



ConBRepro

XI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



01 a 03
de dezembro 2021

OTIMIZAÇÃO DE COLETA DE ENERGIA EM SISTEMA APORTICADO, POR MEIO DE MATERIAIS PIEZOELETRICOS.

D. B. Pires,
PPGEP - UTFPR
G. G. Lenzi
PPGEE - UTFPR
J. M. Balthazar
PPGEE - UTFPR
A. M. Tusset
PPGEP - UTFPR

Resumo: Devido à preocupação crescente com o desenvolvimento de fonte de energias renováveis para aplicações em microssistemas, este trabalho teve como objetivo, propor um algoritmo genético para análise paramétrica de sistemas micro eletromecânicos, para otimizar a coleta de energia por meio de materiais piezoelétricos acoplados a um sistema aporticado. Com a utilização do algoritmo genético foi possível determinar parâmetros relacionados à rigidez estrutural do sistema, que proporciona a produção ótima de energia. Os resultados numéricos demonstram que o algoritmo proposto é eficiente em determinar os parâmetros ideais para geração de energia.

Palavras-Chave: Coleta de Energia, Piezoeletricidade, Otimização.

1. Introdução

Com os avanços tecnológicos, a energia elétrica vem se tornando indispensável para a manutenção da sociedade, junto a isto, existe uma preocupação ambiental, relacionada aos meios geradores de energia mais convencionais, que utilizam de fontes geradoras não renováveis, ou seja, que utilizam de recursos esgotáveis.

Sendo assim, métodos de geração de energia renováveis vêm sendo amplamente estudados para garantir um futuro mais sustentável para sociedade, tanto em escala macro, para suprir a necessidade de grandes instalações, quanto escala micro para suprir a necessidade de sistemas que apresentam pouca demanda de energia para funcionarem.

O Brasil vem desenvolvendo infraestrutura para geração de energia elétrica por meio de fontes renováveis em escala macro, pois segundo a Empresa de Pesquisa Energética (2021) as fontes geradoras mais utilizadas no Brasil em 2020 foram: hidráulica (63,8%), eólica (9,18%), biomassa (8,95%) e gás natural (8,61%).

Uma alternativa para a geração de energia elétrica para microssistemas é coleta de energia (energy harvesting), que consiste em reaproveitar a energia dissipada por um sistema e transformá-la em energia elétrica para a alimentação de outros sistemas menores (MORAES, 2018). De acordo com Elvin e Erturk (2013) esse tipo de sistema tem diversas

áreas de aplicação, tais como: implantes médicos, monitoramento e instrumentação de estruturas, sensores sem fios, relógios, entre outros.

Dentre os métodos de coleta de energia mais comuns, este trabalho optou pela utilização do método de coleta vibracional por meio de materiais piezoelétricos, que são capazes de gerar tensão elétrica ao serem submetidos a deformações, devido a sua estrutura cristalina do tipo Perovskita (PEREIRA, 2010).

Segundo Iliuk (2016), um sistema que vem amplamente sendo estudado para coleta de energia através de materiais piezoelétricos é a estrutura aporticada do tipo shear building proposta por Garzeri (2001).

Visto isso, este trabalho propõe a utilização de algoritmos computacionais, para maximizar a coleta de energia oriunda dos materiais piezoelétricos acoplados a estrutura aporticada, proposta por Garzeri (2001).

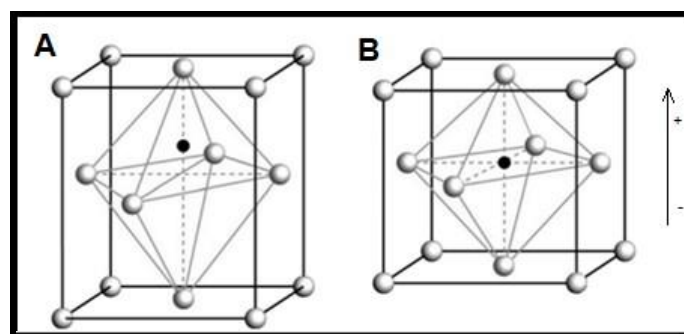
Segundo Pereira (2010), a piezoelectricidade é baseada na capacidade de alguns materiais de gerarem cargas elétricas quando submetidos a uma deformação mecânica. Isto ocorre, pois estes materiais pertencem ao grupo das cerâmicas denominado materiais ferroelétricos.

