



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

Revisão dos circuitos derivativos e suas variações usados na regeneração de energia a partir de materiais piezoelétricos em estruturas vibrantes (2006-2009)

Marcella Cristina Oliveira Chagas, marcella_cristina@yahoo.com¹

Roberto Mendes Finzi Neto, finzi@eee.ufg.br²

Carlos Alberto Gallo, gallo@ufu.br¹

¹Universidade Federal de Uberlândia - Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia “Estruturas Inteligentes em Engenharia”, Av. João Naves de Ávila nº2121 Campus Santa Mônica – Bloco 1O CEP: 38400-902 Uberlândia – MG

²Universidade Federal de Goiás – UFG / Campus Catalão, Av. Dr. Lamartine P. Avelar, nº 1120 CEP: 75704-020 Catalão - GO

Resumo: *A preocupação com o fim das fontes de energia no mundo tem sido cada vez maior. Muitos pesquisadores estudam sobre como usar os recursos energéticos naturais, a fim de preservar os recursos que são esgotáveis e evitar riscos e danos ao meio ambiente. O principal objetivo deste trabalho é analisar as experiências mais importantes que foram estudadas entre os anos de 2006 e 2009 na conversão de energia mecânica do ambiente em energia elétrica utilizável usando materiais inteligentes, com efeito piezoelétrico, em estruturas com alguma vibração (regeneração de energia). A conversão da energia mecânica em energia elétrica tem sido o foco de pesquisas para sistemas auto-alimentados, em especial para dispositivos situados em locais remotos e de difícil acesso. Após a energia elétrica regenerada ser retirada, se faz necessário o uso de um circuito derivativo que possa tornar essa energia armazenável e posteriormente utilizável além de garantir sua compatibilidade com o sistema. Para tanto, um circuito elétrico retira a tensão gerada pelo material piezoelétrico, depois essa é retificada e a seguir passa pelo conversor DC-DC. Este trabalho analisará os circuitos elétricos já desenvolvidos e mostrará um comparativo dos conversores que já foram propostos como circuitos que se utilizam apenas de diodos, retificadores síncronos, que usam elementos de potência, como MOSFETs que têm perdas que podem ser consideradas desprezíveis, e suas variações. Será comentada ainda a eficiência da conversão de energia de cada circuito discutido para que se possa chegar numa conclusão de vantagens e desvantagens do uso de cada conversor comparado.*

Palavras-chave: *Conversor; Armazenamento; Energia renovável; Regeneração de energia; Material Piezoelétrico.*

1. INTRODUÇÃO

A demanda por sensores eletrônicos, em especial os sem fio, tem crescido cada vez mais. Os avanços tecnológicos dos sistemas microeletromecânicos tem possibilitado a colocação de sensores em praticamente qualquer lugar. No caso de dispositivos posicionados em locais remotos e de restrito acesso, sua bateria pode acabar a qualquer momento e a substituição desta pode ser difícil.

Nos dias atuais, a regeneração de energia proveniente do ambiente tem sido estudada para aumentar a vida útil de sistemas, dispositivos eletrônicos e sensores autoalimentados. A fonte de energia usada para regeneração depende do ambiente onde o dispositivo está inserido, podendo ser solar, ser advinda de variação térmica ou mesmo de vibração mecânica. Vale ressaltar ainda a crescente preocupação com o esgotamento das fontes de energia e com o meio ambiente e os impactos que este vem sofrendo. Essa preocupação tem fortalecido a busca por novas fontes de energia, além de trazer os focos de pesquisa para as fontes renováveis e limpas, sem muitos impactos ambientais.

Dentre as várias formas de conversão de energia de sua matriz energética, podem ser citadas as fotocélulas, que convertem luz em eletricidade, os termopares que convertem calor em eletricidade e os geradores eletromagnéticos que convertem energia mecânica em eletricidade. Esses são chamados geradores de energia, frequentemente usados em geração de eletricidade. Semelhante aos geradores eletromagnéticos, os geradores piezoelétricos também são capazes de converter energia mecânica, tensão ou ainda vibração em energia elétrica. Esses geradores têm sido o foco de muitas pesquisas inovadoras devido à fácil integração em um sistema e de sua capacidade de converter energia mecânica diretamente em energia elétrica, de forma bidirecional, ou seja, capaz de converter energia elétrica em mecânica.

