

MATERIAIS PIEZELÉTRICOS: UMA ANÁLISE DE SEU POTENCIAL COMO *ENERGY HARVESTING**

Isadora Coffani dos Santos de Siqueira¹
Jéssica de Deus Lima²
Matheus Bezerra de Moraes³
Victor Lins Cavalcante Garicots de Carvalho⁴
Vinicius Lima Barata Valentim⁵
Willy Ank de Moraes⁶

Resumo

Este artigo tem por objetivo a análise das propriedades e características dos materiais piezoelétricos sob a ótica da geração de energia limpa e renovável, baseando-se no aproveitamento de energia (*energy harvesting*). Por meio de pesquisa do acervo bibliográfico disponível de 2001 até 2015, foi possível reunir os principais estudos e características destes materiais, sendo discutido a sua eficiência energética e a possibilidade para aplicações na atualidade. Com base nestas informações será proposto um dispositivo para converter parte da energia da marcha humana em energia elétrica.

Palavras-chave: Energy harvesting; piezeletricidade; materiais piezoelétricos.

PIEZOELECTRIC MATERIALS: AN ANALYSIS OF ITS POTENTIAL AS ENERGY HARVESTING

Abstract

This paper aims to analyze the properties and characteristics of piezoelectric materials under the perspective of the generation of clean and renewable energy, based on energy harvesting. Through research of the bibliographic collection available from 2001 to 2015 it was possible to bring together the main studies and characteristics of this material, being discussed its energy efficiency and the possibility of applications in the present days. Based on this information will be proposed a device to convert part of the energy of the human march into electric energy.

Keywords: Energy harvesting; piezoelectricity; piezoelectric materials.

¹ Graduanda em Engenharia Mecânica da UNISANTA, Tecnóloga em Logística, Estagiária na Petróleo Brasileiro SA Petrobras, Santos, SP, Brasil. E-mail: isacoffani1@gmail.com.

² Graduanda em Engenharia Mecânica da UNISANTA, Estagiária na WILLY ANK Soluções para o Setor Metal-Mecânico, Santos, SP, Brasil. E-mail: jessica_deuslima@outlook.com.

³ Graduando em Engenharia Mecânica da UNISANTA, Santos, SP, Brasil. E-mail: matheus.bmoraes@live.com.

⁴ Graduando em Engenharia Mecânica da UNISANTA, Santos, SP, Brasil. E-mail: linsvict@gmail.com.

⁵ Graduando em Engenharia Mecânica da UNISANTA, Santos, SP, Brasil. E-mail: vinicius.valentim@live.com.

⁶ Doutorando, Mestre, Engenheiro e Técnico em Metalurgia e Materiais, Consultor Técnico na INSPEBRAS, Sócio-Diretor da Willy Ank Soluções Metal-Mecânica, Professor Adjunto, UNISANTA, Santos, SP, Brasil. E-mail: willyank@unisanta.br.

1 INTRODUÇÃO

Além das energias mais usuais e exploradas, como a dos ventos, existem aplicações mais inusitadas: estudos comprovam a enorme capacidade do corpo humano em produzir energia através dos movimentos e do calor emitido. Por exemplo, um homem de 68 Kg caminhando a 2 passos por segundo pode produzir cerca de 67 W de potência, ou seja, um valor relativamente alto, de acordo com a pesquisa de Starner e Paradiso [1]. Para aproveitar tal energia, oriunda do corpo humano, os materiais piezoelétricos demonstram ser uma boa alternativa, nas condições descritas neste trabalho de revisão.

Existem materiais que, sob pressão ou tensão mecânica, geram cargas elétricas em sua superfície. Este fenômeno, descoberto em 1880 pelos Curies, foi denominado efeito piezoelétrico e é reversível, ou seja, a aplicação de um campo elétrico causa a deformação do material e pode voltar ao seu estado inicial sem perdas no material [2]. Cristais como o de quartzo, a turmalina, o sal de *Rochelle* e o topázio exibem efeito piezoelétrico em seu estado natural. A explicação para o efeito piezoelétrico está na estrutura atômica destes materiais.

Um dos materiais naturalmente piezoelétricos, o quartzo possui uma estrutura cristalina constituída por uma hélice que se estende ao longo do eixo Z com dois átomos de oxigênio (cargas negativas) e um de silício (carga positiva), conforme esquematizado na Figura 1. No plano XY na Fig. 1, os átomos formam um hexágono que apresenta carga elétrica total nula, no estado natural, ou seja, na ausência de tensão. A aplicação de esforços de tração ou compressão na direção X ou Y do cristal faz com que haja um desbalanceamento de cargas levando à geração de cargas elétricas externas. Por outro lado, a aplicação de forças no eixo Z não gera cargas elétricas. Também é observado o efeito inverso: a aplicação de um potencial elétrico externo nas direções X ou Y, em referência a estrutura mostrada na Fig. 1, faz com que o material se deforme, em uma magnitude de deformação proporcional a intensidade do campo elétrico aplicado [3].

