

REVIEW OF ENERGY HARVESTING TECHNIQUES FOR THE DEVELOPMENT OF SELF-POWERED SYSTEMS: METHODS AND APPLICATIONS

Data de aceite: 01/08/2024

Eder Andrade da Silva

Universidade Federal da Integração
Latinoamericana – UNILA
Programa de Pos-graduação
Interdisciplinar em Energia e
Sustentabilidade – PPGIES
Foz do Iguaçu, PR

Jorge Javier Gimenez Ledesma

Universidade Federal da Integração
Latinoamericana – UNILA
Programa de Pos-graduação
Interdisciplinar em Energia e
Sustentabilidade – PPGIES
Foz do Iguaçu, PR

Marco Roberto Cavallari

Universidade Estadual de Campinas
(UNICAMP)
Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação (FEEC)
Campinas, SP

Oswaldo Hideo Ando Junior

Universidade Federal Rural de
Pernambuco - UFRPE
Grupo de Pesquisa em Energia &
Sustentabilidade Energética - GPEnSE
Cabo de Santo Agostinho – PE

RESUMO: Este capítulo apresenta uma breve revisão do potencial das técnicas de captação de energia residual (*Energy Harvesting*) para o desenvolvimento de sistemas autoalimentados (*self-powered*) que abrangem microgeradores, sensores autônomos e Internet das Coisas (IoT). Inicialmente, discute-se a importância da conservação e da eficiência energética, destacando a necessidade de aprimorar técnicas eficazes para o aproveitamento de energias residuais, com foco em eficiência, conservação e sustentabilidade. Posteriormente, são exploradas as principais formas de aproveitamento baseadas em *Energy Harvesting*, incluindo métodos como piezoelectricidade, termoelectricidade, acoplamento magnético, radiofrequência e solar. Finalmente, são apresentados exemplos de aplicações que ilustram o potencial dessas técnicas para o desenvolvimento de sistemas autoalimentados.

PALAVRAS-CHAVE: Piezoelectricidade, Termoelectricidade, Acoplamento magnético, Radiofrequência, Solar, Microgeração, Captação de Energia, Sensores autônomos.

ABSTRACT: This chapter presents a brief review of the potential of energy harvesting techniques for the development of self-powered systems that include micro-generators, autonomous sensors and the Internet of Things (IoT). Initially, the importance of energy conservation and efficiency is discussed, highlighting the need to improve effective techniques for harnessing residual energy, with a focus on efficiency, conservation and sustainability. Subsequently, the main forms of utilization based on Energy Harvesting are explored, including methods such as piezoelectricity, thermoelectricity, magnetic coupling, radiofrequency and solar. Finally, examples of applications are presented which illustrate the potential of these techniques for the development of self-powered systems.

KEYWORDS: Piezoelectricity, Thermoelectricity, Magnetic coupling, Radiofrequency, Solar energy, Microgeneration, Energy harvesting, Autonomous sensors.

INTRODUÇÃO

O aumento das emissões globais de gases de efeito estufa (GEE), especialmente nos setores energético e de transporte, tem sido um ponto crítico destacado por organizações como a *Comisión Económica para América Latina y el Caribe* (2022) e o *World Population Review* (2022). Desde 1990, as emissões globais cresceram 41%, sendo o setor de energia responsável por 73% dessas emissões, destacando-se a importância e a necessidade de buscar alternativas e adotar tecnologias sustentáveis alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 e aos compromissos do Acordo de Paris para a neutralização das emissões de GEE até 2050 (SACHS et al., 2022). Destaca-se que o Brasil, comprometido com o Acordo de Paris, visa reduzir suas emissões de CO₂ em 37% até 2025, com perspectiva de alcançar uma redução de 43% até 2030 (IEA et al., 2022; RUCKS et al., 2023).

O constante desenvolvimento do setor industrial global, aliado ao aumento do uso de equipamentos eletrônicos, tem provocado um crescimento exponencial na demanda por eletricidade nas últimas décadas, resultando em obstáculos nos sistemas de geração de energia (SUTIKNO et. al., 2023). Neste contexto, o desenvolvimento e a implementação de técnicas avançadas de *Energy Harvesting* (EH), não apenas buscam maximizar a eficiência energética e reduzir custos operacionais, mas também desempenham um papel crucial na redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Ao transformar energia residual, que de outra forma seria dissipada, em energia elétrica utilizável, a EH contribui para a diminuição da dependência de fontes tradicionais de energia e do uso de baterias frequentemente associadas a altas emissões de GEE. Essa abordagem não só se alinha com os compromissos globais de mitigação climática, mas também impulsiona a transição para um futuro mais sustentável e resiliente.

Energy Harvesting consiste na captura e na conversão de energia que normalmente seria perdida em formas úteis de energia elétrica, utilizando transdutores especiais capazes de transformar grandezas físicas como pressão, temperatura ou luz em energia elétrica (FARMER & JUSTIN, 2007). EH surge da necessidade de melhorar a eficiência energética

e buscar soluções de autoalimentação para microssistemas isolados, visando reutilizar energia desperdiçada e transformá-la em oportunidades de reaproveitamento, ou seja, a captação de energia residual (ANDO JUNIOR et al., 2014).

A crescente demanda energética impulsiona o desenvolvimento tecnológico global, incluindo métodos de aproveitamento de energia. Este cenário promove a criação e o aprimoramento de métodos destinados a reduzir perdas nos processos industriais, diminuir custos e aumentar a produção. É com o avanço dos dispositivos eletrônicos nas últimas décadas, houve uma tendência de miniaturização e melhoria das funcionalidades, resultando em significativa redução no consumo de energia em comparação com dispositivos mais antigos. Este progresso, aliado a outros fatores, permitiu o desenvolvimento de tecnologias capazes de aproveitar energia residual de diversas fontes (ANDO JUNIOR et al., 2014).

A pesquisa e aplicação de novas formas de captação de energia residual continuam a expandir-se, impulsionadas por considerações ambientais e sociais, visando mitigar os impactos adversos da má gestão energética e potenciais crises.

O capítulo está estruturado em quatro seções que abordam diferentes aspectos do desenvolvimento de técnicas de EH para o desenvolvimento de sistemas autoalimentados (*self-powered*). Na Seção 1, apresenta uma breve introdução sobre o assunto e sua importância para o desenvolvimento de sistemas autoalimentados e promoção da sustentabilidade energética. Enquanto na seção 2, tem-se um breve relato histórico abordando a origem das principais alternativas para captação de energia, começando pela termoeletricidade, seguida pela piezoeletricidade, eletromagnetismo, radiofrequência e finalizando com energia solar, destacando seus avanços e contribuições para a ciência. Na Seção 3, apresentam-se os principais métodos para captação de energia, destacando seu potencial para o desenvolvimento e a aplicação em sistemas autoalimentados. Finalmente, a Seção 4 apresenta as principais considerações para uso em futuras pesquisas, explorando potenciais melhorias para o desenvolvimento de sistemas autoalimentados em distintos cenários.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção do capítulo, apresenta-se um breve relato histórico sobre a origem das principais alternativas para captação de energia. Inicia-se com a termoeletricidade, seguida pela piezoeletricidade, eletromagnetismo, radiofrequência e conclui-se com a energia solar, destacando seus avanços e contribuições.

Termoeletricidade

A termoeletricidade refere-se à conversão direta de uma diferença de temperatura em uma tensão elétrica, conhecida como efeito *Seebeck*, ou o fenômeno inverso, conhecido como efeito Peltier. A história da teoria termoeétrica remonta a 1823, quando Thomas J. Seebeck conduziu experimentos com uma bússola e observou que ela se desviava quando aproximada de um circuito fechado formado por dois condutores diferentes, aquecendo a junção entre eles. Embora suas conclusões iniciais tenham sido equivocadas, estudos subsequentes corrigiram esses equívocos, revelando o verdadeiro fenômeno da termoeletricidade (ROWE, 1995).

