

# Métodos de captação de energia para dispositivos portáteis de instrumentação médica

\*Pedro Dinis Gaspar, \*\*Joana Paulo

Departamento de Engenharia Electromecânica  
Universidade da Beira Interior

Rua Fonte do Lameiro – Edifício 1 das Engenharias, 6201-001 Covilhã

Telf: +351 275 329 925; fax: +351 275 329 972; e-mail: \*dinis@ubi.pt, \*\*joana.mrpaulo@gmail.com

**Resumo:** A tendência da evolução da portabilidade de dispositivos tecnológicos não tem sido igualmente acompanhada pela disponibilidade energética das suas baterias. Face às crescentes características de baixo consumo energético dos mais variados dispositivos portáteis, o conceito de captação de energia (energy harvesting) a partir de fontes ambientais e corporais tem ganho uma nova relevância.

Na pesquisa de métodos e materiais que se adequem a esta necessidade, surgem, entre outras, as energias geradas a partir da piezoelectricidade, da termoelectricidade e do electromagnetismo.

Neste artigo é apresentado o panorama actual, vantagens, desvantagens e futuras aplicações dos métodos de captação de energia, e respectivos mecanismos, em aparelhos médicos portáteis de baixo consumo energético.

O campo médico é um sector muito promissor para a utilização destas tecnologias, quer pela necessidade de estender a disponibilidade energética para a monitorização de vários parâmetros, quer como pela aplicação a variadas formas de terapia contínua.

Assim sendo, o acoplamento de um sistema de captação de energia à bateria já existente nestes equipamentos, poderá melhorar significativamente a sua sustentabilidade energética que, neste momento, é uma das suas maiores limitações.

## 1. Introdução

Desde tempos remotos que a procura por novas fontes de energia e formas de aproveitamento energético são constantes. Ainda mais nos dias que correm, com a necessidade de reduzir a dependência mundial das fontes de energia baseadas em combustíveis não limpos e com a consciencialização relativamente aos efeitos nefastos sobre o ambiente.

Neste contexto, surge o conceito de captação de energia (*energy harvesting*). A partir duma perspectiva mais ampla, os sistemas de captação de energia podem basear-se em várias fontes, incluindo, a energia cinética (vento, ondas, gravitacional, vibrações), a energia electromagnética (fotovoltaica, rádio-frequência), a energia térmica (solar-térmica, geotérmica, gradientes de temperatura, combustão), a energia atómica (nuclear, decaimento radioactivo) ou a energia biológica (biocombustíveis, biomassa) [1].

Actualmente, todos estes aparelhos são alimentados por baterias, mantendo ainda a dependência energética. Contudo, a captação de energia de fontes humanas ou ambientais tem demonstrado ser uma alternativa eficaz. À medida que a escala de dimensões da electrónica decresce, o consumo de energia acompanha e diminui. Nesse sentido, seria de esperar que as baterias também fossem produzidas num tamanho mais reduzido e possibilitassem maior disponibilidade energética. No entanto, por questões técnicas e tecnológicas, as baterias não tem seguido o mesmo rumo da evolução, limitando o tempo de desempenho dos aparelhos portáteis devido à necessidade de serem substituídas ou recarregadas periodicamente, adicionando ainda um peso e volume indesejado. O aumento do desempenho dos computadores relativamente aos equipamentos portáteis desde 1990 é apresentado na Figura 1. Como se pode observar, a tecnologia das baterias é a mais lenta no âmbito dos aparelhos móveis [2].

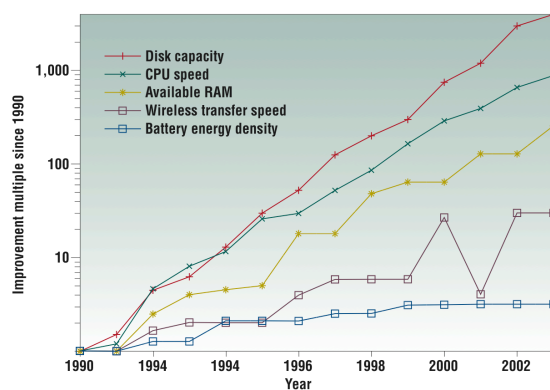


Fig. 1 - Evolução electrónica desde 1990 [2].

Para resolver estes problemas, existem no mercado várias baterias alternativas que substituem ou complementam as antigas, como no caso dos rádios, lanternas, telemóveis que girados manualmente podem ser carregados. Estes mecanismos não são totalmente sustentáveis para todas as aplicações, uma vez que necessitam de baixas potências energéticas e da participação activa do utilizador.

## Energia e corpo humano

O conceito de energia é de fundamental importância na física do corpo humano. Todas as suas actividades, incluindo o pensamento, envolvem trocas de energia. A conversão de energia em trabalho representa apenas uma pequena fracção da energia total gasta pelo corpo. Segundo [3], mesmo em repouso, o corpo humano continua a gastar energia com uma potência de aproximadamente 100 W na manutenção do funcionamento dos órgãos, tecidos e células. Cerca de 25% dessa energia é utilizada pelo esqueleto e pelo coração, 19% pelo cérebro, 10% pelos rins e 27% pelo fígado e pelo baço.

A Tabela I apresenta uma perspectiva das potências utilizadas pelo corpo humano durante várias actividades, sendo que a potência produzida varia entre 81 e 1630 Watt.

TABELA I  
CONSUMO ENERGÉTICO HUMANO PARA ACTIVIDADES  
ESPECÍFICAS [4].

