



IV SINGEP

Simposio Internacional de Gest3o de Projetos, Inova3o e Sustentabilidade
International Symposium on Project Management, Innovation and Sustainability

ISSN: 2317 - 8302

SISTEMA DE GERAÇÃO E ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO TRANSDUTOR PIEZELÉTRICO NA FORMA PULSADA

FABRICIO MARQUI SANCHES
UNESP
fabriciosmf@yahoo.com.br

A CAPES



SISTEMA DE GERAÇÃO E ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO TRANSDUTOR PIEZELÉTRICO NA FORMA PULSADA

Resumo

Neste trabalho é investigada a viabilidade energética do emprego de *buzzers piezelétricos* e circuitos retificadores de onda completa em sistemas de *power harvesting* submetidos a esforços mecânicos causados pelo tráfego de veículos e/ou caminhar de pedestres, demonstrando a possibilidade de reutilização dessa energia no carregamento de baterias para alimentação de circuitos autônomos de monitoramento, indicação, iluminação, etc., em locais remotos, eliminando ou estendendo o tempo necessário entre recargas desses dispositivos. Para realização dos testes os PZTs são submetidos a impactos ocasionados por um cilindro pneumático controlado eletronicamente, sendo os resultados extraídos referentes à tensão elétrica, quantidade de carga e energia armazenada em função do tempo e relações de intensidade de força/pressão aplicadas sobre os PZTs. Ao final pode-se concluir a viabilidade da utilização de dispositivos simples em sistemas de *power harvesting* para geração de energia através de excitações na forma pulsada e em baixas frequências, sendo os maiores valores de tensão e corrente (10,6 V e 60 μ A) obtidos com 8 PZTs, conectados em paralelo e excitados a 1 Hz, para uma força igual a 12,5 Newtons.

Palavras-chave: Energia renovável; Power harvesting; Piezeletricidade;

Abstract

This paper investigated the energy viability of the use of piezoelectric buzzers and full-wave rectifier circuits in power harvesting subjected to mechanical stress caused by the traffic of vehicles and / or walking pedestrian systems, demonstrating the possibility of re-use of energy in the battery charging to power autonomous monitoring circuits, display, illumination, etc., in remote locations, eliminating or extending the time between recharges of these devices. For achievement of the tests PZTs are subjected to impacts caused by a pneumatic cylinder controlled electronically, and the extracted results relating to the voltage, amount of charge and energy stored in function of time and strength intensity ratios / pressure applied to the PZTs. At the end we can conclude the feasibility of using simple devices in power harvesting systems to generate energy through excitations in pulsed manner and at low frequencies, with higher voltages and current (10.6 V and 60 μ A) PZTs obtained with 8 connected in parallel and excited at 1 Hz for a force of 12.5 Newtons.

Keywords: Renewable energy; Power harvesting; Piezoelectricity;



1 Introdução

A maior parte da energia elétrica consumida é gerada em grandes instalações centralizadas movidas a combustíveis fósseis, fissão nuclear ou água corrente. Com o crescente aumento no cenário atual pelo interesse em sustentabilidade energética a busca por fontes renováveis alternativas de energia vêm ganhando importância. Vários estudos foram e estão sendo desenvolvidos na área de energias alternativas renováveis (solar, térmica, eólica, cinética, vibração, eletromagnética, etc), contudo infelizmente ainda são utilizadas em pequenas quantidades. Essa técnica de coleta e armazenamento destes tipos de energias é conhecida na literatura como *energy harvesting* (ANTON et al., 2007), ou *power harvesting*, sendo os equipamentos destinados a esse fim conhecidos como *harvesters* ou “colhedores”, caracterizados por converter, armazenar e/ou redirecionar a energia coletada para outras aplicações.

Dentre as várias áreas de pesquisa do processo de geração e armazenamento de energia elétrica a partir de fontes renováveis, a proveniente de vibrações mecânicas em diferentes áreas como construção civil, sistemas mecânicos, eletromecânicos dentre outras, vem crescendo drasticamente. Tendo assumido um papel importante, principalmente devido à utilização dos materiais piezelétricos por possuírem a capacidade de gerar eletricidade ao serem deformados (ANTON & SODANO, 2007).

O estudo de *power harvesting* apresenta várias vertentes estudadas pelos pesquisadores, das quais podem ser citadas. A otimização de circuitos conversores/extratores (*harvesting*) de modo a diminuir o consumo de energia aumentando a eficiência energética do sistema. E do desenvolvimento de sistemas autônomos alimentados por sistemas de *power harvesting*, que monitoram determinado tipo de grandeza física enviando dados adquiridos para uma unidade fixa/móvel de monitoramento, esses sistemas tem por tendência a busca pela autonomia energética, ou seja, a alimentação dos circuitos serem dadas exclusivamente pelo gerador piezelétrico mediante as deformações mecânicas aos quais são submetidos. (DUTOIT, N. E, 2005)

O objetivo principal deste trabalho é investigar a viabilidade do emprego de circuitos eletrônicos e transdutores piezelétricos de baixo custo já conhecidos na literatura (retificador de onda completa e *buzzer* piezelétrico PZT-5A) em sistemas de *power harvesting*, para reaproveitando da energia proveniente de esforços mecânicos (deformações mecânicas de curta duração) causados pelo tráfego de veículos e/ou caminhar de pedestres tanto em ruas quanto rodovias no carregamento de baterias para alimentação de circuitos autônomos de monitoramento, indicação, iluminação, etc. em locais remotos, eliminando ou estendendo o tempo necessário entre recargas desses dispositivos.