Por volta de 1850, o desenvolvimento da termoeletricidade ganhou impulso, à medida que a busca por novas formas de conversão de energia se expandia para diversas áreas, incluindo a utilização de materiais termoeétricos para geração de eletricidade (ROWE, 1995). Os geradores de estado sólido baseiam-se no efeito *Seebeck*, permitindo que materiais termoeétricos convertam diretamente energia térmica em energia elétrica (KARABETOGLU & SISMAN, 2012), (ANDO JUNIOR et al., 2014).

O efeito *Seebeck* resulta na geração de uma diferença de potencial, denominada tensão de *Seebeck* (E_s), entre duas junções de condutores, ou semicondutores, quando submetidas a um gradiente de temperatura. Isso gera uma corrente contínua no circuito termoeétrico (ANDO JUNIOR et al., 2014).

A Figura 1 ilustra o efeito *Seebeck*, mostrando a relação entre o gradiente de temperatura e a tensão gerada por meio do efeito termoeétrico.

$$E_s = \int_{T_{fria}}^{T_{quente}} \alpha_{A,B} dT = \alpha_{A,B}(\Delta T)$$

Onde E_s (V) é a tensão de *Seebeck*, $\alpha_{A,B}$ (V/K) é o coeficiente diferencial de *Seebeck*, ΔT (K) um gradiente de temperatura (variável de integração) de uma temperatura baixa (T_{fria} , K) a uma alta (T_{quente} , K).

Os Geradores Termoeétricos (TEGs), dispositivos de estado sólido, operam em condições extremas, exigindo gradientes de temperatura elevados para a geração de energia. Apresentam eficiência energética entre 5% e 15%, sendo aplicados amplamente em *Energy Harvesting* (CAMACHO-MEDINA et. al., 2014), (KIM & BUN, 2014). Dado que os geradores termoeétricos são fabricados pela associação em série de N termopares, basta utilizar a equação para obter a tensão de saída do módulo (ANDO JUNIOR et al., 2014).

$$V = NE_s$$

onde V (V) é a tensão de saída do gerador termoeétrico, N o número de termopares internos que compõem o módulo e E_s (V) a tensão de *Seebeck* de um único termopar.

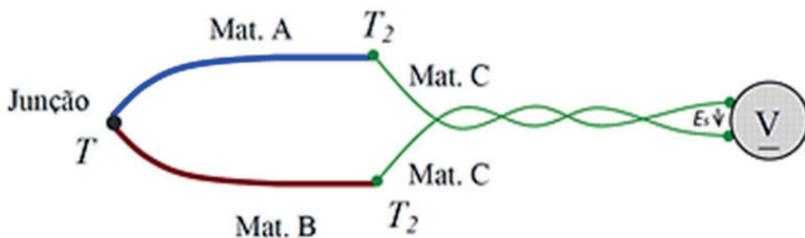


Figura 1 – Demonstrativo do efeito *Seebeck*.

Fonte: (IZIDORO et. al, 2016)

Dispositivos termoelétricos são capazes de transformar energia elétrica em gradientes de temperatura e vice-versa. Esta forma de conversão é principalmente correlacionada com os efeitos *Seebeck* e *Peltier*. Quando é estabelecida uma diferença de temperatura entre as partes “quentes” e “frias” de dois materiais semicondutores distintos é gerada uma tensão elétrica, que pode ser chamada de tensão de Seebeck, essa tensão é diretamente proporcional a um diferencial de temperatura, nesse caso o coeficiente de Seebeck. (ROWE, 1995).

Na Figura 2 apresenta o módulo termoelétrico (TEG) e suas partes constituintes. Destaca-se algumas das vantagens de se utilizar TEG para esse tipo de conversão de energia são: **(i)** os dispositivos termoelétricos não possuem partes móveis, portanto não são necessárias revisão e manutenção frequentes; **(ii)** não contém clorofluorcarbonetos ou outros materiais que demandem reabastecimento ou reposição; e **(iii)** razão de potência por peso (W/Kg) (KARABETOGLU & SISMAN, 2012), (ANDO JUNIOR et al., 2014).

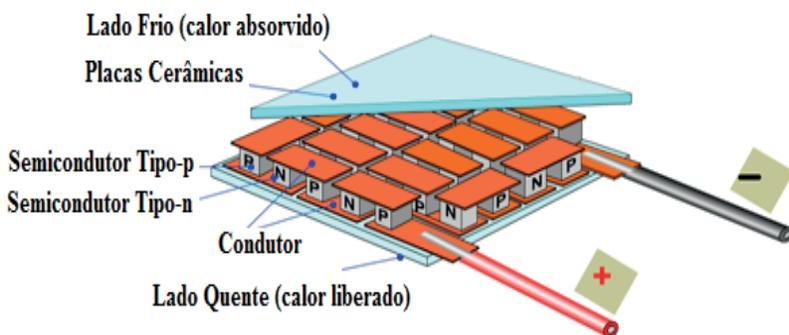


Figura 2 – Diagrama esquemático de um dispositivo termoelétrico

Fonte: (ANDO JUNIOR, 2014)

Dispositivos termoeletricos s3o utilizados em amplas 3reas, desde aeroespacial, instrumental, militar ou produtos comerciais. Em baixa pot4ncia, pode-se exemplificar o uso de TEG em calculadoras ou rel3gios, substituindo baterias em alguns sistemas. A m3xima efici4ncia termoeletrica convertida em um TEG 4 definida pela equa33o (KARABETOGLU & SISMAN, 2012), (ROWE, 1995):

$$\eta_{max} = \frac{T_{quente} - T_{frio}}{T_{quente}} \frac{\sqrt{1+ZT}-1}{\sqrt{1+ZT} + \frac{T_{quente}}{T_{frio}}}$$

Enquanto a figura de m3rito 4 obtida pela equa33o:

$$Z = \frac{s^2}{\rho\lambda} T$$

onde Z 4 figura de m3rito, T (K) a temperatura absoluta, S (V/K) o coeficiente Seebeck, ρ (Ω m) a resist4ncia el4trica, λ(W/m/K) 4 o coeficiente de condu33o t4rmica do material, T_{fria} (K) a temperatura do lado frio dos m3dulos termoeletricos e T_{quente} (K) a temperatura do lado quente do m3dulo termoeletrico. Quando o calor flui atrav4s de um gerador termoeletrico, parte do calor absorvido 4 convertido em energia el4trica, enquanto o restante, em vez de ser dissipado para o ambiente, 4 recolhido e usado para o aquecimento de um fluido (KARABETOGLU & SISMAN, 2012).

A Figura 3 ilustra uma disposi33o b3sica de um sistema de cogera33o termoeletrica. Contudo, quando o dispositivo 4 um gerador termoeletrico como gerador de um pr4-aquecimento de um fluido incorporado, uma pequena por33o de calor (Q1 e Q3) fluir3 atrav4s de uma deriva33o constitu3da pelo m3dulo termoeletrico e ent3o convertida em eletricidade. O calor que 4 dissipado no lado frio (Q2) volta para a entrada do fluido aquecedor e pr4-aquecer3 o fluido. Com isso, o calor de Q2 n3o 4 desperdi3ado (IZIDORO et. al, 2016).

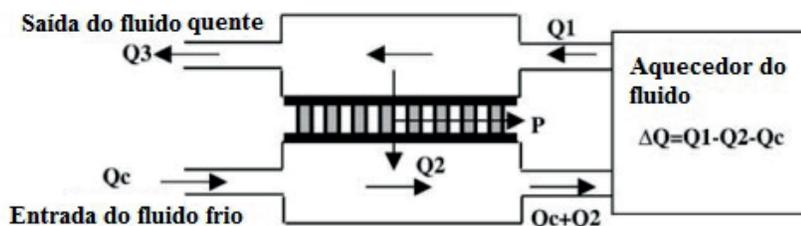


Figura 3 – Gerador termoeletrico utilizado para pr4-aquecer um fluido.

