

INFLUÊNCIA DO TEMPO DE OPERAÇÃO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA PIEZELÉTRICO

Karina Mayumi Tsuruta, Domingos Alves Rade.

RESUMO. O problema de atenuação dos níveis de vibração em máquinas e estruturas está frequentemente presente em vários ramos da atividade produtiva, tais como nas indústrias de construção civil, automotiva, aeronáutica, naval, de geração e distribuição de energia, etc. Por isso, vários métodos passivos e ativos têm sido desenvolvidos para atenuar essas vibrações. Um aumento do nível de amortecimento de uma estrutura pode ser alcançado a partir da conversão de energia mecânica em energia elétrica causando os chamados dispositivos de geração de energia. Normalmente, estes dispositivos utilizam materiais piezelétricos, estes materiais têm a capacidade de gerar cargas elétricas quando deformados mecanicamente (efeito direto) e quando aplicado uma voltagem nestes materiais, estas deformam-se mecanicamente (efeito inverso). O objetivo deste trabalho é analisar a influência do tempo de operação de um sistema piezelétrico na geração de energia elétrica. Para isto, foi montada uma estrutura com duas pastilhas piezelétricas acopladas em uma placa de alumínio excitada pela base e desenvolvida uma interface no *software* na LABVIEW® para medição da energia gerada.

INTRODUÇÃO

Na maioria das referências bibliográficas, o amortecimento é a dissipação de energia de sistemas mecânicos (HARRIS, 2002), e a dissipação normalmente significa a perda de energia que é convertida em calor. No entanto, Lesieutre *et al.* (2004) apontaram que, de modo mais geral, o amortecimento adicionado é resultado da conversão de energia mecânica em outras formas de energia. Esta energia poderia ser utilizada acoplando ao absorvedor um dispositivo gerador de energia, sendo que estes são projetados para capturar energia adjacente do ambiente, e permitem alimentar sistemas elétricos ou eletrônicos por um longo período de tempo, independente de outras formas de energia (ANTON e SODANO, 2007).

Pierre e Jacques Curie observaram experimentalmente que certos cristais podem exibir na superfície cargas quando sujeitos a tensões mecânicas, este fenômeno foi chamado de piezeletricidade (HARB, 2010).

O campo de pesquisas em formas alternativas de geração de energia com baixas potências tem aumentado nos últimos anos devido ao aumento da produção de equipamentos eletroeletrônicos de consumo cada vez mais baixo. Atualmente, dispositivos portáteis e dispositivos sem fio são projetados incluindo baterias eletroquímicas como sua fonte de energia. A utilização destes tipos de baterias pode causar problemas devido à necessidade de substituição periódica, além de serem prejudiciais ao meio ambiente. Analisando a Figura 1, observa-se que a evolução da tecnologia de baterias se manteve praticamente estagnada na década passada, enquanto o desempenho dos sistemas computacionais cresceu constantemente (PARADISO e STARNER, 2005).

Os tipos de fontes de energia existentes podem ser divididos em dois grupos (Figura 2): fontes de densidade de energia fixa (ex. baterias) e fontes de potência fixa (geração de energia pelo ambiente). Fontes de densidade de energia fixa possuem uma limitação na quantidade de energia disponível. Após a energia disponível ser esgotada, a fonte precisa ser substituída ou recarregada. Já as fontes de potência fixa possuem a vantagem de serem gratuitas, os mecanismos de conversão são ecológicos (os processos de conversão não emitem poluição), e a fonte tem uma vida útil potencialmente infinita. Estas fontes são particularmente úteis em aplicações em que dispositivos são de difícil acesso durante a manutenção, como por exemplo, sensores incorporados em estruturas para monitoramento de integridade estrutural (DU TOIT, 2005). Na Tabela 2 é apresentado o consumo médio de energia elétrica em dispositivos elétricos domésticos.

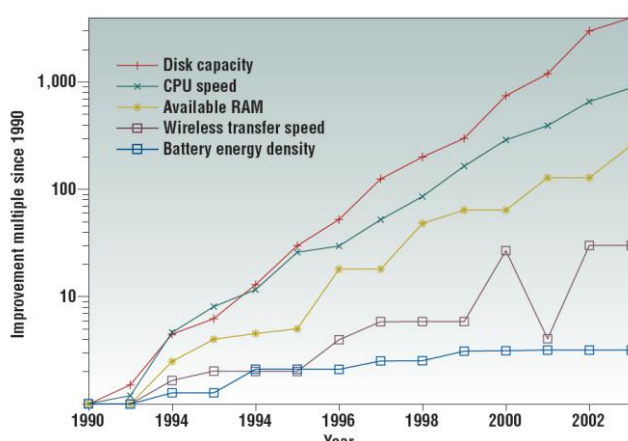


Figura 1: Avanços em tecnologia de computadores e baterias desde 1990 (PARADISO e STARNER, 2005).

Tabela 1 – Fontes de energia disponíveis que geram e podem gerar eletricidade (adaptado de PRIYA, 2007).

