empreendidos levaram o autor a ainda inexploradas. Estudos posteriores deverão ser empreendidos, buscando a sistematização dos procedimentos

propostos, tornando-os ferramentas efetivas de monitoramento estrutural pelo método da impedância eletromecânica.

9.2 Trabalhos Futuros

O capítulo 3 pode ser utilizado como referência para a aplicação em estudos de transferência de fluidos em tubulações industriais. Estudos deverão ser realizados para o tratamento adequado das variáveis externas (ruídos) que podem surgir, tais como variações de temperatura, vibrações induzidas, etc, possibilitando um processo automático de manutenção para flanges. Nas tubulações industriais, é grande o risco de contaminação de fluidos tóxicos como amônia, combustíveis etc, assim como preocupa seu potencial explosivo. A utilização destes mecanismos de monitoramento poderia prever ou aperfeiçoar a capacidade de compreensão das atividades de manutenção em parques industriais. Semelhantemente, trabalhos com estruturas soldadas como nas carrocerias de caminhões em processos de fabricação reais, poderiam ser testados para a validação do procedimento implementado no capítulo 3 para a solda TIG em vigas de aço. Por fim, estudos envolvendo diferentes aplicações de esforços em corpos de prova ainda devem ser realizados para verificar se a metodologia é capaz determinar tais solicitações. Um exemplo importante seriam os ensaios de fluência e fadiga, à vista de sua grande incidência em estruturas reais encontradas na indústria. Atualmente, alguns estudos envolvendo ensaios de fadiga em corpos de prova com o acompanhamento simultâneo dos sinais de impedância eletromecânica estão sendo desenvolvidos no LMEst – UFU.

No capítulo 4 foram apresentados códigos computacionais desenvolvidos em *Javascript* e *PHP*, enquanto a etapa de projetos foi baseada em *UML*, ou seja, usando ferramentas atuais úteis para desenvolvimento dentro do paradigma Orientado a Objetos. Entretanto, por se tratar de ainda de um protótipo, o desenvolvimento do sistema foi feito em uma plataforma estruturada. Futuros códigos desenvolvidos em linguagens orientadas a objetos, como o caso do Java, poderiam ampliar as possibilidades de monitoramento remoto, seja por garantir maior confiabilidade de acesso, seja até mesmo por permitir o desenvolvimento de aplicações hoje impossíveis de serem implementadas com as ferramentas estruturadas, como é o caso do monitoramento usando telefones celulares ou *Palmtops*.

O capítulo 5 apresentou um meta-modelo baseado em redes neurais artificiais para a representação de falhas, tendo ainda sido investigada a possibilidade de identificação das falhas utilizando duas metodologias distintas. Atualmente, acha-se em desenvolvimento no LMEst – UFU trabalhos que utilizam meta-modelos construídos com base na Lógica Nebulosa (*Fuzzy Logic*) para representação do comportamento da corrosão em viga de alumínio utilizando as duas metodologias de SHM propostas nesta tese (Ondas de Lamb e Impedância

Eletromecânica) em conjunto. O sucesso desta iniciativa pode oferecer nova alternativa para construção de meta-modelos usados em SHM.

Para o capítulo 6 é necessário que estudos futuros estudem a possibilidade de estender a análise C-S (campo-substância) para todo o sistema de monitoramento. Isso vale inclusive para o caso de monitoramento remoto comentado no capítulo 4. Assim, seriam contempladas todas as possibilidades de insucesso na aplicação da técnica, além da identificação de pontos-chaves a serem necessariamente evitados para se garantir o sucesso do empreendimento. Pode-se mencionar que, no LMEst – UFU, alguns estudos envolvendo a análise C-S em associação com árvores de falhas e confiabilidade estão sendo conduzidos atualmente.

O capítulo 7 poderia ser utilizado para o desenvolvimento de tecnologia capaz de combinar técnicas de controle com métodos de identificação de falhas. Entretanto, devido à ausência no Brasil de estruturas similares às usadas na tese, além da inexistência de aplicações concretas, dificultaram a realização de testes mais conclusivos. Pode-se prever que, no futuro, sensores-atuadores inteligentes poderão dedicar-se simultaneamente ao monitoramento de falhas e ao controle, buscando atuar sobre a estrutura de tal forma que, mesmo com o aparecimento de uma eventual falha, a estrutura permanece segura, pois o controle ativo é capaz de garantir uma nova configuração estática e dinâmica para o sistema, ampliando a vida residual da estrutura. Quanto às técnicas baseadas em algoritmos genéticos para a identificação da melhor região de monitoramento, preocupados com o elevado tempo de processamento, novos testes no LMEst – UFU estão sendo realizados, procurando agregar métodos auxiliares, tais como o elitismo para melhorar o desempenho dos algoritmos genéticos, ou ainda pela adoção de métodos heurísticos alternativos, como colônias de formigas, evolução diferencial, e outros. Considera-se que as técnicas de inteligência artificial estão em franco desenvolvimento, apontando para novas possibilidades de aplicação em SHM, especialmente na otimização de posicionamento de sensores-atuadores e na obtenção das melhores condições de teste.

No que diz respeito ao capítulo 8, é importante concluir que trabalhos futuros deverão ser realizados no sentido de prover a análise de um maior grupo de fatores ambientais, à vista de sua influência nas técnicas de SHM. Como exemplo desta preocupação, já se encontra em avaliação no LMEst – UFU um estudo sobre a dinâmica de *sloshing* em estruturas simples, para a investigar como fazer o monitoramento estrutural em estruturas submersas. Deve-se lembrar que líquidos com superfícies livres podem causar impactos de natureza hidrodinâmica sobre os sensores/atuadores.

Finalmente, para a aplicação das técnicas de agrupamento em estruturas reais, um número maior de tipos de falhas, assim como um maior grupo de dados será necessário para uma avaliação confiável baseada em princípios estatísticos. Entretanto, por se tratar de vários

tipos de falhas avaliadas, uma maior disponibilidade de estruturas será necessária, pois todos os casos corresponderiam a ensaios destrutivos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aitriz, 2006, www.aitriz.org. Acessado em 10/07/2006.
- Altshuller, G. S., 1969, "Innovation Algorithm". Worcester: Technical Innovation Center, (1a ed. russa, 1969).
- Altshuller, G. S., 1974, "Forty Principles". Worcester: Technical Innovation Center, 1998 (1a ed. russa, 1974).
- Altshuller, G. S., 1979, "Creativity as An Exact Science - The Theory of The Solution of Inventive Problems". 1a. ed. Luxemburg: Gordon & Breach, 1984 (1a ed. russa, 1979).
- Altshuller, G. S., 1980, "Flügel für Ikarus: Über die Moderne Technik des Erfindens". Leipzig: Urania, 1980.
- Altshuller, G. S., 1984, (sob o pseudônimo Altov, H.) "And Suddenly the Inventor Appeared". Worcester: Technical Innovation Center, 1990 (1a ed. russa, 1984).
- Altshuller, G. S.; Zlotin, B.; Zusman, A.; Philatov, V., 1989, "Searching for New Ideas: From Insight to Methodology - The Theory and Practice of Inventive Problem Solving". Kishinev: Kartya Moldovenyaska, 1989 (Publicado em inglês como Tools of Classical TRIZ. Southfield: Ideation International, 1999).
- Anderson, J.A., 1995, "An Introduction to Neural Networks". The MIT Press, London, England.
- Bendat, J.S. and Piersol, A.G., 1986, "Random Data – Analysis and Measurement Procedures", 2nd Edition, John Wiley and Sons, USA.
- Banks, H.T., Smith, R.C. and Wang, Y., 1996, "Smart Materials Structures – Modeling, Estimation and Control", John Wiley & Sons, Paris, France.
- Barbosa, E.B., 2005, "Dante Explica Java 5". Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Editora Ciência Moderna.
- Barros Neto, B., Scarminio I.S. e Bruns, R.E., 1995, "Planejamento e Otimização de Experimentos". Editora da Unicamp, Brazil.
- Bengio, Y., 1999, "Markovian Models for Sequential Data". Neural Computing Surveys 2, 129-162.
- Benes, V.E.. Mathematical Theory of Connecting Networks and Telephone Traffic. Nova Iorque – USA. Academic Press. 1965.
- Berry, M.J.A. and Linoff, G., 1997, "Data Mining Techniques for Marketing Sales and Customer Support". New York, USA. John Wiley.
- Berry, M.J.A. and Linoff, G., 2000, "Mastering Data Mining". New York, USA. John Wiley.

