



LOCALIZAÇÃO ÓTIMA DE CERÂMICAS PIEZELÉTRICAS PARA CAPTURA E ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM ESTRUTURAS INTELIGENTES

Marcel Araujo Clementino, marcelclementino@uol.com.br¹

Sidney Bruce Shiki, sbshiki@gmail.com¹

Samuel da Silva, sam.silva13@gmail.com¹

Vicente Lopes Júnior, vicente@dem.feis.unesp.br²

¹Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), Centro de Engenharias e Ciências Exatas, Av. Tancredo Neves, nº. 6731, Parque Tecnológico Itaipu (PTI), CEP 85856-970, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.

²Universidade Estadual Paulista (UNESP), Departamento de Engenharia Mecânica, Campus de Ilha Solteira, SP, Av. Brasil, nº 56.

Resumo: A geração de energia elétrica a partir da vibração do meio ambiente tem atraído muitas pesquisas nos últimos anos. Dentre os diversos meios mecânicos de conversão, os baseados em cerâmicas piezoeletricas (PZTs) tem recebido grande atenção pela capacidade de captura e armazenamento (power harvesting) usando circuitos retificadores para uso em equipamentos eletrônicos e de baixa potência. Neste sentido, este trabalho apresenta a modelagem via elementos finitos de uma viga inteligente acoplada com PZTs, com um circuito para power harvesting e a otimização do posicionamento dos PZTs visando uma maior capacidade de geração de energia. Para otimizar a localização do sensor/atuador um algoritmo genético foi implementado. Diversas simulações numéricas foram realizadas tanto para modelagem considerando o efeito do acoplamento eletromecânico dos PZTs com a estrutura base. Os resultados mostram que uma escolha adequada do posicionamento dos PZTs na viga pode aumentar consideravelmente a energia capturada e armazenada.

Palavras-chave: modelos de estruturas inteligentes, power harvesting, posicionamento ótimo de PZTs, algoritmos genéticos.

1. INTRODUÇÃO

Produzir energia limpa e de maneira eficiente, é um grande desafio que muitos países vêm enfrentando nos últimos anos. A cada dia torna-se maior a preocupação tanto com o meio ambiente, quanto com a escassez das fontes de energia não-renováveis, evidenciando a necessidade de fontes cujo uso não gera a degradação do ambiente. Por outro lado, o desenvolvimento de novas tecnologias envolvendo dispositivos microeletromecânicos (MEMS), processadores de sinais digitais, equipamentos de sensoriamento e comunicação sem-fio (wireless), também tem sido motivo de preocupação, devido ao fato de possuírem fontes de energia elétrica limitada e esgotável, fornecida geralmente por uma bateria. Logo, a aplicação destes dispositivos sem-fio torna-se, muitas vezes, mais cara e até inviável, já que após um determinado tempo eles deverão ser submetidos a uma troca de baterias.

Assim, a combinação destes e outros problemas tem despertado nas últimas décadas, o interesse para uma área conhecida como Power Harvesting, cujo foco é adquirir energia de um sistema qualquer e convertê-la em energia elétrica disponível para outras aplicações. Existe uma grande variedade de fontes de energia disponíveis para realizar esta captação, tais como: energia mecânica (Erturk and Inman, 2008), energia luminosa (Randall, 2003), energia eletromagnética (Reid and Judd, 2007) e corpo humano (Shenck and Paradiso, 2001).

Apesar desta gama de possibilidades, uma das fontes de energia mais promissoras é oriunda de vibrações, cuja presença é inerente à maioria dos sistemas mecânicos. Vários trabalhos foram e continuam sendo realizados com materiais piezoeletricos (cerâmicas PZTs e filmes PVDF) como transdutores desta energia vibratória. Cook-Chennault et al. (2008) apresentam estudos sobre a utilização de dispositivos para power harvesting aplicados em aparelhos domésticos (máquina de lavar roupas, secador de roupas e microondas) e apontam para a possibilidade de obter 559MWh em um ano, se o dispositivo piezoeletrico em estudo fosse aplicado nestes três aparelhos domésticos em todas as casas da Pensilvânia, EUA (4.86 milhões de eletrodomésticos). Anton and Inman (2008) investigaram a possibilidade de adquirir energia de natureza vibracional e solar em um veículo aéreo não tripulado (UAV – Unmanned aerial vehicle) utilizado pelo exército americano, visando um aumento no tempo de voo da aeronave. A aplicação de materiais

piezelétricos e células fotovoltaicas às asas da aeronave permitiriam elevar a capacidade energética da fonte de alimentação (geralmente baterias recarregáveis) sem aumento significativo na massa, requisito essencial para o bom funcionamento destes veículos. Em Feenstra et al. (2008) é desenvolvido uma mochila capaz de gerar energia elétrica a partir da diferença de forças originada entre o usuário e a mochila. Um atuador mecânico composto por uma pilha piezelétrica é o responsável pela transformação da energia de pressão em elétrica. Os resultados mostraram que é possível obter aproximadamente 0.4mW de potência.

Assim, como se pode perceber pelos parágrafos anteriores, a aplicação destes dispositivos à áreas tão distintas, demonstra o grande potencial que estes materiais poderão adquirir caso continuem sendo estudados e desenvolvidos. Entretanto, realizar somente a modelagem visando prever a quantidade de potência gerada por estes dispositivos não é suficiente para torná-los aptos à comercialização ou aplicações cotidianas, devido à baixa potência gerada. Torna-se necessário então, identificar e otimizar os parâmetros que exibem maior influência sobre o processo (localização e a natureza da força de excitação, posição e quantidade de pastilhas piezelétricas aplicadas, por exemplo), com o objetivo de maximizar a potência gerada. Muitos trabalhos (Sodano et al., 2004; De Marqui et al., 2009; Eggborn, 2003 e Rocha, 2004) apresentam o desenvolvimento destes estudos, incluindo a modelagem de materiais piezelétricos acoplados a estruturas simples, como vigas e placas, e a otimização dos parâmetros citados.