A energia extraída é armazenada em um capacitor de modo a se obter os valores de tensão, corrente, energia, carga armazenada e ainda a intensidade de força e pressão aplicadas sobre os PZTs, quantificada esta por uma célula de carga.

Para realização dos testes os PZTs serão submetidos a duas frequências de impactos causado pelo atuador pneumático controlado eletronicamente (0,5 Hz e 1 Hz), sendo utilizado diferentes quantidades de PZTs (2, 4 e 8) ligados em série e paralelo.

2 Referencial Teórico

O efeito piezelétrico (do grego piezen, pressionar), demonstrado pela primeira vez em 1880 por Jacques e Pierre Curie, pode ser definido como a capacidade de alguns materiais gerarem energia elétrica quando submetidos a esforços mecânicos, bem como a capacidade de se deformarem quando impostos a uma diferença de potencial (CROSS & HEYWANG, 2008).



De todos os materiais cristalinos existentes somente os não centrossimétricos podem apresentar o fenômeno da piezeletricidade, ou seja, ao nível da célula unitária o centro de cargas negativas não pode coincidir com o centro de cargas positivas.

Segundo Rosana (2007), dos minerais que possuem esta propriedade, o quartzo é o mais expressivo, pois ao se aplicar pequenas pressões paralelamente a um de seus eixos, produzirá uma corrente elétrica capaz de ser detectada.

Alguns dos materiais piroelétricos são também ferroelétricos por terem a habilidade de mudar a direção da polarização espontânea na direção de um campo elétrico externo, que quando retirado o material apresentará polarizado nessa direção (polarização remanescente). Essa característica é a responsável por possibilitar a utilização de cerâmicas e polímeros como materiais piezelétricos.

Atualmente existem vários materiais piezelétricos, como o polímero PVDF (*Poly-Vinilidene Fluoride*), compósito MFC (*Macro Fiber Composite*), cerâmica PZT (*Lead Titanate Zirconate*). O uso mais comum é o das cerâmicas piezelétricas constituídos principalmente de óxido de chumbo, zircônio e titânio (PEDERSEN, 2011). Uma das vantagens do PZT reside no fato de apresentar grande rigidez, da ordem de 70 GPa, sendo idealmente indicado na confecção de atuadores. Já o PVDF, cujas propriedades piezelétricas foram descobertas por Kawai após 1960, é um polímero piezelétrico robusto e maleável, que pode ser produzido em geometrias complexas e extremamente delgadas. Com todas essas propriedades o PVDF é altamente indicado para sensoriamento distribuído.

Como já mencionado esses materiais possuem a capacidade de quando submetidos a uma deformação mecânica gerarem cargas elétricas em suas faces, a esse efeito se dá o nome de efeito piezelétrico direto, como ilustrado na Figura 1.

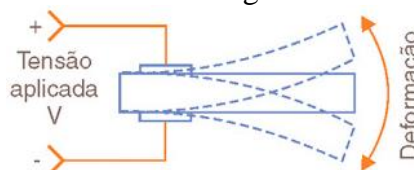


Figura 1. Cargas elétricas produzidas por esforço mecânico.

Fonte: MECATRONICA FÁCIL. (2013). Transdutores piezoelétricos, Ano 6 - N°40

O efeito piezelétrico indireto ocorre devido ao fato de que materiais piezelétricos exibem um efeito recíproco, quando um campo elétrico é aplicado ele produz uma deformação mecânica, alongando-se ou mudando sua espessura, conforme ilustra a Figura 2.

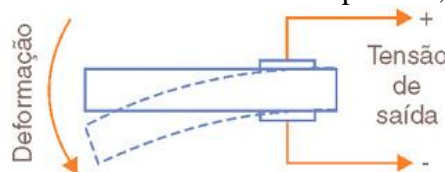


Figura 2. Deformação mecânica resultante de tensão elétrica.

Fonte: MECATRONICA FÁCIL. (2013). Transdutores piezoelétricos, Ano 6 - N°40

O acoplamento eletromecânico de um material piezelétrico linear pode ser parametrizado por três variáveis: a compliância mecânica “ s ”, permissividade dielétrica “ ϵ ” e coeficiente piezelétrico de deformação “ d ”. Tanto o efeito piezelétrico direto quanto o inverso podem ser expressos como uma relação entre tensão mecânica “ T ”, deformação “ S ”, campo elétrico “ E ” e deslocamento elétrico “ D ”. A compliância mecânica e a permissividade dielétrica são apresentadas para serem funções de uma condição de contorno mecânica e elétrica respectivamente, sendo especificadas quando se escrevem esses parâmetros (LEO, 2007).