Corpo Humano	Veículos	Estruturas	Indústria	Ambiente
Respiração, pressão sanguínea, exalação, calor do corpo. Caminhar, movimento do braço, movimento dos dedos, corrida, nado, comer, falar.	Avião, Helicóptero, Trem. Pneus, pedais, freios, amortecedores, turbinas.	Pontes, rodovias, túneis, estruturas agrícolas. Interruptor, dutos, limpeza.	Motores, compressores, bombas, ventiladores. Transportadores, Vibração das máquinas.	Vento, Solar, Variação de temperatura, temperatura diária. Correntes oceânicas, ondas acústicas, EM Ondas, Sinais RF

Tabela 2 – Média do consumo de energia em dispositivos elétricos domésticos (adaptado de PRIYA, 2007).

Produto	Consumo médio de energia
Rádio portátil FM	30 mW
Walkman (Funcionando)	60 mW
Celular (Falando/stand-by)	2 W/ 35 mW
Controle remoto TV	100 mW
Computador portátil	10 W
TV/ (53/67/ wide screen)	50/74/11 W

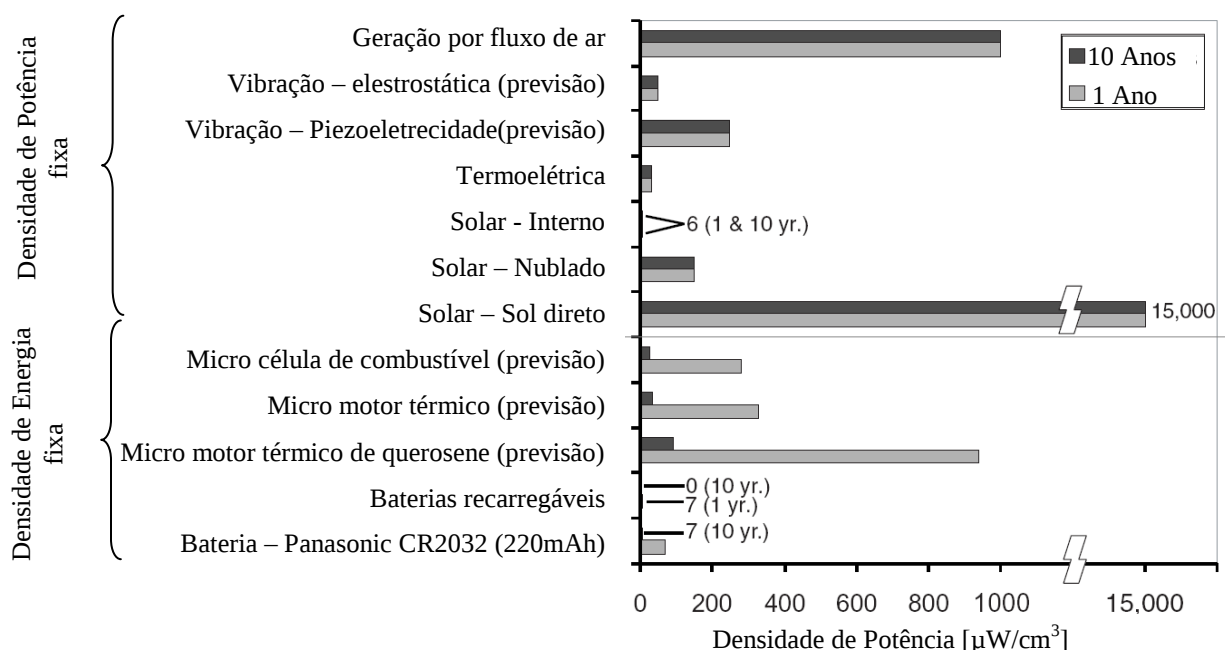


Figura 2. Comparação de fontes de energia (adaptado de DU TOIT, 2005).

Embora existam muitas técnicas que forneçam uma quantidade substancial de energia, como visto na Figura 2, os materiais piezelétricos têm recebido maior atenção, devido à habilidade de converter diretamente a energia mecânica em energia elétrica, além de serem facilmente integráveis em diversos tipos de sistema mecânicos (ANTON e SODANO, 2007). Vários fatores podem influenciar na geração de energia de um sistema piezelétrico, como o tipo de transdutor piezelétrico, a direção de polarização, o tipo de componenetes eletrônicos utilizados no circuito de retificação e armazenamento a temperatura do ambiente, etc.. Com base nisto, o objetivo deste trabalho é analisar a influência do tempo de operação de um sistema piezelétrico na geração de energia elétrica.

