



Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

SHAMIRA MARTINIANO DE LIMA

**RECUPERAÇÃO DE ENERGIA PARA SISTEMAS DE BAIXO
CONSUMO**

Campina Grande, Paraíba
Setembro de 2013

SHAMIRA MARTINIANO DE LIMA

RECUPERAÇÃO DE ENERGIA PARA SISTEMAS DE BAIXO CONSUMO

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Eletrônica

Orientador:

Professor Dr. Raimundo Carlos Silvério Freire

Campina Grande, Paraíba
Outubro de 2013

SHAMIRA MARTINIANO DE LIMA

RECUPERAÇÃO DE ENERGIA PARA SISTEMAS DE BAIXO CONSUMO

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade
Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de Bacharel em
Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Eletrônica

Aprovado em / /

Professor Avaliador
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Dr Raimundo Carlos Silvério Freire
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho à minha avó, sem a qual eu jamais teria chegado até aqui. Uma amiga fiel, dedicada, corajosa e exemplar.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, divino mestre por ter me dado força nos momentos em que tudo parecia cada vez mais distante e impossível, enchendo meu caminho de Luz.

Agradeço também à minha família que apesar da distância física sempre estava ao meu lado. Ao meu pai que embora muito calado sempre soube como passar boas lições. As minhas irmãs que apesar das discursões comuns entre irmãs sempre estiveram comigo. Aos meus avós que acreditaram nesse sonho junto comigo.

Agradeço ao meu noivo Antonio Carlos por toda paciência, incentivo, amor, companheirismo, cumplicidade e por nunca ter medido esforços para me fazer feliz.

Agradeço ao Professor Freire pela dedicação e paciência na orientação desse trabalho. A todos os funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica.

Agradeço também a todos os amigos, sejam eles de infância ou os que fiz durante o curso, o apoio de todos foi essencial durante cada trecho desse percurso.

*“Nem tudo que pode ser contado conta.
Nem tudo que conta pode ser contado”*

Albert Einstein.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo de sistemas autônomos de baixo consumo desenvolvidos com fins de recuperação de energia ambiental ou através do corpo humano. A redução do consumo dos sistemas eletrônicos, fez a pesquisa por novas fontes de energia capazes de alimentar esses dispositivos aumentar nas últimas décadas. Nos sistemas eletrônicos também ocorre à tendência da produção de energia descentralizada em que sistemas autônomos são capazes de produzir sua própria energia e não dependem de fontes de alimentação externas. A conversão de energia está sendo integrada tanto a sistemas discretos como em circuitos integrados. A necessidade do fornecimento da chamada “energia limpa” é cada vez mais crescente nos dias atuais. Em alguns países existem várias discussões e algumas ações no sentido de se descentralizar a conversão de energia. Nesse trabalho é feita uma análise de alguns sistemas já desenvolvidos com recuperação de energia.

Palavras-chave: Recuperação de energia, sistemas autônomos, energia ambiental, conversão de energia, colheita de energia.

ABSTRACT

This work is a study of autonomous systems developed for the purpose of energy recovery environment or through the activity human. Reducing consumption of electronic systems did the research for new energy sources capable of powering these devices increase in recent decades. Electronics systems is also the tendency of decentralized energy production in which autonomous systems are able to produce their own energy and not rely on external power sources. Energy conversion is being integrated both systems as discrete integrated circuits. The necessity of providing “clean energy” is ever increasing nowadays. Some countries there are several discussions and some actions to decentralize energy conversion. This work makes an analysis of some systems already developed with energy recovery.

Keywords: Energy recovery, autonomous systems, environmental energy, energy conversion, energy harvesting.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Camelos usando captação energia solar para alimentar unidades de refrigeração ajudou entregar vacinas para as aldeias africanas remotas na década de 1980	3
Figura 2 - Estrutura de quartzo em estado natural.....	7
Figura 3 - a) efeito da compressão b) efeito da tração.....	7
Figura 4 – definição de eixos para materiais piezoelétricos	9
Figura 5 Tacômetro Eletromagnético	10
Figura 6 Efeito Seebeck.....	11
Figura 7 - geração fotovoltaica.....	12
Figura 8 - Aire, protótipo que converte respiração em eletricidade	16
Figura 9 - Carregadores que transformam energia cinética em elétrica.....	19
Figura 10 - Diagrama simples que mostra dois sistemas de geração a partir do sapato: (1) inserção filme piezoelétrico ou (2) com mola de metal	21
Figura 11 - O aparelho instalado junto ao carril de uma linha ferroviária	22
Figura 12: Eletricidade extraída do ouvido alimenta implantes médicos.....	24
Figura 13 - Fone de ouvido que recarrega celulares.....	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características piezoelétricas do PZT e PVDF	8
Tabela 2 - Resumo das densidade de energia máxima de três tipos de transdutores	13
Tabela 3 - Energia humana por atividade	14

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PZT – Titaconato zirconato de Chumbo

PVDF – Fluoreto de Polividileno

MIT – Massachusetts Institute of Technology

USP – Universidade de São Paulo

EEL – Escola de Engenharia de Lorena

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Objetivo	2
1.2	Motivação	2
1.3	Metodologia.....	4
2	Revisão Bibliográfica	4
2.1	<i>Power Harvesing</i>	5
2.1.1	Piezoelétrico	6
2.1.2	Eletromagnético	10
2.1.3	Térmico	11
2.1.4	fotovoltaico.....	11
2.1.5	Comparação entre os principais métodos de captação de energia	12
2.2	Potenciais do corpo humano para geração de energia	13
2.2.1	Calor do corpo.....	14
2.2.2	Respiração	15
2.2.3	Pressão Arterial	17
2.2.4	Movimento dos membros superiores	17
2.2.5	Caminhada.....	19
3	Sistemas com recuperação de energia	20
3.1	Transdutores piezoelétricos em sapatos.....	20
3.2	Outros sistemas com recuperação de energia	21
3.2.1	Energia elétrica a partir de vibrações mecânicas de uma linha ferroviária..	22
3.2.2	Energia Elétrica extraída do ouvido	23
3.2.3	Fone de ouvido que recarrega celulares	24
3.3	Armazenamento	25
4	Conclusão.....	27
5	Bibliografia	28

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o crescimento das tecnologias de desenvolvimento dos semicondutores presentes nos circuitos integrados foi responsável por enormes progressos tecnológicos. Foi um período em que a indústria de semicondutores cresceu a uma taxa bastante expressiva. Os avanços tecnológicos realizados na área de microeletrônica permitiram agregação de valor e qualidade em toda a cadeia produtiva de praticamente todos os ramos.

A necessidade do fornecimento da chamada “energia limpa” é cada vez mais crescente nos dias atuais. Em alguns países existem várias discussões e algumas ações no sentido de se descentralizar a conversão de energia. Há incentivo para que as residências e empresas produzam parte da energia consumida, buscando evitar que grandes construções sejam feitas para se produzir quantidades muito grandes de energia. Os sistemas descentralizados geralmente causam menos impactos ao meio ambiente e causam menos problemas no caso da fonte de energia principal sofrer alguma pane.

A redução do consumo dos sistemas eletrônicos, fez a pesquisa por novas fontes de energia capazes de alimentar esses dispositivos aumentar nas últimas décadas. Nos sistemas eletrônicos também ocorre à tendência da produção de energia descentralizada em que sistemas autônomos são capazes de produzir sua própria energia e não dependem de fontes de alimentação externas. A conversão de energia está sendo integrada tanto a sistemas discretos como em circuitos integrados.

Em razão da autonomia da bateria está diretamente relacionada com seu tamanho e peso, a necessidade de fontes de energia renováveis e adicionais para os chamados *chips* autônomos vem crescendo para atender todo o ciclo de modernidade em diversos setores e aplicações. Soma-se a esse fator a questão da quantidade de energia presente em uma bateria ser finita, tem vida útil limitada e contém produtos químicos geralmente perigosos, além do inconveniente da substituição periódica, tarefa que pode ter alto custo de complexidade (SODANO & INMAN, 2004).