Actividade	Kcal/h	Watt
Dormir	70	81
Deitado	80	93
Sentado	100	116
Relaxado	110	128
Conversar	110	128
Comer	110	128
Pequeno passeio	140	163
Conduzir	140	163
Tocar piano	140	163
Limpar a casa	150	175
Carpintaria	230	268
Caminhar 4 mph	350	407
Nadar	500	582
Montanhismo	600	698
Corrida longa distância	900	1048
Corrida <i>sprint</i>	1400	1630

O corpo humano corresponde a um sistema capaz de manter a sua temperatura mesmo quando a temperatura do ambiente no qual este se encontra varia. Isso permite a manutenção dos processos metabólicos de produção de energia mesmo em climas bastante frios.

A proporção de calor dissipado pelos diferentes processos mencionados dependem de vários factores como a temperatura, humidade, velocidade do ar, ambiente, actividade física do corpo, área do corpo exposta e o seu isolamento térmico, como roupa e gorduras [3].

A investigação nesta temática tem explorado várias técnicas de captação de energia passivas para aparelhos portáteis. Estas incluem termopares para recolha de energia através do gradiente térmico corporal, vibração mecânica e ainda a implementação de materiais piezoeléctricos no corpo sujeitos a excitações/deformações mecânicas [5].

## 2. Métodos de Captação

### Piezoelctricidade

O efeito piezoeléctrico foi descoberto em 1880 nos cristais de quartzo e pelos irmãos Pierre e Jacques Curie. De uma forma geral, pode ser definido como a conversão de energia mecânica em energia eléctrica (efeito directo) ou a conversão de energia eléctrica em energia mecânica (efeito inverso). [6]

O efeito piezoeléctrico pode ser descrito de forma simplificada pelas seguintes equações:

$$D = dT + \epsilon E \quad (1)$$

$$S = st + dE \quad (2)$$

Relativamente à equação (1),  $D$  ( $C/m^2$ ) corresponde ao fluxo dieléctrico,  $T$  ( $N/m^2$ ) à tensão (pressão) mecânica,  $E$  ( $N/C$ ) ao campo eléctrico e  $\epsilon$  ( $F/m$ ) à permissividade dieléctrica

Já na equação (2),  $S$  (adimensional) representa à deformação unitária gerada, e por fim  $s$  ( $m^2/N$ ) e  $d$  ( $C/N$ ) são coeficientes (elástico e piezoeléctrico respectivamente).

O efeito piezoeléctrico directo (1), ou simplesmente efeito piezoeléctrico de um material, significa que este pode gerar uma carga eléctrica sempre que sujeito a uma força mecânica, quer seja esta de compressão, tracção ou simplesmente vibração. Por sua vez, o efeito piezoeléctrico inverso (2) traduz-se na capacidade desse material produzir energia mecânica ao ser sujeito a uma carga eléctrica, ou seja, sempre que um material piezoeléctrico seja electricamente carregado em faces opostas [6].

### Energia térmica

A temperatura de um corpo varia quando este recebe ou fornece energia. Nessa situação, as suas moléculas estão em movimento constante, sendo essa agitação medida pela temperatura.

Apenas pela diferença de temperatura se consegue garantir a extracção de energia de um reservatório térmico (ex: corpo). A possibilidade de conversão entre calor e trabalho possui restrições para as máquinas térmicas. O Segundo Princípio da Termodinâmica, elaborado em 1824 por Sadi Carnot, é enunciado da seguinte forma [3]:

"Para haver conversão contínua de calor em trabalho, um sistema deve realizar ciclos entre fontes quentes e frias, continuamente. Em cada ciclo, é retirada uma certa quantidade de calor da fonte quente (energia útil), que é parcialmente convertida em trabalho, sendo o restante rejeitado para a fonte fria (energia dissipada)"

A equação de Carnot, baseada na 1ª e 2ª lei da Termodinâmica, serve como ponto de referência para a conversão de energia térmica em trabalho. A sua eficiência máxima teórica nas máquinas térmicas está relacionada com os reservatórios térmicos mantidos a temperaturas quentes ( $T_C$ ) e frias ( $T_F$ ) [7]:

$$\eta_{Carnot} = \frac{T_C - T_F}{T_C} \quad (3)$$

A conversão termoelétrica funciona através da absorção e libertação do calor na interface de conexão entre condutores eléctricos diferentes (termopares). Um termopar define-se como um transdutor composto por dois metais ou ligas, unidos electricamente nas suas extremidades originando desta forma duas junções. Quando estas junções são submetidas a diferentes temperaturas, o circuito termoelétrico apresenta uma corrente eléctrica. Uma destas junções é denominada junção de medição e é submetida à temperatura que se deseja medir, enquanto que na outra junção, junção de referência, é aplicada uma temperatura conhecida, normalmente a temperatura referente a um banho de gelo[6].

A força electromotriz, que gera a corrente eléctrica, é função da diferença entre as temperaturas das junções e é chamada força electromotriz. Para que essa f.e.m. térmica seja medida, o circuito termoelétrico deve ser aberto nalgum ponto, onde um voltímetro é introduzido.

Após a descoberta da termoelectricidade por Alexandre Volta (1800), outros estudos foram desenvolvidos sobre os efeitos termoelétricos, dos quais se destacam o de Thomas Seebeck (1821), de Jean Peltier (1834) e de William Thomson – Lorde Kelvin (1848-1854). Estes cientistas deram origem às denominações dos três efeitos básicos da termometria termoelétrica, que mesmo sendo diferentes, estão relacionados entre si. Esses efeitos são conhecidos como efeitos termoelétricos, recebendo essa denominação por envolverem quer a temperatura quer a electricidade.

