

# **ESTUDO E COMPARAÇÃO ENTRE TÉCNICAS INTELIGENTES DE OTIMIZAÇÃO PARA O PROJETO DE PLACAS COM ATUADORES PIEZOLETRICOS**

**Romes Antonio Borges**

Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila 2160 Campus Santa Mônica.  
Uberlândia MG 38400 – 902, Fone: 0342394149 - FAX: 034 2394282  
[rborges@mecanica.ufu.br](mailto:rborges@mecanica.ufu.br)

**Valder Steffen Jr.**

Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila 2160 Campus Santa Mônica  
Uberlândia MG 38400 – 902, Fone: 0342394149 - FAX: 034 2394282  
[vsteffen@mecanica.ufu.br](mailto:vsteffen@mecanica.ufu.br)

**Resumo.** Com o presente artigo, pretende-se estudar o comportamento de duas técnicas de otimização, Algoritmos Genéticos e Recozimento Simulado (Simulated Annealing), na resolução de um problema de otimização onde se tem uma placa fina e um elemento piezoelettrico. Deseja-se, usando técnicas de otimização encontrar a melhor posição para a pastilha piezoelettrica na placa, a fim de excitar modos de vibração previamente escolhidos. Vários resultados de simulação computacional demonstram que as técnicas utilizadas são eficientes na obtenção da configuração ótima do sistema placa-atuador piezoelettrico.

**Palavras-chave:** Otimização, Algoritmos Genéticos, Recozimento Simulado, placa fina, atuador piezoelettrico.

## **1. INTRODUÇÃO**

Otimização tem a ver com a determinação da melhor configuração de projeto de um dado sistema, sem que seja necessário, entretanto, testar todas as possibilidades. Além disso, com tal ferramenta consegue-se reestruturar o desempenho global de um projeto.

Além das técnicas clássicas de otimização (baseadas no cálculo diferencial), outras técnicas têm sido pesquisadas para a resolução de problemas difíceis ou impossíveis de se resolver utilizando as técnicas clássicas. Dentre estas técnicas de otimização podem ser citadas os Algoritmos genéticos, Recozimento Simulado (Simulated Annealing) e a técnica chamada Busca Tabu (Tabu Search).

Os Algoritmos Genéticos modelam o processo de seleção natural relacionado à "luta pela vida", enquanto o Recozimento Simulado modela o processo metalúrgico de recocimento e a Busca Tabu é baseada na otimização combinatória. Todos procuram encontrar novos pontos dentro do espaço de busca, aplicando operadores estatísticos para os pontos atuais e obtendo novos pontos que orientam a busca dos valores ótimos dentro deste espaço. Neste trabalho procura-se empregar os Algoritmos Genéticos e o Recozimento Simulado no projeto ótimo de placas com atuadores piezoelettricos.

## 2. TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO

Alguns algoritmos Inicializam a minimização da função objetivo através de um conjunto inicial de valores de parâmetros. Este processo converge facilmente para mínimos locais, mas essa convergência é prematura. Isto ocorre comumente com os métodos de otimização tradicionais, baseados no método do cálculo, diferencial, que utilizam o gradiente para definir a direção de busca Vanderplaats, (1998). Os métodos aqui utilizados baseiam-se nos processos naturais e tendem a convergir o mais próximo possível do mínimo global.

### 2.1. Técnicas Naturais de Otimização: Algoritmos Genéticos e Recozimento Simulado

Nos últimos anos tem surgido várias técnicas de otimização baseadas em processos naturais. Os mais conhecidos são os Algoritmos Genéticos (Haupt e Haupt, 1998), o Recozimento Simulado (Kirkpatrick, 1983), a busca tabu (Glover, 1995).

Os Algoritmos Genéticos (Holland, 1975) são baseados no princípio da evolução imaginado por Darwin e resultam num procedimento versátil e robusto. Dispensa-se o uso do gradiente da função e das funções de restrição, isto é, atuam diretamente no espaço de projeto em busca de um ótimo global.

O algoritmo conhecido como Recozimento Simulado (Simulated Annealing), assim como os Algoritmos Genéticos são métodos de otimização baseados em processos naturais. Um estudo detalhado de cada uma destas técnicas pode ser encontrado em (Borges, 2003).