Fonte: (IZIDORO et. al, 2016)

Do ponto de vista de aplicação da termoeletricidade para *Energy Harvesting*, destacam-se: **(i)** aproveitamento do calor dispersado em veículo à combustão; **(ii)** otimização de dispositivos termoeletricos na conversão de energia solar; e **(iii)** aproveitamento do calor residual de metal líquido em processos de fabricação e de vários tipos de sistemas térmicos (ANDO JUNIOR et al., 2014).

Piezoelasticidade

O efeito piezoelétrico se refere à capacidade de certos materiais gerar uma diferença de potencial elétrico quando submetidos a um estresse mecânico, como pressão ou vibração. Esse fenômeno também inclui o efeito inverso, onde esses materiais sofrem deformação quando expostos a um campo elétrico. Pierre e Jacques Curie foram os primeiros a observar esse comportamento em 1880, quando descobriram que certos cristais adquiriam uma carga elétrica sob estresse mecânico, definindo assim, o efeito piezoelétrico (FARMER & JUSTIN, 2007).

A utilização de materiais piezoelétricos começou na década de 1920 com dispositivos compostos por cristais, e a partir dos anos 1940 na geração baseada em materiais cerâmicos. No entanto, foi após a Primeira Guerra Mundial que esses materiais começaram a ser explorados em aplicações como sensores, transdutores e dispositivos de energia (ARMENDANI, 2016).

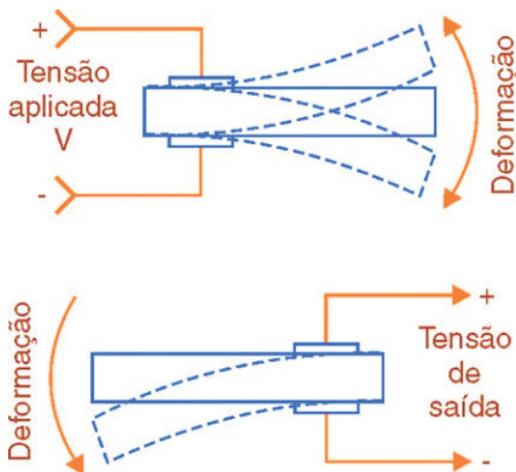


Figura 4 – Ilustração demonstrando o efeito piezoelétrico.

Fonte: (ARMENDANI, 2016).

Os dispositivos piezoelétricos têm uma ampla gama de aplicações, desde a condução elétrica em grafenos até sistemas híbridos em estradas para geração de eletricidade local, carregamento de dispositivos médicos, monitoramento por sensores, sonares e outras aplicações que exploram sua capacidade de converter energia mecânica em energia elétrica (ZHANG, 2015), (HARB, 2011). Nas Figuras 5 (a) e (b) são mostradas ilustrações esquemáticas do sistema do módulo piezoelétrico através de suas vistas, a superior e a lateral, respectivamente (LIU et al., 2011).

Um estudo realizado com o modelo piezoelétrico da Figura 6 apresenta resultados de tensão gerada de acordo com a frequência de vibração e o número de dispositivos piezoelétricos (PZT) em circuitos série e paralelo (LIU et al., 2011).

Para a medição da tensão de saída o sistema piezoelétrico é empregado a testes de vibração. Constituído por um agitador de vibração, amplificador de potência e um analisador de sinal dinâmico. O sinal de vibração é gerado a partir do analisador de sinal dinâmico, amplificado e utilizado para controlar a amplitude da frequência de vibração. Assim sendo, o sistema piezoelétrico sofre excitação e gera tensão de saída que será recolhida e registrada pelo analisador de sinal. Os resultados estão visíveis na Figura 6 e demonstram as diferenças entre a potência final dos sistemas piezoelétricos conectados em série e/ou paralelo (LIU et al., 2011).

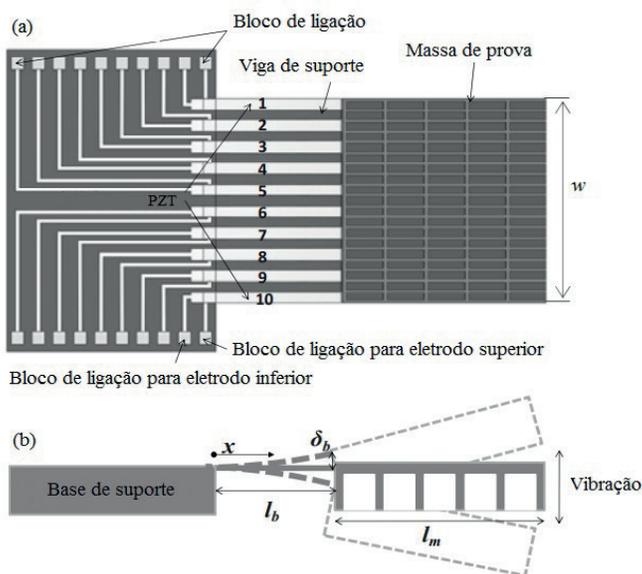


Figura 5 – Ilustração esquemática do sistema piezoelétrico: (a) vista superior e (b) vista lateral.

Fonte: (LIU et al., 2011).

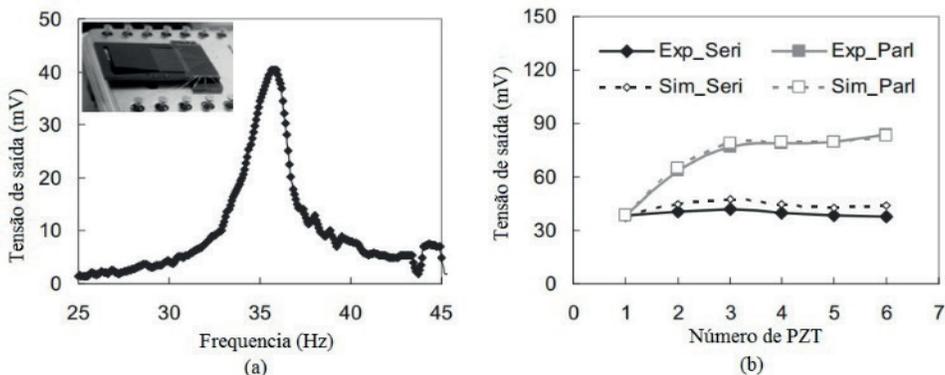


Figura 6 – Ilustração demonstrando (a) a Tensão de saída por frequência de um exemplar de PZT e da (b) Voltagem de saída por diferentes números de PZT conectados em série e em paralelo.

Fonte: (LIU et al., 2011).

Ao contrário do sistema linear em que apenas um módulo é excitado, o sistema não-linear impacta mais módulos com a mesma base de excitação por frequência. A variação do contato rígido altera a dependência de energia dada pelo diferencial do raio da curvatura do piezoelétrico (VIJAYAN et al., 2015).

As reações do feixe determinam a energia a ser gerada e, em seguida, é analisada a eficácia da energia gerada a partir da pressão piezoelétrica. O piezoelétrico pode ser adicionado ao feixe em qualquer configuração isomorfa ou bimorfa (VIJAYAN et al., 2015).

Outras investigações experimentais mostram um sensor sem fio (*wireless*) “*smart*” de baixo custo, que é utilizado para monitoramento de condições de equipamentos e diagnóstico de falhas. A ferramenta para mensurar a extração e acumulação de elementos, é no local onde está ocorrendo o trabalho em condições áspero/molhado (OSTESEVICIUS et al., 2015).