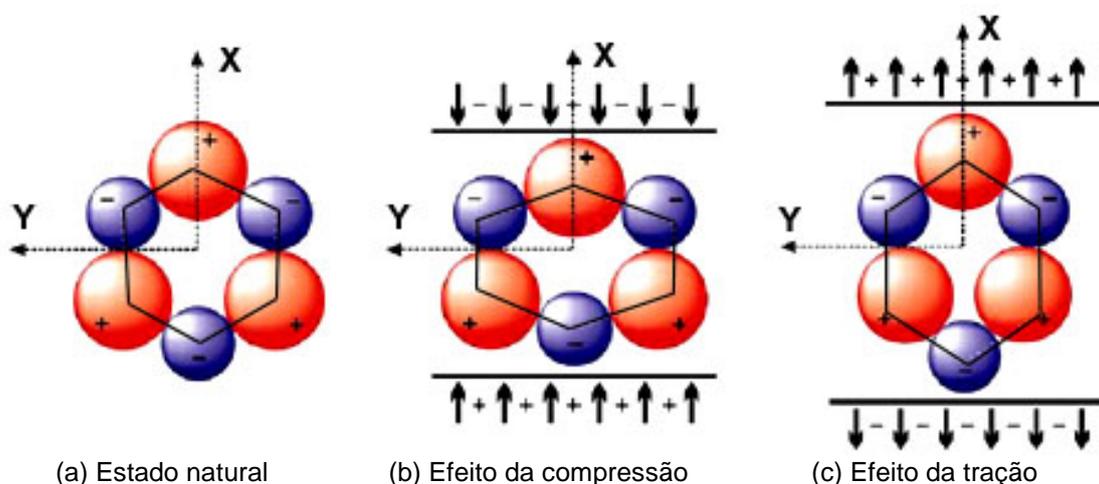


Figura 1. Estrutura atômica do quartzo e sua associação com o efeito piezoelétrico (o eixo Z é perpendicular e para cima da referência desta figura).

Existem materiais piezoelétricos sintéticos, neste caso tais materiais passam por um processo denominado polarização (*poling*) para adquirirem a propriedade da

piezoelectricidade. Pode-se citar como exemplos o titanato-zirconato de chumbo ($\text{Pb}(\text{ZrTi})\text{O}_3$ ou PZT), o titanato de chumbo (PbTiO_2), o zirconato de chumbo (PbZrO_3) e o titanato de bário (BaTiO_3).

O PZT, por exemplo, é formado por blocos microscópicos denominados domínios elétricos/magnéticos que, por sua vez, são formados por células unitárias tetragonais distorcidas, ilustradas na Figura 2.a, quando se encontram abaixo da temperatura Curie. A célula unitária forma um dipolo elétrico devido à posição deslocada do íon de titânio ou de zircônio e, dentro de um domínio, as células apresentam polarização e orientação na mesma direção. Como os domínios encontram-se distribuídos aleatoriamente, o PZT não apresenta propriedades piezoelétricas macroscópicas de acordo com a Figura 2.b.

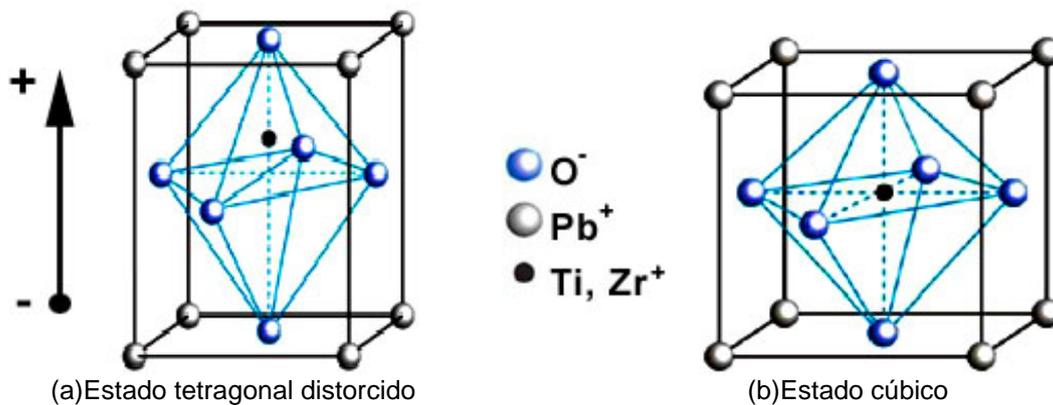


Figura 2. Estrutura atômica do PZT.