## 3. OTIMIZAÇÃO DE ATUADORES PIEZOELÉTRICOS PARA EXCITAÇÃO DE PLACAS FINAS.

O que se propõe neste artigo é resolver problemas de otimização com aplicações em engenharia usando as técnicas de otimização apresentadas anteriormente e mostrar que os Algoritmos Genéticos, e o Recozimento Simulado funcionam, em geral, tão bem quanto às técnicas clássicas de otimização. Será desenvolvida uma aplicação relacionada a vibrações em placas, buscando a melhor posição para pastilhas piezoelétricas em placas, a fim de favorecer a excitação de modos de vibração previamente escolhidos.

### 3.1. Vibrações Livres de Placas Retangulares

A equação do movimento que governa o problema de vibrações em placas elásticas é dada por Gérardin e Rixen, (1997) e por Reddy (1999), podendo ser expressa em termos do Laplaciano:

$$\text{ou } D\nabla^4 w + I_0 \ddot{w} - q(x, y, t) = 0 \quad (1)$$

sendo que  $I_0 = \rho h = m_{pl} / A$ ,  $D$  é a rigidez de flexão da placa,  $w$  é seu deslocamento transversal,  $m_{pl}$  é a massa da placa,  $A$  é a área,  $h$  é a altura da placa,  $q(x, y, t)$  é o carregamento externo e  $\nabla^4$  é o operador biharmônico.

Considera-se o caso da placa simplesmente apoiada nas quatro extremidades. Os modos naturais correspondentes são dados por:

$$W_{mn}(x, y) = A_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{L_x}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{L_y}\right); \quad m, n = 1, 2, \dots \quad (2)$$

e as freqüências naturais da placa são dadas por:

$$\omega_{mn} = \beta_{mn}^2 \sqrt{\frac{D}{m_s}} = \pi^2 \left[ \left( \frac{m}{L_x} \right)^2 + \left( \frac{n}{L_y} \right)^2 \right] \sqrt{\frac{D}{\rho h}}; \quad m, n = 1, 2, \dots \quad (3)$$

### 3.2. Introdução aos Efeitos Piezoelétricos

Um par de atuadores piezoelétricos é colado em ambos os lados da placa (Steffen e Inman, 2002). No modelo de simulação adotado é assumido que os elementos piezoelétricos são acoplados perfeitamente à superfície da placa. Para manter a simetria da estrutura e aumentar a influência do atuador, uma pastilha piezoelétrica é colada em cima e outra sob da placa. Os dois atuadores são ativados, aplicando uma voltagem de sinais opostos nestas duas pastilhas piezoelétricas. As trações uniformes na superfície causadas nas interfaces do atuador-placa vão agir em direções opostas e, estando fora do eixo neutro da placa, causam momentos de flexão uniforme (Devasia, 1993). Devido ao posicionamento simétrico dos atuadores nas superfícies superior e inferior da placa, a deformação ocorre de tal forma que não há nem extensão nem contração no plano médio da mesma. Assim a placa se deforma em flexão pura.

A perfeita união entre a pastilha piezoelétrica e a placa garante a continuidade da deformação na interface. Sendo as deformações na interface da placa e no elemento piezoelétrico iguais e os módulos de elasticidade dos materiais diferentes, as tensões na interface deverão apresentar descontinuidade. Os efeitos resultantes são os momentos de linha distribuídos que agem em fase ao longo das quatro extremidades do atuador.

De acordo com Dimitriadis et al. (1991), assumindo que os atuadores piezoelétricos são unidos perfeitamente à superfície da placa, o carregamento externo da placa, representado pelo atuador, induz momentos, que são dados por:

$$q(x, y, t) = C_o \frac{d_{31}}{t} V \left( \frac{\partial^2 R}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 R}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

onde

$$C_o = -\frac{2}{3} \left( \frac{h}{2} \right)^2 E_p \frac{1 + \nu_{pe}}{1 - \nu_p} \left( \frac{P}{1 + \nu_p - (1 + \nu_{pe})P} \right) \quad \text{e} \quad P = -\frac{E_{pe} (1 - \nu^2)}{E_p (1 - \nu_a^2)} \frac{3t \left( \frac{h}{2} \right) (h + t)}{2 \left[ \left( \frac{h}{2} \right)^3 + t^3 \right] + 3 \left( \frac{h}{2} \right) t^2} \quad (5)$$

Sendo  $E$  o módulo de elasticidade com subscritos  $p$  e  $pe$  denotando as quantidades associadas à placa e ao atuador, respectivamente,  $h$  é a espessura da placa,  $\nu$  é o coeficiente de Poisson,  $d_{31}$  é a constante piezoelétrica e  $V$  é a voltagem aplicada.

