



TÉCNICAS DE CONTROLE ÓTIMO PARA SUPRESSÃO DE VIBRAÇÃO EM ESTRUTURAS COM SENSORES E ATUADORES PIEZELÉTRICOS

Samuel da Silva

www.dem.feis.unesp.br samuel@dem.feis.unesp.br

Vicente Lopes Júnior

Universidade Estadual Paulista, UNESP – Ilha Solteira.

Departamento de Engenharia Mecânica

Av. Brasil n.º 56, Centro, Ilha Solteira – SP, CEP.: 15385-000.

***Resumo.** O estudo de sistemas adaptativos tornou-se uma área de enorme interesse, principalmente no projeto de estruturas leves e resistentes. Estas estruturas, unidas com sensores e atuadores piezoeletricos (PSA), são capazes de realizar controle ativo de supressão de vibrações. Um problema extremamente importante que deve ser solucionado na realização deste tipo de projeto é a localização ótima de PSA em tais sistemas. Neste sentido, este trabalho tem como proposta o controle de vibração em uma viga engastada e livre através do posicionamento ótimo de PSA na estrutura. O efeito do acoplamento eletromecânico é considerado no modelo matemático adotado. Para resolver o problema da melhor localização são utilizados algoritmos genéticos (AG's), já para o problema de otimização das matrizes de ganho do controle é usada a programação seqüencial quadrática (SQP). Maiores considerações são feitas ao problema com AG. Como exemplo foram considerados dois casos: um com ganho fixo/posição otimizada e outro com posição fixa/ganho otimizado. Os resultados mostram de maneira clara a melhora do desempenho quando os PSA são colocados em posições adequadas.*

***Palavras Chaves:** Controle, Algoritmos Genéticos, PSA, Amortecimento.*

1. INTRODUÇÃO

A crescente exigência de melhoria nos sistemas pode ser obtida através de estruturas de engenharia que tenham capacidades adaptativas; isto é possível pelo acoplamento de estruturas convencionais com materiais inteligentes, como ligas de memória de forma, materiais piezoeletricos e uma infinidade de outros materiais, como mostra Clark et al. (1998). Porém para melhorar o desempenho estrutural, ou seja, maximizar a redução de vibrações, aliviando efeitos danosos aos sistemas, os materiais piezoeletricos se mostram muito úteis e têm sido amplamente utilizados, Gabbert et al.(1998) e Lee (2000).

Sensores e atuadores piezoeletricos (PSA) podem ser criados através da polarização destes materiais, dentre estes temos os piezocerâmicos e os piezopolímeros, dos quais o lead zirconate titanate (PZT) e o polyvinylidene fluoride (PVDF) são respectivos exemplos. Os PVDF são muito utilizados como sensores, já os PZT encontram grande utilidade como atuadores.

A determinação da localização e do número destes PSA para se realizar redução de vibrações é um passo extremamente importante no projeto, que se não for bem feito pode afetar o recebimento de sinais e o próprio controle. Wang et al. (1994), mostraram que atuadores localizados em posições ótimas apresentaram uma melhor redução de emissão acústica do que atuadores que foram posicionados arbitrariamente em uma placa retangular. Diversos autores estudaram o problema de localização ótima de PSA no controle ativo de estruturas usando diferentes métodos de otimização.

Rao and Pan (1991) estudaram otimização discreta utilizando como ferramenta algoritmos genéticos (AG's). Kirby III et al. (1994) usaram AG's para solucionar o problema do tamanho e da localização ótima de atuadores para controle de multivariáveis. Gabbert et al. (1997) apresentaram uma técnica baseada nos métodos clássicos para determinar a localização de atuadores em estruturas inteligentes por otimização discreta-contínua.

Este trabalho se baseia na solução proposta por Lopes Jr. et al. (2000), onde os autores utilizaram AG's. Os autores utilizaram como ferramenta de AG's um programa desenvolvido por Houck et al. (1995). Neste trabalho a proposta foi implementar rotinas computacionais próprias em ambiente Matlab[®] para a realização dos respectivos operadores genéticos. A justificativa para esta implementação foi o fato do programa anterior não conseguir trabalhar diretamente com a codificação binária, que é a codificação que mais se ajusta ao problema em questão, o que demandava um alto custo computacional. Outra vantagem da nova implementação é a maior iteração e controle dos operadores e taxas a serem seguidas pelo algoritmo em busca da solução ótima.