A tensão de saída do elemento piezoelétrico é alternada, e não contínua. Sua amplitude depende das dimensões, características e também da vibração mecânica à qual o elemento piezoelétrico está submetido. É necessária uma interface eletrônica para garantir compatibilidade de tensão entre o terminal de carga elétrica e do elemento piezoelétrico. Então, após a energia elétrica ser captada, se faz necessário o uso de um circuito derivativo que possa

tornar essa energia armazenável e posteriormente utilizável. Para tanto, um circuito elétrico retira a tensão gerada pelo material piezoelétrico, depois essa é retificada e a seguir passa pelo conversor DC-DC para que seja obtida uma tensão ideal sem perda de potência.

Sendo assim, este trabalho analisará os circuitos elétricos já desenvolvidos e mostrará um comparativo dos conversores que já foram propostos em trabalhos anteriores, utilizando circuitos que são empregados na eletrônica de potência que fazem o uso de elementos semicondutores, elementos passivos de armazenamento de energia em suas possíveis configurações. Será comentada ainda a eficiência da conversão de energia de cada circuito discutido para que se possa chegar numa conclusão de vantagens e desvantagens do uso de cada conversor comparado.

2. CIRCUITOS DERIVATIVOS

É sabido que a tensão entregue pelo elemento piezoelétrico é alternada, e não contínua. Sua amplitude depende das características do elemento piezoelétrico, de suas dimensões e também das vibrações mecânicas. As vibrações mecânicas podem variar por serem provenientes do ambiente, sendo assim a variação da tensão é imprevisível. Por isso a escolha da interface eletrônica é de suma importância, garantindo a compatibilidade de tensão entre o terminal de carga elétrica e o elemento piezoelétrico. Um elemento de armazenamento de energia elétrica, como um capacitor ou uma bateria eletroquímica, pode ser incluído também para compensar uma redução temporária do nível de vibrações do ambiente ou de superar um pico de potência consumida pela carga eletrônica.

Esta seção apresentará quatro diferentes abordagens, do nível mais comum aos níveis otimizados no período de 2006 a 2009, para depois comparar sua eficácia na regeneração de energia. Os tipos de circuitos serão argumentados na seção 3, buscando um comparativo entre os circuitos discutidos na seção 2.

2.1. Retificador Passivo

Os circuitos considerados como interface padrão, mais comuns nas pesquisas realizadas para retificar e alisar uma tensão alternada, consistem de um diodo (retificação de meia-onda) ou uma ponte retificadora de diodos e um capacitor de filtro, conforme mostrado na Figura 1. O terminal de carga elétrica é modelado por um resistor equivalente R_L tendo um consumo de potência igual à potência média da carga terminal real.

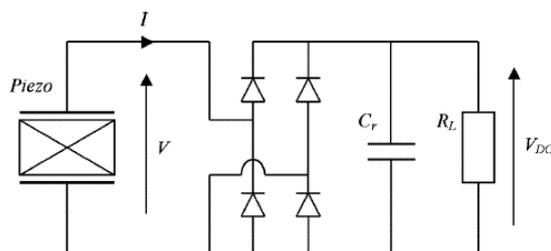


Figura 1 – Interface padrão.

A análise do circuito padrão é apresentada considerando um único modo de vibração. Assim, o deslocamento u da Figura 2 é assumido como sendo puramente senoidal no funcionamento em regime estacionário. Nesta condição, a tensão de circuito aberto emitido pelo elemento piezoelétrico V é também senoidal. Contudo, o circuito elétrico ligado ao elemento piezoelétrico modifica a forma de onda da tensão V .

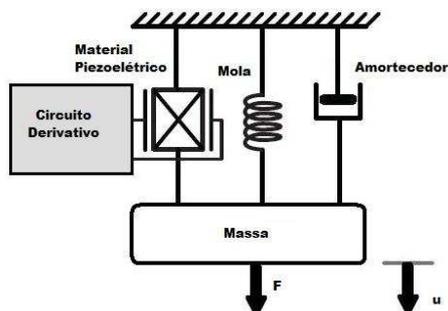


Figura 2 – Sistema massa, mola, amortecedor.