Dessa forma, o presente trabalho apresenta um modelo de elementos finitos de uma viga piezelétrica, visando prever a quantidade de energia gerada pela estrutura eletromecanicamente acoplada. Um procedimento de otimização da posição das cerâmicas piezelétricas utilizando Algoritmos Genéticos é apresentada, de modo a maximizar o potencial elétrico.

2. MODELAGEM DE ESTRUTURAS INTELIGENTES

A modelagem da estrutura simulada neste artigo geralmente é obtida a partir do princípio generalizado de Hamilton (Abreu et al., 2004 e Sodano et al., 2004) ou das equações de Lagrange (Kauffman and Lesieutre, 2009). Neste trabalho, o princípio generalizado de Hamilton foi empregado, juntamente com as relações constitutivas da piezeletricidade linear, para desenvolver as equações do sistema eletromecânico. Outras duas considerações adicionais foram feitas:

- A formulação é restrita aos materiais com comportamento elástico linear (pequenos deslocamentos e deformações);
- A teoria da viga de Euler-Bernoulli é assumida, ou seja, um plano normal ao eixo neutro antes da deformação permanece normal ao eixo neutro após a deformação, não havendo, portanto, variação de espessura durante a deformação. Esta consideração permite dizer que os efeitos de inércia de rotação e cisalhamento são desprezíveis.

2.1. Equações da piezeletricidade

Conforme Clark et al. (1998), elementos piezelétricos apresentam histerese não-linear para elevados níveis de excitação, no entanto, para aplicações estruturais podem-se utilizar aproximações lineares. Logo, as equações constitutivas para a piezeletricidade linear podem ser expressas pela seguinte relação:

$$\{\sigma\} = [c^E]\{\varepsilon\} - [e]^T\{E\} \quad (1)$$

$$\{D\} = [e]\{\varepsilon\} - [k^S]\{E\} \quad (2)$$

sendo $\{\sigma\}$ o tensor de tensões, $\{D\}$ o vetor de deslocamento elétrico, $\{\varepsilon\}$ o tensor de deformação, $\{E\}$ é o campo elétrico, $[c^E]$ o tensor de elasticidade para campo elétrico constante, $[e]$ o tensor de permissividade dielétrica, $[k^S]$ o tensor dielétrico para deformação mecânica constante, $()^E$ indica valores medidos para um campo elétrico constante e $()^S$ indica valores medidos para deformação constante.

O efeito direto, representado pela Eq. (2), corresponde à capacidade de materiais piezelétricos desenvolverem um campo elétrico quando sujeitos a uma deformação, de modo que o material é utilizado em aplicações sensoriais (aplicação deste trabalho). Já o efeito inverso, representado pela Eq. (1), possui o princípio oposto, apresentando deformação como resultado da aplicação de um campo elétrico.

Apesar da especificação das propriedades e relações acima permitirem a inclusão do efeito piezelétrico na modelagem, é comum a utilização de outra propriedade denominada constante piezelétrica d_{ij} , sendo que a permissividade dielétrica pode ser escrita da seguinte forma:

$$e = d_{ij}c^E \quad (3)$$

onde o subscrito i e j indicam, respectivamente, a direção cujo campo elétrico foi aplicado e a direção cujo material é deformado, conforme mostra a Fig. (1).

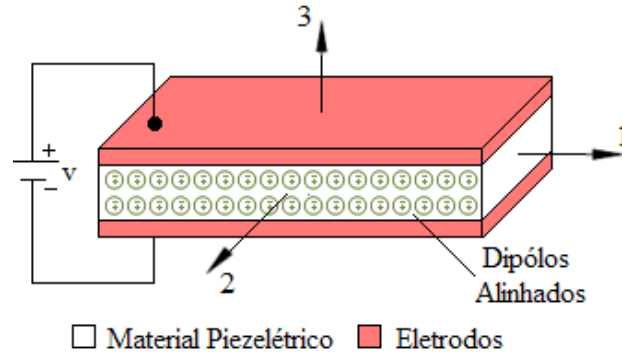


Figura 1. Esquema de materiais piezoeletricos após o processo de polarização.

Em geral assume-se que materiais piezoeletricos são transversalmente isotrópicos, sendo comum considerar a direção de polarização ao longo do eixo 3, que é o eixo isotrópico transversal. Logo, é provável que na maioria dos casos (inclusive este), encontre-se o subscrito i igual a 3. Com relação ao subscrito j , tem-se que para a presente aplicação este será igual a 1 pois o material piezoeletrico é submetido a esforços de flexão.

2.2. Modelo de elementos finitos da viga piezoeletrica

Desconsiderando-se os efeitos magnéticos, o princípio generalizado de Hamilton para um corpo eletroelástico é dado por:

$$\int_{t_1}^{t_2} L(u(t), \dot{u}(t), t) dt = \int_{t_1}^{t_2} [\delta T - \delta U + \delta W_e + \delta W] = 0 \quad (4)$$

onde t_1 e t_2 são dois instantes arbitrários, L é a função lagrangeana, u é o deslocamento transversal e a variação das energias potencial (δU) e cinética (δT) e dos trabalhos virtual (δW) e elétrico (δW_e) podem ser definidos da seguinte forma:

$$\delta U = \int_{V_s} \delta \epsilon^T c_s \epsilon dV_s + \int_{V_p} \delta \epsilon^T c^E \epsilon dV_p \quad (5)$$