Na seqüência deste trabalho é apresentado inicialmente o modelo matemático adotado, seguido de um resumo contendo os principais conceitos de AG's. Nas seções finais são mostradas a estratégia de solução e as simulações numéricas realizadas dos casos considerados. Por fim são feitas as considerações finais, discutindo-se os resultados e apresentando sugestões para futuros trabalhos.

2. MODELO MATEMÁTICO

A equação dinâmica é apresentada considerando o efeito do acoplamento eletromecânico, que pode afetar consideravelmente o controle quando se trabalha com estruturas leves. A equação final do movimento para um sistema com acoplamento eletromecânico pode ser obtida através da formulação modificada de Hamilton, segundo Lopes Jr. et al. (2000), conforme a Eq. (1).

$$\begin{bmatrix} [M_{uu}] & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{u}\} \\ \{F\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_{uu}] & [K_{uj}] \\ [K_{fi}] & [K_{ff}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{F\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F\} \\ \{Q\} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Sendo $[M_{uu}]$ a matriz de massa da parte estrutural do sistema, $[K_{uu}]$ a matriz de rigidez estrutural do sistema, $[K_{u\phi}]$ a matriz de rigidez do acoplamento eletromecânico, $[K_{\phi u}] = [K_{u\phi}]^T$, $[K_{\phi\phi}]$ a matriz de capacitância piezolétrica, $\{u\}$ o vetor de deslocamento, $\{\phi\}$ o potencial elétrico no PSA, $\{F\}$ o vetor de força e $\{Q\}$ a carga elétrica na face do PSA.

Já na parte de controle, dentre os mais populares sistemas podem-se mencionar os seguintes: controladores de saída com realimentação, reguladores lineares quadráticos e os controladores proporcionais derivativos (PD). Este trabalho utiliza um sistema PD, no qual a lei de controle é dada pela Eq. (2).

$$\{F\} = [G_p] \{u_s\} + [G_D] \{\dot{u}_s\} \quad (2)$$

Com $\{u_s\}$ sendo o vetor posição nos elementos onde há PSA e $[G_p]$ e $[G_D]$ as matrizes de ganho do controlador proporcional e derivativo, respectivamente. Substituindo a Eq. (2) na primeira parte da Eq. (1) pode-se obter, considerando amortecimento proporcional, a equação geral do movimento, conforme a Eq. (3).

$$[M_{uu}] \{\ddot{u}\} + [D^*] \{\dot{u}\} + [K^*] \{u\} = \{F\} \quad (3)$$

Sendo:

$$\begin{aligned} [D^*] &= ([D] + [K_{uf}][G_D][T_S]) \\ [K^*] &= ([K_{uu}] + [K_{uf}][G_P][T_S]) \end{aligned} \quad (4)$$

[D] é a matriz proporcional de amortecimento e [T_S], a matriz de distribuição de PSA. Portanto as variáveis a serem otimizadas no problema proposto são as matrizes [G_P] e [G_D] e a matriz [T_S], usando programação seqüencial quadrática (SQP) e AG's respectivamente. Este trabalho dá um maior enfoque na otimização de [T_S], a qual é diferente para cada interação, pois contém as posições onde são alocados os atuadores.

A equação (3) é resolvida neste trabalho usando o método numérico de Newmark, (Bathe, 1976). Com isto consegue-se obter os gráficos de deslocamento, velocidade, aceleração e inúmeras outras informações do sistema.

3. CONCEITOS BÁSICOS DE ALGORITMOS GENÉTICOS

Muitos problemas de engenharia não conseguem ser otimizados utilizando técnicas convencionais por apresentarem descontinuidade, não-linearidade, multiváriaveis ou espaços de busca muito grandes. Isto é o que ocorre nos problemas de localização ótima de PSA, nestas ocasiões os AG's demonstram toda a sua força aliada com robustez.

Um AG se baseia no mecanismo de evolução descrito por Darwin. Em sua teoria, Darwin mostra que, inicialmente, na natureza existe uma enorme variabilidade genética entre os indivíduos de uma população e estas variabilidades são transmitidas as gerações futuras, no entanto somente os indivíduos mais aptos conseguem sobreviver um maior tempo, gerando um número maior de filhos, perpetuando assim os genes ótimos destes indivíduos, como consta em Holland (1975).