- Bhalla, S., Naidu, A. S. K., and Soh, C. K., 2002a, "Influence of Structure– Actuator Interactions and Temperature on Piezoelectric Mechatronic Signatures for NDE," in Proceedings of ISSS-SPIE 2002 International Conference on Smart Materials Structures and Systems, December 12–14, Bangalore, India (paper no ISSS-SA-502).
- Bhalla, S., Naidu, A.S.K., Ong, C.W. and Soh, C.K., 2002b, "Practical Issues in the Implementation of Electromechanical Impedance Technique for NDE", in Proceedings of the SPIE International Symposium on Smart Materials, Nano-, and Micro-Smart Systems, December 16-18, Melbourne, Australia.
- Boeing, Inc, 2004, "Triz-Boeing". Boeing Company's Newsletter – 28/04/2004.
- Bray, D.E., MCBride, D., 1992, "Nondestructive Testing Techniques". John Wiley and Sons.
- Carvalho, M.A., 2006, www.decarvalho.eng.br. Acessado em 10/07/2006.
- Cawley, P., 1984, "The Impedance Method of Non-Destructive Inspection", NDT International, Vol 17, N° 2, USA, pp. 59-65.
- Chaudhry, Z., Joseph, T., Sun, F. and Rogers, C., 1995, "Local-Area Health Monitoring of Aircraft via Piezoelectric Actuator/Sensor Patches", in Smart Structures and Integrated Systems, SPIE Conference, San Diego, CA, Proceedings of the SPIE, Vol.2443.
- Chaudhry, Z., Lalande, F., Ganino, A. and Rogers, C., 1996, "Monitoring the Integrity of Composite Patch Structural Repair via Piezoelectric Actuators/Sensors", AIAA-1996-1074-CP.
- Cimarusti, D. e Ives, R.B., 1982, "Development of an Automatic Identification System of Spoken Languages: Phase 1". Proceedings IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing 82. Paris – França. Pgs 80-92.
- Clarke, A.B. and Disney, R.L., 1979, "Probabilidade e Processos Estocásticos". São Paulo, SP, Brasil. Livros Técnicos e Científicos Editora.
- Daubechies, I., 1993, "Teen Lectures on Wavelets". Philadelphia, USA. SIAM.
- Davis, H. and Mansfield, R., 2002, "The Wi-Fi Experience: Everyone's Guide to 802.11B Wireless Networking". USA. Que Press.
- Debnath, L., 2001, "Wavelet Transforms & Their Applications". Boston, MA, USA. Birkhäuser Press.
- Diniz, C.A. e Louzada Neto, F., 2000, "Data Mining: Uma Introdução". Caxambu, MG, Brasil. Associação Brasileira de Estatística. 14º Simpósio Nacional de Probabilidade e Estatística (SINAPE).
- Farrar, C., and Damage Prognosis Team from Weapon Response Group, Los Alamos National Laboratory, 2003, "An Introduction to Damage Prognosis", Pan American Advanced Study Institute on Damage Prognosis, Florianopolis, SC, Brasil.

- Fiod Neto, M., 1997, "Taguchi e a Melhoria da Qualidade: Uma Releitura Crítica", Editora da UFSC, Florianópolis, SC, Brasil.
- Fitarelli, <http://www.fitarelli.org/>. Acessado em 10/05/2006.
- Fonseca, J.S., 1982. "Curso de Estatística". 3ª Edição. Editora Atlas AS. São Paulo, SP, Brasil.
- Fröhlich, J., 2000, "Neural Networks with Java". Regensburg - Germany. <http://rfhs8012.fh-regensburg.de/~saj39122/jfroehl/diplom/e-main.html>.
- Gibilisco, S., 2002, "Manual de Eletrônica e de Telecomunicações", Reichmann e Affonso Editores, Brasil.
- Giurgiutiu, V. and Zagrai, A.N., 2000, "Characterization of Piezoelectric Wafer Active Sensors", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 11, 959-976.
- Giurgiutiu, V. and Zagrai, A.N., 2002, "Embedded Self-Sensing Piezoelectric Active Sensors for On-Line Structural Identification"; *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 124, pp. 1-10.
- Giurgiutiu, V, Zagrai, A., and Bao, J.J., 2002, "Piezoelectric Wafer Embedded Active Sensors for Aging Aircraft Structural Health Monitoring," *International Journal of Structural Health Monitoring*, Vol. 1, 41–61.
- Giurgiutiu, V., Zagrai, A. N., Bao, J., Redmond, J., Roach, D., Rackow, K., 2003, "Active Sensors for Health Monitoring of Aging Aerospace Structures," *International Journal of the Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management*, Vol. 6, No. 1, 3–21.
- Gonzalez, R.C., 2000, "Processamento de Imagens Digitais", Editora Edgard Blucher, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Guyton, A.C., 1989, "Tratado de Fisiologia Médica". 7ª edição. Editora Guanabara Koogan S.A.. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Hand, D.J., 1998, "Data Mining: Statistics and More?". *The American Statistician*, 52, pp. 112-118.
- Hartigan, P. and Wong, M.A., 1979, "A k-Means Clustering Algorithm: Algorithm AS 1366. *Applied Statistics*, 28, pp.126-130.
- Hayashi, Y., Ogawa, S., Cho, H. and Takemoto, M., "Non-Contact Estimation of Thickness and Elastic Properties of Metallic Foils by Wavelet Transform of Laser-Generated Lamb Waves". *NDT&E International*. Vol. 32. pp.21-27.
- Hoag, M., 2002, "Servidor Web Usando Apache". São Paulo, SP, Brasil. Editora Berkeley.
- Hopkins, B. and Antony, R., 2003, "Bluetooth for Java". USA. Apress.
- Horta, L.G., Reaves, M.C. and Lew, J-S, 2006, "A Procedure for Static and Dynamic Model Update of Finite Element Models: Application to an Inflated/Rigidized Torus". XXIV IMAC – St Louis, MO.
- Hughes, S., 2001, "PHP – Guia do Desenvolvedor". São Paulo, SP, Brasil. Ed. Berkeley.

- ICA - NÚCLEO DE PESQUISA EM INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL APLICADA, 2001, http://www.ica.ele.puc-rio.br/cursos/crs_1st_notas.html. Rio de Janeiro – Brasil.
- INSA, Strasbourg, 2005, “Première Mondiale en France – Le Mastère en Innovation TRIZ”. Dossier de Presse, 26 octobre 2005. www.insa-strasbourg.fr. Acessado em 10/07/2006.
- Intel, Corp., 2004, “TRIZ Methodology: The Science of Innovation”. www.intel.com. Acessado em 10/07/2006.
- James, L.C. and Ma, J., 1997, “Wavelet Decomposition of Vibrations for Detection of Bearing-Localized Defects”. *NDT&E International*. Vol 30. Number 3. pp. 143-149.
- Kovács, Z. L., 1996, “Redes Neurais Artificiais - Fundamentos e Aplicações”. Edição Acadêmica, São Paulo – Brasil.
- Lecun, Y., *et al*, 1990, “Handwritten Digit Recognition with a Backpropagation Network”. *Advances in Neural Information Processing 2 (NIPS 89)*. Pgs 396-404.
- Lemistre, M., Gouyon, R., Kaczmarek, H. and Balageas, D., 1999, “Damage Localization in Composite Plates Using Wavelet Transform Processing on Lamb Wave Signals”, *Second International Workshop on Structural Health Monitoring*, Stanford, USA.
- Leon-Garcia, A., 1994, “Probability and Random Processes for Electrical Engineering”, 2nd Edition. USA. Addison-Wesley Publishing Company.
- Liang, C., Sun, F.P., and Rogers, C.A., 1994, “Coupled Electromechanical Analysis of Adaptive Material Systems – Determination of the Actuator Power Consumption and System Energy Transfer,” *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 5, 12–20.
- Lin, J.K.H., Sapna III, G.H., Scarborough, S.E. and Cadogan, D.P., 2002, “Inflatable Rigidizable Isogrid Boom Development”. *43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, AIAA 2002-1297, Denver, Colorado.
- Lopes Jr., V., Park, G., Cudney, H. H., Inman, D. J., 2000, “Impedance-Based Structural Health Monitoring with Artificial Neural Network”. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. USA.
- Lopes Jr., V., Muellerslany, H. H., Turra, A. E., Brunzel, F., Inman, D. J., 2001, “A New Methodology of Damage Detection by Electrical Impedance and Optimization Technique”, *DINAME, Dynamic Problems of Mechanics*, Florianópolis-SC, Brasil, pp. 311-316.
- Marques, P.V. , 1991, “Tecnologia da Soldagem”. Belo Horizonte-MG-Brasil. ESAB.
- Martin, L.A., 2004, “Developing a Self-Powered, Wireless Damage Detection System for Structural Health Monitoring Applications”, *MSc Thesis*, Virginia Tech, USA.
- Massoud, M., 1985, “Impedance Methods for Machine Analysis: Modal Parameters Extraction Techniques”. *Université de Sherbrooke*, Quebec, Canada, pp. 4-14.