Os materiais ferroelétricos possuem estrutura cristalina do tipo Perovskita que pode ser encontrada na natureza, nos materiais quartzos, além da possibilidade de sintetização em laboratório, como os cristais cerâmicos criados a base de titanato de chumbo ($PbTiO_3$) e zirconato de chumbo ($PbZrO_3$).

As cerâmicas piezoelétricas possuem estrutura cristalina do tipo Perovskita, que dependendo da temperatura em que o material se encontra, podem apresentar simetria tetragonal, romboédrica ou cúbica simples (JAFFE, 1971).

Segundo Jaffe (1971), quando a temperatura é inferior a temperatura crítica, também conhecida como temperatura de Curie, a estrutura cristalina Perovskita apresenta simetria tetragonal, onde o centro de simetria das cargas positivas e negativas não coincidem, dando origem a um dipolo elétrico, como é possível observar na Figura 1.

Figura 1 - Estrutura Cristalina Perovskita. Onde 'A' é a Temperatura inferior a crítica e 'B' é a Temperatura superior a crítica



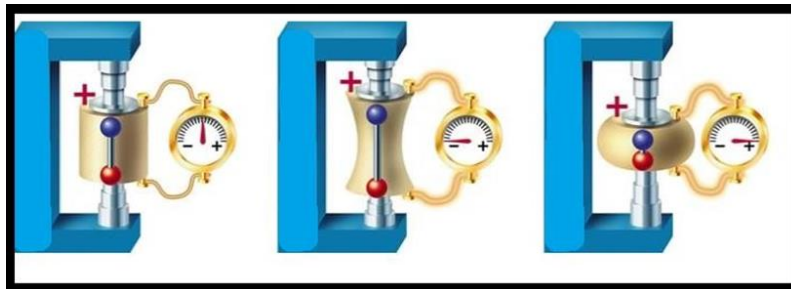
Fonte: Adaptado de Pereira (2010)

Devido a este dipolo, é possível observar 2 tipos de efeitos piezoelétricos, que possuem muitas aplicações na área de engenharia, tanto para geração de energia, quanto para controle de sistemas (PEREIRA, 2010).

Segundo Jaffe (1971) existem 2 tipos de efeito piezoelétrico, sendo eles:

Efeito direto, que se caracteriza quando uma força mecânica atua sobre o material e este por sua vez gera um dipolo elétrico produzindo energia elétrica, como pode ser observado na Figura 2.

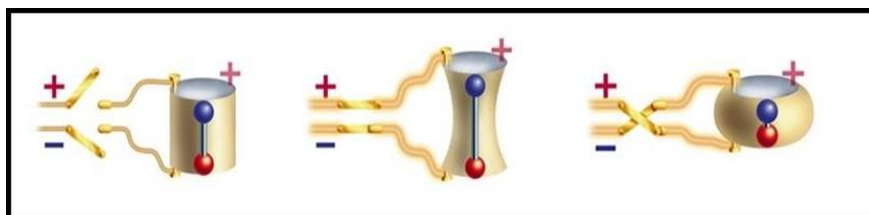
Figura 2 - Efeito Direto



Fonte: Adaptado de Pereira (2010)

Efeito inverso, que se caracteriza quando uma tensão elétrica é aplicada ao material, fazendo com que ele se deforme mecanicamente dependendo do tipo da tensão, gerando assim energia mecânica, como é possível observar na Figura 3.

Figura 3 - Efeito Inverso



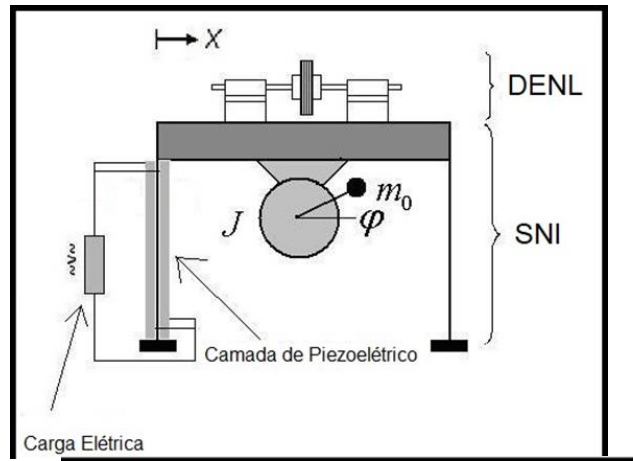
Fonte: Adaptado de Pereira (2010)

Devido a esses efeitos, os materiais piezoelétricos são utilizados em várias áreas de pesquisas, tanto como fonte de geração de energia, como controladores (RODRIGUES, 2019; CLEMENTINO, 2019).

