

## GERAÇÃO DE ENERGIA POR PIEZELETRICIDADE

Karina Mayumi Tsuruta, karina@mecanica.ufu.br

Carlos Alberio Gallo, gallo@ufu.br

Roberto Mendes Finzi, finzi@mecanica.ufu.br

Domingos Alves Rade, domingos@ufu.br

**Resumo:** Métodos alternativos de geração de energia têm sido intensivamente estudados recentemente. Um desses métodos baseia-se na utilização de transdutores piezoelétricos, utilizando o efeito piezeletrico direto, que permite produzir pequenas quantidades de energia pelo movimento vibratório. No entanto, como o performance destes materiais podem variar significativamente com a temperatura, tornando-se importante avaliar esta influência em relação a taxa de geração de energia. Assim, o objetivo deste estudo é analisar a quantidade de energia elétrica gerada, considerando diferentes formas de excitação (harmônica e aleatória), por excitação pela base e avaliar a performance de um sistema de geração de energia piezoelétrico, considerando a evolução da temperatura gerada por efeitos de dissipação mecânica e resistivas. Para isso, foi construída uma estrutura que consiste de dois transdutores piezoelétricos colados a uma placa de alumínio, a qual foi harmonicamente excitada pela base por um excitador eletrodinâmico. A temperatura do recinto foi mantida constante. Os transdutores piezoelétricos foram conectados a um circuito retificador e a energia gerada na experiência foi monitorada por meio de uma interface desenvolvida no software LABVIEW®. A evolução da temperatura foi medida com o auxílio de um termopar colado na superfície no transdutor piezoelétrico. Os resultados experimentais foram processados a fim de quantificar a energia elétrica gerada como uma função do tempo de funcionamento dos sistema piezoelétrico.

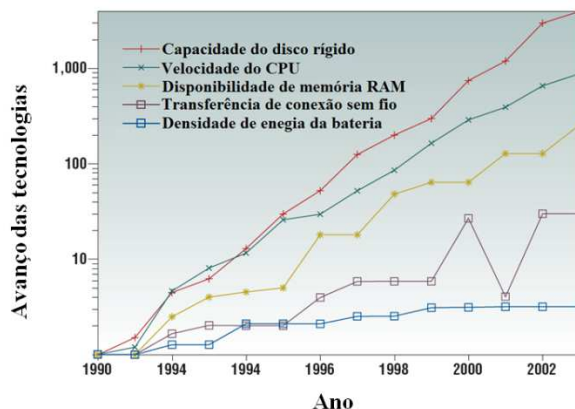
**Palavras-chave:** transdutores piezoelétricos, geração de energia, temperatura

### 1. INTRODUÇÃO

O termo geração de energia (energy harvesting) é o processo no qual um dispositivo captura e pode armazenar energia proveniente de fontes externas como vibrações, ondas eletromagnéticas, energia solar, etc. A primeira observação de geração de energia na forma de carga elétrica foi observada em 1880 por Pierre e Jacques Currie, estes previram e provaram experimentalmente que certos cristais podem exibir cargas elétricas na superfície quando sujeitos a tensões mecânicas, este fenômeno foi chamado de piezeletricidade.

Devido ao aumento da demanda em relação à mobilidade de dispositivos eletrônicos, o campo de pesquisa em relação às formas alternativas de geração de energia de baixa potência tem aumentado nos últimos anos. A utilização de geradores de energia pode estender a vida operacional de dispositivos elétricos tradicionalmente alimentados por baterias, ou mesmo, substituí-las. Visto que a evolução da tecnologia de baterias se manteve praticamente estagnada na década passada em relação aos sistemas computacionais como pode ser observado na Fig. 1 (PARADISO e STARNER, 2005).