O elemento piezoelétrico se torna um circuito aberto somente quando a ponte retificadora está em bloqueio. Isso se dá quando o valor de V é menor que V_{DC} . As formas de onda, teóricas, correspondentes a este momento são as apresentadas na Figura 3, desconsiderando o ripple de V_{DC} como uma aproximação plausível levando em conta que a constante de tempo $R_L C_1$ é muito maior que o período de vibração mecânica.

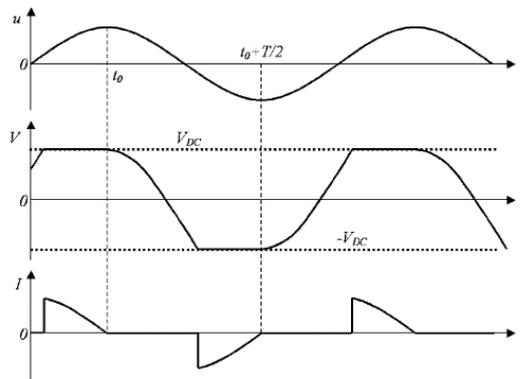


Figura 3 - Formas de onda da aproximação da interface padrão sugerida.

De acordo com Lefeuvre et al (2006), V_{DC} é função apenas do deslocamento u . Se C_0 e α estão relacionadas às constantes eletromecânicas, ligadas à conversão do elemento piezoelétrico. Isso leva a Eq. (1):

$$V_{DC} = \frac{R_L \alpha \omega u}{R_L C_0 \omega + \frac{\pi}{2}} \quad (1)$$

Sendo assim, a potência média é dada pela Eq. (2):

$$P = \frac{V_{DC}^2}{R_L} = \frac{R_L \alpha^2 \omega^2 u^2}{\left(R_L C_0 \omega + \frac{\pi}{2}\right)^2} \quad (2)$$

Lefeuvre et al (2006) conclui, ainda, que a potência máxima gerada acontece quando R_L não influencia significativamente a amplitude da posição u , então a potência máxima P_{MAX} para uma resistência de carga considerada como ótima é:

$$P_{MAX} = \frac{\alpha^2 \omega u^2}{2\pi C_0} \quad (3)$$

2.2. Retificador Síncrono

É sabido que este tipo de geração de energia funciona de modo descontínuo. O capacitor é usado como forma de armazenamento, usado para coletar a energia. A proposta é que sua descarga seja feita de forma controlada.

O circuito proposto para a realização deste tratamento não linear de tensão está representado na Figura 4. As fases de extração de carga ocorrem quando a chave eletrônica S é fechada: a energia elétrica armazenada no capacitor C_0 é então transferida para o indutor L . Quando a carga elétrica é completamente removida do elemento piezoelétrico, a chave é reaberta e a energia armazenada no indutor L é transferida para o capacitor através do Diodo. O diodo é acionado para extração nos instantes de amplitudes mínimas e máximas do deslocamento u , em sincronia com a vibração mecânica. Essa técnica garante que as fases de extração da energia sejam sincronizadas com a vibração mecânica. Outra característica é que o elemento piezoelétrico é deixado em circuito aberto a maior parte do tempo.

Com base nisso, os pesquisadores têm desenvolvido algumas diferentes topologias de conversores chaveados. Diversos autores (Lefeuvre, 2006; Shu, 2007) sugeriram que a configuração conhecida como SSHI (do inglês Synchronized Switch Harvesting on Inductor) ou regeneração sincronizada com chaveamento no indutor, como mostra a Figura 4, tem um rendimento maior na captação da energia.

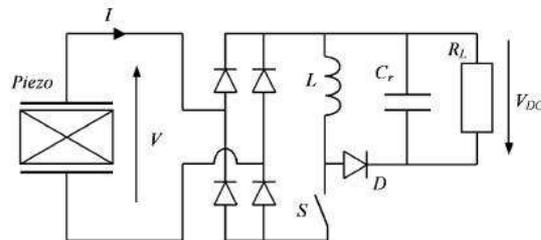


Figura 4 – Retificador síncrono com chaveamento no indutor.