2. Modelo matemático

O sistema de coleta de energia analisado neste trabalho, que pode ser observado na Figura 4, foi proposto por Iliuk (2016), com base na estrutura aporticada não linear, estudada anteriormente por Brasil (1990) e Felix (2002) e com controlador passivo estudado por Tusset et al. (2013) e Tusset e Balthazar (2012).

Figura 4 - Sistema de Coleta de Energia



Fonte: Adaptado de Iliuk (2016)

O movimento horizontal, que atua sobre a estrutura apertada, é proveniente da excitação do motor elétrico de corrente contínua (CC), que possui massa desbalanceada e do controle passivo aplicado pelo Dissipador de Energia Não Linear (DENL) (ILIUK, 2016).

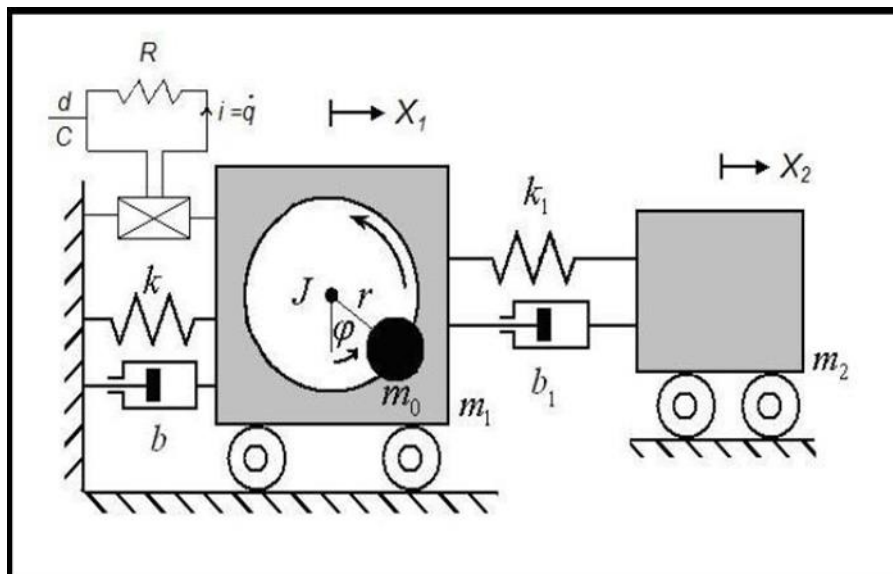
O sistema apresentado pela Fig. 4 é não linear com fonte de excitação não ideal e a estrutura conta com materiais piezoelétricos conectados na coluna (ILIUK, 2016; ILIUK et al., 2014).

Segundo Iliuk (2016), foi utilizado o método de Lagrange para obtenção das equações do movimento do sistema eletromecânico não linear, e o termo de acoplamento do material piezoelétrico nas equações foram definidos por Triplett e Quinn (2009).

Como o Dissipador de Energia Não Linear (DENL) não requer nenhuma injeção de energia no sistema para controlar a estrutura, ele é considerado uma estratégia muito eficaz de controle passivo (TUSSET et al., 2013).

O modelo físico do oscilador com controle passivo acoplado pode ser observado na Figura 5.

