

**BIBLIOTECA DIGITAL DE TESES E DISSERTAÇÕES
UNESP**

RESSALVA

Alertamos para ausência de capa e folha de rosto, não incluídas pelo autor no arquivo original.

DEDICATÓRIA

*À Deus,
pela proteção.
Meus pais, meus irmãos e minha namorada,
pelo amor, apoio e incentivo.*

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Vicente Lopes Júnior, por me orientar durante a realização deste trabalho, assim como, me incentivar, apoiar e prestar os ensinamentos técnicos. Não poderia de esquecer de agradecer ao Vicente pela a amizade durante estes anos de convivência.

Aos meus amigos de graduação e república, Engenheiros Gilson, Maricato, Rogério e Sandhoerts, por terem sido companheiros, incentivadores e proporcionarem momentos de descontração durante sete anos de convivência.

Aos colegas do Grupo de Materiais e Sistemas Inteligentes - GMSINT, pelo trabalho em grupo e amizade.

Aos colegas do curso de pós-graduação que ajudaram de forma direta ou indireta na conclusão deste trabalho.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP-Ilha Solteira pela valiosa colaboração científica.

Ao grupo de polímeros do Departamento de Física da Unesp-Ilha Solteira por colaborar no desenvolvimento deste trabalho.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pelo apoio financeiro.

Ao Programa de Pós-graduação e ao Departamento de Engenharia Mecânica da Unesp-Ilha Solteira por terem oferecido condições para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus pais Lúcio Lourenço Tebaldi e Alice Fonseca Tebaldi por me apoiarem e estarem presentes em todas as minhas decisões.

Aos meus cinco irmãos, que estão sempre torcendo por mim.

A minha namorada Evelin Louise Pavan Ribeiro, pelo carinho, apoio, passar segurança e me dar força em todos os momentos.

Muito Obrigado.

Adriano Tebaldi, março de 2004.

“Algo só é impossível até que alguém duvide e resolve provar o contrário”

Albert Einstein

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUÇÃO	1
1.1. MOTIVAÇÃO	4
1.2. OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO.....	5
1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	5
CAPÍTULO 2.....	7
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E METODOLOGIA.....	7
2.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.2. METODOLOGIA	10
CAPÍTULO 3	13
MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO DE FALHAS	13
3.1. DETECÇÃO DE FALHA BASEADA EM MEDIDAS DE VIBRAÇÕES	15
3.1.1. Problema direto.....	16
3.1.2. Problema inverso	17
3.1.3. Métodos baseados nas matrizes estruturais.....	17
3.1.4. Métodos baseados no modelo modal	20
3.1.5. Métodos baseados no domínio do tempo.....	23
3.1.6. Medidas de Tensão/Deformação.....	23
CAPÍTULO 4	25
TÉCNICA DA IMPEDÂNCIA ELÉTRICA.....	25
4.1. CONCEITOS DE MATERIAIS PIEZELÉTRICOS	25
4.2. MÉTODO BASEADO NO PRINCÍPIO DA IMPEDÂNCIA ELÉTRICA	29
4.3. RELAÇÕES FUNDAMENTAIS PARA VÁRIOS SISTEMAS DE VARIÁVEIS INDEPENDENTES	35
4.4. FALHA MÉTRICA	37
CAPÍTULO 5	39
MEDIDOR DE IMPEDÂNCIA DE BAIXO CUSTO.....	39
5.1. MEDIDA DE IMPEDÂNCIA CONVENCIONAL	39
5.2. CIRCUITO ALTERNATIVO PARA A MEDIÇÃO DA IMPEDÂNCIA ELÉTRICA	41
5.3. VALIDAÇÃO DO MIBC	44

CAPÍTULO 6	49
ALGORITMOS GENÉTICOS	49
6.1. HISTÓRICO.....	51
6.2. DEFINIÇÕES DE ALGORITMOS GENÉTICOS	51
6.3. ALGORITMO GENÉTICO SIMPLES (AGS).....	52
6.4. ASPECTOS GERAIS DO ALGORITMO GENÉTICO.....	53
6.4.1. Mecanismo de codificação.....	54
6.4.2. População inicial.....	56
6.4.3. Função de avaliação.....	56
6.4.4. Operador de seleção.....	57
6.4.5. Operador de cruzamento	61
6.4.6. Mutação	62
6.4.7. Parâmetros de controle.....	63
6.4.8. Critérios de Parada.....	64
CAPÍTULO 7	65
RESULTADOS	65
7.1. IMPEDÂNCIA ELÉTRICA	65
7.1.1. Repetibilidade das medidas.....	66
7.1.2. Influência da voltagem aplicada no PZT	67
7.1.3. Área de influência do PZT	68
7.2. MEDIDAS DE IMPEDÂNCIA NUMA BARRA	72
7.2.1. Caso 1: Monitoramento da falha na posição 1.....	73
7.2.2. Caso 2: Monitoramento da falha na posição 2.....	77
7.3. LOCALIZAÇÃO DE FALHAS EM UM VIRABREQUIM	81
7.4. QUANTIFICAÇÃO DE FALHAS	85
CAPÍTULO 8	95
CONCLUSÕES	95
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	99
CAPÍTULO 9	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Fluxograma esquemático da metodologia proposta.....11

Figura 4.1. Conceitos prevaletentes de estruturas inteligentes.....26

Figura 4.2. (a) Alinhamento dos cristais após a polarização. (b) Efeito piezelétrico.....27

Figura 4.3. Direções dos materiais piezelétricos32

Figura 4.4. Modelo usado para representar o acoplamento de um PZT com a estrutura base.....32

Figura 5.1. Circuito atuador auto-sensoriamento.....40

Figura 5.2. Circuito para medida aproximada da impedância no PZT.....41

Figura 5.3. Circuito para medição da impedância aproximada com amplificador.....42

Figura 5.4. Circuito para medir impedância, utilizado para confecção do medidor alternativo.....43

Figura 5.5. Medidor de impedância de Baixo Custo.....43

Figura 5.6. Analisador de impedância HP 4192A.....44

Figura 5.7. Viga de aço utilizada para validação do MIBC.....45

Figura 5.8. Medida de impedância com o HP4192A e o MIBC.....45

Figura 5.9. Medidas de impedância realizadas com o aparelho HP4192A.....46

Figura 5.10. Medida de impedância, utilizando o MIBC, com falha e sem falha.....47

Figura 6.1. Princípio básico de funcionamento de um AG.....52

Figura 6.2. Exemplo de processo de seleção usando a roleta.....58

Figura 6.3. Escalonamento linear59

Figura 6.4. Exemplo de cruzamento com um ponto de corte61

Figura 6.5. Exemplo de cruzamento com dois pontos de corte62

Figura 6.6. Exemplo de cruzamento uniforme62

Figura 6.7. Exemplo de mutação de um gene.....63

Figura 7.1. Curvas de impedância (parte real) das medidas realizadas na estrutura sem e com falha.....66

Figura 7.2. Falha métrica: Teste de repetibilidade.....67

Figura 7.3. Influência da voltagem aplicada no PZT.....68

Figura 7.4. Placa de aço utilizada na determinação da área de influência do PZT.....69

Figura 7.5. Curvas de impedância (real) para cada falha realizada na placa.....70

Figura 7.6. Falha métrica computada para todas as posições de falha.....71

Figura 7.7. Estrutura analisada, posição dos PZTs e posição das falhas.....72

Figura 7.8. Medida de impedância (Real) para uma falha de 0.5 mm, realizada com o PZT 1.....73

Figura 7.9. (a) Medidas de impedância (Real) e (b) Medidas de referência e falha de 2.5 mm.....74

Figura 7.10. Falha métrica calculada a partir do monitoramento com o PZT 1.....75

Figura 7.11. Medidas de impedância realizadas com o PZT 2 e falhas na posição 1.....76

Figura 7.12. Falha métrica calculada a partir do monitoramento com o PZT 2.....76

Figura 7.13. Medidas de impedância real realizadas com o PZT 1, para a falha na posição 2.....78

Figura 7.14. Falha métrica calculada para as falhas 0:0.5:2.5, utilizando o PZT 1.....	79
Figura 7.15. Medidas de impedância real realizadas com o PZT 2.....	80
Figura 7.16. Falha métrica calculada para as falhas 0:0.5:2.5, utilizando o PZT 2.....	80
Figura 7.17. Estrutura mecânica ensaiada com elementos-PZTs e posição da falha na estrutura.....	81
Figura 7.18. Fotos da estrutura teste e da falha inserida na estrutura.	82
Figura 7.19. Impedância dos PZTs colados na estrutura. Falha de 1.4 mm de profundidade.....	83
Figura 7.20. Falha métrica computada (equação 7.1) para falhas de 0.2 a 1.4 mm.....	84
Figura 7.21. Evolução da falha métrica, em valores absolutos, para as medidas realizadas com o PZT 4.....	85
Figura 7.22. Análise da influência da falha introduzida na estrutura.....	86
Figura 7.23. Posição das falhas e dos PZTs na estrutura analisada.....	88
Figura 7.24. (a) FRFs da estrutura na situação sem falha e com falha, (b) zoom de uma faixa da FRF.....	90
Figura 7.25. (a) FRF plotada para a situação de falhas simultâneas na estrutura. (b) Zoom.....	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1. Propriedades do material PZT.	35
Tabela 4.2. Tipos fundamentais de relações de piezeletricidade.	36
Tabela 7.1. Características da cerâmica piezelétrica utilizada.	66
Tabela 7.2. Dados obtidos para a otimização de todos os elementos.	88
Tabela 7.3. Resultados obtidos pelo AG para o primeiro caso.	90
Tabela 7.4. Resultados obtidos na simulação realizada através do AG.	91
Tabela 7.5. Resultados obtidos pelo AG.	92
Tabela 7.6. Resultados obtidos utilizando AG.	94

LISTA DE SÍMBOLOS

[E]	Matriz de erro
[K]	Matriz de rigidez
[K _{anl}]	Matriz de rigidez analítica
[K _{exp}]	Matriz de rigidez experimental
[M]	Matriz de massa
[C]	Matriz de amortecimento
FRF	Função de Resposta em Frequência
Y(ω)	Admitância elétrica
M	Falha métrica
Z	Impedância absoluta
Z _{i,1}	Impedância de referência
Z _{i,2}	Impedância monitorada
np	Tamanho da população
ρ_c	Taxa de cruzamento
ρ_m	Taxa de mutação
I	Momento de inércia
F _{xe}	Função objetivo

TEBALDI, A., 2003, **Detecção de Falhas Estruturais Usando Sensores e Atuadores Piezelétricos e Algoritmos Genéticos**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (Dem/Feis/Unesp), Ilha Solteira, SP, Brasil.

RESUMO

A tecnologia de materiais inteligentes se tornou uma área de crescente interesse para o desenvolvimento de estruturas que podem incorporar atuadores e sensores capazes de detectar falhas. Extensivas investigações têm sido focadas na tecnologia que integra materiais inteligentes no monitoramento das condições de sistemas. Vários estudos têm sido realizados na área de identificação de sistemas mecânicos e há uma tendência de introduzir otimização em projetos de monitoramento de sinais que permitirá automatização do processo e caracterização de falhas para sistemas complexos. O problema de identificação de variáveis ou detecção de falhas em sistemas mecânicos é uma classe de problemas inversos e, portanto, não apresenta uma solução única. O problema inverso consiste em determinar as causas baseando-se na observação dos efeitos. Nos problemas inversos os parâmetros de falha (comprimento de trinca e/ou localização) podem ser calculados no domínio da frequência ou do tempo. A metodologia proposta neste trabalho utiliza dados no domínio da frequência, e utiliza, em uma primeira etapa, o método da impedância elétrica para se determinar a localização das falhas. Numa segunda etapa é realizada a quantificação da intensidade de falhas, usando algoritmos genéticos. Algoritmos genéticos (AG) são processos de otimização baseados nos princípios de evolução natural. Um AG simula um processo de adaptação em uma população inicial de indivíduos através de operadores genéticos artificiais em cada geração. Em condições de otimização, cada indivíduo da população é codificado em um cromossomo, que representa uma solução genérica para o problema, enquanto a adaptação individual é avaliada por uma função de aptidão.

Palavras chaves: Sensores e atuadores piezelétricos - PZT, Impedância elétrica, Detecção de falhas, Algoritmos genéticos.

TEBALDI, A., 2003, **Structural Fault Detection Using Piezoelectric Sensor and Actuator and Genetic Algorithm**. Master Thesis, Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (Dem/Feis/Unesp), Ilha Solteira, SP, Brasil.

ABSTRACT

Smart material technology has become an area of increasing interest for the development of structures that are able to incorporate actuator and sensor capabilities for fault detection. Extensive investigations have been focused on integrating smart material technology into health monitoring systems. Several studies have been accomplished in the area of identification of mechanical systems and there is a tendency of introducing optimization in projects of signals monitoring, which would allow automation in the process and characterization of faults, even for complex systems. The problem of variables identification or damage detection in mechanical systems is a class of inverse problem and, therefore, it doesn't present a unique solution. The inverse problem consists in determining the causes based on some observation of their effects. In inverse problems the damaged parameters (crack length and/or location) can be calculated in frequency or time domain. The proposal methodology is based on frequency domain, and it uses, in a first stage, the method of electric impedance to determine the location of the faults. Later on takes place the quantification of the fault intensities, in a second stage, by using genetic algorithms. Genetic algorithms (GA) are optimization processes based on principles of natural evolution. A GA simulates an adaptation process taking an initial population of individuals and applying artificial genetic operators in each generation. In optimization conditions, each individual of the population is coded in a string or chromosomes, which represents a trial solution for a certain problem, while the individual adaptation is evaluated through a fitness function.

Keywords: Piezoelectric sensor and actuator - PZT, Electric Impedance, Fault detection, Genetic algorithm.

PUBLICAÇÕES REALIZADAS

1. Trabalho publicado e apresentado: TEBALDI, A., LOPES JR., V., *Identificação de Falhas Estruturais Usando Sensores e Atuadores Piezelétricos e Técnicas de Otimização*, Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM), João Pessoa, Pb, 12 a 16 de agosto de 2002.
2. Trabalho publicado e apresentado: TEBALDI, A., FURTADO, R. M., LOPES JR, V., *Fault Identification in Smart Structures Using Genetic Algorithms and Artificial Neural Networks*, XXII International Modal Analysis (IMAC-2003), Flórida, EUA, 03 a 06 de janeiro de 2003.
3. Trabalho publicado: TEBALDI, A., COELHO, L. S., LOPES JR., V., *Identificação de Falhas em Estruturas Inteligentes Baseada em Otimização Através de Programação Evolutiva*, XXIV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE), Ouro Preto, MG, 29 a 31 de outubro de 2003.
4. Trabalho publicado e apresentado: TEBALDI, A., FURTADO, R. M., SILVA, S., LOPES JR, V., *Structural Health Monitoring Algorithms for Smart Structures*, Pan American Advance Study Institute on Damage Prognosis - PASI, Florianópolis, SC, 19 a 30 de outubro de 2003.
5. Trabalho publicado: TEBALDI, A., LOPES JR., V., APARECIDO, J. B., *Fault Detection Using Piezelectric Devices and Genetic Algorithms*, Inverse Problems, Design And Optimization Symposium, Rio de Janeiro, RJ, 17 a 19 de março de 2004.

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Vibração é um fenômeno importante em máquinas e estruturas. Em alguns casos vibrações podem causar quebra, mau funcionamento ou desconforto. Em outros casos, vibração é o principal mecanismo de operação. Em ambos os casos, é importante entender e detectar o processo de vibração, para assim monitorar este processo. Para entender e detectar vibrações de uma estrutura, primeiro é necessário caracterizar as propriedades de vibrações da estrutura, isto é, ter conhecimento certo de como as partes da estrutura vibram. Caracterização de vibrações é essencial para antecipar os níveis de vibrações ou determinar ações que devam ser tomadas.

A maneira na qual é feita a intervenção nos equipamentos, sistemas ou instalações caracteriza os vários tipos de manutenção existentes. Algumas práticas básicas definem os tipos de manutenção principais como:

- Manutenção corretiva não planejada;
- Manutenção corretiva planejada;
- Manutenção preventiva;
- Manutenção preditiva;
- Manutenção detectiva;
- Engenharia de manutenção.

A manutenção preditiva de máquinas e equipamentos vem encontrando aceitação crescente na indústria. Manutenção preditiva consiste basicamente em monitorar parâmetros que caracterizam a condição de estruturas ou máquinas de forma a poder detectar, prever a época

provável de ocorrência, e se possível, diagnosticar o tipo de falha para que se possa planejar a operação de manutenção na ocasião e de forma conveniente.

Falhas ocorridas em equipamentos e estruturas podem ser devidas a atrito, fadiga, impacto, crescimento de trinca ou alguma outra razão. Para um adequado funcionamento do sistema, a falha deve ser localizada e reparada, se possível. O problema de detecção de falhas está compreendido em localizar, quantificar e estimar a vida útil restante. O local onde a falha está situada pode ter um efeito catastrófico na estrutura. Um monitoramento periódico das condições da estrutura é necessário para avaliar a integridade estrutural. Devido aos avanços nos equipamentos de processamento de sinal, a técnica de detecção de falhas tem evoluído significativamente nas últimas décadas. Os métodos de detecção de falhas podem ser classificados em 2 grupos (Kabeya, 1998): métodos baseados em modelos matemáticos e métodos que não necessitam de modelos.

O diagnóstico de falhas é um processo de avaliação de danos que pode ser pensado de duas maneiras: (1) monitoramento das mudanças de sua condição e, se necessário, parar a operação do equipamento antes de piorar as condições; e (2) garantir que o dano iniciado não se estenda para uma situação de risco. As técnicas de obtenção de (1) estão melhores definidas que as de (2). Uma importante técnica de monitoramento de estruturas é a técnica da impedância eletromecânica. A concepção básica desta técnica é o uso de altas frequências de vibrações para monitorar mudanças na impedância estrutural, numa área local da estrutura, que pode indicar uma falha eminente. Isto é possível usando sensores/atuadores piezelétricos, os quais fornecem medidas diretamente relacionadas com a impedância mecânica da estrutura. As medidas de impedância são, geralmente, realizadas em altas frequências, maiores que 10 kHz. O pequeno comprimento de onda nessas frequências permite a detecção de pequenas mudanças na integridade estrutural. A técnica de monitoramento da saúde estrutural baseada na impedância elétrica tem sido desenvolvida pela utilização de uma variedade de materiais inteligentes e formam um novo método de avaliação não-destrutivo (NDE - Nondestructive Evaluation).

Diversos tipos de materiais, naturais e sintéticos, exibem propriedades piezelétricas. Dentre eles, pode-se citar:

- Cerâmicas piezelétricas. Em particular, as cerâmicas PZT (Titanato Zirconato de Chumbo), têm sido extensivamente utilizadas como elementos atuadores distribuídos, aplicados sob a forma de placas, com espessuras típicas da ordem de 0,1 a 0,2 mm.

- Polímeros piezelétricos. O PVDF (Fluorido de Polivinilideno) tem tido larga utilização como sensores distribuídos, aplicados sob a forma de filmes finos, com espessura típica da ordem de 40 a 120 μ m.

Monitoramento da saúde estrutural (SHM – Structural Health Monitoring) tem sido definido na literatura como aquisição, validação e análise de dados técnicos para facilitar as decisões no gerenciamento do número de ciclos de vida útil. A técnica da impedância elétrica é capaz de detectar falhas, mesmo incipientes, em estruturas e equipamentos. O desafio que vem agregando pesquisadores é apresentar informações quantitativas do dano presente na estrutura, para isto técnicas de otimização computacional, inteligência artificial e outros caminhos têm sido explorados.

Dentre as técnicas que tem se utilizado para quantificar falhas estruturais podemos citar a ferramenta de otimização algoritmos genéticos. Os Algoritmos Genéticos (AG) foram inicialmente desenvolvidos por Holland nas décadas de 60 e 70 e formalmente introduzidos no livro “*Adaptation in Natural and Artificial Systems*” (Holland, 1975). Um AG simula um processo de adaptação tomando uma população inicial de indivíduos e aplicando operadores genéticos artificiais em cada geração. Em condições de otimização, cada indivíduo da população é codificado em um *string* ou cromossomo, o qual representa uma solução possível para um determinado problema, enquanto a adaptação dos indivíduos é avaliada através de uma função de aptidão. Basicamente, aos indivíduos altamente aptos (melhores soluções) são dadas maiores oportunidades de se reproduzirem, trocando partes de informação genética, em um procedimento de acasalamento denominado Cruzamento. O operador de Mutação é utilizado para alterar alguns genes nos cromossomos e causar diversidade na população. A descendência ou nova população pode substituir toda a população atual ou substituir apenas os indivíduos de menor ajuste. Este ciclo de avaliação, seleção e geração, são repetidos até que uma solução satisfatória seja encontrada.

A utilização de algoritmos genéticos se torna interessante quando combinada com alguma técnica de detecção de falhas, como por exemplo, a técnica da impedância elétrica. Esta abordagem será desenvolvida neste trabalho. Quando utilizamos a técnica de impedância elétrica para detectar a região da falha, o número de parâmetros a serem otimizados é reduzido, assim o algoritmo terá maior chance de convergir para a solução ótima do problema abordado, ou seja, detectar a localização exata da falha e a severidade.

Uma outra possibilidade atraente é a utilização do “Lamb wave methods” (Kessler et al., 2002 (b), Raghavan et al., 2004). Esta técnica pode utilizar uma placa de material piezolétrico, PZT, para excitar a estrutura. Técnicas “Lamb wave” fornecem informações sobre o tipo, severidade e localização da falha e são satisfatórios para aplicações em SHM (Kessler et al., 2002 (a)). Esta técnica fornece uma maior informação sobre a localização da falha, assim a proposta de utilizar esta técnica com algoritmos genéticos se torna atraente, pois o número de parâmetros é reduzido.

1.1. Motivação

Aviões, plataformas de petróleo, gasodutos, veículos de lançamento de satélites, satélites e qualquer tipo de estrutura ou máquina são suscetíveis a dano. Aplicações diferentes requerem técnicas diferentes, como por exemplo, análises em baixas ou altas frequências, técnicas baseadas ou não baseadas em modelo matemático, modelo linear ou não linear (Doebling, al de et, 1998), métodos analíticos ou heurísticos, aproximação global e local (Farris e Doyle, 1991). É importante definir vantagens e limitações de cada técnica.

Devido ao grande avanço na área de instrumentação, uma grande mudança aconteceu nos últimos anos para instrumentação de auto monitoramento ativo que incorpora tecnologia de auto-diagnóstico nos sistemas mecânicos para monitorar as condições de operação e o dano estrutural. O crescimento contínuo do uso de novos materiais para fazer sistemas leves e fortes e esquemas de manutenção inteligente, que apenas efetuará o reparo se realmente for necessário, pode ser economicamente atraente.

Monitoramento da saúde estrutural (SHM) é uma tecnologia emergente que conduz ao desenvolvimento de sistemas capazes de monitorar continuamente dano estrutural com uma mínima intervenção humana (Kessler et al., 2002 (a)). As metas de sistemas de SHM buscam melhorar a confiabilidade e a segurança associada à redução de custo com manutenção e, assim, minimizar o custo global de produção. Há vários componentes requeridos para projetar um sistema de SHM próspero e robusto, o qual incluem sistemas de sensoriamento, comunicações e algoritmos para interpretar as grandes quantias de dados. O presente trabalho tem enfoque na utilização de sensores/atuadores piezolétricos, PZT, no diagnóstico de falhas associado aos algoritmos genéticos como ferramenta de otimização para quantificação da severidade de falhas estruturais.

1.2. Objetivo da Dissertação

O objetivo deste trabalho é utilizar a técnica da impedância elétrica para realizar o monitoramento de estruturas e detectar e localizar falhas estruturais. Na segunda etapa é utilizada uma técnica de otimização para estimar a magnitude desta falha. A otimização será realizada usando a técnica dos algoritmos genéticos.

1.3. Organização da Dissertação

Para compreensão do trabalho desenvolvido, é realizado um pequeno resumo de cada capítulo abordado nesta dissertação.

Capítulo 2. Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre detecção de falhas, impedância elétrica, materiais piezelétricos e algoritmos genéticos. A revisão engloba artigos clássicos da literatura e publicações recentes nas áreas de interesse deste trabalho. Em seguida é apresentada a metodologia proposta para este trabalho.

Capítulo 3. Neste capítulo é realizada uma descrição, juntamente com uma revisão bibliográfica, dos principais métodos aplicados na identificação de falhas. Os métodos de detecção de falhas podem ser divididos em três grandes grupos: métodos de detecção no domínio da frequência, métodos de detecção a partir dos modos de vibrar e métodos de detecção no domínio do tempo. Neste capítulo será dada ênfase aos dois primeiros métodos, que aparecem em maior número na literatura especializada.

Capítulo 4. Neste capítulo são apresentados os conceitos básicos do método da impedância elétrica, desde a fundamentação teórica até a aplicação em sistemas reais.

Capítulo 5. Neste capítulo é realizado um estudo sobre funcionamento básico dos medidores de impedância convencionais e uma análise da medida de impedância elétrica. Após este estudo um Medidor de Impedância de Baixo Custo (MIBC) é proposto e construído.

Capítulo 6. Neste capítulo são apresentados os conceitos sobre algoritmos genéticos, realizando um levantamento histórico do surgimento dos AGs. São mostradas também, as principais ferramentas para o desenvolvimento de um AG.

Capítulo 7. Neste capítulo são apresentados os principais conceitos da metodologia proposta neste trabalho. São mostrados também os resultados obtidos utilizando a técnica da impedância elétrica para detectar falha estrutural, assim como, resultados de simulações realizadas para quantificar falhas utilizando AG.

Capítulo 8. Neste capítulo são apresentadas discussões conclusões do trabalho desenvolvido.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E METODOLOGIA

Neste capítulo será apresentada uma revisão bibliográfica da utilização de materiais piezelétricos no problema de detecção e localização de falhas estruturais, assim como a utilização de algoritmos genéticos aplicados à quantificação de falhas estruturais. Os artigos revisados estão organizados em ordem cronológica de publicação. Outros artigos utilizados no desenvolvimento do trabalho são citados no decorrer do relatório. Na última seção deste capítulo é apresentada a metodologia proposta para o desenvolvimento deste trabalho.

2.1. Revisão bibliográfica

Rizos et al. (1990) realizou a localização e quantificação de falhas numa viga engastada-livre a partir dos modos de vibrar da estrutura. Para isto, utilizou resultados analíticos com os modos de vibrar medidos para localizar e estimar a profundidade da falha. A metodologia proposta pode ser usada para identificar falhas em estruturas a partir de dados modais medidos.

Brennan et al. (1994) investigou o uso de elementos piezelétricos como sensores e atuadores de vibrações numa estrutura unidimensional. O modelo analítico de sensores e atuadores piezelétricos excitando a estrutura foi validado através de ensaios experimentais em laboratório.

Banks, et al. (1996) propôs um método não destrutivo para detecção e localização de falhas usando equações diferenciais parciais parametrizadas e a modelagem de falhas em viga de alumínio usando o método de Galerkin. No estudo apresentado a falha foi modelada como furos

na estrutura. Uma investigação teórica, numérica e experimental do uso de estruturas inteligentes (estruturas usando sensores e atuadores piezelétricos) para detectar e localizar falhas estruturais foi realizada.

Napolitano (1997) investigou seis métodos de detecção de falhas usando medidas de vibração estrutural. Uma viga de alumínio, na condição livre-livre, foi usada para gerar as medidas experimentais, que teve suas propriedades de massa e rigidez alteradas. Metodologias que necessitam de modelo analítico são comparadas com metodologias que não requerem um modelo analítico. Os métodos de detecção de falhas são desenvolvidos usando energia de deformação e energia cinética para ambos os casos. Um outro método baseado nas diferentes deformações entre uma estrutura amortecida e não amortecida é desenvolvido para os casos onde o modelo analítico não está disponível. Finalmente, o método de vetores de força residual, que usa modelo analítico da estrutura não amortecida, é também discutido.

Doebling et al. (1998) realizou uma revisão dos métodos de detecção, localização e caracterização de danos em estruturas e sistemas mecânicos, examinando as medidas da resposta de vibração. Os métodos são classificados como métodos baseados em modelos vs. métodos não baseados em modelos e métodos lineares vs. não lineares. No artigo é discutido assuntos críticos para pesquisas futuras na área de identificação de danos baseadas em vibrações.

Friswell e Penny (1998) localizaram falhas em estruturas utilizando algoritmos genéticos com dados de vibrações. O objetivo do trabalho realizado foi identificar a posição de uma ou mais falhas na estrutura e estimar a magnitude destas falhas. As simulações de falhas foram realizadas numa viga engastada-livre em duas posições diferentes. Os autores realizaram uma análise experimental em uma placa.

DeGuilio (2000) descreveu a técnica de monitoramento baseado na impedância da estrutura, desenvolvida para o sistema de controle ativo. Esta técnica foi usada em conjunto com o sistema de controle ativo para prover simultaneamente controle e monitoramento das condições de uma placa teste. DeGuilio apresentou resultados experimentais com o monitoramento das condições.

He et al. (2001) propôs e descreveu um método baseado em algoritmos genéticos para detectar falhas na haste de um sistema de rotor. O processo de detecção de falhas na haste é formulado como um problema de otimização, discretizando a haste em elementos finitos e utilizando algoritmo genético para encontrar uma solução. Usando esta metodologia, eles expressaram problemas inversos como sendo um problema de minimização com a função objetivo sendo a diferença entre as saídas computadas pelo método de elementos finitos e saídas de vibrações da haste no mesmo ponto. O estudo realizado indica que a metodologia proposta tem potencial para resolver uma vasta faixa de problemas inversos de identificação.

Inman (2001) examinou o uso de materiais inteligentes (materiais piezelétricos - PZT) em aplicações estruturais, chamando estas estruturas de estruturas inteligentes. No estudo realizado é apresentada uma introdução às estruturas inteligentes e o usos delas em supressão de vibrações, controle de vóo e monitoramento da saúde estrutural. Apresenta ainda um resumo e problemas do monitoramento da saúde estrutural, usando materiais inteligentes.

Lopes et al. (2001) apresentou uma metodologia que combina a técnica da impedância elétrica com um modelo de diagnóstico, baseado num processo de otimização, para detectar e localizar falhas estruturais. A localização da falha na estrutura real é obtida através da técnica da impedância elétrica, enquanto, a severidade é obtida através de otimização hierárquica, baseada em um modelo reduzido de estrutura.

Simões & Steffen (2002) Utilizam uma metodologia para a caracterização da presença de falhas em sistemas de rotor, consiste em avaliar a alteração da rigidez no eixo causada pela presença destas, e então obter as propriedades dinâmicas do rotor, utilizando suas equações de movimento, considerando a influência da rigidez modificada. Utiliza algoritmos genéticos como estratégia de identificação. A ferramenta utilizada (algoritmo genético) mostrou-se eficiente, conseguindo uma boa estimativa na identificação dos parâmetros reais.

Rutherford et al. (2003) introduziram um novo conceito de momentos de impedância, o qual é análogo ao conteúdo de energia no sistema, para facilitar a interpretação dos dados de medidas de impedância elétrica. O momento de impedância é encontrado para ser eficiente no monitoramento de estruturas, com performance superior comparada a aquela tipicamente usada para métodos de impedância. Nos métodos de impedância a caracterização da sensibilidade a falha é tradicionalmente empregada com o uso de uma falha métrica escalar.

2.2. Metodologia

A metodologia proposta para este trabalho pode ser dividida em 2 partes separadamente. Na primeira se determina a localização da falha através do método de impedância elétrica. Este método é baseado em altas faixas de frequência e modos locais e, portanto, a área de influência de cada sensor/atuador, PZT, é pequena e define com boa exatidão a região da localização da falha. É importante notar que este método não é capaz de fornecer a severidade da falha. A segunda parte desta metodologia fornece informações quantitativas da falha, através de um método de otimização. Neste trabalho é utilizada a técnica de algoritmos genéticos. Algoritmos Genéticos são algoritmos de otimização global, baseados nos mecanismos de seleção natural e da genética. Eles empregam uma estratégia de busca paralela e estruturada, mas aleatória, que é voltada em direção ao reforço da busca de pontos de "alta aptidão", ou seja, pontos nos quais a função a ser minimizada (ou maximizada) tem valores relativamente baixos (ou altos). Uma discussão sobre a técnica da impedância elétrica e da teoria de algoritmos genéticos será realizada nos próximos capítulos.