O efeito de Seebeck transforma energia térmica em energia eléctrica, enquanto que o efeito de Peltier traduz-se na absorção ou emissão de calor na presença de uma corrente eléctrica nas junções. Contudo, ambos estes efeitos actuam em materiais diferentes. Por fim, o efeito de Thomson apresenta semelhanças relativamente ao efeito de Peltier já que a corrente eléctrica produz diferente efeito térmico de acordo com a direcção do ponto quente/frio, apesar de num mesmo material. [6]

### Electromagnético

Um campo eléctrico produz sempre um campo magnético e, inversamente, um campo magnético variável no tempo produz sempre um campo eléctrico.

A lei da indução de Faraday, que descreve a modificação que um campo magnético irá induzir numa corrente eléctrica, representa-se da seguinte forma:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (4)$$

Por sua vez, a equação de Âmpere-Maxwell indica a modificação que um campo eléctrico gera num campo magnético.

$$\nabla \times B = \mu_0 J + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (5)$$

Nas equações acima mencionadas,  $E$  é o vector representativo do campo eléctrico,  $B$  a densidade do fluxo magnético e  $t$  o tempo. Já na equação (5),  $\mu_0$  representa a permeabilidade do espaço livre,  $J$  a densidade de corrente e  $\epsilon_0$  a permissividade do espaço livre.

Já existem vários tipos de geradores eléctricos que utilizam vibrações mecânicas, nomeadamente os que estão presentes nos relógios de pulso e circuitos de rádio-frequências. Estes são capazes de utilizar a energia recuperada do ambiente natural.

Existem dois tipos de geradores mecânicos: os que utilizam o movimento relativo dos objectos no qual o sistema de geração é ligado e os que utilizam o movimento de corpo rígido. As suas configurações básicas são demonstradas na figura 2.

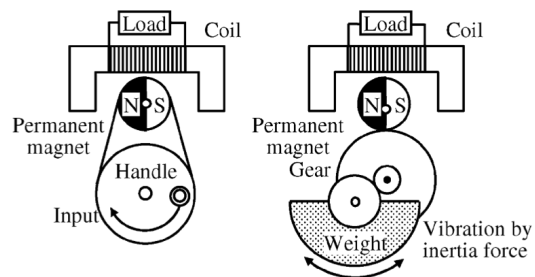


Fig. 2 - Tipos de geradores mecânicos: a) movimento relativo; b) corpo rígido [8].

Ambos os sistemas utilizam o princípio de indução electromagnética para converter movimento em potência eléctrica.

O movimento relativo da armadura correspondente ao ímã permanente é dado pelo movimento relativo do objecto no qual o sistema de geração está fixo, enquanto que no caso do movimento do corpo rígido, a força de inércia do peso está instalada no gerador.

Estes sistemas de movimento relativo são exemplificados nos geradores de bicicletas, rádios e telemóveis.

Quando a manivela é accionada 10 cm (diâmetro) por uma força de 1 kgf (10 N) com uma taxa de 3

rotações por segundo, e desprezando as perdas, obtêm-se 9,3 W de potência, ou seja cerca de 10 vezes superior à potência produzida pelo corpo rígido [8].

O tipo de movimento de corpo rígido está mais sujeito a movimentos vibratórios do que a movimentos constantes, uma vez que utiliza a inércia, ou seja, a resistência ao movimento. A potência disponível por cada ciclo vibratório é apenas a energia cinética que permanece no sistema.

Quando se assume que o equipamento é acoplado ao corpo de uma pessoa e que o movimento do peso é equivalente ao movimento do corpo humano, a energia cinética será cerca de 10  $\mu$ J e a potência eléctrica gerada cerca de 10  $\mu$ W, sendo estes valores inferiores aos produzidos pelo movimento relativo. Neste sentido, este gerador pode funcionar inconscientemente e pode ser instalado em qualquer lugar, sendo possível obter uma grande quantidade de energia.

Existem alguns métodos efectivos para este mecanismo, como o gerador de ressonância, o gerador de auto-excitação rotacional e o gerador do tipo giroscópio.

### 3. Aplicações Industriais

Nos anos 80, a Seiko desenvolveu o relógio Kinetic, alimentado pelos movimentos humanos. As pilhas convencionais foram dispensadas, sendo explorado o movimento do braço humano. Desde então, foram produzidos diversos relógios cinéticos, mas o potencial desse sistema para alimentar aparelhos maiores é limitado pela lentidão com que as pessoas se deslocam e consequentemente o reduzido movimento braçal.

Segundo [2], os exércitos americano e britânico já experimentaram captadores de energia colocados nas botas dos soldados. Estes aparelhos permitem o funcionamento dos rádios telefones, que costumam ser dotados de pesadas baterias recarregáveis. Os sistemas de captação de energia não eram, contudo, suficientemente robustos para resistir a condições extremas e esses projectos foram abandonados [4]. No início dos anos 90, a *Freeplay* introduziu no mercado dispositivos como rádios, lâmpadas e lanternas de manivela com capacidade acrescida de disponibilidade energética face à inclusão de sistemas de captação. Desde então, esta empresa desenvolveu um gerador com manivela para carregar telemóveis, um gerador de bomba de pé capaz de alimentar aparelhos maiores e uma série de protótipos de equipamentos médicos com manivelas.

A introdução de materiais piezoeléctricos nos sapatos, como o Polivinilideno fluorado (PVDF), de forma recuperar alguma potência do andamento, proporciona diversas vantagens. Note-se que uma lâmina piezoeléctrica tem apenas 1,1 mm de

espessura (sem os eléctrodos), possui facilidades de ser cortada para o tamanho apropriado, peso reduzido e elevada duração, promovendo desta forma a flexão necessária para a geração de potência da pilha pela deformação natural do sapato em andamento [9].

