



IDENTIFICAÇÃO DE FALHAS ESTRUTURAIS USANDO SENSORES E ATUADORES PIEZELÉTRICOS E TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO

Adriano Tebaldi

E-mail: tebaldi@dem.feis.unesp.br

Vicente Lopes Júnior

Universidade Estadual Paulista – UNESP – Ilha Solteira

Departamento de Engenharia Mecânica

Av. Brasil Centro, 56 – CEP 15.385.000 – Fone (018) 763 8138 – FAX (018) 762 2992

Resumo. *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 de exibir adaptação em curto prazo. Vários estudos têm sido realizados na área de identificação de sistemas mecânicos e há uma tendência de se introduzir inteligência artificial nos projetos de controle e nos sistemas de monitoramento de sinais, os quais permitiriam uma automatização no processo de monitoramento e diagnose de sistemas complexos. O termo materiais inteligentes é usado para caracterizar materiais com propriedades extraordinárias, como exemplo deste tipo de material pode-se citar os materiais piezelétricos, eletroresistivo e magneto-resistivo, fluidos e sólidos electro-reológico, ligas de memória de forma, ou fibras óticas. Materiais piezelétricos pertencem a uma classe de dielétricos que exibem uma deformação significativa no material em resposta a aplicação de um campo elétrico, assim como produzem uma polarização dielétrica, ou seja, um campo elétrico, em resposta a deformações que o material possa ter. A dupla propriedade exibida pelos materiais piezelétricos torna extremamente vantajosa a aplicação destes materiais para sistemas de controle e para localização e caracterização de falhas estruturais. O problema de identificação de variáveis ou detecção de danos em sistemas mecânicos é uma classe de problema inverso e, portanto não apresenta uma solução única. Neste trabalho a localização e caracterização das falhas são realizadas em dois passos. Em uma primeira etapa é utilizado o método da impedância elétrica para se determinar a localização das falhas e em uma segunda etapa utiliza-se um método de otimização para quantificar a falha. O processo de otimização utilizado é o método de algoritmos genéticos.*

Palavras Chaves: *Sensor e Atuador Piezelétrico, PSA, Impedância Elétrica, Algoritmos Genéticos, Técnicas de Otimização, Identificação de Falhas.*

1. INTRODUÇÃO

Na natureza a adaptação é uma das características que os organismos tem para se adequar ao ambiente em que vivem. Embora existam diversas definições para o termo inteligente (“Smart”), a comunidade de engenharia tem adotado o termo de estruturas inteligentes (“Smart Structures”), para descrever estruturas ou componentes estruturais com habilidades extraordinárias, e que não são encontradas em materiais/estruturas convencionais. A Fig. (1) descreve de maneira comparativa os elementos de uma estrutura inteligente, (Egawa K.A., 1997). Os materiais piezelétricos são utilizados na grande maioria dos sistemas adaptativos (Banks et al., 1996).

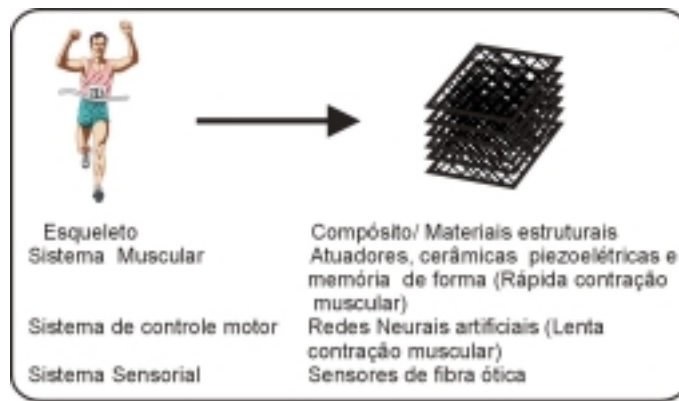


Figura 1. Elementos básicos de estruturas inteligentes

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; algoritmo de controle adaptativo; utilização simultânea como sensor e atuador, que pode frequentemente ser implementado para combinar diferentes funções objetivas ou aliviar situações de danos usando uma plataforma de estrutura adaptativa, (Gabbert et al, 1998) e sistemas de auto monitoramento das condições de máquinas ou estruturas (self-health monitoring), Lopes et al, 2000. A característica que torna extremamente vantajoso o uso dos materiais piezoeletricos 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.