Com o desenvolvimento da micro e da nanotecnologia, os dispositivos eletrônicos estão em rápido avanço. A redução de tamanho é acompanhada da redução do consumo

de energia, o que tem possibilitado o desenvolvimento de fontes autônomas para alimentá-los. Estas fontes são integradas a estes dispositivos para torná-los independentes de fontes de energia externas (PARACHA, A. M., BASSET, P., GALAYKO, DUDKA,2008).

Pesquisas têm sido feitas para se descobrir maneiras eficientes de extrair energia no ambiente e armazená-la em baterias, com isso, o total de trabalhos dedicados ao “*Power harvesting*” está em crescimento. Nestes é comum a geração de energia a partir de vibrações mecânicas (*vibration energy harvesting*). Existem diferentes tipos de transdutores que convertem vibrações mecânicas em eletricidade, entretanto os transdutores piezoelétricos são os que tem recebido uma maior atenção devido da capacidade de converter diretamente a deformação sofrida em energia elétrica utilizável podendo ser facilmente integrados ao sistema, sendo bastante eficientes para sistemas de baixo nível (DE MARQUI,2009).

1.1 OBJETIVO

O objetivo desse trabalho de conclusão de curso é analisar, quantificar e qualificar sistemas autônomos e seus métodos para recuperação de quantidades pequenas de energia através de atividades cotidianas como caminhada, movimento dos membros superiores, respiração, pressão sanguínea, energia eólica, solar, térmica, entre outras formas.

1.2 MOTIVAÇÃO

O mundo hoje é movido pela eletricidade. As pessoas estão cada vez mais contando com eletricidade para a iluminação, casa de manutenção, entretenimento e comunicação em suas vidas diárias, e fabricação e processamento de dados na empresa. No entanto, a acessibilidade e sustentabilidade de eletricidade é limitada, por exemplo, a cobertura de redes de energia ou a capacidade de armazenamento. Nas regiões fora da rede ou quando a capacidade armazenamento não pode atender o uso, a única solução para as necessidades de energia elétrica está gerando eletricidade a partir de fontes de energia disponíveis no local. Captação de energia é, portanto, a ideia de convertendo a energia do ambiente em eletricidade para alimentar dispositivos eletrônicos locais. No entanto, é preciso diferenciar captação de energia a partir de geração de energia

em grande escala para a grande necessidades, tais como usinas solares ou parques eólicos. Captação de energia é para baixo consumo de energia dispositivos. Alguns exemplos da aplicação da captação de energia são introduzidos a seguir:

1) Área remota:

Um exemplo de um projeto em que a captação de energia em uma área remota foi essencial é o do “Camelo Refrigerador”, mostrado na Figura 1 que foi usado para a entrega de vacina na África central. As vacinas devem ser mantidas refrigeradas para manter sua funcionalidade. No entanto, a falta de energia elétrica em milhares de aldeias africanas priva muitos habitantes do uso dessas vacinas.

Na década de 1980, foram desenhados refrigeradores movidos a energia solar para fornecer as vacinas a refrigeração necessária. Pequenos frigoríficos foram montados acima de camelos junto com painéis solares. Os painéis solares geraram energia suficiente para manter vacinas igual ou abaixo da temperatura máxima exigida de 8 ° C. Milhares de vidas foram salvo pelo “Camelo refrigerador” (GAO, 2011).



Figura 1 - Camelos usando captação energia solar para alimentar unidades de refrigeração ajudou entregar vacinas para as aldeias africanas remotas na década de 1980

Fonte: GAO, 2011

2) Ambiente hostil:

Em ambiente hostil, como alta temperatura, alta umidade e corrosão, sensores precisam de proteção especial em suas estruturas. Normalmente, os contatos elétricos dos fios são os pontos mais fracos. Isso limita o acesso dos sensores a fontes de energia externas. Fontes de potência, como baterias, podem ser colocadas junto desses sensores, entretanto essas têm vida útil limitada e sofrem grave degradação do desempenho a

temperaturas elevadas. Além disso, a substituição das baterias em ambiente hostil é impraticável e dispendiosa. Exemplos deste tipo de ambiente incluem camadas resistentes ao calor do ônibus espacial, rolamentos de rotação no motor de uma aeronave, freios a disco, eixo de alta velocidade rotação. Nestes casos, o calor e as vibrações são as fontes que podem ser convertidas em eletricidade.

3) Implantes médicos

Implantes médicos precisam de fontes de energia incorporados para funcionar. Um exemplo é o marca-passo, a bateria constitui mais de 50% do peso total e volume. Esta bateria é esgotada em cerca de 10 anos, e tem de ser substituída através de uma cirurgia. A cirurgia pode causar problemas de saúde graves e até mesmo a mortalidade dos pacientes, especialmente para os idosos. Assim, uma longa vida útil, sem manutenção é necessária fonte de energia livre.

1.3 METODOLOGIA

Esse projeto de conclusão de curso foi executado com auxílio do professor orientador, pesquisas e discussões sobre temas atuais e perspectivas para o futuro sobre esses sistemas com recuperação de energia. As pesquisas foram desenvolvidas principalmente a partir de consultas a artigos, teses, dissertações, livros e sites relacionados ao assunto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo é feita uma revisão bibliográfica onde são apresentados conceitos básicos para compreensão de sistemas com recuperação de energia.

2.1 *POWER HARVESTING*

Várias pesquisas têm sido feitas para se descobrir maneiras eficientes de extrair energia disponível no ambiente e armazená-la em baterias. O chamado “*power harvesting*”, cuja tradução literal significa “colheita de energia”, é o processo de captura de quantidades diminutas de energia a partir de uma ou mais fontes de energia que ocorrem naturalmente, acumulando-os e armazenando-as para uso posterior. Dispositivos de captação de energia eficiente capturaram, acumulam, armazenam e gerenciam a condição desta energia para executar uma tarefa útil. Da mesma forma, um módulo de captação de energia é um dispositivo eletrônico que pode realizar todas essas funções ao poder de uma variedade de sensores e circuitos de controle para aplicações de serviços intermitentes.

A energia captada de uma fonte do ambiente ou através de atividades humanas é uma alternativa cada vez mais viável, em razão da autonomia das baterias estar diretamente relacionada ao seu tamanho e peso, a necessidade de fontes de energia adicionais e renováveis tem se tornado muito importante nos diversos segmentos da indústria. Somando-se a isso o fato de que as baterias disponibilizam uma quantidade finita de energia, têm vida útil limitada e contém produtos químicos geralmente perigosos; além do inconveniente da substituição periódica, tarefa que pode ter alto custo e grande complexidade, tornando-se até mesmo impossível em razão do local onde a bateria está instalada (SODANO; INMAN, 2004; NG; LIAO, 2005).

Dentre as fontes comuns de energia pode-se citar:

- i. Energia Luminosa – Proveniente da luminosidade do ambiente (ex. a luz solar)
- ii. Energia Térmica – minúsculos geradores termoelétricos produzem eletricidade quando submetido a um gradiente de temperatura;
- iii. Energia Mecânica – energia liberada a partir do movimento e vibrações
- iv. Corpo humano – Na verdade uma combinação das outras fontes de energias que são produzidas no corpo humano. Como captação de vibrações mecânicas e energia térmica;
- v. Energia Eletromagnética

Pode-se citar quatro métodos principais para captação de energia: piezoelétrico, térmico, fotovoltaico, eletromagnético vinculados a três fontes de energia do ambiente a vibração, térmica e a solar. Cada um destes é discutido nas subseções seguintes.

2.1.1 PIEZOELÉTRICO

Piezeletricidade é uma das propriedades básicas de grande parte dos cristais, cerâmicas e polímeros. Uma definição simples e concisa para esse efeito é que nesses materiais a aplicação de uma tensão mecânica causa o desenvolvimento de um deslocamento elétrico interno. Tal deslocamento pode ser demonstrado de duas formas: através de uma polarização elétrica interna ou através do aparecimento de cargas elétricas na superfície.