Considerando a simetria existente no estado de tensão e deformação mecânica do material, ao invés de nove elementos independentes de deformação e tensão, restaram apenas seis elementos independentes. Equações (1 e 2).

$$\begin{Bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & s_{14} & s_{15} & s_{16} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} & s_{24} & s_{25} & s_{26} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} & s_{34} & s_{35} & s_{36} \\ s_{41} & s_{42} & s_{43} & s_{44} & s_{45} & s_{46} \\ s_{51} & s_{52} & s_{53} & s_{54} & s_{55} & s_{56} \\ s_{61} & s_{62} & s_{63} & s_{64} & s_{65} & s_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \\ d_{41} & d_{42} & d_{43} \\ d_{51} & d_{52} & d_{53} \\ d_{61} & d_{62} & d_{63} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Equação do sensor: Efeito direto

$$\begin{Bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Equação do atuador: Efeito inverso

Considerando a simetria associada com as propriedades elásticas, elétricas e eletromecânicas e o fato dos materiais piezelétricos serem ortotrópicos, ou seja, suas propriedades térmicas são únicas e independentes nas três direções mutuamente ortogonais. As Equações podem ser escritas em notação matricial compacta, dadas pelas equações 3 e 4.

$$S = s^E T + d^l E \quad (3)$$

$$D = d T + \varepsilon^T E \quad (4)$$

Em aplicações de extração e armazenamento de energia o modo de operação do elemento piezelétrico é definido através do coeficiente piezelétrico, utilizando-se comumente d_{33} ou d_{31} . O primeiro índice indica a direção onde o campo elétrico é obtido e o segundo a direção onde as forças são aplicadas.

Na Figura 3 são apresentados os dois modos mais utilizados em extração e armazenamento de energia.

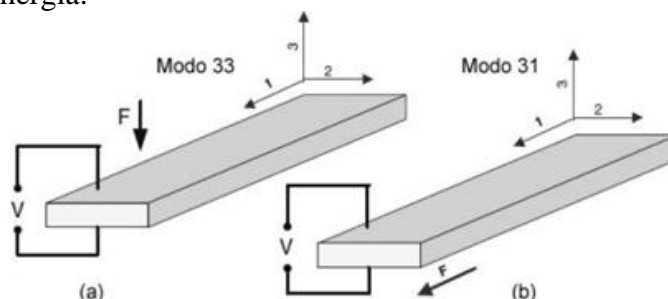


Figura 3. Modos de operação do elemento piezelétrico: (a) 33; (b) 31

Fonte: Adaptado de PRIYA, S., & INMAN, D. (2008). Energy harvesting technologies. New York: Springer.

No modo de operação "33", quando o dispositivo é submetido a uma deformação na direção "3", gerando um campo elétrico também na direção "3". A aplicação desse modo assume a existência de algumas condições de contorno específicas.



Em geral, foca-se a análise nas equações da deformação mecânica e do deslocamento elétrico, equações 5 e 6 respectivamente.

$$S_3 = \frac{1}{Y_3^E} T_3 + d_{33} E_3 \quad (5)$$

$$D_3 = d_{33} T_3 + \varepsilon_{33}^T E_3 \quad (6)$$

O coeficiente de acoplamento eletromecânico “ K ” indica a habilidade do material piezelétrico converter energia mecânica em energia elétrica ou vice-versa. Para um transdutor com um modo de operação “33” o coeficiente de acoplamento é dado por:

$$K_{33} = \frac{d_{33} \sqrt{Y_3^E}}{\sqrt{\varepsilon_{33}^T}} = \frac{d_{33}}{\sqrt{s_{33}^E \varepsilon_{33}^T}} \quad (7)$$

3 Metodologia

Para realização dos testes em laboratório o circuito eletrônico (CI retificador de onda completa) é alimentado eletricamente pelos piezelétricos dispostos sobre uma superfície de borracha, donde são submetidos a impactos mecânicos por um atuador eletropneumático dotado com uma “sapata” de nylon retangular de 7 cm por 15 cm (Figura 4), este atuador controlado eletronicamente com circuito temporizador foi construído com objetivo de simular os impactos mecânicos causados pelo caminhar de pedestres e/ou tráfego de veículos.

Para o dispositivo de extração de energia foi utilizado o CI retificador de onda completa Db107 por apresentar menor queda de tensão do que o retificador a diodos e o capacitor de 100 uF/25 V.

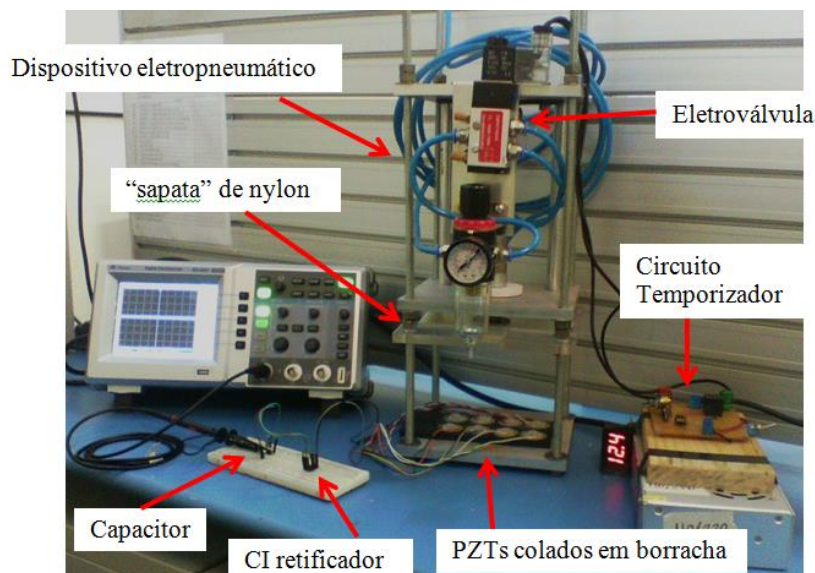


Figura 4. Imagem do layout dos equipamentos, circuitos e dispositivo utilizados.
Fonte: Elaboração do próprio autor.