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. No entanto, devido ao acelerado avanço tecnológico e a alta competitividade do mercado, busca-se agora, adaptações e melhorias estruturais 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.

A capacidade de avaliação de danos pode ser pensada 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). A **manutenção Preditiva** por análise de vibrações procura diminuir os problemas da manutenção preventiva, que é baseada em uma programação da intervenção nas máquinas com base na estimativa de um período médio de ocorrência de falhas, procurando assim evitar paradas inesperadas.

2. CONCEITOS DE IMPEDÂNCIA ELÉTRICA

Propriedades piezoeletricas são definidas utilizando-se três eixos de direções, sendo duas destas direções isotrópicas (mesmas propriedades em todos os pontos destas direções) e a outra é associada com a direção de polarização, que sofre o efeito piezoeletrico, Fig. (2). Sensores e atuadores piezoeletricos podem ser criados pela polarização de material apropriado através da aplicação de um campo elétrico a altas temperaturas. A polarização tem efeito de alinhar parcialmente os eixos polares para se obter um alinhamento macroscópico que resulte no acoplamento eletro-mecânico. Como resultado deste acoplamento, o material piezoeletrico se deforma em resposta a aplicação de um campo elétrico, dando ao material a propriedade de atuador. A capacidade de sensor do material é obtida através do efeito inverso, no qual as tensões mecânicas no material causam uma rotação parcialmente alinhada nos dipolos para gerar um campo elétrico.

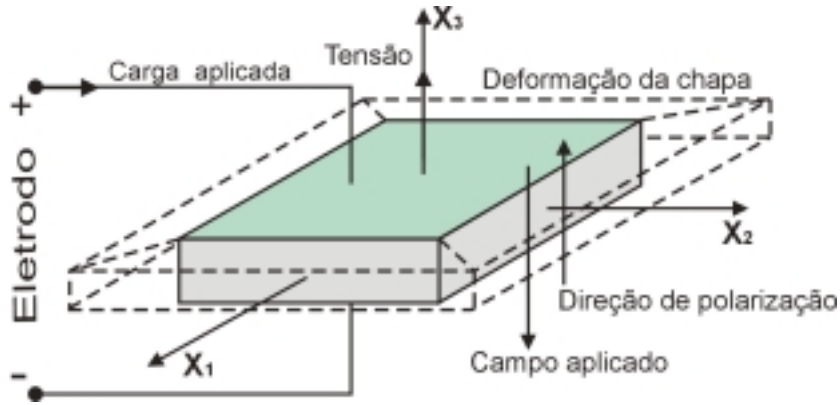


Figura 2. Direções principais dos eixos para materiais piezoeletricos

Elementos piezoeletricos apresentam histerese não linear para elevados níveis de excitação, no entanto, para aplicações estruturais comuns podem ser aproximadas para lineares. Sendo assim podemos usar as seguintes relações constitutivas lineares para o efeito direto e inverso de materiais piezoeletricos, (Clark et al. 1998).

$$\{D\} = [e]^T \{S\} + [\epsilon^S] \{E\} \quad (\text{Efeito Direto}) \quad (1)$$

$$\{T\} = [C^E] \{S\} - [e] \{E\} \quad (\text{Efeito Inverso}) \quad (2)$$

onde o expoente $()^S$ significa que os valores são medidos para deformação constante e o expoente $()^E$ significa que os valores são medidos para um campo elétrico constante, $\{T\}$ é o tensor de tensão $[N/m^2]$, $\{D\}$ é o vetor de deslocamento elétrico $[C/m^2]$, $\{S\}$ é o tensor deformação $[m/m]$, $\{E\}$ é o campo elétrico $[V/m = N/C]$, $[C^E]$ é o tensor de elasticidade para campo elétrico constante $[N/m^2]$, $[e]$ é o tensor de permissividade dielétrica $[N.m/V.m^2 = C/m^2]$ e $[\epsilon^S]$ é o tensor dielétrico para deformação mecânica constante $[N.m/V^2.m]$.