O efeito piezoelétrico direto (habilidade do material para transformar a tensão mecânica em carga elétrica) foi demonstrado e publicado pela primeira vez em 1880 por Pierre e Jacques Curie, dois físicos franceses, que também eram irmãos. Um ano depois, eles descobriram o efeito piezoelétrico inverso (a capacidade de converter um potencial elétrico aplicado em tensão mecânica). (ARNAU, 2008; HEYWANG, 2008; JOSE MARIA, 2010).

Apesar da descoberta a primeira utilização desse material ocorreu apenas durante a primeira guerra mundial, em 1916, quando o físico francês Paul Langevin utilizou cristais de quartzo na construção do primeiro sonar. Após a primeira guerra mundial, devido à dificuldade de se excitar transdutores construídos com cristais de quartzo, por estes demandarem geradores de alta tensão, iniciou-se o desenvolvimento de materiais piezoelétricos sintéticos. Estes esforços levaram à descoberta e aperfeiçoamento, nas décadas de 40 e 50, das cerâmicas piezoelétricas de Titanato de Bário pela então URSS e Japão, e das cerâmicas piezoelétricas de Titanato Zirconato de Chumbo (PZT's) pelos japoneses. Atualmente as cerâmicas piezoelétricas tipo PZT, em suas diversas variações, são as cerâmicas predominantes no mercado. Também podemos encontrar outros materiais, como por exemplo, o PT (PbTiO_3) e o PMN ($\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$), utilizados em dispositivos que exigem propriedades especiais e muito específicas, como transdutores para alta temperatura. (ABEL; LUIZ, 2010).

Na Figura 2 é mostrado a estrutura de um material piezoelétrico em estado natural, não existem dipolos elétricos uma vez que as cargas estão em equilíbrio, ou seja, o centro de gravidade positivo e negativo são coincidentes.

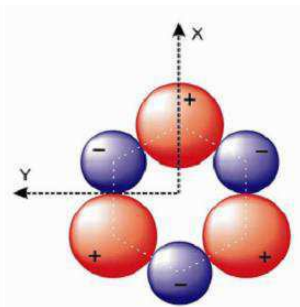


Figura 2 - Estrutura de quartzo em estado natural
Fonte: Escola de Engenharia de Lorena – USP

A seguir é mostrado na Figura 3 o cristal após sofrer um esforço mecânico compressão (3a) e tração (3b). Observa-se que o centro de simetria das cargas positivas e negativas não são mais coincidentes por isso tem-se origem de dipolos elétricos.

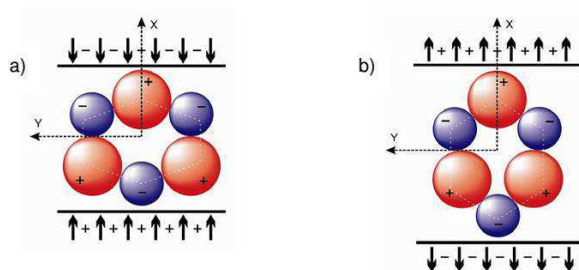


Figura 3 - a) efeito da compressão b) efeito da tração
Fonte: Escola de Engenharia de Lorena – USP

Para selecionar um material piezoelétrico para aplicações tecnológicas é necessário conhecer algumas de suas propriedades, entre elas pode-se destacar (ABEL; LUIZ, 2010):

- **Constante de carga piezoelétrica** – d (m / V ou C / N) - Informa qual é a proporção entre a variação dimensional (Δl) do material piezoelétrico (em metros) e a diferença de potencial aplicada (em Volts), e entre a geração de cargas elétricas (em Coulombs) e a força aplicada no material (em Newtons). Essa informação é usada principalmente em projetos de posicionadores piezoelétricos e sensores de força/deformação.
- **Constante de tensão piezoelétrica** – g ($V.m / N$) - Informa qual é a proporção entre a diferença de potencial gerada (em Volts) e a força aplicada (em Newton) para o comprimento de 1 metro. Essa informação é usada no projeto de detonadores de impacto e “*magic clicks*” (produz uma centelha elétrica que acende a chama de um fogão).

- **Coefficiente de acoplamento** – k - Eficiência do material na conversão de energia elétrica em mecânica e vice versa. Essa informação é indispensável no controle de qualidade das cerâmicas piezoelétricas e no projeto de dispositivos em que não se deseja a conversão cruzada de energia, ou seja, que uma vibração ou deformação em um eixo não gere cargas elétricas ou diferença de potencial em outro eixo. Neste caso, quanto menor o respectivo fator de acoplamento melhor.
- **Fator de qualidade mecânico** - Q - É uma medida das perdas mecânicas (amortecimento) do material. Usado no projeto de dispositivos dinâmicos de alta potência.
- **Temperatura de Curie** $T_C(^{\circ}C)$ - É a temperatura na qual a estrutura cristalina do material sofre uma transição de fase e o mesmo deixa de apresentar propriedades piezoelétricas. Depois de ultrapassada esta temperatura, o material perde a polarização remanescente induzida tornando-se inútil para a utilização como elemento transdutor de energia elétrica em mecânica. Essa informação é indispensável no projeto de dispositivos que deverão operar em altas temperaturas e de alta potência.

Na Tabela 1 são mostradas características dos dois materiais piezoelétricos mais utilizados, o Fluoreto de Polivinilideno e Titanato Zirconato de Chumbo.

Tabela 1 - Características piezoelétricas do PZT e PVDF

Propriedades	PVDF*	PZT
Densidade (g/cm^3)	1.78	7.6
Permissividade relativa (ϵ/ϵ_0)	12	1700
Módulo de elasticidade ($10^{10} N/m$)	0.3	4.9
Constante de carga ($10^{-12} C/N$)	$d_{31}=20$ $d_{33}=30$	$d_{31}=180$ $d_{33}=360$
Constante de tensão (V.m/N)	0.11	$d_{31}=0.35$ $d_{33}=0.69$

*Fluoreto de polivinilideno

Fonte: STARNER, 2010

Os subscritos em algumas das constantes indicam a direção ou modo das interações mecânicas e elétricas. É mostrado na Figura 4 a definição dos eixos para

materiais piezoelétricos, note que os eletrodos são ligados no eixo 3. O subscrito 31 indica que a origem é causada por um eixo de carga elétrica aplicada ao eixo 3. Por outro lado, a tensão no eixo 1 vai produzir uma carga elétrica ao longo do eixo 3. Em prática, esses elementos tem 75% do valor teórico devido para o armazenamento de energia mecânica na montagem e camada de metal.

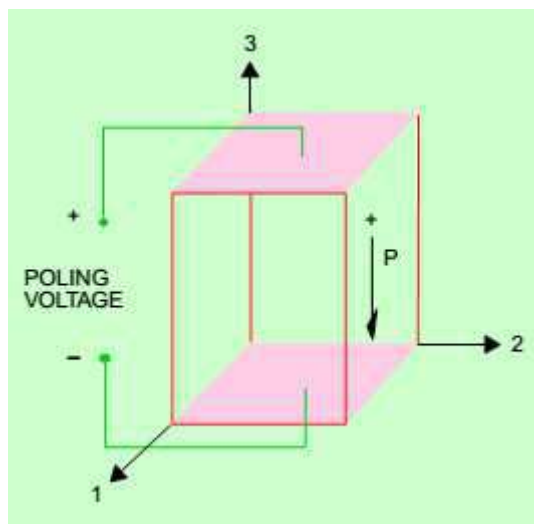


Figura 4 – definição de eixos para materiais piezoelétricos
Fonte: STARNER, 2010

Os PZTs são inadequados para aplicações onde a flexibilidade é necessária. Já, o PVDF, em contraste, é muito flexível. Além disso, é mais fácil de manusear e moldar, apresentam uma boa estabilidade ao longo tempo, e não despolarizam quando submetido a alta campos.