É impossível parar a vibração de curvatura de ferramenta estrutural. Isso permite um sistema autônomo de produção de energia sem cabos de suporte ou baterias. Para a estabilização do equipamento há uma dependência de um estabilizador CC (corrente contínua), cuja diferença de potencial é usada para suprir os componentes eletrônicos e os geradores que invertem a amplitude da tensão (ZHANG, 2015).

O subsistema de conversão de energia elétrica realiza a conversão de energia elétrica, gerada pelo transdutor de energia, em um microcontrolador de tensão. O transdutor primário, ou seja, piezoelétrico, converte vibrações mecânicas em energia elétrica, que é variável e precisa de suficientemente larga amplitude. Em contrapartida o transdutor secundário, o qual converte a tensão variável em constante e contínua, pode ser modificada. Essa proposta de um sensor *wireless* de baixa potência possui a função de monitorar a necessidade de ferramentas em que o suprimento de energia é limitado (OSTESEVICIUS et al., 2015).

Eletromagnetismo

A conexão entre eletricidade e magnetismo foi estabelecida pela primeira vez em 1820 por Hans Oersted. Observou-se que uma corrente elétrica circulando em um fio causava deflexão em uma agulha magnética de bússola. Essa descoberta inicial foi fundamental para o desenvolvimento posterior das aplicações do eletromagnetismo (HARB, 2011).

Em 1831, Michael Faraday expandiu esse campo ao descobrir que uma diferença de potencial é induzida nas extremidades de um condutor quando ele se desloca através de um campo magnético. Essa descoberta levou à formulação da lei de Faraday, que estabelece que a força eletromotriz induzida em um circuito, é proporcional à taxa de variação temporal do fluxo magnético através do circuito. No mesmo ano, Faraday inventou o primeiro gerador de corrente contínua, que consistia em uma placa de cobre girando entre polos magnéticos (HARB, 2011).

A partir da década de 1930, com base nas descobertas de Faraday sobre a indução eletromagnética, o acoplamento magnético começou a ser amplamente utilizado para a geração de eletricidade e para melhorar o desempenho de dispositivos eletrônicos. Este princípio é aplicado em diversos sistemas, como por exemplo a alimentação de relógios por meio da conversão de movimentos humanos em energia rotativa, sistemas autoalimentados para bicicletas por meio de pedais, turbinas de água e monitoramento de equipamentos (ELVIN, 2012), (PRIYA, 2009).

Os dispositivos baseados no acoplamento magnético desempenham um papel crucial na utilização eficiente da energia mecânica e na geração de eletricidade em várias aplicações industriais e de consumo (ELVIN, 2012), (PRIYA, 2009).

Todos os sistemas eletromagnéticos de EH baseados em energia cinética podem ser classificados em três grupos de conversão magnética: **(i)** a conversão rotacional, **(ii)** a conversão oscilatória (vibracional), e **(iii)** conversão híbrida (transformando oscilatória em movimentos rotacionais) (RAHIMI et al., 2011).

Os **conversores rotacionais** utilizam-se de partes móveis e ímãs permanentes para a geração do fluxo magnético. Neste caso, é necessário um projeto dedicado da parte eletrônica para maior eficiência de conversão. Estes modelos possuem bom desempenho em baixas frequências e seus picos de tensão de saída são relativamente pequenos (DINULOVIC et al., 2015), (RAHIMI et al., 2011).

Os **conversores oscilatórios** são baseados em sistemas massa-mola-amortecedor (do inglês, *mass-spring-damper* - MSD), onde os ímãs permanentes são utilizados como massa oscilatória. Geralmente, esse tipo de conversor é utilizado em sistemas de baixa frequência e, é caracterizado pela baixa densidade de energia (DINULOVIC et al., 2015).

Os **conversores híbridos** usam um rotor que transforma vibração linear em rotação. Os conversores rotacionais são aplicáveis em sistemas que possuem uma frequência a

partir de 1 até 400 krpm. Esse tipo de conversor tem sido amplamente utilizado em relógios (DINULOVIC et al., 2015).

Um transdutor eletromagnético é composto de um rotor (parte móvel) e uma parte estacionária. A tensão induzida é controlada usando alimentação via sistema eletromagnético. A tensão CA (corrente alternada) é convertida em CC e levada a um regulador de tensão de saída. A equação a seguir pode ser utilizada para calcular os parâmetros analíticos para obter uma visão sobre o gerador (DINULOVIC et al., 2015):

$$V_{oc} \sim (R_0^2 - R_i^2) \times \left(\frac{T_{pm}}{T_{pm} + T_{ag} + T_c} Br \right) p N \omega$$

onde V_{oc} é a tensão do circuito aberto, R_0 o raio externo da bobina, R_i o raio interno da bobina, T_{pm} a espessura do ímã permanente, T_{ag} a espessura do espaço de ar, T_c a espessura do sistema de bobina, Br o remanescente do ímã permanente, p o número de polos, N o número de voltas/polo e ω a velocidade angular.

O sistema eletromagnético consiste em rotor e estator. Uma alta saturação da densidade de fluxo evita a saturação dos ímãs em um dispositivo de *Energy Harvesting*. Para um bom desempenho, é importante encontrar um acerto entre a indutância elétrica e a resistência das molas (DINULOVIC et al., 2015).

O sistema de conversão por movimentos é baseado em rotação, onde a conversão é iniciada por pressão de um botão. O movimento do botão é linear, por conseguinte, um mecanismo para o movimento de conversão é necessário para converter um movimento linear do botão num movimento de rotação do sistema magnético.

A Figura 7 ilustra o mecanismo de conversão da engrenagem com uma cremalheira redonda. A embreagem unidirecional faz parte do sistema, uma vez que o sinal de tensão negativa for gerado resulta em uma tensão de saída nula. Os ímãs permanentes rodam acima do sistema de bobina incorporado, dessa maneira a tensão elétrica é induzida (RAHIMI et al., 2011).

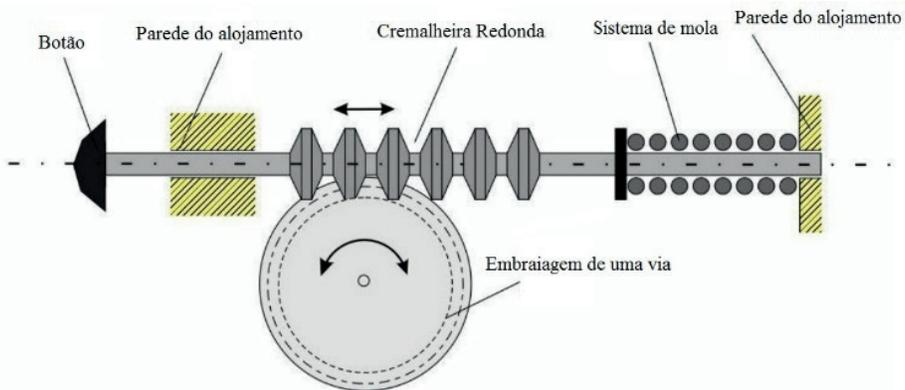


Figura 7 – Mecanismo cinético para a conversão do movimento.

Fonte: (RAHIMI et al., 2011).

A energia cinética resultante das vibrações do sistema é convertida em energia elétrica, onde a tensão induzida é gerada através de uma bobina, devido ao movimento de vibração externo de um ímã. A tensão CA gerada é convertida em CC e, posteriormente, é armazenada num capacitor atuando como bateria (RAHIMI et al., 2011).

Radiofrequência (RF)

As radiofrequências são formas de energia elétrica transmitidas pelo ar, estando vastamente presentes no ambiente cotidiano. O principal objetivo do estudo dessa tecnologia, é sua utilização na geração de energia elétrica para dispositivos pequenos, aproveitando a energia disponível no ambiente (ELVIN, 2012), (PRIYA, 2009).