### 3.3. Excitação de uma Placa Simplesmente Apoiada

Considera-se, uma placa retangular com as bordas simplesmente apoiadas. O atuador é composto de dois elementos piezoelétricos idênticos e acoplados simetricamente em cada lado da placa, tais que suas bordas sejam paralelas às bordas da placa. Este atuador, quando ativado, induzirá momentos internos através do elemento piezoelétrico, sendo que as deformações são as mesmas nas duas direções.

Conforme já foi dito, a ativação do elemento piezoelétrico com tensões elétricas de sinais opostos,

induz o surgimento de distribuições de momentos fletores nas direções  $x$  e  $y$ . Tais momentos podem ser expressos da seguinte forma:

$$m_x = m_y = C_o \frac{d_{31}}{t} V [h(x - x_1) - h(x - x_2)] [h(y - y_1) - h(y - y_2)] \quad (6)$$

onde  $h(\cdot)$  é a função degrau unitário.

Sendo a voltagem de entrada do atuador oscilante,  $m_x$  e  $m_y$  também oscilam na mesma freqüência de entrada. O aumento da massa e da rigidez da placa devido ao atuador é desprezado. Pela teoria clássica de placas finas, a equação do movimento pode ser escrita em função dos momentos fletores da placa  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_{xy}$  e dos momentos induzidos pelo atuador piezoelétrico  $m_x$  e  $m_y$ :

$$\frac{\partial^2(M_x - m_x)}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2(M_y - m_y)}{\partial y^2} + m'' \ddot{w} = 0 \quad (7)$$

Onde  $m''$  a densidade de massa da placa por unidade de área e  $w$  é o deslocamento transversal da placa. Após manipulações algébricas, obtém-se:

$$D \nabla^4 w + m'' \ddot{w} = \frac{\partial^2 m_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 m_y}{\partial y^2} \quad (8)$$

onde  $D$  é a rigidez de flexão da placa.

A partir da eq. (6), obtém-se os carregamentos externos a serem usados na eq. (8). Após manipulações algébricas tem-se:

$$D \nabla^4 w + m'' \ddot{w} = C_o \frac{d_{31}}{t} V [\delta'(x - x_1) - \delta'(x - x_2)] [h(y - y_1) - h(y - y_2)] + \\ + C_o \frac{d_{31}}{t} V [h(x - x_1) - h(x - x_2)] [\delta'(y - y_1) - \delta'(y - y_2)] \quad (9)$$

onde  $\delta(\cdot)$  indica a função Delta de Dirac.

A solução para a eq.(9) pode ser encontrada utilizando a expansão modal da resposta  $w(x, y)$ . Para uma placa simplesmente apoiada, as auto funções são:

$$\phi_{mn}(x, y) = \sin(\gamma_m x) \sin(\gamma_n y) \quad (10)$$

onde:

$$\gamma_m = \frac{m\pi}{L_x} \quad \text{e} \quad \gamma_n = \frac{n\pi}{L_y} \quad \text{com } m, n = 1, 2, ..$$

A resposta da placa pode agora ser expandida em termos das auto-funções, utilizando o teorema da expansão (Meirovitch, 1997), enquanto que, para simplificar, o termo harmônico é suprimido.

$$w(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} W_{mn} \phi_{mn}(x, y) \quad (11)$$

onde  $w_{mn}$  é a amplitude das respostas modais da placa.