- Masters, T., 1993, "Practical Neural Network Recipes in C++". Academic Press, San Diego, CA, USA.
- Mattos, J.R.L. e Guimarães, L.S., 2005, "Gestão da Tecnologia e Inovação". São Paulo, SP, Brasil. Editora Saraiva.
- Miller, M., 2001, "Descobrendo Bluetooth". Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Editora Campus.
- Mingoti, S.A., 2005, "Análise de Dados Através de Métodos de Estatística Multivariada – Uma Abordagem Aplicada". Belo Horizonte, MG, Brasil. Editora da UFMG.
- Montgomery, D.C., 1991, "Design and Analysis of Experiments", 3rd Edition, John Wiley & Sons, Inc., USA.
- Moura Jr, J.R.V. and Steffen Jr, V., 2003, "Compromise Optimization and Meta-Modeling for a Flexible 7 DOF Mechanical System Using the Response Surface Method", 17th International Congress of Mechanical Engineering – COBEM 2003, São Paulo-SP, Brazil.
- Moura Jr, J.R.V. and Steffen Jr, V., 2004, "Impedance-Based Health Monitoring: Frequency Band Evaluation", XXII IMAC, Dearborn, MI, USA.
- Moura Jr, J.R.V., 2004, "Métodos de Identificação de Falhas em Estruturas Aeronáuticas Utilizando Metamodelagem Aliada às Técnicas de Impedância e Estruturas Inteligentes". Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Uberlândia – Uberlândia, MG.
- Moura Jr, J.R.V., Raslan, A.A. e Steffen Jr, V., 2004, "Método De Monitoramento De Integridade Estrutural Baseado Em Sinais De Impedância ", 59th Annual ABM International Congress, São Paulo – SP, Brasil.
- Moura Jr, J.R.V. e Steffen Jr, V., 2005, "Damage Detection Techniques for Aeronautic Structures". In: IMAC-XXIII Conference & Exposition on Structural Dynamics, Orlando - Florida - USA.
- Moura Jr, J.R.V.; Steffen Jr, V. and Inman, D. J., 2006, "Strength and Damage Characterization in an Aircraft Rib Structure. In: IMAC-XXIV: A Conference & Exposition on Structural Dynamics, St Louis - MO.
- Moura Jr, J. R. V. ; Steffen Jr, V., 2006, "Impedance-Based Health Monitoring for Aeronautic Structures using Statistical Meta-modeling". Journal of Intelligent Material Systems and Structures, v. 17, p. 1023-1036.
- Moura Jr, J.R.V., 2006, "Apostila de Ferramentas de Projetos". LMest-FEMEC-UFU. Uberlândia, MG.
- Moura Jr, J. R. V. ; Steffen Jr, V. ; Inman, D. J. ., 2007, "Influence of Environmental Changes in Structural Health Monitoring Analysis as Applied to Aeronautical Structures". In: IMAC-XXV: Conference & Exposition on Structural Dynamics, Orlando - USA.

- Moura Jr, J. R. V. ; Park, S. ; Steffen Jr, V. ; Inman, D. J., 2007, "Damage Characterization Based on Impedance-based Signatures and Lamb Wave Techniques". In: IMAC-XXV: Conference & Exposition on Structural Dynamics, Orlando - USA.
- Moura Jr, J. R. V. ; Park, S. ; Steffen Jr, V. ; Inman, D. J., 2008, "Fuzzy Logic Applied to Damage Characterization through SHM Techniques". In: IMAC-XXVI: Conference & Exposition on Structural Dynamics, Orlando - USA.
- Moura Jr, J. R. V. ; Oliveira, C.A. and Steffen Jr, V., 2008, "Altshuller Innovation Theories Applied to SHM of Aircraft Structures". In: IMAC-XXVI: Conference & Exposition on Structural Dynamics, Orlando - USA.
- Muchow, J.W., 2004, "Core J2ME – Tecnologia & Midp". São Paulo, SP, Brasil. Pearson-Makron Books.
- Naidu, A. Bhalla, S., and Soh, C.K., 2002, "Incipient Damage Localization with Smart Piezoelectric Transducers using High-Frequency Actuation," in Proceedings of SPIE International Symposium on Smart Materials, Nano-, and Micro-Smart Systems, December 16–18, Melbourne, Australia.
- N.C., 2000, "Uma Introdução às Redes Neurais". <http://www.din.uem.br/ia/neurais/>.
- Oliveira, C.A., 2003, "Inovação da Tecnologia, do Produto e do Processo". Belo Horizonte, MG, Brasil. Editora Desenvolvimento Gerencial.
- Oliveira, M.E., 2000, "Backpropagation", São João del Rei, MG, Brasil. <http://geocities.com/CapeCanaveral/Runway/4303/backprop.html>.
- Park, G., Kabeya, K. Cudney, H. H., and Inman, D. J., 1999a, "Impedance- Based Structural Health Monitoring for Temperature Varying Applications," JSME International Journal, Series A, Vol. 42, No. 2, 249–258.
- Park, G., Cudney, H., and Inman, D., 1999b, "Impedance-Based Health Monitoring Technique for Massive Structures and High-Temperature Structures," in Smart Structures and Materials 1999: Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials, Proceedings of the SPIE, Vol. 3670, 461–469.
- Park, G., Cudney, H., and Inman, D. J., 2000a, "Impedance-Based Health Monitoring of Civil Structural Components," ASCE Journal of Infrastructure Systems, Vol. 6, No. 4, 153–160.
- Park, G., Cudney, H., and Inman, D.J., 2000b, "An Integrated Health Monitoring Technique Using Structural Impedance Sensors," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 11, No. 6, 448–455.
- Park, G., Cudney, H., and Inman, D.J., 2001, "Feasibility of Using Impedance-Based Damage Assessment for Pipeline Systems," Earthquake Engineering and Structural Dynamics Journal, Vol. 30, No. 10, 1463–1474.

- Park, G, Sohn, H., Farrar, C.R. and Inman, D.J., 2003, "Overview of Piezoelectric Impedance-Based Health Monitoring and Path Forward", *The Shock and Vibration Digest*, Vol. 35, No. 6, November 2003, pp. 451-463.
- Park, S., 2006, "Health Monitoring of Railroad Track Using Piezoelectric Sensor-based Active Sensing Techniques", seminário interno CIMSS-VT.
- Pereira Jr, I.P., 2004, "Caracterização Numérica e Experimental da Evolução do Dano em Materiais". Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Uberlândia – Uberlândia, MG.
- Pinto, K.C.R., 2005, "Aprendendo a Decidir com a Pesquisa Operacional". Uberlândia, MG, Brasil. Editora da UFU.
- Raghavan, A. and Cesnik, C., 2005, "Lamb-Wave Based Structural Health Monitoring" in *Damage Prognosis – for Aerospace, Civil and Mechanical Systems*, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, NJ, USA.
- Raju, V., 1997, "Implementing Impedance-Based Health Monitoring", MSc Thesis, Virginia Tech, USA.
- Ruggiero, E.J., 2002, "Active Dynamic Analysis and Vibration Control of Gossamer Structures Using Smart Materials". Master Thesis. Virginia Tech.
- Ruhe, T.W., 1999, "Anticipating Failures with Substance-Field Inversion". <http://www.triz-journal.com/archives/2003/03/b/02.pdf>. Acessado em 15/05/2006.
- Sapna III, G.H., Folke, J., Sandy, C.R. and Cadogan, D.P., 2000, "Inflatable Boom Controlled Deployment Mechanism for the Inflatable Sunshield In Space (ISIS) Flight Experiment". 34th Aerospace Mechanisms Conference, NASA GSFC, Greenbelt, MD.
- Sarles, S. A., Bullions, T., Mefford, T., Riffle, J., Leo, D., 2006a, "Carbon Fiber Reinforced Rigidizable Space Structures". *Materials and Devices for Smart Systems II*, 0888-V02-06.
- Sarles, S., Leo, D., Riffle, J., 2006b, "Improved Composite Rigidization via Temperature-Controlled Resistive Heating". 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Newport, RI, May 1-4.
- Simmers Jr, G.E., 2005, "Impedance-Based Health Monitoring to Detect Corrosion", Master Thesis. Virginia Tech, Blacksburg-VA, USA.
- Soares, J.L., 1992, "Biologia - Volume 1". Editora Scipione. São Paulo, SP, Brasil.
- Steinetz, B.M. and Hendricks, R.C., 2000, "Overview of NASA Glenn Seal Development Program". 2000 NASA Seal/Secondary Air System Workshop.
- Soh, C.K., Tseng, K, Bhalla, S., and Gupta, A., 2000, "Performance of Smart Piezoceramic Patches in Health Monitoring of a RC Bridge," *Smart Materials and Structures*, Vol. 9, 533–542.