Figura 5 - Modelo Físico do Oscilador com Controle Passivo



Fonte: Adaptado de Iliuk (2016)

De acordo com Iliuk (2016), as equações que regem o movimento do sistema para a forma adimensional podem ser vistas na Equação 1, a seguir:

$$\begin{aligned}
& x'' - \beta_1 x + \alpha_1 x' + \alpha_2(x' - z') + \beta_3 x^3 + \alpha_3(x' - z')^3 - \theta(1 + \theta|x|)v \\
& \varphi'' \text{sen}\varphi + \delta_1 \varphi'^2 \text{cos}\varphi; \\
& z'' - e\epsilon_1(x' - z') - e\epsilon_2(x - z)^3 = 0; \\
& \varphi'' = \rho_1 \text{cos}\varphi x'' - \rho_3 \varphi + \rho_2; \\
& \rho v' = \theta(1 + \theta|x|)x + v
\end{aligned} \tag{1}$$

Onde as variáveis são: m_0 é a massa desbalanceada; m_1 é a massa da estrutura; k é o coeficiente da mola; b é o coeficiente do amortecedor linear; $X_1(t)$ é o deslocamento do oscilador; $\varphi(t)$ é o deslocamento angular do rotor; J é o momento de inercia; r é a excentricidade; m_2 é a massa do DENL; k_1 é o coeficiente da mola; b_1 é o coeficiente do amortecedor linear, $X_2(t)$ é o deslocamento do oscilador DENL; onde o coeficiente da mola $k = -k_l X_l + k_{nl} X_l^3$.

Utilizando os parâmetros de normalização e adimensionalização propostos por Tusset e Balthazar (2012), Tusset et al (2013).

$$\begin{aligned}
\alpha_2 &= \frac{b_1}{m_2 \omega_1}; \quad \alpha_3 = \frac{k_1 r^2}{m_1}; \quad \epsilon_1 = \frac{m_1 b_1}{m_2 \omega_1}; \quad \epsilon_2 = k_1 r^2; \quad e = \frac{1}{m_2}. \\
\beta_3 &= \frac{k_l}{(m_0 + m_1) \omega_1^2}; \quad \beta_3 = \frac{k_{nl} r^2}{(m_0 + m_1) \omega_1^6}; \quad \delta_1 = \frac{m_0 \omega_1^2}{(m_0 + m_1)}; \\
\rho_1 &= \frac{m_0 r^2}{(J + r^2 m_0) \omega_1^2}, \quad \rho_2 = \frac{V_1}{(J + r^2 m_0) \omega_1^2}, \quad \rho_3 = \frac{V_2}{(J + r^2 m_0) \omega_1}, \\
v &= \frac{q}{q_0}, \quad \rho = RC \sqrt{\frac{k_l}{(m_0 + m_1)}}, \quad \hat{d}(x) = \left(\frac{r}{q_0}\right) d(r), \\
&\theta \left(\frac{r}{q_0}\right) d_{lin}, \quad \Theta r d_{nl}, \quad \hat{d}(x) = \theta(1 + \theta|x|),
\end{aligned}$$

Utilizando novas variáveis definidas como: $x_1 = x$; $x_2 = x'$; $x_3 = z$; $x_4 = z'$; $x_5 = \varphi$; $x_7 = v$, é possível reescrever as equações em forma de espaço de estados, Equação 2.

$$\begin{aligned}
& x'_1 = x_2; \\
& x'_2 = \beta_1 x_1 - \alpha_1 x_2 - \alpha_2(x_2 - x_4) - \beta_3 x_1^3 - \alpha_3(x_1 - x_3)^3 + \dots \\
& \dots \theta(1 + \theta|x_1|)x_7 + \delta_1 \text{sen}(x_5)x'_6 + \delta_1 \text{cos}(x_5)x_6^2; \\
& x'_3 = x_4; \\
& x'_4 = e\epsilon_1(x_2 - x_4) + e\epsilon_2(x_1 - x_3)^3; \\
& x'_5 = x_6; \\
& x'_6 = \rho_1 \text{sen}(x_5)x'_2 + \rho_2 - \rho_3 x_6; \\
& x'_7 = \frac{\theta(1 + \theta|x_1|)x_1}{\rho} - \frac{x_7}{\rho}.
\end{aligned} \tag{2}$$

3. Simulação numérica

As simulações numéricas do modelo do pórtico foram realizadas no Matlab®, utilizando o integrador “ode45” para solução das equações, com passo fixo de 0,01. Os parâmetros utilizados, para simular numericamente podem ser vistos no Quadro 1:

Quadro 1 - Parâmetros para Simulação Numérica

α_1	0,1
β_1	1,0
β_2	0,2
δ_1	8,373
ρ_1	0,05
ρ_2	100
ρ_3	200
α_2	0,1
α_3	0,5
ε_1	1
ε_2	5
θ	0,2
θ	0,6
ρ	1,0

Fonte: Adaptado de Iliuk (2016)

Para verificar a otimização, o critério de varredura teve um passo de 0,01, e as variáveis vão de $0,01 \leq \varepsilon_1 \leq 2$, e $1 \leq \varepsilon_2 \leq 10$.