Fazendo uso das relações de ortogonalidade, pode-se obter as amplitudes modais:

$$W_{mn} = \frac{4C_0 d_{31} V}{m'' t A (\omega_{mn}^2 - \omega^2)} \left\{ - \left( \frac{\gamma_m^2 + \gamma_n^2}{\gamma_m \gamma_n} \right) [\cos(\gamma_m x_1) - \cos(\gamma_m x_2)] [\cos(\gamma_n y_1) - \cos(\gamma_n y_2)] \right\} \quad (12)$$

### 3.4. Estratégia de otimização

Steffen e Inman (2002) utilizaram técnicas de otimização clássica para determinar a dimensão e a posição ótimas de um atuador piezoelétrico acoplado em uma placa fina simplesmente apoiada com vistas a sua excitação. Nesta seção, acrescenta-se às técnicas clássicas, as técnicas de otimização mencionadas anteriormente. A intenção é a de se obter uma configuração ótima em que a capacidade de excitação da placa pelo atuador piezoelétrico seja maximizada. Para isto, serão construídas funções objetivo multi-critério, usando a distribuição de deslocamentos da placa e as amplitudes modais.

### 3.5. Otimização Não Linear

Pode-se definir o problema geral do projeto ótimo não linear como a determinação dos valores de  $x_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ), variáveis de projeto, tal que a função objetivo atinja um valor extremo enquanto, simultaneamente, todas as restrições são satisfeitas (Steffen and Inman, 2002). Se o algoritmo de otimização foi construído de forma que a função objetivo seja minimizada, basta que se troque  $f$  por  $-f$  na formulação para que a função possa ser maximizada. O problema pode ser formulado como:

$$\text{Min}\{f(x)/ h(x) = 0, g(x) \leq 0\}, x \in R^n \quad (13)$$

assim o possível espaço de busca é definido por:

$$X = \{x \in R^n / h(x) = 0, g(x) \leq 0\} \quad (14)$$

onde:

- $R^n$  é um conjunto n-dimensional de números reais;
- $x$  é um vetor de  $n$  variáveis de projeto;
- $f(x)$  é a função objetivo;
- $g(x)$  é o vetor das restrições de desigualdade;
- $g(x)$  é o vetor das restrições de desigualdades;
- $h(x)$  é o vetor das restrições de igualdade.

### 3.6. Otimização Multi-Critério

Em muitas situações várias funções objetivo precisam ser minimizadas (ou maximizadas) simultaneamente (Steffen e Imman, 2002; Borges, 2003). Isto porque muitos problemas do mundo real apresentam uma coleção de objetivos a serem extremizados que são, na maioria das vezes, conflitantes entre si, (Osyczka, 1990) ou seja, a melhoria de algum objetivo causa, consequentemente, a

deterioração de outro. As soluções do problema, neste caso, são chamadas de soluções ótimas de Pareto.

### 3.7. Formulação do Problema

A finalidade do procedimento de otimização a ser usado é determinar a posição do atuador, tal que sua capacidade para excitar modos de vibração selecionados de uma placa fina simplesmente apoiada seja maximizada.

O objetivo neste caso é maximizar a distribuição de deslocamentos da placa para uma determinada freqüência de excitação do atuador piezoelétrico. A função a ser maximizada é dada pela eq. (15):

$$f(x) = \max 20 \log_{10}[\text{abs}(w(x, y))] \quad (15)$$

onde  $w(x, y)$  é dado pela eq. (11).

Todavia, um outro objetivo desta aplicação é observar a influência de outros modos que participam na resposta de placa, principalmente no caso em que a freqüência de excitação está entre duas freqüências de ressonância do sistema.

Com a finalidade de evitar que o elemento piezoelétrico, na busca de seu posicionamento ótimo, extrapole as dimensões da placa, são levadas em consideração funções de restrição especialmente escritas para esta finalidade. Para definir o espaço de projeto, são estabelecidas restrições laterais próprias para cada caso.