O problema direto, que consiste na determinação da variação das propriedades modais em função das variações físicas dos parâmetros da estruturas, tem solução única. No entanto, a caracterização de falhas, que é um problema inverso, não apresenta solução única. Qualquer método de otimização que pretenda ajustar o modelo terá grande chance de fracassar para sistemas com nível médio de complexidade ou maior. Existem vários métodos de redução dos modelos ou de escolha das variáveis que são geralmente, utilizadas no ajuste. Entre os utilizados, pode-se citar a análise de sensibilidade. No entanto, a falha pode ocorrer em posições onde a variação daqueles parâmetros apresenta baixa sensibilidade.

A principal vantagem da proposta apresentada neste trabalho é que o método de impedância elétrica define com boa exatidão a região da localização da falha. Com isto é possível reduzir o número de variáveis que serão utilizadas no processo de otimização. Este é um

método baseado em modelo matemático e, portanto, é necessário que o modelo inicial da estrutura seja confiável. A figura 2.1 mostra um fluxograma esquemático da metodologia proposta.

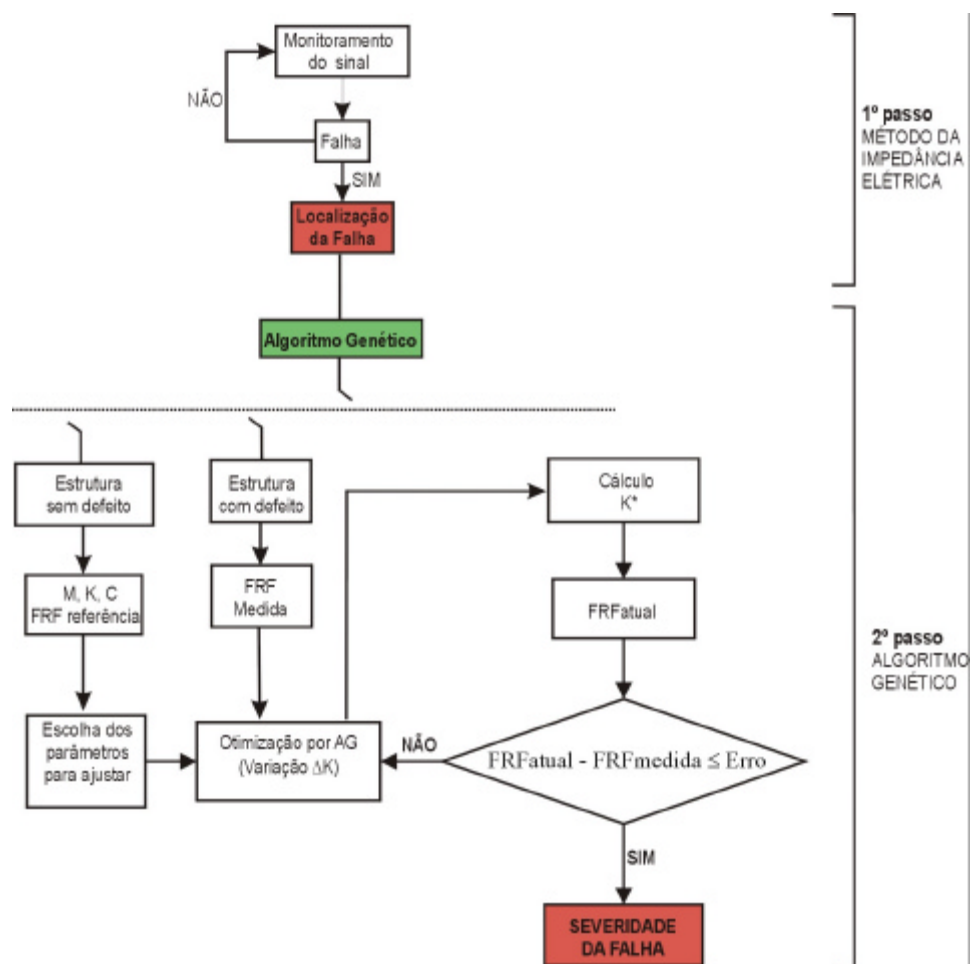


Figura 2.1. Fluxograma esquemático da metodologia proposta.

A escolha dos parâmetros, que serão utilizados para quantificar a falha, é realizada após a localização da região da falha. Após a definição destes parâmetros, calcula-se M^* , K^* e C^* e a FRF_{atual} para cada iteração. O ajuste da FRF_{atual} e da FRF_{medida} (situação com defeito) é feito através da técnica de otimização utilizando AG. Quando a diferença entre estas curvas é menor que um valor especificado (Erro) ou o número máximo de gerações é atingido o processo termina. A diferença entre as matrizes do sistema sem falha, M , K e C , e das matrizes M^* , K^* e C^* , do sistema com falha, fornecem a quantificação do defeito.

Capítulo 3

MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO DE FALHAS

Estruturas ou sistemas mecânicos, às vezes, são submetidos a grandes esforços, os quais podem levar a uma deterioração das condições originais de trabalho. Estes danos podem ser devido à fadiga, impacto, evolução de trincas ou algum outro motivo e causam incômodos como, por exemplo, o aumento das vibrações. A necessidade de monitorar e reparar estruturas tem originado diferentes técnicas de detecção de falhas. As primeiras investigações em detecção de falhas usando informações de vibrações apareceram nos anos 70. Doebling et al. (1998) atribuiu o desenvolvimento inicial no campo de vibrações para as indústrias petrolíferas, enquanto Dimarogonas (1996) atribui às indústrias de geração de energia os primeiros estudos num problema específico de identificação de falhas. Desde o início dos anos 80, o assunto “detecção de falhas usando medidas de vibrações” tem recebido grande atenção de engenheiros e centros de pesquisa, como as áreas de engenharias mecânica e civil, aplicações aeroespaciais e náuticas. Nos anos 90, detecção de falhas se tornou um tópico corrente para sessões técnicas em conferências e simpósios, sendo o principal tema da *15^a International Modal Analysis Conference* com mais de 400 artigos apresentados.

Os efeitos de falhas em estruturas podem ser classificados como lineares ou não lineares (Doebling et al. 1998). Uma situação de falha linear é definida como o caso no qual uma estrutura inicialmente elasto-linear permanece elasto-linear após o dano. As mudanças nas propriedades modais são resultados de mudanças na geometria e/ou nas propriedades da estrutura, mas a resposta estrutural pode ainda ser modelada usando equações lineares de movimento. Métodos lineares podem ainda ser classificados como métodos baseados em modelos matemáticos ou métodos que não utilizam modelos matemáticos.

Métodos baseados em modelos, tais como os métodos que utilizam algoritmos genéticos como uma técnica de otimização para determinar a amplitude da falha, assumem que a estrutura monitorada responde de alguma maneira predeterminada, que pode ser precisamente discretizada, por exemplo, por análise de elementos finitos, tais como a resposta descrita pela teoria de viga de Euler-Bernoulli.

Falha não linear é definida como o caso no qual uma estrutura inicialmente linear e elástica se comporta de maneira não linear após a introdução da falha. Um exemplo de falha não linear é a formação de uma rachadura por fadiga, que subsequente abre e fecha sob condições de operação normal. Outros exemplos incluem perdas de conexões, as quais podem gerar ruídos devido ao movimento relativo das peças que se soltam, e ao próprio comportamento de materiais não lineares, tais como os que são exibidos nos polímeros. A maioria dos estudos relatados na literatura técnica se refere somente ao problema da detecção de falha linear.

Um outro sistema de classificação define quatro níveis de identificação de falhas, (Rytter et al. 1993).

- Nível 1 – Determinação de que a falha está presente na estrutura.
- Nível 2 – Nível 1 mais a determinação da localização geométrica da falha.
- Nível 3 – Nível 2 mais a quantificação da severidade da falha.
- Nível 4 – Nível 3 mais predição da vida de serviço da estrutura que ainda resta.

Inman (2001) adiciona mais três níveis. Todos incorporando a utilização de materiais inteligentes.

- Nível 5 – Combina o nível 4 com estruturas inteligentes para auto-reparo de falhas estruturais.
- Nível 6 – Combina o nível 4 com estruturas inteligentes e controle para formar um sistema de auto-reparo estrutural.
- Nível 7 – Combina o nível 1 com controle ativo e estruturas inteligentes para obtenção de um sistema simultâneo de controle e monitoramento.

Métodos de identificação de falhas baseados em medidas de vibrações proporcionam apenas os níveis 1 e 2 de identificação de falhas. Quando métodos baseados em vibração são

combinados com um modelo estrutural, o nível 3 de identificação de falha pode ser obtido em alguns casos. O nível 4 de predição é geralmente associado com o campo da mecânica da fratura ou análise de vida em fadiga.

A proposta do atual trabalho é combinar os níveis 3 e 7, ou seja, detectar e estimar a magnitude da falha na estrutura e realizar o monitoramento on-line das condições da estrutura, utilizando sensores/atuadores piezelétricos.

Um dano estrutural pode ser resultado de inúmeras causas. Um tipo de falha estrutural é a trinca. Estágios iniciais de trinca podem não ser detectados por métodos tradicionais, tal como, inspeção visual. Entre os métodos classificados como Testes Não-destrutivos (TND), tem-se os métodos que utilizam ultrassom, raios X, ensaios de cargas, métodos de emissão acústica e os ensaios dinâmicos. Os ensaios dinâmicos constituem um grande grupo de métodos para detecção de falhas, utilizando medidas de vibrações para detectar, localizar e caracterizar danos estruturais.

3.1. Detecção de falha baseada em medidas de vibrações

As primeiras investigações em detecção de falhas, a partir de dados de vibrações, foram publicadas bem antes do estabelecimento de análise modal experimental como uma técnica popular de laboratório. Uma revisão geral dos métodos de detecção de falhas baseados em dados de vibrações foi apresentada por Friswell e Penny (1997). Eles especificaram três tipos básicos de dados usados nas medidas de vibrações dinâmicas: domínio do tempo, domínio da frequência e modelo modal. Doebilng et al. (1998) realizou uma revisão dos métodos de detecção, localização e caracterização de falhas em estruturas e sistemas mecânicos a partir da análise de medidas da resposta de vibração.

O problema de detecção de falhas é classificado como um problema inverso, o qual, consiste em determinar as causas tendo como referência os efeitos. Em problemas inversos os parâmetros de falha (comprimento e/ou localização) podem ser calculados através da variação da frequência natural. Pôr outro lado, problemas diretos consistem na determinação da solução a partir da completa descrição das causas.

3.1.1. Problema direto

O problema direto consiste em calcular a variação da frequência para um conhecido tipo de falha. Tipicamente, a falha é modelada matematicamente, então as frequências medidas experimentalmente são comparadas as frequências previstas para se determinar o dano. Este método foi usado extensivamente nas plataformas de petróleo. Como exemplo, Cawley e Adams (1979) propuseram uma formulação para determinar danos em materiais compósitos a partir da mudança de frequências. Eles começaram com a razão entre a mudança de frequência para dois modos diferentes. Uma rede de possíveis danos é considerada e um termo de erro é construído, o qual relaciona as mudanças de frequências medidas à aquelas previstas pelo modelo baseado em uma redução de rigidez local. Um número dos pares modais é considerado para cada localização do dano em potencial. O par com menor erro, indica a localização do dano. Esta formulação não se aplica para localização de danos múltiplos.

Friswell, Penny e Wilson (1994) apresentam os resultados de um ensaio para identificar danos baseados em um catálogo de prováveis danos. Usando um modelo adequado, calcula-se as variações das frequências dos primeiros modos para a estrutura sem danos e todas as situações de danos a serem consideradas, então, a razão de todas as mudanças de frequências são calculadas. Para a estrutura em análise, as mesmas razões são calculadas e uma relação é ajustada para estes dois conjuntos de números. Quando o conjunto de dados é livre de ruídos e quando a estrutura em análise pertence a uma classe de danos assumida, o tipo correto do dano produz uma linha com inclinação unitária. Para todos os outros tipos de danos o ajuste será impreciso. A probabilidade da identificação do dano depende da qualidade do ajuste, para cada padrão de dano conhecido. Duas medidas de ajuste são usadas: a primeira é relacionada ao coeficiente de correlação, e a segunda é uma medida normalizada do expoente e do coeficiente de correlação. Ambas medidas são definidas em uma escala de 0 a 100 e, assume-se que o dano está presente quando ambas as medidas estão próximas de 100.

Juneja, Haftka e Cudney (1997) apresentam uma técnica chamada “maximização do contraste” para ajustar a resposta de uma estrutura danificada a um conjunto de danos estruturais para localizar o dano. Eles também desenvolveram uma medida preditiva da detectabilidade de danos.

3.1.2. Problema inverso

O problema inverso, o qual é típico em identificação de falhas, consiste no cálculo dos parâmetros do dano (como por exemplo, tamanho e/ou localização) em função da variação da frequência. Os primeiros a publicarem artigo em periódicos sobre detecção de falha por medidas de vibração foram Lifshitz e Rotem, (1969), citados por Doebling et al. 1998. Eles observaram a mudança no módulo dinâmico, que pode ser relacionado pela mudança de frequência, como um indicativo de falha. O módulo dinâmico, que é a inclinação da curva tensão-deformação sob cargas dinâmicas, foi calculado para diversas situações.

Stubbs e Osegueda (1990a, 1990b), citados por Doebling et al. 1998, desenvolveram um método de detecção de falha usando o critério de sensibilidade da frequência modal, que é baseado no trabalho de Camley e Adams (1979). Neste método, uma função erro para cada modo e cada membro estrutural é calculada, assumindo-se dano em apenas um elemento. O elemento que minimiza esse erro é assumido como elemento em situações de dano. Este produz resultados mais precisos do que o método de Stubbs e Osegueda, em que o número de membros são maiores do que o número de modos medidos. Eles mostram que o método da sensibilidade de frequência se apóia na sensibilidade das matrizes que são computadas, usando a formulação de elementos finitos. Isto exige um aumento da carga computacional e também aumenta a dependência na exatidão de um modelo numérico.

Morassi e Rovere (1997) apresentaram uma técnica inversa para localizar efeitos de entalhes em armação de aço usando mudanças nas frequências modais. Este estudo é baseado na exatidão do modelo da estrutura assumida como intacta e a praticidade de se fazer medidas de vibração no campo.

3.1.3. Métodos baseados nas matrizes estruturais

Estes métodos usam matrizes estruturais para identificar falhas através da determinação do elemento, identificando o erro ou perturbação na matriz. Para utilizar esta técnica é necessário que a estrutura seja discretizada em elementos finitos e as medidas experimentais da estrutura com falha são comparadas com dados obtidos da estrutura sem falha. Mannan e Richardson (1990) propuseram a estimação das matrizes de massa, rigidez e amortecimento a partir de dados modais medidos e as diferenças entre estes dados e as matrizes sem falha para determinar a localização da falha.

Método do erro na matriz de rigidez

O método da matriz de erro da rigidez é baseado no cálculo de uma matriz de erro. Esta matriz é função da variação da matriz de flexibilidade estrutural e da matriz rigidez para a estrutura sem falha. Em outras palavras, a função erro é definida como a diferença entre as matrizes de rigidez analítica (ou sem falha) e a experimental (ou com falha),

$$[E] = [K_{ani}] - [K_{exp}]$$

He e Ewins (1986) apresentam a matriz de erro da rigidez como um indicador de erros entre os parâmetros medidos e as matrizes de rigidez e de massa analíticas. Para identificação de falha, a matriz de rigidez geralmente produz mais informações do que a matriz massa e é, portanto, comumente usada no método da matriz erro. Gysin (1986) demonstrou a dependência deste método em função do tipo de redução da matriz e do número de modos usados para formar as matrizes de flexibilidade. Ele comparou as técnicas de redução de eliminação, redução de Guyan e redução indireta. As duas últimas técnicas apresentaram resultados satisfatórios, as quais não foram obtidas considerando-se a primeira técnica.

A matriz de flexibilidade residual representa a contribuição dos modos que estão fora da faixa medida. A matriz flexibilidade exata pode ser relatada para os modos medidos e a flexibilidade residual. Doebling, et al. (1996) apresentam uma técnica para estimar parte da matriz de flexibilidade residual não medida, porque apenas uma coluna da matriz de função de resposta em frequência (FRF) pode ser medida para cada excitação modal. Esta técnica não adiciona nenhuma informação nova para a flexibilidade residual, mas ela completa a matriz de flexibilidade residual. Com isto esta matriz pode ser usada no cálculo da flexibilidade medida. Os autores demonstraram que a inclusão da flexibilidade residual no cálculo da matriz de flexibilidade medida produz uma estimativa precisa da matriz de flexibilidade estática.

Métodos Baseados na Medida da Flexibilidade Dinâmica

Uma outra classe de métodos de identificação de falhas usa a matriz de flexibilidade dinâmica medida experimentalmente para estimar mudanças no comportamento da estrutura estática. A matriz de flexibilidade é definida como o inverso da matriz rigidez estática e relaciona a força estática aplicada e o deslocamento estrutural resultante. Deste modo, cada coluna da matriz flexibilidade dinâmica representa o deslocamento padrão da estrutura associado com a unidade de força aplicada no grau de liberdade (DOF) correspondente. A matriz de

flexibilidade dinâmica medida pode ser estimada a partir da massa normalizada, das medidas da forma do modo e das frequências. A formulação da matriz flexibilidade dinâmica por este método é aproximada, devido ao fato de que apenas os primeiros modos da estrutura são medidos. A obtenção da matriz completa de flexibilidade estática requer a medida de todos os modos de vibração e das frequências.

Tipicamente, a falha é detectada comparando-se as matrizes flexibilidade obtidas através da estrutura com falha, com a matriz flexibilidade de um modelo de elemento finito para a estrutura sem falhas. A matriz flexibilidade é mais sensível às variações nos modos de baixas frequências da estrutura.

Aktan, et al. (1994) propôs o uso da medida da flexibilidade como um índice de condição para indicar a integridade relativa de uma ponte. Eles aplicaram esta técnica para duas pontes e analisaram a exatidão das medidas de flexibilidade comparando-as com as medidas de deflexões estáticas induzidas por um grupo de vagões de carga.

Pandey e Biswas (1994, 1995), citados por Doebling et al. 1998, apresentam um método para detecção e localização de falhas baseado nas mudanças da flexibilidade medida na estrutura. Este método foi aplicado para vários exemplos numéricos e para uma viga real específica. Resultados dos exemplos numérico e experimental mostraram que a estimativa da condição de falha e da localização pode ser obtida através da medida dos dois primeiros modos da estrutura.

Mayes (1995), citado por Doebling et al. 1998, usou medidas da flexibilidade, para localizar falha, obtidas através de um teste modal em uma ponte. Ele também propôs um método para usar a medida de flexibilidade como uma entrada para um método de localização de falha (STRECH). Este método avalia as mudanças na relação carga-deflexão para uma estrutura com modelo massa-mola. Peterson, Doebling e Alvin (1995) propuseram um método para decompor a matriz flexibilidade medida em parâmetros de rigidez elementares para uma assumida conexão estrutural. Zhang e Aktan (1995), citados por Doebling et al. 1998, sugerem que a mudança na curvatura de uma superfície com carga uniforme é um sensível indicador do local da falha. Eles apontaram que as mudanças na carga superficial uniforme são apropriadas para identificar deterioração uniforme. A matriz de flexibilidade com carga uniforme é construída somando as colunas da matriz de flexibilidade medida. A curvatura é então calculada para flexibilidade de carga uniforme, usando um operador diferencial central.

Um outro método bastante usado é o método de comparação da unidade. Este método é baseado na relação da pseudoinversa entre a medida da matriz de flexibilidade dinâmica e a

matriz de rigidez estrutural. Uma matriz de erro é definida para quantificar esta relação. Esta relação usa a pseudoinversa, pois a matriz de flexibilidade dinâmica é tipicamente deficiente. Lim (1990), estendeu o método da comparação da unidade para o problema de detecção de falhas. Ele definiu um problema de mínimos quadrados para mudanças na rigidez elementar, a qual é consistente com a comparação de erro da unidade, para membros em avançado estágio de falhas.

3.1.4. Métodos baseados no modelo modal

Vários trabalhos procuram examinar as mudanças nas propriedades básicas modais. Neste contexto, as propriedades básicas modais são definidas como frequência natural, amortecimento modal e a forma do modo vetorial.

Em plataformas marítimas as variações de frequência originadas devido a surgimento de falhas são difíceis de ser distinguidas de mudanças resultantes do aumento de massa em razão da maresia. Testes conduzidos em pontes de auto estrada nos Estados Unidos demonstraram que as mudanças de frequências não são indicadores sensíveis de falha para aquele sistema específico, Farrar (1997). Quando a rigidez da seção transversal de uma viga central foi reduzida em 96,4%, reduzindo a flexibilidade de toda a seção transversal da ponte em 21%, nenhuma alteração significativa na frequência modal foi observada. Até o momento, usando equipamentos convencionais, a variação das frequências para detectar o aparecimento de falhas são usadas em aplicações práticas onde tais mudanças podem ser medidas precisamente em ambientes controlados.

Devido ao fato que as frequências modais são propriedades globais da estrutura, não é totalmente claro que mudanças nestes parâmetros possam ser usadas para identificar além do nível 1 e 2 de falha. Em outras palavras, as frequências geralmente não podem proporcionar informações espaciais sobre mudanças estruturais. Uma exceção a esta limitação ocorre para altas faixas de frequências modais, onde os modos estão associados com respostas locais. No entanto, as limitações práticas envolvidas com a excitação e a extração destes modos locais, causadas em parte por altas densidades modais, pode torná-las de difícil identificação. É neste contexto que se insere como proposta do atual trabalho a aplicação da técnica de impedância elétrica. Múltiplas mudanças de frequências podem proporcionar informações espaciais sobre falhas estruturais, pois diferentes localizações de falhas causam diferentes combinações nas

variações das frequências modais. Este problema pode não apresentar solução única, pois a combinação de alteração de diferentes parâmetros podem levar a mesma variação das frequências. Kamiski (1997) e Lopes e Inman (1999) usaram uma adequada normalização adimensional para as combinações das alterações das frequências modais e obtiveram identificação única da localização da falha.

Métodos Baseados na Mudança da Frequência Natural

Mudanças nas propriedades estruturais causam mudanças nas frequências de vibração. As primeiras tentativas para detectar mudanças nas frequências naturais foram publicadas por Adams (1978). Ele usou a relação da mudança de frequência em dois modos diferentes como uma função apenas da posição da falha e usou esta relação para realizar a localização. Um resumo dos métodos baseados apenas nas frequências naturais pode ser encontrado em Salawu (1997). Deve ser notado que mudanças das frequências tem limitações práticas significativas para aplicações em alguns tipos de estruturas, pois a baixa sensibilidade das mudanças das frequências devido às falhas exige medidas precisas, ou que as falhas estejam em um nível acelerado de dano. No entanto, recentes estudos mostram que as frequências ressonantes tem pequenas variações estatísticas devidas a erros aleatórios, diferentemente de outros parâmetros modais. O dano, em sua fase inicial, é um fenômeno local e pode ser determinado utilizando-se técnicas que empregam altas frequências. Embora os métodos convencionais que utilizam baixa faixa de frequências para a caracterização de danos tenham algumas limitações práticas, a associação destes métodos com a proposta deste trabalho, de se usar a técnica de impedância elétrica, pode sobrepor grande parte destas dificuldades.

Variação na forma dos modos de vibração

West (1984), citado por Doebling et al. 1998, apresenta o que possivelmente seja o primeiro uso sistemático de informação do modo de vibração para a localização de falha estrutural sem o uso de um modelo de elementos finitos a priori. West usou o fator de correlação modal (MAC) para determinar o nível de correlação entre os modos da estrutura sem falha e os modos após a situação de danos. A mudança no valor MAC é relacionada às mudanças na forma do modo e então relacionada à falha estrutural.

Fox (1992), citado por Doebling et al. 1998, demonstra que as medidas de variação no modo de vibrações assim como o MAC são relativamente insensíveis à falha em uma viga com

corde. Isto realça também o problema que a compressão de dados pode causar na identificação da falha. Os valores MAC medidos na proximidade de um ponto modal é um indicador sensível de variações no modo de vibração causado pela falha. Comparações gráficas de mudanças relativas no modo de vibração prova ser o melhor modo de detecção e localização de falha quando apenas a frequência de ressonância e o modo de vibração são examinados. Um método simples de correlação dos pontos nodais (em modos que mostram relativamente pouca mudanças na frequência de ressonância) com os correspondentes picos de amplitude (nos modos que mostram grandes mudanças na frequência de ressonância) pode ser utilizado para localizar falhas. A escala de mudanças relativas no modo de vibração podem identificar a localização da falha.

Ratcliffe (1997) apresenta uma técnica para localizar falhas em viga, que usa uma diferença finita da aproximação do operador Laplaciano no cálculo do modo de vibração. Cobb e Liebst (1997b), citado por Doebling et al. 1998, apresentam um método priorizando a localização de sensores para identificação de falha estrutural baseado em uma análise da sensibilidade dos autovetores. Skjaeraek, Nielsen e Cakmak (1996b), citado por Doebling et al. (1998), utilizam a localização ótima de sensores para detectar falha estrutural baseado nas variações dos modos e nas frequências modais usando um método de subestruturação.

Uma alternativa para usar o modo de vibração para obter informação espacial sobre a fonte de mudança na vibração é usar derivadas do modo de vibração, semelhante à curvatura. Para vigas, placas e cascas, existe em relação direta entre a curvatura e a deformação de flexão. Algumas pesquisas discutem a prática da medida de deformação direta ou através de medidas de deslocamento ou aceleração.

Pandey, Bisdwas e Samman (1991) demonstram que mudanças absolutas na curvatura do modo de vibração pode ser uma boa indicação de falha para o modelo de elemento finito (FEM) em estruturas de vigas. Os valores da curvatura são computados do deslocamento do modo de vibração usando o operador diferencial central.

Stubbs, Kim e Topole (1992), citado por Doebling et al. 1998, apresentam um método baseado no decréscimo da energia de deformação modal entre duas estruturas, como definido pela curvatura da forma dos modos medidos, enquanto, Stubbs e Kim (1996), citado por Doebling et al. 1998, examinam a possibilidade de localizarem falha usando a técnica sem os parâmetros modais de referência.

3.1.5. Métodos baseados no domínio do tempo

Os métodos de detecção de falhas no domínio da frequência têm tido uma maior atenção por pesquisadores do que os métodos baseados no domínio do tempo. Nos métodos baseados no domínio da frequência as frequências naturais da estrutura ou os modos de vibrar ou uma combinação de ambos, são usados para detectar a falha. Nos métodos no domínio do tempo, medidas de resposta no tempo são usadas para detectar mudanças na massa ou rigidez da estrutura. Uma técnica, usando métodos no domínio do tempo, desenvolvida por Hajela (1990) usa medidas de resposta dos dados de entrada e saída para determinar a variação dos parâmetros do sistema, simulando o comportamento de uma estrutura. Branks (1996) desenvolveu um método que usa minimização do erro por mínimos quadrados para ajustar vários modelos de falha numa viga engastada-livre.

Melo (1998) desenvolveu uma metodologia para detecção e localização de falhas em sistemas mecânicos discretos usando a técnica dos observadores de estado. A metodologia utiliza dados medidos no tempo e tem a capacidade de reconstruir os estados não medidos do sistema ou os pontos de difícil acesso. Os parâmetros sujeitos a falhas são escolhidos e projetam-se observadores globais que analisa todo o sistema. A cada parâmetro sujeito a falhas, são projetados observadores robustos que tem a capacidade de localizar a irregularidade no sistema.

Lemos (2004) desenvolveu uma metodologia para detecção e localização de falhas em sistemas contínuos (sistemas de rotores), utilizando a técnica dos observadores de estado. Esta técnica consiste no desenvolvimento do modelo a ser analisado e compara as saídas dos observadores com a saída do sistema.

3.1.6. Medidas de Tensão/Deformação

O propósito de medidas de tensão e deformação, em outras palavras mecânica experimental, é checar se as estruturas projetadas e construídas são capazes de suportar os carregamentos esperados e se, também, estruturas envelhecidas podem suportar o carregamento máximo esperado ou não. Inspeção não destrutiva (NDI-nondestructive inspection) pode ser dividida em controle da manufatura e inspeção da manutenção (monitoramento da condição). A primeira etapa reduz o número de produtos defeituosos nas linhas de produção e a segunda verifica a segurança das estruturas. Para avaliação da segurança das estruturas projetadas e em uso, pode-se dizer que medidas de tensão/deformação e inspeção não destrutiva tem o mesmo

objetivo, apesar das diferenças tecnológicas. No entanto, medidas de tensão/deformação não tem sido utilizadas freqüentemente para desenvolver estudos para a manutenção de equipamentos e estruturas. O processo de desenvolvimento de alguns tipos de falhas, ou deterioração, é um fenômeno com pequena velocidade de mudança, então não é fácil a quantificação desta variação através de medidas de tensão e deformação.

Capítulo 4

TÉCNICA DA IMPEDÂNCIA ELÉTRICA

4.1. Conceitos de materiais piezelétricos

Na natureza a adaptação é uma das características que os organismos têm para se adequar ao ambiente em que vivem. Podemos ressaltar dois tipos principais de adaptação quanto ao tempo: em curto prazo onde, por exemplo, o camaleão possui a capacidade de se adaptar ao meio em que vive, mudando de cor de acordo com o ambiente; e em longo prazo onde, por exemplo, demorou um certo tempo para ocorrer mudanças na curvatura dos ossos nas asas de um pássaro para que ganhe tempo de vôo.

Em engenharia as inovações científicas e tecnológicas provêm, em sua grande maioria, de adaptações em longo prazo, onde o projeto e a performance dos sistemas são melhorados em função destas inovações. Para estruturas de engenharia, devido ao acelerado avanço tecnológico e a alta competitividade do mercado, busca-se adaptações em curto espaço de tempo, pois estas não apresentam características de vida e de adaptação em função do meio ambiente ou da necessidade de sobrevivência.

Embora existam diversas definições para o termo inteligente (“Smart”), a comunidade de engenharia tem adotado o termo de estruturas inteligentes (“Smart Structures”) desde o início da década 90 para descrever estruturas ou componentes estruturais com habilidades especiais e, que não são encontradas em materiais/estruturas convencionais. Um detalhamento destas propriedades será dado a seguir, no entanto, a figura 4.1, mostra de uma maneira sucinta a analogia entre estruturas inteligentes e os seres vivos. (Egawa, 1997)

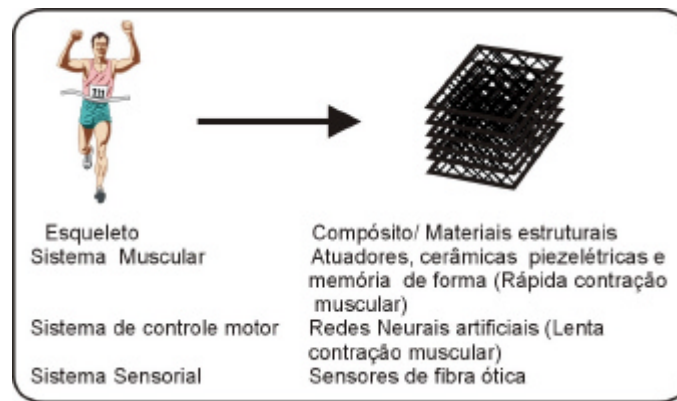


Figura 4.1. Conceitos prevaletentes de estruturas inteligentes.

A ciência de estruturas inteligentes é recente e nesta conjuntura podemos ter uma visão desta tecnologia como uma oportunidade para resultados em longo prazo, ou podemos examinar os impactos que as estruturas inteligentes terão na habilidade do sistema para exibir adaptação em curto prazo. O estudo da tecnologia de estruturas inteligentes é importante devido ao potencial demonstrado para estruturas convencionais em várias aplicações. Pode-se citar, por exemplo:

- Aplicações para controle ativo, que tipicamente fornece supressão de vibração para faixas de frequências baixas, se comparado a métodos passíveis disponíveis, Clark, Saunders e Gibbs, 1998.
- A presença de algoritmo de controle adaptativo que fornece um crítico mecanismo de adaptação em curto prazo em resposta a mudanças em uma variedade de parâmetros do sistema, Silcox et al. 1992.
- Estratégias com uso duplo, que pode frequentemente ser implementado para combinar alguns números de performances objetivas, incluindo uma performance estrutural melhorada (redução de vibração, redução de emissão acústica, etc.), ou aliviando situações de danos usando uma plataforma de estrutura adaptativa, Gabbert et al., 1998.
- Sistemas de auto monitoramento das condições de máquinas ou estruturas (self-health monitoring), Lopes et al., 2000.