Entretanto, é possível polarizar o PZT de maneira que este passe a proporcionar o efeito piezoelétrico. Este procedimento é realizado aquecendo-se o material acima da temperatura Curie, de forma que o estado das células unitárias do material passa a apresentar simetria cúbica, como ilustrado na Figura 2.b e na situação ilustrada pela Figura 3.a. Com o material aquecido, aplica-se um campo elétrico intenso e as células unitárias se expandem na direção deste campo, como mostrado na Figura 2.a, causando o efeito sobre os domínios mostrado na Figura 3.b. Após o resfriamento do material e a retirada do campo elétrico, as células unitárias mantêm parcialmente o alinhamento, conforme a Figura 4. Tal alinhamento remanescente é suficiente para que PZT passe a exibir o efeito piezoelétrico.

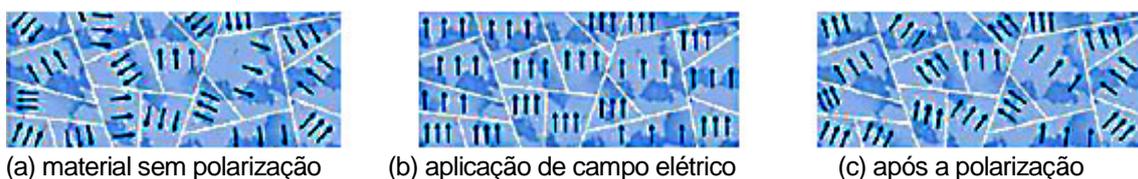


Figura 3. Mudança dos domínios elétricos com a polarização do PZT.

Como os piezoelétricos são materiais transversalmente isotrópicos, os efeitos elétricos são dependentes da direção considerada. Por isso, por convenção, a direção definida como positiva de polarização (*polingdirection*) é usualmente escolhida para ser coincidente com o eixo 3, conforme indicado na Figura 4. O eixo 3 também é o eixo Z, perpendicular aos eixos X e Y, em referência à Fig. 1 (no

sentido definido pela regra da mão direita). Esta direção é estabelecida durante a fabricação do material. Os eixos 1 e 2 (X e Y) são arbitrários e os movimentos de cisalhamento torcional são estipulados como 4, 5 e 6.

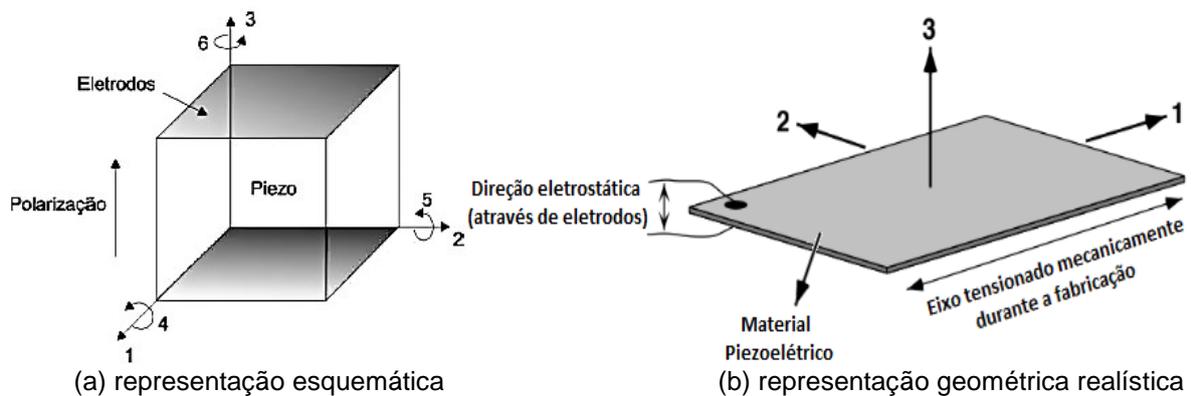


Figura 4. Definição de eixos para materiais piezoelétricos (os eletrodos são montados através do eixo Z).

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Utilização de Materiais Piezoelétricos

A Tabela 1 mostra as propriedades de materiais piezoelétricos industriais comuns, como o poli-fluoreto de polivinilideno, PVDF $-(C_2H_2F_2)_n-$ e titanato de zirconato de chumbo, PZT $(Pb(ZrTi)O_3)$.

Tabela 1. Características piezoelétricas de PVDF e PZT

PROPRIEDADES	UNIDADES	PVDF	PZT
Densidade	$\frac{g}{cm^3}$	1,78	7,60
Permissividade relativa	$\frac{\epsilon}{\epsilon_0}$	12,00	1.700,00
Módulo elástico	$\frac{10^{10} C}{N}$	0,30	4,90
Constante piezoelétrica	$\frac{10^{-12} C}{N}$	$d_{31} = 20,00$ $d_{33} = 30,00$	$d_{31} = 180,00$ $d_{33} = 360,00$
Constante de acoplamento	$\frac{CV}{Nm}$	0,11	$k_{31} = 0,35$ $k_{33} = 0,69$

Adaptado de STARNER; PARADISO[1].