$$\delta T = \int_{V_s} \rho_s \delta \dot{u}^T \dot{u} dV_s + \int_{V_p} \rho_p \delta \dot{u}^T \dot{u} dV_p \quad (6)$$

$$\delta W = \int_{V_s} \delta u^T F_e dV + \int_{S_s} \delta u^T F_s dS_s + \delta u^T F_c - \int_{S_p} \delta v^T q dS_p \quad (7)$$

$$\delta W_e = \int_{V_p} E^T D dV_p = \int_{V_p} \delta \epsilon^T e^T E dV_p + \int_{V_p} \delta E^T e S dV_p + \int_{V_p} \delta E^T k^s E dV_p \quad (8)$$

sendo ρ a massa específica, q a carga elétrica, v o potencial elétrico na cerâmica PZT, F_e as forças externas, F_s as forças de superfície, F_c as forças de corpo, S a área, V o volume e os subscritos p e s representam o material piezoeletrico e a viga (base), respectivamente.

Utilizando as relações constitutivas da piezoeletricidade linear dadas pela Eq. (2) e a relação constitutiva para materiais elásticos lineares (Lei de Hooke para o estado plano), o princípio generalizado de Hamilton torna-se:

$$\int_{t_1}^{t_2} \left[\int_{V_s} \rho_s \delta \dot{u}^T \dot{u} dV_s + \int_{V_p} \rho_p \delta \dot{u}^T \dot{u} dV_p - \int_{V_s} \delta \epsilon^T c_s \epsilon dV_s - \int_{V_p} \delta \epsilon^T c^E \epsilon dV_p + \int_{V_p} \delta \epsilon^T e^T E dV_p + \int_{V_p} \delta E^T k^s E dV_p + \int_{V_p} \delta E^T e S dV_p + \int_{V_s} \delta u^T F_e dV + \int_{S_s} \delta u^T F_s dS_s + \delta u^T F_c - \int_{S_p} \delta v^T q dS_p \right] dt = 0 \quad (9)$$

A solução da equação acima permite obter a equação do movimento para qualquer sistema mecânico que contenha elementos piezoeletricos acoplados. O método dos elementos finitos (MEF) será utilizado neste trabalho para a

modelagem e consequentemente, a obtenção da equação do movimento. A Fig. (2) exemplifica o tipo de acoplamento dos PZTs modelado.

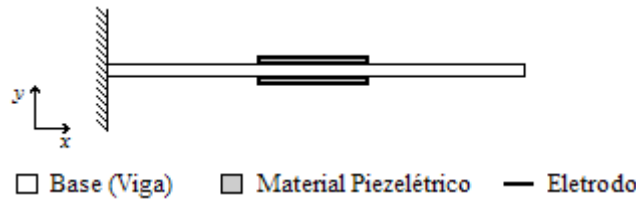


Figura 2. Exemplo de acoplamento do tipo sanduíche.

De acordo com o método dos elementos finitos, uma solução aproximada é proposta através da discretização do domínio em várias regiões menores, conhecidas por elementos finitos. Desta forma, funções de interpolação são utilizadas para escrever as respostas obtidas para estes elementos e assim obter a solução global. Neste trabalho, elementos de viga isoparamétricos com dois graus de liberdade mecânicos e um grau de liberdade elétrico por nó serão utilizados, conforme mostra a Fig. (3).

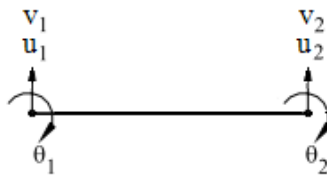


Figura 3. Elemento de viga isoparamétrico utilizado na modelagem.

onde θ representa o deslocamento angular, v o potencial elétrico gerado pelo PZT e u o deslocamento transversal da viga.

Assim, utilizando a teoria de Euler-Bernoulli em conjunto com o MEF, é possível escrever o deslocamento transversal e a deformação mecânica em termos da função de interpolação $[N_u] = [N_u(x,y,z)]$ como mostra a Eq. (10) e (11) respectivamente. O potencial e o campo elétrico, apresentados nas Eq. (12) e (13), são obtidos analogamente.

$$\mathbf{u} = [N_u] \{\mathbf{u}\} \quad (10)$$

$$\{\boldsymbol{\varepsilon}\} = -z \left\{ \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} \quad \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} \quad 2 \frac{\partial^2 u_z}{\partial x \partial y} \right\}^T = L_u \{u\} = L_u [N_u] \{\mathbf{u}\} = [B_u] \{\mathbf{u}\} \quad (11)$$

$$\mathbf{v} = [N_v] \{\mathbf{v}\} \quad (12)$$

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial}{\partial z} \{\mathbf{v}\} = -\frac{\partial}{\partial z} [N_v] \{\mathbf{v}\} = -[B_v] \{\mathbf{v}\} \quad (13)$$

onde $L_u = \left\{ \frac{\partial^2}{\partial x^2} \quad \frac{\partial^2}{\partial y^2} \quad \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \right\}^T$ é um operador linear para o caso elástico e $[B]$ é a matriz de derivadas de segunda ordem da função de interpolação $[N]$.