Esta idéia de evolução pode ser implementada em uma poderosa técnica de busca, onde as variáveis são representadas como genes em um cromossomo, e. g., [11001], cromossomo com 5 genes (0,1). A técnica combina a sobrevivência dos cromossomos mais adaptados com a troca de informação entre estes de uma forma aleatória, esta troca é feita pelos operadores de transformação. A medida da qualidade de um cromossomo é feita por um valor conhecido como aptidão; este valor de aptidão muitas vezes pode ser o próprio valor da função objetivo, como mostra Goldberg (1989). A Figura (1) representa a configuração básica de um AG.

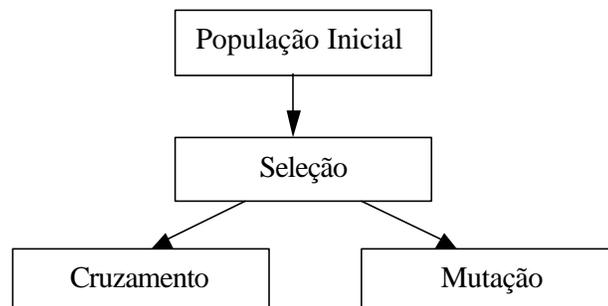


Figura 1. Configuração básica de um AG.

Em um AG sempre é apresentado um grupo de soluções candidatas, que são cromossomos pertencentes a uma população. O tamanho desta população, em geral, deve ser entre 30 e 200 cromossomos, segundo a maioria dos autores. Utilizando o conceito de seleção natural, que garante que os mais aptos tenham maiores chances de se reproduzir, e com o auxílio dos dois principais operadores genéticos, cruzamento e mutação, é possível definir nesta população os cromossomos com melhor aptidão. Com o cruzamento é possível formar um novo cromossomo, que tem uma enorme probabilidade de ser geneticamente superior aos seus pais. Este cruzamento é feito por meio de um casal de cromossomos que é selecionado no universo da população. Já com a mutação é

garantido que o algoritmo alcance praticamente todo o espaço de busca. Após um determinado número de gerações a probabilidade de se encontrar uma solução ótima ou estar próxima desta é muito grande. A seguir são apresentadas algumas considerações sobre estes operadores padrões.

3.1. Seleção

Este operador garante que os indivíduos mais aptos tenham maiores chances de sobreviver e participar dos processos de transformações. A seleção pode ser feita de diversas maneiras, Goldberg (1989) sugere: seleção dos n piores ou n melhores indivíduos; seleção por sorteio, onde cada cromossomo tem a mesma chance de ser escolhido; seleção por roleta, onde há uma probabilidade de seleção de acordo com a aptidão do cromossomo ou ainda seleção por torneio.

Neste trabalho é utilizada a seleção por torneio, por ser de fácil implementação computacional e por gerar bons resultados. Nesta seleção os cromossomos são escolhidos através de torneios ou jogos. Escolhe-se aleatoriamente na população corrente um número k de cromossomos (em geral $k \in \{1,2,3,4,5\}$). Dentre os escolhidos o que tiver o maior valor de aptidão é selecionado para participar das transformações. Em geral se faz um número de torneios igual ao número de cromossomos presentes na população.

3.2. Cruzamento

É considerado o operador genético predominante, daí sua taxa de cruzamento (t_c) ser alta, em geral entre 0,5 e 1,0. Inicialmente é escolhido aleatoriamente um casal de cromossomos na população. O AG então gera um número aleatório entre 0 e 1, se este número for menor que t_c então será realizado o cruzamento, caso contrário o casal irá para a mutação. Existem diversas formas de se realizar o cruzamento, e.g.: cruzamento simples, com multipontos de corte, cruzamento uniforme, etc. Neste trabalho é considerado o cruzamento simples.

No cruzamento simples é escolhido um ponto de corte aleatório, então se processa o cruzamento de informações, conforme Fig. (2). Observa-se que a partir de um casal de pais é gerado um casal de filhos.