A constante de acoplamento mostrada na Tabela 1 é a eficiência com a qual um material converte energia mecânica em elétrica. A carga induzida em um material piezoelétrico é proporcional a força F aplicada, através de uma constante k (C/N), de acoplamento, conforme mostra a Equação (1) [4]:

$$k = \frac{q}{F} \quad (1)$$

Os subscritos em algumas das constantes indicam a direção ou o modo das interações mecânicas e elétricas, em referência à Fig. 4.b. O modo 31 indica que a

deformação é causada ao eixo 1 (X) por carga elétrica aplicada ao eixo 3 (Z). Por outro lado, a deformação no eixo 1 (X) produzirá uma carga elétrica ao longo do eixo 3 (Z). As superfícies dos 3 eixos são tornadas condutoras, para facilitar a conexão elétrica. Esta condição pode ser conseguida, por exemplo, pela metalização com alumínio, aplicação de epóxi prata, ou, em casos de extrema tensão, recobertas com carbono. Portanto, o dispositivo nesta condição comporta-se como um capacitor.

Os elementos de flexão são denominados em função da existência de material piezoelétrico em um dos lados ou em ambos os lados da linha neutra de carregamento mecânico em flexão. Os unimorfos possuem material piezo apenas em um lado da linha neutra e os dimorfos nos dois lados, assim exibindo uma camada em expansão e uma inferior em contração, quando sob flexão, sendo empregados frequentemente na indústria. Além disso, na prática, os elementos piezoelétricos de flexão possuem uma constante de acoplamento efetiva de 75% do valor teórico, devido ao armazenamento de energia mecânica na camada central do suporte e do calço.

A conversão de energia mais eficiente, conforme indicado pelas constantes de acoplamento pela Tabela 1, vem da compressão do PZT (no modo d_{33}). Mesmo assim, a quantidade de energia efetiva que pode ser transferida desta forma é mínima, devido a sua compactação, conforme a equação (2) [1]:

$$\Delta H = \frac{FH}{AY}(2)$$

Na qual:

F(N) é força, **H(m)** é altura em relação à condição não carregada, **A(m²)** é a área sobre a qual a força é aplicada e **Y** é o módulo elástico (N/m²).

O módulo elástico para o PZT é de $4,9 \times 10^{10}$ N/m²[1]. Assim, seria preciso uma força muito elevada para comprimir um material apreciavelmente, por exemplo, para uma chapa de 50×10×1 mm reduzir sua espessura em 1% seria necessário aplicar 25 ton. (245.000 N) de compressão. Como a energia é definida como força através da distância, a energia efetiva gerada através da compressão direta do PZT pela atuação humana direta seria muito pequena, mesmo com uma conversão perfeita.

Por outro lado, dobrar um pedaço de material piezoelétrico para tirar proveito de seu modo d_{31} é muito mais fácil. Por ser duro e frágil, o PZT não processado não possui muita amplitude de movimento nessa direção. A deformação superficial máxima para este material é $\varepsilon = 5 \times 10^{-4}$, conforme definido pela equação (3):

$$\varepsilon = \frac{xt}{L_c^2}(3)$$

Em que:

x é a deflexão, **t** é a espessura do feixe e **L_c** é o comprimento da viga.

O PVDF, por outro lado, é muito flexível, mais fácil de manusear, moldar. Além disso, este material exibe boa estabilidade ao longo do tempo e não despolariza quando submetido a campos alternados muito altos [5]. A desvantagem, no entanto, é que a constante de acoplamento do PVDF é significativamente menor que a do PZT. Além disso, a eficiência do material degrada, dependendo do clima operacional e do número de camadas usadas.

Através de estudos [1], sabe-se que uma placa triangular de 116 cm² dobrada 40 vezes, em um calço de metal central, em uma intensidade de deflexão de 5 cm pela atuação de uma força de 68 kg, a uma taxa de 0,6 Hz (3 vezes a cada 5 s), resulta na geração de 1,5 W de potência. Estes são dados oriundos do emprego de um material piezoelétrico em um equipamento desenvolvido para uma aplicação envolvendo energia das ondas do mar. Tal resultado é uma ótima referência para os cálculos de dimensionamento a serem realizados, pensando em uma aplicação envolvendo a recuperação de energia da marcha humana.