## 4. APLICAÇÃO

Para as aplicações a seguir foi utilizada uma placa retangular com as seguintes características:

$$L_x = 0.60m; L_y = 0.40m; h=1.5\text{ mm}; E=1.07e11\text{ N/m}^2; \rho=7870\text{ Kg/m}^3; \nu=0.292.$$

As características do atuador acoplado à placa são dadas por:

$$E=63e9\text{ N/m}^2; d_{31}=120e-12\text{ m/V}; \nu = 0.3; t=2.0e-4\text{ m}.$$

Usando a eq. (3). são calculadas as freqüências naturais da placa, conforme apresentadas na Tabela1:

Tabela 1. Freqüências naturais  $\omega_{mn}$  da placa [rad/seg]

| $m \setminus n$ | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1               | 206.9  | 636.6  | 1352.7 | 2355.3 | 3644.4 |
| 2               | 397.9  | 827.5  | 1543.7 | 2546.3 | 3835.3 |
| 3               | 716.1  | 1145.8 | 1826.0 | 2864.6 | 4153.6 |
| 4               | 1161.7 | 1591.4 | 2307.6 | 3310.2 | 4599.2 |
| 5               | 1734.7 | 2164.3 | 2880.5 | 3883.1 | 5172.2 |

### 4.1. Dimensões do atuador

Neste caso, considera-se um atuador quadrado de lado  $72,4\text{mm}$ , sendo estas dimensões consideradas usuais para problemas semelhantes ao aqui abordado. Para garantir a manutenção da geometria do atuador, foram escritas restrições de igualdade dadas por:

$$x_2 - x_1 = 0,0724; \quad y_2 - y_1 = 0,0724 \quad (16)$$

A seguir tem-se na eq. (17) as restrições laterais escritas para definir o espaço de projeto.

$$0,0 \leq x_1 \leq 0,5276; \quad 0,0724 \leq x_2 \leq 0,60; \quad 0,0 \leq y_1 \leq 0,3276 \quad 0,0724 \leq y_2 \leq 0,40 \quad (17)$$

#### 4.1.1 Atuador com $\omega=400$ rad/s

Como posição inicial, considera-se o atuador colocado no centro da placa. De acordo com a Tab.(1), pode ser visto que neste caso  $\omega \cong \omega(2,1)$ , ou seja, a freqüência de excitação é próxima de uma das freqüências naturais da placa sem o atuador. A Fig. (1) mostra a distribuição de deslocamentos para este modo, sendo possível observar que este não é um modo característico. Nesta mesma figura são mostradas as amplitudes da resposta  $W_{mn}$  para vários modos de vibração da placa. Pode ser observado que  $W_{21}$  é muito pequeno quando comparado aos outros modos mostrados. Isto significa que o atuador não está colocado em uma posição ideal, não favorecendo, portanto, a excitação do modo (2,1) da placa. Assim, para esta configuração, outros modos estão contribuindo muito mais para a resposta do sistema que o modo (2,1).

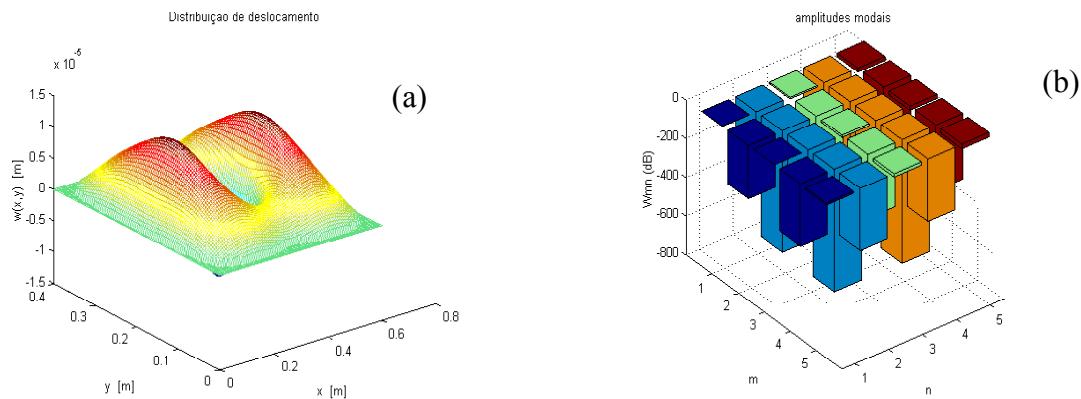


Figura 1. Deslocamentos na placa (a) e Amplitudes modais da placa (b) para freq = 400 rad/s (config. inicial)

Deseja-se encontrar uma melhor configuração para o atuador na placa, para que o modo (2,1) seja excitado de maneira preponderante. No processo de otimização utilizou-se otimização multi-critério. Utilizando técnicas clássicas de otimização obteve-se duas configurações ótimas, dependendo da posição inicial adotada, sendo que na tab. (2) mostra-se os resultados obtidos com a utilização de técnicas clássicas, Algoritmos Genéticos e Recozimento Simulado. Neste caso também foram obtidas duas posições ótimas para o atuador. Isto se deve à simetria da placa.