Se cada elemento da matriz constante de material piezoeletrico, $[e]$, é designado por e_{ij} onde i corresponde as linhas e j as colunas da matriz, então e_{ij} corresponde à tensão desenvolvida na j -ésima direção devido a um campo elétrico aplicado na i -ésima direção. As constantes piezoeletricas de tensão podem ser obtidas a partir das constantes da deformação, usando as equações constitutivas lineares opcionais:

$$\{S\} = [s^E] \{T\} + [d] \{E\} \quad (3)$$

$$\{D\} = [d]^T \{T\} + [\epsilon^T] \{E\} \quad (4)$$

onde $[\epsilon^T]$ é o tensor dielétrico para tensão constante. A Eq. (3) é chamada de equação do atuador e a Eq. (4), de equação do sensor. A equação de movimento para um PZT vibrando na direção y , pode ser expressa como:

$$\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \bar{Y}^E \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \quad (5)$$

onde v é o deslocamento na direção y e ρ 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,

$$v = \bar{v} e^{i\omega t} = (A \sin(k.y) + B \cos(k.y)) e^{i\omega t} \quad (6)$$

$$k = \omega^2 \frac{\rho}{\bar{Y}_{22}^E} \quad (7)$$

O 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:

$$I = i\omega D_3 d\sigma \quad (8)$$

onde σ é a área do eletrodo e D_3 o deslocamento. A admitância, inverso da impedância, é $Y = I/V$ e após algumas substituições, para um PZT retangular, como mostrado na Fig. (2) pode ser encontrada como (Sun, 1996):

$$Y(\omega) = i\omega \frac{w_A l_A}{h_A} \left(\bar{\epsilon}_{33}^T - (d_{32})^2 \bar{Y}_{22}^E + \frac{Z_A(\omega)}{Z_S(\omega) + Z_A(\omega)} (d_{32})^2 \bar{Y}_{22}^E \frac{\tan(k l_A)}{k l_A} \right) \quad (9)$$

onde Z_A é a impedância mecânica do atuador ao longo da direção y e Z_S é a impedância mecânica da estrutura. Uma das vantagens de elementos piezelétricos para aplicações em problemas de controle e localização de falhas resulta na relativa insensibilidade destes materiais quando utilizados abaixo da temperatura de Curie. A variação no tensor de deformação piezelétrico para um material piezocerâmico sob a ação de carga constante é menor que 12% para temperaturas até 120°C. Devido ao fato de as deformações sofridas pelo material estarem relacionadas com o valor do campo elétrico a ser introduzido, tal estabilidade à temperatura é crucial em aplicações de controle e detecção de falhas, pois erros provenientes de variações térmicas acarretarão erros na magnitude do controle e poderão fornecer informações errôneas no caso de monitoramento de defeitos estruturais.

A baixa sensibilidade à temperatura dos piezelétricos é uma vantagem sobre os elementos eletro-resistivos, pois estes são altamente dependentes da temperatura. Uma segunda vantagem dos piezelétricos está em sua flexibilidade em uma variedade de aplicações, isto é parcialmente devido à diversidade de materiais que possuem propriedades piezelétricas. Entre os materiais piezelétricos mais utilizados estão os piezocerâmicos e os piezopolímeros, dos quais os PZT's (lead zirconate titanates) e os PVDF's (polyvinylidene fluorides) são respectivos exemplos.