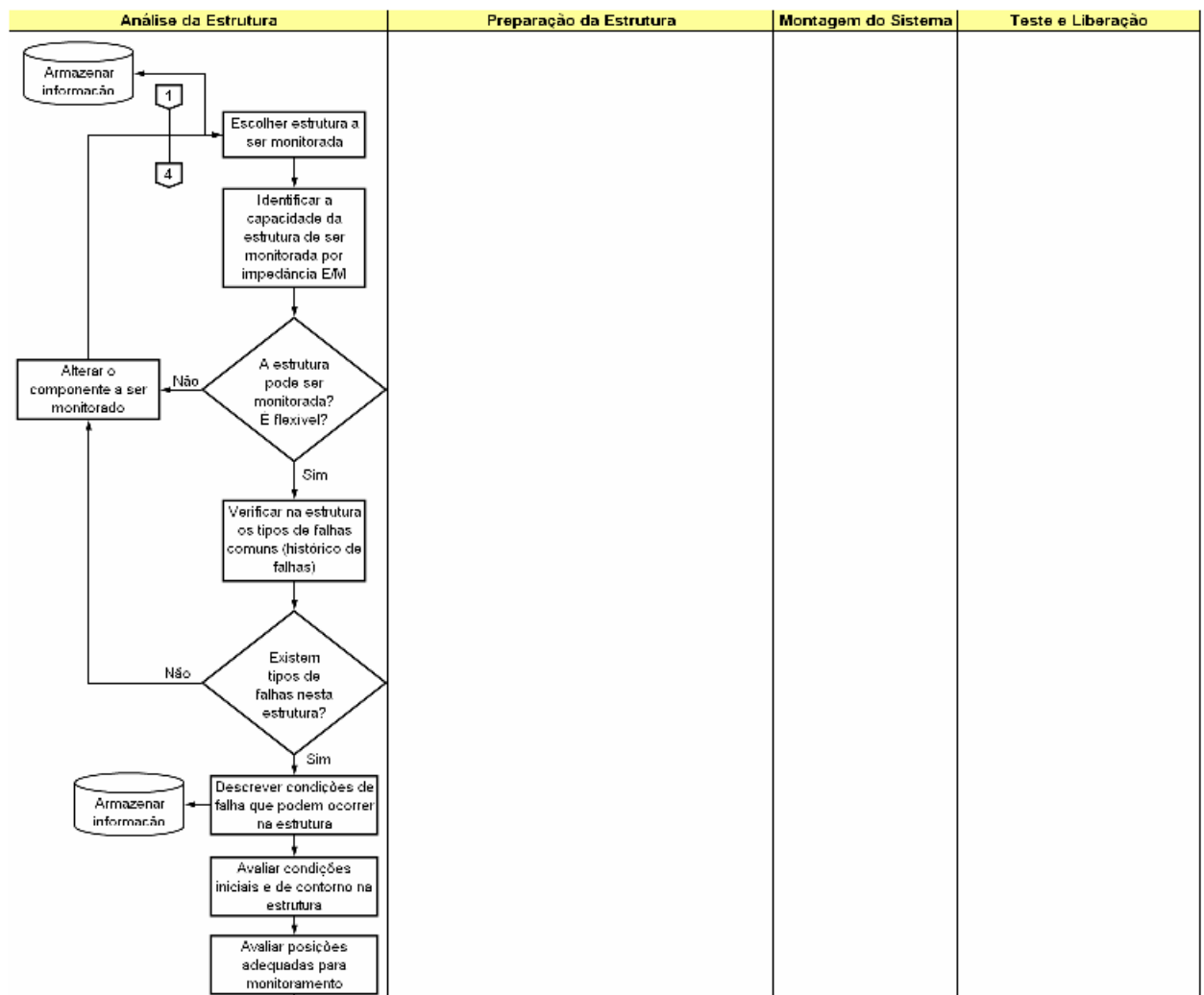
- Sohn, H., 2005, "Statistical Pattern Recognition Paradigm Applied to Defect Detection in Composite Plates" in *Damage Prognosis – for Aerospace, Civil and Mechanical Systems*, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, NJ, USA.
- Specht, D., 1990, "Probabilistic Neural Networks", *Neural Networks* 3, Baltimore – USA. Pgs 109 a 118.
- Speece, D.L., McKinney, J.D., Appelbaum, M., 1985, "Classification of Behavior Subtypes of Learning-disable Children". *Journal of Education Psychology*, 77, 1, pp.67-77.
- Stewart, D.K., Love, W.A., "A General Canonical Index". *Psychological Bulletin*, 70, pp. 160-163.
- Sun, F.P., Chaudhry, Z., Liang, C., and Rogers, C.A., 1995, "Truss Structure Integrity Identification Using PZT Sensor–Actuator," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 6, 134–139.
- Tafner, M.A., 2002, "As Redes Neurais Artificiais: Aprendizado e Plasticidade". Campinas, SP, Brasil. <http://www.epub.org.br/cm/n05/tecnologia/plasticidade2.html>.
- Tansley, D., 2002, "Como Criar Web Pages Rápidas e Eficientes Usando PHP e MySQL". Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Editora Ciência Moderna.
- Tarazaga, P.A., Inman, D.J. and Wilkie, W.K., 2006, "Structural Health Monitoring of Space Rigidizable-Inflatable Booms". XXIV IMAC – St Louis, MO.
- Tavares, E.M., 2005, "Programação Java para Wireless". São Paulo, SP, Brasil. Editora Digerati Books.
- Teolis, A., 1998, "Computational Signal Processing with Wavelets". Boston, MA, USA. Birkhäuser Press.
- Topley, K., 2002, "J2ME in a Nutshell – A Desktop Quick Reference". Sebastopol, CA, USA. O'Reilly Media, Inc.
- Yuhas, B., 1997, "Neural Networks in Telecommunications". Massachusetts–USA. Kluwer Academic Publishers.
- Zakrajsek, J.J., McKissock, D.B., Woytach, J.M. and Zakrajsek, J.F., 2005, "Exploration Rover Concepts and Development Challenges". First Space Exploration Conference: Continuing the Voyage of Discovery sponsored by the American Institute of Aeronautics and Astronautics. Orlando, Florida, USA.