Paradiso & Shenck [10] integraram elementos piezoeléctricos sob a palmilha removível do sapato de forma a recuperar energia pela força exercida no calcanhar e nos dedos dos pés. Na Figura 3 é representado este tipo de material e a forma como este é dimensionado para a sua utilização no sapato.

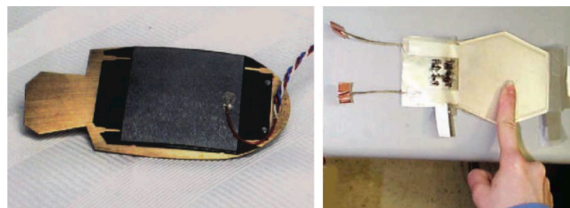


Fig. 3 - Aplicação piezoeléctrica [10].

Devido à limitada eficiência de conversão electromecânica, a potência média produzida foi de 8,3 mW no calcanhar e 1,3 mW nos dedos dos pés durante uma caminhada normal. De forma a melhorar estes resultados, Kornbluh [11] aplicou um gerador elastómero no calcanhar de uma bota, como se verifica pela Figura 4.

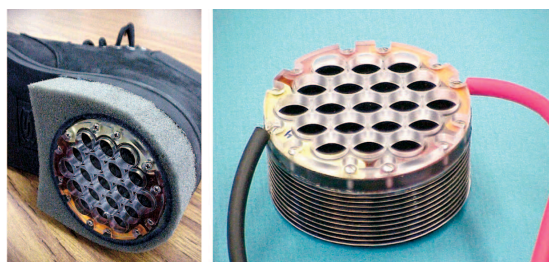


Fig. 4 - Gerador electrostático baseado na compressão de um elastómero dieléctrico [11].

Quando o calcanhar é pressionado contra o chão, a compressão implementada comprime a membrana elastómera, que produz uma tensão. Quando a tensão eléctrica é aplicada através dos eléctrodos, esta produz energia.

Uma outra aplicação para o aproveitamento de andamento para gerar energia consiste em aplicar o material piezoeléctrico no sapato, no chão que pisamos ou ainda numa escada que adquira, acumule e converta em electricidade a energia gerada pela passagem das pessoas, ao invés de aplicá-lo no sapato [6].

Segundo estudos efectuados por [12], cada passo produz 8 Watts. Estes são absorvidos pelo solo, sendo possível captar pelo menos 30 % dessa energia.

Neste contexto, é possível imaginar uma pista de dança em que o chão é concebido para atenuar as vibrações e dispersar a energia, captando-a e gerando

electricidade, além de limitar o desgaste dos membros dos dançarinos uma vez que é equipado com captadores de energia sob a superfície.

Aproveitando ainda o movimento natural do andamento, Paradiso *et al.* [14] tentaram implementar geradores magnéticos nos sapatos, como se verifica na Figura 5. Este protótipo adequa-se ao sapato apenas com uma mola, um pêndulo e um sistema gerador que produz picos de potência próximos de 1 W, ou seja, energia suficiente para alimentar um rádio à medida que o utilizador caminha. No entanto, estes geradores são difíceis de integrar no sapato, sem acarretar incómodos ao utilizador, uma vez que o sistema mecânico se revelou bastante intrusivo.



Fig. 5 - Gerador rotativo adaptado à sapatilha [14].

Assim, Hayashida [15] desenvolveu um modelo de forma a melhorar a integração do gerador na sola do sapato, como é representado na figura 6. Como os geradores rotativos necessitam de girar rapidamente para atingir a eficiência desejada, todos os restantes sistemas que envolvem relações significativas de engrenagem, introduzem uma complexidade mecânica considerável e um binário razoavelmente elevado, conduzindo a uma probabilidade elevada de ruptura.

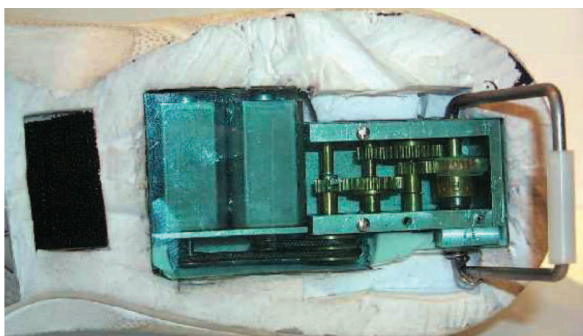


Fig. 6 - Aperfeiçoamento do gerador rotacional, com dois geradores magnéticos construídos na sola de uma sapatilha [15].

Uma vez que os sistemas electromagnéticos podem ser constituídos por uma bobine e por um íman permanente ligado a uma mola, este movimento mecânico, que é provocado pela vibração estrutural, induz uma tensão eléctrica no terminal da bobine que

a converte em carga eléctrica. Se o íman for grande, irá mais facilmente induzir um campo magnético na bobine. No entanto, o tamanho e a disposição do íman são limitados pela mola e pela estrutura do aparelho em si.

#### 4. Aplicações Médicas

De acordo com o estudo efectuado por Parsonnett & Cheema [16], indivíduos que possuem *pacemakers* alimentados por baterias de lítio necessitam de intervenção cirúrgica de 8 em 8 anos para a substituição das baterias. Ainda com maior relevância, os neuroestimuladores implantáveis e as bombas de infusão consomem mais energia que os *pacemakers*, possuindo um tempo de duração estimado entre 3 a 5 anos [17]. Desta forma, é importante tentar reduzir a dependência das baterias neste campo, uma vez que impulsionará diversos benefícios para o utilizador.