2.2 Eficiência de Sistemas Piezoelétricos

A eficiência de sistemas piezoelétricos varia muito, quando comparados entre si. Isso ocorre, devido às diversas variáveis responsáveis por influenciar seu rendimento, sendo algumas delas: material empregado, arranjo do circuito, direção das tensões aplicadas, padrão do eletrodo e configuração do sistema, algumas destas já descritas nas seções anteriores. Tais fatores serão discutidos brevemente no presente trabalho.

2.2.1 Melhoria da Eficiência Baseada no Material

Segundo Sodano e Anton [6], o principal fator que influencia a eficiência de um sistema piezoelétrico é o próprio material selecionado. Atualmente, um dos materiais mais comuns é o PZT. Lee et al.[7] esclarecem que o PZT possui limitações de aplicação, não sendo recomendado para carregamentos com alta ciclagem. Como alternativa, é utilizado o PVDF (sigla para opoli-fluoreto de polivinilideno), um polímero piezoelétrico mais flexível do que o PZT.

É interessante que se busque alternativas para aumentar a resistência de tais materiais porque, quanto maior os esforços aplicados ao material piezoelétrico, maior será sua absorção de energia e consequentemente maior será a geração de eletricidade. Por isso, sendo a fragilidade uma barreira, outros materiais e configurações foram desenvolvidos, tentando melhorar a resistência e, assim, aumentar as taxas de carregamento permissível sem que ocorra ruptura do material.

Lee et al. [7], através de experimentos, concluíram que ao utilizar uma camada superficial de um eletrodo mais resistente do que o material piezoelétrico em questão, tornou-se possível submeter o sistema a condições mecanicamente mais críticas. Além desse método, surgiram as piezofibras que, segundo Mohammadi et al.[5], são constituídas pelo entrelaçamento de fibras de PZT em uma matriz de epóxi. Ao entrelaçar estes materiais, é possível criar um material composto, constituído por 60% de epóxi e 40% de PZT, que é bastante flexível permitindo um aumento ainda maior na taxa de carregamento permissível, em relação aos outros casos já citados.

Existe a possibilidade de alterar a configuração do eletrodo e do material piezoelétrico em busca do aumento da eficiência. O eletrodo deve ser constituído de algum tipo de metal que tenha uma resistência superior ao do substrato que, no caso, se trata do material piezoelétrico. Cho et al. [8] perceberam que, ao criar diferentes disposições de camadas de material piezoelétrico e metal, é possível

diminuir a tensão residual, responsável por afetar significativamente a quantidade de energia absorvida, uma das principais causas para diminuição da eficiência.

Na Figura 5, o arranjo (a) e (b) correspondem ao dimorfo, ou seja, uma viga com o seu interior formado por material piezoelétrico, enquanto as duas camadas externas são de metal e estão conectadas formando o diferencial de potencial. A diferença entre os dois arranjos é que em (a) a configuração está conectada em série e a (b) está conectada em paralelo. Já no terceiro caso, é a configuração unimorfa, sendo composta por uma camada de metal e uma de material piezoelétrico conectadas em série.

Ao comparar as três possibilidades, Ng e Liao [9] perceberam que, para pequenas taxas de carregamento, o unimorfo apresenta um melhor rendimento. Para médias taxas de carregamento, o arranjo em paralelo dimorfo teve a maior conversão de energia, enquanto que para altas taxas de carregamento, o arranjo em série dimorfo teve o melhor resultado (Fig. 5.a). Com isso, é possível perceber que o máximo aproveitamento da energia convertida de um sistema piezoelétrico está intrinsecamente ligado à impedância e à taxa de carregamento. Um sistema conectado em série, aumenta a sua impedância, tornando-se mais eficiente em operações com altas taxas de carregamento.

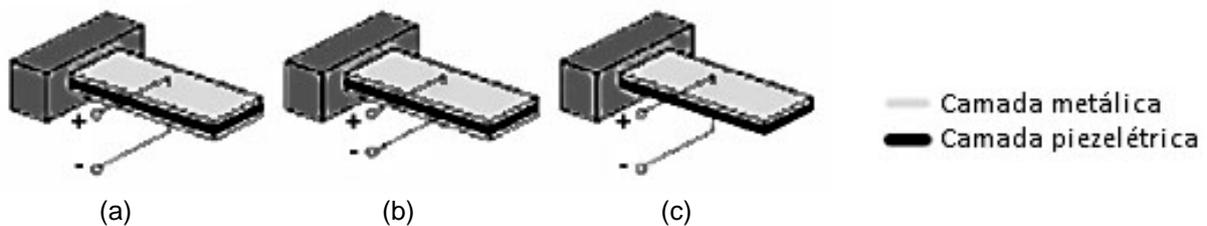


Figura 5. Configurações para sensores piezoelétricos.