Os geradores de energia de baixa potência podem ser particularmente vantajosos em sistemas com acesso limitado, como implantes biomédicos e estruturas as quais micro sensores sem fio foram incorporados, pois não precisam ser substituídos periodicamente como as baterias. E como as tecnologias sem fio necessitam uma alta densidade de energia para receber e transmitir dados, além de terem que funcionar permanentemente, a troca das baterias fica inviável, por isso a utilização de sistema que geram energia proveniente de fontes externas é altamente vantajoso.



**Figura 1. Progresso da tecnologia dos sistemas computacionais e densidade de energia das baterias (adaptado de Paradiso e Starner, 2005).**

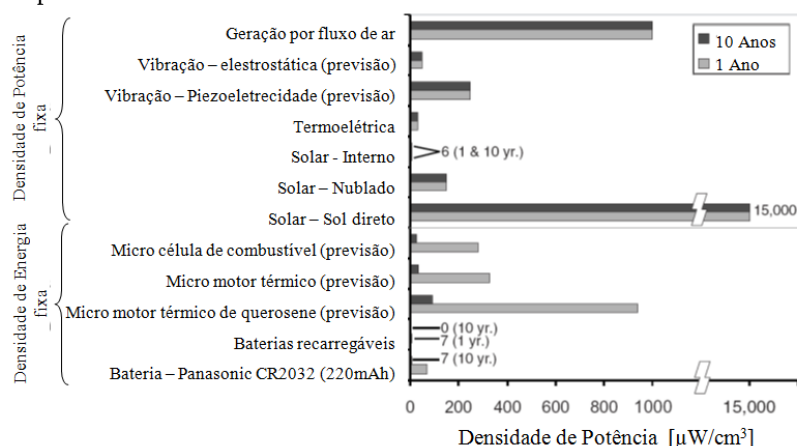
Os dispositivos de produção de energia são projetados para capturar a energia disponível no ambiente adjacente convertendo-a em energia elétrica utilizável. Na Tab. 1 são apresentadas algumas fontes de energia que podem gerar energia.

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

| Fonte de energia | Exemplos                                                                                                                                 |
|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Corpo Humano     | Respiração, pressão sanguínea, exalação, calor do corpo, caminhar, movimento do braço, movimento dos dedos, corrida, nado, comer, falar. |
| Veículos         | Avião, ANT, Helicóptero, Trem. Pneus, pedais, freios, amortecedores, turbinas.                                                           |
| Estruturas       | Pontes, rodovias, túneis, estruturas agrícolas. Interruptor, dutos, limpeza.                                                             |
| Indústria        | Motores, compressores, bombas, ventiladores. Transportadores, vibração das máquinas.                                                     |
| Ambiente         | Vento, Solar, Variação de temperatura, temperatura diária., correntes oceânicas, ondas acústicas, sinais RF                              |

Os tipos de fontes de energia existentes podem ser divididos em dois grupos (Figura 1.2): fontes de densidade de energia fixa (ex. baterias) e fontes de potência fixa (geração de energia pelo ambiente). As Fontes de densidade de energia fixa possuem uma limitação na quantidade de energia disponível, pois 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, além dos mecanismos de conversão serem ecológicos (os processos de conversão não emitem poluição), e as fontes de energia tem uma vida útil potencialmente infinita.

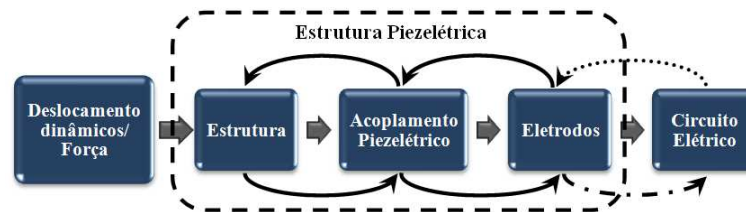
Várias pesquisas em geradores piezelétricos de energia tem sido focada na maximização da máxima potência gerada através de modificações estruturais, sintonização na frequência de ressonância e adaptações no circuito elétrico. Em aplicações práticas, estes materiais piezelétricos podem ser operados em várias temperaturas do ambiente, mas a pesquisa destes dispositivos foi realizada principalmente à temperatura ambiente. Uma vez que constantes de material de um material piezoelétrico dependem fortemente da temperatura, o desempenho do dispositivo piezoelétrico pode variar significativamente( *KIM et. al*, 2011),. *Kim et. al* (2011), desenvolveram um estudo experimental no qual variou-se a temperatura de câmara onde se encontrava um sistema de geração de energia piezelétrico, estes verificaram que com o aumento da temperatura do ambiente, a potência produzida pelo transdutor diminui. O objetivo deste trabalho é analisar a influência da geração de energia em relação à dissipação da energia mecânica e elétrica em forma de energia térmica nos transdutores piezelétricos.