Por fim, ao introduzir as equações descritas acima na Eq.(9) e reescrever a equação resultante na forma matricial agrupando os termos semelhantes, é possível escrever a equação global para o sistema eletromecânico:

$$\begin{bmatrix} [M_{uu}] & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{u}} \\ \ddot{\mathbf{v}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_{uu}] & [K_{uv}] \\ [K_{vu}] & [K_{vv}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{v} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{q} \end{Bmatrix} \quad (14)$$

Entretanto, a solução para a Eq. (14) não pode ser obtida pela aplicação da técnica padrão de autovalor e autovetor, uma vez que as matrizes globais do sistema não são definidas positivas e, portanto, não admitem matriz inversa. Este problema é solucionado quando alguns graus de liberdade elétricos são retirados do sistema, visto que apenas um valor de potencial elétrico (por elemento) é suficiente para modelar a resposta elétrica de cada elemento piezocerâmico. Assim, uma nova matriz de capacitância piezoeletrica K_{vv}^* é obtida e o problema da singularidade é resolvido:

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_{uu} - [\mathbf{K}_{uv} (\mathbf{K}_{vv}^*)^{-1} \mathbf{K}_{vu}] \quad (15)$$

3. CAPTURA E ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Embora a idéia de aproveitar a energia vibratória da vizinhança de um sistema mecânico e convertê-la em energia elétrica com o propósito de alimentar outros dispositivos seja extremamente atraente, este objetivo muitas vezes não é tão fácil de ser alcançado. A quantidade de energia produzida por dispositivos piezelétricos não é suficiente para alimentar tais equipamentos, mesmo aqueles denominados de baixa potência, gerando um grande obstáculo para a utilização em grande escala. Por esta razão, a utilização de métodos para acumular e armazenar a energia gerada, é de extrema importância para o desenvolvimento de sistemas energeticamente auto-suficientes.

Vários autores (Sodano et al., 2005; Ammar and Basrou, 2006; Lallart and Guyomar, 2008) realizam estudos sobre a utilização de baterias recarregáveis e circuitos eletrônicos (especificamente, capacitores) como meios de armazenagem, bem como o aprimoramento dos mesmos visando um aumento na eficiência dos dispositivos piezelétricos. Este trabalho aborda uma breve introdução sobre o funcionamento de circuitos eletrônicos para Power Harvesting, visto que uma abordagem mais completa foge ao escopo deste trabalho e pode ser encontrada em diversas referências. Materiais piezelétricos podem ser descritos de acordo com o circuito elétrico mostrado na Fig. (4). Onde os sobrescritos p e e representam o elemento piezelétrico e o dispositivo externo, respectivamente.

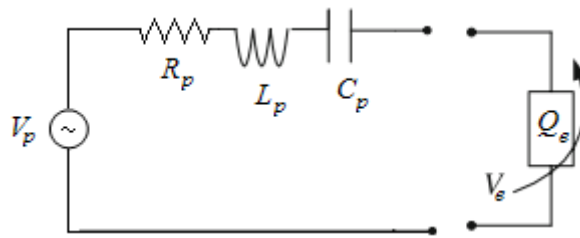


Figura 4. Elemento piezelétrico modelado como circuito elétrico.

Entretanto, utilizar estes dispositivos para alimentação de equipamentos de baixa-potência exige circuitos um pouco mais elaborados, conforme esquematizado na Fig. (5).

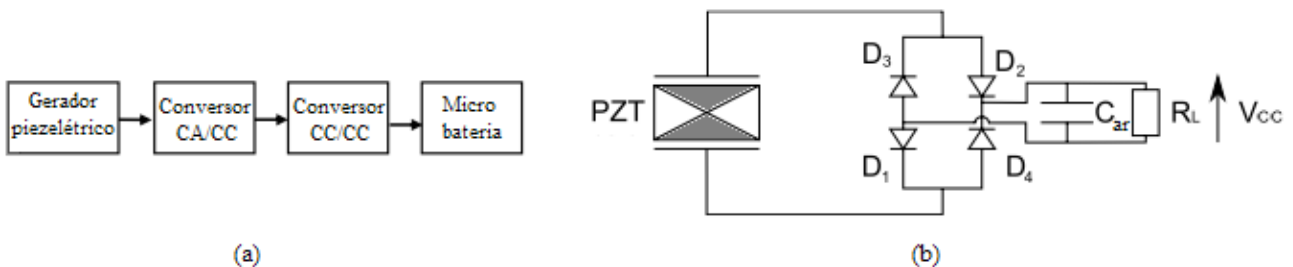


Figura 5. Estrutura básica de circuito para Power harvesting: (a) Diagrama esquemático; (b) Circuito elétrico.

Neste circuito, um retificador CA/CC (ou AC/DC) é conectado ao elemento piezelétrico, pois o sinal produzido é CA e as baterias a serem alimentadas necessitam de um sinal CC. Quando o valor absoluto da tensão gerada pelo PTZ é menor que a soma das tensões do capacitor de armazenamento (V_{CC}) e da ponte retificadora, o PZT encontra-se em circuito aberto e a tensão piezelétrica varia com o deslocamento da estrutura base. A partir do momento que estes valores se igualam, a energia passa a ser transferida do elemento piezelétrico para o capacitor de armazenamento. Outro elemento é adicionado ao circuito quando altos níveis de excitação estão presentes. A Fig. (5a) mostra um conversor CC/CC, utilizado quando há presença de níveis elevados de excitação com o objetivo de nivelar a tensão de saída do conversor CA/CC com a carga externa. Uma das grandes vantagens deste método encontra-se na possibilidade de utilizar a energia adquirida em um curto espaço de tempo, ao invés da necessidade de um ciclo de carga completa antes da utilização da mesma.

4. ALGORITMOS GENÉTICOS

Os algoritmos genéticos (AG) são métodos de busca e otimização fundamentados na teoria biológica da evolução das espécies, descrita por Charles Darwin. São métodos de grande robustez e aplicabilidade na resolução de problemas em diversas áreas, tais como engenharia, computação, bioquímica e biologia.

Segundo Goldberg (1989), os algoritmos genéticos diferem dos métodos tradicionais em quatro aspectos principais:

- Trabalham com codificação do conjunto de parâmetros ao invés de seus valores propriamente ditos;
- Operam com populações de possíveis soluções enquanto métodos tradicionais partem de uma única solução;
- Utilizam apenas informações de custo-recompensa (função objetivo) para cada cromossomo, sem ser necessários outros valores como derivadas e outros conhecimentos auxiliares;

- Aplicam regras de transição probabilística.