Parâmetros geométricos também influenciam no aproveitamento da energia mecânica coletada. Anderson e Sexton [10], ao investigar métodos para aumentar a eficiência de sistemas piezoelétricos dimorfos, notaram que ao variar a largura, a espessura ou o comprimento do corpo de prova, implicava na alteração do rendimento da geração de energia. Conforme Anton e Sodano [3], a configuração geométrica mais comum para geração de energia piezoelétrica é o retângulo. Outras formas já foram testadas e desenvolvidas, tais como a triangular e a trapezoidal, destas duas, o trapézio apresentou-se como a forma com a melhor eficiência geométrica, por ser capaz de distribuir as tensões presentes na estrutura de forma mais uniforme do que as demais.

Esta condição geométrica também foi percebida por Roundy et al. [11], que constataram que uma viga trapezoidal é capaz de gerar mais do que o dobro de energia do que uma em formato retangular. Sendo assim, ao utilizar o formato trapezoidal ao invés do retangular, é possível construir um sistema de coleta de energia mais barato, menor e eficiente.

Tal afirmação também foi comprovada por Kim et al.[12] que, ao desenvolver um transdutor piezoelétrico em formato circular, seu sistema de coleta de energia se

tornou mais eficiente, justamente pela tensão estar melhor distribuída pelo material quando comprimido. Criar sistemas já pré-tensionados também é uma alternativa quando se quer melhorar a eficiência de um sistema piezoelétrico. Mossi et al. [13] salientaram que, o emprego de uma placa piezoelétrica retangular, já inicialmente curvada antes da força ser aplicada, permitia gerar um pequeno diferencial de potencial, que afeta positivamente na eficiência do sistema, quando da aplicação de força a ser empregada na geração de energia.

Também existe a possibilidade de aumentar a energia a ser coletada escolhendo a forma mais apropriada para as direções dos polos dos materiais e dos esforços empregados. Isso pode ser feito de duas formas, sendo elas: o modo d_{31} que consiste na direção da força aplicada perpendicular à direção dos polos do material, enquanto que no modo d_{33} , a força está na mesma direção dos polos (paralela). A escolha do método depende da necessidade da aplicação. Através de estudos realizados por Baker [14] foi possível perceber que a configuração d_{31} é a mais eficiente para pequenos esforços, enquanto que para situações com maiores solicitações, é adquirida uma maior eficiência com a configuração d_{33} . A Figura 6 apresenta a configuração do piezoelétrico em termos de cargas mecânicas e elétricas associadas.

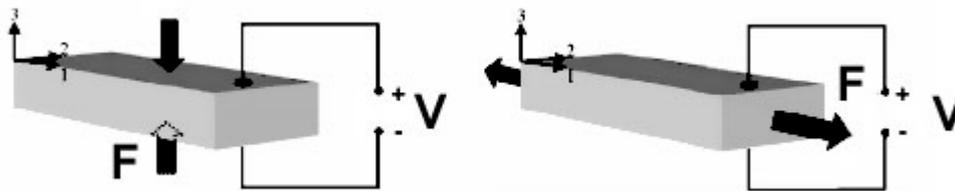


Figura 6. Configurações pelos modos d_{33} (esquerda) e d_{31} (direita).

2.2.2 Melhoria da Eficiência Baseada no Circuito

Um circuito piezoelétrico pode ser montado com diversos componentes e padrões construtivos. Entretanto, tais componentes e circuitos influenciam diretamente no rendimento da geração de energia elétrica. Um circuito que pode ser mencionado foi o desenvolvido por Tayahi et al. [15], criado para ser estimulado em baixas frequências, como ocorre em caminhadas. Para isso, seu circuito continha apenas um retificador, um capacitor e um regulador de voltagem para simular o efeito do carregamento, desta forma, tornando-se um exemplo simples dos componentes básicos para um protótipo de sistema piezoelétrico, visando a extração de energia mecânica gerada pela marcha humana.

Conforme Anton e Sodano [3], uma excelente forma para melhorar a eficiência de um circuito piezoelétrico, inicialmente, é pela utilização de um retificador síncrono. Esse, quando comparado analiticamente e experimentalmente com sistemas tradicionais com associações diodo-resistor, o retificador síncrono mostrou o aproveitamento de 400% mais energia do que com o método convencional. Falando em termos de eficiência, utilizando o esquema diodo-resistor, obtêm-se apenas até 34%, enquanto que para um retificador síncrono é possível chegar até a 92%.

Segundo Shenck e Paradiso [16], outra forma para aumentar a eficiência de um circuito piezoelétrico é a utilização de conversores CC/CC. Isso faz com que a energia consiga ser melhor aproveitada, vencendo as variações de frequência. Isso ocorre porque a tensão em sistemas piezoelétricos é gerada em níveis muito elevados, devendo ser reduzida até um nível aceitável para ser armazenada em uma bateria.