Tabela 2. Valores ótimos para freq = 400 rad/s (atuador com geometria fixa)

|                        | $x_1[m]$ | $x_2[m]$ | $y_1[m]$ | $y_2[m]$ |
|------------------------|----------|----------|----------|----------|
| Otimização clássica 1  | 0,1134   | 0,1858   | 0,1638   | 0,2362   |
| Otimização clássica 2  | 0,4141   | 0,4865   | 0,1637   | 0,2361   |
| Algoritmos Genéticos 1 | 0,1229   | 0,1953   | 0,1539   | 0,2264   |
| Algoritmos Genéticos 2 | 0,3555   | 0,4279   | 0,1539   | 0,2344   |
| Recozimento Simulado 1 | 0,1239   | 0,1963   | 0,1534   | 0,2258   |
| Recozimento Simulado 2 | 0,3768   | 0,4492   | 0,1544   | 0,2268   |

A Fig.(2) mostra os modos de vibração da placa para as configurações ótimas encontradas, onde se percebe que o modo  $W_{21}$  foi maximizado em relação aos demais modos de vibração. Ainda nesta figura é mostrada a distribuição de deslocamentos para a primeira e também para a segunda configuração ótima devido a simetria da placa de onde se percebe que, agora, se aproxima do resultado esperado para este modo.

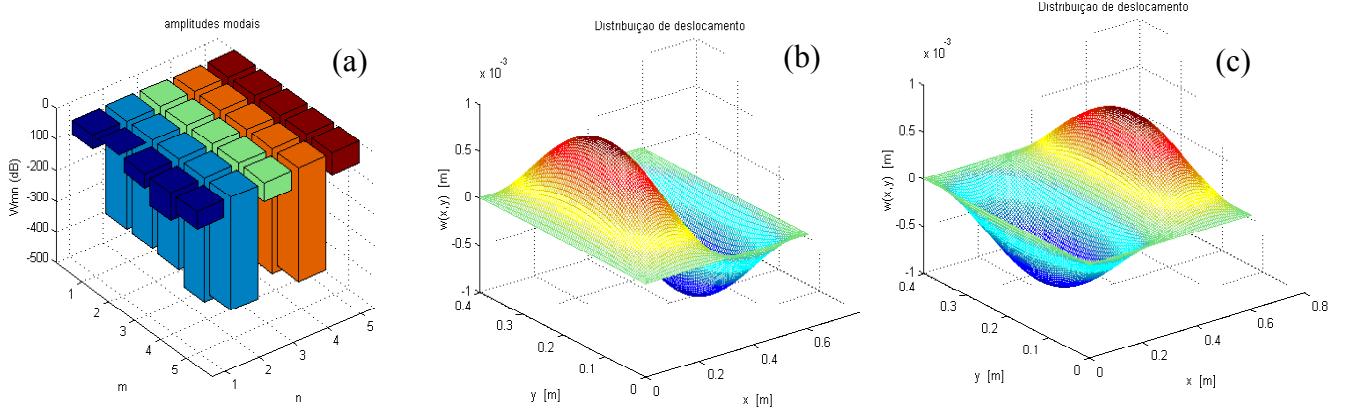


Figura 2. Amplitudes modais da placa (a), distribuição de deslocamentos para freq = 400 rad/s na primeira (b) e segunda (c) configuração ótimas

#### 4.1.2. Atuador com $\omega=300$ rad/s

De acordo com a Tab. (1), observa-se que a freqüência de 300 rad/s está entre as freqüências dos modos (1,1) e (2,1). A fig.(3) mostra as amplitudes da resposta  $W_{mn}$  para vários modos de vibração da placa, para uma configuração inicial aleatória, onde se percebe que  $W_{11}$  está sendo excitado mas o mesmo não ocorre com  $W_{21}$ . Conclui-se que o atuador não se acha colocado na posição ideal para esta freqüência de excitação. Nesta mesma figura são mostradas as amplitudes modais ótimas dadas pela tab.(3) a seguir, dando a perceber que o atuador, nesta posição, maximiza os modos pretendidos.