O efeito piezoelétrico direto ou inverso levou a criação dos transdutores eletromecânicos. Transdutores eletromecânicos são dispositivos que convertem energia elétrica em energia mecânica, e vice-versa. Esses transdutores encontraram aplicações quando são usados de forma passiva (sensor) ou ativa (atuador). Geradores piezoelétricos são utilizados para fornecer energia elétrica para pequenos componentes eletrônicos através da conversão da energia disponível no meio em energia elétrica.

2.1.2 ELETROMAGNÉTICO

O campo do eletromagnetismo tem suas principais descobertas a partir de 1777, com o físico francês Charles Augustin de Coulomb que formulou a lei que leva seu nome (lei do inverso do quadrado das distâncias para as interações de cargas elétricas). Posteriormente, Benjamin Franklin (1706-1790), Galvani (1737-1798) e Volta (1745-1827) realizaram vários experimentos e foi em 1820 que Oersted (1777-1851) descobriu que uma corrente elétrica produz um campo magnético, Ampère (1775-1836) já havia estudado a conexão entre corrente constante e magnetismo. Em 1821, Faraday (1791-1867) mostrou que um campo magnético variável poderia produzir uma corrente elétrica; Maxwell (1831-1879) apresentou uma teoria que forneceu uma explicação completa e unificada para os fenômenos elétricos, magnéticos e ópticos em 1864 e Hertz (1857-1894) demonstrou, inequivocamente, a existência de ondas eletromagnéticas (SHAMOS, 1987; OLBY, 1996; SMITH, 1997; KEITHLEY, 1999; JOSE MARIA, 2010).

Um transdutor eletromagnético opera quando desloca-se um campo magnético sobre um condutor. Não importa se o campo magnético é deslocado através do condutor ou se o condutor é deslocado através do campo magnético. Em ambos os casos haverá sempre uma tensão produzida.

O valor da tensão depende da velocidade com a qual o campo magnético desloca-se sobre o condutor. Depende também do número de condutores. Em outras palavras, quanto maior o número de condutores deslocando-se através do campo magnético maior será a tensão produzida. Na Figura 5 é mostrado um tacômetro eletromagnético, um tacômetro é um dispositivo utilizado para medir a velocidade do motor, neste modelo são colocados dois ímãs permanentes na roda de alumínio. A medida que cada ímã passa pela bobina uma tensão é produzida uma vez que o campo magnético está se deslocando sobre o condutor.

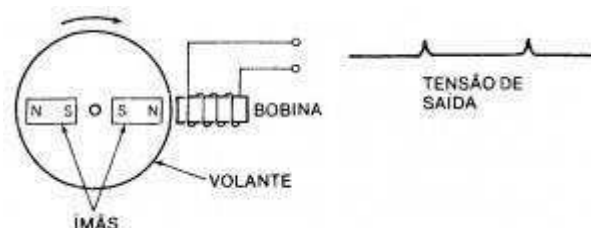


Figura 5 Tacômetro Eletromagnético
Fonte: <http://eletronicos.etc.br>

2.1.3 TÉRMICO

A produção de energia elétrica a partir de um gradiente de temperatura foi observada pela primeira vez em 1821 pelo físico Thomas Johann Seebeck. Peltier descobriu em 1834 que o calor é liberado ou absorvido dependendo do sentido da corrente que atravessa uma junção de dois condutores diferentes. Mas foi Thomson em 1851 que demonstrou este efeito com mais precisão (JOSE MARIA, 2010).

O efeito Seebeck como ficou conhecido produz uma tensão entre dois condutores de matérias diferentes quando esses são submetidos a temperaturas diferentes. O princípio de Seebeck é mostrado na Figura 6.

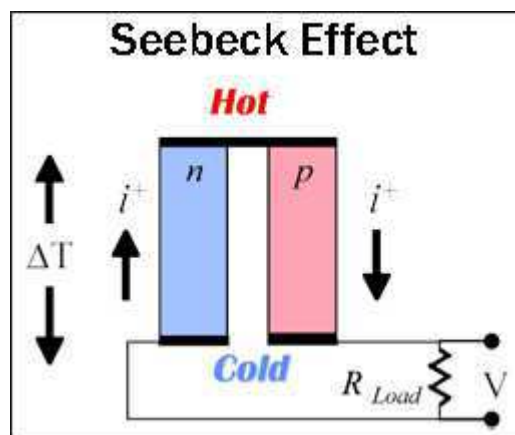


Figura 6 Efeito Seebeck
Fonte: Thermoelectric Elements - www.letu.edu

Os gerados termoelétricos mais simples e conhecidos são os termopares, cujo princípio é também o exposto na Figura 6. Um material do tipo P e outro do tipo N são conectados termicamente em paralelo e eletricamente em série.

2.1.4 FOTOVOLTAICO

O efeito fotovoltaico corresponde a criação de uma grandeza elétrica (tensão ou corrente) correspondente em um material após sua exposição a luz. A capacidade de produzir energia elétrica a partir da radiação solar foi observada pela primeira vez pelo físico francês Alexandre-Edmond Becquerel em 1839, quando utilizou eletrodos em uma solução eletrolítica. Entretanto, foi apenas em 1877 que Adams e Day observaram o efeito em um elemento sólido, o selênio.

Para formar uma célula fotovoltaica (ou um diodo) são unidos os dois tipos de semicondutores. Na área da união, chamada de Junção-PN, os elétrons livres do semicondutor tipo N migram para o semicondutor tipo P para ocuparem esses espaços. Essa migração não ocorre indefinidamente, pois forma-se um campo elétrico na área de junção que impede que os elétrons continuem fluindo. Ao receberem fótons de luz visível os elétrons são energizados, mas não conseguem fluir da camada N para a camada P. Se ligarmos as duas camadas externamente, podemos aproveitar a corrente elétrica que se forma na passagem dos elétrons de uma camada para outra. É assim que funciona uma célula fotovoltaica. O modelo de uma célula fotovoltaica é mostrado na Figura 7.

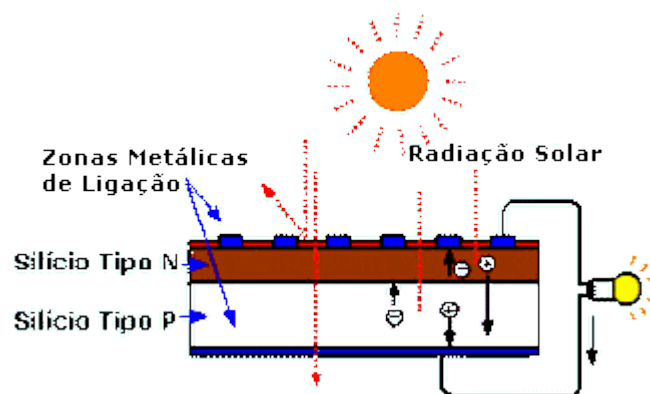


Figura 7 - geração fotovoltaica
Fonte: www.electronica-pt.com

2.1.5 COMPARAÇÃO ENTRE OS PRINCIPAIS MÉTODOS DE CAPTAÇÃO DE ENERGIA

Foram analisados os principais métodos de captação de energia. Embora existam vários quando o assunto é captação de energia a partir de vibrações mecânicas os transdutores piezoelétricos são os mais utilizados devido sua capacidade de converter diretamente a deformação sofrida em energia elétrica utilizável, são fáceis de serem integrados ao sistema. Quando comparados com os outros transdutores os piezoelétricos tem a capacidade de produzir a maior quantidade de energia por volume como é mostrado na tabela 1 (JOSÉ MARIA, 2010).