GERAÇÃO DE ENERGIA POR PIEZELETRICIDADE

As estruturas piezelétricas geradoras de energia são formadas por transdutores piezelétricos acoplados a uma estrutura base, sendo excitados por uma força externa e um circuito elétrico (Fig. 3). E os componentes elétricos básicos de geração de energia por piezeletricidade são: um retificador que transforma uma saída oscilatória do piezelétrico em sinal unipolar, e um dispositivo de armazenamento, como uma bateria ou capacitor. Para simplificação, assume-se que o dispositivo de geração de energia esteja oscilando em uma única frequência. No entanto, isto não é uma restrição, e a saída do material piezelétrico é uma única frequência harmônica. O sinal oscilatório é conectado a um circuito retificador que produz um sinal unipolar, como mostrado na Figura 4. O sinal da voltagem unipolar também produz um sinal de corrente unipolar. A saída do circuito retificador é suavizada, sendo então um sinal DC com uma pequena ondulação na frequência de oscilação do elemento piezelétrico. O sinal DC (com uma pequena ondulação) é conectado a um dispositivo armazenador de energia como um capacitor. O capacitor então armazena energia como uma carga. Um capacitor ideal irá reter a carga quando desconectado do dispositivo de geração de energia e descarregar a carga quando conectado a uma carga (LEO, 2007).

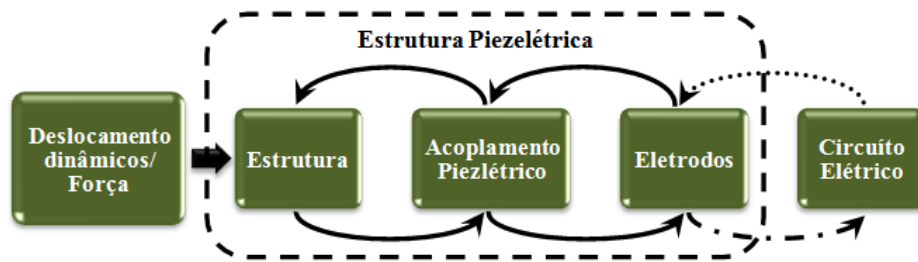


Figura 3: Componentes de uma estrutura geradora de energia, incluindo o acoplamento do circuito à estrutura (adaptado de RUPP et al., 2009).



Figura 4: Componentes do sistema piezétrico de geração de energia (Adaptado de Leo, 2007)

A Figura 5(a) mostra uma representação esquemática de um sistema de um grau de liberdade com um dispositivo piezétrico acoplado. E a Figura 5(b) mostra um resumo das três formas de energia envolvidas nestes dispositivos. As três formas são: mecânica, elétrica e térmica. As duas primeiras são ligadas bidirecionalmente ao transdutor piezétrico. Pelo caminho 1 a energia mecânica é diretamente dissipada. Os caminhos 2 e 3 passam através da “ponte piezétrica”, convertendo uma parte da energia mecânica em energia elétrica, que é armazenada e ao mesmo tempo, e energia mecânica e elétrica são convertidas em energia térmica pelos elementos de dissipação como amortecedores mecânicos e resistores elétricos (LIANG e LIAO, 2009).

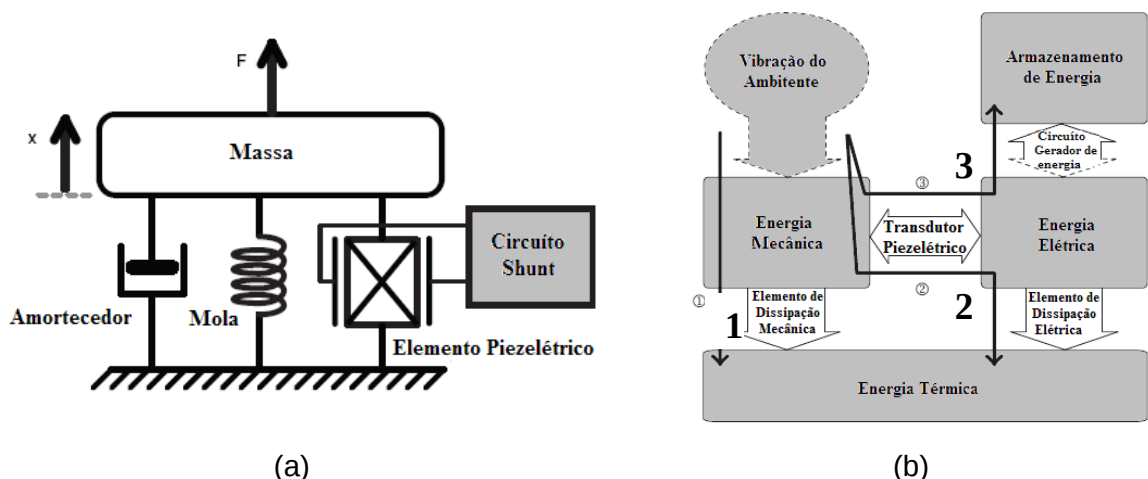


Figura 5: (a)Esquema de um sistema de um grau de liberdade com acoplamento piezétrico. (Adaptado de LIANG e LIAO, 2009); (b)Ilustração dos fluxos de energia (adaptado de LIANG e LIAO, 2009).

Na Tabela 3é apresentado um resumo de alguns resultados de geração de energia por excitação harmônica e randômica, extraídos da literatura.