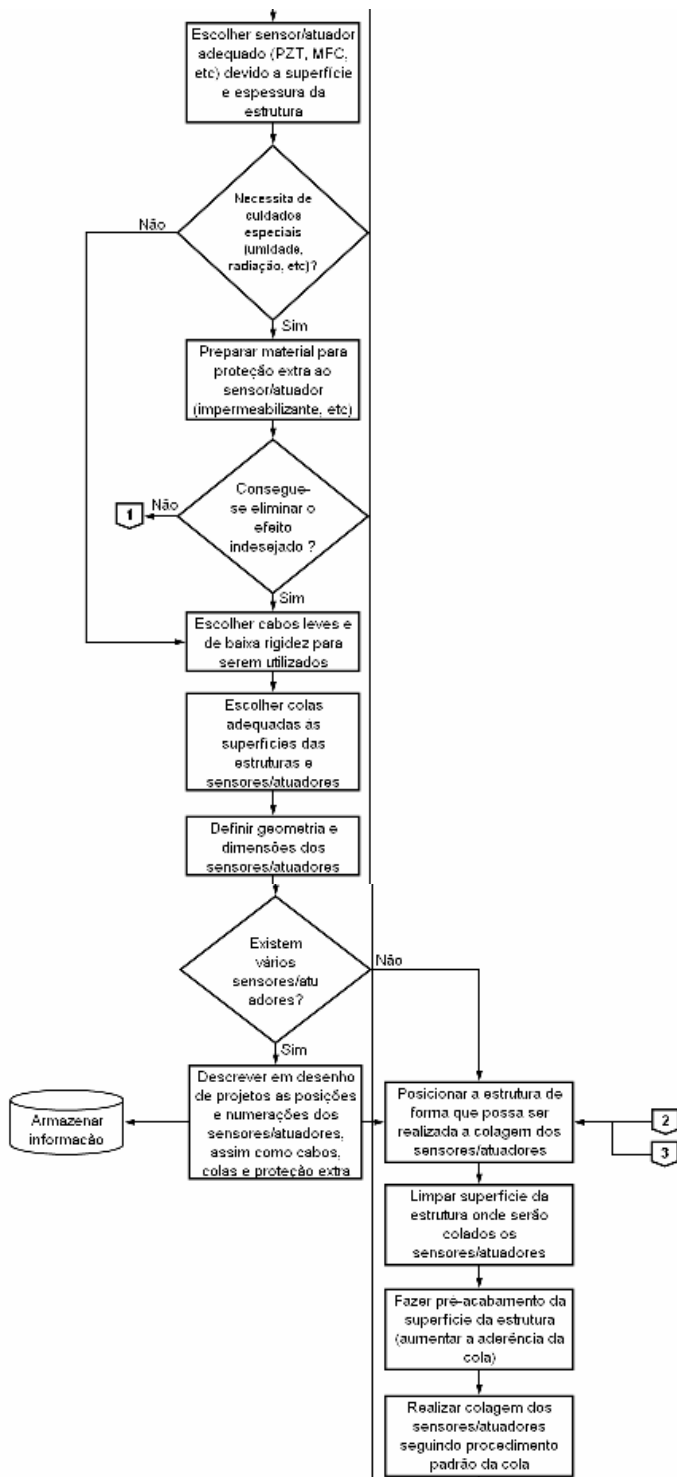
Anexo I

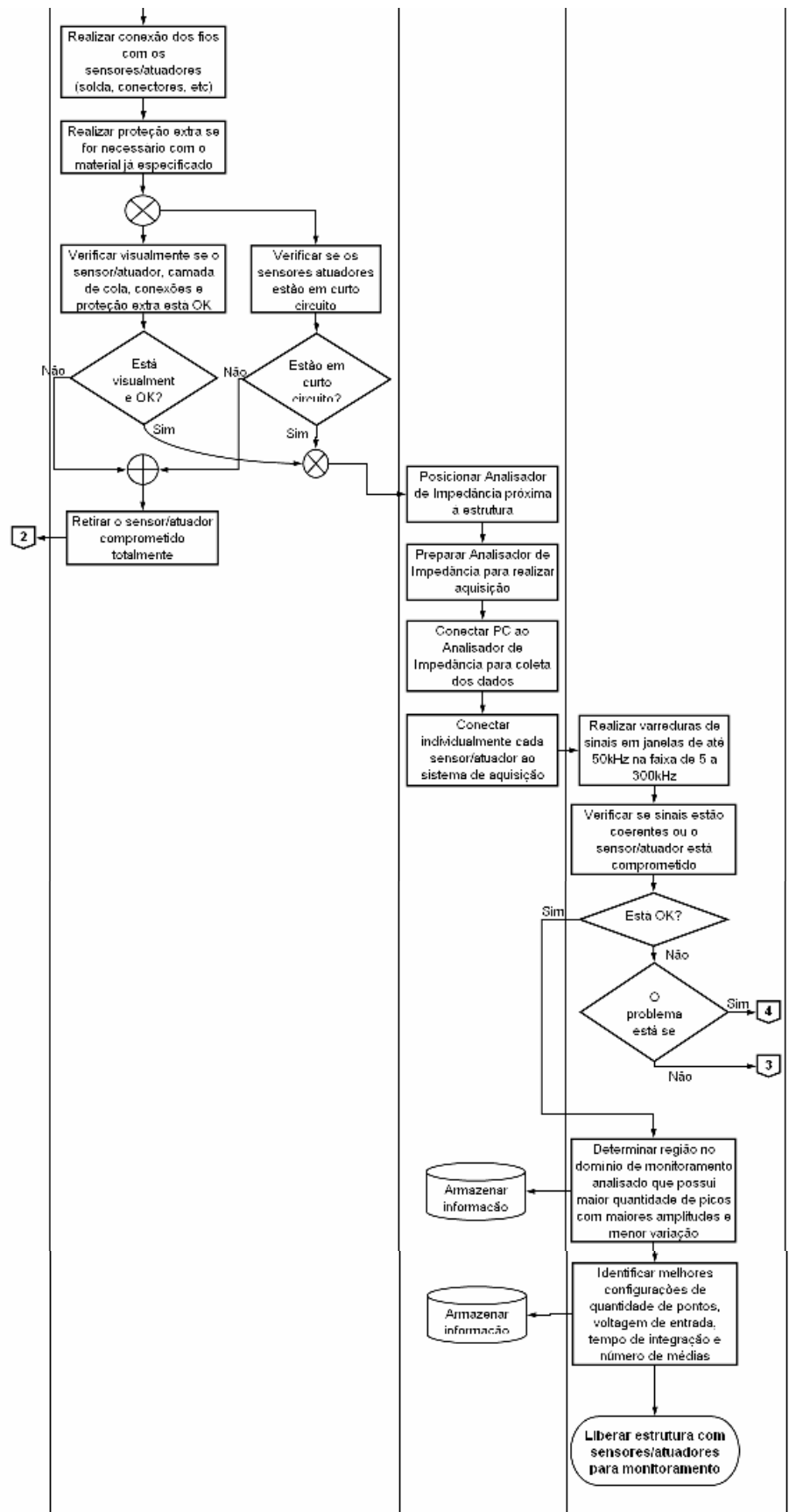
FLUXOGRAMA DE INSTRUMENTAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO

Neste anexo é apresentado o mapa de processo final elaborado a partir das análises realizadas no capítulo 6 para a estrutura painel de uma aeronave comercial (Tab. A1.1).

Tabela A1.1 – Mapa de processo do processo de instalação do sistema de monitoramento.







Anexo II

TABELAS DE EXPERIMENTOS DAS PÁS DE HELICÓPTEROS

Neste anexo são apresentadas as tabelas dos experimentos com pás de helicópteros do capítulo 8. As Tabs. All.1 e All.2 são para a estrutura civil, respectivamente, para ensaios das trincas e furos. As Tabs. All.3 e All.4 são para a estrutura militar, equivalentes aos ensaios de trincas e furos.

Tabela All.1 – Tabela de experimentos para as trincas na pá do helicóptero civil.

Número do Experimento	Posição da Falha	Profundidade da Falha	Condição da Estrutura*	Banda de Freqüências	Número do PZT
1	0	0	1	25-31	1
2	0	0	1	25-31	2
3	0	0	2	25-31	1
4	0	0	3	25-31	1
5	0	0	1	32-44	1
6	0	0	2	32-44	1
7	0	0	3	32-44	1
8	0	0	1	45.5-58	1
9	0	0	2	45.5-58	1
10	0	0	3	45.5-58	1
11	1	1	1	25-31	1
12	1	1	1	25-31	2
13	1	1	2	25-31	1
14	1	1	3	25-31	1
15	1	1	1	32-44	1
16	1	1	2	32-44	1
17	1	1	3	32-44	1
18	1	1	1	45.5-58	1
19	1	1	2	45.5-58	1
20	1	1	3	45.5-58	1
21	1	2	1	25-31	1
22	1	2	2	25-31	1
23	1	2	3	25-31	1
24	1	2	1	32-44	1
25	1	2	2	32-44	1
26	1	2	3	32-44	1
27	1	2	1	45.5-58	1
28	1	2	2	45.5-58	1
29	1	2	3	45.5-58	1