Tabela 2 - Resumo das densidade de energia máxima de três tipos de transdutores

Tipo	Densidade de energia (mJ/cm³)
Piezoelétrico	35,4
Eletromagnético	24,8
Eletrostático	4

Fonte: (ROUNDY; WRIGHT, 2004)

2.2 POTENCIAIS DO CORPO HUMANO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA

Essa seção é baseada no artigo “*Human-powered wearable computing*” (Computação vestível com potência humana) do estudante de doutorado Thad Starner, do *Massachusetts Institute of Technology*, MIT, publicado no *IBM Systems Journal*.

Starner pesquisou a necessidade de obter novas fontes de energia para aumentar a autonomia dos dispositivos da computação móvel, onde analisou os potenciais do corpo humano para a geração de energia que serviria de fonte de alimentação para tais dispositivos. Starner pesquisou o montante de energia que poderia ser produzida por diversos sistemas do corpo humano, dentre eles: calor do corpo, respiração, pressão arterial, movimento dos membros superiores e caminhada, cada um desses será descrito nas subseções a seguir.

O termo “*wearable computing*” cuja tradução literal significa “computação vestível” corresponde ao esforço para tornar os computadores verdadeiramente parte de nossas vidas por incorporá-los a nossas roupas, sapatos ou criando formatos que facilitem seu serem usados em acessórios como o óculos de sol. O hardware computacional em si vem sendo cada vez mais reduzido em tamanho possibilitando essa incorporação, entretanto os sistemas de energia que alimentam esses dispositivos ainda são grandes e volumosos. Por isso Starner analisou a quantidade de energia gerada por atividades humanas cotidianas com a finalidade de substituir os sistemas volumosos de energia e gerar a partir dessas atividades a energia necessária para dar autonomia aos dispositivos móveis.

2.2.1 CALOR DO CORPO

O corpo humano converte energia em forma de calor, sendo essa naturalmente possibilidade de recuperação de energia. Entretanto, ao gerar energia pela troca de calor a quantidade de energia reaproveitada é limitada eficiência de Carnot. Em um ambiente com temperatura relativamente baixa de 20°C (293K) e corpo a uma temperatura de 37°C (310K), a eficiência de Carnot é:

$$\frac{T_{corpo} - T_{ambiente}}{T_{corpo}} = \frac{310K - 293K}{310K} = 5,5\%$$

Para um ambiente com temperatura de 27°C (300K), a eficiência é:

$$\frac{T_{corpo} - T_{ambiente}}{T_{corpo}} = \frac{310K - 300K}{310K} = 3,2\%$$

Portanto, apenas uma parte muito pequena poderá ser aproveitada para gerar energia. Na Tabela 3 estão referenciadas a energia gasta na realização de algumas atividades humanas cotidianas.

Tabela 3 - Energia humana por atividade

Atividade	Kcal/hora	Watts	Potência reaproveitada dada a eficiência de Carnot (Watts)
Dormir	70	81	4,4
Deitado	80	93	5,12
Conversar	110	128	6,88
Esperando em pé	110	128	6,88
Dirigir um carro	140	163	8,97
Arrumar a casa	150	175	9,62
Nadar	500	582	32
Correr	1400	1630	89,65

Fonte: STARNER, 2010

As eficiências acima assumem que todo o calor irradiado pelo corpo é capturado e transformado em energia perfeitamente. No entanto, mesmo sob as melhores condições, a evaporação conta de perda de calor para 25 por cento do total de dissipação de calor para uma “transpiração insensível”. Em diferenças de temperatura mais extremas, uma maior eficiência pode ser alcançada, mas retirar do usuário quantidades de calor em temperaturas ambientais adversas não é prático.

Para que o sistema atinja a eficiência máxima de Carnot para as potências referidas na Tabela 3 o usuário teria de ser totalmente encapsulado. Uma alternativa seria o uso de um terno ou uma roupa de mergulho. Ou o uso de um colar cervical no pescoço, uma vez que o pescoço corresponde a aproximadamente 1/15 da área superficial da parte que o corpo tenta manter aquecido em todos os tempos e assumindo o mesmo calor de dissipação sobre o corpo, um máximo de 0,20-0,32W poderia ser recuperado com o uso deste colar.

A cabeça também pode ser uma fonte de calor conveniente para algumas aplicações onde já se usam capacetes ou capas protetoras sobre a mesma. A área da superfície da cabeça é de cerca de três vezes maior do que o pescoço e poderia proporcionar 0,60-0,96 W de potência dada ótima conversão. Mesmo assim, a funcionalidade, conforto e eficácia de tais sistemas são relativamente limitadas.

2.2.2 RESPIRAÇÃO

Uma pessoa média de 68 kg consome uma taxa aproximada de 30 litros de ar por minuto. Se aumentar o esforço necessário para a inspiração podem surgir efeitos fisiológicos adversos, assim apenas a expiração foi considerada para geração de energia. A pressão exercida na respiração é de apenas 2% acima da pressão atmosférica, assim a energia disponível durante a respiração é:

$$W = p\Delta v$$

$$W = 0,02 \left(\frac{1,013 \times 10^5}{m \cdot seg^2} \right) \left(\frac{30l}{1min} \right) \left(\frac{1min}{60seg} \right) \left(\frac{1m^3}{1000l} \right)$$

$$W = 1,0W$$

Aproveitar a energia da respiração envolve o uso de máscaras que podem causar desconforto ao usuário. Na Figura 8 é mostrado o *Aire* um protótipo criado pelo designer brasileiro João Lammoglia que converte a respiração humana em eletricidade. Para alguns profissionais tais como pilotos de aeronaves militares, astronautas, ou manipuladores de materiais perigosos, o uso de máscaras é comum e essa pode ser uma excelente alternativa para captação de energia nesses casos.



Figura 8 - Aire, protótipo que converte respiração em eletricidade
Fonte: Super interessante

No entanto, a eficiência de uma combinação de gerador de turbina é de um percentual de apenas 40%, ou seja cerca de 0,40W, e quaisquer tentativas de explorar esta fonte de energia iria colocar um esforço adicional para o usuário. Assim, o benefício dos cerca de 0,40 W de potência recuperável tem de ser ponderado contra o outro, métodos mais eficientes são discutidos nas seções a seguir.

Uma outra forma de gerar energia a partir de respiração é fixar uma faixa apertada em torno do peito do usuário. Medições empíricas comprovaram que existe uma mudança de 2,5 centímetro (cm) na circunferência do tórax ao respirar normalmente, e essa mudança pode chegar até 5 cm ao respirar profundamente. Uma grande quantidade de força pode ser mantida durante este intervalo. Assumindo uma taxa de respiração de 10 respirações por minuto e uma força de 100 N aplicada sobre a 0,05 m de distância máxima, o total energia que pode ser gerada é descrito a seguir:

$$P = (100N)(0.05m) \frac{10 \text{ respirações}}{1 \text{ minuto}} \frac{1 \text{ minuto}}{60 \text{ segundos}} = 0,83W$$

Com um projeto cuidadoso, um fração significativa desta potência pode ser recuperada, cerca de 50%, mas a resultante em torno 0,42 W é uma quantidade relativamente pequena de potência pelo inconveniente que é causado ao usuário.

2.2.3 PRESSÃO ARTERIAL

Embora alimentar um sistema eletrônico com pressão arterial possa parecer impraticável, os números são bastante surpreendente. Assumindo uma pressão sanguínea média de 100 mm de Hg (mercúrio) (pressão arterial normal desejada é 120/80 acima da pressão atmosférica), considerando uma frequência cardíaca de uma pessoa normal em repouso de cerca 60 batimentos por minuto, e que um volume de 70 mililitros (ml) passa através da aorta por batida, a energia que pode ser gerada é:

$$P = (100mmHg) \left(\frac{1,013 \times 10^5 \text{ kg}/m \cdot \text{seg}^2}{760mmHg} \right) \left(\frac{60 \text{ bat.}}{1 \text{ min}} \right) \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}} \right) \left(\frac{0.07l}{\text{bat}} \right) \left(\frac{1m^3}{1000l} \right)$$

$$P = 0,93W$$

Esta taxa de energia pode facilmente dobrar quando é executada, entretanto aproveitar este potencial é difícil. Adicionar uma turbina para o sistema iria aumentar a carga sobre o coração, podendo ser perigoso ao usuário. No entanto, mesmo que apenas dois por cento desta energia seja aproveitada, esta é suficiente para alimentar os microprocessadores de baixo consumo e sensores. Assim, essa geração poderia ser utilizada para a auto alimentação sensores médicos e próteses.