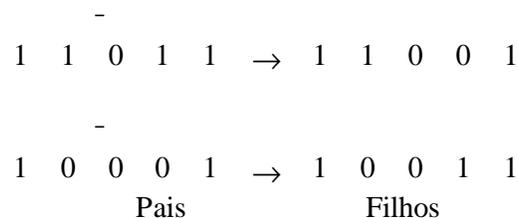


Figura 2. Representação do cruzamento simples.

3.3. Mutação

A mutação é um operador genético secundário, com taxa de mutação (t_m) baixa; isto porque se t_m for alta, existe uma grande chance de cromossomos bons serem modificados. Em geral se utiliza t_m entre 0,01 e 0,09. A mutação simples utilizada neste trabalho pode ser exemplificada pela Fig. (3).

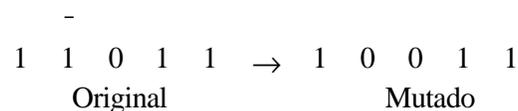


Figura 3. Representação da mutação.

4. ESTRATÉGIA DE SOLUÇÃO

Nos exemplos simulados foi considerado uma viga engastada e livre de alumínio com 500x30x5mm de comprimento, largura e espessura, respectivamente, conforme a Fig. (4). Esta viga é excitada no nó 21 (extremidade livre) com uma força impulsiva de 100 N. O total de graus de liberdade utilizado foi de 42 (20 elementos, com 2 graus de liberdade por nó: um de deslocamento e um de rotação).

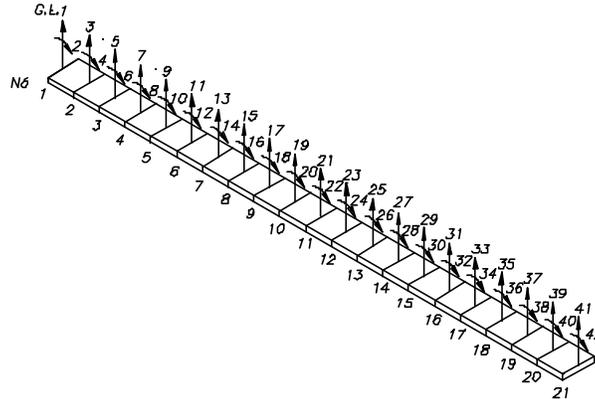


Figura 4. Representação esquemática da viga simulada.

Cada PSA foi considerado como sendo do mesmo tamanho do elemento finito discretizado, então existe uma possibilidade de 2^{20} combinações de PSA para serem alocados. Um cromossomo corresponde então a uma destas possibilidades, contendo 20 genes cada um. Os genes podem assumir valor 1, caso exista PSA no elemento, ou valor 0 se não existir. Um cromossomo significa neste caso a mesma combinação que a matriz de distribuição $[T_S]$, discutida anteriormente, apresentará.

Considera-se também um número máximo de PSA por cromossomo, por questões de custo, ou seja, um número máximo de genes com valor 1 presentes por cromossomo. O tamanho destes cromossomos pode ser reduzido em função do conhecimento, a priori, de algumas propriedades dinâmicas do sistema que se deseja analisar. Nos exemplos, mostrados a seguir, foram considerados, em função da dinâmica da estrutura, apenas as 10 primeiras posições, isto agiliza muito a busca pela melhor resposta e não há perda de generalidade.

O valor da aptidão utilizado foi o inverso da energia cinética presente na viga, pois o AG maximiza o valor da função objetivo. Os cromossomos que sofrem transformações e estão fora dos parâmetros desejados, ou seja, que se tornam ineficazes, sofrem uma penalização no valor de suas aptidões; com isto estes cromossomos têm tendência de se extinguir com o passar das gerações. O critério de parada adotado foi um número máximo de gerações pré-determinado.

5. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

São considerados dois casos neste trabalho: um com ganho fixo e posição otimizada de PSA e o outro com posição fixa e ganho otimizado.