Tabela 3: Resumo de algumas bibliografias de geração de energia por piezeletricidade.

Referência	F [Hz]	Nível de Excitação [m/s^2]	Material Piezelétrico	Circuitoelétrico	Estrutura	Ligação dos transdutores	P [μW]
Song <i>et al.</i> , (2009)	30 Hz	0.49 m/s^2	SFC – MTEH	CRP*	Bimorfo	Série	1,80 μW ^a
	30 Hz		MFC – MTEH			Série	2,76 μW ^a
	30 Hz		MFC – MTEH			Paralelo	2,48 μW ^a
	(28-32) Hz		MFC - MTEH			Paralelo	2,68 μW ^a
Sun <i>et al.</i> , (2009)	178,65 Hz	3 m/s^2	PMN-PT	---	Unimorfo	---	18 μW ^b
De Marqui Jr. <i>et al.</i> (2009)	106,97 Hz	---	PZT-5A	---	Bimorfo	Série	157,72 $\mu\text{W/g}^2$
De Marqui Jr. <i>et al.</i> (2011)	Fluter 12, 3 m/s	---	QP-10N	---	Unimorfo	Paralelo	30 μW ^b
Song <i>et al.</i> , (2010)	20 Hz	---	MFC	---	Bimorfo	Série	4,11 μW
Rakbamrunget <i>al.</i> (2010)	Freq. de ressonância	N/I	PZT+1 mol%Mn	CRP*	Unimorfo	---	1,7 μW
			PZT+1 mol%Mn	SSHI			11,2 μW
			PMN-25PT	CRP*			4,5 μW
			PMN-25PT	SSHI			12,6 μW
Erturket <i>al.</i> , (2008)	1744 Hz	---	PZT-5A/ Al	---	Unimorfo	---	12,84 W/g^2
	1312 Hz		PZT-5A/ SS				71,50 W/g^2
	1744 Hz		PMN-PT/Al				0,0717 W/g^2
	1312 Hz		PMN-PT/SS				0,503 W/g^2
Lefeuvre <i>et al.</i> , (2007)	[10 Hz, 2 kHz] ^c	---	PZT - P1-89	CRP	N/I	---	0,98 μW
	[10 Hz, 2 kHz] ^c			SECE			1,9 μW
	[10 Hz, 150 Hz] ^c			CRP			1,6 μW
	[10 Hz, 150 Hz] ^c			SECE			2,97 μW
	[10 Hz, 500 Hz] ^c			CRP			1,75 μW
	[10 Hz, 500 Hz] ^c			SECE			2,9 μW
Karamiet. <i>al</i> (2011)	Cicloslimitados		QP10n		Bimófica	Série	10 ⁻⁴ W
	Excitação caótica						10 ⁻³ W

^a: Resultado experimental ; ^b: Resultado numérico ; ^c: Excitação randômica por uma banda de frequência; *: Circuito retificador padrão; N/I : Não informado

METODOLOGIA

Para os ensaios de geração de energia elétrica foi construída uma placa geradora de energia elétrica excitada pela base por um excitador eletrodinâmico (Fig. 6(a)). Esta estrutura geradora é constituída de uma placa de alumínio com dimensão de 0,224 m x 0,050 m e espessura de 0,001 m, nesta estrutura foram acopladas na superfície duas pastilhas piezelétricas do tipo ACX-QP15N (Fig. 6(b)).

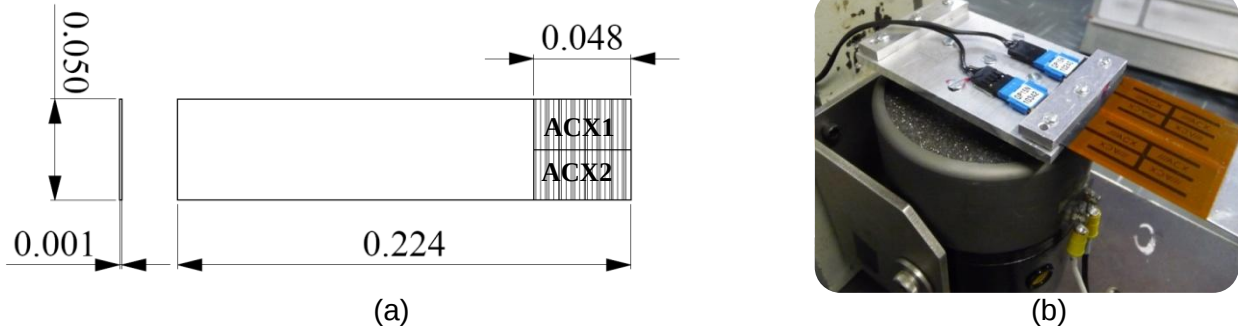


Figura 6: Dimensões da placa de alumínio com as pastilhas piezelétricas.