2.2.4 MOVIMENTO DOS MEMBROS SUPERIORES

A comparação das atividades enumeradas na Tabela 3 indica que tocar violino e limpeza da casa utilizam até 30 kcal/h, ou aproximadamente 35W de energia a mais do que quando você fica parado em pé. A maior parte dessa potência é gerada por essas atividades é obtida pelo movimento dos membros superiores.

Estudos empíricos, realizados por BRAUNE; FISCHER, 1987, mostraram que para um determinado homem de 58,7 kg, o braço inferior junto com as mãos possuem massa de 1,4 kg, a parte superior do braço tem 1,8 kg, e todo o braço 3,2 kg.

A amplitude do movimento de extensão do nível do centro muscular do bíceps braquial a parte inferior do braço é de 0,335m, e ao se erguer o braço completamente fazendo um movimento em torno da cabeça com todo conjunto do a amplitude será de 0,725m. Empiricamente, atividade energético-muscular (extensão) com a parte inferior do braço pode ser realizada a uma taxa máxima de 2 ciclos/seg, e ao se realizar o movimento completo acima da cabeça a taxa é de 1,3 elevações/segundo. Assim a potência máxima gerada pela extensão energética-muscular do bíceps é:

$$P = (1,8Kg) \left(\frac{9,8m}{seg^2} \right) (0,335m) \left(\frac{2 \text{ ondulações}}{seg} \right) (2braços) = 24W$$

E a potência máxima gerada pelo levantamento completo dos braços é

$$P = (3,2Kg) \left(\frac{9,8m}{seg^2} \right) (0,725m) \left(\frac{1,3 \text{ levantamentos}}{seg} \right) (2braços) = 60W$$

Obviamente, atividades como limpeza da casa e tocar violino não são realizadas de forma tão extenuante como as experiências citadas acima. Entretanto, a partir destes cálculos é possível observar que existe muita energia para ser recuperada a partir dessa atividade do usuário. O desafio, então, é como recuperar essa energia sem sobrecarregar o usuário.

Durante o entusiasmo de uma conversa normal, um usuário realiza um gesto com o braço em média a cada dois segundos, o que gera uma potência de 3W. Através da montagem de um sistema de polias com uma correia e assumindo uma eficiência de 50 por cento, essa atividade poderia gerar em torno de 1,5W de potência, mas esse sistema seria extremamente inconveniente. Na figura 9 são mostrados dois protótipos criado pelo designer de produtos Mac Funamizu que transformam energia cinética em elétrica para carregar o celular.



Figura 9 - Carregadores que transformam energia cinética em elétrica
Fonte: Planeta Sustentável

Uma solução mais inovadora é a utilização de materiais piezoelétricos nas articulações que gerariam taxa de energia a partir do movimento e o revestimento não sobrecarregaria o usuário. Entretanto, como será visto nas seções seguintes, materiais com a flexibilidade adequada tem apenas 11% eficácia, tornando a potência recuperável de apenas 0,33 W.

2.2.5 CAMINHADA

O movimento das pernas é uma das atividades que possuem maior consumo da energia do corpo humano. Por exemplo, um homem de 68 kg andando a uma taxa de dois passos por segundo, utiliza 280 kcal / h o equivalente a 324 W de potência. Comparando esta potência com a atividade de ‘esperar em pé’ ou ‘caminhar de forma normal’ implica que até a metade desta potência está sendo utilizada para mover as pernas. Enquanto caminha, uma pessoa coloca em média 30% mais força na parte interna dos pés do que já é colocado pelo peso corporal.

Considerando o deslocamento médio vertical do calcanhar de 5 centímetros durante uma caminhada humana a potência gerada é descrita por:

$$P = (68kg) \left(\frac{9,8m}{seg^2} \right) (0.05m) \left(\frac{2\text{ passos}}{seg} \right) = 67W$$

Este resultado é bastante promissor dado a grande quantidade de energia disponível quando comparado relativamente com as análises anteriores. Embora

caminhadas não ocorram de forma contínua, como a respiração, uma parte da energia poderiam gerada durante essa atividade poderia ser armazenada, proporcionando um fornecimento constante de energia mesmo quando o usuário não está andando. Mais adiante serão apresentados sistemas que reaproveitamento energia através da utilização dos geradores piezoelétricos descritos na 2.1.1.

3 SISTEMAS COM RECUPERAÇÃO DE ENERGIA

Uma vez descritos os conceitos básicos para compreensão da recuperação de energia em pequena escala assim como a quantidade de energia que pode ser reaproveitada a partir de atividades cotidianas, pode-se agora descrever o uso de alguns sistemas que possuem reaproveitamento de energia. Entre eles está o modelo proposto por STARNER, 2010 para reaproveitar a energia que é gerada durante uma caminhada.

3.1 TRANSDUTORES PIEZOELÉTRICOS EM SAPATOS

STARNER, 2010 propôs a utilização de palmilhas feitas com material usando PVDF para reaproveitar a energia gerada durante a caminhada. Há várias vantagens na utilização desse método. Primeiro, a flexão natural do sapato quando anda fornece a deformação necessária para gerar energia para deformar o piezoelétrico, como é mostrado na Figura 10. Segundo, o PVDF é fácil de ser cortado em forma apropriada e bastante durável, assim podem ser usados diretamente sem a necessidade de mudar o design do calçado.

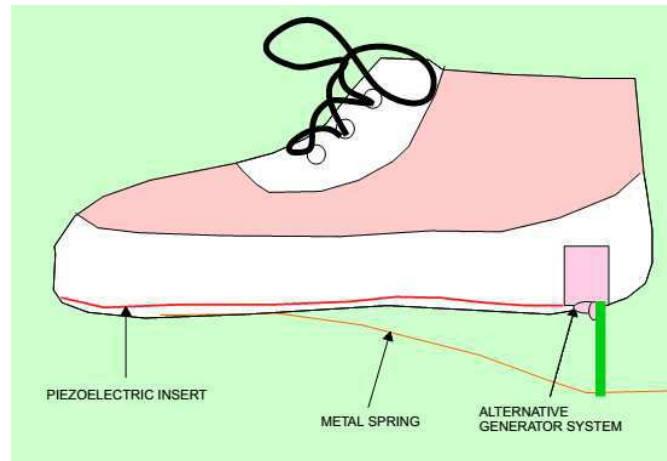


Figura 10 - Diagrama simples que mostra dois sistemas de geração a partir do sapato: (1) inserção filme piezoelétrico ou (2) com mola de metal
 Fonte: STARNER, 2010

Considerando uma pessoa com uma passada de cerca de 116 centímetros. E sabendo-se que a máxima força aplicada no final do passo de um utilizador aumenta a massa aparente de 30%, o usuário precisa apenas de 52 kg (115 libras) de massa para deformar a PVDF em um total de 5 cm. Um fabricante oferece uma placa triangular de metal que deforma 5cm por 68 kg, três vezes a cada cinco segundo resultando na geração de 1,5 W de potência. Assim a deformação de apenas um segundo é de 0,6. Logo a potência gerada por uma pessoa de 52kg em um ritmo de caminhada rápida é de:

$$P = (1,5W) \left(\frac{2 \frac{\text{passos}}{\text{seg}}}{0,6 \frac{\text{defor}}{\text{seg}}} \right) = 5W$$

3.2 OUTROS SISTEMAS COM RECUPERAÇÃO DE ENERGIA

Nessa seção são apresentados com base em pesquisas feitas na web alguns sistemas desenvolvidos que possuem recuperação de energia. O que segue são diferentes dispositivos e tecnologias de colheita de energia, em diferentes estágios de prototipagem e aplicação.