Os parâmetros internos do algoritmo, tais como porcentagem permanente da população, razão de crossover e mutação, foram utilizados os padrões do Matlab® (ACKLEY, 1987).

A Equação 4 rege a potência gerada pelo material piezoelétrico

$$P = \frac{\theta(1+\theta|x_1|)x_1}{\rho} - \frac{x_7}{\rho} \quad (4)$$

Como a potência que está sendo produzida é de corrente alternada, os valores alternam entre positivos e negativos em caráter senoidal, por tanto foi utilizado o método de Root Mean Square (RMS), que representa o valor eficaz da potência gerada.

Devido a este caráter a função objetivo, observada na Equação 5, é o valor eficaz da potência gerada.

$$FOBJ = RMS(P) \quad (5)$$

Como este trabalho está visando a otimização de 2 parâmetros, foi necessário otimizá-los separadamente e também analisar a eficiência do algoritmo separadamente para cada parâmetro.

3.1 Caso 1

Para realizar a otimização do parâmetro ε_1 por meio algoritmo genético foi utilizado a função objetivo Equação 5, sujeita aos parâmetros descritos no Quadro 3, exceto o parâmetro ε_1 , pois ele é a variável de otimização.

A variável de otimização está sujeita as restrições:

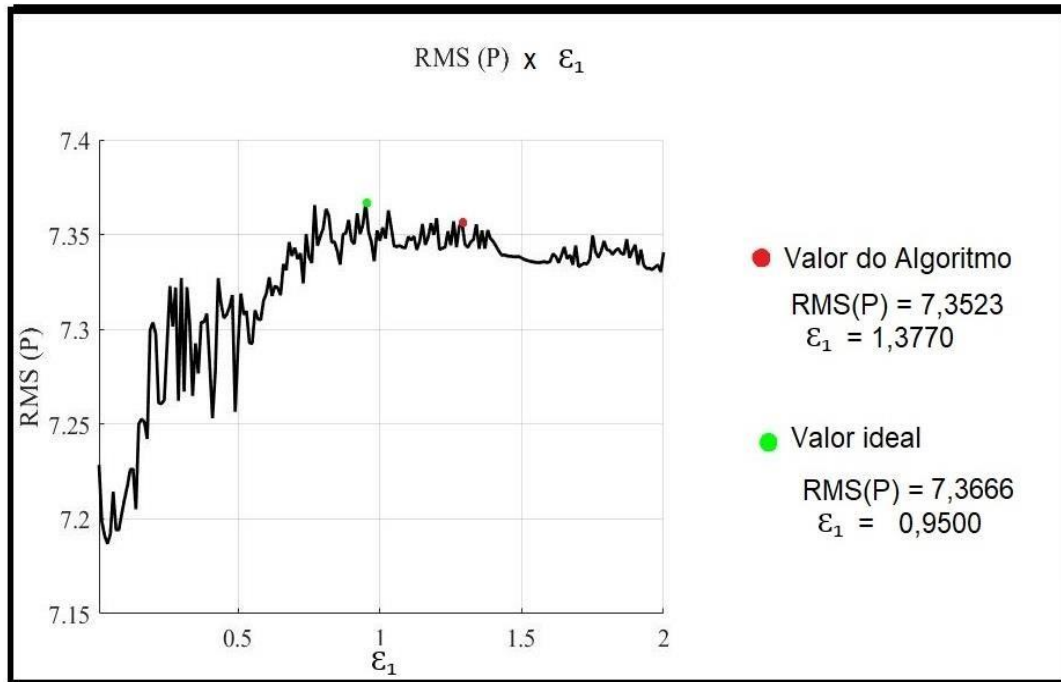
$$\varepsilon_1 \geq 0,01;$$

$$\varepsilon_1 \leq 2,00.$$

Para testar a eficiência do algoritmo foi feito uma varredura no parâmetro ε_1 variando de 0,01 a 2,00, com 200 valores intermediários.