5.1. Caso (A): Ganho Fixo/Posição Otimizada

Nesta simulação se busca encontrar a melhor distribuição de PSA na viga; os valores das matrizes de ganho foram mantidos com valores fixos e não foi feita nenhuma restrição quanto a limitação de voltagem nos PSA, por questão de diminuição de tempo computacional. Foram utilizados os seguintes parâmetros genéticos:

População Inicial: Gerada aleatoriamente, contendo 80 cromossomos;
 Genes: (0)-não há PSA, (1)-há PSA;
 Tamanho dos Cromossomos: 10 genes, contendo no máximo 5 genes com valor (1);
 Tipo de Seleção: Torneio, com 3 participantes por rodada;
 Tipo de Cruzamento: Simples, com um ponto de corte gerado aleatoriamente;
 Taxa de Cruzamento: 0,8;
 Tipo de Mutação: Simples;
 Taxa de Mutação: 0,085;
 Número de Gerações: 20.

A Figura (5) apresenta a evolução da aptidão média das populações para o número de gerações considerado.

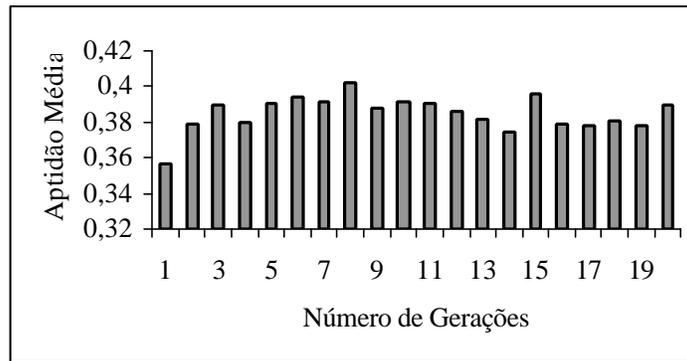


Figura 5. Evolução da aptidão média das populações.

A Figura (6) mostra o gráfico da máxima aptidão encontrada em cada geração. A melhor solução encontrado ao fim do processo foi alocar PSA nas posições 1, 2, 3, 4 e 5.

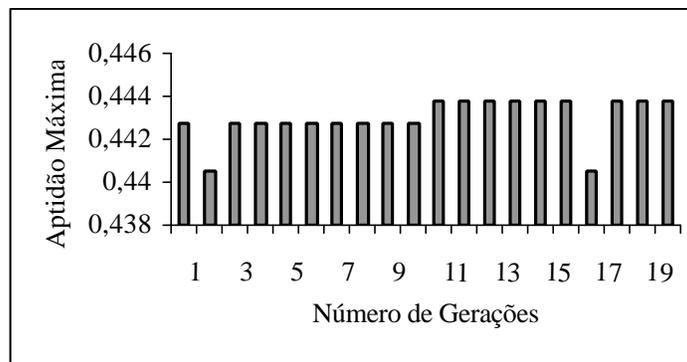


Figura 6. Máxima aptidão por geração.

5.2. Caso (B): Posição Fixa/Ganho Otimizado

Neste caso se considera um número fixo de PSA e se busca obter um valor ótimo das matrizes de ganho proporcional e derivativo, respectivamente $[G_P]$ e $[G_D]$. Esta otimização foi feita utilizando SQP. PSA foram colocados nos elementos 1, 2, 3, 4 e 5, que foi a solução ótima encontrada no caso (A) simulado. A Figura (7) apresenta o gráfico de deslocamento do nó 21 para os dois casos. Já a Figura (8) mostra a função de resposta em frequência (FRF) para o nó 21 para as

configurações sem controle e com controle (apresentando nesta configuração dois casos: ganho fixo e ganho otimizado).