O indutor L é escolhido a fim de obter um custo de duração da fase de extração muito mais curto do que o período de vibração. A tensão teórica e ondas de deslocamento estão representadas na Figura 5:

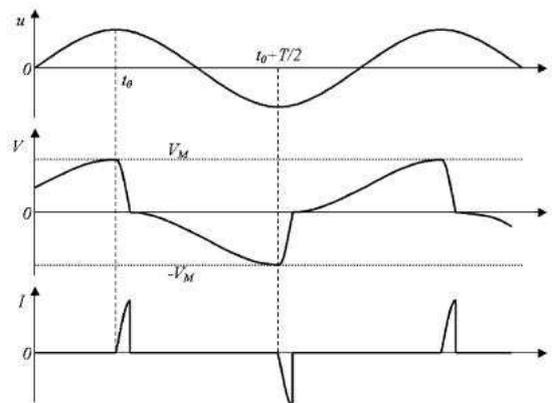


Figura 5 – Formas de onda do retificador síncrono com chaveamento no indutor.

Seguindo a mesma linha de raciocínio usada no circuito padrão, a potência máxima P_{MAX} é dada por:

$$P_{MAX} = \frac{2 \alpha^2 u^2}{\pi C_0} \quad (4)$$

2.3. Retificação Síncrona com Chave em Paralelo

Esta interface paralela SSHI, proposta por alguns autores (Liang, 2009; Liu, 2007; Lefeuvre, 2006; Makihara, 2006), é composta de um circuito não linear de processamento em paralelo com os eletrodos elemento piezoelétrico e a entrada da ponte retificadora, como mostrado na Figura 6. O circuito de processamento não linear é composto apenas de um indutor L em série com uma chave eletrônica S. Essa chave é brevemente ativada quando os mecanismos de deslocamento atingem um valor máximo ou mínimo. Nessas ocasiões de disparo, um circuito elétrico oscilante L-C₀ é estabelecido. O período de oscilação elétrica é escolhido muito menor do que o período de vibrações mecânicas T. A chave é desligado após meio período, resultando em uma quase inversão instantânea da tensão V. As formas de onda correspondentes, teóricas são mostradas na Figura 7.

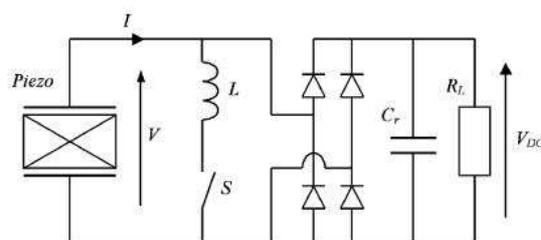


Figura 6 – Retificador Síncrono com chave em paralelo.

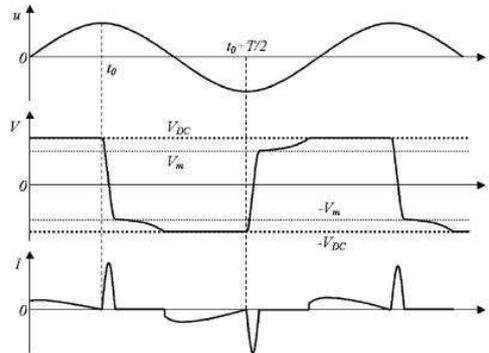


Figura 7 – Formas de onda do retificador síncrono com chave em paralelo.

Quando a chave está ligada, o valor absoluto da tensão V continua a ser inferior à tensão retificada V_{DC} , assim a ponte retificadora está bloqueando. No entanto, a inversão de polaridade de tensão não é perfeita, o que significa que o processo não linear induz perdas de energia de pequeno porte. A maioria das perdas de inversão de tensão é devido ao circuito composto do indutor em série com o interruptor. Uma pequena parte pode também ser irradiada no sistema mecânico.