O valor encontrado pelo algoritmo genético para ε_1 foi de 1,3770, com o RMS(P) de 7,3523. Enquanto a varredura encontrou o valor de 0,9500 para ε_1 com o RMS(P) de 7,3666, como pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 - RMS(P) x ε_1



Fonte: Autoria própria

É possível observar, que mesmo os valores de ε_1 não sendo próximos, o algoritmo conseguiu encontrar um máximo local muito satisfatório, representando 99,8% do valor ideal.

É válido apontar que o valor ideal para este problema, também pode ser caracterizado como máximo local, pois existe restrições quanto ao valor que o parâmetro tido como variável de otimização pode variar, sendo de 0,01 a 2,00.

3.2 Caso 2

Para realizar a otimização do parâmetro ε_2 por meio algoritmo genético foi utilizada a função objetivo Equação 5, sujeita aos parâmetros descritos no Quadro 3, exceto o parâmetro ε_2 , pois ele é a variável de otimização, e o parâmetro ε_1 que foi previamente determinado como 0,9500.

A variável de otimização está sujeita as restrições:

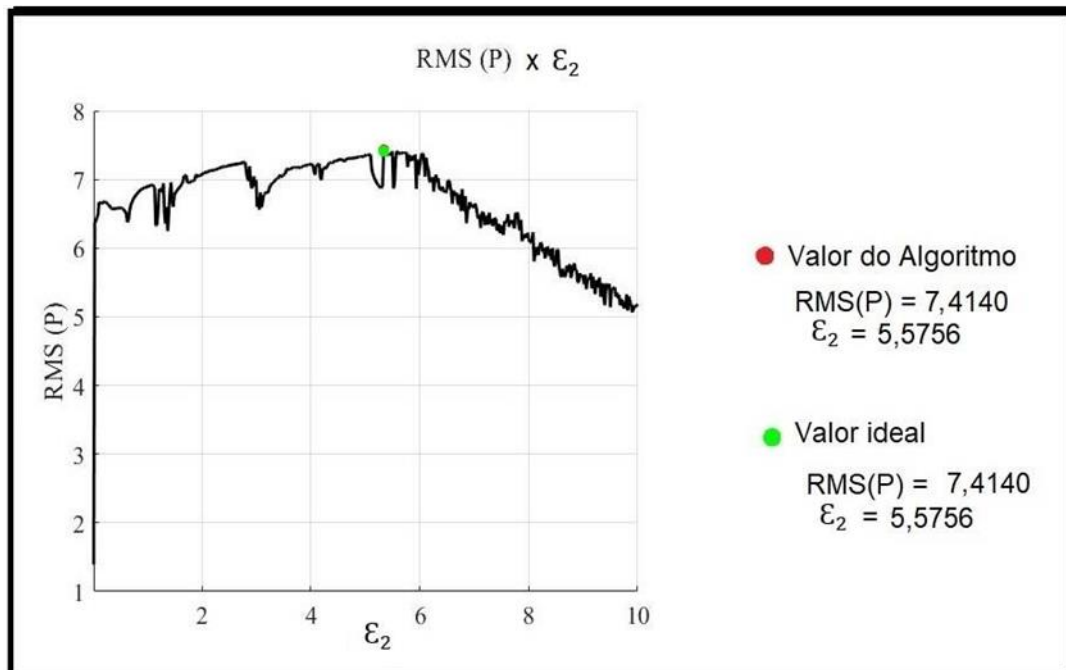
$$\varepsilon_2 \geq 0,01;$$

$$\varepsilon_2 \leq 10,00.$$

Para testar a eficiência do algoritmo foi feito uma varredura no parâmetro ε_2 variando de 0,01 a 10,00, com 500 valores intermediários.

O valor encontrado pelo algoritmo genético para ε_2 foi de 5,5756, com o RMS(P) de 7,4140, o mesmo valor encontrado com a varredura, como pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 - Caso 2 - RMS(P) x ϵ_2



Fonte: Autoria própria

Como visto na Figura 7, o algoritmo conseguiu chegar no valor ideal para a solução do problema, mostrando-se um eficiente método para otimizações de problemas que envolvem vários parâmetros.