2.2.3 Melhoria da Eficiência Baseada no Armazenamento de Energia

Guan e Liao [17] compararam a capacidade de armazenamento em diferentes sistemas de armazenamento de energia, sendo esses: um supercapacitor, uma bateria recarregável de níquel e uma bateria recarregável de lítio. Foi possível observar que a maior eficiência em todas as situações testadas foi do supercapacitor, com uma eficiência máxima de 95%. A bateria de lítio obteve 92% e a bateria de níquel foi a menos eficiente, com apenas 65% de aproveitamento da energia. Entretanto, os supercapacitores não conseguem armazenar por tanto tempo quanto as baterias recarregáveis. Depois de 10 dias, somente cerca de 85% da energia original ainda estava presente no supercapacitor. Enquanto que, após 30 dias de armazenamento de energia as baterias de níquel ainda apresentavam 95% da quantidade original.

É possível sugerir que, de forma geral, os supercapacitores apresentam melhores resultados pela sua longa vida útil e sua alta taxa de carregamento em relação às baterias recarregáveis. Estes componentes apenas não são tão atraentes para armazenamento por longos períodos, porém, na grande maioria dos casos de aplicação para geração de energia elétrica por piezoelectricidade, esta não é uma questão relevante.

2.2.4 Performance da Piezoelectricidade quando comparada a outros Métodos

Uma das possíveis aplicações da piezoelectricidade é na conversão de energia mecânica em energia elétrica. Além desse método, existem outras duas formas para conseguir tal objetivo, sendo através de sistemas eletromagnéticos e eletrostáticos [3].

Tais métodos distinguem-se entre si pelas vantagens e desvantagens que apresentam. Ao comparar esses três métodos, Roundy et al.[11] explica que, para a coleta de energia, os geradores piezoelétricos têm a vantagem de não requerer nenhuma fonte de tensão para conversão da energia mecânica em energia elétrica, ao contrário dos geradores eletrostáticos. Entretanto, ainda segundo os autores citados, geradores piezoelétricos não são tão facilmente integrados em microsistemas quanto geradores eletromagnéticos. Quando se trata desses últimos geradores, mesmo que não necessitem de nenhuma fonte de tensão para operação, estes produzem uma quantidade relativamente baixa de tensão defronte aos geradores piezoelétricos. Por sua vez, os geradores piezoelétricos geram altas quantidades de tensão com baixa corrente, sendo capazes também de produzir uma maior quantidade de potência por unidade de volume do que os conversores eletrostáticos [3].

Dessa forma, sugere-se que a escolha do método a ser empregado depende da aplicação e do sistema a ser construído. Sodano e Anton [3] afirmam que a energia eletromagnética é o melhor método quando se trata da coleta de energia por meio de grandes instalações, enquanto que a utilização da eletrostática é indicada para microestruturas. A piezoelectricidade é capaz de apresentar bons níveis de eficiência em qualquer tamanho de sistema, mesmo que sua capacidade de gerar energia seja menor quando comparada a sistemas eletromagnéticos e eletrostáticos.

3 CONCLUSÃO

Embora os conceitos e dispositivos aqui discutidos ainda sejam protótipos, a piezoelectricidade é uma promissora área a ser explorada para geração de energia, já existindo aplicações para ela, das quais não foram o foco do artigo. Ainda é uma preocupação o modo de armazenamento da energia obtida por este sistema, limitando o seu aproveitamento, sendo necessário o uso imediato.

Através do acervo bibliográfico aqui apresentados e com a associação de métodos descritos para a maximização da eficiência, o presente trabalho poderá ser tomado como base, tanto pelos autores quanto a terceiros, para auxiliar futuros estudos e projetos que visam o uso de materiais piezoelétricos para geração de energia elétrica. Particularmente, os presentes autores dimensionarão um sistema de recuperação energia da marcha humana, visando a recuperação de uma parte de potência desprendida nesta atividade.