Usualmente, emprega-se o termo de sistemas de materiais inteligentes à aqueles compostos de materiais piezelétricos, eletroresistivo e magneto-resistivo, fluidos e sólidos

electro-reológico, ligas de memória de forma, ou fibras óticas. As propriedades de alguns destes materiais já eram conhecidas desde algum tempo, como por exemplo, o efeito piezelétrico que foi descrito pela primeira vez em 1880 por Pierre e Jacques Curie. No entanto, apenas a partir do início da década de 90 estes materiais começaram a ter aplicações práticas. Já outros materiais, como cabos de fibras óticas e fluidos eletro-reológico, foram desenvolvidos recentemente e algumas de suas propriedades necessitam de caracterizações. A incorporação destes materiais como sensores e/ou atuadores em sistemas inteligentes é ainda recente e intensa investigação matemática e experimental é fundamental para a correta aplicação e utilização desta tecnologia.

Materiais piezelétricos: São os materiais mais utilizados em sistemas adaptativos (Banks et al., 1996). Eles possuem a propriedade de sofrer polarização (surgimento de cargas elétricas) quando são deformados por esforços mecânicos externos (efeito piezelétrico direto). Inversamente estes materiais têm sua forma alterada quando seus dipolos se alinham espontaneamente sob ação de um campo elétrico externo, causando deformação da estrutura cristalina (efeito piezelétrico inverso). Em outras palavras: quando uma voltagem é aplicada na mesma direção da polarização, o material alonga na direção polar e ocorre uma contração transversal. Quando a voltagem é aplicada oposta à direção de polarização, o material contrai na direção polar e expande na direção transversal. Este efeito pode ser observado na figura 4.2.

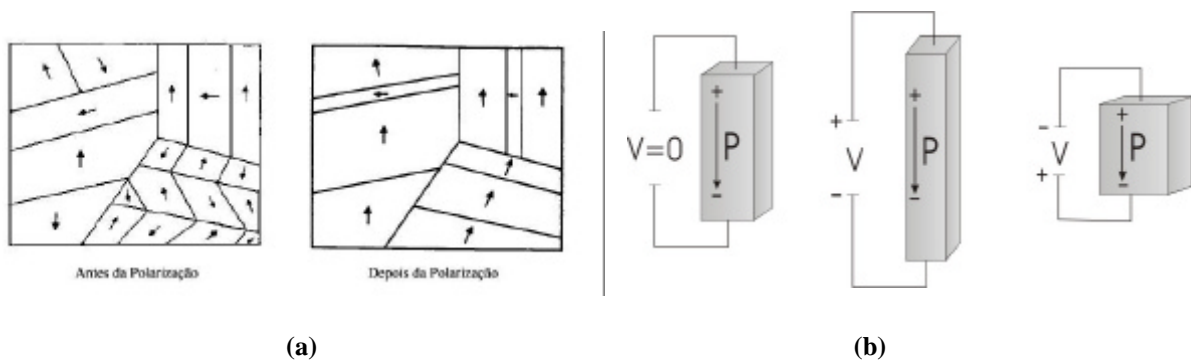


Figura 4.2. (a) Alinhamento dos cristais após a polarização. (b) Efeito piezelétrico.

O efeito piezelétrico inverso é explorado na construção de atuadores, ao passo que o efeito direto é utilizado na concepção de sensores. No primeiro caso, os elementos piezelétricos, geralmente dispostos sob forma de placas finas, são colados rigidamente à estrutura elástica. A aplicação de tensão elétrica ao material piezelétrico gera deformações que são transferidas para a estrutura, provocando nesta o surgimento de deformações mecânicas que, por sua vez,

ocasionam variações nas características estáticas e dinâmicas (rigidez e frequências naturais de vibração, por exemplo). No segundo caso, os elementos piezelétricos, geralmente dispostos sob a forma de placas ou películas finas, podem ser colados à superfície da estrutura, ou embutidos, e recebem destas as deformações mecânicas geradas por vibrações e/ou carregamentos externos. Estas deformações provocam o surgimento de cargas elétricas no material piezelétrico que constituem o sinal de saída do sensor.

A característica que torna extremamente vantajoso o uso dos materiais piezelétricos é a possibilidade de construção de sensores e atuadores distribuídos ao longo de superfícies relativamente amplas, o que tem importantes implicações no tocante à sensibilidade dos sensores, à capacidade de aplicação de cargas dos atuadores e à potência requerida para a atuação.

Diversos tipos de materiais – naturais e sintéticos – exibem propriedades piezelétricas. Dentre os sinais utilizados, pode-se citar:

Cerâmicas piezelétricas. Em particular, as cerâmicas PZT (Titanato Zirconato de Chumbo), devido suas características, têm sido extensivamente utilizadas como elementos atuadores distribuídos, aplicados sob a forma de placas, com espessuras típicas da ordem de 0,1 a 0,2 mm.

Polímeros piezelétricos. O PVDF (Fluorido de Polivinilideno) tem tido larga utilização como sensores distribuídos, aplicados sob a forma de filmes finos, com espessura típica da ordem de 40 a 120 μ m.

Os materiais piezelétricos têm sido utilizados em diversas aplicações de engenharia, principalmente aquelas requerendo atuações de alta precisão e velocidade, tais como: sistemas de rastreamento óptico, microposicionadores para robôs, impressoras a jato de tinta e alto-falantes. Pesquisas recentes têm sido dedicadas ao uso de atuadores de PZT em sistemas de controle ativo de vibrações e ruído e de controle de danos estruturais. São também numerosas as aplicações de materiais piezelétricos como sensores de temperatura (explorando o efeito piroelétrico), deformação e pressão.

Vários produtos industriais já incorporaram a tecnologia dos materiais piezelétricos, podendo ser mencionados: material esportivo de alto desempenho (raquete de tênis e bastões de beisebol dotados de dispositivos de absorção de vibrações, skis de neve com características dinâmicas adaptativas e bicicletas com suspensões adaptativas); sensores para aplicações

automotivas (sensores de impacto e de vibrações, sensores para levantamento de tráfico de veículos); equipamento de áudio (microfones e alto-falantes) e; em instrumentação médica (ultra-som e exames baseados em imagens).

Por apresentarem um comportamento aproximadamente linear sob baixos campos elétricos, relativa insensibilidade à variação de temperatura e flexibilidade como sensores e atuadores, os elementos piezelétricos são utilizados freqüentemente em aplicações aeroespaciais e automotivas. Sensores e atuadores piezocerâmicos, PSA, são leves e podem ser colocados a uma variedade de estruturas. Pelo exposto, podemos traçar um paralelo entre as vantagens e desvantagens destes materiais:

Vantagens: Relativa insensibilidade à temperatura, resposta linear a baixos níveis de excitação, baixo peso, flexibilidade para serem usados como sensores e atuadores em uma larga variedade de aplicações e ampla faixa de resposta.

Desvantagens: Significante perda por histerese para grandes campos elétricos, rigidez e baixa tenacidade dos PZT's, baixas propriedades eletromecânicas nos PVDF's e o efeito piezelétrico gerado pode deteriorar e conduzir a efeitos de envelhecimento e degradação da performance.

4.2. Método baseado no princípio da impedância elétrica

Elementos piezelétricos têm sido usados com sucesso para monitoramento de estruturas em projetos de controle ativo para diferentes sistemas, tal como viga, placas e estruturas (Dosch, Inman e Garcia, 1992). Alguns dos atributos que tornam atrativos atuadores piezelétricos para controle ativo, é a larga faixa em que podem ser utilizados, a eficiente conversão de energia elétrica para mecânica, capacidade de controle de forma e a simplicidade mecânica do atuador. Estes aspectos são também desejados para o monitoramento de máquinas desde que sensor/atuador são partes fundamentais e importantes deste processo.

Esta seção descreve a técnica em que o atuador e sensor são combinados num simples elemento piezelétrico chamado auto-sensor-atuador. Auto-sensor-atuador tem um número de propriedades desejáveis, não facilmente obtidos com sensores e atuadores separados (Inman, 1990). O atuador é integrado na estrutura e a tensão, deformação, campo elétrico e deslocamento elétrico, dentro do material piezelétrico pode ser completamente descrito por um par de equações eletromecânica. Existem vários pares de equações eletromecânicas e a escolha depende do

problema. Usando a notação padrão IEEE 176-1987, a tensão, deformação, deslocamento elétrico de um material piezelétrico pode ser descrito pelas equações (4.1) e (4.2). As letras nos colchetes indicam as unidades das variáveis no Sistema Internacional de Unidades, com Newton (N), metro (m), voltagem (V) e Coulomb (C).

$$S_{ij} = s_{ijkl}^E T_{kl} + d_{kij}^t E_k \quad (4.1)$$

$$D_i = d_{ikl} T_{kl} + e_{ik}^T E_k \quad (4.2)$$

em que:

O superescrito t indica matriz transposta, os superescritos E e T indicam que as quantidades foram obtidas com campo elétrico e tensão constante, respectivamente.

i, j, k, l representam os valores 1, 2, 3 (ou x, y, z)

S_{ij} = tensor deformação [m/m]

T_{kl} = tensor de tensão [N/m²]

E_k = campo elétrico [V/m; N/C]

d_{kij} = constante piezelétrica [C/N]

D_i = deslocamento elétrico ou indução [C/m²]

s_{ijkl} = tensor de compliança [m²/N]

e_{ik}^T = permissividade dielétrica [C²/Nm²]

Na forma matricial obtém-se:

$$\begin{bmatrix} S \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s^E & d^t \\ d & e^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ E \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

em que,

$$D = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix}, \quad e = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{12} & e_{22} & e_{23} \\ e_{13} & e_{23} & e_{33} \end{bmatrix}$$

$$S = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix}, \quad T = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix}, \quad s = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & s_{14} & s_{15} & s_{16} \\ s_{12} & s_{22} & s_{23} & s_{24} & s_{25} & s_{26} \\ s_{13} & s_{23} & s_{33} & s_{34} & s_{35} & s_{36} \\ s_{14} & s_{23} & s_{34} & s_{44} & s_{45} & s_{46} \\ s_{15} & s_{25} & s_{35} & s_{45} & s_{55} & s_{56} \\ s_{16} & s_{26} & s_{36} & s_{46} & s_{56} & s_{66} \end{bmatrix}, \quad d = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix}$$

Assim,

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & s_{14} & s_{15} & s_{16} & d_{11} & d_{21} & d_{31} \\ s_{12} & s_{22} & s_{23} & s_{24} & s_{25} & s_{26} & d_{12} & d_{22} & d_{32} \\ s_{13} & s_{23} & s_{33} & s_{34} & s_{35} & s_{36} & d_{13} & d_{23} & d_{33} \\ s_{14} & s_{23} & s_{34} & s_{44} & s_{45} & s_{46} & d_{14} & d_{24} & d_{34} \\ s_{15} & s_{25} & s_{35} & s_{45} & s_{55} & s_{56} & d_{15} & d_{25} & d_{35} \\ s_{16} & s_{26} & s_{36} & s_{46} & s_{56} & s_{66} & d_{16} & d_{26} & d_{36} \\ d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} & e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} & e_{12} & e_{22} & e_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} & e_{13} & e_{23} & e_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Na figura 4.3 pode ser observado as direções de referências dos materiais piezelétricos, assim como alguns termos da equação 4.4.

Dependendo das constantes utilizadas nas equações constitutivas, necessita-se da relação $k = \mathbf{e}/\mathbf{e}_o$, onde $\mathbf{e}_o = 8.5 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$ é a permissividade dielétrica no vácuo. A técnica baseada na impedância utiliza o PZT como atuador e sensor. Um PZT colado na estrutura e alimentado por um campo elétrico alternado com valor fixo excita e induz vibrações na estrutura (Efeito Inverso). A vibração resultante gera um fluxo de corrente no PZT (Efeito Direto), que é função do grau de interação mecânica entre o PZT e a estrutura, dentro da faixa de frequência considerada.

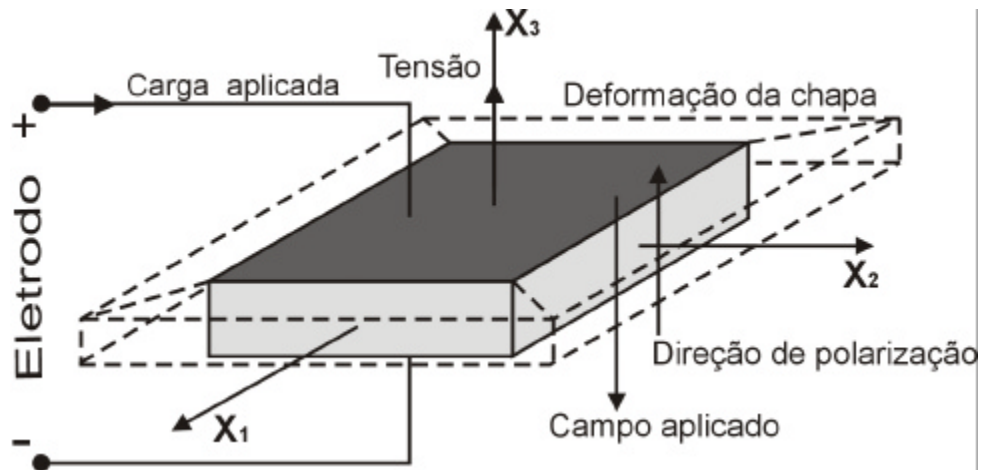


Figura 4.3. Direções dos materiais piezoeletricos

A impedância elétrica é definida como a razão entre a voltagem de entrada e corrente resultante. A impedância mecânica é definida como a razão da força aplicada e a velocidade resultante (Ewins, 1984). O transdutor eletromecânico, como um piezoeletrico, fornece uma maneira de se acoplar as impedâncias elétrica e mecânica.

Sendo mais fácil medir a impedância elétrica do que a mecânica, esta característica pode ser utilizada com vantagens para muitas aplicações, onde a FRF poderia ser de difícil obtenção.

Um modelo simples, como mostrado na figura 4.4, pode descrever a interação entre um PZT e a estrutura a ele vinculada. O PZT é considerado como uma barra fina exposta a uma vibração axial em resposta a aplicação de voltagem alternada aplicada. Uma extremidade é fixa e a outra é conectada na estrutura, representada por um sistema de um grau de liberdade.

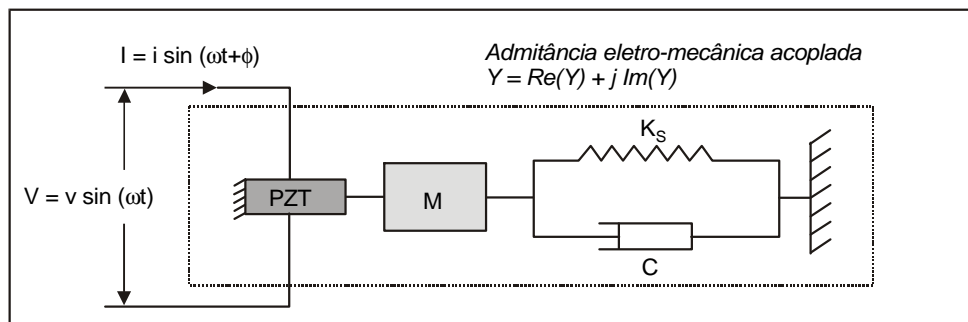


Figura 4.4. Modelo usado para representar o acoplamento de um PZT com a estrutura base

$$Z_s(\mathbf{w}) = \frac{F(\mathbf{w})}{\dot{x}(\mathbf{w})} \quad (4.5)$$

$$Y(\mathbf{w}) = \frac{1}{Z_s(\mathbf{w})} \quad (4.6)$$

em que $Z_s(\mathbf{w})$ é a impedância mecânica, $F(\mathbf{w})$ é a força de entrada, $\dot{x}(\mathbf{w})$ é a velocidade e $Y(\mathbf{w})$ é a admitância mecânica, a qual é o inverso da impedância mecânica. A impedância da estrutura depende da frequência de excitação e para um sistema massa-mola amortecedor é dada por :

$$Z_s(\mathbf{w}) = c + m \frac{\mathbf{w}^2 - \mathbf{w}_n^2}{\mathbf{w}} i \quad (4.7)$$

onde c é o coeficiente de amortecimento, m é a massa, \mathbf{w} a frequência de excitação e \mathbf{w}_n a frequência de ressonância do sistema. A relação força-deslocamento para o sensor/atuador PZT e a estrutura é,

$$F = k_A (x - x_{in}) \quad (4.8)$$

$$k_A = \frac{\bar{Y}^E}{Y_{22}^E} \frac{w_A h_A}{l_A} \quad (4.9)$$

$$x_{in} = d_{32} E l_A \quad (4.10)$$

$$\bar{Y}_{22}^E = Y_{22}^E (1 + i\eta) \quad (4.11)$$

em que x é o deslocamento, F é a força exercida pelo atuador, k_A é a rigidez estática do PZT, w_A , h_A e l_A são largura, espessura e comprimento do PZT respectivamente, x_{in} é o deslocamento do atuador sem indução, Y_{22}^E é modulo complexo do PZT para campo elétrico zero, η é o fator de perda mecânica do PZT, E é o campo elétrico e d_{32} é a constante piezelétrica. Para aplicações dinâmicas, como no caso do monitoramento de condição baseado na impedância, a relação força-deslocamento é baseada no conceito da impedância mecânica. Assumindo um estado harmônico de excitação constante e usando a equação 4.7.

$$F = -Z x = -\left(c + m \frac{\mathbf{w}^2 - \mathbf{w}_n^2}{\mathbf{w}} i \right) (i\mathbf{w} x) \quad (4.12)$$

$$F = -k_D x = -(ic\mathbf{w} - m(\mathbf{w}^2 - \mathbf{w}_n^2))x \quad (4.13)$$

em que k_D é a rigidez dinâmica. A relação força-deslocamento dinâmico pode agora ser determinada pela equação 4.8 e 4.13, como:

$$F = -\frac{k_D k_A}{k_D + k_A} x_m \quad (4.14)$$

Para aplicação estrutural, as equações eletromecânica 4.1 e 4.2 são reduzidas para duas equações escalares, 4.15 e 4.16. A equação 4.4 reduz à equação 4.17. Considerando que o campo elétrico é aplicado na direção z (eixo x_3) e que o PZT expande e contrai apenas na direção y , a relação constitutiva é:

$$S_2 = s_{22}^E T_2 + d_{32} E_3 \quad (4.15)$$

$$D_3 = d_{32} T_2 + \mathbf{e}_{33}^T E_3 \quad (4.16)$$

ou, na forma matricial

$$\begin{Bmatrix} S_2 \\ D_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{22}^E & d_{32} \\ d_{32} & \mathbf{e}_{33}^T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_2 \\ E_3 \end{Bmatrix} \quad (4.17)$$

Aqui é assumido que D_3 é medido, E_3 é determinado a partir do campo elétrico aplicado no atuador piezocerâmico e s_{22}^E , d_{32} , \mathbf{e}_{33}^T são constantes. S_2 é a deformação e T_2 é a tensão no PZT ao longo do eixo y . A primeira equação é chamada de equação do atuador e a segunda, de equação do sensor. Nestas condições, existem duas variáveis desconhecidas, S_2 e T_2 , as quais podem ser determinadas pelas equações acima. A solução das equações eletromecânica, no caso escalar, é a base teórica do auto-sensoramento do atuador piezoeletrico. A equação de movimento para um PZT vibrando na direção y pode ser expressa como:

$$\mathbf{r}_A \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \bar{Y}_{22}^E \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \quad (4.18)$$

em que v é o deslocamento na direção y e \mathbf{r}_A é a densidade do PZT. Separando o deslocamento nos domínios do tempo e espacial e aplicando as condições de contorno, a equação acima pode ser escrita como:

$$v = \bar{v} e^{i\omega t} = (A \operatorname{sen}(k \cdot y) + B \cos(k \cdot y)) e^{i\omega t} \quad (4.19)$$

$$k = \omega^2 \frac{\mathbf{r}_A}{\bar{Y}_{22}^E} \quad (4.20)$$

A saída de deslocamento do atuador PZT, a deformação, o campo de tensão e o campo de deslocamento elétrico podem então ser determinados (Ayres, 1996).

O fluxo de corrente no PZT é a taxa de tempo da carga elétrica total entre os dois eletrodos, podendo ser expressa como:

$$I = \iint_S i\omega D_3 ds \quad (4.21)$$

em que σ é a área do eletrodo. A admitância elétrica é $Y = I/V$ e após algumas substituições, para um PZT retangular, como mostrado na figura 4.3 pode ser encontrada como (Sun, 1996):

$$Y(\omega) = i\omega \frac{w_A l_A}{h_A} \left(\mathbf{e}_{33}^T (1 - i\mathbf{d}) - \frac{Z_S(\omega)}{Z_S(\omega) + Z_A(\omega)} (d_{33})^2 \bar{Y}_{22}^E \right) \quad (4.22)$$

em que $Y(\omega)$ é a admitância elétrica (inverso da impedância); \bar{Y}_{22}^E é o módulo de elasticidade do PZT com campo elétrico zero; \mathbf{e}_{33}^T , \mathbf{d} , d_{33} , são constantes do PZT; e w_a , l_a , e h_a são as dimensões do PZT. Z_S e Z_A são as impedâncias mecânicas estrutural e do atuador PZT, respectivamente. O primeiro termo da equação 4.22 é a capacitância do PZT livre e o segundo termo é o resultado da interação eletromecânica do PZT com a estrutura base. Portanto, variações da impedância mecânica estrutural podem ser diretamente relacionadas com a admitância elétrica do PZT, conforme a equação 4.22 (Lopes, et al. 2000). Na tabela 4.1 são apresentadas as propriedades do material piezelétrico baseadas no material designado por PSI-5A-S4 (Piezo Systems, Inc.), que será utilizado nas aplicações experimentais que serão mostradas nos próximos capítulos.

Tabela 4.1. Propriedades do material PZT.

$E_p = 63 \text{ GPa}$	$\rho_p = 7650 \text{ kg/m}^3$
$d_{31} = -190 \text{ e-12 m/V}$	$d_{33} = -190 \text{ e-12 m/V}$
$c_{11} = 1.07 \text{ e11 N/m}^2$	$K^T = 1800$
$E_p = 30.705 \text{ N.m/V. m}^2$	$\epsilon_{33}^s = 7.33 \text{ e-9 F/m}$

4.3. Relações fundamentais para Vários Sistemas de Variáveis Independentes

Deformação, S , e Tensão, T , são variáveis mecânicas, geralmente, utilizadas nos cálculos. Para variáveis elétricas usa-se a polarização, P , o deslocamento elétrico, D , ou campo elétrico, E .

A tabela 4.2 mostra as principais relações fundamentais para as equações eletromecânicas (Ikeda, 1996).

Tabela 4.2. Tipos fundamentais de relações de piezeletricidade.

(a) Equações baseadas na Polarização, P.

Variável Independente	Relação Piezelétrica	Função Termodinâmica
S,P	$T = c^P S - aP$ $E = -aS + x^S P$	Energia livre de Helmholtz $F = \frac{1}{2}c^P S^2 - aSP + \frac{1}{2}x^S P^2$
T,E	$S = s^E T + dE$ $P = dT + k^T E$	Energia livre de Gibbs $G = -\frac{1}{2}S^E T^2 - dTE - \frac{1}{2}k^T E^2$
T,P	$S = s^P T + bP$ $E = -bT + x^T P$	Energia elástica de Gibbs $G_1 = -\frac{1}{2}S^E T^2 - dTE - \frac{1}{2}k^T E^2$
S,E	$T = c^E S - eE$ $P = eS + k^S E$	Energia elétrica Gibbs $G_2 = \frac{1}{2}c^E S^2 - eSE - \frac{1}{2}k^S E^2$

$$G = F - TS - EP, \quad G_1 = F - TS, \quad G_2 = F - EP$$

(b) Equações baseadas no deslocamento elétrico, D.

Variável independente	Tipo	Relação piezelétrica	Forma
S,D	Extensiva	$T = c^D S - hD$ $E = -hS + b^S D$	Forma - h
T,E	Intensiva	$S = s^E T + d' E$ $D = dT + \epsilon^T E$	Forma - d
T,D	Misturado	$S = s^D T + gD$ $E = -gT + b^T D$	Forma - g
S,E	Misturado	$T = c^E S - eE$ $D = eS + \epsilon^S E$	Forma - e

Teoricamente, P é a escolha provável, porém, D é preferível quando se considera análise prática acústica e de vibração. Pode-se usar P ou D para construir uma série de relações fundamentais. Assim, estas relações podem ser divididas em dois tipos: um esquema de polarização e um esquema de deslocamento elétrico. Estas relações são referidas como esquema-P e esquema-D, respectivamente.

A classificação de relações fundamentais é mostrada na tabela 4.2. Todas as equações são tensoriais e os índices foram omitidos por clareza de entendimento.

Cada tipo de relação é derivada de uma função termodinâmica apropriada, como mostrado para o esquema-P na tabela. Diferentes procedimentos também são possíveis, por exemplo, a função elástica de Gibbs G_1 é obtida de F através de $G_1 = F - T_{ij} S_{ij}$. Isto resulta na relação de variável independente T, P . Uma formulação diferencial alternativa é somente a transformação de um tipo de relação para outro. Porém, cuidado deve ser tomado no rearranjo das relações correspondente; a equação não pode ser dividida por um coeficiente porque a expressão é tensorial. É necessário, portanto, multiplicar a equação por um tensor inverso do respectivo coeficiente.

Os sinais dos termos de acoplamento para a primeira e segunda equações de cada relação são opostos para o tipo misturado da variável independente. Porém, são os mesmos para os tipos intensivo e extensivo.

4.4. Falha métrica

A falha métrica é usada neste trabalho como um índice para monitorar a ocorrência de falhas e, é definida como a soma das diferenças quadráticas das mudanças de impedância para cada frequência. Este índice simplifica a interpretação das variações de impedância e fornece informações do sinal de resposta em impedância para a região de influência do atuador (Lopes et al. 2000). O monitoramento de cada PZT é feito separadamente, isto é, cada PZT é continuamente monitorado na faixa de frequência especificada. Para cada PZT, deve-se definir um valor mínimo, acima do qual é uma indicação de falha naquela posição. Condições de operações e variações de temperatura podem mudar as características dinâmicas da estrutura. O valor mínimo é definido por tentativa e erro, ou conhecimento anterior da dinâmica estrutural do sistema. A falha métrica, M , é dada por:

$$M = \sum_{i=1}^n [(Z_{i,1}) - (Z_{i,2})]^2 \quad (4.23)$$

em que $Z_{i,1}$ é a impedância medida na estrutura intacta, $Z_{i,2}$ é a impedância medida na estrutura em condições normais de operação e i é o número de pontos utilizados na aquisição do sinal, (Park et al. 2000).

Capítulo 5

MEDIDOR DE IMPEDÂNCIA DE BAIXO CUSTO

Os analisadores de impedância podem ser utilizados para o monitoramento da condição de máquinas, equipamentos, ou estruturas. Estes analisadores operam em altas faixas de frequência, como por exemplo, o analisador de impedância HP 4194 A. O custo dos analisadores comerciais é alto, aproximadamente US\$ 30.000,00, dificultando a aplicação da técnica da impedância elétrica e, ainda, estes analisadores são volumosos e pesados. A técnica da impedância usa um subconjunto pequeno da capacidade destes instrumentos. A proposta de desenvolvimento de um medidor de impedância de baixo custo e tamanho reduzido (a partir deste ponto será chamado de medidor de impedância alternativo) visa a implantação de um sistema on-line, que pode ser facilmente transportado e usado nas técnicas de manutenção. Nesta ótica esta seção apresenta um aparelho com estas características, que foi desenvolvido durante este trabalho. Esta proposta foi inspirada em um aparelho semelhante desenvolvido na Virginia Polytechnic Institute and State University, Peairs (2002).

5.1. Medida de impedância convencional

Normalmente o método de realizar a medida da impedância elétrica através do HP 4194A é medindo a amplitude da impedância e a fase. Este equipamento mede simultaneamente duas medidas independentes, parâmetros complementares de impedância. A combinação destes parâmetros representa ambas as características de resistência e reação da impedância elétrica, 15 tipos de parâmetros podem ser avaliados, entretanto, apenas a função $R-X$ é geralmente utilizada no monitoramento. A letra R representa a componente real da impedância em ohms e X a componente imaginária em ohms. Em um circuito em série equivalente esta impedância é igual a $R+j.X$. A impedância absoluta, Z , e o ângulo de fase, θ , podem ser calculados pelas equações (5.1) e (5.2).

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (5.1)$$

$$q = \tan^{-1}\left(\frac{X}{R}\right) \quad (5.2)$$

Alternativamente a magnitude (Z) e fase (q), a componente R é geralmente empregada no monitoramento estrutural. Isto se deve ao fato da componente R ser mais sensível a falha ou mudanças na integridade estrutural, enquanto X é mais sensível a mudanças devido a temperatura (Raju, 1998).

Outros dispositivos já foram sugeridos para serem utilizados na medida da impedância elétrica no monitoramento de falhas, mas não são comumente empregados. Raju (1998) sugere o uso de um computador portátil conectado ao equipamento HP 4192A via PCMCIA-GPIB com um barramento remoto de controle e simula a função *sweep* com o Visual Basic, através de um software desenvolvido por ele próprio. Infelizmente, isto ainda requer a compra de equipamentos caros que não são comuns na maioria dos laboratórios de engenharia.

O método da impedância se coloca como uma técnica de auto-monitoramento. Outro método de auto-monitoramento usando ponte com circuito RC (resistor capacitor) com um gerador de sinal e um sensor de aceleração é apresentado por Pardo de Vera e Guemes (1997). O circuito é o mesmo utilizado para fazer o auto-sensoriamento com atuador apresentado por Dosch (1992), como mostra a figura 5.1.

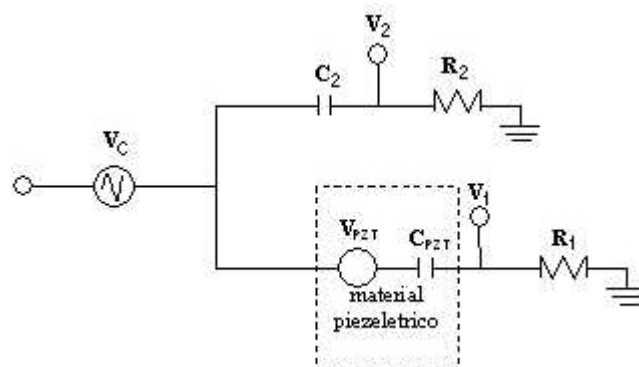


Figura 5.1. Circuito atuador auto-sensoriamento.

No diagrama, V_c representa o controle de voltagem e a voltagem de saída é $V_1 - V_2$. É necessário realizar o balanceamento preciso do circuito ($R_1 C_{PZT} = R_2 C_{PZT}$) para prevenir uma contaminação no sinal de saída. Uma tentativa inicial de balanceamento é utilizar o PZT com

dimensões similares ao do sensor já fixado na estrutura. Desta maneira é possível obter a real impedância em função da frequência.

5.2. Circuito alternativo para a medição da impedância elétrica

Como alternativa aos métodos convencionais de medição de impedância, apresentamos e sugerimos neste trabalho um novo método utilizando um software de aquisição de sinais o SignalCalc ACE[®] (Dynamic Signal Analyzer). Este software foi escolhido por estar disponível no laboratório e será usado para a geração e aquisição do sinal, que é obtido através de um circuito elétrico desenvolvido para as medidas da impedância elétrica no PZT. Softwares comerciais, como o utilizado neste trabalho, são comuns em laboratórios de engenharia, possibilitando assim a utilização desta técnica sem o desprendimento de grande quantia de dinheiro, uma vez que o aparelho desenvolvido tem seu custo em torno de US\$ 100,00.