O elemento piezelétrico utilizado (Figura 5) escolhido principalmente por ser de fácil aquisição e baixo custo, constitui-se de um atuador já pronto para uso, isto é, a cerâmica piezelétrica (PZT-5A) já está colada sobre o substrato de metal formando um conjunto atuador-membrana. (MURATTA, 2012)



Figura 5. Estrutura do diafragma piezelétrico.

Fonte: Adaptado de MURATA. (2012). Piezoelectric Sound Components. Murata Manufacturing Co., Ltd.

As características mecânicas da cerâmica piezelétrica (PZT-5A) e da membrana metálica são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1:

Principais características do buzzer piezelétrico PZT-5A

Material	Parâmetro	Valor	Simbologia
Latão	Coefficiente de Poisson	0,34	ν
	Módulo de elasticidade (GPa)	100 - 91	Y
	Densidade (Kg/m ³)	8600 - 8400	ρ
	Diâmetro (mm)	27	d
	Espessura (mm)	0,2	e
Material Piezelétrico	Constante dielétrica relativa (Vmm/N)	830	$\epsilon_{33}^s / \epsilon_0$
	Constantes elásticas “módulo de elasticidade” 10 ¹⁰ (N/m ²)	12,10	c
		11,10	c_{33}^E
	Constante Piezelétrica (C/m ²)	15,8	e_{33}
	Acoplamento eletromecânico	0,6	K_p
	Densidade (Kg/m ³)	7650 - 7700	ρ
	Módulo de elasticidade (GPa)	65	Y
Diâmetro (mm)	23	d	
Membrana (Epoxy)	Coeficiente de Poisson	0,3	ν
	Módulo de elasticidade (GPa)	62,75	Y

Fonte: MORGAN-MATROC. Piezoelectric ceramics: Properties and Applications, Morgan Electro Ceramics Inc. technical publication.

Para quantificar a intensidade do esforço mecânico, pressão aplicada sobre os PZTs e posteriormente realizar uma relação entre energia gerada e pressão aplicada foi construído um circuito de aquisição de dados (Figura 6), composto de uma célula de carga e CI amplificador de instrumentação (Ina122p). O circuito foi calibrado para uma carga máxima de 10 Kg, possuindo uma sensibilidade de 0,4 V/Kg.

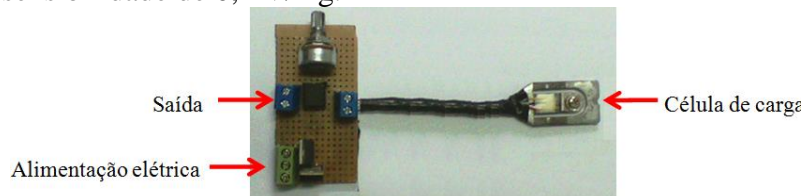


Figura 6. Circuito de aquisição da intensidade de força aplicada sobre os PZTs.

Fonte: (elaboração do próprio autor).

4 Análise dos resultados

Os dados foram obtidos com osciloscópio digital para tensão, carga e energia armazenada no capacitor em função do tempo, mediante a variações de duas frequências de acionamento do pistão pneumático (0,5 Hz e 1 Hz), piezelétricos conectados diretamente ao



osciloscópio, conectados ao retificador e também ao dispositivo de armazenamento (capacitor). Foram testadas ainda três quantidades de geradores piezelétricos (2, 4 e 8) e conectados em série e paralelo, com o intuito de verificar qual configuração é mais eficiente.

As formas de onda ilustradas são referentes à intensidade de carga aplicada (Figura 7) quantificada pelo circuito de aquisição, entrada e saída (Figuras de 8 a 15) do circuito em aberto com retificador para frequência de acionamento iguais a 0,5 Hz e 1 Hz. Posteriormente são dispostos na tabela 2 os dados de tensão, corrente, energia e carga em função da curva de carga do capacitor para um tempo de cinco minutos com o intuito de compara-los, sendo visualizadas ainda na tabela 3 as relações entre pressão mecânica aplicada e energia/tensão gerada.

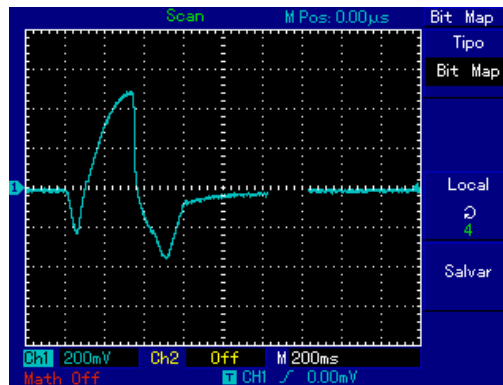


Figura 7. Sinal adquirido com o circuito de aquisição de dados.