Os equipamentos utilizados no experimento foram:

- Computador com o software LABVIEW® (Laboratory Virtual Engineering Workbench);
- Placa de aquisição de dados modelo USB-6259 (National Instruments);
- Excitador eletrodinâmico modelo ET-126B (LabWorks Inc.);
- Amplificador de potência modelo pa-138 (LabWorks Inc.);
- Osciloscópio modelo Agilent 35670;
- Resistências elétricas;
- Diodo de Germânio OA90;
- Capacitor 100 μF ;
- Multímetro digital.

Na Figura 7 é mostrado o aparato experimental. A placa geradora de energia foi excitada por um excitador eletrodinâmico, com o auxílio de um osciloscópio, onde foi escolhida a frequência de excitação do sistema, e a tensão RMS aplicada no excitador foi controlada por um amplificador de potência. A tensão elétrica produzida pela deformação das pastilhas piezelétricas era medida por uma placa de aquisição com o auxílio de um computador com o Software LABVIEW®.



Figura 7: (a) Aparato experimental para geração de energia elétrica; (b) Circuito retificador padrão.

Primeiramente foram encontradas experimentalmente as frequências naturais da estrutura placa-pastilhas piezelétricas, identificadas pelos picos da FRF mostrada na Figura 8.

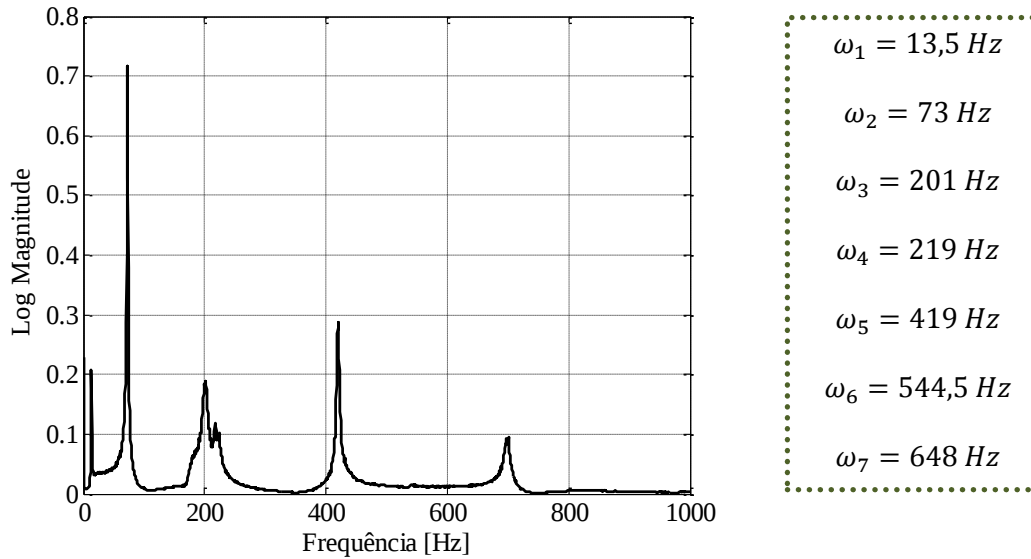


Figura 8: Frequências naturais da placa geradora de energia.

Para leitura da tensão elétrica adquirida pela placa de aquisição foi implementado no LABVIEW® um programa considerando-se o circuito padrão da figura 4.4, este circuito possui uma ponte retificadora com quatro diodos, um capacitor e duas resistências elétricas. O programa foi desenvolvido obedecendo as seguintes restrições:

$$V_{aq} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} * V_{cf} \quad (1)$$

no qual, V_{aq} = tensão elétrica adquirida [V], R = Resistência elétrica [Ω], V_{cf} = Tensão elétrica no capacitor [V].

Devido à limitação da placa de aquisição de sinais em relação à tensão de saída, esta tem que ser menor que 10 V. E a tensão que passa pelo capacitor tem que ser menor que 30 V.

$$V_{aq} \leq 10 \text{ V}, \quad (2)$$

onde, V_{aq} = tensão elétrica adquirida [V].

$$V_{cfm\acute{a}x} \leq 30 \text{ V}, \quad (3)$$

onde, $V_{cfm\acute{a}x}$ = tensão elétrica máxima no capacitor [V].

Substituindo (2) e (3) em (1), tem-se que os valores das resistências elétricas utilizadas no circuito de retificação devem satisfazer a seguinte restrição:

$$R_2 \leq \frac{R_2 + R_1}{3} \quad (4)$$

Para o cálculo da energia produzida por tempo, utilizou-se a equação 7 obtida a partir das equações da energia produzida por tempo (Eq.5) e potência (Eq.6).

$$\varepsilon = P * t [\text{W.h}] \quad (5)$$

$$P = \frac{V_{cf}^2}{R_1 + R_2} (\text{W}) \quad (6)$$

$$\varepsilon = \frac{V_{cf}^2}{R_1 + R_2} * t [\text{W.h}] \quad (7)$$

Considerando que a tensão elétrica é em função do tempo ($V_{cf} = f(t)$), Então para o cálculo de energia calcula-se a integral da área da tensão de saída:

$$\varepsilon(t) = \int_0^t \frac{[V_{cf}(t)]^2}{R_1 + R_2} dt \text{ [W.h]} \quad (8)$$

Na Figura 9 é apresentada a interface gráfica desenvolvida no LABVIEW® onde os dados de entrada são os valores das resistências elétricas (R_1 [Ω] e R_2 [Ω]), a frequência de aquisição e o tempo de aquisição [s]. Os valores de saída são a Energia [W.h] e a Potência [W]. O gráfico mostra a tensão elétrica que passa pelo elemento capacitivo.