Um circuito especializado para geração de energia, conectado a uma antena receptora, pode captar a energia de radiofrequência livre no ambiente e convertê-la em uma tensão contínua utilizável para alimentar dispositivos menores. O uso da tecnologia de radiofrequência é especialmente relevante para a geração de energia destinada a dispositivos de pequeno porte, aproveitando uma fonte de energia disponível e abundante no ambiente (ELVIN, 2012), (PRIYA, 2009).

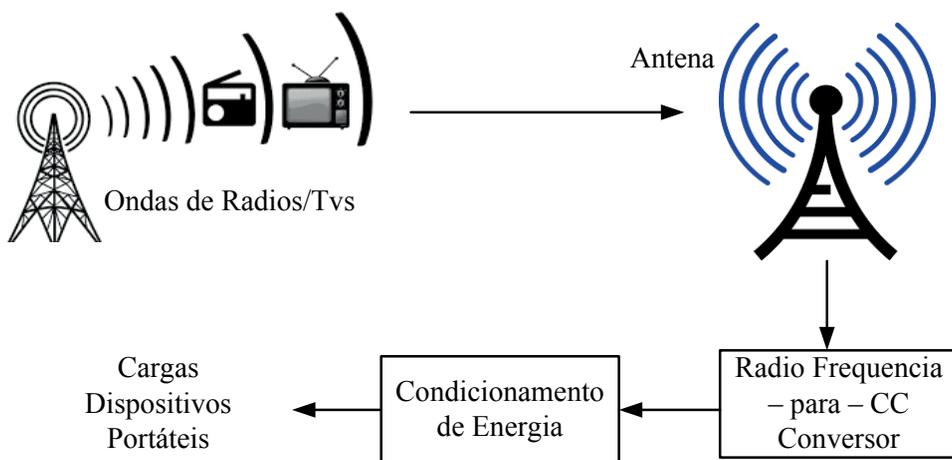


Figura 8 – Demonstrativo da aplicação de RF para *Energy Harvesting*

Fonte: (PRIYA, 2009).

Energia Solar

As células solares apresentam características distintas em comparação com outros métodos de captação de energia que para otimizar seu desempenho, é crucial encontrar o ponto de operação ideal onde a energia é extraída do painel solar.

Uma abordagem, para melhorar a eficiência da energia solar é combinar tecnologias de *Energy Harvesting*, aproveitando diferentes fontes de energia de forma complementar. Em muitos casos, pequenas placas solares são utilizadas para alimentar dispositivos de pequeno porte por exemplo, sistemas de iluminação, monitoramento e comunicação, além de diversas outras aplicações em indústria e veículos.

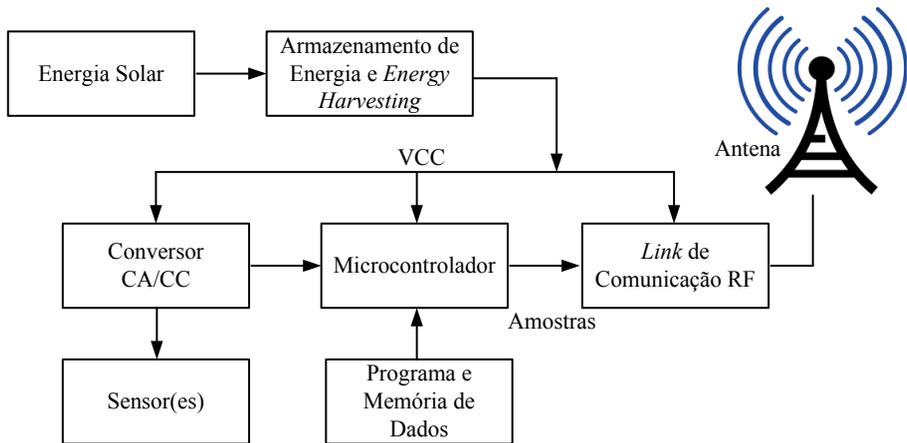


Figura 9 –Energia Solar em um sensor autônomo.

Fonte: (ELVIN, 2012).

Nessa perspectiva, novas tecnologias fotovoltaicas têm sido introduzidas, como os filmes fotovoltaicos orgânicos (OPV), que são leves, semitransparentes e eficientes em aplicações de microgeração interna, ganhando visibilidade no mercado e criando uma demanda crescente por equipamentos que viabilizem sua aplicação em larga escala. A tecnologia OPV, com sua alta eficiência na conversão da iluminação interna em energia elétrica (> 30 %), apresenta-se como uma alternativa promissora (TAN *et. al.*, 2023), (BITO *et. al.*, 2017).

No estudo de (ABDELNOUR *et. al.*, 2019) foi desenvolvido um sistema autoalimentado utilizando tecnologia de células fotovoltaicas orgânicas (OPV) para alimentar um sensor RFID do tipo SL900A-TAG. Um aspecto inovador deste trabalho, foi a fabricação por impressão de um supercapacitor flexível diretamente no OPV, formando assim, um módulo de energia integrado monoliticamente. Esse avanço possibilita a geração e armazenamento de energia de forma compacta e eficiente, adequada para aplicações onde o espaço e a flexibilidade são críticos, como em dispositivos portáteis e vestíveis (*wearables*).

ENERGY HARVESTING: METÓDO E TÉCNICA

Nesta seção, serão expostos os métodos principais de conversão para captação de energia, destacando seu potencial para o desenvolvimento e aplicação em *self-powered* com base nas referências estudadas.

Conversão de Energia por Termoeletricidade

O dispositivo termoeletrico (TEG) oferece diversas vantagens para *Energy Harvesting*, sendo uma das mais destacadas a ausência de partes móveis, que torna a conversão de energia silenciosa e livre de vibrações, ideal para aplicações em ambientes sensíveis ou com restrições de ruído. Além disso, a termoeletricidade pode operar em uma ampla faixa de temperaturas, desde condições criogênicas até centenas de graus Celsius. A robustez dos materiais termoeletricos, resistentes a vibrações e choques, e a escalabilidade da tecnologia, que pode ser ajustada para diferentes dispositivos e aplicações, também são pontos fortes. Pesquisas recentes destacam várias aplicações promissoras de TEG para EH em sensores autônomos e dispositivos autoalimentados com ênfase para as aplicações listadas/mencionadas a seguir:

Sensores de Vibração e Monitoramento Estrutural: (1) **Monitoramento de pontes e edifícios** - Utilizando o calor gerado pela radiação solar ou pela fricção do vento para alimentar sensores que monitoram a integridade estrutural e detectam rachaduras ou outros problemas. (2) **Monitoramento de máquinas rotativas** - Aproveitando o calor gerado pelo atrito ou pelo processo de produção para alimentar sensores que monitoram o desempenho da máquina e detectam falhas.

Sensores Ambientais e de Monitoramento: (1) **Monitoramento da qualidade do ar:** Utilizando o calor gerado pela radiação solar ou pela atividade humana para alimentar sensores que monitoram a qualidade do ar e detectam poluentes. (2) **Monitoramento de temperatura e umidade:** Aproveitando o calor gerado pelo ambiente ou por fontes artificiais para alimentar sensores que monitoram a temperatura e a umidade do ambiente.

Captação de Energia Cinética em Dispositivos Vestíveis: (1) **Coleta de energia do corpo humano:** Utilizando o calor gerado pelo corpo humano para alimentar dispositivos vestíveis como *smartwatches* e rastreadores de *fitness*. (2) **Coleta de energia da atividade física:** Aproveitando o calor gerado pela atividade física para alimentar dispositivos vestíveis similares.