Neste sentido, e tendo por base os métodos já mencionados, Yang *et al.* [18] criaram um nanogerador de energia eléctrica que trará utilidade na fabricação de implantes médicos e sensores.

O nanogerador é capaz de converter a energia mecânica do movimento do corpo humano em electricidade pelo alongamento dos músculos e até pelo fluxo de sangue.

Os nanogeradores foram construídos com nanofios de óxido de zinco - um material que é piezoeléctrico e semiconductor. A energia eléctrica é gerada quando os nanofios são dobrados e voltam à sua posição original, num movimento de "vai e vem". O resultado é uma separação de cargas no nanofio - positiva no lado dobrado e negativo no lado comprimido - causada pelo efeito piezoeléctrico já referido anteriormente. Mesmo sendo um material cerâmico, os nanofios de óxido de zinco podem ser dobrados até 50° sem se partir. Na Figura 7 é demonstrado a aplicação destes nanofios, apenas pelo dobrar dos dedos.

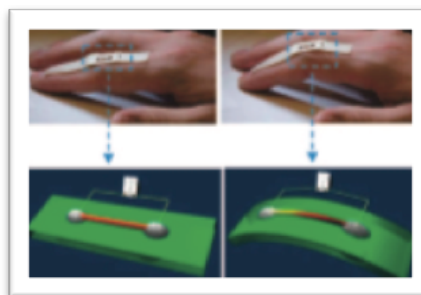


Fig. 7 - Captação de energia pela oscilação do dedo utilizando um único fio [18].

O óxido de zinco não é tóxico, ao contrário dos componentes das baterias, sendo ideal para o uso no interior do corpo humano.

Segundo Yang *et al.* [18], o batimento das veias poderá ser aproveitado para gerar energia e abastecer

nanodispositivos e sensores médicos, destinados a monitorar sinais vitais, como os batimentos cardíacos e a pressão sanguínea, enviando assim os resultados continuamente para um monitor remoto.

Uma outra aplicação na medicina é o uso de sensores sem fios pois diversas aplicações requerem fontes de energia autosustentáveis. Assim, aparelhos termoelétricos são bastante atractivos como fonte de energia uma vez que convertem directamente os gradientes térmicos em potência eléctrica.

Enquanto que alguns geradores termoelétricos já se encontram disponíveis no mercado à algum tempo, o desenvolvimento de implantes médicos de baixa potência só recentemente tem sido desenvolvidos. São considerados dois casos de interesse para aparelhos biomédicos: os implantáveis à superfície da pele e os subcutâneos [19]. Um aproveitamento prático destas fontes de energia requer uma proximidade ao alvo mecânico.

Yang [19] realizou algumas experiências com o intuito de estudar a viabilidade de geradores termoelétricos para alimentar aparelhos médicos e verificou que estavam disponíveis entre 1 a 5 Kelvin (K) na gordura do corpo humano. Numa experiência *in vivo* foi implantado um aparelho termoelétrico comum no abdómen de um coelho e detectaram-se 1,3 K em repouso.

Com a apresentação destes resultados, a viabilidade da utilização de geradores termoelétricos para alimentar implantes médicos é bastante esclarecedora. Contudo, é necessário desenvolver mais trabalho com modelos cada vez mais avançados de transferência de calor biológico juntamente com exames experimentais das variações da temperatura do corpo humano. Como já foi referido anteriormente, características fisiológicas como a altura, peso, percentagem de gordura corporal e tom da pele são outros componentes que podem afectar o gradiente térmico nas camadas subcutâneas do corpo. Com este último objectivo de tentar acoplar geradores termoelétricos com aplicações biomédicas, é necessário ter ainda em consideração a biocompatibilidade dos seus materiais. A maior preocupação em relação a este tema é a toxicidade do telureto de bismuto utilizado como material termoelétrico. Apesar do telureto de bismuto ter uma toxicidade relativamente baixa, os seus componentes são conhecidos por provocar danos renais. Assim, em grandes quantidades, pode ser fatal [20].

Porém, quando este método é aplicado adequadamente no interior do corpo humano, a diferença de temperatura existente entre a superfície interna da pele e a temperatura interior do corpo pode ser usada, por exemplo, para produzir energia eléctrica e aumentar a duração da bateria de um *pacemaker* [21], como é demonstrado na figura 8.

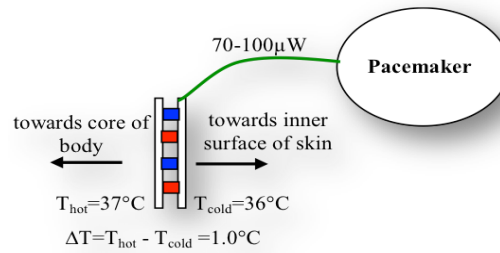


Fig. 8 - Dispositivo termoelétrico demonstrando a existência de  $\Delta T$  que sustenta o pacemaker [21].

Com uma fina película termoelétrica é possível gerar mais de 100  $\mu W$  de potência, apenas com uma pequena diferença de temperatura de 0,3 a 1,7  $^{\circ}C$ .

O desempenho de dispositivos termoelétricos com um grande número de elementos ( $N$ ) foi modelado usando as relações termoelétricas padrão que descrevem o comportamento do dispositivo.

À medida que o número de elementos aumenta, é possível gerar um maior  $V_{oc}$  com um menor  $\Delta T$ . Isto permite o uso directo da potência gerada, sem necessitar da conversão de DC-DC no gerador electrónico de pulso.