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

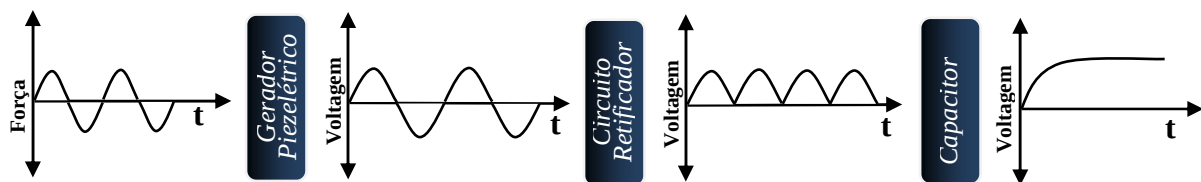
## 2. GERAÇÃO DE ENERGIA POR PIEZELETRICIDADE

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). Estes sistemas utilizam o efeito direto destes materiais piezelétricos, ou seja; a capacidade destes de gerar cargas elétricas quando deformados mecanicamente.



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

Na Fig.4 são descritos como funcionam os componentes básicos de um sistema de geração de energia. Primeiramente, assumiu-se que o dispositivo de geração de energia esteja sendo excitado por uma força harmônica, com isso o sinal oscilatório de saída do gerador piezelétrico é uma tensão harmônica, quando este sinal passa por um retificador, este produz uma tensão 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 (LEO, 2007).



**Figuras 4. Componentes do sistema piezelétrico de geração de energia (Adaptado de Leo, 2007).**

A Fig. 5 mostra um resumo das três formas de energia envolvidas nos sistemas de geração de energia piezelétrica, a energia mecânica, energia elétrica e energia térmica. As duas primeiras são ligadas bidirecionalmente ao transdutor piezelétrico. Pelo caminho 1 a energia mecânica é diretamente dissipada. Os caminhos 2 e 3 passam através da “ponte piezelétrica”, convertendo uma parte da energia mecânica em energia elétrica, que é armazenada e ao mesmo tempo, a energia mecânica e elétrica são convertidas em energia térmica pelos elementos de dissipação como amortecedores mecânicos e resistores elétricos (LIANG e LIAO, 2009).

A partir da transformação da energia mecânica em energia elétrica e térmica, a estrutura na qual o dispositivo de geração de energia piezelétrico está anexado é amortecida, visto que o amortecimento é a dissipação de energia de sistemas mecânicos. Por isso, os dispositivos de geração de energia piezelétricos são utilizados para atenuar os níveis de vibração, além de gerar energia elétrica (Harris, 2002; Lesieutre, et al.,2004).