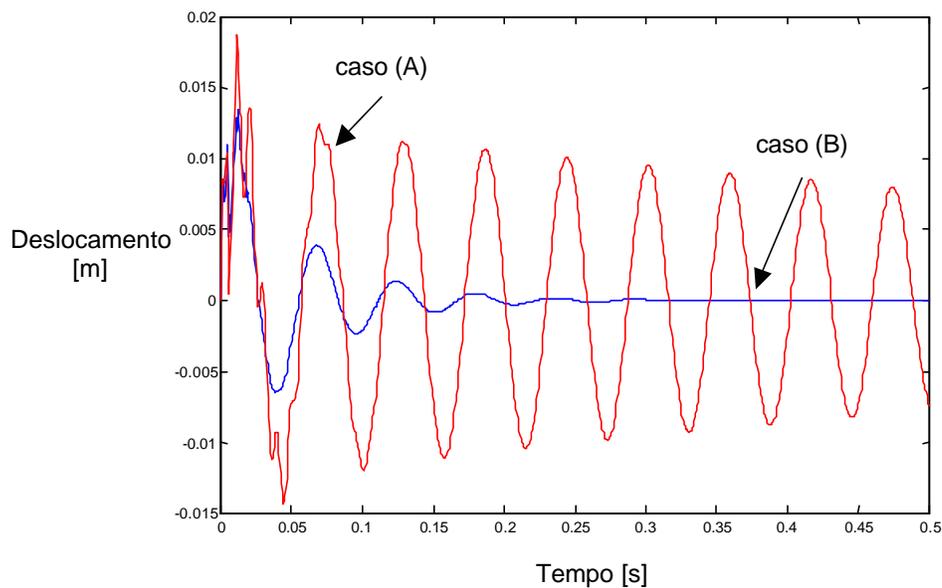


Figura 7. Deslocamento no tempo do nó 21.

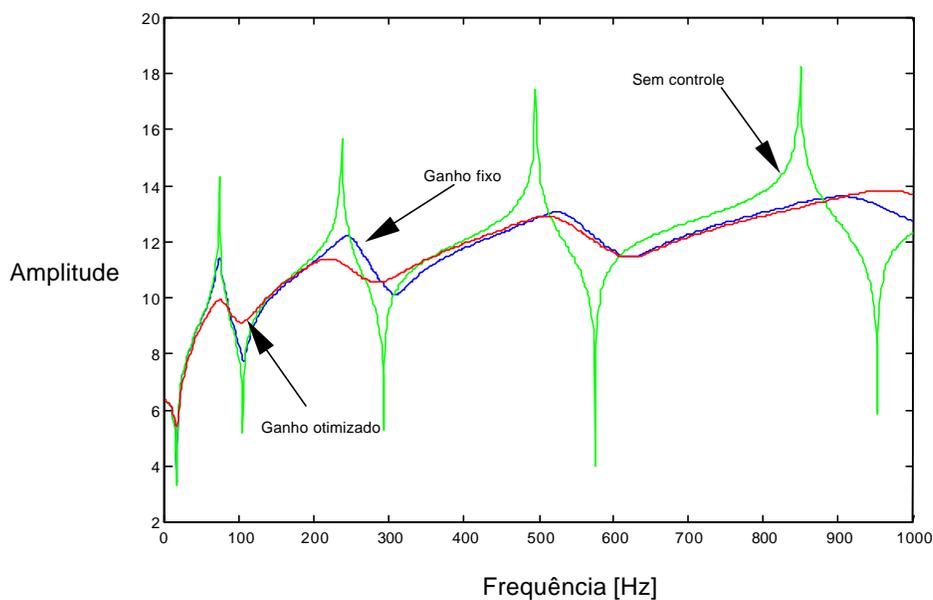


Figura 8. FRF do nó 21, mostrando as configurações sem controle, com controle com ganho fixo e com controle com ganho otimizado.

No caso (B) analisado a capacitância para cada PSA é igual 200nF e é considerado 100 Volts o máximo valor de voltagem na face do PSA.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou uma metodologia para solução do problema de localização ótima de PSA em estruturas adaptativas para controle de vibrações. Foram simulados dois casos interdependentes considerando uma viga engastada e livre. Observa-se que a melhora no desempenho quando se trabalha com ganho otimizado é bem maior do que com ganho fixo, portanto o ideal é se trabalhar com os dois laços juntos (caso (A), para encontrar a melhor distribuição de PSA e caso (B), para encontrar o melhor ganho). A proposta de solução do caso (A) utilizando as rotinas computacionais de AG implementadas se mostra válida e eficiente, por trabalhar diretamente com a codificação binária e mostrar uma clara tendência de evolução e aleatoriedade, típicas de um AG padrão. Porém o caso (B) ainda necessita de ajustes, pois existem posições de PSA que não conseguem obter um ganho ótimo, além do tempo computacional ser extremamente longo quando se trabalha com os dois laços em paralelo. Sugere-se a implementação de outra lei de controle, ou reformulação da estratégia de cálculo dos ganhos. A partir destas mudanças e do maior desenvolvimento da estratégia seguida é possível estender esta metodologia para outras estruturas, como placas, treliças ou cascas, criando soluções para sistemas mecatrônicos práticos e soluções para outros problemas de otimização como definição da melhor forma e tamanho de PSA a serem alocados em estruturas.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão da bolsa de iniciação científica referente ao processo n. ° 00/12389-0.