As perdas de inversão são modeladas pelo fator de qualidade elétrico Q_i do oscilador elétrico. P_{MAX} torna-se mais ou menos proporcional a esse fator de qualidade. O fator de qualidade deve ser tão grande quanto possível para obter o máximo possível de energia elétrica com uma determinada quantidade de material piezoelétrico. Este fator é praticamente limitado pelas perdas elétricas do oscilador LC_0 , que estão localizados principalmente no indutor (perdas Joule e as perdas ferromagnéticas).

Ainda com a mesma linha de raciocínio anterior no cálculo da P_{MAX} é dada por:

$$P_{MAX} = \frac{\alpha^2 \omega u^2}{\pi C_0 (1 - e^{-\pi/2 Q_i})} \quad (5)$$

2.4. Retificação Síncrona com Chave em Série

Uma configuração SSHI em série é circuito de interface é semelhante ao circuito SSHI em paralelo, mas em vez de ligar a chave e o indutor em paralelo com o elemento piezoelétrico e a entrada do retificador, este dipolo é ligado em série, como mostrado na Figura 8:

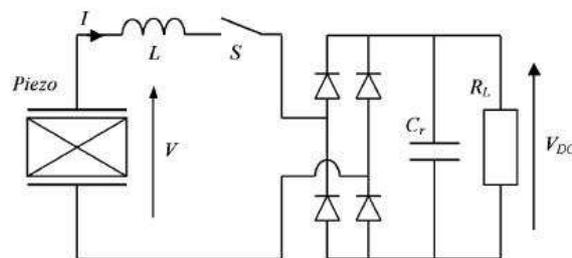


Figura 8 – Retificador síncrono com chave em série.

O controle da chave é o mesmo que o controle descrito no caso do circuito paralelo SSHI. Na maioria das vezes, o elemento piezoelétrico está em configuração de circuito aberto. Cada vez que a opção é fechar, uma parte da energia armazenada no capacitor C_0 é transferida para o capacitor C_r através da ponte retificadora. Nesses instantes, as inversões de tensão de V ocorrem. As tensões e as formas de onda de deslocamento são desenhadas na Figura 9.

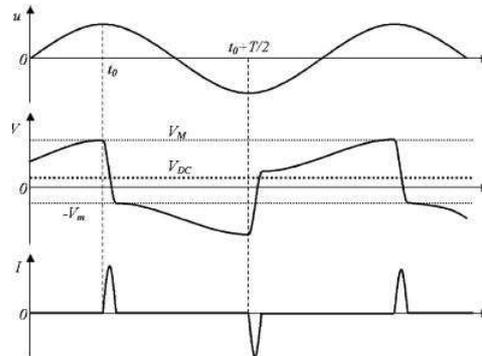


Figura 9 – Formas de onda do retificador síncrono com chave em série.

A expressão da potência média é dada por:

$$P_{MAX} = \frac{\alpha^2 u^2}{2\pi C_0} \frac{1 + e^{-\pi/2Q_i}}{1 - e^{-\pi/2Q_i}} \quad (6)$$

2.5. Outras configurações

Lefevre et al (2007) explorou o uso do conversor Buck-boost em sua pesquisa. O circuito apresentado foi o representado na figura. Esse circuito tem as vantagens de ter os valores de duty-cycle e frequência de chaveamento fixados e ser capaz de converter a energia independentemente se a tensão de entrada for alta ou baixa. Entretanto, o próprio autor compreende que a energia regenerada é baixa, devido, principalmente, à alta impedância do circuito.

Alguns pesquisadores (Cheng, 2007; Elvin, 2009) representam seus circuitos isolados do circuito do material piezoelétrico, mas se não referem exatamente a conversores isolados como forward e flyback.

3. COMPARAÇÃO

Segundo os experimentos de Lefuvre et al (2006), os quatro primeiros conversores têm o mesmo máximo de energia regenerada, mas em cada um o máximo não é atingido pelo mesmo valor do fator de acoplamento eletromecânico (constante eletromecânica). Com a interface padrão, a SSHI em série e em paralelo, o poder de regeneração tende a aumentar com o aumento do fator de acoplamento eletromecânico. Já no caso do retificador síncrono, a média de potência alcança o máximo valor para um valor do fator de acoplamento eletromecânico determinado.