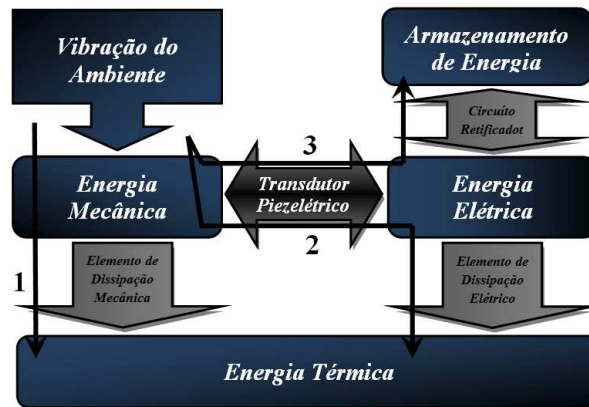
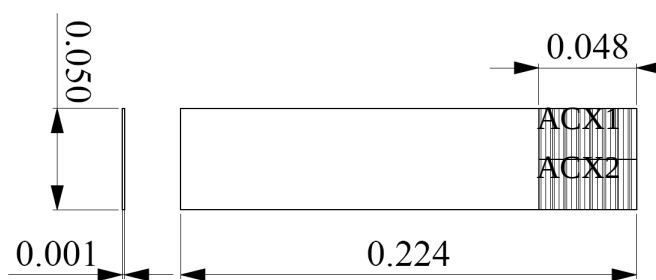


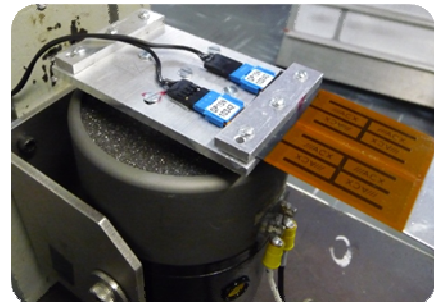
Figura 5. Ilustração dos fluxos de energia (adaptado de LIANG e LIAO, 2009).

### 3. METODOLOGIA

Para avaliar o desempenho de um sistema de geração de energia baseado no efeito da piezeletricidade, foi construída uma placa geradora de energia elétrica excitada pela base por um excitador eletrodinâmico (Fig. 6(a)). A placa de alumínio apresenta dimensões de 0,224 m x 0,050 m e espessura de 0,001 m. Duas pastilhas piezelétricas do tipo ACX-QP15N forma coladas na superfície da placa conforme ilustrado (Fig.6(b)).



(a)



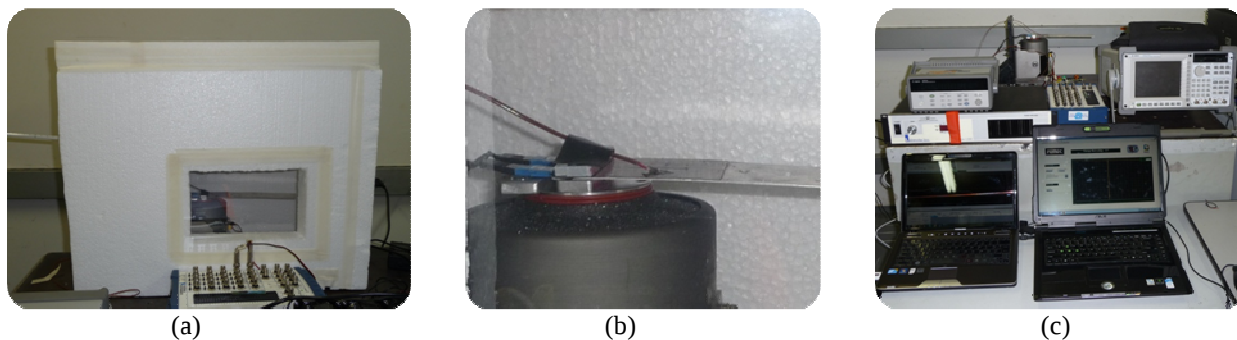
(b)

Figura 6. Placa de alumínio com as pastilhas piezelétricas: (a) Dimensões; (b) Transdutor piezelétrico tipo ACX.