8. REFERÊNCIAS

- Bathe, K.J. and Wilson, E.L., 1976, "Numerical Methods in Finite Elements Analysis", Prentice-Hall, Inc.
- Clark, R.L., Saunders, W.R., and Gibbs, G.P., 1998, "Adaptive Structures: Dynamics and Control", John Wiley & Sons, Inc.
- Gabbert, U. Berger, H., Koppe, H. and Cao, X., 1998, "On Modelling and Analysis of Piezoelectric Adaptive Structures by the Finite Element Method", 4th ESSM, pp. 621-628, Harrogate.
- Gabbert, U., Schultz, I. and Weber, C.T., 1997, "Actuator Placement in Smart Structures by Discrete-Continuous Optimization", ASME Design Eng. Tech. Conferences, Sacramento, Ca, USA.
- Goldberg, D. E., 1989, "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning", Massachusetts: Addison-Wesley Co.
- Holland, J. H., 1975, "Adaptation in Natural and Artificial Systems", Ann Arbor:University of Michigan Press.
- Houck, C. R., Joines, J. A. and Kay, M. G., 1995, "A Genetic Algorithm for Function Optimization: A Matlab Implementation", NSCU-IE Technical Report 95-09.
- Kirb III, G.C., Matic, P. and Lindner, D.K., 1994, "Optimal Actuator Size and Location Using Genetic Algorithms for Multivariable Control", AD-Vol. 45/MD-Vol. 54, Adaptive Structures and Composite Materials: Analysis and Application, ASME, pp. 325-335.
- Lee, Y.S., 2000, "Active Control of Smart Structures using Distributed Piezoelectric Transducers", Ph. D. Thesis, University of Southampton, Faculty of Engineering and Applied Science, Institute of Sound and Vibration Research.
- Lopes Jr., V., Steffen Jr. V., and Inman, D.J., 2000, "Optimal Design of Smart Structures Using Bonded Piezoelectric for Vibration Control", in ISMA 25 – International Conference on Noise and Vibration Engineering, Leuven, Belgium.
- Rao, S.S., Pan, T.S., Venkayya, V.B., 1991, "Optimal Placement of Actuators in Actively Controlled Structures Using Genetic Algorithms", AIAA Journal, 29(6):942-943.

Wang, B. T., Burdisso, R. A., Fuller, C. R., 1994, "Optimal Placement of Piezoelectric Actuators for Active Structural Acoustic Control", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, pp. 67-77, Vol. 5, USA.

OPTIMAL CONTROL TECHNIQUES FOR VIBRATION REDUCTION IN STRUCTURES USING BONDED PIEZOELECTRICS SENSORS AND ACTUATORS

Samuel da Silva

www.dem.feis.unesp.br samuel@dem.feis.unesp.br,

Vicente Lopes Júnior

Universidade Estadual Paulista, UNESP – Ilha Solteira

Department of Mechanical Engineering, Av. Brasil n. ° 56, Centro, Ilha Solteira - SP, ZIP CODE: 15385-000.

***Abstract.** The study of adaptatives systems became an area of enormous interest, mainly in the design of lighter and stronger structures these structures, when coupled with piezoelectrics sensors and actuators (PSA) are capable to accomplish an active control for vibration reduction. An extremely important problem that should be solved in the accomplishment of this design it is the optimal placement of PSA in such systems. Seeking this end, this work intends to reduce the vibration in a cantilever beam, accomplishing the optimal location of PSA in this structure. The effect of the electromechanical coupling is considered in the adopted mathematical model. To solve the problem of the optimal location are used genetic algorithms (GA's). While the problem of determination of optimal control gains is solved by sequential quadratic programming (SQP). Larger considerations are made to the problem with GA's. Two cases are considered: one with fixed gain/optimal position and another with fixed position/optimal gain. The results show the improvement of the perfomance when PSA are placed in appropriate positions.*

Keywords: Control, Genetic Algorithms, PSA, Damping..