Sistemas de Energia e Microgeração: (1) **Captação de energia de fontes renováveis:** Utilizando o calor gerado pelo sol, biomassa ou outras fontes renováveis para alimentar microgeradores que fornecem energia para um determinado dispositivo. (2) **Captação de energia de processos industriais:** Aproveitando o calor gerado nos processos industriais para alimentar principalmente microgeradores e/ou sensores autônomos.

Aplicações Espaciais e Aeroespaciais: (1) Alimentação de satélites e espaçonaves: Utilizando o calor gerado por fontes radioativas ou pelo sol, para alimentar satélites e espaçonaves que operam em ambientes com pouca ou nenhuma energia solar disponível. **(2) Alimentação de instrumentos científicos:** Aproveitando o calor gerado pelo ambiente ou por fontes artificiais para alimentar instrumentos científicos que operam em ambientes extremos.

É importante frisar que a escolha do TEG depende da fonte de calor disponível em sua aplicação, da quantidade de energia necessária e dos requisitos específicos do dispositivo. Embora a tecnologia termoelétrica ainda esteja em desenvolvimento, com pesquisas em andamento para melhorar a eficiência e reduzir o custo dos materiais, é claro que a tecnologia termoelétrica tem capacidade para ser usado em várias situações diferentes. Em particular, para aplicações espaciais e aeroespaciais, onde a robustez e a eficiência em ambientes extremos são cruciais.

Conversão de Energia por Piezoelectricidade

O piezoelétrico é uma solução que permite alimentar sensores autônomos e dispositivos autoalimentados, aproveitando a energia mecânica de fontes como vibrações, pressão e movimentos corporais para convertê-la em energia elétrica utilizável ou aproveitável. Entre os benefícios, destacam-se o baixo custo de manutenção ao eliminar a necessidade de substituição frequente de baterias, reduzindo os custos operacionais. Os elementos piezoelétricos são conhecidos pela robustez e durabilidade, sendo capazes de resistir a condições adversas e a aumentar a vida útil dos dispositivos. Destaca-se que a quantidade de energia gerada depende da amplitude e da frequência das vibrações ou da força aplicada, o que torna crucial otimizar o design para maximizar a eficiência energética. A versatilidade da tecnologia permite a captação de energia de várias fontes mecânicas, ampliando suas possibilidades de aplicação. Como por exemplo pode-se citar as seguintes aplicações:

Sensores de Vibração e Monitoramento Estrutural: Implementam-se sensores autônomos para monitorar vibrações e fadiga em estruturas como pontes, edifícios e equipamentos rotativos. A energia mecânica das vibrações é convertida em energia elétrica pelos elementos piezoelétricos, eliminando a necessidade de baterias.

Sensores de Pressão e Força: Utilizam-se para medir pressão, força e deformação em diversas aplicações, incluindo monitoramento de pneus e interfaces homem-máquina. A energia mecânica da pressão ou força aplicada é convertida em energia elétrica pelos elementos piezoelétricos, alimentando os sensores diretamente.

Coleta de Energia Cinética em Dispositivos Vestíveis: Implementam-se sensores piezoelétricos em dispositivos vestíveis para captar energia cinética do movimento humano, como passos, caminhadas e corridas. Essa energia é convertida e armazenada para alimentar ou transmitir para outros dispositivos.

Sensores Autônomos para Monitoramento Ambiental: são empregados no monitoramento de parâmetros ambientais, tais como a temperatura, vento e fluxo de água. As vibrações causadas por mudanças ambientais são convertidas em energia elétrica pelos elementos piezoelétricos, garantindo autonomia aos sensores.

Sistemas de Energia e Microgeração: Empregam dispositivos de EH para captar energia de vibrações em máquinas industriais e equipamentos rotativos. Essa energia é convertida em eletricidade que pode ser armazenada ou usada diretamente.

O piezoelétrico representa uma tecnologia promissora para o desenvolvimento de sensores autônomos e dispositivos *self-powered*, no avanço da tecnologia autônoma e sustentável, destacando a importância desse aspecto para investigações e avanços futuros no campo do sensoriamento inteligente.

Conversão de Energia por Acoplamento Eletromagnético

O acoplamento eletromagnético oferece diversas vantagens significativas, incluindo: **(i)** alta eficiência de conversão, isto significa, a capacidade de converter uma grande porcentagem da energia mecânica em energia elétrica, permitindo alimentar dispositivos com menor movimento ou vibração; **(ii)** versatilidade, conseqüentemente, aplicável a diversas fontes de movimento, como vibrações, rotações e movimentos lineares; **(iii)** robustez, ou em outros termos, os sistemas de acoplamento eletromagnético são robustos e resilientes a vibrações e choques, tornando-os ideais para ambientes hostis; e **(iv)** escalabilidade, ou seja, sendo facilmente escaláveis para atender às necessidades variadas de dispositivos e aplicações distintas. Por exemplo:

Sensores de Vibração e Monitoramento Estrutural: (1) Monitoramento de pontes e edifícios: Utilização da energia das vibrações estruturais para alimentar sensores que monitoram a integridade das estruturas, detectando rachaduras e outros problemas. **(2) Monitoramento de máquinas rotativas:** Captação de energia das vibrações em motores, turbinas e outras máquinas rotativas para alimentar sensores que monitoram o desempenho e detectam falhas.

Sensores de Pressão e Força: (1) Monitoramento da pressão em pneus: Aproveitamento da energia da pressão dos pneus para alimentar sensores que monitoram a pressão em tempo real, alertando pneus com baixa pressão. **(2) Medição de força em plataformas vibratórias:** Captação de energia da força aplicada em plataformas vibratórias para alimentar sensores que medem a força e oferecem *feedback* aos usuários.

Captação de Energia Cinética em Dispositivos Vestíveis: Uso da energia dos movimentos dos pés durante caminhadas e corridas para alimentar dispositivos vestíveis como *smartwatches* e rastreadores de *fitness*.

Sensores Ambientais e de Monitoramento: (1) Monitoramento da qualidade do ar: Utilização da energia das vibrações do ar para alimentar sensores que monitoram

a qualidade do ar e detectam poluentes. **(2) Monitoramento de temperatura e umidade:** Captação de energia das vibrações do ar para alimentar sensores que monitoram temperatura e umidade ambiental.

Sistemas de Energia e Microgeração: (1) Captação de energia das vibrações: em máquinas industriais para alimentar microgeradores e sensores autônomos. **(2) Aproveitamento da energia das ondas:** para alimentar microgeradores e sensores autônomos.

A escolha da aplicação mais adequada para o acoplamento eletromagnético depende da fonte de energia mecânica disponível, da quantidade necessária de energia e dos requisitos específicos do dispositivo ou sensor em questão. Esta tecnologia está em constante desenvolvimento, com novos materiais e designs sendo explorados para aprimorar eficiência e versatilidade no campo dos dispositivos *self-powered* e sensores autônomos.

Conversão de Energia por Radiofrequência (RF)

Aplicações de RF para *Energy Harvesting* tem como principal benefício o baixo custo de manutenção ao eliminar a necessidade de substituição frequente de baterias, reduzindo assim os custos operacionais. A RF permite escalabilidade e implementação eficiente de redes de sensores sem infraestrutura de energia complexa. A flexibilidade dessa tecnologia possibilita a instalação de sensores em locais remotos ou de difícil acesso, expandindo as capacidades de monitoramento e coleta de dados sem intervenção humana. Algumas das aplicações do RF em EH para alimentação de sensores autônomos e dispositivos *self-powered* pode ser visto a seguir:

Sensores Ambientais e de Monitoramento: Implementam-se sensores autônomos para monitorar temperatura, umidade, pressão, qualidade do ar e outros parâmetros ambientais em locais remotos ou de difícil acesso. A energia RF capturada de torres de celular, Wi-Fi ou outras transmissões de rádio, é alimenta os sensores, eliminando a necessidade de baterias e reduzindo a necessidade de manutenção.