A impedância elétrica de um PZT vinculado a estrutura é igual a tensão elétrica aplicada no PZT dividido pela corrente que atravessa o mesmo. Uma aproximação para a impedância elétrica gerada é considerarmos a voltagem no PZT igual a voltagem aplicada pelo programa SignalCalc ACE[®] no circuito, V_i . A figura 5.2 mostra a voltagem, V_o , com o resistor R_s em série com o PZT.

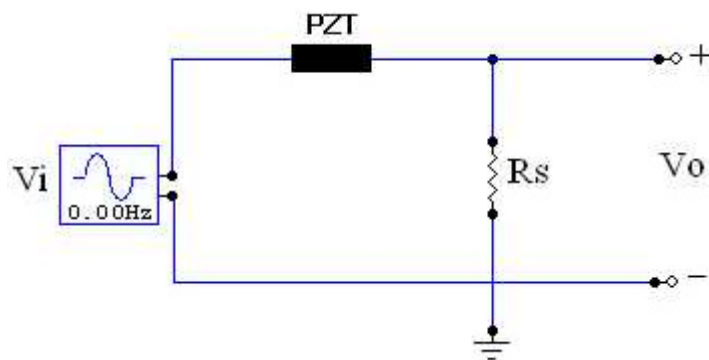


Figura 5.2. Circuito para medida aproximada da impedância no PZT.

A voltagem de saída é proporcional a corrente que passa pelo resistor. Se o resistor apresentar uma baixa resistência podemos admitir que a corrente que atravessa o PZT é a mesma que passa pelo resistor (como realizada em um medidor normal de impedância). O circuito é descrito pelas equações abaixo.

$$I = \frac{V_0}{R_s} \quad (5.3)$$

sendo I a corrente que atravessa o resistor. Segundo as considerações acima assumidas temos que a impedância elétrica (Z) aproximada é:

$$Z = \frac{V_i}{I} = \frac{V_i * R_s}{V_0} \quad (5.4)$$

Como os PZT's são elementos com propriedades capacitivas, a corrente que o atravessa muda em função da frequência. Assim um aumento da frequência causa um aumento da corrente diminuindo a impedância, contrariamente, para valores baixos de frequência se tem altos valores de impedância. Neste caso um amplificador inverso para o circuito pode provocar uma larga faixa de saída. O circuito para medição aproximada de impedância com amplificador é apresentado na figura 5.3.

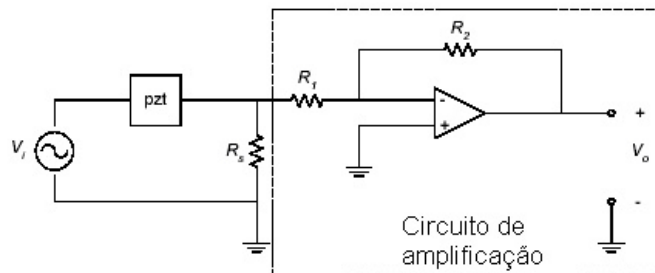


Figura 5.3. Circuito para medição da impedância aproximada com amplificador.

O ganho, G , do circuito amplificador apresentado é mostrado na equação 5.5. Como o amplificador apresentado é do tipo inversor, seu ganho é negativo.

$$G = -\frac{R_2}{R_1} \quad (5.5)$$

Com base nas informações acima, um circuito para medir impedância foi desenvolvido, como pode ser visto na figura 5.4.

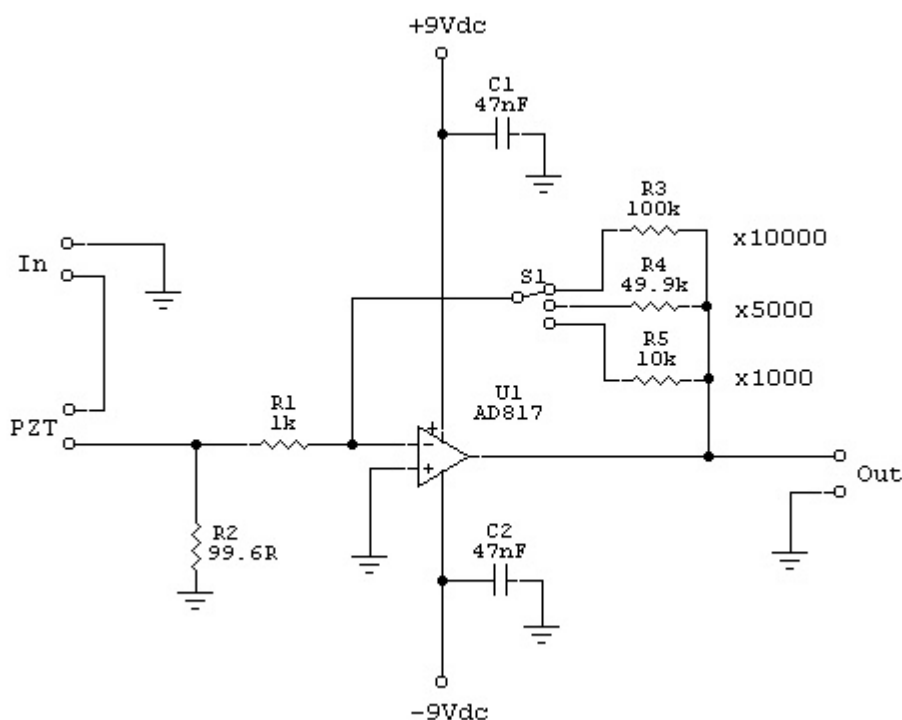


Figura 5.4. Circuito para medir impedância, utilizado para confecção do medidor alternativo.

No circuito proposto para medição de impedância é possível operar com ganho variável, o qual depende da faixa de frequência que se deseja utilizar o aparelho.

A figura 5.4 mostra o circuito básico segundo o qual aparelho foi confeccionado. Este aparelho foi batizado pelo Grupo de Materiais e Sistemas Inteligentes (GMSINT) de MIBC (Medidor de Impedância de Baixo Custo). Além de ser de fácil manuseio e prático, o aparelho possui uma chave seletora onde é possível escolher o ganho na saída. Pode-se selecionar o fator 1000, 5000 e 10.000 vezes. O aparelho ainda possui as entradas para os terminais do PZT, o terminal de entrada (excitação) e o de saída (medição), além de uma chave para ligar e desligar o aparelho, pois o mesmo é alimentado por duas baterias comuns de 9 volts, figura 5.5.



Figura 5.5. Medidor de impedância de Baixo Custo.

Com o desenvolvimento deste aparelho foi possível consolidar a utilização do método da impedância elétrica para o monitoramento de falhas em estruturas. Isto se tornou de suma importância pelo fato de ainda não possuímos um medidor comercial, como por exemplo, o HP 4194A. Além da vantagem de ser acessível devido a questão financeira, como já mencionado o aparelho fabricado tem seu custo inferior a US\$ 100,00, a praticidade também tem aspecto interessante, uma vez que, freqüentemente, em situações práticas os locais onde são realizadas as medidas são de difícil acesso, dificultando a utilização do aparelho comercial, que é volumoso e sensível. Assim, a realização de medidas com o MIBC, em conjunto com um computador portátil e o restante dos equipamentos normalmente utilizados nas medições (como cabos, amplificadores, filtros, etc.), facilita todo o procedimento, tornando-se uma proposta atraente. A figura 5.6 mostra o analisador de impedância HP 4192^A, disponível no Departamento de Física e Química, da Feis, que foi utilizado para validar o medidor de impedância alternativo MIBC.

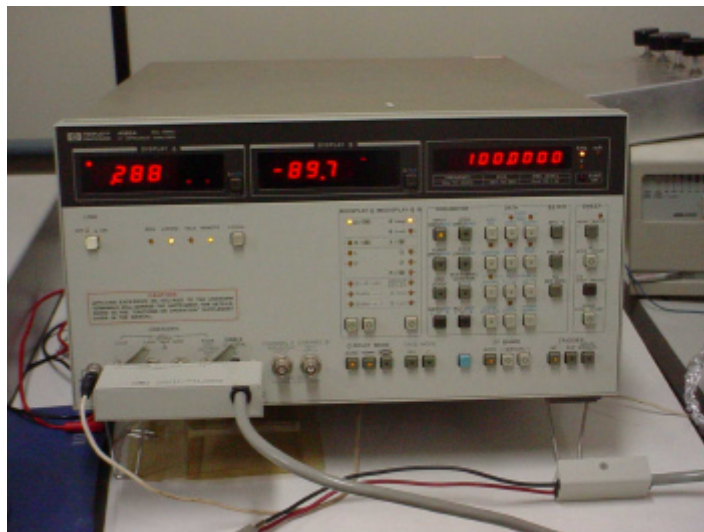


Figura 5.6. Analisador de impedância HP 4192A.

5.3. Validação do MIBC

Após a confecção do MIBC, a próxima etapa foi realizar a validação deste equipamento. Esta validação foi realizada comparando-se os resultados obtidos pelo MIBC e os resultados obtidos pelo analisador de impedância HP4192A, do Departamento de Física e Química (Feis/Unesp).

Uma viga de aço foi utilizada para realizar as medidas com os dois equipamentos, na condição livre-livre. As características da viga podem ser observadas na figura 5.7, sendo a espessura da viga de 3 mm.

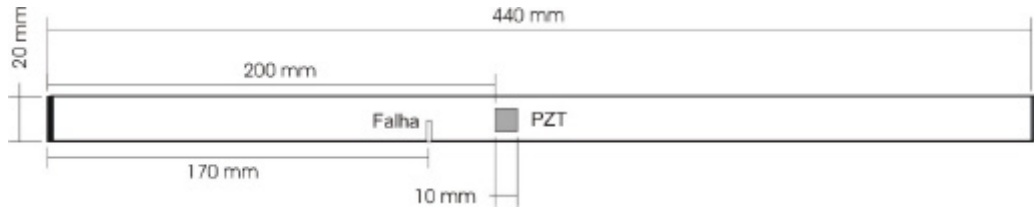


Figura 5.7. Viga de aço utilizada para validação do MIBC.

Para as medidas realizadas com MIBC, um sinal chirp com 1 V de pico foi aplicado usando o software SignalCalc ACE[®] e ajustando no MIBC um ganho de 1000. Os resultados da medida de impedância obtidos para a viga na condição sem falha são mostrados na figura 5.8.

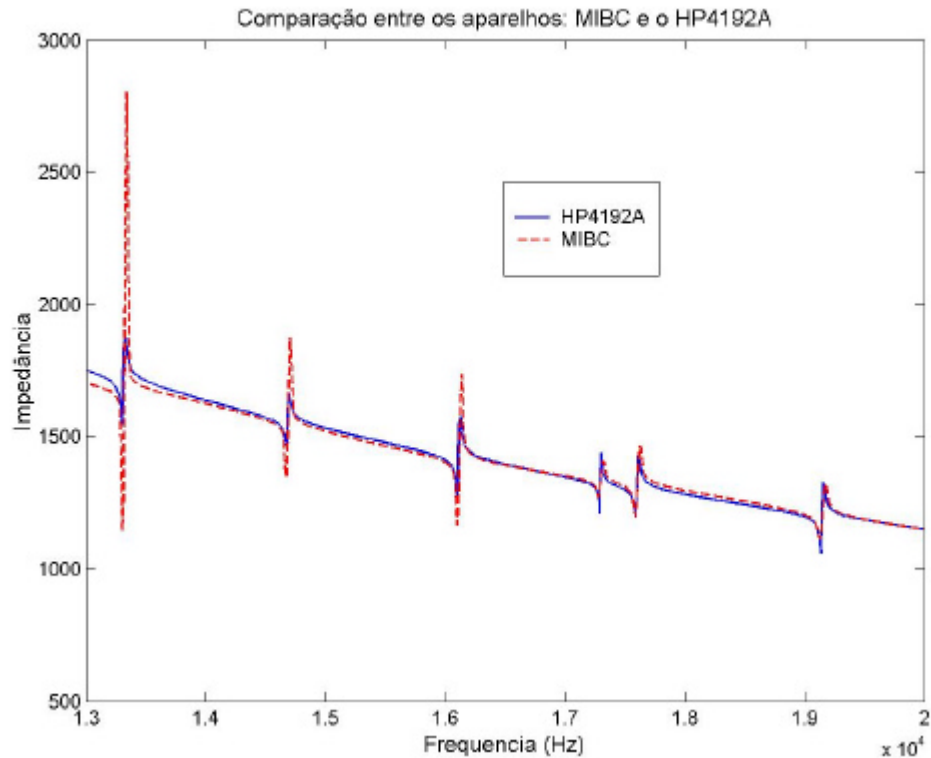


Figura 5.8. Medida de impedância com o HP4192A e o MIBC.

As curvas de resposta são as mesmas, havendo um aumento nos picos da medida realizada com o MIBC, isto ocorreu por ter usado um amplificador de voltagem na leitura da resposta do MIBC. Uma pequena diferença entre as curvas pode ser notada, mas a forma das duas curvas é exatamente a mesma.

A seguir foi realizada uma falha na viga, cuja posição pode ser vista na figura 5.7, de 4 mm de profundidade e 1 mm de largura e, realizou-se as medidas com o MIBC e o HP4192A. Nas figuras 5.9 e 5.10 podem ser vistos os resultados obtidos.

A figura 5.9 mostra as curvas de impedância para as condições sem falha e com falha de 4 mm de comprimento, realizadas com o aparelho HP4192A.

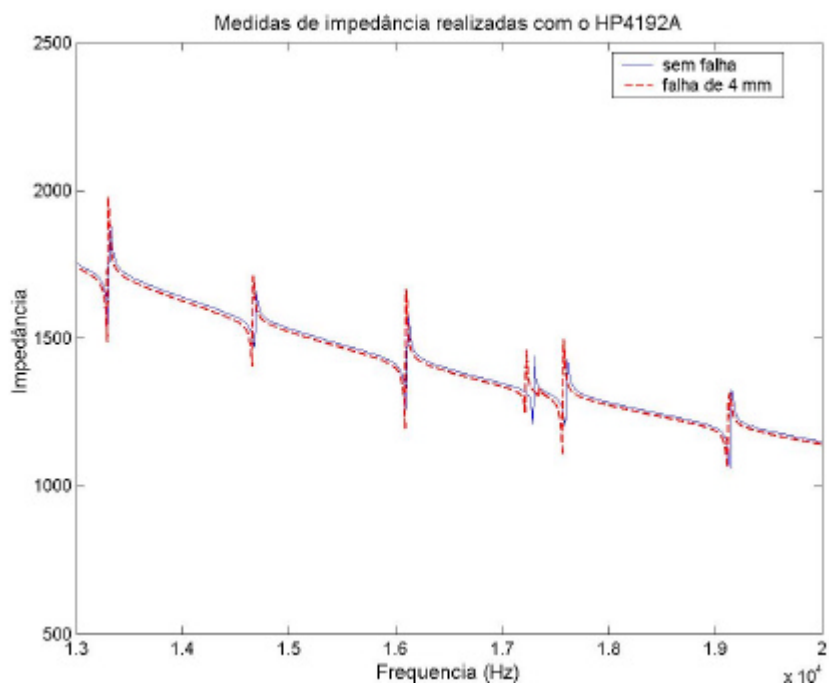


Figura 5.9. Medidas de impedância realizadas com o aparelho HP4192A.

A figura 5.10 mostra as curvas de impedância para as condições sem falha e com falha de 4 mm de comprimento, realizadas com o aparelho MIBC.

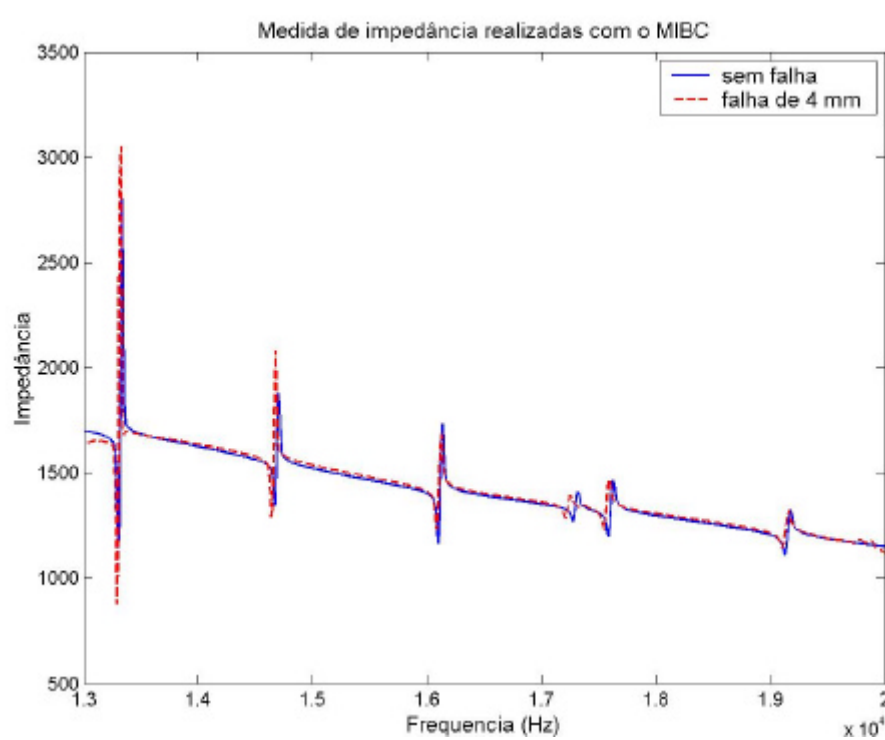


Figura 5.10. Medida de impedância, utilizando o MIBC, com falha e sem falha.

As curvas obtidas com o MIBC e o HP4192A são semelhantes, inclusive as variações ocorridas nas curvas devido a introdução da falha. Podemos assim, analisando as medidas realizadas, concluir que o MIBC apresentou resultados que aprovam sua utilização para realizar o monitoramento das características de uma estrutura. Desde que o método de impedância elétrica proposto neste trabalho é baseado na variação das curvas, o fato da curva não ser exatamente a mesma não interfere nos resultados.

Capítulo 6

ALGORITMOS GENÉTICOS

INTRODUÇÃO

Nos algoritmos tradicionais de otimização, tais como Gradiente, Newton e Fibonacci, há um único caminho desde a solução inicial até a solução final do problema. Estes algoritmos partem de uma solução inicial que, iterativamente, é manipulada a cada iteração, chegando a um valor ótimo. Não é possível assegurar se este valor é um ótimo global, isto depende da complexidade do problema analisado. Por outro lado, as técnicas que utilizam algoritmos evolutivos, tais como Algoritmos Genéticos (AGs), operam sobre uma população de candidatos à solução do problema. Assim a busca é realizada em diferentes áreas do espaço considerado, possibilitando que seja encontrado uma solução com valor bem próximo do ótimo.

Os Algoritmos Genéticos fazem parte da área de Inteligência Artificial de Sistemas Inspirados na Natureza; sistemas estes que simulam os processos naturais e aplica-os à solução de problemas reais. Algoritmos Genéticos são métodos generalizados de busca e otimização que simulam os processos naturais da evolução, aplicando a idéia *darwiniana* de seleção natural das espécies. De acordo com a *aptidão* e utilizando de combinações com outros *operadores genéticos*, são produzidos métodos de grande robustez e aplicabilidade na resolução de problemas. Num algoritmo genético os indivíduos melhores adaptados têm maior chance de sobreviver em um ambiente competitivo. As características específicas determinam sua capacidade de sobrevivência, e em último caso, essa capacidade é determinada pela unidade elementar da biologia chamada de *gene*. Na natureza a seleção natural leva à sobrevivência dos indivíduos melhores adaptados e os melhores genes são transmitidos de geração para geração através do processo de *reprodução*; por outro lado os indivíduos menos dotados são eliminados na processo de competição por comida, água, espaço físico, etc. Deste modo o princípio da seleção natural permite que somente os indivíduos que possuem as melhores cargas genéticas

gerem descendentes. Em algoritmos genéticos os processos que contribuem para a evolução são o *cruzamento* (*crossover*) e a adaptação baseada na *seleção/reprodução*. A *mutação* também tem papel importante, mas seu grau de importância continua sendo um assunto em que os pesquisadores ainda não entraram em consenso.

Os algoritmos genéticos diferem dos métodos tradicionais de busca e otimização, em quatro principais aspectos [Goldberg, 1989].

- AGs trabalham com uma codificação do conjunto de parâmetros e não com os próprios parâmetros;
- AGs operam sobre uma população de soluções, diferentemente dos métodos convencionais que partem de uma única solução;
- AGs utilizam informações de custo ou recompensa (função objetivo) para cada indivíduo e não derivadas ou outro conhecimento auxiliar;
- AGs utilizam regras de transição probabilísticas e não determinísticas.

Na utilização de AGs soluções ótimas, ou aproximadamente ótimas, são encontradas em uma grande variedade de problemas, pois não impõem muitas das limitações encontradas nos métodos de busca tradicionais. Os conceitos utilizados podem ser expostos explicando o funcionamento básico destes algoritmos: o processo é iniciado com a geração de uma população inicial (normalmente de maneira aleatória) e em seguida são aplicados operadores genéticos artificiais em cada geração. Em condições de otimização, cada indivíduo da população é codificado em um *string* ou cromossomo, o qual representa uma solução possível para um determinado problema, enquanto a adaptação dos indivíduos é avaliada através de uma função de aptidão (*fitness*). Basicamente, aos indivíduos melhores adaptados (melhores soluções) são dadas maiores oportunidades de se reproduzirem, trocando partes de informação genética, em um procedimento de acasalamento denominado cruzamento (*crossover*). O operador de Mutação é utilizado para alterar alguns genes na população e tem como principal função explorar novos espaços de busca, mantendo a diversidade na população. A descendência ou nova população pode substituir toda a população atual ou substituir apenas os indivíduos de menor ajuste. Este ciclo de avaliação, seleção, reprodução e mutação é repetido até que uma solução satisfatória seja encontrada.

6.1. Histórico

No século XIX os naturalistas acreditavam que cada espécie havia sido criada separadamente por um ser supremo ou através de geração espontânea. O trabalho do naturalista Carolus Linnaeus levou a acreditar na existência de uma certa relação entre as espécies. Por outro lado, Thomas Robert Malthus propôs que fatores ambientais tais como doenças e carência de alimentos limitavam o crescimento de uma população.

No século XX após anos de observações e experimentos, Charles Darwin apresentou em 1858 sua teoria de evolução através de seleção natural. Por volta de 1900, a moderna teoria da evolução combina a genética e as idéias de Darwin e Wallace sobre a seleção natural, criando o princípio básico de Genética Populacional: a variabilidade entre indivíduos em uma população de organismos que se reproduzem sexualmente é produzida pela mutação e pela recombinação genética.

Este princípio foi desenvolvido durante os anos 30 e 40, por biólogos e matemáticos de importantes centros de pesquisa. Nos anos 50 e 60, muitos biólogos começaram a desenvolver simulações computacionais de sistemas genéticos. Entretanto, foi John Holland quem avançou o desenvolvimento das primeiras pesquisas no tema e, em 1975 publicou o livro "*Adaptation in Natural and Artificial Systems*", hoje considerado a principal referência de AGs.

Nos anos 80 David Goldberg, aluno de Holland, consegue o primeiro sucesso em aplicação industrial de Algoritmos Genéticos. Desde então, estes algoritmos vêm sendo aplicados com sucesso em diversos problemas de otimização e aprendizado de máquinas.

6.2. Definições de algoritmos genéticos

Duas definições interessantes para algoritmos genéticos são apresentadas por Goldberg (1989) e por Tanomaru (1995), estas definições são:

Segundo Goldberg (1989), Algoritmos Genético são algoritmos de procura baseado nos mecanismos de seleção natural e genética. Ele combina a sobrevivência de estrutura de caracteres através de testes de ajustes com uma estruturada troca de informações aleatórias para formar um algoritmo de procura com algum talento inovador da procura humana. Em toda geração, um novo conjunto de criaturas artificiais (Caracteres) é criado usando bits e pedaços da geração anterior; uma parte nova ocasional é, então, experimentada. Algoritmos Genéticos

exploram eficientemente informações históricas para especular novos pontos de procura com uma performance melhorada.

Para Tanomaru (1995), Algoritmos Genéticos são métodos computacionais de busca baseados nos mecanismos de evolução natural e na genética. Em Algoritmos Genéticos, uma população de possíveis soluções para o problema em questão evolui de acordo com operadores probabilísticos concebidos a partir de metáforas biológicas, de modo que há uma tendência de que, na média, os indivíduos representem soluções cada vez melhores à medida que o processo evolutivo continua.

6.3. Algoritmo genético simples (AGS)

O algoritmo definido por Holland é comumente chamado de Algoritmo Genético Simples ou AGS. O princípio básico do funcionamento deste algoritmo pode ser observado na figura 6.1. Durante este processo, os melhores indivíduos, assim como alguns dados estatísticos, podem ser coletados e armazenados para avaliação. Estes algoritmos, apesar de serem computacionalmente muito simples, são bastante poderosos.

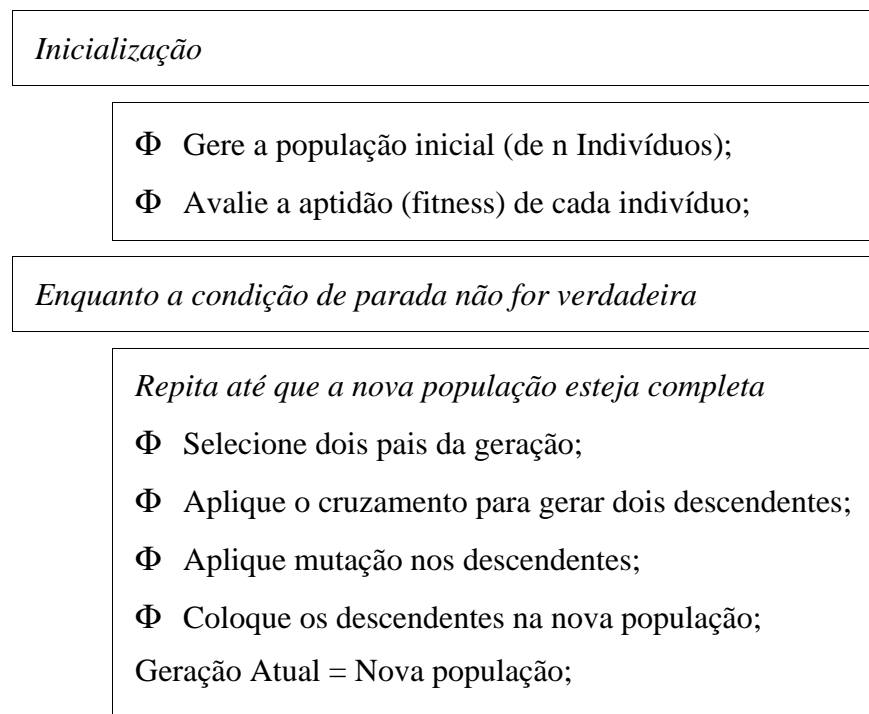


Figura 6.1. Princípio básico de funcionamento de um AG.

Um critério de seleção vai fazer com que, depois de muitas gerações, o conjunto inicial de indivíduos gere indivíduos mais aptos. A maioria dos métodos de seleção são projetados para

escolher preferencialmente indivíduos com maiores aptidões, embora não exclusivamente, a fim de manter a diversidade da população. Um método de seleção amplamente utilizado é o Método da Roleta, onde indivíduos de uma geração são escolhidos para fazer parte da próxima geração, através de um sorteio de roleta.

Um conjunto de operações é necessário para que, dada uma população, se consiga gerar populações sucessivas que melhorem sua aptidão com o tempo. Estes operadores são: cruzamento (crossover) e mutação. O cruzamento combina as características de dois cromossomos, escolhidos no processo de seleção, para formar dois descendentes semelhantes trocando segmentos correspondentes dos cromossomos. A principal característica do cruzamento é a troca de informação entre diferentes soluções de boa qualidade.

O processo de mutação altera genes de uma população selecionados arbitrariamente de acordo com a taxa de mutação. Esses operadores são utilizados para assegurar que a nova geração seja totalmente nova, mas possua características de seus pais, ou seja, a população se diversifica e mantém características de adaptação adquiridas pelas gerações anteriores. Para prevenir que os melhores indivíduos não desapareçam da população pela manipulação dos operadores genéticos, eles podem ser automaticamente colocados na próxima geração, através da reprodução elitista. Esse ciclo é repetido um determinado número de vezes, geralmente limitado através do número de gerações.

6.4. Aspectos gerais do algoritmo genético

Nesta seção serão analisadas as etapas do AGS, exemplificando-as. O algoritmo genético usa uma população de indivíduos, que nos problemas combinatoriais significa um conjunto de configurações, para resolver um problema de otimização. O ponto de partida para a utilização de algoritmos genéticos, como ferramenta para solução de problemas, é a representação destes problemas de maneira que os algoritmos possam trabalhar adequadamente, para isto é utilizado um mecanismo de codificação. A solução de um problema pode ser codificada em números binários, inteiros, reais ou combinação destes. As etapas a serem realizadas pelos AGs são:

1. Representar adequadamente uma configuração do problema. A representação popular é a representação em codificação binária, onde são facilmente implementados os operadores genéticos de cruzamento e mutação;

2. Encontrar uma forma adequada para avaliar a função objetivo ou de adaptação. Assim, as melhores configurações são aquelas que apresentam função objetivo de melhor qualidade;
3. Definir uma estratégia de seleção das configurações com direito a participar na formação das configurações da nova população;
4. Escolher um mecanismo que permita implementar o operador genético de cruzamento;
5. Definir um mecanismo que permita implementar o operador genético de mutação;
6. Definir um critério de parada para finalizar a execução do algoritmo.

6.4.1. Mecanismo de codificação

Usualmente, os cromossomos são representados na forma de um vetor onde cada componente representa um gene (ou uma variável da solução). Entre os tipos de representação dos cromossomos, pode-se encontrar na literatura a representação com variáveis binárias, com variáveis inteiras e com variáveis reais. Os primeiros algoritmos genéticos usaram codificação binária (Goldberg, 1989), ou seja, as variáveis inteiras e reais são transformadas em codificação binária. Este tipo de codificação é a mais utilizada até hoje, por ser facilmente interpretada e se adaptar aos mecanismos de renovação de uma população de cromossomos. Uma abordagem utilizando variáveis reais pode ser encontrada em Michalewicz, 1996.

A seguir, tem-se alguns exemplos de como são aplicadas as codificações de variáveis: binárias \rightarrow binárias, inteira \rightarrow binárias e reais \rightarrow binárias.

Variáveis Binárias

Seja um problema com 4 variáveis: $x_1, x_2, x_3, x_4 \in \{0,1\}$, neste caso o cromossomo pode ser representado da seguinte maneira:

$$X = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ \hline \end{array}$$

A representação destas variáveis em codificação binária fornecerá:

$$X = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline 0 & 1 & 1 & 0 \\ \hline \end{array}$$

Variáveis Inteiras

Neste caso, cada variável inteira pode ser representada por seu equivalente binário e ocupar as casas binárias na codificação. Seja um problema com 4 variáveis: $x_1, x_2, x_3, x_4 \in \{0,1,2,3,4,5\}$. Uma configuração particular assume a seguinte forma:

$$X = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline \underbrace{\hspace{3cm}} & \underbrace{\hspace{3cm}} & \underbrace{\hspace{3cm}} & \underbrace{\hspace{3cm}} \\ x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ \hline \end{array}$$

neste caso particular, a configuração acima representa os números inteiros $x_1 = 1, x_2 = 3, x_3 = 5$ e $x_4 = 0$.

Neste ponto surgem os primeiros problemas na codificação de variáveis inteiras em codificação binária. No exemplo abordado foi necessário 3 casas decimais para representar as variáveis x_j do problema, então existe a possibilidade que em um dado momento (após recombinações e mutações), x_j assumam valores infactíveis como $x = 6$ ou $x = 7$. Esse problema é agravado quando as variáveis do problema são valores reais variando num intervalo, como por exemplo $x_j \in [-1,10; 4,60]$, e se deseja codificá-las em variáveis binárias. Para contornar este problema foi apresentada uma estratégia diferente, utilizando uma codificação de variáveis reais.