Em geral, um AG básico apresenta uma população inicial de cromossomos, gerada de maneira aleatória e codificada de forma binária, cuja função é representar possíveis soluções para um determinado problema. Em condições de otimização, cada cromossomo é avaliado por uma medida de qualidade, denominada *fitness*, que se relaciona à função objetivo do problema. Então, operadores de cruzamento e mutação são aplicados, gerando uma nova população de cromossomos. Esse processo é repetido iterativamente até que determinado critério de parada seja atingido, ou até certo número de gerações pré-definido. O fluxograma de um algoritmo genético básico é mostrado na Fig. (6).

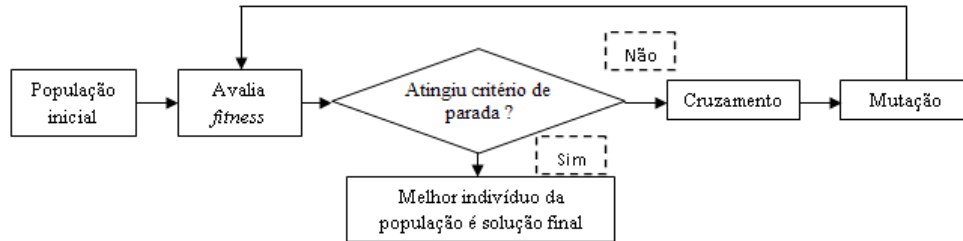


Figura 6. Fluxograma de um algoritmo genético básico.

Neste trabalho a técnica de algoritmos genéticos será utilizada para maximizar a potência gerada pelas cerâmicas PZTs. Um AG será criado com o objetivo de encontrar o posicionamento ótimo de um conjunto de elementos piezelétricos acoplados ao longo da viga. Este algoritmo codificará os cromossomos em vetores com números binários, onde cada posição do vetor corresponde a uma posição discreta da viga modelada em elementos finitos. Desse modo, a presença do número “1” corresponde a um local da viga onde há presença do PZT e “0” onde este está ausente. A quantidade total de PZTs na viga será pré-determinada, e as posições serão então otimizadas maximizando a potência gerada por estes materiais.

5. RESULTADOS

Conforme citado anteriormente, a modelagem da viga piezelétrica e a aplicação de algoritmos genéticos à mesma foram realizadas com o objetivo de maximizar a potência gerada (*fitness*) por uma viga piezelétrica. A viga de alumínio, com dimensões 0,480 X 0,025 X 0,003 m, é submetida a condição engastada-livre e discretizada em 24 elementos, sendo que uma força de natureza harmônica de amplitude igual a 25N e frequência 15Hz, é utilizada como excitação na extremidade livre da viga.

A Fig. (7) mostra um esquema de duas configurações de acoplamento dos PZTs geradas aleatoriamente. Para o caso (a), seis cerâmicas piezelétricas são acopladas e para o caso (b) cinco. As respostas para estes casos, obtidas através da integração da equação do movimento utilizando o método de Newmark (potencial elétrico gerado) e pelo cálculo da área total sob a curva de potencial elétrico (potência gerada), são comparadas posteriormente com as respostas geradas pela configuração otimizada, caso (c). A integração da equação do movimento foi realizada para 3800 amostras e uma taxa de amostragem de 800.

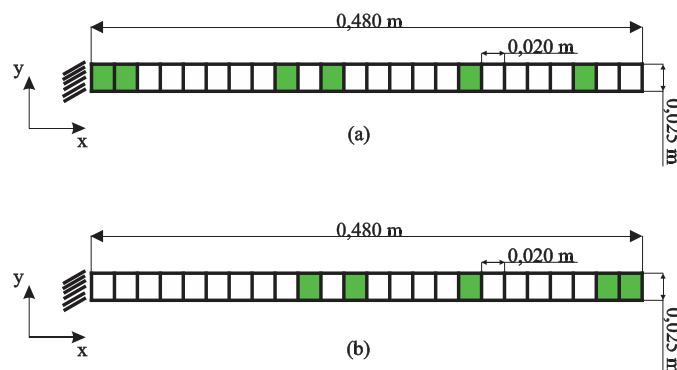


Figura 7. Esquema da viga com configuração de PZTs acoplados para caso (a) e (b).

5.1. Resolução do Problema de otimização via algoritmos genéticos

A viga de alumínio discretizada foi codificada em um vetor binário representando os 24 elementos, onde “0” indica as posições sem PZT e “1” as posições com PZT. Cada cromossomo do algoritmo genético foi representado por um destes vetores, sendo que nesta simulação limitou-se a quantidade de cerâmicas presentes na viga em 4. O problema de

otimização neste caso, trata-se de encontrar as posições dos 4 PZTs que maximizem uma função objetivo baseada na integral no tempo de simulação T do sinal de potencial elétrico resultante da modelagem por elementos finitos:

$$\max J(p) = \int_0^T V(p) dt \quad (16)$$

Sendo V o sinal de potencial, p o vetor com a configuração do posicionamento dos PZTs ao longo da viga e J a função objetivo. Os parâmetros básicos do algoritmo genético utilizado são mostrados na Tab. (1), de modo que mais informações sobre os parâmetros de controle destes algoritmos podem ser encontradas em Michalewicz (1996).

Tabela 1. Parâmetros utilizados na confecção do algoritmo genético.