Os equipamentos e materiais utilizados no experimento foram:

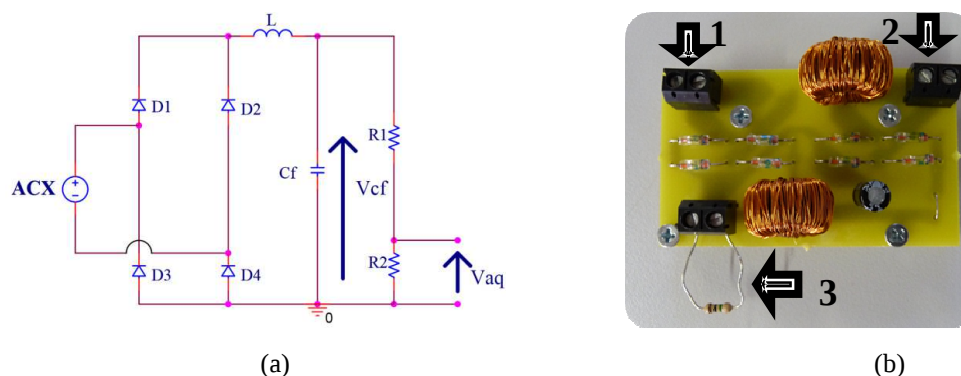
- Computador com o software LABVIEW® (Laboratory Virtual Engineering Workbench);
- Placa de aquisição de dados modelo USB-6259 (National Instruments);
- Excitador eletrodinâmico modelo ET-126B (LabWorks Inc.);
- Amplificador de potência modelo pa-138 (LabWorks Inc);
- Osciloscópio modelo Agilent 35670;
- Termopar tipo J;
- Unidades de aquisição/comutação de dados 34970.

A Fig. 7(a) ilustra o aparato experimental utilizado para geração de energia. O sistema sob investigação foi isolado termicamente do ambiente externo por uma caixa térmica feita de isopor. Através do osciloscópio, regulava-se a tensão RMS de excitação aplicada ao excitador eletrodinâmico, definida em 0,350 V. O amplificador de potência garantia os requisitos de energia necessários ao excitador eletrodinâmico. A energia produzida pelo transdutor (ACX1) foi monitorada em um computador com o Software LABVIEW®, com auxílio de uma placa de aquisição. O monitoramento da temperatura ambiente e interna à caixa térmica foi feita com um termômetro de precisão. A temperatura da pastilha piezelétrica foi medida com grande precisão usando um termopar conectado no transdutor piezelétrico, conforme Fig. 7(b), interligado ao sistema Agilent BenchLink Data Logger Pro®. A Fig. 7(c) apresenta a montagem experimental completa.



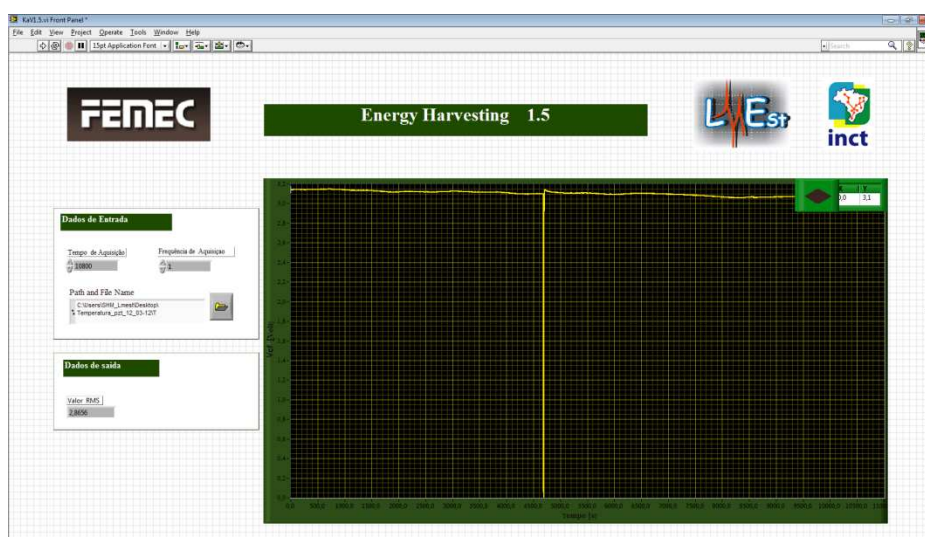
**Figura 7. (a) sistema de geração de energia isolado; (b) Termopar conectado na pastilha piezelétrica; (c) Aparato experimental.**