30	2	1	1	25-31	1
31	2	1	1	25-31	2
32	2	1	2	25-31	1
33	2	1	3	25-31	1
34	2	1	1	32-44	1
35	2	1	2	32-44	1
36	2	1	3	32-44	1
37	2	1	1	45.5-58	1
38	2	1	2	45.5-58	1
39	2	1	3	45.5-58	1
40	2	2	1	25-31	1
41	2	2	2	25-31	1
42	2	2	3	25-31	1
43	2	2	1	32-44	1
44	2	2	2	32-44	1
45	2	2	3	32-44	1
46	2	2	1	45.5-58	1
47	2	2	2	45.5-58	1
48	2	2	3	45.5-58	1
49	3	1	1	25-31	1
50	3	1	2	25-31	1
51	3	1	3	25-31	1
52	3	1	1	32-44	1
53	3	1	2	32-44	1
54	3	1	3	32-44	1
55	3	1	1	45.5-58	1
56	3	1	2	45.5-58	1
57	3	1	3	45.5-58	1
58	3	2	1	25-31	1
59	3	2	2	25-31	1
60	3	2	3	25-31	1
61	3	2	1	32-44	1
62	3	2	2	32-44	1
63	3	2	3	32-44	1
64	3	2	1	45.5-58	1
65	3	2	2	45.5-58	1
66	3	2	3	45.5-58	1
67	4	1	1	25-31	1
68	4	1	2	25-31	1
69	4	1	3	25-31	1
70	4	1	1	32-44	1
71	4	1	2	32-44	1
72	4	1	3	32-44	1
73	4	1	1	45.5-58	1
74	4	1	2	45.5-58	1
75	4	1	3	45.5-58	1
76	4	2	1	25-31	1
77	4	2	2	25-31	1

78	4	2	3	25-31	1
79	4	2	1	32-44	1
80	4	2	2	32-44	1
81	4	2	3	32-44	1
82	4	2	1	45.5-58	1
83	4	2	2	45.5-58	1
84	4	2	3	45.5-58	1

* A condição da estrutura refere-se a como estava posicionada a estrutura durante o ensaio. O código 1-3 refere-se:

1. Monitorada na posição horizontal;
2. Monitorada na posição vertical;
3. Monitorada na posição horizontal;

Tabela AII.2 – Tabela de experimentos para os furos na pá do helicóptero civil.

Número do Experimento	Posição da Falha	Profundidade da Falha	Condição da Estrutura	Banda de Frequências	Número do PZT
Referências – sem falhas					
a1	0	0	1	28.5-35	1
a2	0	0	1	28.5-35	2
a3	0	0	1	28.5-35	3
a4	0	0	1	36-46	1
a5	0	0	1	36-46	2
a6	0	0	1	36-46	3
a7	0	0	2	28.5-35	1
a8	0	0	2	28.5-35	2
a9	0	0	2	28.5-35	3
a10	0	0	2	36-46	1
a11	0	0	2	36-46	2
a12	0	0	2	36-46	3
a13	0	0	3	28.5-35	1
a14	0	0	3	28.5-35	2
a15	0	0	3	28.5-35	3
a16	0	0	3	36-46	1
a17	0	0	3	36-46	2
a18	0	0	3	36-46	3
Falha - Posição 1					
b1	1	1	1	28.5-35	1
b2	1	1	1	28.5-35	2
b3	1	1	1	28.5-35	3
b4	1	1	1	36-46	1
b5	1	1	1	36-46	2
b6	1	1	1	36-46	3
b7	1	1	2	28.5-35	1
b8	1	1	2	28.5-35	2
b9	1	1	2	28.5-35	3
b10	1	1	2	36-46	1
b11	1	1	2	36-46	2
b12	1	1	2	36-46	3

b13	1	1	3	28.5-35	1
b14	1	1	3	28.5-35	2
b15	1	1	3	28.5-35	3
b16	1	1	3	36-46	1
b17	1	1	3	36-46	2
b18	1	1	3	36-46	3
b19	1	2	1	28.5-35	1
b20	1	2	1	28.5-35	2
b21	1	2	1	28.5-35	3
b22	1	2	1	36-46	1
b23	1	2	1	36-46	2
b24	1	2	1	36-46	3
b25	1	2	2	28.5-35	1
b26	1	2	2	28.5-35	2
b27	1	2	2	28.5-35	3
b28	1	2	2	36-46	1
b29	1	2	2	36-46	2
b30	1	2	2	36-46	3
b31	1	2	3	28.5-35	1
b32	1	2	3	28.5-35	2
b33	1	2	3	28.5-35	3
b34	1	2	3	36-46	1
b35	1	2	3	36-46	2
b36	1	2	3	36-46	3
Falha - Posição 2					
c1	2	1	1	28.5-35	1
c2	2	1	1	28.5-35	2
c3	2	1	1	28.5-35	3
c4	2	1	1	36-46	1
c5	2	1	1	36-46	2
c6	2	1	1	36-46	3
c7	2	1	2	28.5-35	1
c8	2	1	2	28.5-35	2
c9	2	1	2	28.5-35	3
c10	2	1	2	36-46	1
c11	2	1	2	36-46	2
c12	2	1	2	36-46	3
c13	2	1	3	28.5-35	1
c14	2	1	3	28.5-35	2
c15	2	1	3	28.5-35	3
c16	2	1	3	36-46	1
c17	2	1	3	36-46	2
c18	2	1	3	36-46	3
c19	2	2	1	28.5-35	1
c20	2	2	1	28.5-35	2
c21	2	2	1	28.5-35	3
c22	2	2	1	36-46	1

c23	2	2	1	36-46	2
c24	2	2	1	36-46	3
c25	2	2	2	28.5-35	1
c26	2	2	2	28.5-35	2
c27	2	2	2	28.5-35	3
c28	2	2	2	36-46	1
c29	2	2	2	36-46	2
c30	2	2	2	36-46	3
c31	2	2	3	28.5-35	1
c32	2	2	3	28.5-35	2
c33	2	2	3	28.5-35	3
c34	2	2	3	36-46	1
c35	2	2	3	36-46	2
c36	2	2	3	36-46	3
Falha - Posição 3					
d1	3	1	1	28.5-35	1
d2	3	1	1	28.5-35	2
d3	3	1	1	28.5-35	3
d4	3	1	1	36-46	1
d5	3	1	1	36-46	2
d6	3	1	1	36-46	3
d7	3	1	2	28.5-35	1
d8	3	1	2	28.5-35	2
d9	3	1	2	28.5-35	3
d10	3	1	2	36-46	1
d11	3	1	2	36-46	2
d12	3	1	2	36-46	3
d13	3	1	3	28.5-35	1
d14	3	1	3	28.5-35	2
d15	3	1	3	28.5-35	3
d16	3	1	3	36-46	1
d17	3	1	3	36-46	2
d18	3	1	3	36-46	3
d19	3	2	1	28.5-35	1
d20	3	2	1	28.5-35	2
d21	3	2	1	28.5-35	3
d22	3	2	1	36-46	1
d23	3	2	1	36-46	2
d24	3	2	1	36-46	3
d25	3	2	2	28.5-35	1
d26	3	2	2	28.5-35	2
d27	3	2	2	28.5-35	3
d28	3	2	2	36-46	1
d29	3	2	2	36-46	2
d30	3	2	2	36-46	3
d31	3	2	3	28.5-35	1

d32	3	2	3	28.5-35	2
d33	3	2	3	28.5-35	3
d34	3	2	3	36-46	1
d35	3	2	3	36-46	2
d36	3	2	3	36-46	3
Falha - Posição 4					
e1	4	1	1	28.5-35	1
e2	4	1	1	28.5-35	2
e3	4	1	1	28.5-35	3
e4	4	1	1	36-46	1
e5	4	1	1	36-46	2
e6	4	1	1	36-46	3
e7	4	1	2	28.5-35	1
e8	4	1	2	28.5-35	2
e9	4	1	2	28.5-35	3
e10	4	1	2	36-46	1
e11	4	1	2	36-46	2
e12	4	1	2	36-46	3
e13	4	1	3	28.5-35	1
e14	4	1	3	28.5-35	2
e15	4	1	3	28.5-35	3
e16	4	1	3	36-46	1
e17	4	1	3	36-46	2
e18	4	1	3	36-46	3
e19	4	2	1	28.5-35	1
e20	4	2	1	28.5-35	2
e21	4	2	1	28.5-35	3
e22	4	2	1	36-46	1
e23	4	2	1	36-46	2
e24	4	2	1	36-46	3
e25	4	2	2	28.5-35	1
e26	4	2	2	28.5-35	2
e27	4	2	2	28.5-35	3
e28	4	2	2	36-46	1
e29	4	2	2	36-46	2
e30	4	2	2	36-46	3
e31	4	2	3	28.5-35	1
e32	4	2	3	28.5-35	2
e33	4	2	3	28.5-35	3
e34	4	2	3	36-46	1
e35	4	2	3	36-46	2
e36	4	2	3	36-46	3

* A condição da estrutura refere-se a como estava posicionada a estrutura durante o ensaio. O código 1-3 é equivalente ao da tabela anterior.