Devido à natureza cerâmica, os PZT's tem boa rigidez e freqüentemente excede a da estrutura base, o que resulta em uma excelente conversão da energia elétrica em energia mecânica. Isto torna estes elementos eficientes atuadores para uma grande variedade de aplicações. Materiais piezocerâmicos são efetivos sobre uma larga faixa de freqüência, e a dupla propriedade exibida por estes materiais (self-sensing actuators, Dosch, Inman and Garcia, 1992) torna extremamente vantajosa sua aplicação para sistemas de controle ou localização de falhas. Embora vantajoso em muitas aplicações, os piezocerâmicos apresentam dificuldade em assumir moldes com formas complexas devido à fragilidade inerente a eles. Alternativamente, filmes PVDF têm consistência de uma folha plástica e podem ser colados em praticamente qualquer geometria, tem alta sensibilidade e precisão nas medidas e são, portanto, utilizados, principalmente, como sensores. A aplicação direta dos filmes PVDF como atuadores tem sido limitada, pois exibem coeficientes de acoplamento eletromecânico mais baixo que os PZT. No entanto, a resistência dielétrica dos filmes PVDF é maior que a do PZT e eles podem ser expostos a maiores campos elétricos.

O coeficiente de acoplamento eletromecânico garante a conversão efetiva de energia em um sistema de interação linear. Neste trabalho, o coeficiente de acoplamento eletromecânico (freqüentemente chamado fator de acoplamento) do transdutor piezelétrico é considerado. Para se determinar o coeficiente de acoplamento, a informação da orientação do cristal e o arranjo de entrada e saída são requeridos, em outras palavras, o coeficiente é definido para o respectivo modo

de vibração no limite estático. O coeficiente de acoplamento k é medido em porcentagem para a maioria dos casos, porém ele tem maior significado quando utilizado ao quadrado, k^2 , o qual corresponde a razão de energia.

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 mais frequentemente utilizados em aplicações aeroespaciais e automotivas. Sensores e atuadores piezocerâmicos, PSA, são leves e podem ser colados a uma variedade de estruturas. Grande parte das pesquisas atuais considera que o efeito do acoplamento eletromecânico destes materiais com a estrutura base é pequeno e pode ser desprezado. No entanto, para técnicas de ajuste de modelos ou aplicações envolvendo localização de falhas em estruturas leves e específicas este efeito deve ser considerado (Lopes et. al. 2000).

3. CONCEITOS DE ALGORITMO GENÉTICO

Os Algoritmos Genéticos foram inicialmente desenvolvidos por Holland nas décadas de 60 e 70 e formalmente introduzidos no seu 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, é repetido até que uma solução satisfatória seja encontrada.

O sucesso na utilização do algoritmo genético depende de quatro decisões, descritas a seguir.

Qual a codificação usar?

Esta é a decisão fundamental para o sucesso dos Algoritmos Genéticos e segundo Mitchell (1996), ainda não há nenhuma conclusão rigorosa sobre qual codificação conduzirá ao melhor resultado para um problema a ser solucionado. Neste problema utilizou-se a codificação em números reais para se ajustar a variação das matrizes de massa e rigidez da FRF medida

Como Realizar a Seleção?

A Seleção tem que ser equilibrada com o cruzamento e a mutação em relação à diversidade. Meios de seleção muito fortes reduzirão a diversidade necessária para trocas genética posteriores e progresso da população, enquanto seleção muito fraca resultará em evolução muito lenta.

Quais Operadores Usar (Além da Seleção)?

Esta decisão depende do problema abordado, bem como da estratégia de codificação do cromossomo e do tipo de relacionamento que cada gene guarda com os demais.

Como ajustar os Parâmetros?

Ainda não existem resultados conclusivos sobre o estabelecimento de parâmetros como o tamanho da população, a taxa de cruzamento e a taxa de mutação. Um fato interessante é que os parâmetros interagem de forma não linear uns com os outros, de modo que não podem ser otimizados separadamente.

4. METODOLOGIA DE ANÁLISE

A proposta deste 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 atuador, PSA, 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.

O problema direto, que consiste na determinação da variação das propriedades modais em função das variações físicas da estrutura, 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 serão utilizadas no ajuste. Entre os mais utilizados, pode-se citar o método 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 exatidão a localização da falha e 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 Fig. (3) mostra um fluxograma esquemático da metodologia proposta.