Fonte: (elaboração do próprio autor).

De posse da carga máxima encontrada e área de contato dos PZTs com a “sapata” de nylon é possível calcular as pressões aos quais os mesmos foram submetidos.

1º caso: Para 2 PZTs, esforço máximo de 1,25 Kg, área de contato com 1,57 cm² se obteve uma pressão de aproximadamente 7,96 N/cm².

2º caso: Para 4 PZTs, esforço máximo de 1,25 Kg, área de contato com 3,14 cm² se obteve uma pressão de aproximadamente 3,98 N/cm².

3º caso: Para 8 PZTs, esforço máximo de 1,25 Kg, área de contato com 6,28 cm² se obteve uma pressão de aproximadamente 1,99 N/cm².

Nas Figuras de 8 a 11 são ilustradas as respostas para 2 PZTs em aberto e com retificador, configuração série e paralelo e com frequências de acionamento iguais a 0,5 Hz e 1 Hz, respectivamente.

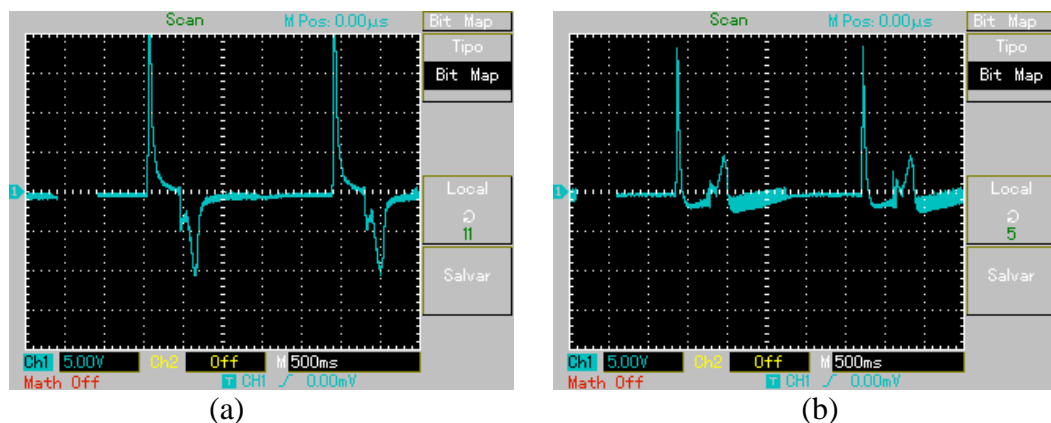


Figura 8. Respostas de 2 PZTs em série excitados com frequência de 0,5 Hz: (a) sem retificador; (b) com retificador.

Fonte: (elaboração do próprio autor).

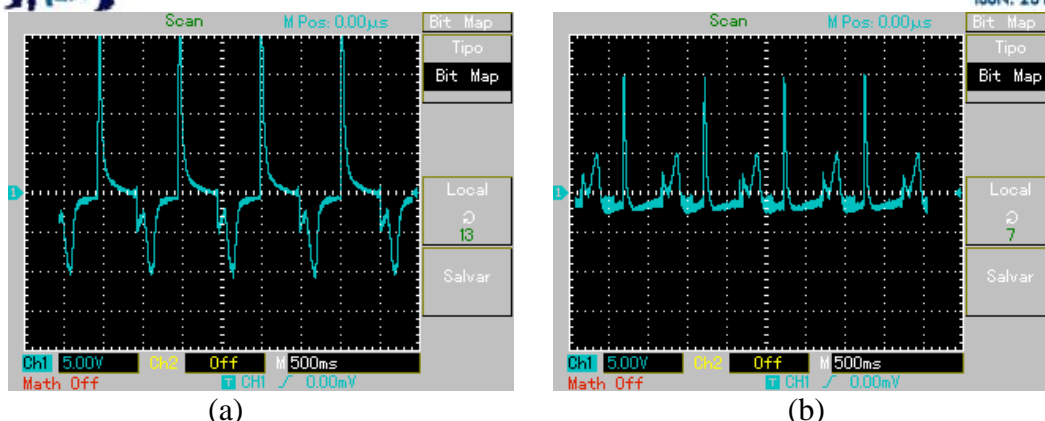


Figura 9. Respostas de 2 PZTs em série excitados com frequência de 1 Hz: (a) sem retificador; (b) com retificador.

Fonte: (elaboração do próprio autor).