3.2.1 ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE VIBRAÇÕES MECÂNICAS DE UMA LINHA FERROVIÁRIA

Um grupo de investigadores da Stony Brook University de Nova Iorque (EUA) anunciou ao público o desenvolvimento de um novo protótipo de dispositivo que permite converter as vibrações causadas pela passagem de locomotivas nos carris de linhas de caminhos-de-ferro em energia elétrica para diversos fins: abastecimento de semáforos, dos sistemas de monitorização, e mesmo dos aparelhos de mudança de via das referidas linhas (PINTO, 2010). O aparelho é mostrado na Figura 11 junto com sua instalação do aparelho junto a uma linha ferroviária.



Figura 11 - O aparelho instalado junto ao carril de uma linha ferroviária
Fonte: PINTO,2010

Este sistema distingue-se da maior parte dos dispositivos de captura de energia ambiental, cuja potência é em regra de somente alguns miliwatts (mW). A força exercida sobre os carris quando as locomotivas se deslocam através dos trilhos produz deflexão vertical. Este deslocamento poderia ser usado por um conversor eletromagnético com vista à geração de potência elétrica suficiente para operar pequenas aplicações ferroviárias – algo que é particularmente útil em zonas remotas onde a eletrificação tem custos maiores. A captura deste tipo de energia é muito mais eficiente com base em movimentos regulares e unidirecionais, mas as vibrações dos trilhos são bidirecionais e aleatórias.

A equipa coordenada por Lei Zuo, professor do departamento de engenharia mecânica da referida universidade, afirma ter construído um novo conversor que converte as vibrações oscilatórias dos carris num movimento regulado de tipo rotativo e unidirecional, de forma análoga àquela através da qual um retificador de tensão converte corrente alternada (CA) em corrente contínua (CC). De acordo com Zuo o novo protótipo permite capturar 200 W de energia elétrica com base em deflexões induzidas pelos carris

e usá-la no fornecimento de dispositivos elétricos das proximidades. Este sistema tem como base duas embraiagens unidirecionais que convertem os irregulares movimentos ascendentes e descendentes em rotação unidirecional que aciona um gerador, alcançando um alto nível de eficiência e de fiabilidade. As habituais forças de impacto do repetitivo processo de carga e descarga são por seu lado reduzidas por meio da incorporação de uma roda de balanço que estabiliza o gerador, permitindo manter a rotação regular do dispositivo a uma velocidade mais útil e anulando a influência negativa da inércia – o que reduz a tensão mecânica e incrementa a confiabilidade do mesmo. Os testes da tecnologia em laboratório apuraram que esta tem uma eficiência mecânica entre 55 e 72%. Lei Zuo defende que a implementação em grande escala deste dispositivo poderia poupar mais de 10 milhões de dólares por ano em energia elétrica usada nas referidas aplicações, e evitar a emissão de 3 000 toneladas anuais de CO₂, só no estado de Nova Iorque.

A equipa liderada por Zuo foi recentemente ganhou prêmio *Best Application of Energy Harvesting* durante a terceira edição dos *Energy Harvesting and Wireless Sensor Networks USA Awards*, e já licenciou a tecnologia para comercialização(PINTO,2010).

3.2.2 ENERGIA ELÉTRICA EXTRAÍDA DO OUVIDO

No ouvido interno de todos os mamíferos existe uma câmara repleta de íons, encarregados de produzir uma corrente elétrica para gerar os sinais neurais que levam até o cérebro os impulsos que codificam os sons. É essencialmente uma bateria natural. Patrick Mercier e seus colegas do MIT construíram um coletor de energia que captura uma parte dessa eletricidade natural.

A energia gerada pelo dispositivo, que é pequeno para ser implantado no interior do ouvido humano, é suficiente para alimentar um implante médico. Segundo a equipe, como o dispositivo não atrapalha a audição natural, ele poderá ser usado para alimentar tanto implantes auditivos, quanto equipamentos para pessoas com problemas de equilíbrio. Eventualmente ele poderá ser usado para liberar medicamentos nas quantidades e nos prazos predeterminados pelo médico.

O pequeno coletor de energia foi implantado em cobaias, que continuaram respondendo normalmente aos testes auditivos. Enquanto isso, o equipamento transmitia as condições químicas do ouvido interno para um receptor por meio de uma conexão de rádio.

O ouvido converte a força mecânica induzida pelas ondas sonoras no tímpano em um sinal eletroquímico que é enviado até o cérebro - a bateria biológica é a fonte dessa corrente elétrica que é enviada através dos nervos.

Localizada na parte da orelha chamada cóclea, a câmara da bateria é dividida por uma membrana que contém células especializadas em bombear íons. A tensão elétrica é criada por um desequilíbrio entre os íons de sódio e potássio entre os dois lados da membrana.

A energia elétrica produzida pela bateria natural varia ao longo do tempo, mas não é suficiente para colocar o circuito eletrônico em funcionamento. Por isso os cientistas dão a partida nele usando como ignição um pulso de ondas de rádio. Uma vez em funcionamento, contudo, o circuito se torna autossustentável, e passa a funcionar continuamente. Nas cobaias, leva de 40 segundos a quatro minutos para que o circuito eletrônico implantado acumule energia suficiente em um capacitor para fazer sua transmissão (Inovação tecnológica, 2010). O circuito é mostrado na Figura 12 a seguir:

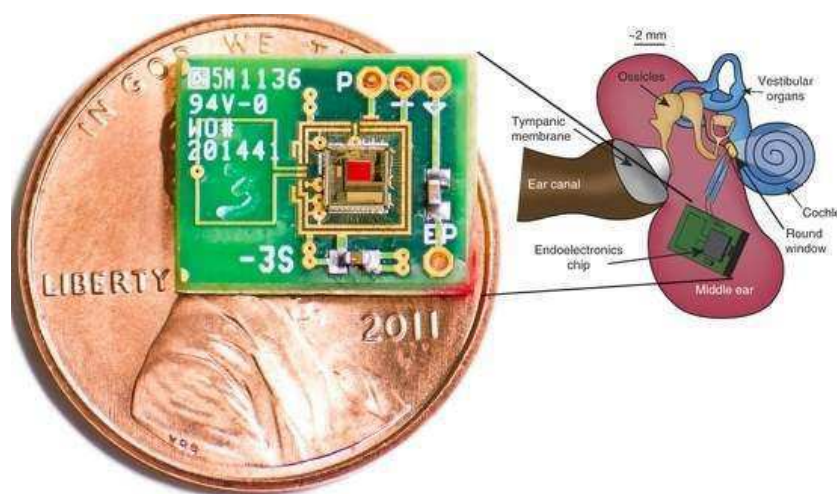


Figura 12: Eletricidade extraída do ouvido alimenta implantes médicos
Fonte: Nature Biotechnology

3.2.3 FONE DE OUVIDO QUE RECARREGA CELULARES

O escocês Andrew Anderson lançou um fone de ouvido, mostrado na Figura 13 que recarregar o celular ao qual está conectado através da captação da energia solar, chamado *OnBeat*, no site de *crowdfunding* (que capta doações para financiar vários tipos de projetos) Kickstarter, por meio do qual espera viabilizar sua comercialização.

A alça do fone tem uma célula solar flexível com uma capacidade de carregamento de 0,55 watts. A energia gerada é armazenada em duas pequenas baterias de lítio. Escondidas nas conchas do fone, as baterias carregam o telefone celular quando o fone é conectado no celular por meio de um cabo.



Figura 13 - Fone de ouvido que recarrega celulares

3.3 ARMAZENAMENTO

Cada sistema de geração de energia proposto, com exceção da conversão de calor, é necessário algum tipo de armazenamento de energia dispositivo por períodos entre os ciclos de geração de energia. Assim, é necessário algum cuidado relativo à eficiência do armazenamento.