Para calcular a tensão de circuito aberto, é utilizada a seguinte equação:

$$V_{oc} = N * (\alpha_p + \alpha_n) * \Delta T \quad (8)$$

em que,  $\alpha_n \cong 260 \mu V/^{\circ}C$  e  $\alpha_p \cong 207 \mu V/^{\circ}C$  são os coeficientes de Seebeck dos elementos estruturais do tipo  $n$  e  $p$ , respectivamente. Teoricamente, se  $N = 8600$  e  $\Delta T = 1,0 \text{ }^{\circ}C$ , então  $V_{oc}$  seria de 4 V [21].

Continuando com o exemplo do *pacemaker*, e pelo facto da sua bateria ser de baixo consumo energético em comparação com outros dispositivos, esta não necessita de um carregamento contínuo como o de um coração totalmente artificial. Contudo, e como já foi referido, a sua bateria tem um tempo limitado de funcionamento. Assim, foi proposto um método electromagnético baseado num suplemento eléctrico que é ligado às baterias e que as carrega através da baixa frequência de um campo magnético rotativo [22]. Este sistema implementável é composto por um micro-gerador, com uma engrenagem de elevada desmultiplicação, um íman de metal e duas fases de excitação da bobine, que é instalado fora do corpo humano, como mostra a figura 9.

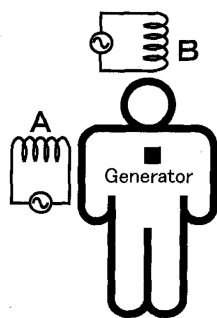


Fig. 9 - Campo magnético no corpo humano [22].

Ao excitar as bobinas, um campo magnético rotacional é aplicado ao ímã que está implantado no corpo, accionando o micro-gerador.

A velocidade de rotação do micro-gerador é cerca de 100 vezes superior que a rotação do ímã, uma vez que o sistema de engrenagens é instalado entre estes, obtendo-se assim uma elevada tensão que serve para carregar a bateria do *pacemaker*.

Yuen *et al.* [22] desenvolveram um conversor energético baseado em micro-electromagnetismo apto a armazenar a energia numa bateria do tamanho AA. O conversor é capaz de carregar o condensador com 1,6 V, a nível DC, em menos de 1 minuto. Este aparelho foi utilizado para sustentar um sistema sem fios num sensor de temperatura.

## 5. Futuro

Uma vez que é possível captar energia de várias partes do corpo, tais como do andamento, o pedalar, movimento dos braços, pressão dos dedos, respiração e ainda da pressão sanguínea, uma das futuras aplicações associadas a esta última será o desenvolvimento de uma bateria humana que retira electricidade da glicose presente no sangue, sendo capaz de gerar até 100 W [23].

A bateria humana baseia-se numa enzima com a capacidade de retirar electrões da glicose, ou seja, alimenta-se de açúcar.

Uma vez que os aparelhos de monitorização da Diabetes tipo I estão em constante contacto com o sangue, de forma a controlar os seus níveis de glicose, seria possível aproveitar esta interacção e gerar energia para sustentar o aparelho. Este ao ser portátil necessita, como é óbvio, de uma bateria para o seu funcionamento. Assim, esta bio-nanobateria poderia ser implementada nas bombas de infusão de insulina.

Todos os aparelhos médicos implantáveis (IMD), incluindo os *pacemakers*, desfibrilhadores, bombas de infusão e neuro-estimuladores requerem potência eléctrica. As baterias não recarregáveis são utilizadas como fonte de energia destes aparelhos. Uma das limitações dos IMD é a longevidade da fonte de energia. Quando a bateria é incapaz de sustentar os aparelhos, os IMD têm de ser retirados e/ou a bateria

ou o aparelho têm de ser substituído colocando muitas vezes em risco a saúde e o bem estar do utilizador. Ainda assim, a durabilidade da bateria depende da potência requerida pelo IMD e da quantidade de energia armazenada nesta [24].

Assim, após um estudo efectuado às características técnicas de alguns aparelhos médicos portáteis, foi possível encontrar alguns equipamentos que podem ser conciliados com a captação de energia corporal, por possuírem um baixo consumo de energia. Estes valores apresentam-se na Tabela II:

TABELA II  
CONSUMO ENERGÉTICO DE ALGUNS APARELHOS MÉDICOS.

Equipamento	Marca	Consumo energético
<i>Bombas de infusão de insulina</i>	Syring	12 W
<i>Pressão arterial</i>	Nanjing	3 W
	Winice Trade	
<i>Monitorização coagulação sanguínea</i>	CoaguChek	0,5 W
<i>Pacemaker</i>		5,6 W
<i>Monitorização dos níveis de glicose</i>	Accu-Chek	0,5 W

Depois de uma análise aos métodos de produção de energia e da recolha de informação sobre IMD, verificou-se que estes possuem um baixo consumo energético, sendo possível aplicar estes métodos quer nos IMD, quer nos aparelhos de monitorização. Apesar da captação de energia ser um tema que está bastante em voga, não existem ainda muitas aplicações médicas no mercado. Assim sendo, após uma pesquisa sobre aparelhos médicos portáteis e sobre o seu funcionamento, foi possível antever algumas aplicações da captação de energia para estes. As bombas de infusão de insulina, já acima mencionadas, podem também ser carregadas pela diferença de temperatura, uma vez que estes aparelhos necessitam de introduzir uma agulha subcutânea. Desta forma, estão em permanente contacto com o sangue, e como tal, estão também em contacto com a temperatura interna do corpo. Pelo método termoeléctrico já explicado anteriormente, é provável que a diferença de temperatura entre os tecidos consiga pelo menos carregar o aparelho de controlo dos níveis de glicose para que a bateria deste tenha uma maior autonomia.