3.3 Caso 3

Para observar qual seria o melhor valor, caso fosse utilizado apenas o algoritmo genético na otimização do parâmetro ϵ_1 , foi feita uma otimização no parâmetro ϵ_2 utilizando a função objetivo vista na Equação 5, e os parâmetros descritos no Quadro 3, exceto ϵ_2 que é a variável de otimização e ϵ_1 que foi previamente definida como 1,3770.

A variável de otimização está sujeita às restrições:

$$\epsilon_2 \geq 0,01;$$

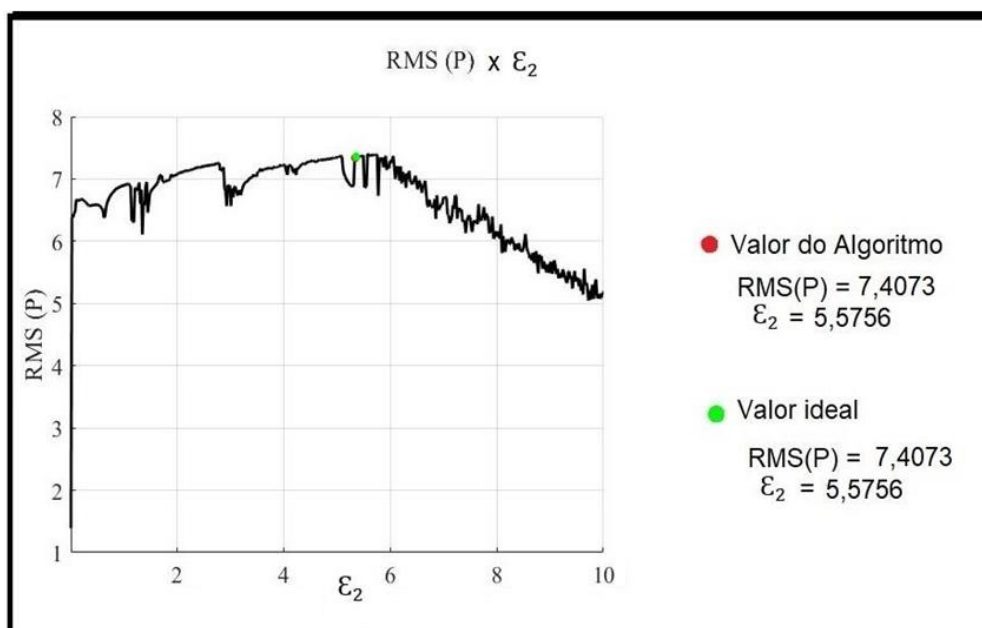
$$\epsilon_2 \leq 10,00.$$

Para encontrar o valor ideal e obter uma representação visual, foi feita uma varredura no parâmetro ϵ_2 variando de 0,01 a 10,00, com 500 valores intermediários.

O valor encontrado pelo algoritmo genético para ϵ_2 foi de 5,5756, com o RMS(P) de 7,4073, o mesmo valor encontrado com a varredura, como pode ser observado na Figura 8.

Como é visto na Figura 8, o algoritmo encontrou o valor ideal de ϵ_2 para o problema, quando o ϵ_1 é 1,3770, sendo o RMS(P) 7,4073. Porém como o valor ideal para o ϵ_1 é 0,9500, o máximo local entre 0,01 e 10, representa 99,9% do ideal otimizando os 2 parâmetros.

Figura 8 - RMS(P) x ϵ_2



Fonte: Autoria própria

Para analisar os resultados obtidos com os 3 casos apresentados, foi feito um comparativo, que pode ser visto no Quadro 1, o algoritmo atingiu valores muito satisfatórios.

Quadro 1 - Comparativo dos Resultados

Fonte:

Parâmetro	Valores Obtidos					
	Caso 1		Caso 2		Caso 3	
	AG	Varredura	AG	Varredura	AG	Varredura
ϵ_1	1,3770	0,9500	0,9500	0,9500	1,3770	1,3770
ϵ_2	5,0000	5,0000	5,5756	5,5756	5,5756	5,5756
RMS(P)	7,3523	7,3666	7,4143	7,4143	7,4073	7,4073

Autoria própria

O algoritmo conseguiu uma eficiência superior a 99% para o resultado, além de ter encontrado o valor ideal, quando otimizou o parâmetro ϵ_2 , tanto no caso 2, quanto no caso 3.