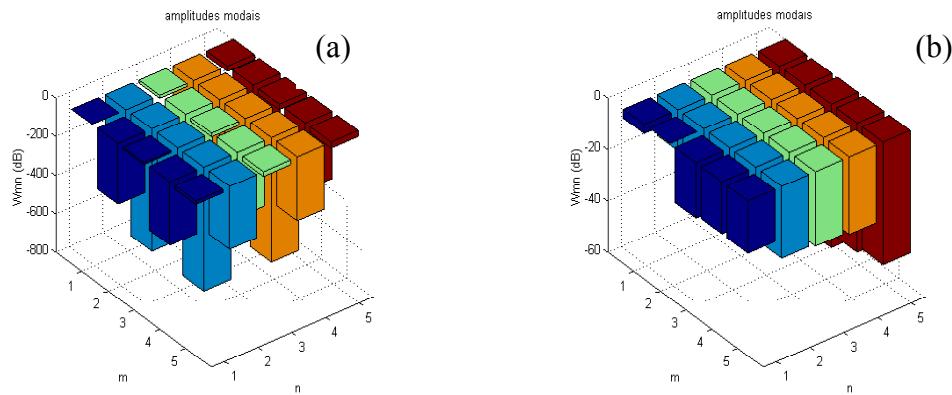


Figura 3. Amplitudes modais para a configuração inicial (a) e a configuração ótima (b) para freq = 300 rad/s (configuração inicial)

O procedimento de otimização foi administrado a partir da configuração inicial que considera o atuador no canto superior esquerdo da placa. A otimização multi-critério é feita, buscando a posição ótima do atuador, tal que as amplitudes dos modos (1,1) e (2,1) sejam maximizadas. Os resultados obtidos a partir de todas as técnicas mencionadas são mostrados na Tab. (3).

Tabela 3. Valores ótimos para freq = 300 rad/s (atuador com geometria fixa)

|                        | $x_1[m]$ | $x_2[m]$ | $y_1[m]$ | $y_2[m]$ |
|------------------------|----------|----------|----------|----------|
| Otimização clássica    | 0,1457   | 0,2181   | 0,1991   | 0,2715   |
| Algoritmos Genéticos 1 | 0,1487   | 0,2211   | 0,1998   | 0,2722   |
| Algoritmos Genéticos 2 | 0,1505   | 0,2229   | 0,0826   | 0,1550   |
| Recozimento Simulado 1 | 0,1475   | 0,2199   | 0,1926   | 0,2650   |
| Recozimento Simulado 2 | 0,1498   | 0,2222   | 0,0732   | 0,1456   |

## 5. CONCLUSÕES

De uma maneira geral, pode-se considerar que as técnicas apresentadas são bastante eficientes e encontram, potencialmente, largas possibilidades de aplicação nos diferentes ramos das ciências e da engenharia.

Quanto à técnica dos Algoritmos Genéticos, observou-se que esta teve um ótimo desempenho para todos os tipos de problemas resolvidos neste trabalho. Quando se trata de problemas mais complexos, verifica-se que este método conduz a um alto custo computacional. Já para o Recozimento Simulado, evidenciou-se sua robustez em encontrar o mínimo (ou máximo), desde problemas mais simples, até problemas com alto grau de complexidade, como estudado neste trabalho. Notou-se, ainda, que o custo computacional decorrente da aplicação desta técnica é menor que no caso dos Algoritmos Genéticos na maioria das aplicações visitadas.

Quanto à necessidade de se considerar restrições, estas foram introduzidas tanto nos Algoritmos Genéticos como no Recozimento Simulado, através de funções de penalidade. A comparação com resultados obtidos usando técnicas clássicas de otimização demonstrou que o procedimento adotado para as restrições é plenamente satisfatório.