Tipo de seleção	Torneio
Tipo de cruzamento	Um ponto
Tamanho da população	100
Quantidade de participantes do torneio	5
Quantidade de iterações (gerações)	100
Taxa de cruzamento	0,8
Taxa de mutação	0,1

A execução do algoritmo genético foi feita cinco vezes obtendo satisfatoriamente o mesmo resultado para todos os cinco, sendo que a Fig. (8) ilustra a configuração otimizada de PZTs com a respectiva codificação binária. A evolução dos cromossomos ao longo das iterações pode ser visualizada na Fig. (9), onde é possível verificar que o *fitness* máximo (2.248mW) foi atingido com poucas iterações.

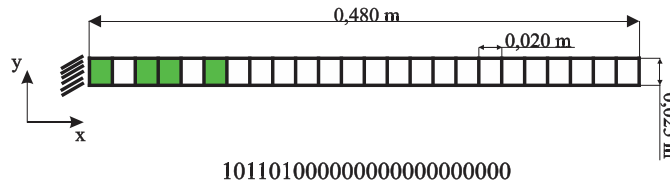


Figura 8. Esquema da viga com posição de PZTs otimizada – caso (c).

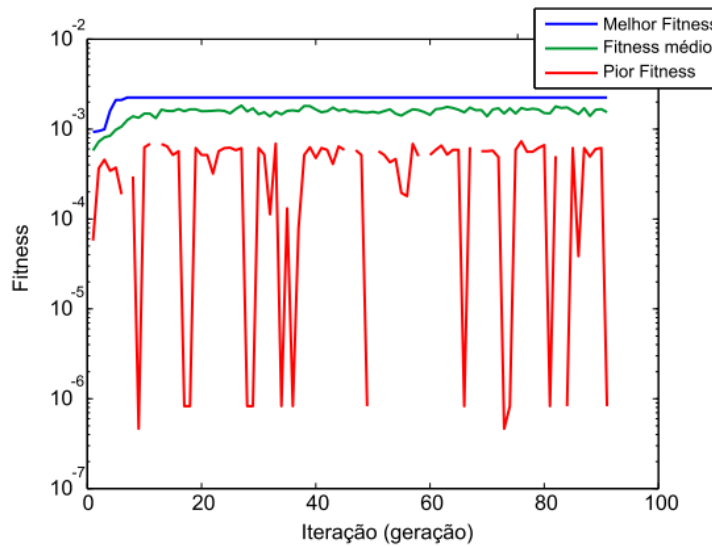


Figura 9. Evolução dos cromossomos ao longo das iterações.

Na Fig. (10) é mostrado o gráfico da função objetivo para todas as diferentes configurações do posicionamento dos 4 PZTs. As configurações mais a esquerda possuem os materiais acoplados mais próximos ao engaste, enquanto as configurações mais a direita tem os PZTs mais próximos à extremidade livre da viga. Uma redução considerável na

potência gerada pelos PZTs é verificada conforme o acoplamento dos mesmos se distanciam da extremidade engastada da viga.

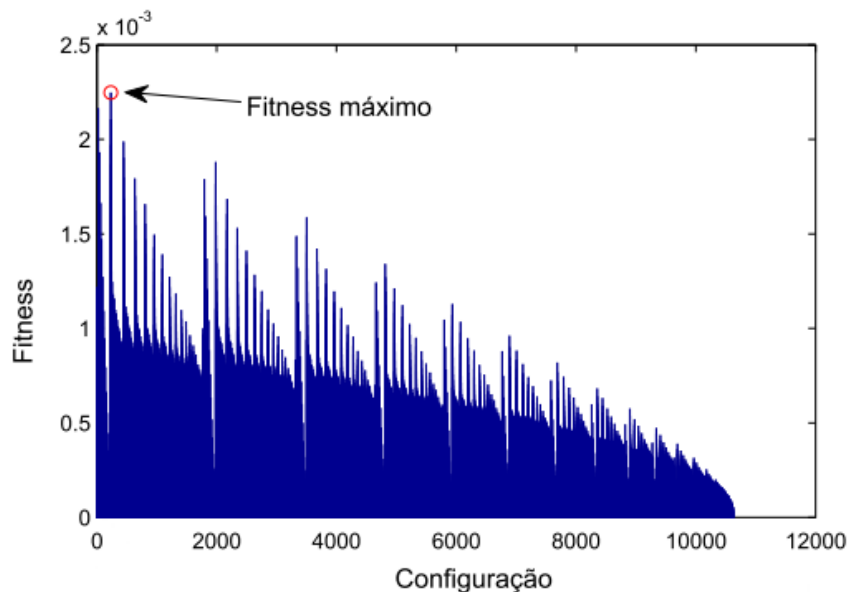


Figura 10. Função objetivo para todas as posições possíveis do problema.

As frequências naturais e a FRF (Função Resposta em Frequência) correspondente ao nó da extremidade livre podem ser vistas para os três casos na Tab. (2) e Fig. (11), respectivamente.

Tabela 2. Frequências naturais para os casos (a), (b) e (c).

Frequências	1 ^a	2 ^a	3 ^a
Caso (a) - Hz	11,3	70,9	199,6
Caso (b) - Hz	9,9	64,4	182,8
Caso (c) - Hz	12,2	70,8	192,3