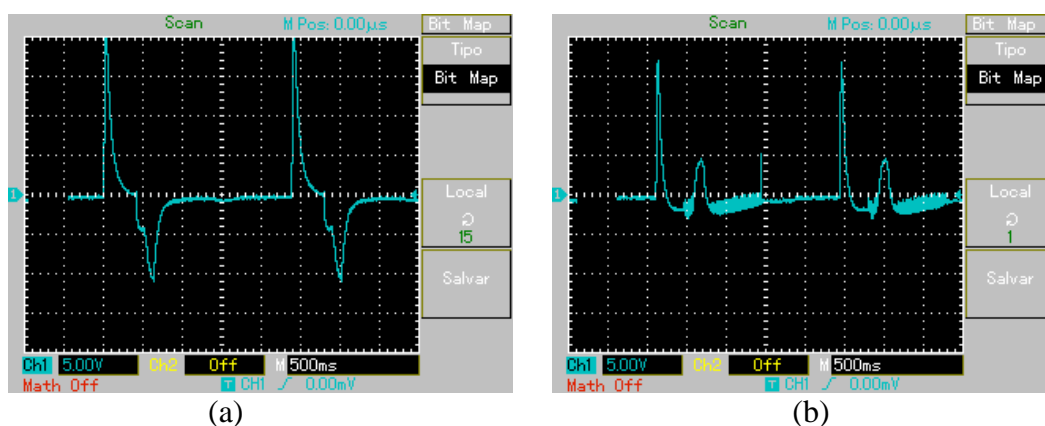


Figura 10. Respostas de 2 PZTs em paralelo excitados com frequência de 0,5 Hz: (a) sem retificador; (b) com retificador.

Fonte: (elaboração do próprio autor).

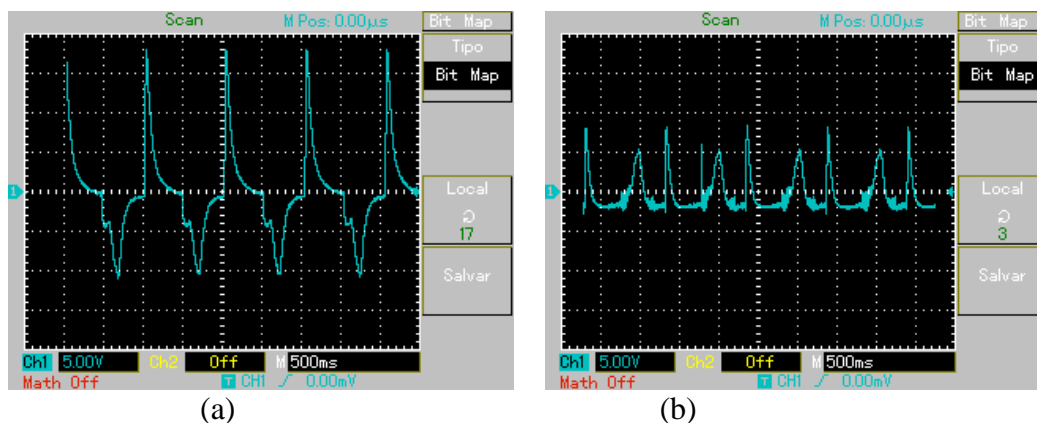
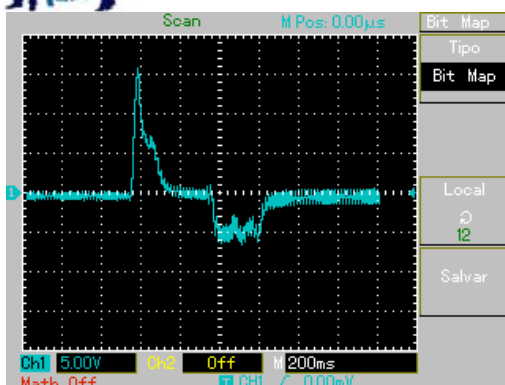


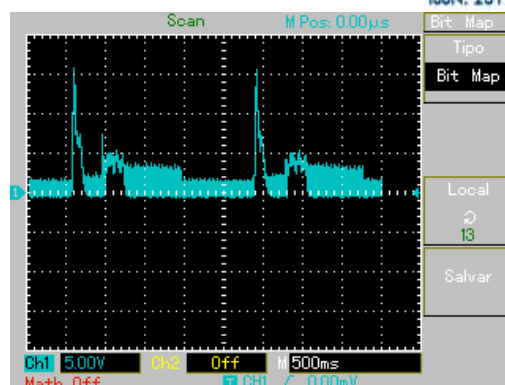
Figura 11. Respostas de 2 PZTs em paralelo excitados com frequência de 1 Hz: (a) sem retificador; (b) com retificador.

Fonte: (elaboração do próprio autor).

Nas Figuras de 12 a 15 são ilustradas as respostas para 4 PZTs em aberto e com retificador, configuração série e paralelo com frequências de acionamento de 0,5 Hz e 1 Hz, respectivamente.



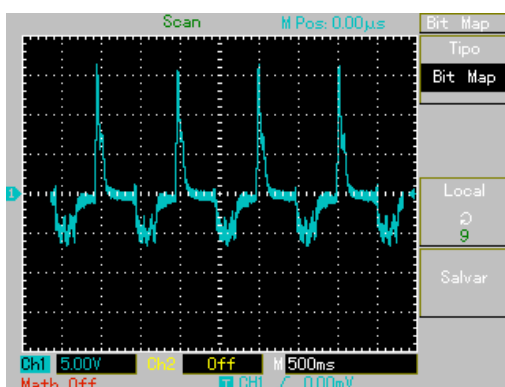
(a)



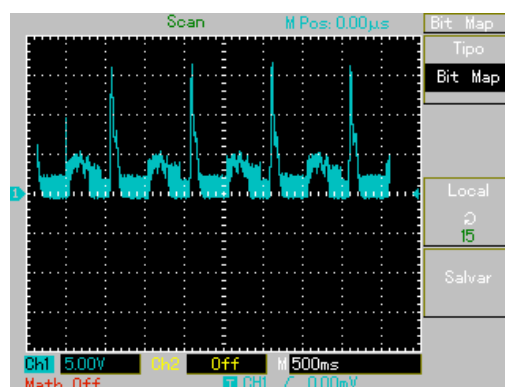
(b)

Figura 12. Respostas de 4 PZTs em série excitados com frequência de 0,5 Hz: (a) sem retificador; (b) com retificador.