## 6. PERSPECTIVAS FUTURAS

Como perspectiva para trabalhos futuros, pretende-se explorar a possibilidade do uso simultâneo de mais de uma das técnicas apresentadas, resultando em um procedimento híbrido. Assim, a intenção seria a de maximizar os pontos positivos das técnicas, eventualmente permitindo a abordagem de problemas mais complexos, como, por exemplo, os problemas inversos da dinâmica.

## 7. AGRADECIMENTOS

A CAPES pelo apoio financeiro recebido para conclusão do curso de Mestrado do primeiro autor. O segundo autor agradece à FAPEMIG (projeto TEC 205/02) pelo apoio financeiro.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Borges, R.A, 2003, "Técnicas Inteligentes de Otimização", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica.
- Devasia, S et al.1993."Piezoelectric Actuator Design for Vibration Suppression: Placement and Sizing", Journal of Guidance, Control and Dynamics, 16(5):859-864.
- Dimitriadis, E.K. et al. 1991."Piezoelectric Actuators for Distributed Vibration Excitation of Thin Plates", Journal of Vibration and Acoustics, 113(1):100-107.
- Gérardin, M.; Rixen, D., 1997, "Mechanical Vibrations. Theory and Application to Structural Dynamics", 2<sup>nd</sup> Edition, Wiley.

- Glover, F., 1995, " Tabu search Fundamentals and uses", Graduate School of Business, University of Colorado.
- Haupt, R.L., and Haupt, S.E, 1998, "Practical Genetic Algorithms", John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Holland, J.H., 1975 "Adaptation in natural and artificial systems". MIT Press, Illinois Genetic Algorithm Laboratory. IlliGAL, University of Illinois at Urbana-Champaign, pp. 11-147.
- Kirkpatrick, S.; Gelat, C.D.; Vecchi, M. P., 1983 "Optimization by simulated annealing", Science, vol.220, N°4598, pp. 671-680.
- Meirovitch, L. 1997. Principles and Techniques of Vibrations. Prentice-Hall, Inc.
- Metropolis, N; Rosenbluth, M.; Rosenbluth, A.; Teller, E., 1953, "Equation of state calculations by fast computing machines" J. Chem. Phys. V. 21, pp.1087-1092.
- Osyczka, A. 1990. Multi-criterion Optimization in Engineering. Ellis Horwood Ltd.
- Reddy, J.N. 1999. Theory and Analysis of Elastic Plates. Taylor & Francis.
- Steffen Jr., V ; Imman, D. J., 2002, " On the Optimization of Piezoelectric Actuators for Thin Plates Excitation", Nonlinear Dynamics, Chaos, Control and Their Applications to Engineering Sciences, Recent Developments in Nonlinear Phenomena, V.4, pp. 194-207
- Vanderplaats, G.N., 1998, Numerical Optimization Techniques for Engineering Design, VR&D Inc., Colorado Springs, CO, USA, pp.417.

## **STUDY AND COMPARISON INVOLVING INTELLIGENT OTIMIZATION TECHNIQUES OF FOR THE DESIGN OF PLATES WITH PIEZOELECTRIC ACTUATORS**

**Romes Antonio Borges**

Federal University of Uberlândia, School of Mechanical Engineering  
 P.O. Box 593 – ZIP 38400-902 - Uberlândia – MG – Brazil  
[rborges@mecanica.ufu.br](mailto:rborges@mecanica.ufu.br)

**Valder Steffen Jr**

Federal University of Uberlândia, School of Mechanical Engineering  
 P.O. Box 593 – ZIP 38400-902 - Uberlândia – MG – Brazil  
[vsteffen@mecanica.ufu.br](mailto:vsteffen@mecanica.ufu.br)

**Abstract.** In the present paper, it is intended to study the behavior of two optimization techniques, namely Genetic algorithms and Simulated Annealing, in the optimal design of piezo actuated thin plate. Consequently, by using optimization techniques, the best position for the Piezoelectric patch is to be found, aiming at exciting previously chosen vibration modes. Simulation results demonstrate that the techniques used in this paper are efficient in obtaining the optimal configuration of the plate-piezo actuator system.

**Keywords.** Optimization, Genetic Algorithms, Simulated Annealing, thin plate, piezoelectric actuators.