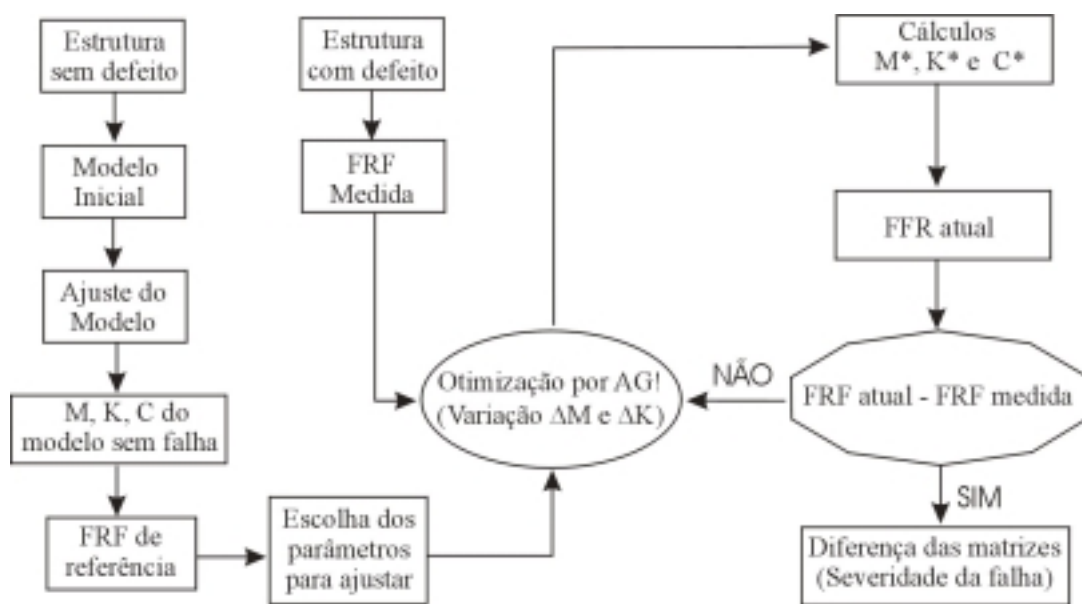


Figura 3. Fluxograma esquemático da metodologia proposta.

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^* , 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 o processo termina e a diferença entre as matrizes do sistema sem falha, M , K e C , e das matrizes M^* , K^* e C^* fornecem a quantificação do defeito. A otimização foi realizada utilizando um algoritmo genético desenvolvido por C. R. Houck, J. Joines, e M. Kay na North Carolina State University, adaptado às condições deste trabalho.

As técnicas de busca e otimização tradicionais se iniciam com um único candidato, que iterativamente, é manipulado utilizando algumas heurísticas (estáticas) diretamente associadas ao problema a ser solucionado. Geralmente, estes processos não são resolvidos por algoritmos e sua simulação em computadores pode ser muito complexa.

Os Algoritmos Genéticos diferem dos métodos tradicionais de busca e otimização, principalmente em quatro aspectos: AGs trabalham com uma codificação do conjunto de parâmetros e não com os próprios parâmetros; AGs trabalham com uma população e não com um único ponto; AGs utilizam informações de custo ou recompensa e não derivadas ou outro conhecimento auxiliar e os AGs utilizam regras de transição probabilísticas e não determinísticas.

5. RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados abaixo foram obtidos para uma viga de alumínio, com dimensões de 500x30x5 milímetros, por comprimento, largura e espessura, respectivamente. A viga foi discretizada em 20 elementos, com 2 graus de liberdade (translação na direção z e rotação em y) por nó. A viga foi considerada engastada em uma de suas extremidades e livre na outra. As propriedades do material piezolétrico são baseadas no material designado por PSI-5A-S4 (Piezo Systems, Inc.) são dadas na Tab. (1).

Tabela 1. Propriedades do material PZT.

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

Os valores obtidos do modelo sem falha foram comparados com valores teóricos das frequências naturais para os seis primeiros modos de vibrar da viga. Para a viga, com $E = 70 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$, $b = 0.03\text{m}$, $h = 0,005\text{m}$ e $L = 0.5\text{m}$, obteve-se os valores teóricos (Inman, 1996) de: $f_1 = 16.42 \text{ Hz}$, $f_2 = 102.90 \text{ Hz}$, $f_3 = 288.13 \text{ Hz}$, $f_4 = 564.62 \text{ Hz}$, $f_5 = 933.36 \text{ Hz}$ e $f_6 = 1394.28 \text{ Hz}$.