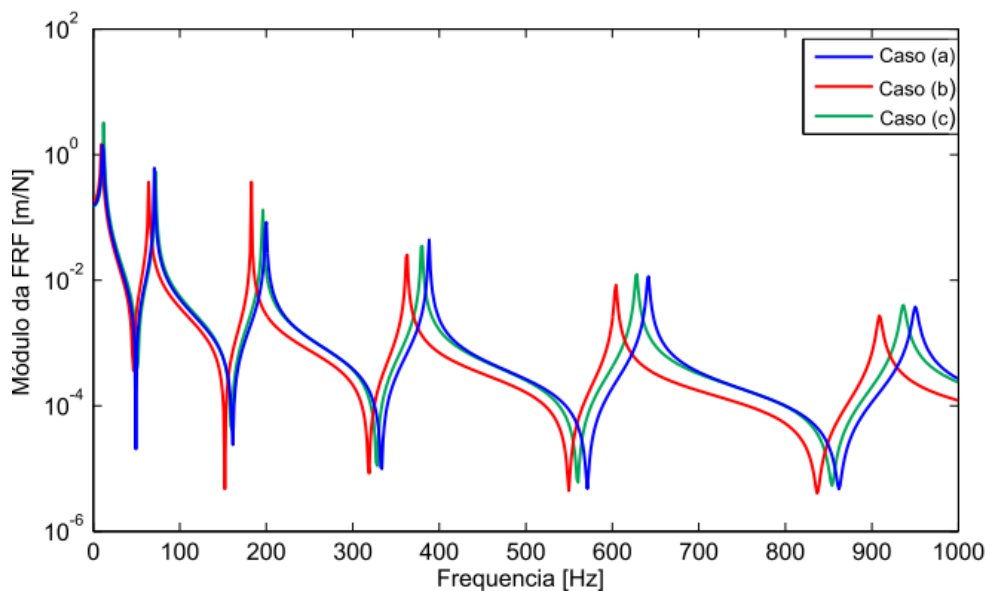


Figura 11. Função de Resposta em Frequência da viga para os casos (a), (b) e (c).

A Fig. (12) mostra a curva do máximo potencial elétrico gerado para cada um dos casos (PZT localizado no segundo elemento), sendo esta condizente com o padrão de resposta para uma excitação harmônica exibindo periodicidade. Ao integrar a função correspondente à curva, isto é, a área sob o gráfico, obtém-se a potência gerada (potência antes da passagem pela ponte retificadora). A Tab. (3) expõe os resultados obtidos para os três casos estudados sendo possível perceber que tanto para o potencial elétrico, como para a potência gerada, o caso (c) apresenta maiores resultados.

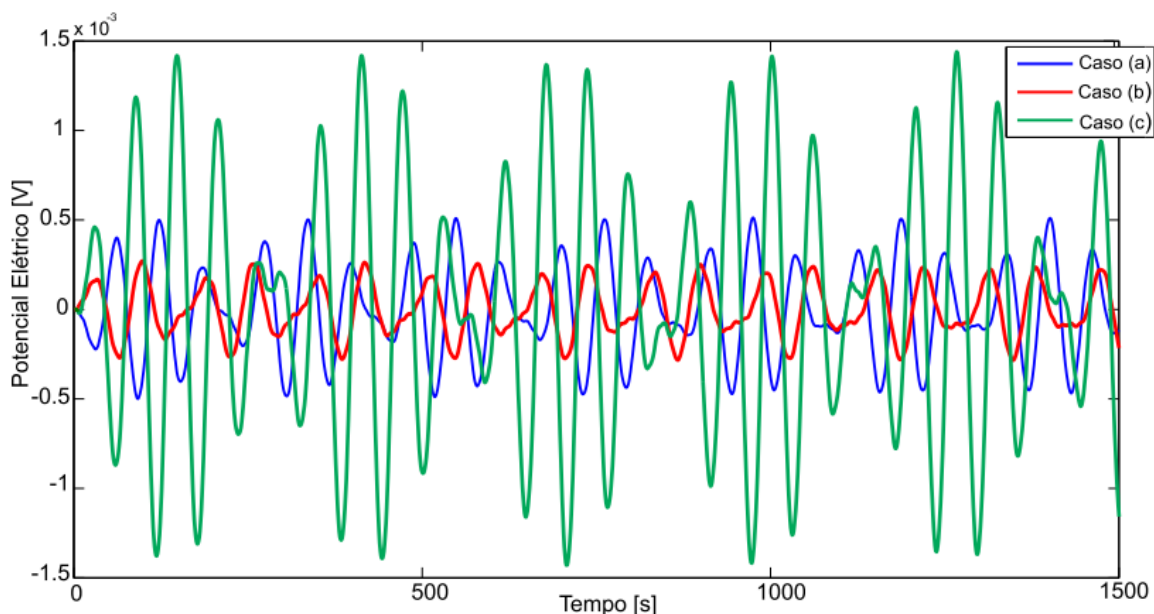


Figura 12. Potencial elétrico gerado para os três casos: (a) PZTs nas posições 1, 2, 9, 11, 17 e 22; (b) PZTs nas posições 10, 12, 17, 23 e 24; (c) PZTs nas posições 1, 3, 4 e 6.

Tabela 2. Potencial elétrico e potência gerada para casos (a), (b) e (c).

	Potencial elétrico (mV)	Potência (mW)
Caso (a)	0.513	0.520
Caso (b)	0.276	0.286
Caso (c)	1.439	2.248

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou um modelo FEM para prever a quantidade de energia por unidade de tempo (potência) gerada por um conjunto de cerâmicas piezelétricas acopladas a uma viga sob condição engastada-livre. Além disso, foi realizada a otimização do posicionamento deste conjunto de PZTs utilizando a técnica de Algoritmos genéticos visando comparar a potência gerada pela posição ótima e não ótima.

Os resultados mostraram-se condizentes com o esperado, de maneira que tanto o potencial elétrico quanto a potência gerada para o caso (c) (configuração ótima), foram relativamente superiores aos casos (a) e (b), onde a configuração foi criada aleatoriamente. Isto mostra que ao otimizar o posicionamento, consegue-se uma maior geração de potência com um menor número de PZTs, diminuindo a quantidade de material piezelétrico e assim reduzindo os custos do dispositivo. O fato de a configuração ótima ser localizada próxima ao engaste valida o resultado obtido pelo AG, já que esta é a região de maiores esforços e consequentemente possibilita maior geração de energia.