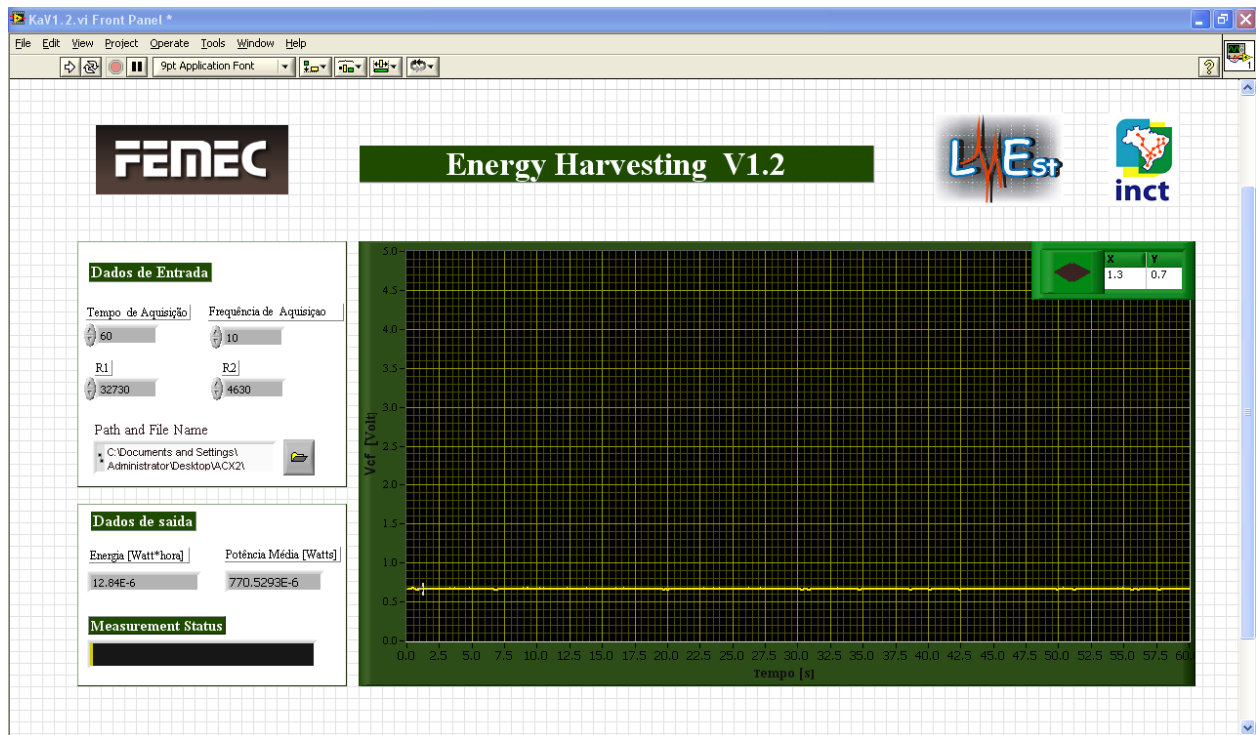


Figura 9: Interface gráfica desenvolvida no LABVIEW®.

Na Figura 8 são apresentados dois gráficos de tensão elétrica medidas. Utilizando a Equação 8, determina-se a energia elétrica gerada por um determinado período de tempo e o cálculo da potência. No gráfico 10(a) é mostrada a tensão elétrica produzida pela estrutura geradora de energia excitada harmonicamente na frequência de 73 Hz com a resistência elétrica de 14,93 Ω para um tempo de medição de 60s, sendo que os transdutores foram conectados em série, e na Figura 10(b) apresenta-se a tensão elétrica obtida de dois transdutores conectados em paralelo com excitação randômica na banda de frequência de [0 -100] Hz com resistência elétrica de 56,44 Ω para um tempo de medição de 180 s.