Variáveis Reais

Para exemplificar o uso de variáveis reais, seja a variável x que pode assumir valores reais no intervalo $[a, b]$. Utilizaremos um vetor binário como um cromossomo para representar os valores reais de x , sendo que o comprimento do vetor depende da precisão requerida, sendo a precisão 10^c , “c” é o número de casas decimais requerida. O domínio de x tem comprimento $(b-a)$, o intervalo de valores $[a, b]$ pode ser dividido em $(b-a) \cdot 10^c$ subintervalos do mesmo tamanho. Desta maneira, pode-se estipular o número de bits (nb) necessários para representar a variável real num vetor binário, Michalewicz, 1996.

A conversão do vetor binário em número real pode ser obtida através da equação 6.1:

$$x = a + x' \cdot \frac{(b-a)}{2^{nb} - 1} \quad (6.1)$$

em que x' é a conversão do vetor binário $\langle b_{21} b_{20} \dots b_0 \rangle$ da base 2 para a base 10:

$$(\langle b_{nb-1} b_{nb-2} \dots b_0 \rangle)_2 = \left(\sum_{i=0}^{nb-1} b_i \cdot 2^i \right)_{10} = x \quad (6.2)$$

Exemplificando, seja a variável x definida com uma precisão de 3 casas decimais no intervalo [1 5]; assim o número de subdivisões no intervalo será: $(5-1) \cdot 10^3 = 4000$. O número de bits necessário para representar a variável é: $2048(2^{11}) < 4000 < 4096(2^{12})$, ou seja, são necessários 12 bits para representar a variável x . Um vetor binário (ou cromossomo) típico pode assumir a seguinte forma (0 1 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0) que representa o número 2,366 desde que:

$$x' = (0 1 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0)_2 = 1398$$

e

$$x = 1 + 1398 \cdot \frac{(5-1)}{2^{12}-1} = 2,366$$

6.4.2. População inicial

Ao iniciarmos o processo computacional, um número de indivíduos (ou cromossomos) são criados aleatoriamente (pois, segundo a literatura, a melhor solução encontrada deve ser independente da população inicial). Para a maioria dos problemas, o processo de geração da população inicial dos algoritmos genéticos é simples, onde cada cromossomo é um vetor binário. Normalmente, utiliza-se procedimentos aleatórios ou algoritmos heurísticos, mas deve-se tomar cuidado para que a população inicial represente adequadamente o espaço de busca.

Em relação à população existem dois aspectos principais a serem discutidos: o tamanho da população e a forma de gerar a população inicial. O tamanho da população deve ser escolhido em função do tamanho do problema e a experiência com AGs. No caso do problema de quantificação de falhas, para a estrutura analisada, veremos nos resultados obtidos que o tamanho da população irá variar com o número de variáveis que são consideradas no problema, especificamente, no número de elementos onde possíveis falhas possam ocorrer.

6.4.3. Função de avaliação

A função de avaliação (ou função objetivo) tem o papel de avaliar o nível de aptidão (fitness) de cada cromossomo gerado pelos algoritmos genéticos; esta função será utilizada para implementar o processo de seleção. Para manter a uniformidade sobre o domínio de vários

problemas, geralmente torna-se necessário normalizar a função objetivo dentro de determinados parâmetros. Em problemas de maximização com uma função objetiva que assume somente valores positivos, a aptidão pode ser, simplesmente, representada pela função objetivo do problema. Por outro lado, se g é uma função objetivo, positiva para minimizar, então, por exemplo, $f_1 = 1 / (1 + g)$ e $f_2 = 1 / (1 + g^2)$ podem representar funções de fitness. Neste caso, a minimização de g corresponde à maximização de f_1 ou f_2 .

6.4.4. Operador de seleção

Este operador é responsável por selecionar os indivíduos da geração corrente que devem participar da formação de uma nova população. Alguns indivíduos podem gerar vários descendentes e outros podem ser eliminados do processo por não serem de boa qualidade. São vários os tipos de seleção, a seguir são apresentados os tipos que são freqüentemente utilizados.

Seleção Proporcional (ou roleta)

A seleção proporcional apareceu juntamente com a teoria básica de algoritmos genéticos. Neste processo cada configuração tem direito de gerar um número de descendentes, que é proporcional ao valor de sua função de avaliação. Assim, o número de descendentes é encontrado usando a seguinte relação:

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^n f_i} \quad (6.3)$$

em que p_i é a probabilidade que o indivíduo i tem para ser selecionado, f_i é o valor da função de avaliação (fitness) do indivíduo i na população corrente e n é o tamanho da população.

De acordo com a equação 6.3, pode-se afirmar que cada indivíduo da população é representado na roleta proporcionalmente a sua aptidão. Aos indivíduos com alta aptidão é dada uma maior proporção na roleta e quanto menor a aptidão menor é a participação relativa na roleta. No exemplo da figura 6.2 é possível observar o processo de seleção proporcional.

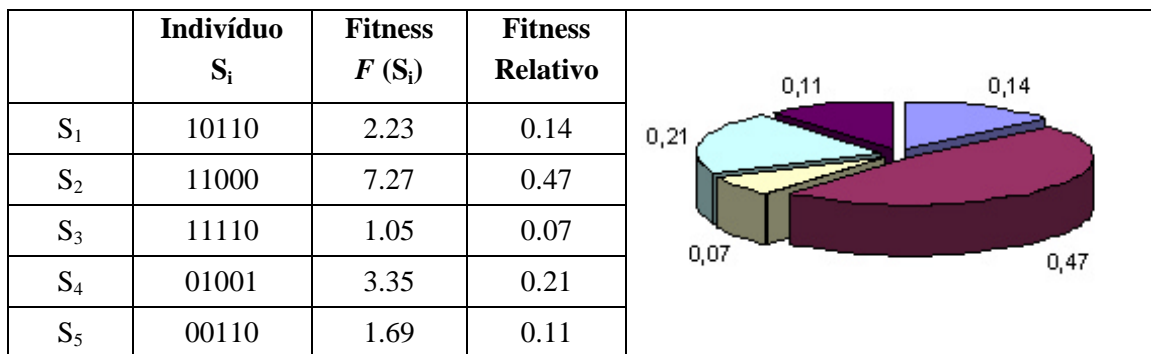


Figura 6.2. Exemplo de processo de seleção usando a roleta.

Este processo de seleção apresenta dois grandes problemas, listados a seguir:

- Superconfigurações: se nas fases iniciais do processo aparecem soluções excelentes então estas soluções eliminam a participação de outras, eliminando prematuramente, assim, o conteúdo energético de indivíduos pouco atrativos.
- Perda de seletividade: nas fases finais os valores das funções de adaptação são próximos, ou seja, os indivíduos são de qualidade, desaparecendo a seletividade do processo.

Para tentar contornar estes dois problemas, foram propostas modificações no processo, como pode ser visto a seguir.

Seleção estocástica do resíduo

Com este tipo de seleção o uso da roleta é diminuído, avaliando somente a parte fracionária, considerando a parte inteira sem o uso da roleta. O esforço computacional é diminuído pois a roleta é utilizada apenas para terminar o processo de seleção. Mas esta proposta não resolve os dois problemas típicos da seleção proporcional.

Seleção determinística

Esta proposta de seleção elimina o uso da roleta, realizando-se seleção determinística da parte inteira do número de indivíduos como na proposta anterior e termina o processo usando a parte fracional do número de descendentes. Este processo prioriza os indivíduos que apresentam maior parte fracionária. Assim como no processo anterior, este processo não resolve os dois problemas típicos da seleção proporcional.

Seleção com participações limitadas

Esta proposta consiste em limitar o número máximo de descendentes que pode ter uma configuração, isto é, nenhuma configuração pode ter direito a gerar um número de descendentes maior que um limite especificado. Esta proposta pode ser incorporada nos processos de seleção analisados anteriormente, com isto o problema de superconfigurações nas fases iniciais é resolvido parcialmente.

Seleção usando escalonamento linear

A idéia básica, é modificar os valores da função de adaptação antes de iniciar o processo de seleção proporcional, com isto, o aparecimento de superconfigurações nas fases iniciais do processo e perda de seletividade das fases finais do processo são atenuados.

$$f' = af + b \quad (6.4)$$

em que f é a função de adaptação e f' é a função de adaptação escalonada. Os coeficientes a e b são obtidos a partir de duas condições: o valor médio dos f e dos f' devem ser iguais, e escolhe-se o valor máximo de um f' como sendo proporcional ao valor médio, $f'_{máx} = c_t \cdot f'_{med}$, valores típicos para c_t são [1,2 ; 2,0].

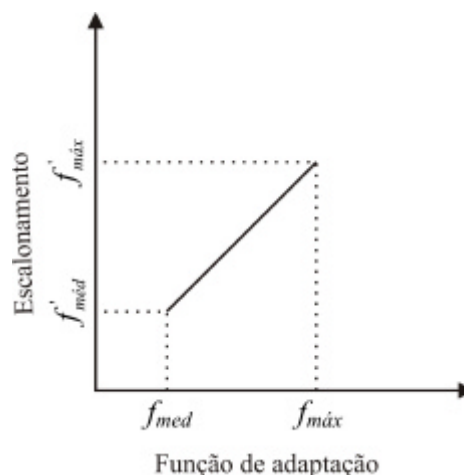


Figura 6.3. Escalonamento linear

Seleção usando ordenamento (ranking)

Nesta proposta a seleção é realizada usando um ordenamento pré-estabelecido e o número de descendentes é encontrado usando uma função de designação adequada. Numa seleção ordenada, os descendentes são ordenados em ordem decrescentes dos valores da função

de adaptação para o problema de maximização e em ordem invertida para o problema de minimização. No ordenamento linear, o número de descendentes varia linearmente, assim, a função de adaptação é usada apenas para fazer o ordenamento. O número de descendentes não é inteiro, portanto, deve-se utilizar o processo de seleção proporcional para terminar o processo.

Com a seleção baseada no ordenamento linear é resolvido os dois problemas existentes na seleção proporcional (roleta), ou seja, o aparecimento de superconfigurações nas fases iniciais e perda de seletividade nas fases finais.

A função de designação linear $[a(x)]$ que permite encontrar o número de descendentes para cada configuração deve satisfazer algumas propriedades teóricas:

1. $a(x) \in \mathbb{R}$ para $x \in [0, 1]$;
2. $a(x) \geq 0$;
3. $\int_0^1 a(x).dx = 1$

Seja a forma geral de $a(x) = a_0 - a_1x$, então se tem:

$$\int_0^1 a(x).dx = 1 \rightarrow \int_0^1 (a_0 - a_1x)dx = \left[a_0x - \frac{a_1}{2}x^2 \right]_0^1 = 1 \quad (6.5)$$

$$a_0 - \frac{a_1}{2} = 1 \rightarrow a_1 = 2.(a_0 - 1) \Rightarrow a(x) = a_0 - 2.(a_0 - 1)x \quad (6.6)$$

A exigência de que $a(x) \geq 0$ limita o valor de a_0 para o intervalo: $0 < a_0 < 2$.

Seleção baseada no torneio

Nesta seleção os descendentes são escolhidos realizando n jogos sendo n o tamanho da população. Em cada jogo são selecionados k indivíduos da população e o indivíduo que tem a melhor função de adaptação é declarado vencedor. O valor de k é geralmente pequeno, tipicamente $k \in \{2, 3, 4, 5\}$. Após n jogos encerra-se o processo de seleção. O número de descendentes encontrados é um número inteiro, com isto, o uso de processo de seleção proporcional para terminar o processo é dispensado. O esforço computacional é menor por este tipo de seleção, e tanto para problemas de maximização como de minimização, a estratégia é a

mesma. Outra vantagem do método é que elimina os dois problemas existentes na seleção proporcional, porque a seleção depende apenas dos valores relativos das funções de adaptação.

6.4.5. Operador de cruzamento

Cruzamento é o operador responsável pela recombinação de características dos pais selecionados no processo de seleção, permitindo que as próximas gerações herdem essas características. Este operador tenta simular o fenômeno de crossing over na genética. Ele é considerado o operador genético predominante, pôr isso a taxa de cruzamento deve ser maior do que a taxa de mutação.

Existem vários tipos de cruzamento, a diferença entre eles está no número de ponto de cruzamento. Assim estes tipos de cruzamento são conhecidos como: cruzamento de um ponto, cruzamento de vários pontos e cruzamento uniforme.

Cruzamento de um ponto

Um ponto de cruzamento é escolhido e a partir deste ponto as informações genéticas dos pais serão trocadas, gerando novos descendentes. Seja um indivíduo com k bits, então, deve-se gerar de forma aleatória um número entre 1 e $(k - 1)$, este será o ponto de cruzamento. As informações anteriores a este ponto em um dos pais são ligadas às informações posteriores à este ponto no outro pai selecionado para o cruzamento. A figura 6.4 mostra um exemplo de cruzamento com um ponte de corte.

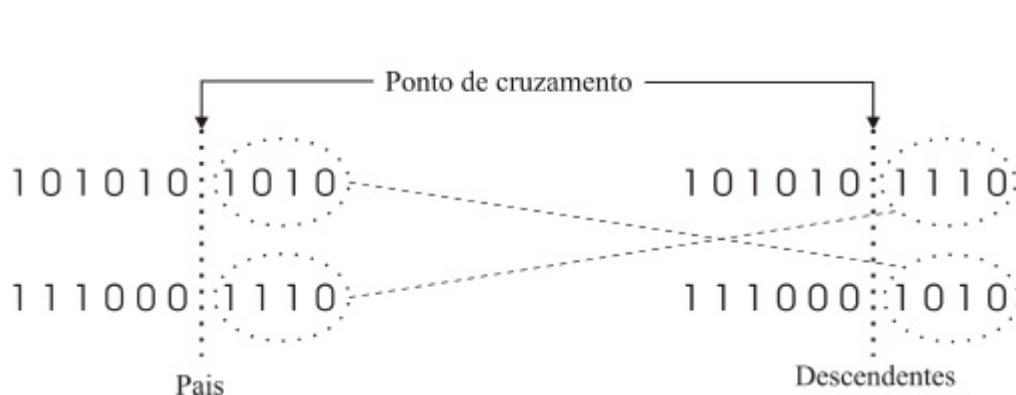


Figura 6.4. Exemplo de cruzamento com um ponto de corte

Vários pontos de cruzamento

Este cruzamento é uma generalização do cruzamento com um ponto de corte. A diferença é que agora dois ou mais pontos podem ser utilizados para realizar o cruzamento entre os pais. A figura 6.5 mostra um exemplo considerando dois pontos de corte.

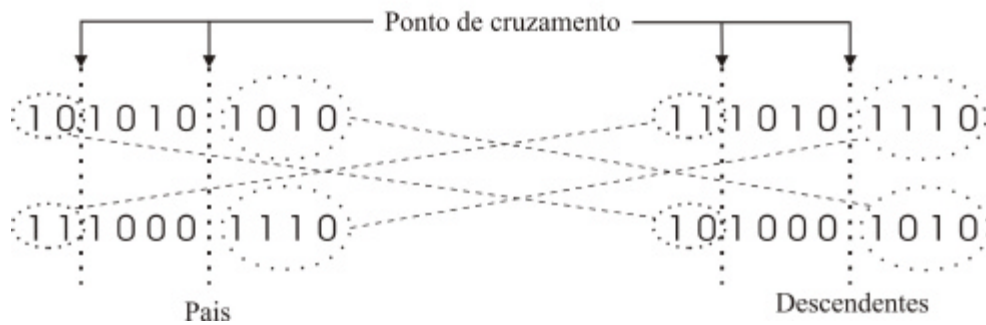


Figura 6.5. Exemplo de cruzamento com dois pontos de corte.

Cruzamento uniforme

No cruzamento uniforme cada bit do descendente é escolhido aleatoriamente dos correspondentes bit dos pais, este cruzamento pode ser observado na figura 6.6.

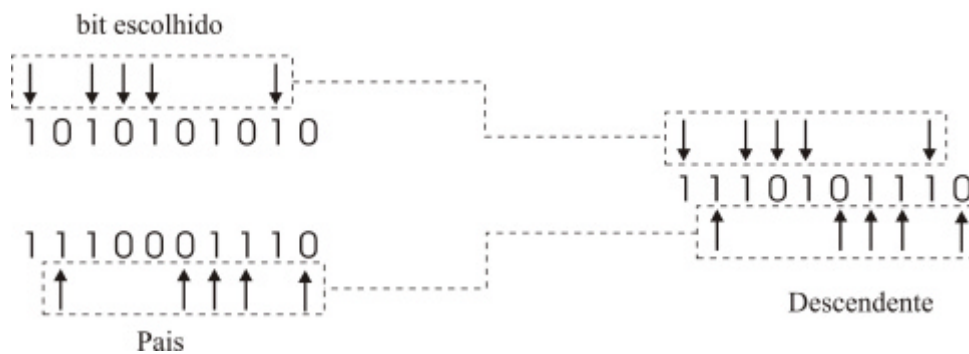


Figura 6.6. Exemplo de cruzamento uniforme.

6.4.6. Mutação

O processo de mutação é responsável pela alteração de um bit no indivíduo de 0 para 1 ou vice-versa. Este operador é necessário para a manutenção da diversidade genética da população, servindo para incluir novos indivíduos na população. Desta forma o processo de mutação assegura que a probabilidade de chegar a qualquer ponto do espaço de busca nunca é zero, colaborando no contorno de problemas com mínimos locais. Este operador é aplicado a um bit, sendo que este tem uma probabilidade de sofrer mutação dada pela taxa de mutação.

A taxa de mutação (p_m) normalmente assume valores pequenos, valores menores que a taxa de cruzamento. Supondo uma taxa igual a 0,01, então é gerado um número aleatório entre 0 e 1 para cada bit. Se esse número é menor que 0,01 o bit é alterado. Esse processo pode exigir um esforço computacional significativo; por exemplo, seja uma população com 100 indivíduos e cada indivíduo com 100 bits, isto implica em gerar 10000 números aleatórios possíveis de serem mutados. Na figura 6.7 é possível observar o processo de mutação aplicado a um bit.



Figura 6.7. Exemplo de mutação de um gene.

6.4.7. Parâmetros de controle

O adequado funcionamento de um algoritmo genético depende em grande parte de uma boa escolha dos parâmetros de controle, tais como: tamanho da população, taxa de cruzamento e taxa de mutação. Geralmente estes valores são configurados antes de executar o algoritmo, baseando-se em experimentação ou, estes parâmetros podem ser variáveis (Lehrer, 2002). A sintonia destes parâmetros consome tempo e é praticamente impossível obter todas as combinações destes parâmetros e ainda, os valores selecionados não são necessariamente ótimos. Valores típicos recomendados pela literatura especializada são os seguintes:

- Tamanho da população (n_p): Entre 30 e 200 indivíduos.
- Taxa de cruzamento (ρ_c): Entre 0,5 e 1,0.
- Taxa de mutação (ρ_m): Entre 0,001 e 0,05.

Tamanho da População

O tamanho da população afeta o desempenho global e a eficiência dos AGs. Uma população pequena oferece uma pequena cobertura do espaço de busca, causando uma queda no desempenho. Uma população suficientemente grande fornece uma melhor cobertura do domínio do problema e previne a convergência prematura para soluções locais. Entretanto, com uma grande população tornam-se necessários recursos computacionais maiores, ou um tempo maior

de processamento do problema. Logo, deve-se buscar um ponto de equilíbrio no que diz respeito ao tamanho escolhido para a população.

Taxa de Cruzamento

Quanto maior for esta taxa, mais rapidamente novas estruturas serão introduzidas na população. Entretanto, isto pode gerar um efeito indesejado pois a maior parte da população será substituída, ocorrendo assim perda de variedade genética. Neste caso, pode ocorrer perda de estruturas de alta aptidão e convergência a uma população com indivíduos extremamente parecidos, indivíduos estes de solução boa ou não. Com um valor baixo, o algoritmo pode se tornar lento para oferecer uma resposta aceitável.

Taxa de Mutação

Uma baixa taxa de mutação previne que uma dada solução fique estagnada num valor, além de possibilitar que outros pontos do espaço de busca sejam visitados. Enquanto, taxa de mutação alta pode tornar a busca essencialmente aleatória.

6.4.8. Critérios de Parada

Existem vários critérios de parada que podem ser implementados. Desta maneira, o processamento do algoritmo genético pode ser interrompido quando:

- For executado um determinado número de gerações;
- A melhor solução encontrada assume um valor desejado;
- A melhor solução encontrada não melhora durante um determinado número de gerações;
- As soluções ficam homogêneas, assim, praticamente não haverá evolução.

Na prática, mais de um critério de parada pode ser utilizado simultaneamente. A implementação destes critérios depende do problema que está sendo analisado.

Neste capítulo foi apresentado a teoria básica sobre algoritmos genéticos, analisando os aspectos envolvidos na execução do programa, desde a codificação da variável até o critério de parada de execução do programa. Um maior aprofundamento na teoria de algoritmos genéticos pode ser encontrado nas referências (Goldberg, 1989 e Michalewisc, 1996).

Capítulo 7

RESULTADOS

INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos quando se utilizou a técnica da impedância elétrica para detectar falhas estruturais. As medidas experimentais foram realizadas com o analisador de impedância HP 4192A. As curvas de impedância são avaliadas através do valor da falha métrica. Na segunda parte deste capítulo são apresentados os resultados de quantificação da falha na estrutura, obtidos através de um método de otimização, que neste trabalho foi empregado algoritmos genéticos. Uma das vantagens em se combinar estas duas técnicas, impedância elétrica e algoritmos genéticos, é a possibilidade de identificação de falhas simultâneas, em diferentes estágios de evolução.

7.1. Impedância elétrica

As medidas de impedância elétrica são necessárias para realizar a primeira etapa da metodologia proposta, ou seja, determinar a localização da falha na estrutura. Todas as medidas de impedância realizadas e mostradas neste item, foram realizadas com o equipamento HP 4192A.

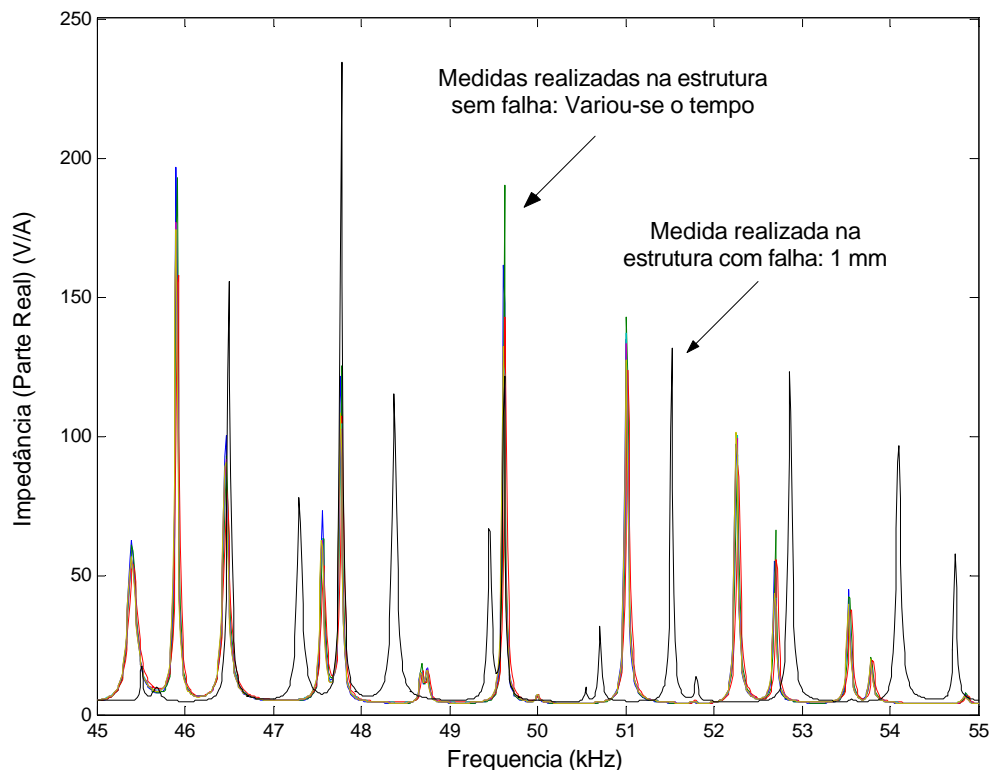
Diferentes ensaios foram realizados para se analisar a repetibilidade das medidas de impedância elétrica nos elementos PZTs, para se verificar a influência da voltagem aplicada, para se determinar a área de influência do PZT e, também, a influência da variação de temperatura nas medidas de impedância elétrica. As características dos sensores/atuidores piezelétricos utilizados podem ser vistas na tabela 7.1. As propriedades do material piezelétrico são baseadas no material designado por PSI-5A-S4 (Piezo Systems, Inc.).

Tabela 7.1. Características da cerâmica piezolétrica utilizada.

$E_p = 63 \text{ GPa}$	$\rho_p = 7650 \text{ kg/m}^3$
$d_{31} = -190 \text{ e-12 m/V}$	$d_{33} = -190 \text{ e-12 m/V}$
$c_{11} = 1.07 \text{ e11 N/m}^2$	$K^T = 1800$
$E_p = 30.705 \text{ N.m/V. m}^2$	$\epsilon_{33}^S = 7.33 \text{ e-9 F/m}$

7.1.1. Repetibilidade das medidas

Para avaliar a repetibilidade das medidas e, assim, a confiabilidade da técnica não-destrutiva utilizando PZTs, várias medidas foram realizadas em diferentes intervalos de tempo. As medidas foram realizadas em 0 hora (medida utilizada como referência), 7 horas após, 24 horas 72 horas e 79 horas após a primeira medida. Após a última medida, uma falha de 1 milímetro de largura por 0.5 milímetro de profundidade foi introduzida a uma distância de 440 milímetros do PZT. Características da estrutura, posição do PZT e local da falha podem ser observadas na figura 7.7. As medidas foram realizadas com o PZT 1, utilizando o analisador de impedância HP 4192A e a faixa de frequência entre 45- 55 kHz. A figura 7.1 mostra as medidas de impedância para todas situações citadas acima.

**Figura 7.1. Curvas de impedância (parte real) das medidas realizadas na estrutura sem e com falha.**

A avaliação qualitativa da falha foi realizada através do cálculo da falha métrica escalar, definida com a soma das diferenças quadráticas da parte real da impedância em todo o passo de frequência. A equação 7.1 mostra a falha métrica, M , na forma matemática. As variáveis utilizadas foram: $Z_{i,1}$ medida de impedância de referência; $Z_{i,2}$ medida de impedância da estrutura monitorada; e n o número de passos da frequência.

$$M = \sum_{i=1}^n [\text{Re}(Z_{i,1}) - \text{Re}(Z_{i,2})]^2 \quad (7.1)$$

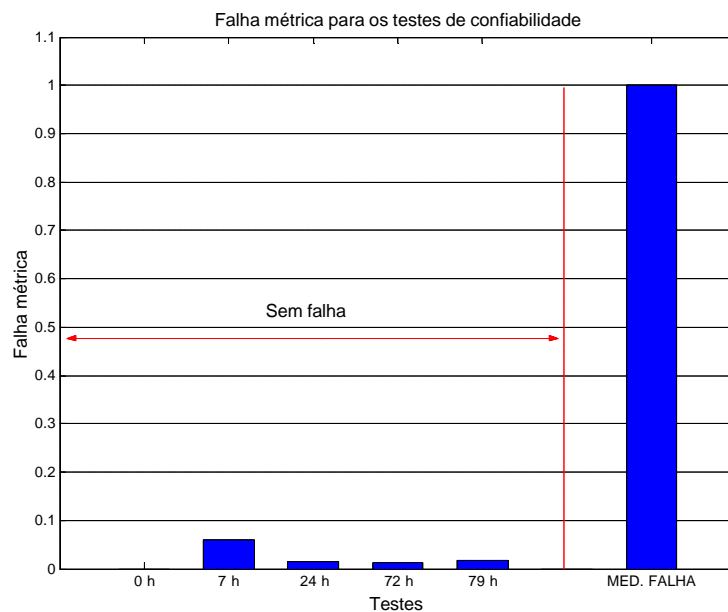


Figura 7.2. Falha métrica: Teste de repetibilidade.

A figura 7.2 mostra os valores obtidos para os diferentes intervalos de tempo. A figura, também, mostra que existe uma leve oscilação na falha métrica escalar com o tempo decorrido. Entretanto, comparando os valores das falhas métricas em relação a estrutura com falha, pode-se definir um valor mínimo (threshold), acima do qual é uma indicação da ocorrência de falhas. Variações abaixo deste valor são creditadas a outros fatores. Com esta definição, pode-se então, garantir a repetibilidade destas medidas.

7.1.2. Influência da voltagem aplicada no PZT

Foram realizadas medidas de impedância numa barra (figura 7.7) com o objetivo de se verificar a influência da voltagem aplicada no PZT. Para isto foi utilizada a mesma configuração em todas as medidas realizadas: número de pontos, faixa de frequência, velocidade das

aquisições (O analisador de impedância HP 4192A, possui três velocidades de aquisição das medidas: Normal, Média e Alta velocidade. Para todas as medidas realizadas, se utilizou a velocidade média de medida.) e número de médias.

Foram realizadas medidas para variações de voltagem de 1.0, 0.9, 0.8 e 0.7 Volts. Os resultados obtidos podem ser vistos na figura 7.3. A voltagem aplicada no PZT tem uma influência no valor de pico da ressonância na curva de impedância, não alterando a forma da curva.

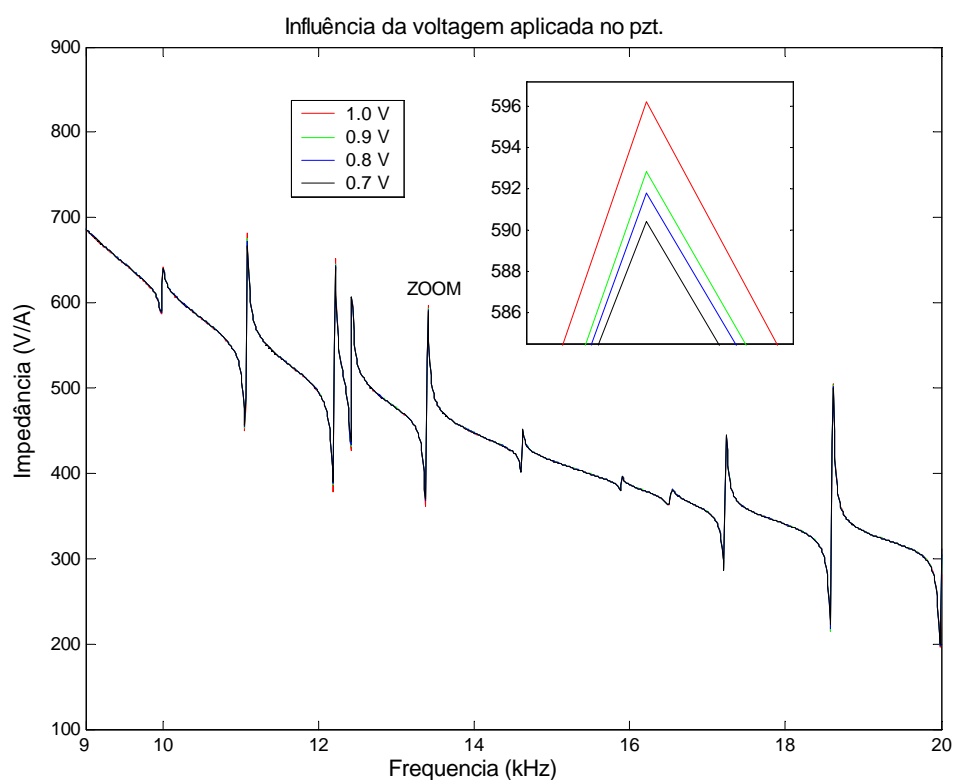


Figura 7.3. Influência da voltagem aplicada no PZT.

7.1.3. Área de influência do PZT

É importante se conhecer qual a capacidade e a qual distância o sensor/atuador PZT pode monitorar uma modificação estrutural. Pouco se tem na literatura sobre esse assunto, na verdade não se encontram trabalhos que possam esclarecer qual a área de atuação do PZT. Neste sentido se pretende estudar aqui qual a área de influência do PZT. Com o intuito de se determinar a área de influência, foram realizadas diversas medidas numa placa de aço. Neste experimento ainda se pode analisar o comportamento das medidas de impedância quando a falha se aproxima em

direção do PZT. Durante estes testes foi possível, também, se analisar a influência da temperatura nas medidas realizadas.