7. AGRADECIMENTOS

Os dois primeiros autores agradecem a Fundação Parque Tecnológico Itaipu, através do programa PTI – Ciência e Tecnologia, por suas bolsas de Iniciação Científica.

8. REFERÊNCIAS

- Abreu, G. L. C. M. de, Ribeiro, J. F. and Steffen Jr., V., 2004, "Finite Element Modeling of a Plate with Localized Piezoelectric Sensors and actuators", Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences & Engineering, Vol. XXVI, No. 2, p. 117-128.
- Ammar, Y. and Basrou, S., 2006, "Non-Linear Techniques for Increasing Harvesting Energy from Piezoelectric and Eletromagnetic Micro-Power-Generators", DTIP of MEMS & MOEMS.
- Anton, S. R., and Inman, D. J., 2008, "Vibration Energy Harvesting for Unmanned Air Vehicles," Smart Structures and Materials 2008: Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems II, vol. 6928, San Diego, CA.
- Clark, R.L., Saunders, W.R., and Gibbs, G.P., 1998, "Adaptive Structures: Dynamics and Control", John Wiley & Sons, Inc.
- Cook-Chennault, K. A., Thambi, N., Bitetto, M. A. and Hameyie, E. B., 2008, "Piezoelectric Energy harvesting: A Green and Clean Alternative for Sustained Power Production", Bulletin of Science, Technology & Society, vol. 28, p. 496-509.

- De Marqui Jr., C., Erturk, A. and Inman, D. J., 2009, "An electromechanical finite element model for piezoelectric energy harvester plates", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 327, pp. 9-25.
- Eggborn, T., 2003, "Analytical Models to Predict Power Harvesting with Piezoelectric Materials". Masters Degree Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Erturk, A. and Inman, D. J., 2009, "An experimentally validated bimorph cantilever model for piezoelectric energy harvesting from base excitations", *IOP Electronic Journal, Smart Materials and Structures*
- Feenstra, J., Granstroma, J. e Sodano, H., 2008, "Energy harvesting through a backpack employing a mechanically applied piezoelectric stack", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 22, pp. 721-734.
- Goldberg, D. E., 1989 "Genetic Algorithms: in search, optimization & machine learning". Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.
- K. J. Bathe. Finite Element Procedures in Engineering Analysis. Prentice Hall, 1982.
- Kauffman, J. L. and Lesieutre, G. A., 2009, "A Low-order Model for the Design of Piezoelectric Energy Harvesting Devices", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 20, pp. 495-504.
- Lallart, M. and Guyomar, D., 2008, "An Optimized self-powered switching circuit for non-linear energy harvesting with low voltage output", *IOP Electronic Journal – Smart Materials and Structures*.
- Mateu, L. and Moll, F., 2005, "Optimum piezoelectric bending beam structures for energy harvesting using shoe inserts. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*", vol. 16(10), pp. 835-845.
- Michalewicz, Z., 1996, "Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs", 3º Edição, Springer, Charlotte, Estados Unidos
- Randall, J. F., 2003, "On ambient energy sources for powering indoor electronic devices", Ph.D Thesis, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Suíça.
- Reid, A. and Judd, M., 2007, "A Novel Self-Powered Condition Monitoring Sensor for harsh Environments – Feasibility Study", 15th International Symposium on High Voltage Engineering.
- Rocha, T. L., 2004, "Modelagem de Estruturas Inteligentes", Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista - UNESP.
- Shenck, N. S., Paradiso, J. A., 2001, "Energy Scavenging with Shoe-Mounted Piezoelectrics, *IEEE Micro*, 21, 30-41.
- Sodano, H. A., Inman, D. J. and Park G., 2005, "Generation and Storage of Electricity from Power Harvesting Devices", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 2005, vol. 16, pp. 67-75.
- Sodano, H. A., Inman, D. J. and Park, G., 2004, "Estimation of Electric Charge output for Piezoelectric Energy Harvesting", *LA-UR-04-2449, Strain Journal*, vol. 40(2), pp. 40-58.

9. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluídos no seu trabalho.

OPTIMAL LOCATION OF PIEZOELECTRIC CERAMICS FOR ENERGY HARVESTING IN SMART STRUCTURES

Marcel Araujo Clementino, marcelclementino@uol.com.br¹

Sidney Bruce Shiki, sbshiki@gmail.com¹

Samuel da Silva, sam.silva13@gmail.com¹

Vicente Lopes Júnior, vicente@dem.feis.unesp.br²

¹ Western Paraná State University (UNIOESTE), Engineering and Exact Ciencas Center, Tancredo Neves Av., nº. 6731, Itaipu Technological Park (PTI), CEP 85856-970, Foz do Iguaçu, PR, Brasil

²São Paulo State University (UNESP), Mechanical Engineering Department, Ilha Solteira Campus, SP, Brasil Av., nº 56, CEP 15385-000

Abstract: *The generation of electricity from the vibration of the environment has attracted many researches in recent years. Among the various mechanical means of conversion, those based on piezoelectric ceramics (PZTs) has received great attention due to their ability to capture and storage (power harvesting) using rectifier circuits for use in low-powered electronic devices. Therefore, this paper presents a Finite Element model of a smart beam with PZTs coupled, with a power harvesting circuit and an optimization technique applied to the positioning of PZTs seeking a greater capacity to generate energy. A genetic algorithm is implemented to optimize the location of the sensor / actuator. Several numerical simulations are performed considering the effect of electromechanical coupling of PZTs with the basic structure. The results show that an appropriate choice of the positioning of the PZTs can increase considerably the energy captured and stored.*

Palavras-chave: smart structure models, power harvesting, PZTs optimal location, genetic algorithms.