Tabela All.3 – Tabela de experimentos para as trincas na pá do helicóptero militar.

Número do Experimento	Posição da Falha	Profundidade da Falha	Condição da Estrutura	Banda de Freqüências	Número do PZT
Referências – sem falhas					
a1	0	0	1	26-35.5	1
a2	0	0	1	26-35.5	3
a3	0	0	1	26-35.5	5
a4	0	0	1	26-35.5	7
a5	0	0	1	19-29	2
a6	0	0	1	19-29	4
a7	0	0	1	58-68	1
a8	0	0	1	58-68	3
a9	0	0	1	58-68	5
a10	0	0	1	58-68	7
a11	0	0	1	65-79	2
a12	0	0	1	65-79	4
a13	0	0	2	26-35.5	1
a14	0	0	2	26-35.5	3
a15	0	0	2	26-35.5	5
a16	0	0	2	26-35.5	7
a17	0	0	2	19-29	2
a18	0	0	2	19-29	4
a19	0	0	2	58-68	1
a20	0	0	2	58-68	3
a21	0	0	2	58-68	5
a22	0	0	2	58-68	7
a23	0	0	2	65-79	2
a24	0	0	2	65-79	4
a25	0	0	3	26-35.5	1
a26	0	0	3	26-35.5	3
a27	0	0	3	26-35.5	5
a28	0	0	3	26-35.5	7
a29	0	0	3	19-29	2
a30	0	0	3	19-29	4
a31	0	0	3	58-68	1
a32	0	0	3	58-68	3
a33	0	0	3	58-68	5
a34	0	0	3	58-68	7
a35	0	0	3	65-79	2
a36	0	0	3	65-79	4
Falha - Posição 1					
b1	1	1	1	26-35.5	1
b2	1	1	1	26-35.5	3
b3	1	1	1	26-35.5	5
b4	1	1	1	26-35.5	7
b5	1	1	1	19-29	2
b6	1	1	1	19-29	4

b7	1	1	1	58-68	1
b8	1	1	1	58-68	3
b9	1	1	1	58-68	5
b10	1	1	1	58-68	7
b11	1	1	1	65-79	2
b12	1	1	1	65-79	4
b13	1	1	2	26-35.5	1
b14	1	1	2	26-35.5	3
b15	1	1	2	26-35.5	5
b16	1	1	2	26-35.5	7
b17	1	1	2	19-29	2
b18	1	1	2	19-29	4
b19	1	1	2	58-68	1
b20	1	1	2	58-68	3
b21	1	1	2	58-68	5
b22	1	1	2	58-68	7
b23	1	1	2	65-79	2
b24	1	1	2	65-79	4
b25	1	1	3	26-35.5	1
b26	1	1	3	26-35.5	3
b27	1	1	3	26-35.5	5
b28	1	1	3	26-35.5	7
b29	1	1	3	19-29	2
b30	1	1	3	19-29	4
b31	1	1	3	58-68	1
b32	1	1	3	58-68	3
b33	1	1	3	58-68	5
b34	1	1	3	58-68	7
b35	1	1	3	65-79	2
b36	1	1	3	65-79	4
b37	1	2	1	26-35.5	1
b38	1	2	1	26-35.5	3
b39	1	2	1	26-35.5	5
b40	1	2	1	26-35.5	7
b41	1	2	1	19-29	2
b42	1	2	1	19-29	4
b43	1	2	1	58-68	1
b44	1	2	1	58-68	3
b45	1	2	1	58-68	5
b46	1	2	1	58-68	7
b47	1	2	1	65-79	2
b48	1	2	1	65-79	4
b49	1	2	2	26-35.5	1
b50	1	2	2	26-35.5	3
b51	1	2	2	26-35.5	5
b52	1	2	2	26-35.5	7

b53	1	2	2	19-29	2
b54	1	2	2	19-29	4
b55	1	2	2	58-68	1
b56	1	2	2	58-68	3
b57	1	2	2	58-68	5
b58	1	2	2	58-68	7
b59	1	2	2	65-79	2
b60	1	2	2	65-79	4
b61	1	2	3	26-35.5	1
b62	1	2	3	26-35.5	3
b63	1	2	3	26-35.5	5
b64	1	2	3	26-35.5	7
b65	1	2	3	19-29	2
b66	1	2	3	19-29	4
b67	1	2	3	58-68	1
b68	1	2	3	58-68	3
b69	1	2	3	58-68	5
b70	1	2	3	58-68	7
b71	1	2	3	65-79	2
b72	1	2	3	65-79	4
Falha - Posição 2					
c1	2	1	1	26-35.5	1
c2	2	1	1	26-35.5	3
c3	2	1	1	26-35.5	5
c4	2	1	1	26-35.5	7
c5	2	1	1	19-29	2
c6	2	1	1	19-29	4
c7	2	1	1	58-68	1
c8	2	1	1	58-68	3
c9	2	1	1	58-68	5
c10	2	1	1	58-68	7
c11	2	1	1	65-79	2
c12	2	1	1	65-79	4
c13	2	1	2	26-35.5	1
c14	2	1	2	26-35.5	3
c15	2	1	2	26-35.5	5
c16	2	1	2	26-35.5	7
c17	2	1	2	19-29	2
c18	2	1	2	19-29	4
c19	2	1	2	58-68	1
c20	2	1	2	58-68	3
c21	2	1	2	58-68	5
c22	2	1	2	58-68	7
c23	2	1	2	65-79	2
c24	2	1	2	65-79	4
c25	2	1	3	26-35.5	1

c26	2	1	3	26-35.5	3
c27	2	1	3	26-35.5	5
c28	2	1	3	26-35.5	7
c29	2	1	3	19-29	2
c30	2	1	3	19-29	4
c31	2	1	3	58-68	1
c32	2	1	3	58-68	3
c33	2	1	3	58-68	5
c34	2	1	3	58-68	7
c35	2	1	3	65-79	2
c36	2	1	3	65-79	4
c37	2	2	1	26-35.5	1
c38	2	2	1	26-35.5	3
c39	2	2	1	26-35.5	5
c40	2	2	1	26-35.5	7
c41	2	2	1	19-29	2
c42	2	2	1	19-29	4
c43	2	2	1	58-68	1
c44	2	2	1	58-68	3
c45	2	2	1	58-68	5
c46	2	2	1	58-68	7
c47	2	2	1	65-79	2
c48	2	2	1	65-79	4
c49	2	2	2	26-35.5	1
c50	2	2	2	26-35.5	3
c51	2	2	2	26-35.5	5
c52	2	2	2	26-35.5	7
c53	2	2	2	19-29	2
c54	2	2	2	19-29	4
c55	2	2	2	58-68	1
c56	2	2	2	58-68	3
c57	2	2	2	58-68	5
c58	2	2	2	58-68	7
c59	2	2	2	65-79	2
c60	2	2	2	65-79	4
c61	2	2	3	26-35.5	1
c62	2	2	3	26-35.5	3
c63	2	2	3	26-35.5	5
c64	2	2	3	26-35.5	7
c65	2	2	3	19-29	2
c66	2	2	3	19-29	4
c67	2	2	3	58-68	1
c68	2	2	3	58-68	3
c69	2	2	3	58-68	5
c70	2	2	3	58-68	7
c71	2	2	3	65-79	2

c72 2 2 3 65-79 4

Tabela All.4 – Tabela de experimentos para os furos na pá do helicóptero militar.