As medidas de impedância foram realizadas com o analisador de impedância HP 4192A. A faixa de frequência analisada é de 44 à 55 kHz, por ser uma faixa com acentuada variação e, portanto, adequada para se detectar falha na estrutura. Para simular a falha na placa, um furo passante de 3 milímetros de diâmetro foi feito na estrutura. Os furos estão numerados de 1 a 8, sendo o furo 1 o que está próximo a extremidade da placa e o furo 8 o que está mais próximo do PZT. A figura 7.4 mostra as posições das falhas realizadas na placa, assim como a posição do PZT colado na estrutura e as dimensões da placa, sendo a espessura de 2 milímetros.

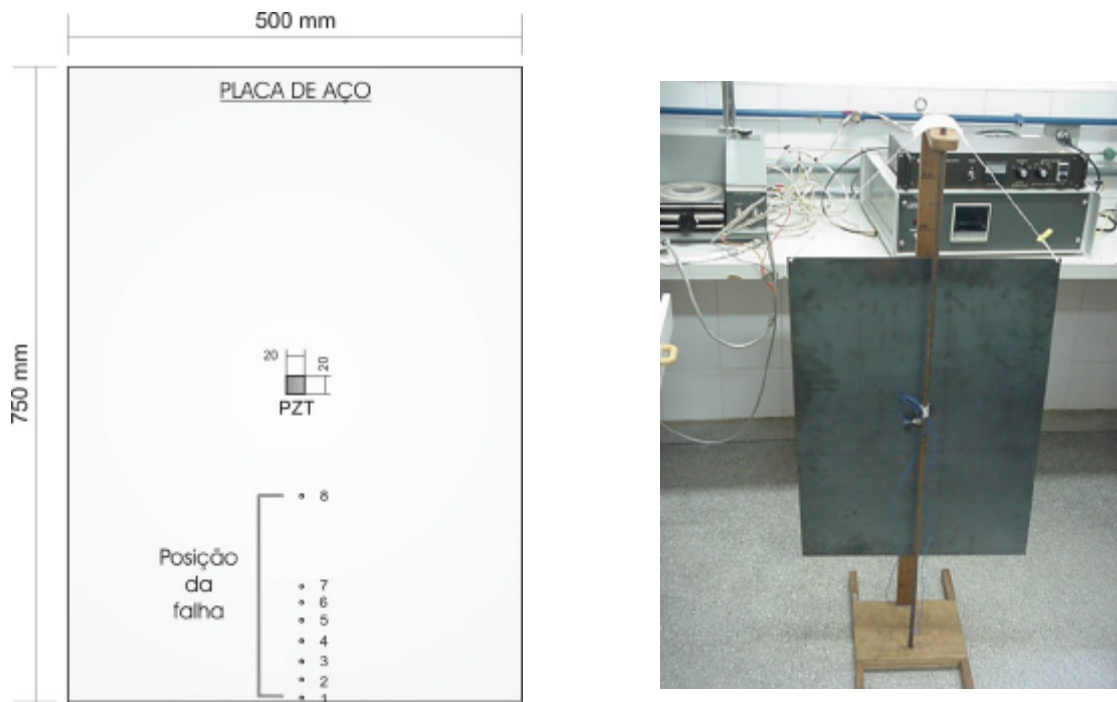


Figura 7.4. Placa de aço utilizada na determinação da área de influência do PZT.

O procedimento do experimento foi inserir a falha na estrutura e, então, medir a impedância elétrica (parte real). A primeira falha foi inserida a uma distância de 5 mm da extremidade, a partir desta foram inseridas falhas a uma distância de 20 mm até a sétima falha. A distância entre a sétima e oitava falha é de 100 mm. As curvas de impedância podem ser observadas na figura 7.5.

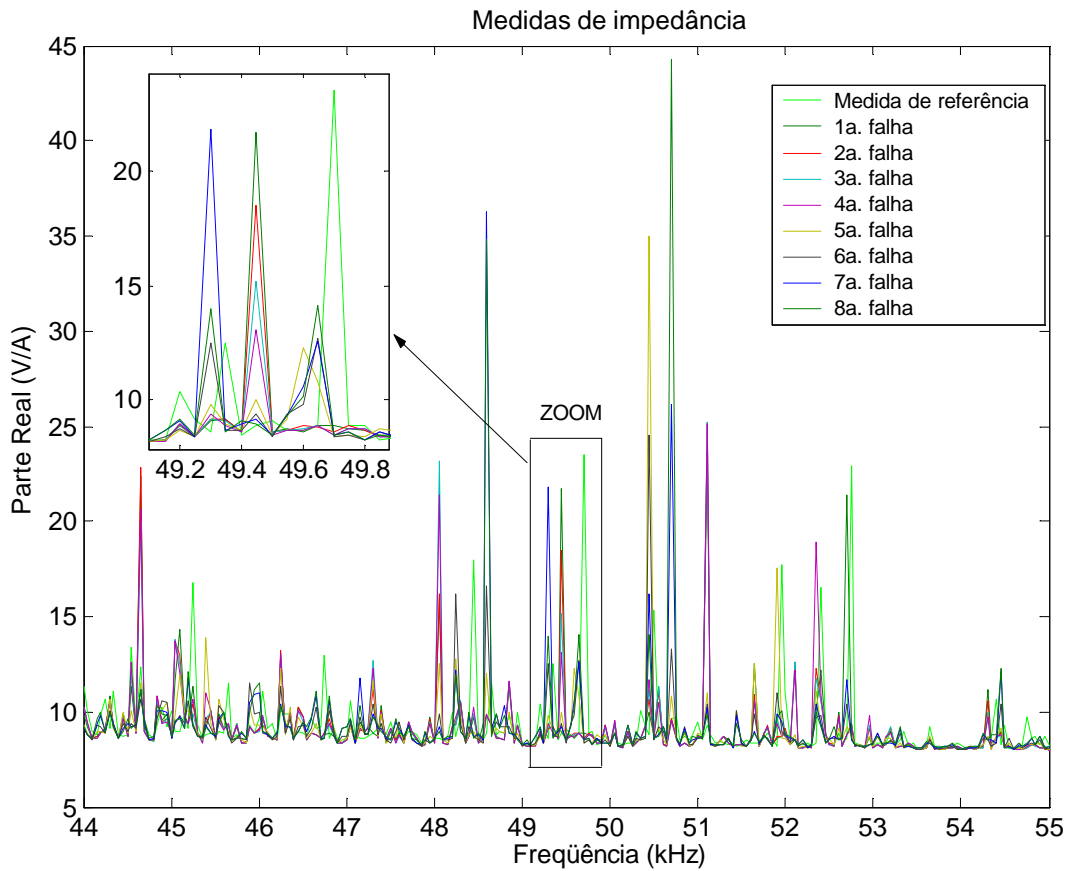


Figura 7.5. Curvas de impedância (real) para cada falha realizada na placa.

Neste teste foi possível, também, verificar o efeito da temperatura ambiente sobre as medidas de impedância. É conhecido que as propriedades dos materiais inteligentes, tais como cerâmicas piezelétricas e fibras óptica, são dependentes da temperatura (DeGuilio, 2000). Para as medidas realizadas até a quinta falha, a temperatura ambiente foi de 25° C (ar-condicionado ligado), da sexta até a oitava falha, as medidas foram realizadas a 31° C (ar-condicionado desligado) em temperatura ambiente. Após a medida de impedância realizada para a quinta falha, se esperou 10 minutos para realizar a medida para a sexta falha. As falhas métricas computadas para as diferentes situações são mostradas na figura 7.6.

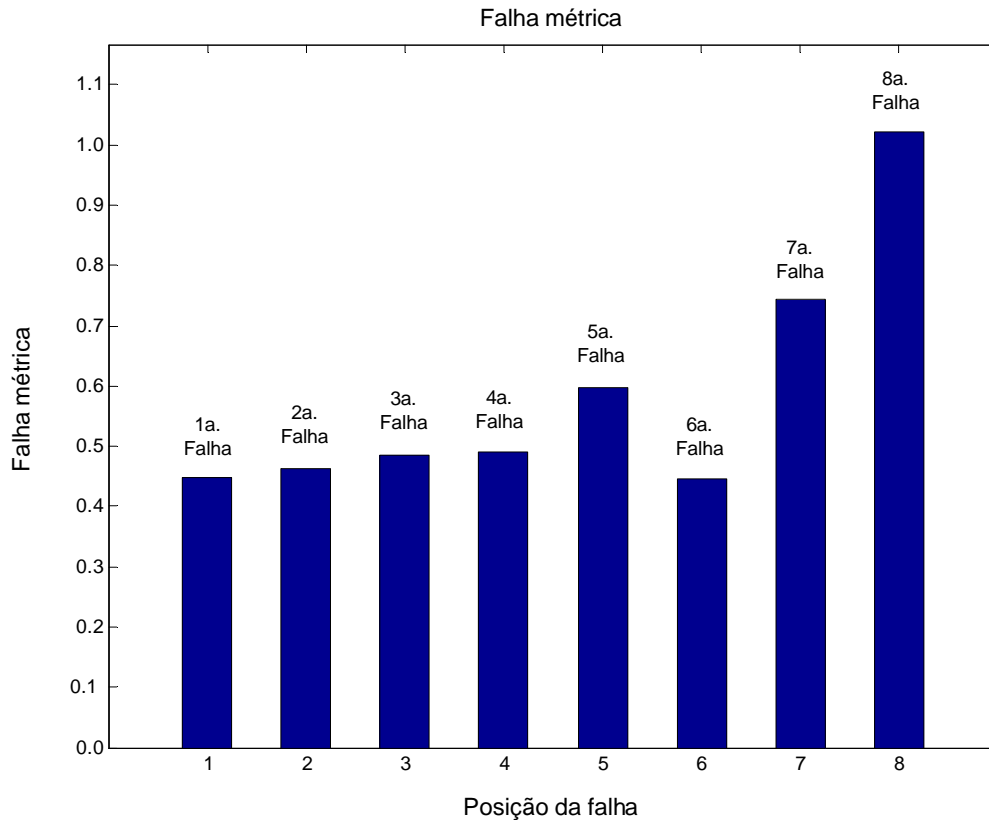


Figura 7.6. Falha métrica computada para todas as posições de falha.

Analisando a figura 7.6 se tem uma descontinuidade no crescimento da falha métrica. A tendência de crescimento no valor da falha métrica é uma exponencial. Quanto mais perto a falha, maior a variação na curva de impedância. A descontinuidade na curva foi observada na sexta falha, ou seja, na medida em que houve a alteração da temperatura ambiente.

As medidas de impedância elétrica foram realizadas em altas faixas de frequência e baixa tensão elétrica. A área de influência do PZT é, portanto, função da propagação de ondas destes atuadores. Para a situação de a falha na posição 1 (falha próxima a extremidade da placa), o PZT detectou a mudança estrutural, como pode ser visto na figura 7.6. Assim se pode concluir que em estruturas como a analisada, placas sem soldas e sem dobras, a área de monitoramento do PZT é superior a 350 milímetros. A variação das curvas é, também, função da severidade da falha. portanto, um estudo completo da área de influência deverá considerar diferentes situações de severidade da falha.

7.2. Medidas de impedância numa barra

Realizou-se um experimento numa barra de alumínio com o objetivo de se localizar falhas incipientes na estrutura, acompanhar a evolução das falhas e analisar o comportamento quando se tem falhas simultâneas na estrutura. Para isto foi utilizado uma barra de alumínio com 600x25x5 milímetros de comprimento, largura e espessura, respectivamente. A localização dos PZTs e as posições das falhas podem ser vistas na figura 7.7.

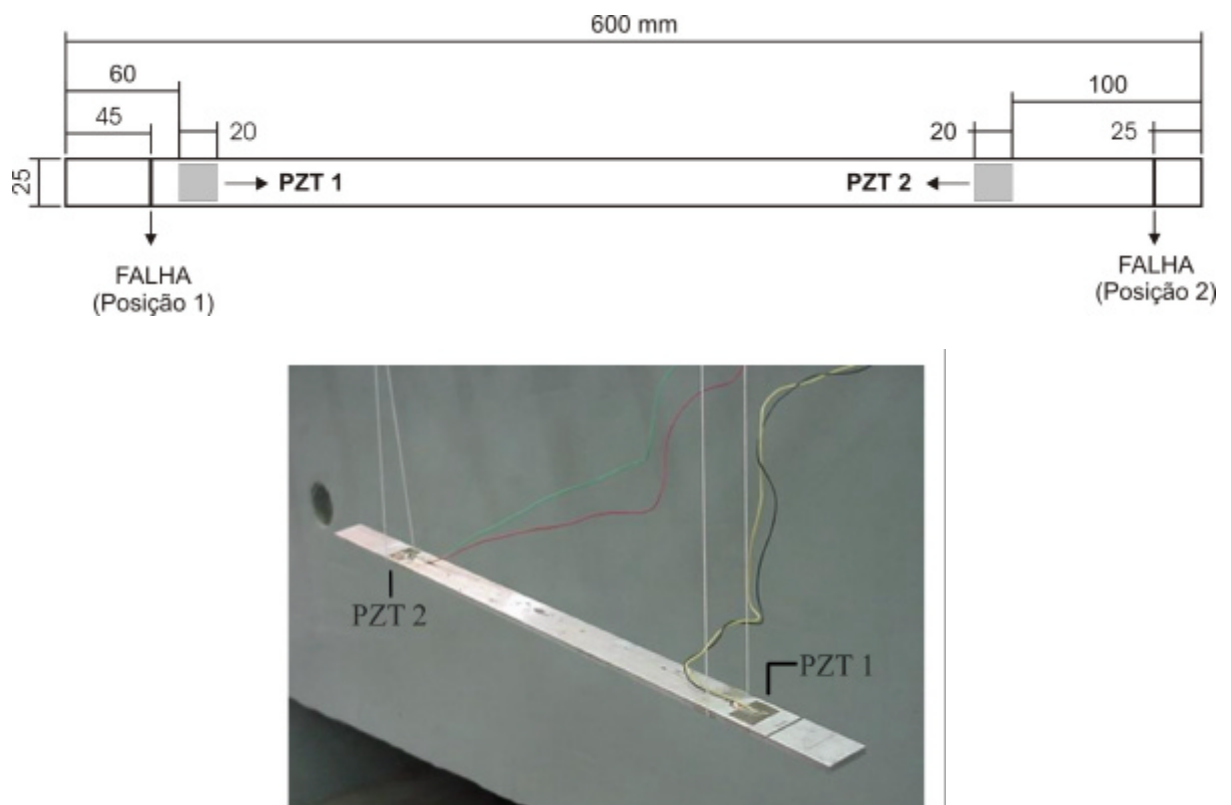


Figura 7.7. Estrutura analisada, posição dos PZTs e posição das falhas.

Na estrutura foram colados dois PZTs (um em cada extremidade da barra, designados por PZT 1 e PZT 2). Duas falhas foram realizadas na estrutura, estas falhas foram designadas como FALHA (Posição 1) e FALHA (Posição 2). Na primeira parte do experimento, que será explorada no caso 1, realizou-se o monitoramento, através do sinal de impedância elétrica dos dois PZTs, da evolução da falha na posição 1. Na segunda parte do experimento realizou-se o monitoramento, da falha na posição 2. Os dois casos citados acima são abordados a seguir.

7.2.1. Caso 1: Monitoramento da falha na posição 1.

Nesta primeira etapa do experimento foram tomadas medidas da estrutura sem falha e após o aparecimento de uma falha (Falha na posição 1). A condição de falha inserida na estrutura é um corte transversal com uma fresa de disco de 2.0 milímetros de largura. Esta falha foi inserida na mesma face em que estão colados os PZTs. A primeira situação de falha, 0.5 milímetros de profundidade, permite analisar o comportamento da técnica da impedância elétrica para falhas incipientes.

Medidas realizadas com o PZT 1.

Na figura 7.8 estão mostrados os resultados para uma faixa de frequência de 20 a 60 kHz medidos com o PZT 1 (ver figura 7.7). Isto foi realizado para se definir a faixa para de medidas de impedância (parte real). Após a análise dos resultados, definiu-se a faixa de 43 a 53 kHz como sendo a faixa para análise dos resultados experimentais a serem obtidos.

Ocorreu alteração nos valores de impedância quando se inseriu a falha de 0.5 milímetros na estrutura. Esta alteração pode ser observada na figura 7.8, onde os picos de impedância para a situação de falha são maiores do que os medidos sem falha. A falha de 0.5 milímetros inserida na estrutura pode, então, ser detectada. As próximas medidas acompanham a evolução desta falha.

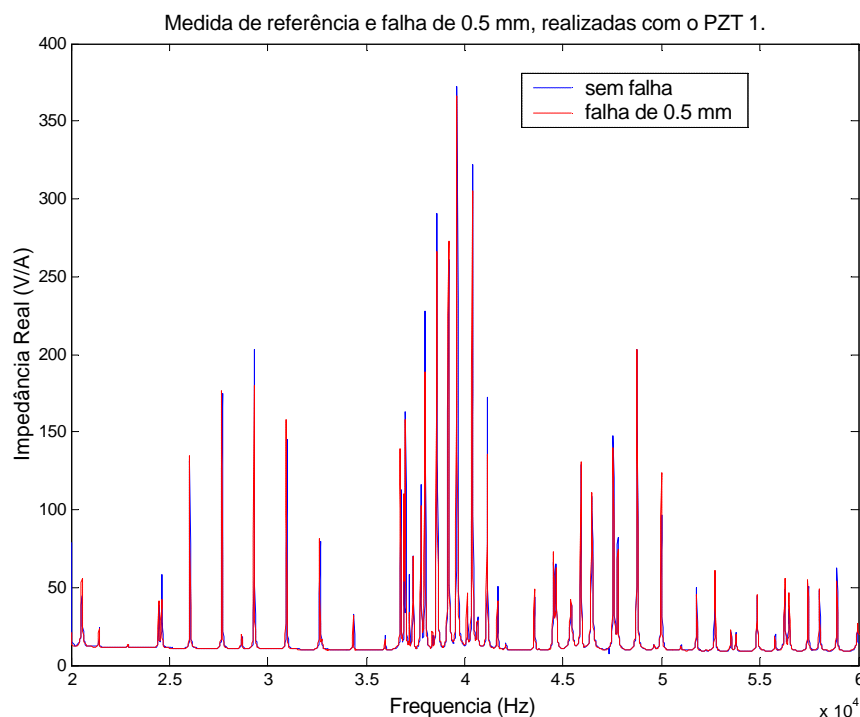
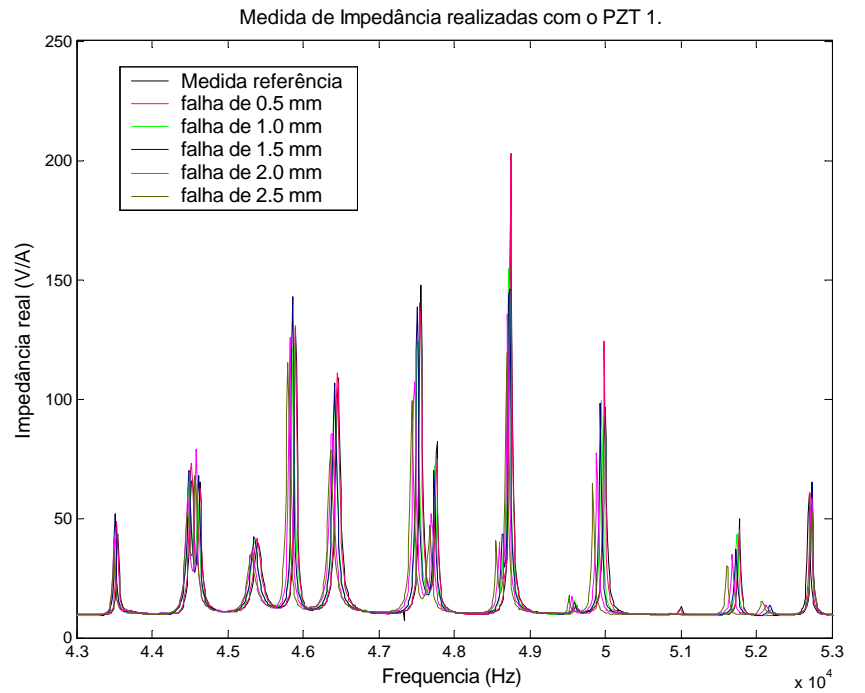
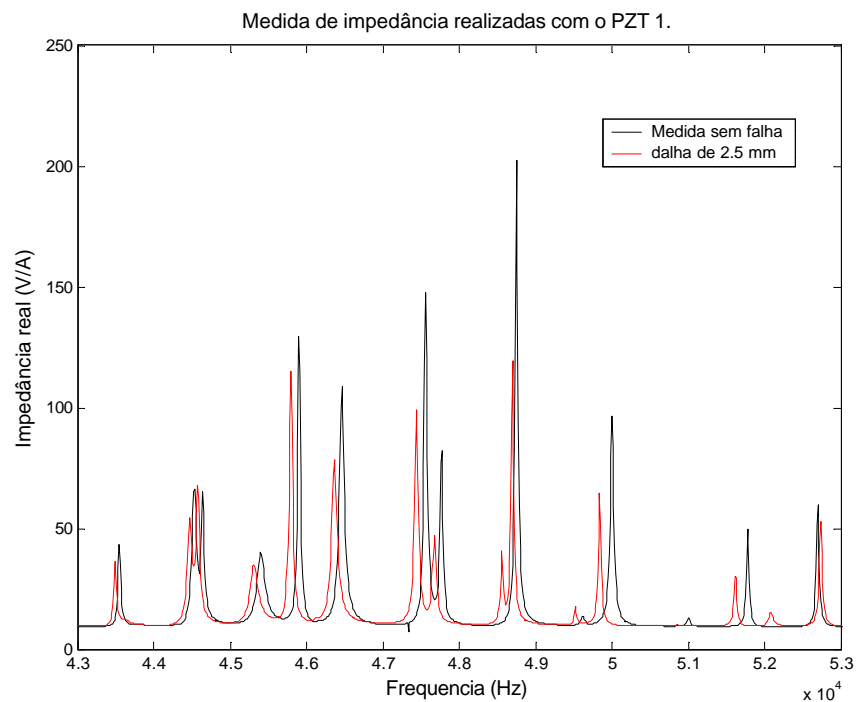


Figura 7.8. Medida de impedância (Real) para uma falha de 0.5 mm, realizada com o PZT 1.

As próximas situações de falhas consideram 1.0, 1.5, 2.0 e 2.5 milímetros de profundidade, realizadas com a fresa de 2.0 milímetros de largura. Todas as medidas, inclusive a medida de referência, podem ser vistas na figura 7.9 (a). A figura 7.9 (b) mostra, para propósito de clareza, a curva de impedância elétrica quando se tem uma falha de 2.5 milímetros de profundidade.



(a)



(b)

Figura 7.9. (a) Medidas de impedância (Real) e (b) Medidas de referência e falha de 2.5 mm.

Após a realização das medidas de referência e de monitoramento, a falha métrica é computada de acordo com a equação 7.1. Na figura 7.10 pode ser observada a falha métrica (normalizada) calculada para todas as medidas realizadas com o PZT 1. Pode ser notado nessa figura a evolução da falha métrica, em valores absolutos, para cada nível de falha inserido na estrutura. Lembrando que a medida de referência, neste caso, é para a condição da estrutura sem falha.

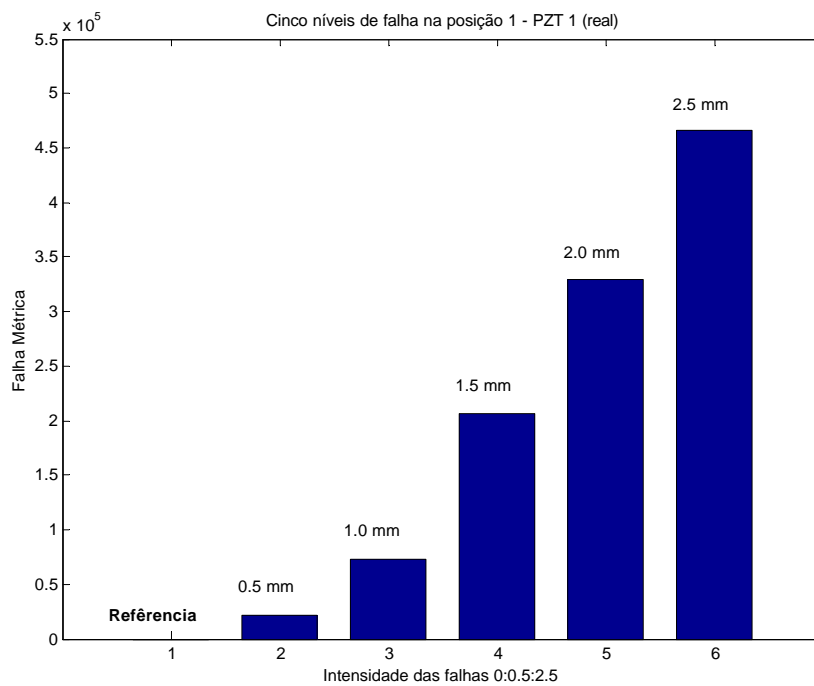


Figura 7.10. Falha métrica calculada a partir do monitoramento com o PZT 1.

Medidas realizadas com o PZT 2.

Para os mesmos níveis de falha do caso anterior, foi realizado o monitoramento da estrutura com o PZT 2. Os resultados obtidos podem ser observados nas figuras 7.11 e 7.12.

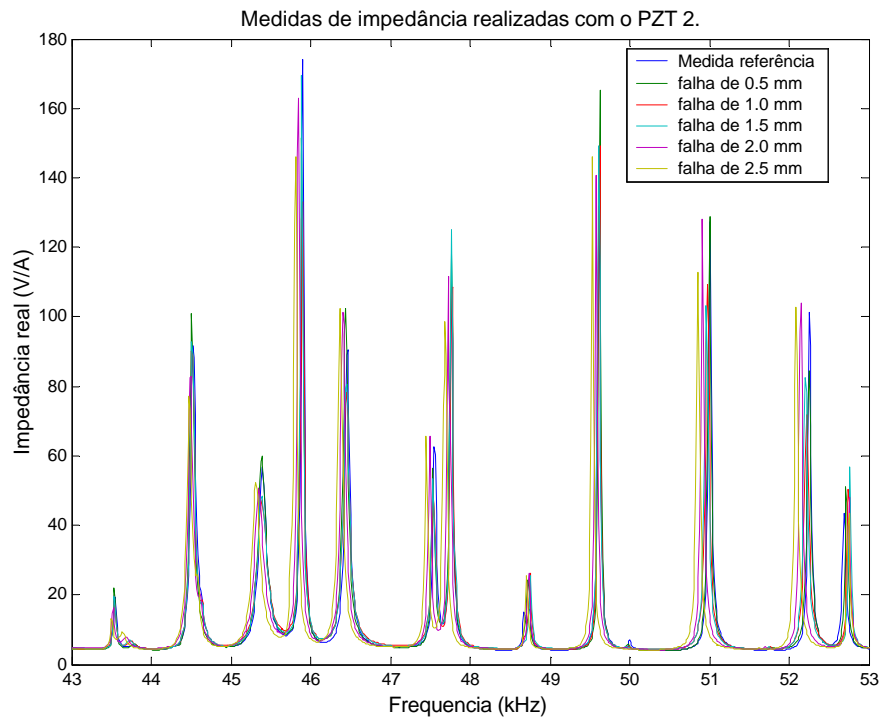


Figura 7.11. Medidas de impedância realizadas com o PZT 2 e falhas na posição 1.

Na figura 7.11 tem-se as curvas de impedância quando se realizou o monitoramento da estrutura com o PZT 2 e as falhas na posição 1. A figura 7.12 mostra os valores absolutos das falhas métricas obtidas para essa condição de monitoramento.

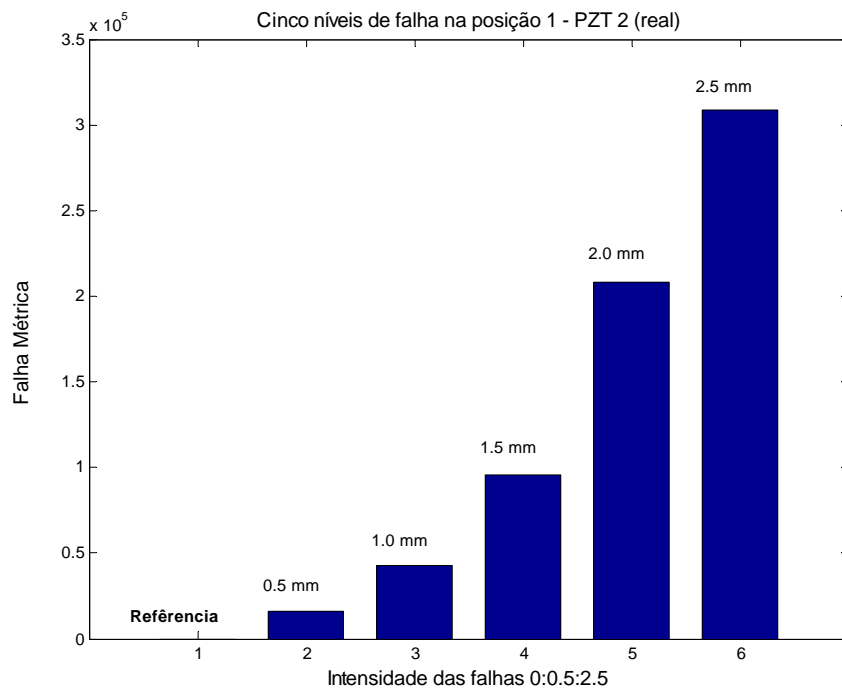


Figura 7.12. Falha métrica calculada a partir do monitoramento com o PZT 2.

Analisando as medidas realizadas com os PZTs 1 e 2, pode-se concluir que a falha realizada na estrutura cresceu com variação do sinal de impedância nos dois PZTs. Entretanto, comparando as falhas métricas das figuras 7.10 e 7.12 podemos notar que os valores obtidos na figura 7.10 são maiores do que os obtidos na figura 7.12. Isto ocorre devido ao fato de que a falha está localizada próximo ao PZT 1. Assim é possível determinar a localização da falha, ou seja, quanto mais próximo uma falha estiver de um PZT, maior será a variação da impedância. Este fato pôde, também, ser comprovado quando se analisou a área de influência do PZT na placa de aço.

Outra informação interessante que se pode obter deste experimento realizado com a barra é a área de atuação do PZT, ou seja, a área de influência do PZT colado na barra de alumínio é maior que 435 mm.

7.2.2. Caso 2: Monitoramento da falha na posição 2.

Após o monitoramento da falha na posição 1, uma nova condição de falha foi aplicada na estrutura. Nesta nova condição, uma falha de 0.3 milímetros de largura foi inserida na posição 2 (ver figura 7.7), com variações de 0:0.5:2.5 milímetros de profundidade. Os resultados das medidas de impedância e os valores da falha métrica são apresentados no item a seguir. Para esta situação de falha foram realizadas medidas com os dois PZTs colados na estrutura. A medida de referência, para este caso, é a medida realizada na estrutura na condição sem falha na posição 2 e a falha de 2.5 milímetros de profundidade na posição 1. Esta medida de referência foi utilizada no cálculo da falha métrica para as medidas realizadas com os dois PZTs.

Medidas realizadas com o PZT 1.

Na figura 7.13 são mostradas as medidas de impedância realizadas na estrutura para as falhas com profundidade de 0.5, 1.5 e 2.5 milímetros, não foram plotados os resultados de todas as falhas para não sobrecarregar a figura e, assim, facilitar a visualização na mudança da curva de impedância.