Rastreamento de Ativos e Cadeia de Suprimentos: Utilizam-se etiquetas RFID ou sensores autônomos para rastrear o movimento de ativos, mercadorias ou animais em tempo real. A energia RF capturada do ambiente permite o rastreamento contínuo sem a necessidade de recarga manual.

Internet das Coisas (IoT) e Redes de Sensores Sem Fio: Criam-se redes de sensores IoT autônomos alimentados por RF para coletar dados de múltiplos pontos de interesse. A energia RF elimina a necessidade de fiação e baterias, facilitando a implantação e escalabilidade da rede.

Sensores Vestíveis e Monitoramento de Saúde: Implementam-se sensores vestíveis autônomos para monitorar sinais vitais, atividade física e outros parâmetros de saúde. A energia RF capturada do ambiente viabiliza o monitoramento contínuo e sem fio.

Sistemas de Energia e Microgeração: Utilizam-se dispositivos de RF para EH para capturar energia de fontes ambientais como transmissões de rádio, Wi-Fi ou energia solar, armazenando-a em acumuladores de energia e/ou alimentando dispositivos autônomos.

Por fim, o RF para *Energy Harvesting* apresenta um potencial significativo para transformar o desenvolvimento e a implementação de sensores autônomos e dispositivos *self-powered*, proporcionando novas oportunidades em áreas como agricultura, saúde, monitoramento ambiental, logística e indústria. Destaca-se que a combinação desta tecnologia com outras fontes energéticas, como baterias ou energia solar, pode aumentar a confiabilidade e a autonomia ampliando ainda mais suas aplicações.

Conversão de Energia por Energia Solar

A energia solar é uma fonte renovável e abundante, sendo um sistema de baixo custo de manutenção e alta escalabilidade para diferentes aplicações. As pesquisas nesta temática têm explorado o aproveitamento da energia solar, em diversas aplicações, incentivando o desenvolvimento de novas tecnologias nesse campo. Inúmeros exemplos são descritos a seguir:

Sensores de Iluminação: Utilizam energia da luz solar interna para alimentar sensores que regulam automaticamente a iluminação artificial, otimizando o consumo energético em ambientes como escritórios e residências (*Indoor Lighting Systems*).

Sensores de Qualidade do Ar: Alimentados pela luz solar interna, monitoram níveis de poluentes e CO₂, garantindo ambientes mais saudáveis em locais públicos (*Indoor Lighting Systems*).

Sensores de Temperatura e Umidade: Utilizam energia solar interna para monitorar condições climáticas, ajustando sistemas de HVAC e garantindo conforto térmico (*Indoor Lighting Systems*).

Dispositivos Vestíveis: Integrados com painéis solares, permitem o funcionamento contínuo de dispositivos como *smartwatches* e rastreadores de *fitness* através da energia solar captada por janelas ou claraboias (*Indoor Lighting Systems*).

Domótica: Dispositivos alimentados por painéis solares integrados, que controlam dispositivos domésticos como luzes e termostatos, interruptores, etc. (*Indoor Lighting Systems*).

Sensores Ambientais: Utilizam energia solar direta para monitorar parâmetros climáticos como temperatura e umidade, essenciais para aplicações meteorológicas e sistemas de irrigação (*Outdoor System*).

Sensores de Segurança: Equipados com células solares, monitoram movimentos em áreas externas, aumentando a segurança e a eficiência energética (*Outdoor System*).

Sensores de Monitoramento de Infraestrutura: Alimentados por energia solar direta, monitoram a integridade de estruturas como pontes e edifícios, garantindo segurança e manutenção adequadas (*Outdoor System*).

Dispositivos de Comunicação e Rede: Roteadores Wi-Fi e repetidores de celular solares fornecem conectividade em áreas remotas, operando de forma independente da rede elétrica tradicional (*Outdoor System*).

Sistemas de Iluminação Pública: Postes de luz solares captam energia durante o dia para iluminar ruas e espaços públicos à noite, reduzindo custos operacionais e impacto ambiental (*Outdoor System*).

Por fim, a Energia Solar tem um grande potencial para sua aplicação para EH e encontra-se em evolução com novos materiais e novas tecnologias que visam melhorar a eficiência e durabilidade dos painéis solares. Destaca-se que a escolha entre dispositivo de captação de energia solar (*indoor* ou *outdoor*) dependerá da disponibilidade de luz solar, da demanda energética, do local de instalação e dos requisitos do dispositivo a ser alimentado.

CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS

Nesta seção, são apresentadas as considerações finais sobre os métodos de *Energy Harvesting* discutidos ao longo deste capítulo, assim como as perspectivas futuras para o desenvolvimento de sistemas *self-powered*.

Os métodos de captação de energia discutidos (termoeletricidade, piezoeletricidade, acoplamento magnético, radiofrequência e energia solar) têm demonstrado potencial significativo para aplicações em *self-powered*. Cada um desses métodos apresenta vantagens e desvantagens, desde a alta relação W/kg e baixa eficiência dos TEG, até a fragilidade e versatilidade das células fotovoltaicas para aplicação em ambientes (*indoor* ou *outdoor*).

Destaca-se que a *Energy Harvesting* está em constante evolução, proporcionando oportunidades contínuas de pesquisa e desenvolvimento. O crescente interesse em sistemas *self-powered* tem impulsionado melhorias na eficiência dos dispositivos e do potencial de captação de energia ampliado significativamente o campo de utilização dos dispositivos baseados em EH. A Figura 10 ilustra diversas aplicações com base no consumo de energia, destacando a versatilidade do método de EH para distintos cenários de acordo com o uso (FOELKEL, 2019).

As perspectivas futuras para essas tecnologias incluem desafios e oportunidades significativos. Entre os desafios estão a melhoria da eficiência energética, a redução de custos, a adaptação a diferentes condições de uso, o desenvolvimento de novos materiais, e integração com outras fontes de energia renovável.

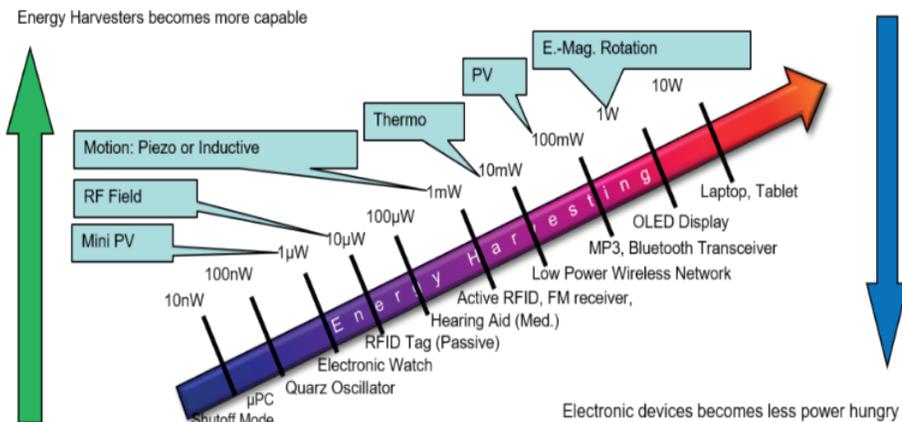


Figura 10 – *Energy Harvesting*: Método de captação versus Potência requerida.

Fonte: (FOELKEL, 2019).

Por fim, a produção e o aproveitamento de energia a partir de fontes de energia renovável ou reaproveitamento de energia são cruciais para o desenvolvimento sustentável. Todas as técnicas de EH têm potencial para contribuir na promoção da sustentabilidade energética. No entanto, é importante destacar que alguns métodos podem ainda se encontram em fase de desenvolvimento tecnológico com alto custo para aplicações em larga escala. A redução de custos por meio de pesquisas é essencial para viabilizar a disseminação dessas tecnologias no mercado.