Conforme dito anteriormente, a leitura e cálculo da energia gerada pelo transdutor foi feita com o auxílio do software LABVIEW®. Um circuito retificador de onda completa foi usado para facilitar as medidas e cálculos. (Fig. 8). Foi projetado um circuito retificador padrão com duas entradas (indicado pelas setas 1 e 2 da Fig.8) para conexão dos transdutores piezelétricos, sendo que para cada entrada foi feito um circuito retificador padrão e uma saída (indicado pela seta 3) .



**Figura 7. (a) Circuito retificador padrão.**

Na Fig. 8 é apresentada a interface gráfica desenvolvida no LABVIEW® onde os dados de entrada são os valores da frequência de aquisição e o tempo de aquisição [s]. E os valores de saída são voltagem [V] e a tensão RMS [V] aplicada no excitador eletrodinâmico. O gráfico mostra a tensão elétrica sobre a resistência R2, utilizada para amostrar uma parcela da tensão gerada e retificada pelo sistema.

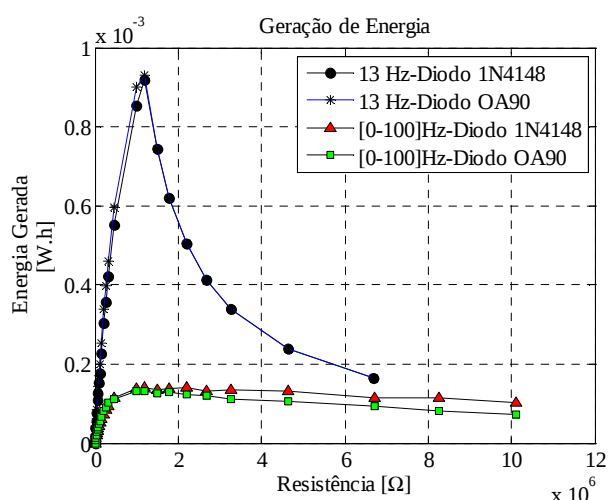


**Figura 8. Interface gráfica desenvolvida no LABVIEW®.**

Os dois ensaios realizados tiveram duração de 3 horas, sendo que foram medidos simultaneamente o tempo, a temperatura