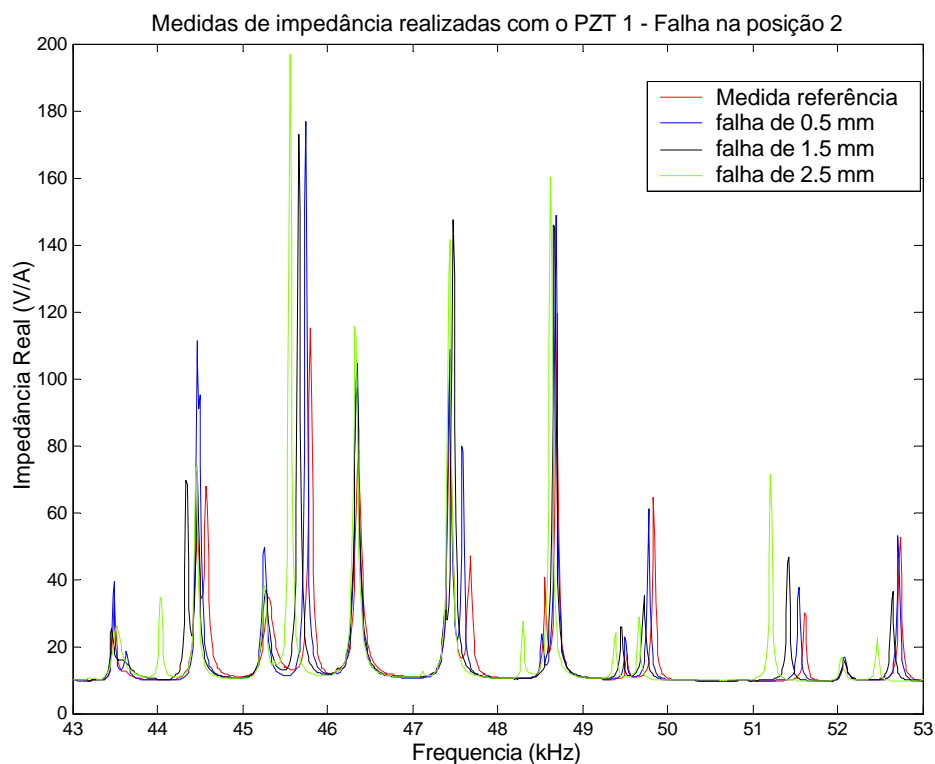


Figura 7.13. Medidas de impedância real realizadas com o PZT 1, para a falha na posição 2.

Após as medidas de impedância, os valores da falha métrica foram calculados. Neste caso a medida de referência foi tomada para a estrutura com condição de falha de 2.5 milímetros de profundidade na posição 1. Os resultados obtidos no cálculo da falha métrica podem ser observados na figura 7.14.

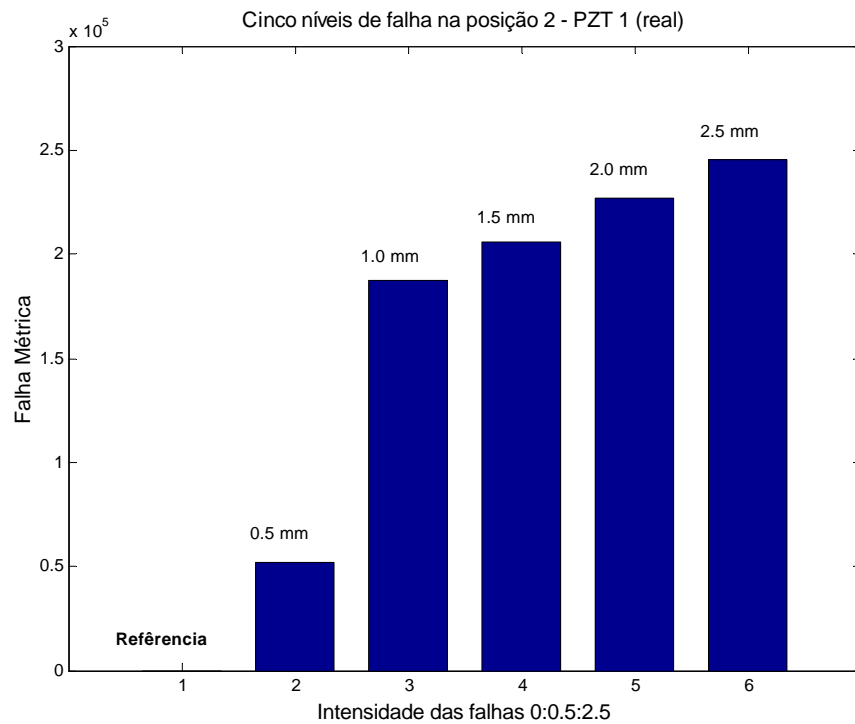


Figura 7.14. Falha métrica calculada para as falhas 0:0.5:2.5, utilizando o PZT 1.

Observando o comportamento das medidas realizadas, pode-se concluir que o PZT 1 detectou a evolução da falha na posição 2. Assim uma falha realizada perto do PZT 2 pôde ser localizada pelo PZT 1, isto ocorreu devido ao fato da área de atuação do PZT ser maior do que a distância entre o PZT e a falha.

Medidas realizadas com o PZT 2.

Nas mesmas condições das medidas realizadas com o PZT 1, foram realizadas medidas com o PZT 2. As curvas de impedância obtidas para falhas de 0.5, 1.5 e 2.5 milímetros de profundidade estão plotadas na figura 7.15.

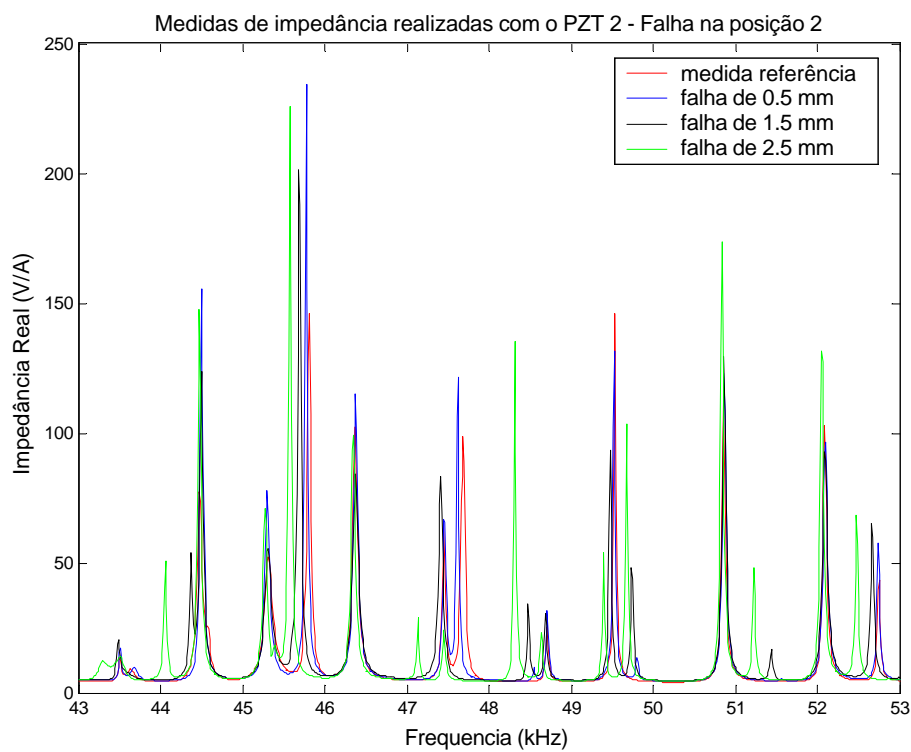


Figura 7.15. Medidas de impedância real realizadas com o PZT 2.

A figura 7.16 mostra os valores da falha métrica para as medidas realizadas com o PZT 2.

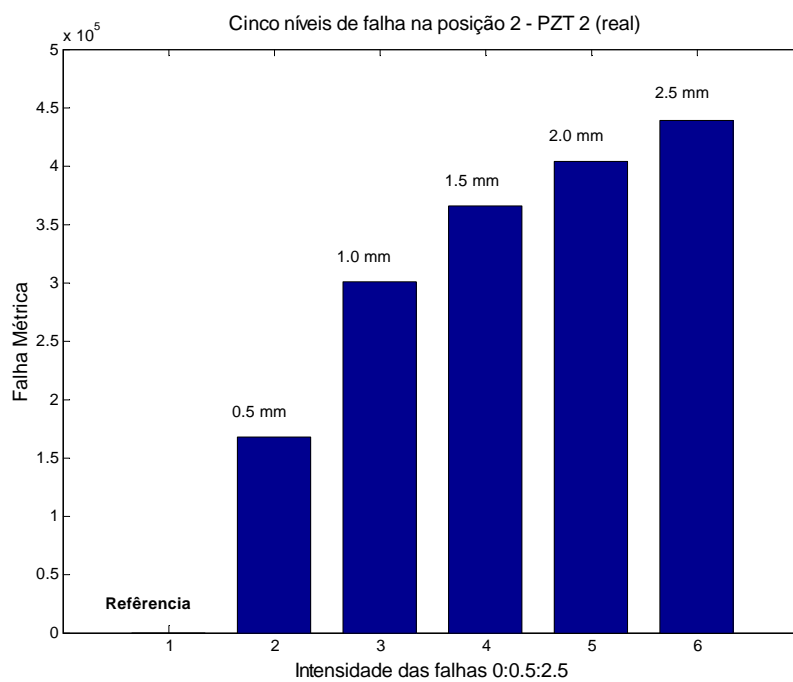


Figura 7.16. Falha métrica calculada para as falhas 0:0.5:2.5, utilizando o PZT 2.

O PZT 2 localizou a falha na posição 2, isto pode ser observado ao analisar os gráficos das figuras 7.14 e 7.16. Os valores absolutos das falhas métricas são maiores para o PZT 2 do que os valores obtidos pelas medidas realizadas com o PZT 1. Isto ocorreu devido ao fato da falha estar próxima do PZT 2.

Com as medidas realizadas para a falha na posição 2, pode-se afirmar que a área de influência PZT 1 engloba a falha na posição 2. Similarmente ao ocorrido no caso anterior, onde o PZT 2 detectou a falha na posição 1.

7.3. Localização de falhas em um virabrequim

Na estrutura analisada no item anterior a localização da região da falha foi realizada através dos valores absolutos das falhas métricas, esta localização da falha foi dificultada devido ao fato de os dois PZTs colados na estrutura detectaram a falha. Nesta seção será aplicada a técnica da impedância elétrica numa estrutura de maior complexidade. A estrutura é mostrada nas figuras 7.17 e 7.18. Nesta estrutura foram colados quatro PZTs, numerados de PZT 1, PZT 2, PZT 3 e PZT 4, que serão utilizados para fazer o monitoramento da estrutura.

Uma falha foi inserida, na posição indicada na figura 7.17, na face oposta do PZT 4. Esta falha consiste de um corte com 0.3 milímetros de largura entre os pontos 11 e 13 da estrutura. A profundidade do corte variou de 0.2 – 1.4 milímetros. Para cada profundidade de falha foram realizadas medidas com os quatro PZTs.

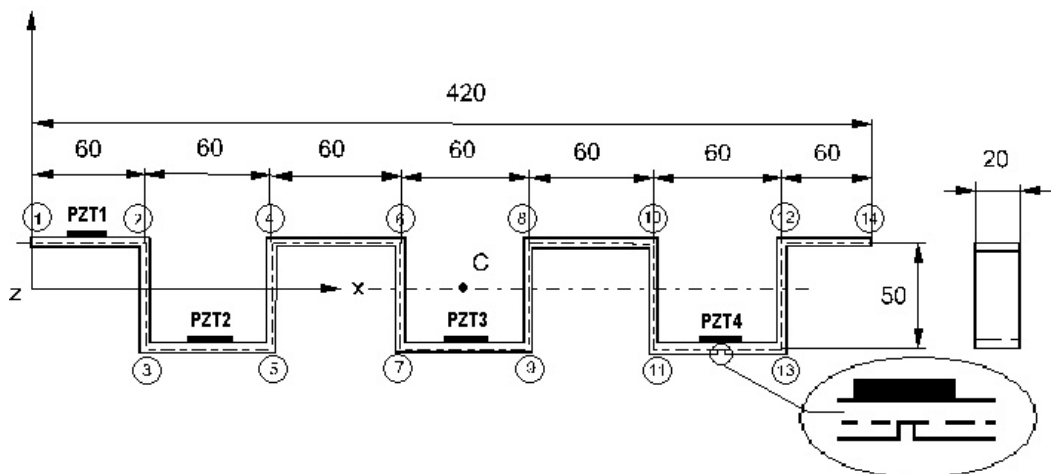


Figura 7.17. Estrutura mecânica ensaiada com elementos-PZTs e posição da falha na estrutura.

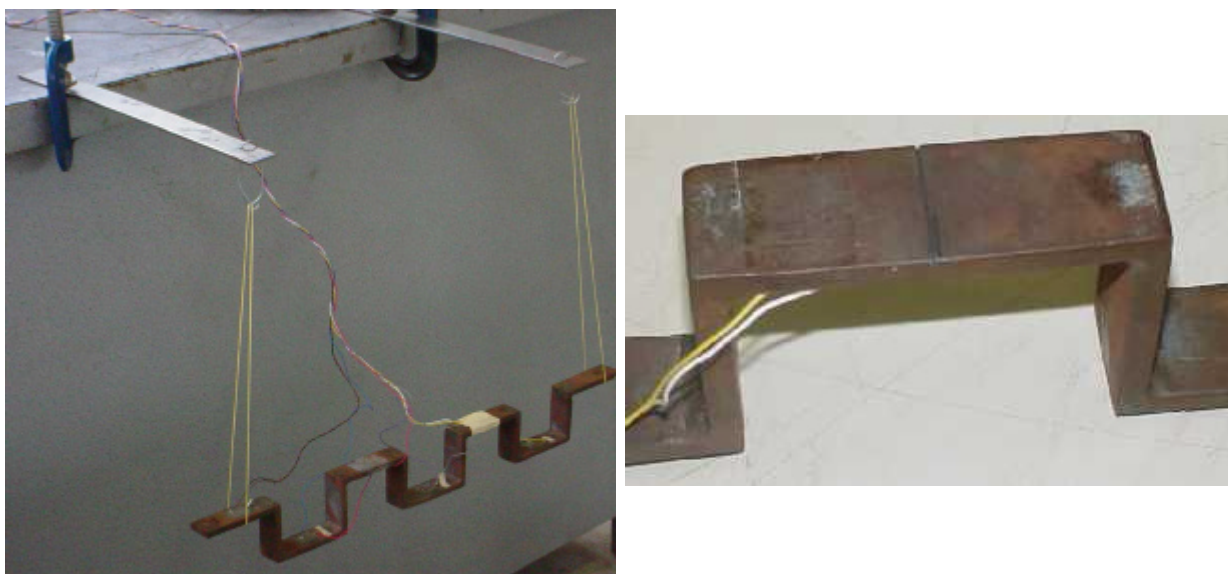


Figura 7.18. Fotos da estrutura teste e da falha inserida na estrutura.

Os sinais de impedância foram monitorados na faixa de frequência de 45 a 55 kHz. Cada PZT foi monitorado independentemente, com o objetivo de identificar e determinar a área de localização da falha. Nos gráficos da figura 7.19 tem-se as medidas de impedância realizadas na estrutura para os quatro PZTs. Para cada PZT foram realizadas medidas de referência (medidas realizadas na condição sem falha na estrutura) que servirão de comparação para o monitoramento da estrutura. Tem-se ainda nesta figura medidas de impedância realizadas após a inserção da falha, com uma profundidade de 1.4 milímetros.

Os gráficos da figura 7.19 mostram a componente real das medidas de impedância, por ser esta componente sensível a falha ou mudanças na integridade estrutural.

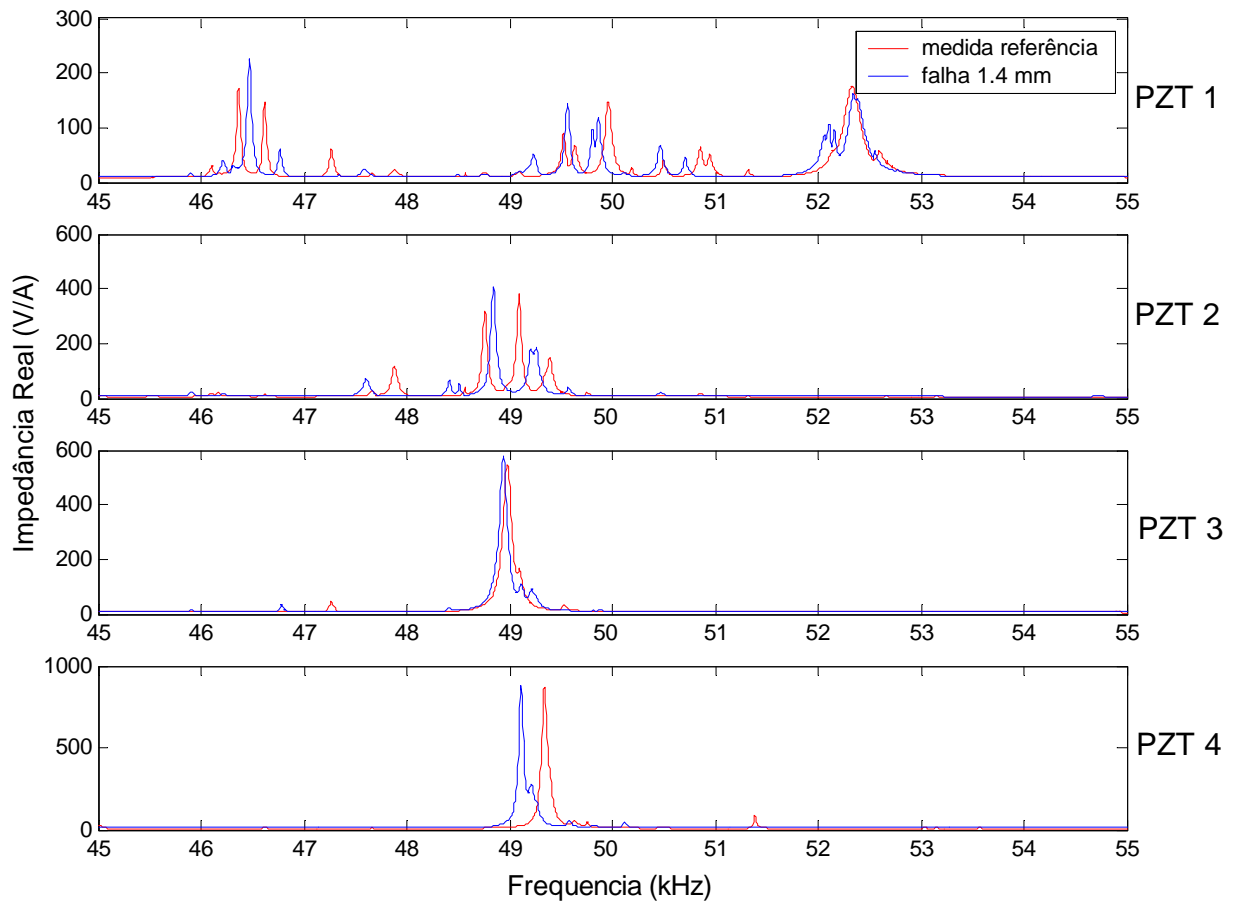


Figura 7.19. Impedância dos PZTs colados na estrutura. Falha de 1.4 mm de profundidade.

Na figura 7.20 é possível observar a falha métrica normalizada para os quatro PZTs e as intensidades de falhas inseridas na estrutura. O valor da falha métrica é função da severidade e distância entre a falha e o PZT, ou seja, uma falha pequena próxima ao PZT pode ter o mesmo valor de M de uma falha distante em estágio avançado de dano. Portanto, esta técnica não caracteriza a falha, apenas a região de ocorrência. Pode ser observado na figura 7.20 que a falha ocorre na região de influência do PZT 4. Os valores de M para os PZT 1, PZT 2 e PZT 3, indicam uma variação razoável no valor de M . Acredita-se que esta variação é devida a alguma condição inicial ou interferência nos dados ao se realizar a medida de referência.

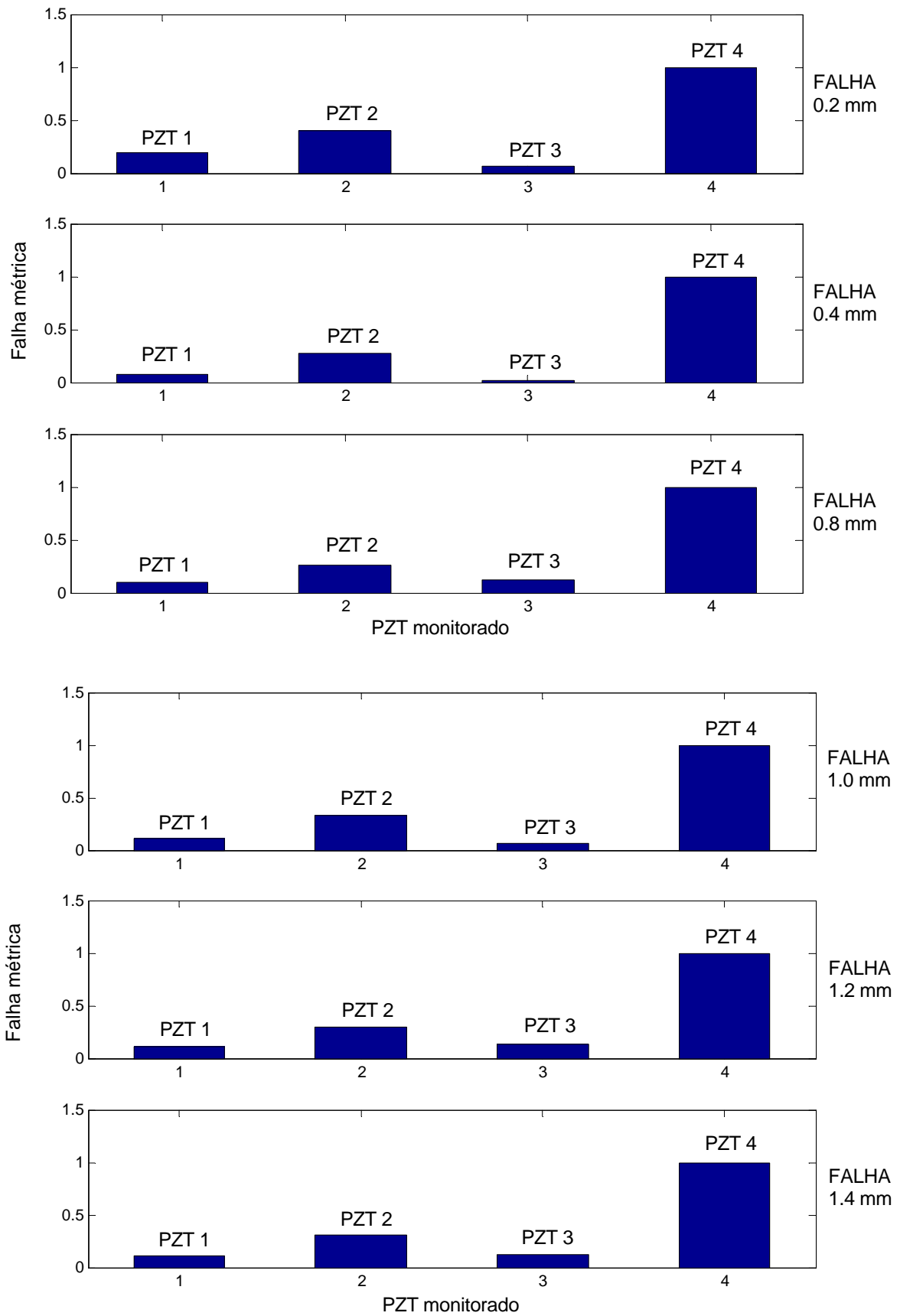


Figura 7.20. Falha métrica computada (equação 7.1) para falhas de 0.2 a 1.4 mm.

A figura 7.21 mostra a evolução da falha métrica para os vários níveis de falhas ensaiados na estrutura, quando se realizou o monitoramento com o PZT 4. Quanto maior a intensidade da falha, maior a variação nas medidas de impedância elétrica.

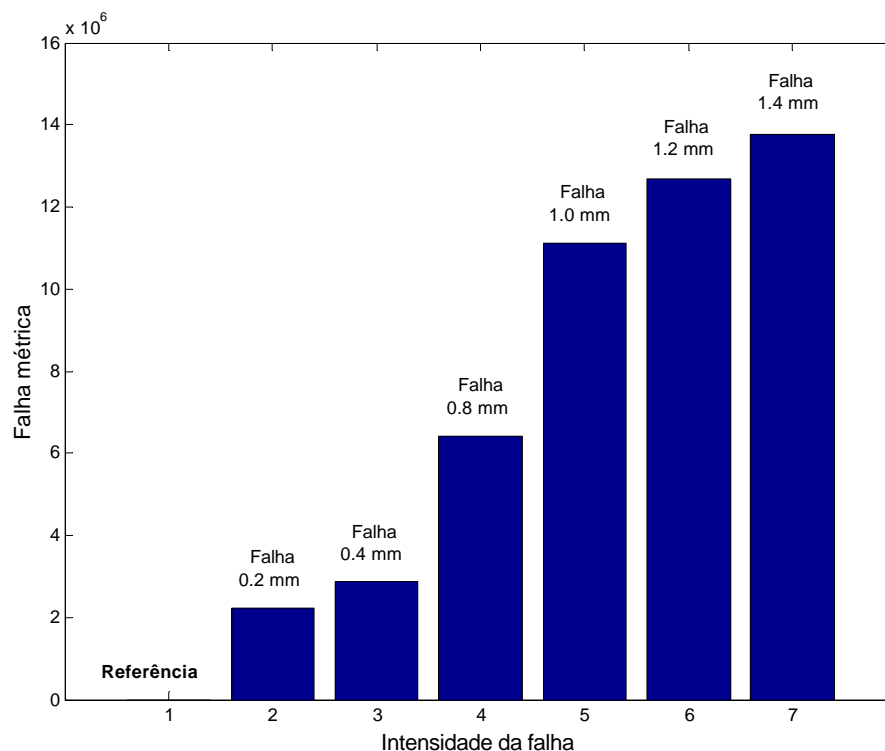


Figura 7.21. Evolução da falha métrica, em valores absolutos, para as medidas realizadas com o PZT 4.

7.4. Quantificação de falhas

Os algoritmos genéticos são atualmente aplicados em diversas áreas, tais como, medicina, química, biologia, engenharia, dentre muitas outras. Neste capítulo serão mostrados alguns testes para comprovar a capacidade do AG quantificar falhas em estruturas. Nos testes realizados foram analisadas duas situações de falhas na estrutura.

A detecção da falha na estrutura é realizada através da variação da curva Função da Resposta em Frequência, FRF. A falha simulada neste trabalho consiste num corte transversal à viga, com largura b e profundidade a . Para simular o defeito, considera-se a variação do momento de inércia I do elemento, onde, a largura da falha é mantida constante e a mesma do elemento. Na equação 7.2 é possível observar como a matriz de rigidez, K , obtida através do método de elementos finitos é influenciada pela variação do momento de inércia I .

$$I \rightarrow K = K\left(\frac{E.I}{L^3} \cdot [\dots]\right) \rightarrow f = f(K, M) \quad (7.2)$$

Na figura 7.22 é possível notar como a profundidade da falha influencia na redução do momento de inércia. Este estudo foi realizado para se saber qual seria a redução do momento de inércia devido às falhas impostas.

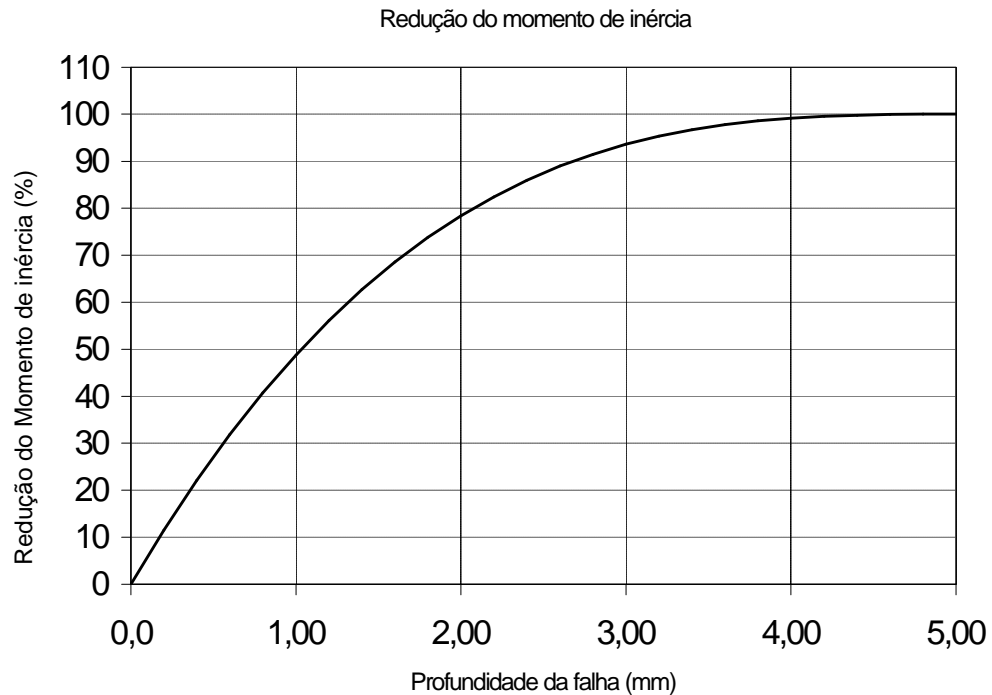


Figura 7.22. Análise da influência da falha introduzida na estrutura.

Função objetivo

O método de quantificação de falhas consiste em minimizar uma definida função de custo (função objetivo), que possa representar diferenças, em alguma norma, entre as respostas medida e numérica. A função adotada neste trabalho para caracterizar a falha pode ser matematicamente expressa como:

$$f_m = f_{medida}(1:7) \quad f_{aj} = f_{atual}(1:7) \quad (7.3)$$

$$Fxe = \sum |f_m - f_{aj}| \quad (7.4)$$

em que f_{medida} e f_{atual} são os valores das sete primeiras frequências naturais obtidas segundo a metodologia apresentada na figura 2.1. A função de custo definida é multimodal, isto é,

apresenta vários mínimos locais, o que torna o processo de identificação extremamente dependente de uma boa escolha inicial.

Existem disponíveis, na literatura e páginas da internet, softwares de algoritmos genéticos. Entretanto, optou-se neste trabalho pela implementação de um código próprio. A vantagem de se implementar um programa é o total controle das variáveis e o menor tempo computacional para a execução, pois o programa é “enxuto” e considera apenas o necessário para a aplicação específica.

Critério de Parada

Para o problema abordado, foram implementados dois critérios: o número máximo de gerações e a obtenção do valor ótimo da solução. Estes critérios foram implementados para trabalharem simultaneamente, ou seja, assim que um dos critérios seja satisfeito o programa é finalizado.

Resumo das variáveis implementadas no AG

1. Codificação: Binária
2. Gerar população inicial: Aleatória
3. Função objetivo: Cálculo do valor da função
4. Seleção: implementado o tipo “Roleta”
5. Cruzamento: implementado os tipos um ponto e dois pontos
6. Mutação: Implementado o tipo uniforme
7. Testar critérios de parada: se um dos critérios de parada é satisfeito o processo é finalizado. Caso contrário voltar ao passo 3.

Estrutura analisada

A estrutura analisada, figura 7.23, é uma barra de alumínio cujas dimensões são 500, 25 e 5 milímetros de comprimento, largura e espessura, respectivamente. A viga foi considerada engastada numa extremidade e livre na outra. Para a modelagem em elementos finitos da estrutura, considerou-se o elemento do tipo Beam e o programa foi implementado no software

MatLab® 6.0. A estrutura foi modelada com 21 nós e foram considerados 2 graus de liberdade (GDL) por nó (translação em y e rotação em z). Na primeira situação é considerada uma falha na região do PZT 1 (ou seja, falha no elemento 5 da estrutura). Na segunda situação é considerada uma nova falha na estrutura no elemento 17 (região do PZT 2), o que tornou possível a análise de falhas simultâneas na estrutura.