Agradecimentos

Agradecemos nossa instituição de ensino Universidade Santa Cecília por fornecer os conhecimentos e o apoio necessário para a realização da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- 1 STARNER, T, PARADISO, JA. Human Generated Power for Mobile Electronics. Low Power Electronics Design. 2004 [acesso em: 16 mar. 2018]; 1:1-30. Disponível em < <http://responsive.media.mit.edu/wp-content/uploads/sites/5/2013/12/Human-Generated-Power-for-Mobile-Electronics.pdf>>. Acessado em: 10 abr. 2018.
- 2 CALLISTER, W. D., RETHWISCH, D. G.; Materials science and engineering. John Wiley & Sons Inc., 8th edition, 2009.
- 3 ANTON, S. R., SODANO, H. A. A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003-2006). 2007. p. 2-12.
- 4 MARINHO, A.D.; ASSUNÇÃO, J.H; JUNIOR, L.V.; ALBUQUERQUE, P; DA SILVA, T.U; Materiais piezoelétricos, Trabalho da disciplina “Materiais Metálicos” do Curso de Engenharia de Materiais. Marabá (PA): Universidade Federal do Pará. 2013. Disponível em < <https://pt.slideshare.net/LeonardoVilarinho/materiais-piezoelétrico>>. Acessado em: 5 abr. 2018.
- 5 MOHAAMMADI, F; KHAN, A; CASS, R.B. Power generation from piezoelectric lead zirconatetitanate fiber composites. Symposium Elec. on Unconventional Substrates– Electrotext. and Giant-Area Flex. Circ. 2003; 736:5-12. Disponível em: <<https://www.cambridge.org/core/journals/mrs-online-proceedings-library-archive/article/power-generation-from-piezoelectric-lead-zirconate-titanate-fiber-composites/19622D895CB3CA0F82E7DDD34EFEA48E>>. Acessado em: 7 abr. 2018.
- 6 ANTON, S.R., SODANO H.A. A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003-2006). Smart Materials and Structures. 2007 [acesso em: 10 abr. 2018]; 16: 2-12. Disponível em <<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/16/3/R01/meta>>. Acessado em: 7 abr. 2018.
- 7 LEE, C. S.; JOO, J.; HAN, S.; LEE, J. H.; KOH, S. K. Poly(vinylidene fluoride) transducers with highly conducting poly(3,4-ethylenedioxythiophene) electrodes. 2005; Proc. Int. Conf. On Science and Technology of Synthetic Metals. vol 152 pp 49–52.
- 8 CHO, J; ANDERSON, M; RICHARDS, R; BAHR, D., RICHARDS, C. Optimization of electromechanical coupling for a thin-film PZT membrane: I. modeling. Journal of Micromechanics and Microengineering. 2005; 15:15–17. Disponível em

- <<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0960-1317/15/10/002/meta>>. Acessado em: 15 abr. 2018.
- 9 NG, T.H., LIAO, W.H. Sensitivity analysis and energy harvesting for a self-powered piezoelectric sensor. *Journal of Intelligent Materials Systems and Structures*.2005 [acesso em: 2 fev. 2018]; 16:785-797. Disponível em <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.1031.6385&rep=rep1&type=pdf>>. >. Acessado em: 17 abr. 2018.
 - 10 ANDERSON, T. A.; SEXTON, D. W.A vibration energy harvesting sensor platform for increased industrial efficiency.2006; Proc. Smart Structures and Materials Conf.; Proc. SPIE 6174 61741Y.
 - 11 ROUNDY, S.; WRIGHT, P. K.; RABAEY, J. A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes. 2003; *Comput. Commun.* 26 1131–44.
 - 12 KIM, H. S.; KIM, J. H.; KIM, J. A review of piezoelectric energy harvesting based on vibration. 2011; *Inter. Jour. of Prec. Eng. and Manuf.* Vol. 12, No. 6, pp. 1129-1141.
 - 13 MOSSI, K;GREEN, C, OUNAIES, Z;HUGHES, E. Harvesting energy using a thin unimorphprestressed bender: geometrical effects. *Journal of Intelligent Materials Systems and Structures*. 2005 [acesso em: 26 abr. 2018]; 16:249-261. Disponível em <https://pdfs.semanticscholar.org/8ee0/090fa28a444d280ae37deaeda3e9acd8930b.pdf>> . Acessado em 20 abr. 2018.
 - 14 BAKER, J;ROUNDY, S;WRIGHT, P. Alternative geometries for increasing power density in vibration energy scavenging for wireless sensor networks. Proc. 3rd Int. Energy Conversion Engineering Conf. 2005 [acesso em: 10 abr. 2018]; 3:15-18.Disponível em<<https://iss.mech.utah.edu/files/2012/10/AIAA-2005-5617-210.pdf>>. Acessado em 20 abr. 2018.
 - 15 TAYAH, M. B.; JOHNSON, B.; HOLTZMAN, M.; CADET, G. Piezoelectric materials for powering remote sensors. 2005; Proc. IEEE 24th Int. Performance, Computing, and Communications Conf. (Phoenix, AZ, April) pp 383–6.
 - 16 Shenck, NS, Paradiso, JA. Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics. *IEEE Micro*.2001; 6:30-42. Disponível em <<https://reserv.media.mit.edu/pubs/papers/2001-Shenck-Paradiso.pdf>>. Acessado em 2 fev. 2018.
 - 17 GUAN, M.; LIAO, W. H. On the energy storage devices in piezoelectric energy harvesting.2006; Proc. Smart Structures and Materials Conf.; Proc. SPIE 6169 61690C membrane: II. experiment *J. Micromech. Microeng.* 15 1804–9.