No caso dos retificadores síncronos a maior vantagem é um alto grau de controle sobre as formas de onda de voltagem ou de corrente dos elementos piezoelétricos. Nos modelos onde a energia regenerada é chaveada no indutor, este último determina o pico de corrente. Esse pico pode ser reduzido usando uma alta indutância, porém isso pode ser difícil devido ao tamanho do indutor e a resistência adicional que a acompanha. Esse pico de corrente é facilmente controlado pelo conversor de potência.

Vale ainda ressaltar o consumo de potência de cada um dos circuitos. Os resultados colhidos mostram que a perdas devido ao indutor usado na configuração SSHI paralela e SSHI série (valores de potência que dependem do fator de qualidade Q_i) devem ser levados em consideração, pois são altas. Mas o consumo de potência do retificador síncrono deve ser diminuído para que haja potência útil na conversão. O controle dos circuitos SSHI consome menos que 5% da energia regenerada em experimentos.

4. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A regeneração de energia tem sido bastante pesquisada ultimamente por diversos motivos como preocupação com o meio ambiente, preocupação com sistemas implantados em locais de difícil acesso, além de investimento em sistemas autoalimentados. Muitos trabalhos têm sido focados na vibração mecânica como fonte da regeneração, utilizando materiais piezoelétricos por converter diretamente energia mecânica em elétrica de forma bidirecional. Nessa busca por eficientes sistemas de regeneração encontram-se discussões sobre vários tipos de circuitos para captar energia.

É percebido que os circuitos vão dos mais simples, a fim de retificar apenas meia-onda, aos mais sofisticados, como os controlados. Algumas pesquisas colocam como modelo simplificado uma isolação entre a parte elétrica e a parte mecânica, como foi citado na seção, mas não houve circuito proposto com isolação galvânica.

Os autores propõem desde já, como trabalhos futuros, a pesquisa de conversores isolados para regeneração de energia tendo em vista a proteção da carga.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e a FAPEMIG pelo apoio financeiro (Proc. No. 574001/2008-5 - INCT-EIE) e também a Texas Instruments e ON Semiconductor por nos mandar amostras gratuitas.