O síndrome de morte súbita de recém-nascidos e lactentes é uma das grandes preocupações de saúde infantil, surgindo repentinamente quando estes estão a dormir. É impossível de prever por não apresentar sintomas prévios. Os aparelhos existentes baseiam-se na verificação da respiração e do movimento do bebé.

Quando este fica imóvel na cama durante um certo tempo é emitido um sinal de alarme.

Assim, de forma a evitar que tal aconteça, coloca-se à volta do peito do recém-nascido uma cinta piezoelétrica que, com a alteração do volume provocado pela inspiração e expiração, sofre uma deformação mecânica e produz energia apta a carregar as baterias do sistema de monitorização.

Neste seguimento, é viável também a utilização de cintas com propriedades piezoelétricas em grávidas, uma vez que estas, quando já estão em período de gestação avançado, necessitam de controlar os movimentos e o ritmo cardíaco do bebé.

Actualmente existem várias formas de medir a tensão arterial, sendo uma delas a utilização de um aparelho de pulso, como os relógios. Assim, pelo mesmo método dos micro-sistemas inerciais, é possível produzir energia para este aparelho da mesma forma que se produz para os relógios. Uma vez que este aparelho é colocado no pulso, está sujeito a movimentos durante todo o dia. Assim, as pessoas com problemas de hipertensão ou hipotensão poderão controlar constantemente os níveis de pressão sanguínea sem necessitar de trocar de bateria com uma regularidade tão acentuada.

Um dos métodos que mais é utilizado a nível industrial é o piezoelétrico, uma vez que a deformação mecânica do material é algo fácil de se conseguir. Com a introdução do material no sapato, como já foi referido, é possível gerar uma quantidade satisfatória de energia. Assim, além de se poder aplicar esta energia em aparelhos MP3 e telemóveis, é também possível a sua utilização, não para IMD, mas sim para qualquer tipo de aparelho portáteis, desde que estejam ligados à energia gerada na deformação do material pelo andamento.

O caminhar é ainda eficaz noutros métodos, como é o caso do electromagnético. A aplicação de um íman permanente num sapato pode ser viável na medida em que ao andar provocamos uma deslocação do íman pela bobine, provocando assim um campo magnético que geraria energia. Mais uma vez seria apenas necessário ajustar essa energia ao aparelho em questão.

Além da medicina, estes métodos de captação de energia poderiam ser bastante rentáveis no controlo dos testes físicos de atletas. Isto deve-se ao facto dos atletas estarem em constante movimento, produzindo, por exemplo, deformação nos materiais piezoelétricos ou ainda agitação magnética no íman. Porém, ambos os mecanismos de captação de energia teriam de estar ou instalados nas sapatilhas, ou nos braços, respectivamente. O desafio aqui seria, mais uma vez, aplicar estes dispositivos sem provocar grandes alterações de peso no atleta, de forma a não induzir resultados errados.

Uma outra forma de aproveitamento energético nos atletas será pela diferença de temperatura que surge no próprio exercício físico.

O problema que se coloca nas aplicações dos dispositivos de captação é o facto de estes serem muito dispendiosos, não tornando rentável a sua utilização para qualquer tipo de aparelho médico portátil.

Por exemplo, apesar de ser possível a implementação de um sistema de captação de energia num aparelho de medição de glicose, relativamente barato e que não necessita de estar constantemente ligado, não se justificaria a sua aplicação por actualmente ser bastante dispendiosa.

Por sua vez a bomba de insulina para monitorização de Diabetes tipo I é um instrumento caro, custando mais de 2000 euros e, em alguns casos apresentando uma duração média de apenas 2 anos [25]. Neste caso específico, já compensaria aplicar um sistema de captação, podendo com este prolongar o tempo médio de vida.

Assim, é necessário ter em conta o tipo de aparelho a que se aplica o dispositivo de captação. Este só poderá trazer benefícios a nível financeiro se for colocado em aparelhos que se encontrem constantemente ligados e que estejam sujeitos ao movimento corporal, de forma a poderem usufruir da sua energia.

## 5. Conclusão

Neste artigo são apresentados os métodos de captação de energia a partir do ambiente e do corpo humano com maior relevância para a alimentação de dispositivos de baixo consumo energético, particularmente dispositivos portáteis, e fundamentalmente com aplicações médicas em termos de monitorização de sinais fisiológicos e destinados à terapêutica assistida. Para tal, são apresentadas as características principais e a fundamentação físico-matemática dos métodos de colheita de energia por piezoelectricidade, por termoelectricidade e por electromagnetismo. As aplicações dos sistemas piezoelétricos, termoelétricos e electromagnéticos de captação de energia encontram-se subdivididas nos campos industrial/doméstico e médico. Assim, desenvolve-se um exercício sobre as futuras aplicações de métodos de captação de energia em dispositivos médicos portáteis e ainda se aborda a sua sustentabilidade energética.

Em conclusão, é evidenciada a grande dependência actual dos aparelhos portáteis relativamente às baterias, o que, pelo seu peso acrescido e principalmente pela sua reduzida capacidade de armazenamento de energia, se traduz num menor tempo de utilização contínuo dos dispositivos. Neste sentido, e face à crescente evolução tecnológica, é

necessário encontrar soluções através de recursos ambientais e humanos, de forma a colmatar as necessidades dos utilizadores. Isto tanto a nível industrial, como a nível médico. Para ambos, a necessidade de estender a disponibilidade energética de diversos aparelhos é vital. Todavia, o campo dos dispositivos médicos portáteis de baixo consumo energético, quer pela monitorização vital de vários parâmetros quer pela actuação de uma determinada terapêutica, corresponde a um sector muito promissor para a utilização destas tecnologias.