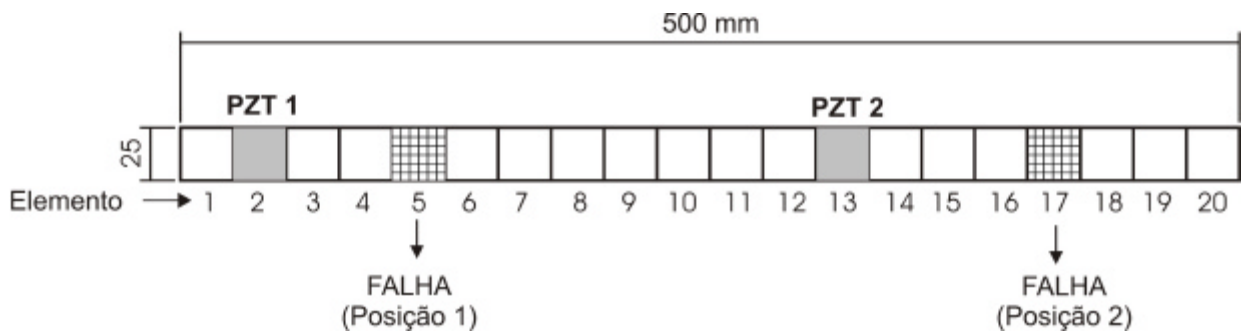


Figura 7.23. Posição das falhas e dos PZTs na estrutura analisada.

Inicialmente, realizou-se um teste para avaliar a necessidade e importância da primeira etapa da metodologia proposta. A falha no 5º elemento da estrutura foi realizada alterando em 20% o momento de inércia deste elemento. Nesta primeira etapa todos os elementos foram considerados no processo de otimização, ou seja, deixou-se todos os momentos de inércia dos elementos livres para serem ajustados. A tabela 7.2 mostra os dados médios obtidos após 3 execuções do programa de algoritmo genético. Os dados esperados (ou ideais) são: I do elemento 5 igual a 0.8000 e os demais 1.0000.

Tabela 7.2. Dados obtidos para a otimização de todos os elementos.

Elemento	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I (m ⁴)	0.6950	0.6100	0.9261	0.7073	0.9326	0.9818	0.9472	0.5859	0.9560	0.9560
Elemento	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
I (m ⁴)	0.9114	0.8528	0.9906	0.8944	0.7367	0.9724	0.9994	0.8217	0.7202	0.9443

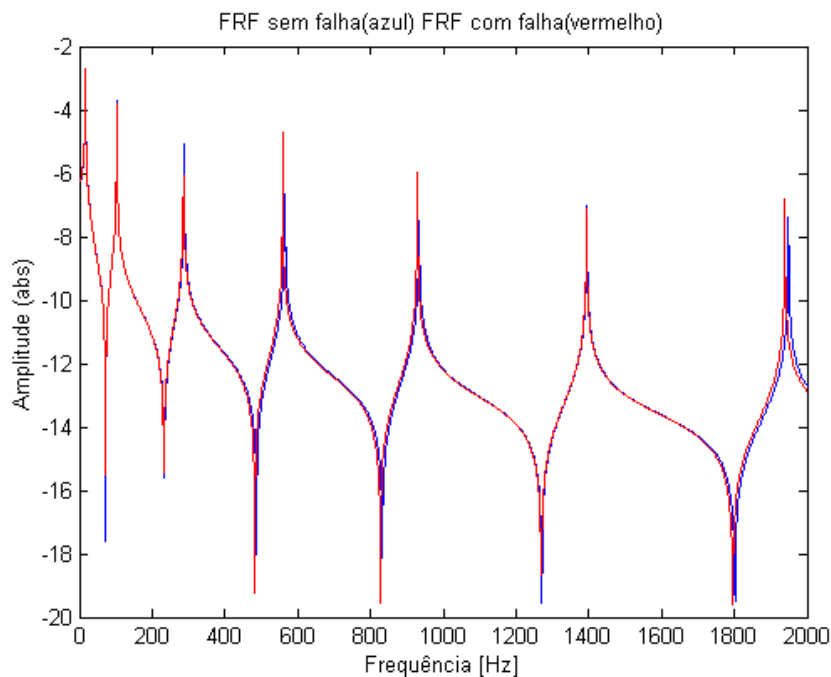
Nesta situação se considerou uma falha no 5º elemento da estrutura e possibilidade de ajuste em todos os momentos de inércia da estrutura. Podemos observar que o algoritmo não convergiu para uma situação ótima, ou seja, não conseguiu detectar que a falha estava no elemento 5. Este é tipicamente um problema inverso e como tal não apresenta solução única.

Embora o algoritmo genético tenha fornecido uma resposta, esta não corresponde a solução desejada.

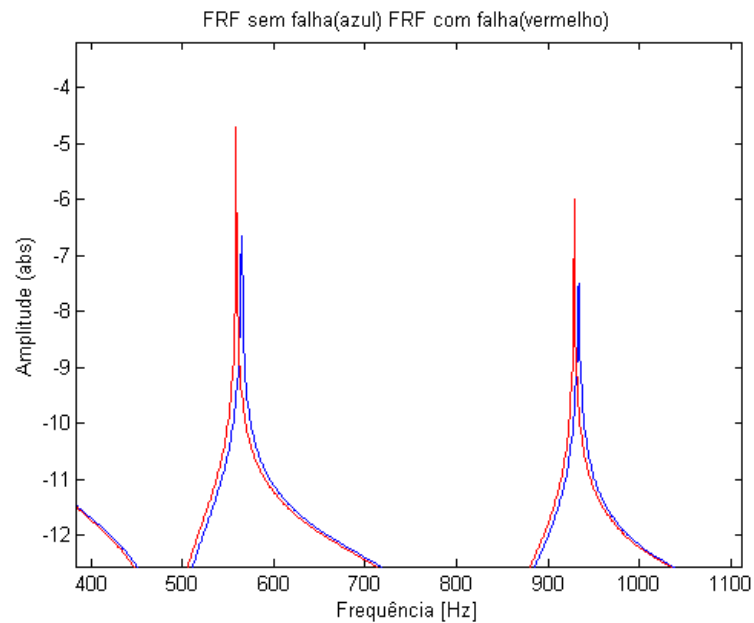
Quando utilizamos a técnica da impedância elétrica para realizar o monitoramento da estrutura, a região de localização da falha é encontrada e, com isto o número de elemento é reduzido. Nesta nova situação temos dois casos possíveis: no primeiro é considerado que a técnica da impedância elétrica localizou com exatidão a posição de falha na estrutura, ou seja, a técnica forneceu a informação de que a falha estava no elemento 5, assim o AG deverá considerar para otimização apenas o momento de inércia do elemento 5; no segundo, considerou-se o caso em que a técnica da impedância elétrica localizou uma região de falha, ou seja, forneceu a informação de que a falha estava na região dos elementos 4, 5 e 6, assim o AG deverá considerar para otimização os momentos de inércia destes três elementos.

Primeiro caso: Otimização apenas do elemento 5.

A figura 7.24 mostra as curvas das FRFs para as situações sem falha e com falha (variação de 20% no momento do inércia). Nesta figura, o zoom na região entre 400 e 1100 Hz mostra a pequena variação das curvas. O objetivo do AG é a partir da curva sem falha (em azul) ajustar à curva com falha (em vermelho) e assim, através das diferenças entre matrizes, quantificar a falha presente na estrutura.



(a)



(b)

Figura 7.24. (a) FRFs da estrutura na situação sem falha e com falha, (b) zoom de uma faixa da FRF.

Esta é uma situação ideal e de complexidade relativamente simples, pois para a implementação no AG a simulação de quantificação de falha pode ser comparada com um problema de otimização com apenas uma variável.

A tabela 7.3 contém os valores do momento de inércia e o número de gerações para dez testes realizados. A tabela apresenta, também, a média destes resultados e o desvio padrão. Os valores utilizados para obtenção destes resultados foram:

- Tamanho da população: 20 indivíduos.
- Taxa de cruzamento: 0,8 (80%).
- Taxa de mutação: 0,05 (5%).
- Numero máximo de gerações: 25 gerações.

Tabela 7.3. Resultados obtidos pelo AG para o primeiro caso.

Run	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média	Desvio Padrão
Geração	5	17	5	18	11	25	5	6	11	25		
I (m ⁴)	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800	0,799	0,800	0,800	0,800	0,798	0,7997	0,00067

Segundo caso: Otimização da região 4, 5 e 6.

Neste segundo caso, verifica-se a capacidade do AG quantificar a falha quando a técnica da impedância elétrica localiza uma região de falha, ou seja, a técnica informa que a falha está presente e localizada numa região envolvendo alguns elementos.

A tabela 7.4 mostra os valores do momento de inércia para cada execução do programa e um tratamento estatístico dos resultados obtidos. Para compreensão desta tabela, tem-se a legenda:

$I^4 \Rightarrow$ momento de inércia do elemento 4 (valor ideal 1.000)

$I^5 \Rightarrow$ momento de inércia do elemento 5 (valor ideal 0.800)

$I^6 \Rightarrow$ momento de inércia do elemento 6 (valor ideal 1.000)

Os parâmetros utilizados no AG foram:

- Tamanho da população: 90 indivíduos.
- Taxa de cruzamento: 85%.
- Taxa de mutação: 9%
- Numero máximo de gerações: 100 gerações.

Tabela 7.4. Resultados obtidos na simulação realizada através do AG.

Run	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média	Desvio Padrão
Geração	96	32	100	100	57	100	100	73	100	100		
$I^4 (m^4)$	1,000	1,000	1,000	0,998	1,000	0,999	0,999	1,000	0,999	0,998	0,9993	0,00082
$I^5 (m^4)$	0,800	0,800	0,801	0,803	0,800	0,801	0,800	0,800	0,801	0,801	0,8001	0,00095
$I^6 (m^4)$	1,000	1,000	0,999	0,999	1,000	0,999	0,998	1,000	1,000	0,999	0,9994	0,00067

Situação de falhas simultâneas na estrutura

Antes de testar a situação de falha simultânea, analisou-se a capacidade do AG quantificar apenas a falha no elemento 17, já que este elemento está localizado na região da

extremidade livre da estrutura e tem pouca influência na variação dos primeiros modos. A situação de falha na estrutura foi: alteração de 15% no momento de inércia do elemento 17.

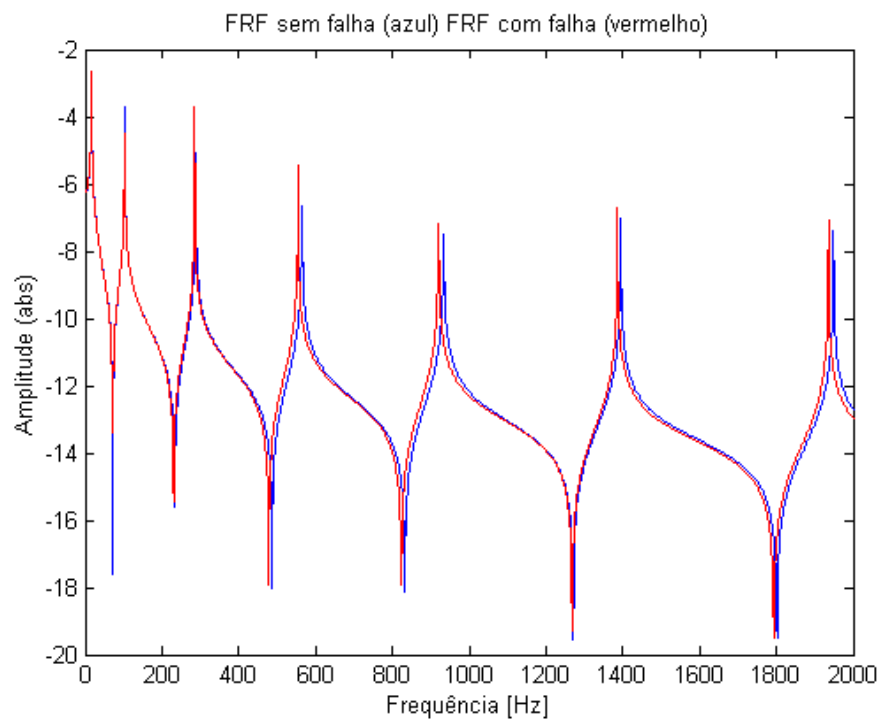
A tabela 7.5 mostra os valores do momento de inércia para cada execução do programa e um tratamento estatístico dos resultados obtidos, sendo o valor ideal para o momento de inércia (I) igual a 0.8500. Os parâmetros utilizados para obtenção destes resultados foram:

- Tamanho da população: 20 indivíduos.
- Taxa de cruzamento: 0.8 (80%).
- Taxa de mutação: 0.05 (5%).
- Numero máximo de gerações: 15 gerações.

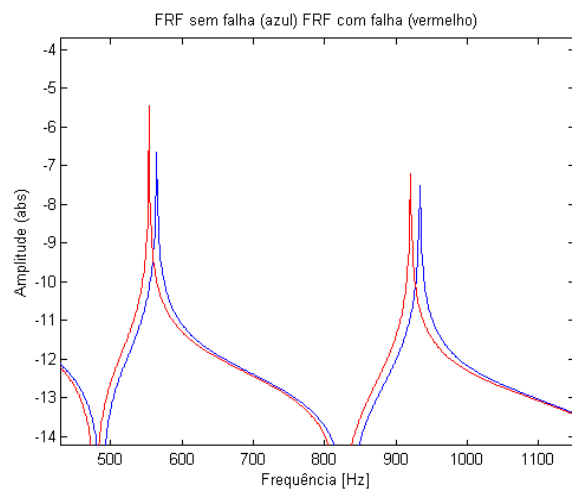
Tabela 7.5. Resultados obtidos pelo AG.

Run	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média	Desvio Padrão
Geração	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15		
I (m ⁴)	0,8504	0,8504	0,8499	0,8499	0,8499	0,8499	0,8499	0,8504	0,8499	0,8499	0,8501	0,00024

Após verificar a influência do elemento 17 e concluir que o programa quantifica a falha com boa eficiência, a próxima etapa foi a realização de testes com falhas em duas posições diferentes da estrutura e em estágios diferentes de evolução. As situações de falha na estrutura foram: alteração de 20% no momento de inércia do elemento 5 e 15% de alteração no momento de inércia do elemento 17. A figura 7.25 mostra as FRFs para os casos sem falha (curva em azul) e com falhas simultâneas (curva em vermelho).



(a)



(b)

Figura 7.25. (a) FRF plotada para a situação de falhas simultâneas na estrutura. (b) Zoom.

A tabela 7.6 mostra os valores do momento de inércia para cada execução do programa e um tratamento estatístico dos resultados obtidos. Para compreensão desta tabela tem-se:

$I^4 \Rightarrow$ momento de inércia do elemento 4 (valor ideal 1.000)

$I^5 \Rightarrow$ momento de inércia do elemento 5 (valor ideal 0.800)

$I^{16} \Rightarrow$ momento de inércia do elemento 16 (valor ideal 1.000)

$I^{17} \Rightarrow$ momento de inércia do elemento 17 (valor ideal 0.850)

Os parâmetros utilizados no AG foram:

- Tamanho da população: 80 indivíduos.
- Taxa de cruzamento: 0.9 (90%).
- Taxa de mutação: 0.05 (5%).
- Número máximo de gerações: 80 gerações.

Tabela 7.6. Resultados obtidos utilizando AG.

Run	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média	Desvio Padrão
Geração	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80		
$I^4 (m^4)$	1.000	0.998	0.999	1.000	0.992	1.000	1.000	0.999	0.995	0.999	0.9982	0.00266
$I^5 (m^4)$	0.799	0.806	0.804	0.800	0.802	0.801	0.800	0.813	0.814	0.804	0.8043	0.00531
$I^{16} (m^4)$	1.000	0.991	0.996	0.999	0.987	0.999	1.000	0.987	0.988	0.997	0,9944	0,00554
$I^{17} (m^4)$	0.850	0.845	0.851	0.850	0.846	0.851	0.850	0.851	0.853	0.850	0.8497	0.00241

Através dos resultados, pôde-se verificar a importância da primeira etapa da metodologia proposta, aplicações da técnica da impedância elétrica, e a necessidade de se escolher em pequeno subsistema de parâmetros. Este subsistema de parâmetros é necessário para obtenção da solução ótima no processo de otimização utilizado.

Capítulo 8

CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentadas as técnicas da impedância elétrica para detectar falhas estruturais e a técnica de otimização utilizando algoritmos genéticos para quantificar falhas estruturais. Um medidor de impedância de baixo custo foi proposto e construído, para realizar medidas em laboratório.

O Medidor de Impedância de Baixo Custo (MIBC) foi construído e as especificações técnicas apresentadas. Vários testes foram realizados com o MIBC, que se comportou bem, quando comparado com o analisador de impedância HP 4192A. Nos testes realizados, o aparelho apresentou comportamento semelhante ao HP 4192A, até mesmo quando uma falha foi inserida na estrutura. Não foi possível a utilização deste equipamento para realizar todas as medidas de impedância do trabalho desenvolvido, pois o software que se tem disponível gera, apenas, sinal até a frequência de 20 kHz. A construção deste medidor viabilizou a aplicação futura da técnica da impedância elétrica, já que o Departamento de Engenharia Mecânica (Feis/Unesp) não possui equipamento similar. A continuidade dos trabalhos desenvolvidos por alunos do GMSINT (Grupo de Materiais e Sistemas Inteligentes) e demais interessados está, portanto, garantida.

A técnica da impedância foi aplicada em estruturas simples e de maior complexidade. Conceitos de parâmetros aplicados à técnica, tais como, nível de voltagem aplicada no PZT, área de atuação do PZT, efeitos das condições ambientes e repetibilidade das medidas realizadas com os PZTs foram também estudadas neste trabalho.

O nível da voltagem aplicada no PZT altera os picos de ressonância na curva de impedância elétrica. A técnica emprega altas frequências e baixa tensão elétrica e, portanto, excita os modos locais da estrutura. A área de influência de cada PZT está intimamente ligada a estes fatores.

A área de monitoramento do PZT foi testada. O PZT colado numa placa de aço foi capaz de detectar falha a uma distância de 350 milímetros. A medida que a falha se aproxima do PZT, o sinal de impedância elétrica sofre uma maior variação, isto pôde ser observado no gráfico da falha métrica plotada na figura 7.6. Nos experimentos realizados numa barra de alumínio, pode ser constatado que o PZT é capaz de detectar uma falha a uma distância de 345 milímetros. Isto foi notado quando se realizaram medidas com os dois PZTs colados na estrutura. Não existe na literatura informação técnica sobre a área de influência do PZT, portanto, estes experimentos contribuem como referência inicial para monitoramento a serem realizados em outras estruturas e para que novos testes sejam realizados.

A influência da temperatura ambiente nas curvas de impedância foi também verificada. Uma alteração de 6 °C foi feita na sala onde estavam sendo realizadas as medidas. Com esta alteração de temperatura o valor da falha métrica diminuiu. Estes resultados não são conclusivos, outros experimentos devem ser realizados para um maior esclarecimento do efeito da temperatura ambiente nas medidas de impedância elétrica.

Um teste importante realizado é sobre a repetibilidade nas medidas realizadas com o PZT. Este teste é importante no estabelecimento do valor mínimo (threshold) da falha métrica. Foram realizadas medidas num intervalo de tempo de 79 horas, sem alterar as condições da estrutura, e a falha métrica foi calculada. Observamos que as medidas realizadas durante os intervalos de tempo não sofreram alterações significativas.

A técnica da impedância elétrica foi aplicada com sucesso em detecção de falhas estruturais. Foram realizados testes em estruturas de materiais diferentes e geometrias diferentes e em todos os casos a técnica conseguiu, com êxito, detectar as mudanças estruturais. A evolução da falha foi monitorada e o comportamento da técnica foi verificado. Os resultados foram animadores, visto que a técnica foi capaz de identificar diversas situações de falhas.

O algoritmo genético, utilizado para quantificar as falhas estruturais, tem como principal tópico a definição dos parâmetros genéticos. Estes parâmetros, tais como, tamanho da população, taxa de cruzamento, mutação e o número máximo de gerações foram definidos após vários testes e realizações de combinações, o que não garante que a combinação adotada seja a melhor, já que não é possível testar todas as combinações. Ainda, estes testes são demorados e exaustivos. Os resultados obtidos com o AG se tornaram interessantes quando combinados com a técnica da impedância elétrica, pois o número de variáveis do subsistema é reduzido.

A proposta de aplicação conjunta das técnicas de impedância elétrica e dos Algoritmos Genéticos pode oferecer um critério robusto e eficiente para identificação de danos estruturais. Pois, na primeira etapa desta metodologia, a localização da falha pode ser determinada com exatidão e assim os parâmetros de ajuste são reduzidos drasticamente. As vantagens dos AG aliadas ao pequeno número de variáveis a ajustar nos fazem acreditar na potencialidade do método.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar testes de maior complexidade para se determinar a área de influência do PZT;
- Realizar outros testes para se verificar a influência da temperatura ambiente nas medidas de impedância elétrica;
- Realizar ensaios utilizando o MIBC em estruturas complexas e em outras faixas de frequência;
- Utilizar “Lamb wave” para localizar a região exata da falha e algoritmos genéticos para quantificação;
- Implementar outros tipos de seleção, operadores de cruzamento e operador de mutação no algoritmo genético;
- Implementar outros tipos de funções objetivo para o algoritmo genético desenvolvido;
- Aplicar outras técnicas de otimização, tais como, “Simulated Annealing” ou “Tabu Search” para comparar os resultados com os algoritmos genéticos.

Capítulo 9

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, R. D., CAWLEY, P., PYE, C. J. AND STONE, B. J., 1978, **A Vibration Technique for Non-Destructively Assessing the Integrity of Structures**. Journal of Mechanical Engineering Science, v. 20, p. 93-100.

AKTAN, A. E., LEE, K. L., CHUNTAVAN, C., AND AKSEL, T., 1994, **Modal Testing for Structural Identification and Condition Assessment of Constructed Facilities**. Proc. of 12th International Modal Analysis Conference - IMAC, p. 462-468.

AYRES, J. W., 1996, **Qualitative Health Monitoring and Incipient Damage Inspection/Evaluation**. Master Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University – CIMSS.

BANKS, H. T., INMAN, D. J., LEO, D. J., AND WANG, Y., 1996, **An Experimentally Validated Damage Detection Theory in Smart Structures**. Journal of Sound and Vibrations, v. 191, p. 859-880.

BRENNAM, M. J., DAY, M. J., ELLIOTT, S. J., PINNINGTON R. J., 1994, **Piezoelectric Actuators and Sensors**. Proceedings of the IUTAM Symposium of the Active Control of Vibration, p. 1-7, Bath.

CAWLEY, P., ADAMS, R. D., 1979, **The Location of Defects in Structures from Measurements of Natural Frequencies**. Journal of Strain Analysis, v. 14, n. 2, p. 49-57.

CLARK, R. L., SAUNDERS, W. R., AND GIBBS, G. P., 1998, **Adaptive Structures: Dynamics and Control**. John Wiley & Sons, Inc.

DIMAROGONAS, A. D., 1996, **Vibration of Cracked Structures: A State of the Art Review**. Engineering Fracture Mechanics, v. 55, n. 5, p. 831-857.

DOEBLING, S. W., 1996, **Minimum-rank optimal update of elemental stiffness parameters statistics for structural damage identification**. AIAA Journal, v. 34, n. 12, p. 2615-2621.

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

- DOSCH, J. J. INMAN, D. J. AND GARCIA, E., 1992, **Self-Sensing Piezoelectric Actuator for Collocated Control**. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, v. 3, n. 1, p. 166-185.
- EGAWA, K., 1997, **A new Concept of Maintenance Inspection**. Structural Health Monitoring Currents Status and Perspectives Stanford, CA, September 18-20.
- EWINS, D. J., 1984, **Modal Testing: Theory and Practice**. John Wiley & Sons inc.
- FARRAR, C. R., DOEBLING, S. W., CORNWELL, P. J., AND STRASER, E. G., 1997, **Variability of Modal Parameters Measured on the Alamosa Canyon Bridge**. Proc. 15th International Modal Analysis Conference - IMAC, Orlando, FL, v. 1, p. 257-263.
- FRISWELL, M. I., AND PENNY, J. E., 1997, **The Practical Limits of Damage Detection and Location using Vibration Data**. Proceedings, 11th VPI&SU Symposium on Structural Dynamics and Control, Blacksburg, VA, 1-10.
- FRISWELL, M. I., PENNY, J. E. T. E GARVEY, S. D., 1998, **A Combined Genetic and Eigensensitivity Algorithm for the Location of Damage in Structures**. Computers and Structures, v. 69, p. 547-556.
- FRISWELL, M. I., PENNY, J. E. T., AND WILSON, D. A. L., 1994, **Using vibration data and statistical measures to locate damage in structures**. Modal Analysis: the International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis, v. 9, n. 4, 239-254.
- GABBERT, U. BERGER, H., KOPPE, H. AND CAO, X., 1998, **On Modeling and Analysis of Piezoelectric Adaptive Structures by the Finite Element Method**. 4th ESSM, p. 621-628, Harrogate.
- GOLDBERG, D. E., 1989 "Genetic Algorithms: in search, optimization & machine learning". Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.
- GYSIN, H. P., 1986, **Critical Application Of an Error Matrix Method for Location of Finite Element Modeling Inaccuracies**. Proc. of the 4th International Modal Analysis Conference, p. 1339-1351.
- HAJELA, P. E SOEIRO, F. J., 1990, **Recent Developments in Damage Detection Based on System Identification Methods**. Structural Optimization, v. 2, p. 1-10.
- HE, J. AND EWINS, D. J., 1986, **Analytical Stiffness Matrix Correction Using Measured Vibration Modes**. Modal Analysis: The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis, v. 1, n. 3, p. 9-14.
- HE, Y., GUO, D., CHU, F., 2001, **Using Genetic algorithms to Detect and Configure Shaft Crack for Rotor-Bearing System**. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, p. 5895-5906.
- IKEDA, T., 1996, **Fundamentals of Piezoelectricity**. Oxford Science Publications.
- INMAN, D. J., 2001, **Smart Structures: Examples and New Problems**. XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica – COBEM, Uberlândia, p. 26-30.

- INMAN, D.J., 1990, **Control/Structure Interaction: Effects of Actuator Dynamics**. AIAA Dynamics Specialist Conference, p. 311-321.
- JUNEJA, V., HAFTKA, R. T., AND CUDNEY, H. H., 1997, **Damage detection and damage detectability: Analysis and experiments**. Journal of Aerospace Engineering, v. 10, n. 4, p. 135-142.
- KABEYA, K., 1998, **Structural Health Monitoring Using Multiple Piezoelectric Sensors and Actuators**. Master Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 83p.
- KAMINSKI, P. C., 1997, **Um Sistema de Diagnóstico de Falhas Estruturais Baseado em Redes Neurais Artificiais e Frequências Naturais**. Tese de Livre Docência, Escola Politécnica da USP, 139p.
- KESSLER, S. S., SPEARING, S. M. AND ATALLA, M. J. 2002 (a), **In-situ Damage detection of Composites Structures using lamb wave methods**. Thesis of Doctorate of Philosophy in Aeronautics and Astronautics at the Massachusetts Institute of Technology, Department of Aeronautics and Astronautics Massachusetts Institute of Technology.
- KESSLER, S. S., SPEARING, S. M. AND ATALLA, M. J. 2002 (b), **Piezoelectric-Based In-Situ Damage Detection of Composite Materials for Structural Health Monitoring Systems**. PASI – Pan American Advance Study Institute on Damage Prognosis, Florianópolis.
- LEHER, C., BORGES, P. S. S., 2002 “Algoritmos Genéticos com Operador de Recombinação Variável”, II Congresso Brasileiro de Computação – CBComp.
- LEMOS, G. F., 2004, **Detecção de Falhas via Observadores de Estado em Sistemas Rotativos, Considerando-se suas Fundações**. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Feis/Unesp, Tese de Mestrado, 113p.
- LIFSHITZ, J. M. AND A. ROTEM, 1969, **Determination of Reinforcement Unbonding of Composites by a Vibration Technique**. Journal of Composite Materials, v. 3, p. 412-423.
- LIM, T. W., 1990, **A Submatrix Approach To Stiffness Using Modal Test Data**. AIAA Journal, v. 28, n. 6, p. 1123-1130.
- LOPES JR., V. AND INMAN, D.J., 1999, **Active Damage Detection Using Smart Material**. In: EuroDiname – Dynamic Problems in Mechanics and Mechatronics, Gunzburg, Germany, p. 153-158, July 11-16.
- LOPES JR., V., PARK, G., CUDNEY, H. H., AND INMAN, D. J., 2000, **Impedance - Based Structural Health Monitoring with Artificial Neural Network**. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, v. 11, n. 3, p. 206-214.
- LOPES, V. JR., TURRA, A. E., MÜLLER, H. H., BRUNZEL, F., INMAN, D. J., 2001, **A New Methodology of Damage Detection by Electrical Impedance and Optimization Technique**. Diname, pp. 311-316, Florianópolis-Brasil.
- MANNAN, M. A. E RICHARDSON, M. H., 1990, **Detection and Location of Structural Cracks Using FRF Measurements**. Proceedings of the 8th International Modal Analysis Conference - IMAC. v.1, p. 652-657.

- MELO, G. P., 1998, **Detecção e Localização de Falhas via Observadores de Estado de Ordem Reduzida**. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Tese de Doutorado, 125p.
- NAPOLITANO, K. L., 1997, **Damage Detection Using reduced Measurements: Analytical Investigation**. AIAA-ASME-ASCE-AHS Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Reston, v. 3, p. 2041-2051.
- PANDEY, A. K., BISWAS, M., AND SAMMAN, M. M., 1991, **Damage Detection from Changes in Curvature Mode Shapes**. Journal of Sound and Vibration, v. 145, n. 2, p. 321-332.
- PARDO DE VERA, C. AND GUEMES, J. A., 1997, **Embedded Self-Sensing Piezoelectric for Damage Detection**. Proceedings of the International Workshop on Structural Health Monitoring, September 18-20, Stanford, CA 445-455.
- PARK, G., CUDNEY, H. AND INMAN, D. J., 2000, **Impedance-based Health Monitoring of Civil Structural Components**. ASCE/Journal of Infrastructure Systems, v. 6, n. 4, p. 153-160.
- PEAIRS, D. M., 2002, **Development of a Self-Sensing and Self-Healing Bolted Joint**. Master Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 93p.
- PETERSON, L. D., DOEBLING, S. W., AND ALVIN, K. F., 1995, **Experimental Determination of Local Structural Stiffness by Disassembly of Measured Flexibility Matrices**. Proc. of 36th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, p. 2756-2766.
- RAJU, V., PARK, G., CUDNEY, H., 1998, **Impedance-based health monitoring of composite reinforced structures**. 9th International Conference on Adaptive Structures and Technologies, Cambridge, MA. p. 448-457.
- RATCLIFFE, C. P., 1997, **Damage Detection Using a Modified Laplacian Operator on Mode Shape Data**. Journal of Sound and Vibration, v. 204, n. 3, p. 505-517.
- RIZOS, P. F., ASPRAGATHOS, N., DIMAROGONAS, A. D., 1990, **Identification of Crack Location and magnitude in a Cantilever Beam From the Vibration Modes**. Journal of Sound and Vibration, v. 138, n. 3, p. 381-388.
- RUTHERFORD, A. C., PARK, G., SOHN, H., FARRAR, C. R., 2004, **The Use of Electrical Impedance Moments for Structural Health Monitoring**. XXII International Modal Analysis Conference - IMAC, Dearborn.
- RYTTER, A., 1993, **Vibration based inspection of civil engineering structures**. Ph. D. Dissertation, Department of Building Technology and Structural Engineering, Alborg University, Denmark.
- SALAWU, O. S., 1997, **Detection of Structural Damage through Changes in Frequency: a Review**. Engineering Structures, v. 19, p. 718-723.
- SILCOX, R.J., LEFEBVRE, S, METCALF, V.L., E FULLER, C.R., 1992, **Evaluation of Piezoceramic Actuators for Control of Aircraft Interior Noise**. Proceeding of DGLR/AIAA, 14th Aeroacoustic Conference, Aachen, Germany.

SIMÕES, R. C. AND STEFFEN JR., V., 2002, **Sobre o Problema da Identificação de Falhas em Máquinas Rotativas**. II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM, João Pessoa - PB.

SUN, F., 1996, **Piezoelectric Active Sensor and Electric Impedance Approach for Structural Dynamic Measured**. Master Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University – CIMSS.

TANOMARU, J., 1995, **Motivação, Fundamentos e Aplicações de Algoritmos Genéticos**. Congresso Brasileiro de Redes Neurais, Curitiba.