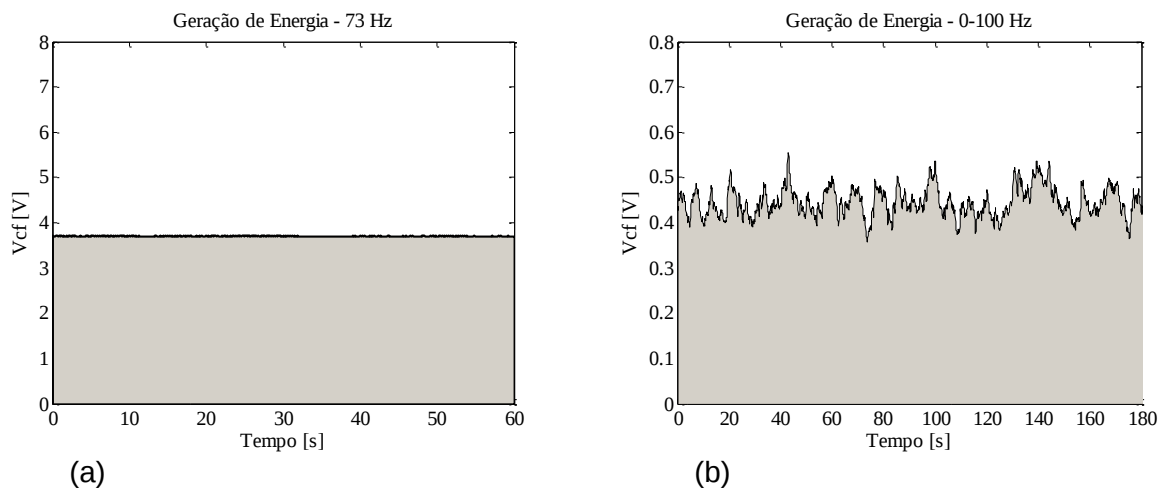


Figura 10– Gráficos de tensão elétrica: (a) com o transdutor ACX 1 (b) com os dois transdutores conectados em paralelo.

Foi projetado um circuito retificador padrão com duas entradas (indicadas pelas setas 1 e 2 da Fig. 9(a)); estas foram utilizadas para conexão dos transdutores piezelétricos, sendo que cada entrada possui um circuito retificador padrão individual e uma única saída (indicado pela seta 3) onde eram conectadas as resistências elétricas.

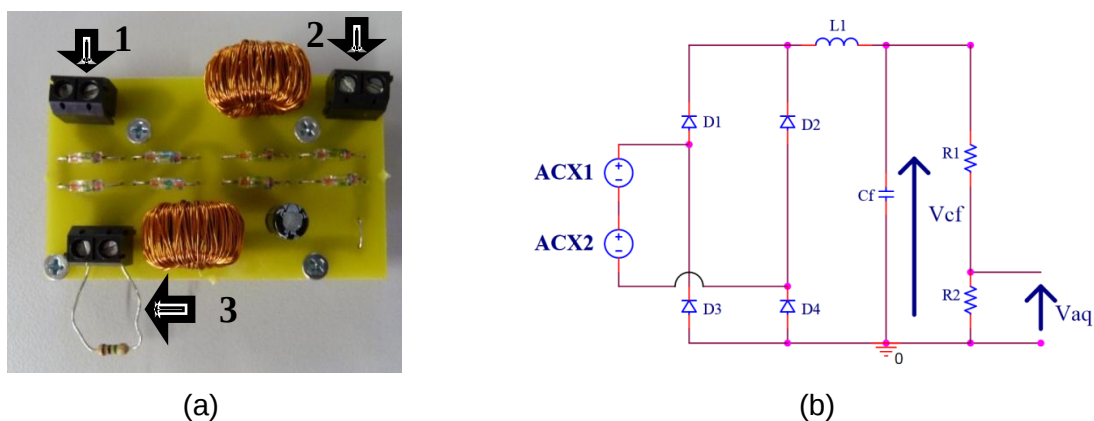


Figura 11: (a) Circuito retificador padrão; (b) Circuito retificador padrão com os dois transdutores piezelétricos em conectados em série.

A estrutura piezelétrica foi excitada pela base na primeira harmônica da viga em 13,5 Hz com uma voltagem RMS de 0,3 V aplicada no excitador eletrodinâmico, as resistências 1 foi de 119,1 k Ω e a resistência 2 foi de 2,2 k Ω , e com auxílio do LABVIEW® foi possível mensurar a potência gerada em relação ao tempo decorrido (Figura 10), para verificar a influência do tempo de operação de um sistema piezelétrico. Os transdutores piezelétricos foram conectados em série, conforme mostrado na Figura 9(b).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na tabela 4 são mostrados os resultados da potência adquirida em relação ao tempo decorrido do experimento; o sistema foi mensurado no decorrer de um período de três horas, no qual os parâmetros de ensaio não foram modificados, além da temperatura ambiente ser mantida constante. Verifica-se na tabela que o valor da potência diminuiu em relação ao tempo. Na Figura 10(a) é possível visualizar a variação da potência em relação ao tempo no gráfico de efeitos da potência. A variação da potência no início ao final do experimento foi de aproximadamente 100 μ W, como pode ser observado no gráfico de intervalo das potências (Figura 10(b)). Essa variação pode ser explicada pelo aquecimento dos componentes eletrônicos, ou mesmo dos transdutores piezelétricos.

Tabela 4: Resultado da potência em relação ao tempo de operação do sistema piezelétrico.