Fonte: (elaboração do próprio autor).



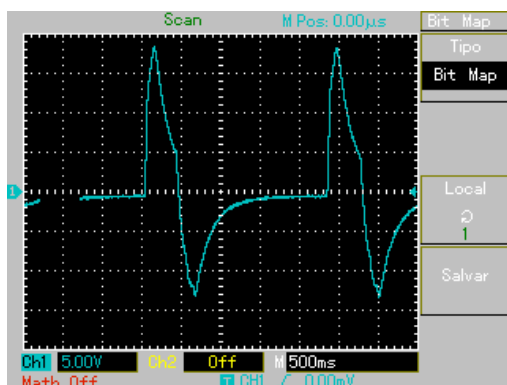
(a)



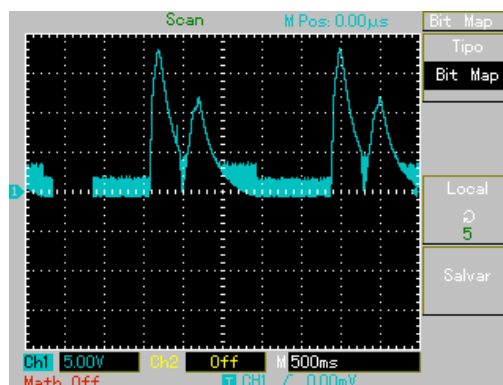
(b)

Figura 13. Respostas de 4 PZTs em série excitados com frequência de 1 Hz: (a) sem retificador; (b) com retificador.

Fonte: (elaboração do próprio autor).



(a)



(b)

Figura 14. Respostas de 4 PZTs em paralelo excitados com frequência de 0,5 Hz: (a) sem retificador; (b) com retificador.

Fonte: (elaboração do próprio autor).

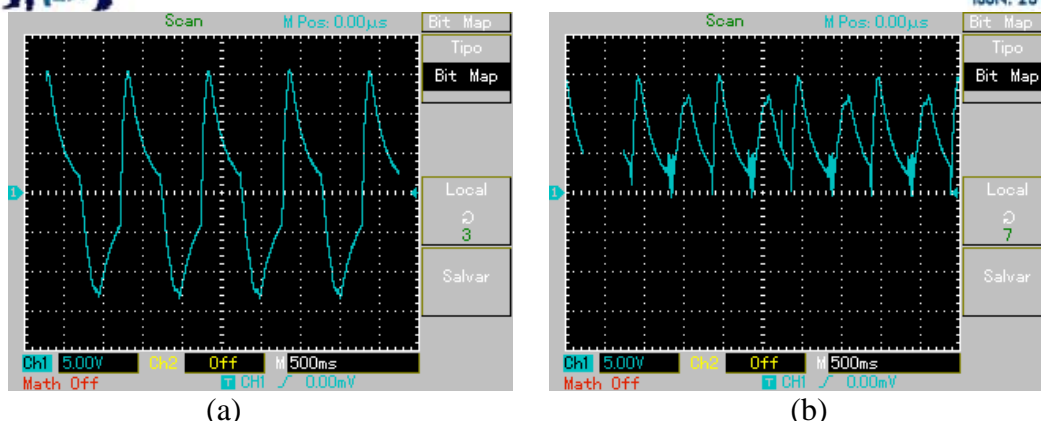


Figura 15. Respostas de 4 PZTs em paralelo excitados com frequência de 1 Hz: (a) sem retificador; (b) com retificador.

Fonte: (elaboração do próprio autor).

A Tabela 2 apresenta os valores obtidos através das aquisições de dados realizadas para tensão, carga e energia acumulada no capacitor com tempo máximo de 5 minutos para as diferentes configurações e parâmetros testados.

Tabela 2:

Valores de tensão, carga e energia acumulada no capacitor para um tempo de carga igual a 5 minutos

Frequência (Hz)	2 PZTs Série		2 PZTs Paralelo		4 PZTs Série		4 PZTs Paralelo		8 PZTs Série		8 PZTs Paralelo	
	0,5	1	0,5	1	0,5	1	0,5	1	0,5	1	0,5	1
Tensão (V)	0,84	1,93	1,92	3,65	1,52	2,44	4,2	6	3,9	4,4	8,9	10,6
Corrente (µA)	5,1	7,9	7,6	9,8	18,7	20	19	29,4	38,6	43,1	42	60
Carga (µC)	84	193	192	365	152	244	420	600	390	440	890	1060
Energia (µJ)	35,2	186,2	184,3	666,1	115,5	297,6	822	1800	760,5	968	3961	5618

Fonte: (elaboração do próprio autor).