## Referências

- [1] Chapman, P. and Raju, M., (2008). Designing power systems to meet energy harvesting needs, *TechOnline India* **8**, 42.
- [2] Paradiso, A., (2008). Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics. Massachusetts Institute of Technology Media Laboratory Thad Starner, Georgia Institute of Technology, GVU Center
- [3] Okuno, E., Caldas, I., Chow, C., (1986). Conservação de Energia. In *Física para ciências biológicas e biomédicas*, vol II, pp. 103-105. Lisboa: HARBRA.
- [4] Morton, D., (1952). Human Locomotion and Body Form. The Williams & Wilkins Co., *Science Education* **36**, 312.
- [5] Amirtharajah, R., Collier, J., Siebert, J., Zhou, B., Chandrakasan, A., (2005). DSPs for Energy Harvesting Sensors: Applications and Architectures; Intel & Massachusetts Institute of Technology, *IEEE* **1536**, 72-74.
- [6] Casimiro, F., Gaspar, P.D., Gonçalves, L.C.C. (2009). Aplicação do princípio piezoelétrico no desenvolvimento de pavimentos para aproveitamento energético, III Conferência Nacional em Mecânica de Fluidos, Termodinâmica e Energia: MEFTE - 2009, Bragança, Setembro.
- [7] Monteiro, M.S. (2002). Avaliação metrológica da estabilidade termoelétrica de termopar AuPt. Tese de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. pp. 32-36.
- [8] Hosaka, H., (2003). Personal electric power generation technology for portable information equipamention. Micro Mechatronics. *The journal of the Horological Institute of Japan* **47**(3), 38-46.
- [9] Kagetsu, Y., Osaki, Y., Hosaka, H., Sasaki, K., Ito, K., (2004). Research on automatic power generator using self-exciting rotation. *Micro Mechatronics (The Journal of the Horological Institute of Japan)*. **48**(3), 22-33.
- [10] Paradiso, J., Shenck N., (2001). Energy Scavenging with Shoe-Mounted Piezo-Electrics, *IEEE Micro*, **21**(3), 30-42.
- [11] Kornbluh, R., (2002). Electroelastomers: Applications of Dielectric Elastomer Transducers for Actuation, Generation, and Smart Structures, *Proc. SPIE* **4698**, 254-270.
- [12] <http://www.sustainabledanceclub.com/>, 11/02/2009.
- [13] Vining, C., (2001). Semiconductors are cool. *Nature* **413**, 577-578.
- [14] Paradiso, J., Kymissis, J., Kendall, C., Gershenfeld, N., (1998). Parasitic power harvesting in shoes. In *IEEE Intl. Symp. On Wearable computers* 24, 132-139.
- [15] Hayshida, J., (2000). Unobtrusive integration of magnetic generator systems into common footwear. MIT Department of mechanical engineering, pp. 98-104.
- [16] Parsonnett, V., Cheema, A., (2003). The nature and frequency of postimplant surgical interventions: A realistic Appraisal. *Pace* **26**, 2308-2312.
- [17] Lanmuller, H., Sauermann, S., Unger, E., Schnetz, G., Mayr, W., Bijak, M., Girsch, W., (1999). Multifunctional implantable nerve stimulator for cardiac assistance by skeletal muscle. *Artificial Organs* **23**, 352.
- [18] Yang, R. Qin, Y., Li, C., Zhu, G., Wang, Z., (2009). Converting Biomechanical Energy into Electricity by a Muscle-Movement Driven Nanogenerator, *Nano Lett* **9**(3), 1201-1205.
- [19] Yang, Y. (2007). Suitability of a thermoelectric power generator for implantable medical electronic devices. *Physics* **40**, 5790-5800.
- [20] Rom, N. (2006). Environmental and Occupational Medicine. Philadelphia, Pennsylvania: *Wolters Kluwer/Lippincott Williams & Wilkins*.
- [21] Rowe, D. (1995). Handbook of Thermoelectric, *CRC*.
- [22] Suzuki, S., Katane, T., Saotome, H., Saito, O., (1999). A Proposal of Electric Power Generating System for Implanted Medical Devices. *IEEE transactions on magnetic* **35**(5), 21-23.
- [23] Yuen, S., Lee, J., Lee, M., Chan, G., Lei, F., Leong, P., Li, W., Yeung, Y., (2004). AA size Micro power Conversion Cell for wireless applications. *Proc. of the world congresso intelligent control and automation (WCICA)* **6**, 5629-5634.
- [24] <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=010115030819> Abril, 09.
- [25] Wahlstrand, C., (2005). Kind Code. Headset recharger for cranially implantable medical devices. U.S. Pat. Application 20050004619.

## Nomenclatura

### Geral

$B$	Densidade de fluxo magnético, [1T = 1wb/m]
$d$	Coefficientes piezoelétrico, [C/N]
$D$	Fluxo dielétrico [C/m <sup>2</sup> ]
$E$	Campo eléctrico [N/C]
$J$	Densidade de corrente, [A/m <sup>2</sup> ]
$S$	(Adimensional)
$s$	Coefficientes elástico, [m <sup>2</sup> /N]
$T$	Tensão (pressão) mecânica, [N/m <sup>2</sup> ]
$T_c$	Temperatura quente, [° C]
$T_f$	Temperatura fria, [° C]

### Simbologia grega

$\epsilon$	permissividade dielétrica, [F/m]
$\epsilon_0$	Permissividade do espaço livre, [8,854x10 <sup>-12</sup> F/m]
$\mu_0$	Permeabilidade do espaço livre, [4πx10 <sup>-7</sup> N/A <sup>2</sup> ]
$\nabla$	Operador vectorial