Número do Experimento	Posição da Falha	Profundidade da Falha	Condição da Estrutura	Banda de Freqüências	Número do PZT
Referências – sem falhas					
a1	0	0	1	26-35.5	1
a2	0	0	1	26-35.5	3
a3	0	0	1	26-35.5	5
a4	0	0	1	26-35.5	6
a5	0	0	1	26-35.5	7
a6	0	0	1	19-29	2
a7	0	0	1	19-29	4
a8	0	0	1	58-68	1
a9	0	0	1	58-68	3
a10	0	0	1	58-68	5
a11	0	0	1	58-68	6
a12	0	0	1	58-68	7
a13	0	0	1	65-79	2
a14	0	0	1	65-79	4
a15	0	0	2	26-35.5	1
a16	0	0	2	26-35.5	3
a17	0	0	2	26-35.5	5
a18	0	0	2	26-35.5	7
a19	0	0	2	19-29	2
a20	0	0	2	19-29	4
a21	0	0	2	58-68	1
a22	0	0	2	58-68	3
a23	0	0	2	58-68	5
a24	0	0	2	58-68	7
a25	0	0	2	65-79	2
a26	0	0	2	65-79	4
Falha - Posição 1					
b1	1	1	1	26-35.5	1
b2	1	1	1	26-35.5	3
b3	1	1	1	26-35.5	5
b4	1	1	1	26-35.5	7
b5	1	1	1	19-29	2
b6	1	1	1	19-29	4
b7	1	1	1	58-68	1
b8	1	1	1	58-68	3
b9	1	1	1	58-68	5
b10	1	1	1	58-68	7
b11	1	1	1	65-79	2
b12	1	1	1	65-79	4
b13	1	1	2	26-35.5	1

b14	1	1	2	26-35.5	3
b15	1	1	2	26-35.5	5
b16	1	1	2	26-35.5	7
b17	1	1	2	19-29	2
b18	1	1	2	19-29	4
b19	1	1	2	58-68	1
b20	1	1	2	58-68	3
b21	1	1	2	58-68	5
b22	1	1	2	58-68	7
b23	1	1	2	65-79	2
b24	1	1	2	65-79	4
b25	1	2	1	26-35.5	1
b26	1	2	1	26-35.5	3
b27	1	2	1	26-35.5	5
b28	1	2	1	26-35.5	6
b29	1	2	1	26-35.5	7
b30	1	2	1	19-29	2
b31	1	2	1	19-29	4
b32	1	2	1	58-68	1
b33	1	2	1	58-68	3
b34	1	2	1	58-68	5
b35	1	2	1	58-68	6
b36	1	2	1	58-68	7
b37	1	2	1	65-79	2
b38	1	2	1	65-79	4
b39	1	2	2	26-35.5	1
b40	1	2	2	26-35.5	3
b41	1	2	2	26-35.5	5
b42	1	2	2	26-35.5	7
b43	1	2	2	19-29	2
b44	1	2	2	19-29	4
b45	1	2	2	58-68	1
b46	1	2	2	58-68	3
b47	1	2	2	58-68	5
b48	1	2	2	58-68	7
b49	1	2	2	65-79	2
b50	1	2	2	65-79	4
Falha - Posição 2					
c1	2	1	1	26-35.5	1
c2	2	1	1	26-35.5	3
c3	2	1	1	26-35.5	5
c4	3	2	1	26-35.5	6
c5	2	1	1	26-35.5	7
c6	2	1	1	19-29	2
c7	2	1	1	19-29	4
c8	2	1	1	58-68	1
c9	2	1	1	58-68	3

c10	2	1	1	58-68	5
c11	3	2	1	58-68	6
c12	2	1	1	58-68	7
c13	2	1	1	65-79	2
c14	2	1	1	65-79	4
c15	2	1	2	26-35.5	1
c16	2	1	2	26-35.5	3
c17	2	1	2	26-35.5	5
c18	2	1	2	26-35.5	7
c19	2	1	2	19-29	2
c20	2	1	2	19-29	4
c21	2	1	2	58-68	1
c22	2	1	2	58-68	3
c23	2	1	2	58-68	5
c24	2	1	2	58-68	7
c25	2	1	2	65-79	2
c26	2	1	2	65-79	4
Falha - Posição 3					
d1	3	1	1	26-35.5	1
d2	3	1	1	26-35.5	3
d3	3	1	1	26-35.5	5
d4	3	2	1	26-35.5	6
d5	3	1	1	26-35.5	7
d6	3	1	1	19-29	2
d7	3	1	1	19-29	4
d8	3	1	1	58-68	1
d9	3	1	1	58-68	3
d10	3	1	1	58-68	5
d11	3	2	1	58-68	6
d12	3	1	1	58-68	7
d13	3	1	1	65-79	2
d14	3	1	1	65-79	4
d15	3	1	2	26-35.5	1
d16	3	1	2	26-35.5	3
d17	3	1	2	26-35.5	5
d18	3	1	2	26-35.5	7
d19	3	1	2	19-29	2
d20	3	1	2	19-29	4
d21	3	1	2	58-68	1
d22	3	1	2	58-68	3
d23	3	1	2	58-68	5
d24	3	1	2	58-68	7
d25	3	1	2	65-79	2
d26	3	1	2	65-79	4
Falha - Posição 4					
e1	4	1	1	26-35.5	1
e2	4	1	1	26-35.5	3
e3	4	1	1	26-35.5	5

e4	4	1	1	26-35.5	7
e5	4	1	1	19-29	2
e6	4	1	1	19-29	4
e7	4	1	1	58-68	1
e8	4	1	1	58-68	3
e9	4	1	1	58-68	5
e10	4	1	1	58-68	7
e11	4	1	1	65-79	2
e12	4	1	1	65-79	4
e13	4	1	2	26-35.5	1
e14	4	1	2	26-35.5	3
e15	4	1	2	26-35.5	5
e16	4	1	2	26-35.5	7
e17	4	1	2	19-29	2
e18	4	1	2	19-29	4
e19	4	1	2	58-68	1
e20	4	1	2	58-68	3
e21	4	1	2	58-68	5
e22	4	1	2	58-68	7
e23	4	1	2	65-79	2
e24	4	1	2	65-79	4
e25	4	2	1	26-35.5	1
e26	4	2	1	26-35.5	3
e27	4	2	1	26-35.5	5
e28	4	2	1	26-35.5	6
e29	4	2	1	26-35.5	7
e30	4	2	1	19-29	2
e31	4	2	1	19-29	4
e32	4	2	1	58-68	1
e33	4	2	1	58-68	3
e34	4	2	1	58-68	5
e35	4	2	1	58-68	6
e36	4	2	1	58-68	7
e37	4	2	1	65-79	2
e38	4	2	1	65-79	4
e39	4	2	2	26-35.5	1
e40	4	2	2	26-35.5	3
e41	4	2	2	26-35.5	5
e42	4	2	2	26-35.5	7
e43	4	2	2	19-29	2
e44	4	2	2	19-29	4
e45	4	2	2	58-68	1
e46	4	2	2	58-68	3
e47	4	2	2	58-68	5
e48	4	2	2	58-68	7
e49	4	2	2	65-79	2

e50	4	2	2	65-79	4
Falha - Posição 5					
f1	5	1	1	26-35.5	1
f2	5	1	1	26-35.5	3
f3	5	1	1	26-35.5	5
f4	5	1	1	26-35.5	7
f5	5	1	1	19-29	2
f6	5	1	1	19-29	4
f7	5	1	1	58-68	1
f8	5	1	1	58-68	3
f9	5	1	1	58-68	5
f10	5	1	1	58-68	7
f11	5	1	1	65-79	2
f12	5	1	1	65-79	4
f13	5	1	2	26-35.5	1
f14	5	1	2	26-35.5	3
f15	5	1	2	26-35.5	5
f16	5	1	2	26-35.5	7
f17	5	1	2	19-29	2
f18	5	1	2	19-29	4
f19	5	1	2	58-68	1
f20	5	1	2	58-68	3
f21	5	1	2	58-68	5
f22	5	1	2	58-68	7
f23	5	1	2	65-79	2
f24	5	1	2	65-79	4
f25	5	2	1	26-35.5	1
f26	5	2	1	26-35.5	3
f27	5	2	1	26-35.5	5
f28	5	2	1	26-35.5	6
f29	5	2	1	26-35.5	7
f30	5	2	1	19-29	2
f31	5	2	1	19-29	4
f32	5	2	1	58-68	1
f33	5	2	1	58-68	3
f34	5	2	1	58-68	5
f35	5	2	1	58-68	6
f36	5	2	1	58-68	7
f37	5	2	1	65-79	2
f38	5	2	1	65-79	4
f39	5	2	2	26-35.5	1
f40	5	2	2	26-35.5	3
f41	5	2	2	26-35.5	5
f42	5	2	2	26-35.5	7
f43	5	2	2	19-29	2
f44	5	2	2	19-29	4

f45	5	2	2	58-68	1
f46	5	2	2	58-68	3
f47	5	2	2	58-68	5
f48	5	2	2	58-68	7
f49	5	2	2	65-79	2
f50	5	2	2	65-79	4

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)