Os defeitos na viga, que neste caso representam os valores medidos, foram simulados alterando a rigidez do elemento 5 em 90, 80, 70, 60, 50 e 40% do valor considerado sem defeito. Estes valores correspondem aos defeitos 1 a 6, respectivamente. A Fig. (4) mostra as FRFs da viga para os casos sem defeito, com defeito máximo ($\text{FRF}_{\text{medida}}$) e após o ajuste, obtido pelo AG ($\text{FRF}_{\text{atual}}$).

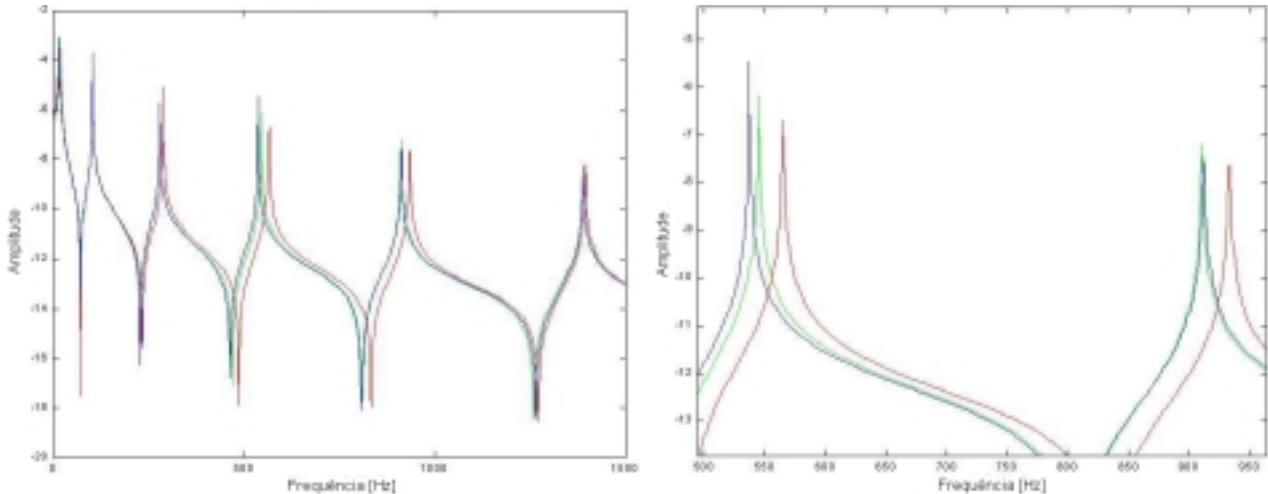


Figura 4. FRFs da viga para os casos sem defeito (Cor Vermelho), com defeito máximo (Cor Azul) e após o ajuste (Cor Verde).

A otimização foi realizada utilizando como função objetivo a somatória dos erros das seis primeiras frequências naturais. Foram utilizados dois critérios para a somatória das diferenças entre as frequências naturais. No primeiro caso (Critério 1) se utilizou a porcentagem da diferença entre os valores obtidos pelo algoritmo genético e o valor da curva com defeito ($\text{FRF}_{\text{medida}}$). Enquanto no segundo caso (Critério 2) se utilizou o valor absoluto das diferenças entre as frequências naturais.

Vários testes foram realizados para que se verificasse a capacidade do AG em quantificar a severidade da falha. Na Tab. (2) os limites inferior e superior definem a faixa na qual os parâmetros puderam variar. Estes limites foram mantidos constantes, neste exemplo, para que se avaliasse, em

um instante inicial, a influência do número da população inicial e do número de gerações. A taxa de seleção utilizada foi de 0.08 e os parâmetros de mutação e cruzamento não foram alterados, utilizando-se a opção default do programa. O erro obtido se refere à soma, em porcentagem, dos erros das seis primeiras frequências naturais.