6. REFERÊNCIAS

- Cheng, S., Wang, N., Arnold, D. P., 2007, "Modeling of magnetic vibrational energy harvesters using equivalent circuit representations", *J. Micromech. Microeng.* 17, pp. 2328 – 2335.
- Elvin, N. G., Elvin, A. A., 2009, "A Coupled Finite Element - Circuit Simulation Model for Analyzing Piezoelectric Energy Generators", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 20, pp. 587 – 595.
- Ferrari, M., Ferrari, V., Marioli, D., Taroni, A., 2006, "Modeling, Fabrication and Performance Measurements of a Piezoelectric Energy Converter for Power Harvesting in Autonomous Microsystems", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 55, No. 6, pp. 2096 – 2101.
- Guilar, N. J., Amirtharajah, R., Hurst, P. J., 2009, "A Full-Wave Rectifier With Integrated Peak Selection for Multiple Electrode Piezoelectric Energy Harvesters", *IEEE Journal of Solid-state Circuits*, Vol. 44, No. 1, pp. 240 – 246.
- Hu, Y., Xue, H., Hu, T., Hu, H., 2008, "Nonlinear Interface Between the Piezoelectric Harvesting Structure and the Modulating Circuit of an Energy Harvester with a Real Storage Battery", *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 55, No. 1, pp. 148 – 160.
- Jian-Hui, L., Xiao-Ming, W., Hao, C., Xi, L., Tian-Ling, R., Li-Tian, L., 2009 "Analyses of vibration-based piezoelectric power generator in discontinuous operation mode", *Sensors and Actuators A*, 152, pp. 48 – 52.
- Kanjuro Makihara, K., Onoda, J., and Miyakawa, T., 2006, "Low energy dissipation electric circuit for energy harvesting", *Smart Mater. Struct.* 15, pp. 1493–1498.
- Le, T. T., Han, J., von Jouanne, A., Mayaram, K., Fiez, T. S., 2006, "Piezoelectric Micro-Power Generation Interface Circuits", *IEEE Journal of Solid-state Circuits*, Vol. 41, No. 6, pp. 1411 – 1420.
- Lefeuvre, E., Audigier, D., Richard, C., Guyomar, D., 2007, "Buck-Boost Converter for Sensorless Power Optimization of Piezoelectric Energy Harvester", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 22, No. 5, pp. 2018 – 2025.
- Lefeuvre, E., Badel, A., Richard, C., Petit, L., Guyomar, D., 2006, "A comparison between several vibration-powered piezoelectric generators for standalone systems", *Sensors and Actuators A* 126, pp. 405 – 416.
- Liang, J. R., Liao, W. H., 2009, "Piezoelectric Energy Harvesting and Dissipation on Structural Damping", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 20, pp. 515 – 527.
- Liu, Y., Tian, G., Wan, Y., Lin, J., Zhang, Q., Hofmann, H. F., 2009, "Active Piezoelectric Energy Harvesting: General Principle and Experimental Demonstration", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 20, pp. 575 – 585.
- Liu, W. Q., Feng, Z. H., He, J., Liu, R. B., 2007, "Maximum mechanical energy harvesting strategy for a piezoelement", *Smart Mater. Struct.* 16, pp. 2130 – 2136.
- Minazara, E., Vasic, D., Costa, F., Poulin, G., 2006, "Piezoelectric diaphragm for vibration energy harvesting" *Ultrasonics* 44, pp. e699 – e703.
- Shu, Y. C., Lien, I. C., 2006, "Analysis of power output for piezoelectric energy harvesting systems", *Smart Mater. Struct.* 15 pp. 1499–1512.
- Shu, Y. C. and Lien, I. C., 2006, "Efficiency of energy conversion for a piezoelectric power harvesting system", *J. Micromech. Microeng.* 16, pp. 2429 – 2438.
- Shu, Y. C., Lien, I. C., Wu, W. J., 2007, "An improved analysis of the SSHI interface in piezoelectric energy harvesting", *Smart Mater. Struct.* 16, pp. 2253–2264.
- Yen, B. C., Lang, J. H., 2006, "A Variable-Capacitance Vibration-to-Electric Energy Harvester", *IEEE Transactions on Circuits and Systems – I: regular papers*, vol. 53, n.2, pp. 288 – 295.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

Review of Shunt Circuits and Their Variations used in Piezoelectric Energy Harvesting in Vibrating Structures (2006-2009)

Marcella Cristina Oliveira Chagas, marcella_cristina@yahoo.com¹

Carlos Alberto Gallo, gallo@mecanica.ufu.br¹

¹Federal University of Uberlândia – National Institute of Science and Technology - “Smart Structures in Engineering”, Av. João Naves de Ávila n 2160 Campus Santa Mônica – Bloco 1M CEP: 38400-902 Uberlândia – MG

Resumo: *Concern for the purpose of renewable energy in the world has been increasing. Many researchers are studying how to use natural energy resources in order to preserve finite resources and avoid scratches and damage to the environment. This study aims to analyze the most important experiences studied between years 2006 and 2009 in conversion of mechanical energy from environment into electrical energy using smart materials, with piezoelectric effect in vibrating structures (power harvesting). The conversion of mechanical energy into electrical energy has been the focus of research for self-powered systems, especially for devices placed in remote location. After power has been removed, it is necessary to use a shunt circuit that could make possible to stored energy or to use it and ensure its compatibility with the system. Therefore, an electrical circuit removes the tension generated by the piezoelectric material, then this is rectified and then passes through the DC-DC converter. This paper will examine the electrical circuits have already been developed and will show a comparison of the converters that have been proposed as circuits that are used only for diodes, synchronous rectifiers, that use elements like MOSFETs and their losses can be considered negligible, and its variations. It will be also mentioned the efficiency of energy conversion of each circuit discussed so that might be reached a conclusion of advantages and disadvantages of each converter compared.*

Palavras-chave: *Converter; Storage; Renewable energy; Power harvesting; Piezoelectric material.*

The authors are the only responsible for the content of the printed material included in his work.