Tempo [h]	Potência [μ W]
0,0167	8,4565
0,0833	8,0317
0,1670	7,7435
0,2500	7,5717
0,5000	7,2978
1,0000	7,1061
1,5000	6,8359
2,0000	6,7137
2,5000	6,6645
3,0000	6,5466

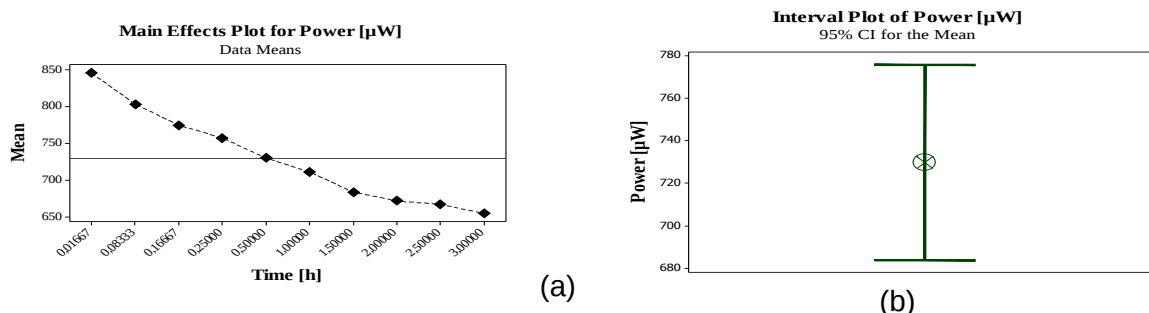


Figura 10: (a) Gráfico de efeitos da potência em relação ao tempo; (b) Gráfico de intervalo da potência.

CONCLUSÕES

Vários fatores influenciam na geração de energia em sistemas de materiais piezelétricos, como a temperatura ambiente, o tipo de conexão dos transdutores, a direção de polarização dos transdutores, etc.. Analisando os resultados da influência do tempo de funcionamento nos sistemas que geram energia com auxílio dos transdutores piezelétricos, pode-se concluir que este influencia na energia produzida pelos transdutores piezelétricos. Pode-se verificar que a produção de energia diminuiu em relação ao tempo de operação dos sistema, que pode ser justificado pelo aumento da temperatura do sistema de geração de energia.

REFERENCIAS

Anton, S. R., Sodano, H. A., “**A Review of Power Harvesting Using Piezoelectric Materials**”, Smart Materials and Structures, Vol. 16, pp. R1- R21, 2007.

De Marqui Jr., C. M., Erturk, A., Inman. D. J., “**An Eletromechanical Finite Element Model for Piezoelectric Energy Harvester Plates**”, Journal of Sound and Vibration, pp. 1-35, 2009.

De Marqui, C., Anicézio, M. M., Erturk, a, & Inman, D. J.,” **Nonlinear Modeling and Analysis of a Piezoaeroelastic Energy Harvester**”. Proceedings of the XIV International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics (DINAME 2011), 2011, ISSN: 2179-9601.

Du Toit, N. E., “**Modeling and design of a MEMS Piezoelectric Vibration Energy Harvester**”, Master of Science in Aeronautics and Astronautics, Massachusetts, 2005.

Harb, A., “**Energy Harvesting: State-of-the-art**”, Renewable energy, pp.1-14, 2010, doi: org/10.1016/j.renene.2010.06.014

Karami, M.A., Varoto, P. S., Inman, D. J., **“Experimental Study of the Nonlinear Hybrid energy Harvesting System.”**, Proceedings of the XIV International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics (DINAME 2011), 2011, ISSN: 2179-9601.

Leo, D. J., **“Engineering Analysis of Smart Material Systems”**, John Wiley and Sons, Inc., 2007, ISBN 978-0-471-68477-0 s, V.19, pp.165–182, 2007.

Liang, J. R., Liao, W. H., **“Piezoelectric Energy Harvesting and Dissipation on Structural Damping”**, Journal of Intelligent Material Systems and Structure, Vol. 20, pp. 515-527, 2009.

Priya, S., **“Advances in energy harvesting using low profile piezoelectric transducers”**. J. Electroceramic Paradiso, J., Starner T., “Energy scavenging for mobile and wireless electronics”, IEEE Perv.Comput. 4, pp. 18–27, 2005.

Rupp, C.J., Evgrafov, A., Maute, K. and Dunn, M.L., **“Design of Piezoelectric Energy Harvesting Systems: A Topology Optimization Approach Based on Multilayer Plates and Shells,”** Journal of Intelligent Material Systems and Structures, V.20 ,pp.1923-1939, 2009.

Rupp, C.J., Evgrafov, A., Maute, K. and Dunn, M.L., **“Design of Piezoelectric Energy Harvesting Systems: A Topology Optimization Approach Based on Multilayer Plates and Shells,”** Journal of Intelligent Material Systems and Structures, V.20 ,pp.1923-1939, 2009.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, CAPES, FAPEMIG e ao INCT-EIE.