Tabela 2. Erros obtidos para diferentes situações.

Limite superior	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Limite inferior	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
População inicial	100	150	200	200	250	250	250	300	300	400
Gerações	200	200	200	250	150	200	300	250	300	250
Erro obtido (%)	56,5	38,7	37,2	31,4	21,7	15,2	8,3	37,2	22,8	21,1

A melhor população inicial encontrada, levando em conta o esforço computacional e o erro obtido, foi de 250 indivíduos. Quanto ao número de gerações quanto maior melhor, pois os indivíduos são melhorados a cada geração. No entanto, à medida que se aumenta o número de gerações o esforço computacional aumenta, assim foi definido o número máximo de 300 gerações.

Após a definição da melhor população inicial e do número de gerações o próximo parâmetro a ser modificado foi a taxa de seleção. Valores de referência encontrados na literatura especializada foram testados, mas como citado nas literaturas, a taxa de seleção deverá ser adotada para cada caso. As Tabs. (3) e (4) se referem aos ensaios realizados variando a taxa de seleção e o critério de avaliação.

Tabela 3. Valores obtidos para diferentes taxas de seleção utilizando o Critério 1.

Taxa de Seleção	0,01	0,04	0,05	0,06	0,07	0,09	0,2	0,5	0,9
Erro obtido (%)	34,41	42,67	11,41	18,02	21,09	57,43	7,72	66,49	19,50

Tabela 4. Valores obtidos para diferentes taxas de seleção utilizando o Critério 2.

Taxa de Seleção	0,01	0,04	0,05	0,06	0,07	0,09	0,2	0,5	0,9
Erro obtido (%)	24,20	35,86	8,21	15,30	24,18	47,66	48,85	23,99	7,20

O erro obtido na Tab. (4) foi transformado em porcentagem para que se pudesse comparar ao caso anterior.

6. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

O bom funcionamento de um GA depende do correto ajuste dos parâmetros utilizados no programa e um bom modelo comparativo, assim foram realizados vários testes para definir estes parâmetros. Quando testada a população inicial e o número de gerações, nota-se que para populações pequenas (inferiores a 100 indivíduos) os valores da otimização não convergem. Apenas aumentar a população inicial não significa que resultados melhores serão obtidos, isto pode ser observado nas simulações realizadas quando as populações iniciais eram maiores que 250 indivíduos. A explicação para estes dois fenômenos está relacionada com o campo de busca do GA, quando as populações são pequenas este campo fica restrito dificultando a convergência, o mesmo acontece quando os valores da população inicial são grandes, o campo de busca fica amplo demais dificultando o encontro de bons indivíduos. A melhor população que se encontrou neste trabalho foi de 250 indivíduos, onde os menores erros foram encontrados em todas as faixas analisadas.

A cada momento que o número de gerações é aumentado ocorre uma melhoria nos resultados obtidos, mas foi observado neste trabalho que esta melhoria pode não ser significativa em função do esforço computacional. Assim, o melhor número encontrado foi de 300 gerações. A partir deste

número a eficiência do GA não foi significativa. A taxa de seleção influencia diretamente a resposta do GA. Altas taxas podem levar o GA a uma convergência prematura e uma baixa taxa irá exigir um grande esforço computacional. Nas Tabs. (3) e (4) as melhores taxas de seleção foram de 0.2 e 0.9 para o caso 1 e 2, respectivamente. No entanto, não houve repetibilidade para estes casos. Contrariamente a esta situação, para a taxa de 0.05 houve boa repetibilidade para os dois critérios, sendo escolhido, portanto, como a melhor opção.

A aplicação conjunta das técnicas de impedância elétrica e dos Algoritmos Genéticos, como método de otimização, mostrou grande versatilidade e, acredita-se que estas ferramentas poderão, em conjunto, oferecer um critério robusto e eficiente para identificação de danos estruturais.

7. AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão de bolsa de iniciação científica para o desenvolvimento deste trabalho, processo 00/12388-3.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ayres, J.W. *Qualitative Health Monitoring and Incipient Damage Inspection/ Evaluation*, Master Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University – CIMSS, 1996.
- Banks, H.T., Inman, D.J., Leo, D.J., and Wang, Y., “An Experimentally Validated Damage Detection Theory in Smart Structures”, *Journal of Sound and Vibrations*, Vol.191, pp. 859-880, 1996.
- Dosch, J.J. Inman, D. J. and Garcia, E., “Self-Sensing Piezoelectric Actuator for Collocated Control,” *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol.3, No 1 pp. 166-185, Jan.1992.
- Egawa, K. *A new Concept of Maintenance Inspection*. Structural Health Monitoring Currents Status and Perspectives Stanford, CA, September 18-20, 1997.
- Gabbert, U. Berger, H., Koppe, H. and Cao, X. On Modelling and Analysis of Piezoelectric Adaptive Structures by the Finite Element Method, 4th ESSM, pp. 621-628, Harrogate, July 1998.
- Goldberg, D.E. *Genetic Algorithms: in search, optimization & machine learning*. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1989.
- Holland, J.H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. The University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.
- Houck, C. R., Joines, J. A., Kay, M. G., A Genetic Algorithm for Optimization: A Matlab Implementation, North Carolina State University, USA, 1996.
- Ichihara, J. A., Um Método de Solução Heurístico para a Programação de Edifícios Dotados de Múltiplos Pavimentos-Tipo, Capítulo III. Florianópolis, 1998.
- Inman, D. J., *Engineering Vibration*, 0-13-518531-9, Editora Prentice Hall, Inc, N.J., USA, 1996.
- Lopes Jr., V., Park, G., Cudney, H. H., and Inman, D. J. Impedance-Based Structural Health Monitoring with Artificial Neural Network. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, USA p.p. 206-214, Vol.11, N.3 – March/2000.
- Mitchell, M.; *An Introduction to Genetic Algorithms*. A Bradford Book, The MIT Press, Cambridge, England. 1996.
- Sun, F., Piezoelectric Active Sensor and Electric Impedance Approach for Structural Dynamic Measurment, master Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University – CIMSS, 1996.

DAMAGE IDENTIFICATION BY PIEZOELECTRIC SENSORS AND ACTUATORS AND OPTIMIZATION TECHNIQUE

Adriano Tebaldi

Universidade Estadual Paulista – UNESP – Ilha Solteira

E-mail: tebaldi@dem.feis.unesp.br

Vicente Lopes Júnior

Universidade Estadual Paulista – UNESP – Ilha Solteira

Departamento de Engenharia Mecânica

Av. Brasil Centro, 56 – CEP 15.385.000 – Fone (018) 763 8138 – FAX (018) 762 2992

***Abstract.** The science of smart structure is recent and we can have a vision of this technology as an opportunity for results at long time, or we can examine the impacts that the smart structures is going to have in the ability of adaptation at short time. Several studies have been realized in the field of identification, and there is a tendency to introduce artificial intelligence in projects of control and signal monitoring. It would allow automation in the monitoring of health conditions of complex systems. The term smart material has been used to characterize material with uncommon properties. Examples of these material are: piezoelectric materials, electro and magnetostrictive, electrorheological fluids, and shape memory alloys. Piezoelectric materials belong to a dielectric class, and its effect is described in terms of the ability of a range of materials to convert mechanical stress into electric field and vice versa. In order for the piezoelectric effect to occur, the material concerned must be anisotropic and electrically poled, that is, there must be a spontaneous electric field in a particular direction maintained throughout the material. The double propriety of these materials becomes extremely worth its application for control systems and localization and characterization of structural damage. The problem of damage identification is a class of inverse problem and, hence it does not have a unique solution. In this work the characterization of damages are realized in two steps. In a first step is used the method of electric impedance in order to determine the damage localization, and in a second step is used a method of optimization to quantify the damage. The process of optimization used is the method of genetic algorithms.*

***Keywords:** Piezoelectric Sensor and Actuator, PSA, Smart Structure, Electric Impedance, Genetic Algorithms, Optimization Technique and Damage Identification.*