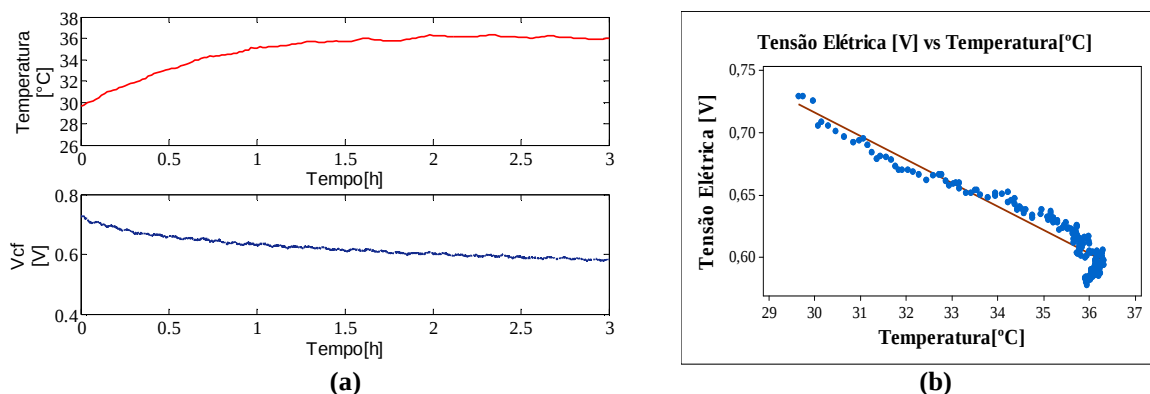
#### 4. RESULTADOS

Para esta verificação, a estrutura geradora de energia foi excitada pela base na primeira frequência de ressonância desta (13,5 Hz) e uma banda frequência randômica na faixa de [0-100] Hz. E a tensão eficaz (RMS) fornecida para o excitador eletrodinâmico foi de 0,35 V para excitação harmônica, e na excitação randômica a tensão RMS foi ajustada de modo que o valor não ultrapassasse 0,35 V. Os resultados mostraram o sistema de geração de energia excitado na frequência harmônica de 13,5 Hz produz mais energia que um sistema de excitando em uma banda de frequência randômica.



**Figura 9** – Gráfico de energia gerada na frequência de excitação do sistema em 13,5 Hz e randômica em bandas de frequência.

Conforme a metodologia, os sistemas de geração de energia piezoelétrico foram conectados a uma resistência equivalente de 31k $\Omega$ , e excitados mecanicamente pela base por uma frequência harmônica de 13,5 Hz para avaliar a taxa de geração de energia elétrica em relação à variação da temperatura devido à dissipação da energia mecânica e elétrica dos transdutores piezoelétricos. A partir da Fig. 10(a), verificou-se que houve uma diminuição da taxa de energia em relação ao aumento da temperatura do sistema. A partir dos resultados foi feito um tratamento estatístico dos dados, com isso, obteve-se o gráfico de regressão linear representado pela Fig. 10(b). O equação de regressão obtida mostrou-se ajustada com os dados obtidos, pois R-Sq e R-Sq(adj) ficaram próximos de 100%.



**Figura 10.** (a) Gráficos de tempo  $\times$  temperatura e tempo  $\times$  tensão Elétrica ; (b) Regressão Linear tensão elétrica  $\times$  temperatura

The regression equation is

Tensão Elétrica [V] = 1,284 - 0,01892 Temperatura [°C]

S = 0,0102997 R-Sq = 91,2% R-Sq(adj) = 91,1%

Analysis of Variance

| Source     | DF  | SS       | MS       | F       | P     |
|------------|-----|----------|----------|---------|-------|
| Regression | 1   | 0,196432 | 0,196432 | 1851,65 | 0,000 |
| Error      | 179 | 0,018989 | 0,000106 |         |       |
| Total      | 180 | 0,215421 |          |         |       |

## 5. CONCLUSÃO

Os resultados demonstram que o sistema de geração de energia excitado harmonicamente pela base gera mais energia que o sistema excitado em uma banda frequência randômica. Além disso, a taxa de energia gerada reduz com o aumento da temperatura. Tal redução decorre, principalmente, do aumento da impedância complexa do PZT (parte reativa).

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES, CNPq e ao Instituto Nacional de Ciências e Tecnologia em “Estruturas Inteligentes em Engenharia” (INCT-EIE) pelo financiamento da pesquisa.

## 7. REFERÊNCIAS

- Leo, D. J., “Engineering Analysis of Smart Material Systems”, John Wiley and Sons, Inc., 2007, ISBN 978-0-471-68477-0..
- Kim, S; Park, J., Ahn, H., Liu, D., Kim, D;” , “Temperature effects on output power of piezoelectric vibration energy harvesters”, *Microelectronics Journal*, Vol. 42, pp. 988–991, 2011.
- Lesieutre, G. A., Ottman, G. K., Hofmann, H., F., “Damping as a Result of Piezoelectric Harvesting”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 269, pp. 991-1001, 2004.
- 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.
- Harris, C.M. 2002. *Shock and Vibration Handbook*, McGraw-Hill, New York. ISBN 0-07-137081-1
- Paradiso, J., Starner T., “Energy scavenging for mobile and wireless electronic”s, *IEEE Perv. Comput.* 4, pp. 18–27, 2005.
- Priya, S., “Advances in energy harvesting using low profile piezoelectric transducers”. *J. Electroceramics*, V.19, pp.165–182, 2007.
- 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.