As relações feitas em relação à tensão, energia, número de PZTs, área e pressão considerando a força de 12,5 Newtons sobre os PZTs bem como as respectivas áreas e pressões (1,57 cm² e 7,96 N/cm²) para 2 PZTs, (3,14 cm² e 3,98 N/cm²) para 4 PZTs e (6,28 cm² e 1,99 N/cm²) para 8 PZTs são visualizados na Tabela 3.



Tabela 3:

Valores de tensão e energia acumulada em função da área e da pressão

Frequência Hz	2 PZTs Série		2 PZTs Paralelo		4 PZTs Série		4 PZTs Paralelo		8 PZTs Série		8 PZTs Paralelo	
	0,5	1	0,5	1	0,5	1	0,5	1	0,5	1	0,5	1
Tensão/n° PZTs V/PZTs	0,42	0,96	0,96	1,82	0,38	0,61	1,05	1,5	0,48	0,55	1,4	1,32
Tensão/Área V/cm ²	0,53	1,22	1,22	2,32	0,48	0,77	1,33	1,91	0,62	0,7	1,41	1,68
Energia/Área μJ/cm ²	22,4	118,5	117,3	424,2	36,7	94,7	261,7	573,2	121,1	154,1	630,7	894,5
Tensão/Pressão V/(N/cm ²)	0,10	0,24	0,24	0,45	0,38	0,61	1,05	1,5	1,95	2,21	4,47	5,32
Energia/Pressão μJ/(N/cm ²)	4,4	23,3	23,1	83,6	29,0	74,7	206,5	452,2	382,1	486,4	1990,4	2823,1

Fonte: elaboração do próprio autor

5 Conclusões e Considerações finais

Ao final dos testes realizados pode-se concluir que:

É viável a utilização de circuitos simples e transdutores piezelétricos de baixo custo em sistemas de *power harvesting* excitados de forma intermitente (sem forma definida) oriundos da simulação de impactos da passagem de veículos e/ou pedestres. Visto que, mesmo em baixas frequências de excitação e quantidades de PZTs é possível extrair energia desses elementos.

Os resultados de maior expressão em termos de tensão, quantidade de carga e energia armazenada no capacitor por área para a mesma intensidade de força aplicada foram alcançadas para excitação de 1 Hz, maior quantidade de geradores (8 PZTs) e conectados em paralelo.

Em relação à quantidade de PZTs (2, 4 e 8) para uma mesma frequência de excitação (0,5 Hz ou 1 Hz) e configuração de ligação (série ou paralelo), as respostas não são lineares, ou seja, dobrando a quantidade de PZTs ou a frequência de excitação os valores não dobram, mas, em sua maioria permanecem próximos ao dobro.

Por fim para que se possam obter valores de tensão e corrente maiores, sendo possível o emprego desses geradores em circuitos reguladores de tensão/corrente (conversor DC-DC) utilizados no carregamento de baterias para fins autônomos, deve-se utilizar a maior quantidade de PZTs possível conectados eletricamente em paralelo, estando estes divididos em menores quantidades (células) e conectadas na entrada de cada retificador, que por sua vez tem sua saída conectada em paralelo aos demais retificadores correspondentes às demais células existentes.

Essa configuração deve ser adotada pelo fato dos PZTs como mencionado inicialmente apresentarem efeito reverso, ou seja, se com a passagem do veículo/pessoa for pressionado uma pequena quantidade destes, os demais conectados diretamente em paralelo que não o foram estariam consumindo energia elétrica e a convertendo em energia mecânica (deformação), resultando no não armazenamento dessa energia nos dispositivos de armazenamento.

6 Referências

ANTON, S. R., & SODANO, H. A. (2007) A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003–2006). *Smart Materials and Structure* (pp. R1–R21). Bristol, v.16, n.3. Disponível em: stacks.iop.org/SMS/16/R1



CROSS, L. E., & Heywang, W. (2008). Piezoelectricity: Evolution and Future of a Technology, vol. 114, (pp. 1–4). Springer, chapter Introduction.

DUTOIT, N. E. (2005). Modeling and design of a MEMS piezoelectric vibration energy harvester. Dissertação (Mestrado) – University of Cambridge, Cambridge. Disponível em: http://robotics.caltech.edu/~ndutoit/wiki/images/1/1b/MS_thesis.pdf

LEO, D. J. (2007). Engineering analysis of smart material systems. (pp. 1-297). Hoboken: John Wiley & Sons.

MECATRONICA FÁCIL. (2013). Transdutores piezoelétricos. São Paulo, SP, Ano 6 - N°40 Disponível em: <http://www.mecatronicaatual.com.br/educacao/969-transdutores-piezoeltricos?tmpl=component&print=1&layout=default&page=>

MORGAN MATROC. Piezoelectric ceramics: Properties and Applications, Morgan Electro Ceramics Inc. technical publication.

MURATA. (2012). Piezoelectric Sound Components. Murata Manufacturing Co., Ltd. Disponível em: www.murata.com/products/catalog/pdf/p15e.pdf

PEDERSEN, J. H. (2011). Low frequency low voltage vibration energy harvesting converter. Dissertação (Mestrado) – Universidade Técnica da Dinamarca, Kongens Lyngby. New York: Springer. Disponível em: http://www.delta.dk/imported/images/DELTA_Web/documents/Innovation/Master_Thesis_Johan_Pedersen_s052402.pdf