4. Conclusão

Por meio da estratégia de utilização de Algoritmos Genéticos, foi possível determinar os valores dos parâmetros relacionados à massa e rigidez de um sistema micro eletromecânicos, que otimizam a coleta de energia gerada pelos materiais piezoelétricos acoplados ao sistema aporticado.

Considerando simulações numéricas e computacionais, foi apresentado neste trabalho a variação da geração de energia, considerando a variação dos dois parâmetros relacionados à massa e rigidez. Com a proposta da função objetivo, foi possível utilizar o algoritmo

genético para determinar, para quais valores de massa e rigidez pode-se obter a maior energia possível, considerando as restrições dos materiais.

Com os resultados apresentados, pode-se concluir que a estratégia proposta para otimização é eficiente, e que a utilização de materiais piezelétricos é uma excelente alternativa para geração de energia para componentes eletrônicos.

Com a conclusão deste trabalho foi possível contribuir com os estudos para proposta e otimização de fontes de energia renováveis. Como proposta de trabalhos futuros, pode-se propor a continuidade deste trabalho para aplicações em sistemas macros, como em fontes eólicas, fotovoltaicas, biomassa, entre outras.

Referências

ACKLEY, D. H. **A connectionist machine for genetic hillclimbing**. Boston, Kluwer Academic Publishers, 1987.

BRASIL, R. M. L. R. F. **Não-linearidade Geométrica na Dinâmica de Estruturas Apertadas Planas: Um Tratamento pelo Método dos Elementos Finitos**. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.

CLEMENTINO, M. A; MARQUI C; NIZTSCHKE, F. **Design and experimental verification of a smart piezoelectric pitch link for vibration attenuation**. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

DUTOIT, N. E; WARDLE, B. L. **Experimental verification of models for microfabricated piezoelectric vibration energy harvesters**. AIAA Journal - American Institute of Aeronautics and Astronautics, v. 45, n. 5, 2007.

ELVIN, N; ERTURK, A. **Advances in Energy Harvesting Methods**. 1. ed. Springer. 2013.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021**. Rio de Janeiro, 2021.

FELIX, J. L. P. **Teoria de Sistemas Vibratórios Apertados Não-lineares e Não-ideais**. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

FERREIRA, L. F S. S. **Sistemas de Geração de Energia via Sensores Piezoelétricos**. TCC (Graduação) – Centro Universitário de Brasília – UniCeub Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas – Fatecs. Brasília, 2017.

GARZERI, F. J. **Dinâmica não linear de um pórtico plano sob carregamento não ideal: análise numérica e experimental**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

ILIUK, I. **Análise de um sistema de captura de energia piezoelétrico não linear e não ideal utilizando-se uma estrutura apertada**. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo – São Paulo, 2016.

JAFFE, B. **Piezoelectric Ceramics**. 1. Ed. New York, Academic, 1971.

MORAES, R. M. **Desenvolvimento de sistema para coleta de energia vibracional utilizando dispositivos piezoelétricos**. Dissertação – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2018.

PEREIRA, A. H. A. **Cerâmicas piezoelétricas: funcionamento e propriedades**. ATCP Engenharia Física. São Carlos, 2010

RODRIGUES, J. I. P. **Integração de Fontes de Energia Renovável em Sistemas Elétricos Isolados**. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Eletrônica – Universidade de Coimbra, Coimbra, 2019

TRIPLETT, A; QUINN, D. D. **The Effect of Non-linear Piezoelectric Coupling on Vibration-based Energy Harvesting.** Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 20 p. 1959-1967, 2009.

TUSSET, A. M; BALTHAZAR, J. M; CHAVARETTE, F.R; FELIX, J. L. P. **On energy transfer phenomena, in a nonlinear ideal and non-ideal essential vibrating systems, coupled to a (MR) magneto-rheological damper.** Nonlinear Dynamics, p. 1-22, 2012.

TUSSET, A. M; BALTHAZAR, J. M; FELIX, J. L. P. **On elimination of chaotic behavior in a non-ideal portal frame structural system, using both passive and active controls.** Journal of Vibration and Control, p. 1-11, 2012.

TUSSET, A. M., BALTHAZAR, J. M. **On the Chaotic Suppression of Both Ideal and Non-ideal Duffing Based Vibrating Systems, Using a Magnetorheological Damper.** Differential Equations and Dynamical Systems, v. 21, p. 105-121, 2013.