Pelo método piezoelétrico, um transformador abaixador e regulador seria necessário. As estratégias atuais para converter as tensões elevadas geradas pelo piezoelétrico materiais para os níveis de tensão de um computador, por exemplo, podem atingir mais de 90 por cento de eficiência.

É necessário cuidado para igualar a elevada impedância do gerador piezo adequadamente, devido as baixas correntes envolvidas, a eficiência real pode ser menor. Para outros métodos de geração de energia reguladores seriam necessários, bem como estratégias melhores podem atingir até 93 por cento de eficiência.

A solução mais direta para o problema de armazenamento de energia para os aparelhos é carregar capacitores que podem drenar a energia durante períodos de não geração de energia. Infelizmente, uma solução puramente capacitiva para o problema está também limitada pela tamanho.

O problema dos supercapacitores comuns, feitos com um carbono em alta quantidade e cheio de poros, é a relação entre energia e volume: apesar da alta vida útil, um componente muito grande é necessário para armazenar uma pequena quantidade de energia. Atualmente, supercapacitores pequenos (menos de 16 cm³) 5V são classificados para cerca de 3 Faradays. Assim, apenas

$$E = (0,5)C.V^2 = (0,5)(3F)(5V)^2 = 37,5 J$$

A energia que pode ser armazenada para ciclos de um minuto é,

$$P = \frac{38J}{60 \text{ seg}} = 0,62W$$

Este valor de armazenamento é aceitável para recuperação energia através da respiração, pressão arterial e temperatura corporal. O armazenamento capacitivo não é adequado para recuperação a partir do movimento dos membros superiores, pois a potência fornecida pelo capacitor durante uma hora cai em 0,01 W.

4 CONCLUSÃO

Com esse trabalho foi descrito a propriedade de converter energia mecânica em elétrica e o inverso, os materiais piezoelétricos possuem grande potencial na produção de energia limpa e renovável, como alguns estudos que visam utilizar asfalto piezoelétrico para geração de energia. Além dessas aplicações em pequena escala, há projetos conceituais para a utilização de materiais piezoelétricos para captação de energia em larga escala. Devido ao aumento da consciência ambiental, a possibilidade de usar piezoeletricidade como fonte de uma "energia verde" deram origem a ideias como metrô piezoelétrico, plataformas, bandas transportadoras, catracas, escadas, calçadas, rodovias, ferrovias, pontes, pistas de dança de discoteca, etc; e alguns desses conceitos em larga escala estão sendo implementados atualmente.

Cada um dos métodos de produção tem as seus pontos forte e fracos, dependendo da aplicação. No entanto, a geração de energia através de caminhada parece ser a melhor e mais adequada para dispositivos móveis. O usuário pode facilmente gerar energia quando necessário, e, em muitos casos, caminhar todos os dias pode fazer bem ao usuário. A surpreendente quantidade de energia (5-8 W) pode ser recuperada durante a caminhada em um ritmo acelerado, possivelmente sem exigir grande esforço do usuário. Se menos energia é necessária, podem ser utilizadas inserções piezoelétricos, reduzindo a mecânica a complexidade do sistema de geração. No entanto, problemas de armazenamento de energia e fatores humanos ainda precisam ser resolvido.

5 BIBLIOGRAFIA

ABEL, Ana Maria da Silva; LUIZ, Sandro Galisteu. **Sensores e Atuadores Piezoelétricos**. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Escola de Engenharia de Loren a – EEL. São Paulo, maio de 2010.

ARNAU, A. (2008). **Piezoelectric Transducers and Applications**. Springer, Berlin. Disponível em: <http://books.google.com.br/books?id=az1RYaJr5HsC&dq=piezoelectric+Transducers+and+Applications&printsec=frontcover&source=bn&hl=ptBR&ei=OZ5qTIXeNYPGIQfTluH1AQ&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=4&ved=0CC8Q6AEwAw#v=onepage&q&f=false>. Acesso em: 25 agosto de 2013

BRAUNE, W.; FISCHER, O. **The Human Gait** (originally published 1895–1904), Springer-Verlag, Berlin (1987).

DE MARQUI JR, C.; ERTURK, A.; INMAN, D.J. (2010). **Piezoaeroelastic Modeling and Analysis of a Generator Wing with Continuous and Segmented Electrodes**. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, v.21 – July 2010

ERTURK, A. **On the energy harvesting potential of piezoaeroelastic systems**, Applied physics letters, v. 96, 184103. 2010

GAO, Xiaotong. **Vibration and Flow Energy Harvesting using Piezoelectric**. Drexel University. 2011

HEYWANG, W.; LUBITZ, K.; WERSING, W. (2008). **Piezoelectricity: Evolution and Future of a Technology**. Springer, Berlin. Disponível em: <http://books.google.com.br/books?id=8KyawZ92eIEC&printsec=frontcover&dq=Piezoelectricity:+Evolution+and+Future+of+a+Technology&hl=ptBR&ei=6J9qTOT5DMKclgeXtejNAQ&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=1&ved=0CCgQ6AEwAA#v=onepage&q&f=false>. Acesso em: 14 setembro 2013

JOSÉ MARIA, M. (2010). **Modelagem e análise de uma asa piezoaeroelástica para geração de energia**. São Carlos. 85p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2010

JUNHUI, H. et al. (2010). **Vibration Energy Harvesting Based on Integrated Piezoelectric Components Operating in Different Modes**, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, v.57, n.2, February 2010

KEITHLEY, J.F. (1999). **The story of electrical and magnetic measurements: from 500 B.C. to the 1940s**. New York: IEEE Press.

MERCIER, Patrick P.; LYSAGHT, Andrew C.; BANDYOPADHYAY, Saurav; CHANDRAKASAN, Anantha P.; STANKOVIC Konstantina M.(2010). **Energy extraction from the biologic battery in the inner ear**. *Nature Biotechnology*. Publicação online, disponível em: www.inovacaotecnologica.com.br/noticias.php?artigo=bateria-natural-eletriciade-ouvido&id=010110121109 Acesso em 23 de julho de 2013

NG, T.H.; LIAO, W.H. (2005). **Sensitivity analysis and energy harvesting for a selfpowered piezoelectric sensor**, Journal of Intelligent Material Systems and Structures. v.16, p.785–97

OLBY, R.C. et al. (1996). **Companion to the history of modern science**. London: Routledge New York.

PARACHA, A. M., BASSET, P., GALAYKO, D., & DUDKA, A. **Characterization Of A Dc/Dc Converter Using An In-Plane Bulk Silicon Capacitive Transducer For Vibration-Toelectricity Power Conversion**. *Proceedings of Power MEMS 2008 + microEMS2008* (pp. 9-12). Sendai, Japan: November, 2008

PINTO, Ricardo. **Poupança de energia**. Inovação tecnológica. 2010

SODANDO, H.A.; INMAN, D.J.(2004). **A review of Power Harvesting from Vibration using Piezoelectric Materials**, The shock and Vibration Digest, V.36(3), p-197-20.

STARNER, Thad. **Human-powered wearable computing**, IBM Systems Journal, v.35, NOS 3&4. 1996

Termopares. Thermocom. Disponível em: <http://www.thermocom.com.br/pdf/termopares.pdf>. Acesso em: 20 de setembro de 2013.

SHAMOS, M.H. (1987). **Great experiments in physics: firsthand accounts from Galileo to Einstein**. New York: Dover.

SMITH, G.S. (1997). **An introduction to classical electromagnetic radiation**. Cambridge University Press: United Kingdom. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=m8RzbqS772IC&pg=PA1&dq=Electromagnetic+Classic+Theory&lr=&cd=11#v=onepage&q=Electromagnetic%20Classic%20Theory&f=false>>. Acesso em 06 setembro 2013