AGRADECIMENTOS & FOMENTO

Esta pesquisa foi parcialmente apoiada pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) de N°407531/2018-1, 303293/2020-9, 405385/2022-6, 405350/2022-8 e 40666/2022-3. Os autores gostariam de agradecer a FACEPE (Fundação de Amparo à Pesquisa de Pernambuco) ao longo do projeto com referências APQ-0616-9.25/21 e APQ-0642-9.25/22. O.H.A.J. agradece ao apoio do Programa em Engenharia de Sistemas Energéticos (PPGESE) Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho (UACSA) da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE). M.R.C. foi financiado pela UNICAMP (Universidade Estadual de Campinas) por meio do Auxílio Início de Carreira (Docente), FAEPEX, processo número 2095/23, e Programa de Incentivo a Novos Docentes (PIND), FAEPEX, processo número 2419/23, assim como FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo), processo número 2021/11380-5.

REFERÊNCIAS

- ABDELNOUR, A.; HALLET, A.; DKHIL, S.B.; PIERRON, P.; KADDOUR, D.; TEDJINI, S. Energy harvesting based on printed organic photovoltaic cells for RFID applications. In: Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA), Pisa, Italy, 25–27 September 2019. Pisa: IEEE, 2019. p. 110-112. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/Rfid-Ta.2019.8892206>. Acesso em: 25 jun. 2024.
- ANDO JUNIOR, O. H. et al. Proposal of a Thermoelectric Microgenerator based on Seebeck Effect to Energy Harvesting in Industrial Processes. *Renewable Energy & Power Quality Journal (RE&PQJ)*, v. 1, p. 227-333, 2014.
- ARMENDANI, Willian Alves; et al. Conhecendo a Piezoeletricidade, uma nova forma de geração de energia elétrica. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*. Ano 1. Vol. 9. pp 314-320, outubro / novembro de 2016. ISSN: 2448-0959.
- BITO, J.; HESTER, J.G.; TENTZERIS, M.M. A fully autonomous ultra-low power hybrid RF/Photovoltaic energy harvesting system with –25 dbm sensitivity. In: Proceedings of the 2017 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC), Taipei, Taiwan, 10–12 May 2017. Taipei: IEEE, 2017. p. 1-4. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/Wpt.2017.7953858>. Acesso em: 25 jun. 2024.
- CAMACHO-MEDINA, P.; OLIVARES-ROBLES, M. A.; VARGAS-ALMEIDA, A.; SOLORIO-ORDAZ, F. Maximum Power of Thermally and Electrically Coupled Thermoelectric Generators. *Entropy*, vol. 16, n. 5, pp. 2890-2903, 2014.
- COMISIÓN ECONÓMICA PARA AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE. Índice ODS 2021 para América Latina y el Caribe.pdf. Bogotá, Colombia, ago. 2022.
- DINULOVIC, Dragan; BROOKS, Michael; HAUG, Martin; PETROVIC, Tomislav. Rotational Electromagnetic Energy Harvesting System. *Physics Procedia*, vol. 75, pp. 1244-1251, 2015.
- ELVIN, Niell; ERTURK, Alper. Advances in Energy Harvesting Methods. In: *Advances in Energy Harvesting Methods*. Capítulo: p. 241-369. 2012.
- FARMER, Justin R. A comparison of power harvesting techniques and related energy storage issues. 2007. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Virginia Polytechnic Institute and State Univ., Blacksburg.
- FOELKEL, L. Energy harvesting is not fiction anymore. In: PROCEEDINGS OF THE 2ND PCNS, Bucharest, Romania, 10–13 Sept. 2019.
- GAO, Min; ROWE, D. M. Conversion Efficiency of Thermoelectric Combustion Systems. *IEEE Transactions on Energy*, v. 22, n. 2, p. 528-534, jun. 2007.
- HARB, Adnan. Energy Harvesting: State-of-the-art. *Renewable Energy*, vol. 36, pp. 2641-2654, 2011.
- IEA; IRENA; UNSD; World Bank; WHO. Tracking SDG7: The Energy Progress Report 2022. Washington DC, 2022.
- IZIDORO, C. L.; ANDO JUNIOR, O. H.; CARMO, J. P.; SCHAEFFER, L. Characterization of thermoelectric generator for energy harvesting. Measurement, Available online 8 January 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2016.01.010>. Acesso em: 25 jun. 2024.
- KARABETOGLU, S.; SISMAN, A. Characterization of a thermoelectric generator at low temperatures. *Energy Conversion and Management: Elsevier Science*, vol. 62, pp. 47-50, abril 2012.

KIM, Bunthern; BUN, Long et al. Modeling and tuning of MPPT Controllers for a Thermoelectric Generator. In: 2014 First International Conference on Green Energy, p. 220-226, 2014.

LIU, Huicong; QUAN, Changenn; TAY, Cho Jui; KOBAYASHI, Takeshi; LEE, Chngkuo. A MEMS-based piezoelectric cantilever pattern with PZT thin film array for harvesting energy from low frequency vibrations. *Physics Procedia*, vol. 19, pp. 129-133, 2011.

OMER, S. A.; INFIELD, D. G. Design optimization of thermoelectric devices for solar power generation. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, UK, v. 53, p. 67-82, 1998.

OSTESEVICIUS, Vytautas et al. Cutting tool vibration energy harvesting for wireless applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 233, pp. 310-318, 2015.

PEERAPONG, Prachuab; LIMMEECHOKCHAI, Bundit. Optimal Photovoltaic Resources Harvesting in Grid-connected Residential Rooftop and in Commercial Buildings: Cases of Thailand. *Energy Procedia*, vol. 79, novembro 2015, pp. 39-46.

PRIYA, Shashank; INMAN, Daniel J. Energy Harvesting Technologies. In: *Energy Harvesting Technologies*. Capítulo: p. 3-128, 325-350, 459-488. 2009.

RAHIMI, A.; ZORLU, Ö.; MUHATAROGLU, A.; KÜLAH, H. A compact Electromagnetic Vibration Harvesting System with High Performance Interface Electronics. *Procedia Engineering*, vol. 25, pp. 215-218, 2011.

RIFFAT, S. B.; MA, X. Thermoelectrics: a review of present and potential applications. *Applied Thermal Engineering*, UK, v. 23, p. 913-935, 2003.

RUCKS, S.; LEITE, L.; FERREIRA, I.; SALVE, S.; MUNIZ, E. Relatório Anual 2022 ONU Brasil. Nações Unidas, Brasília, DF, mar. 2023.

ROWE, D. M. CRC handbook of thermoelectrics. CRC Press LLC, Estados Unidos da América, 1995.

SACHS, J.; KROLL, C.; LAFORTUNE, G.; FULLER, G.; WOELM, F. Sustainable Development Report 2022. 1. ed. Cambridge University Press, 2022. doi: 10.1017/9781009210058.

SUTIKNO, T.; APRILIANO, R.A.; PURNAMA, E.H.S. Application of non-isolated bidirectional DC–DC converters for renewable and sustainable energy systems: A Review. *Clean Energy*, v. 7, p. 293-311, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/Ce/Zkac070>. Acesso em: 25 jun. 2024.

TAN, W.-H.; MOHAMAD-SALEH, J. Critical Review on Interrelationship of Electro-Devices in PV Solar Systems with Their Evolution and Future Prospects for MPPT Applications. *Energies* 2023, 16, 850. <https://doi.org/10.3390/en16020850>. Acesso em: 25 jun. 2024.

VIJAYAN, K.; FRISWELL, M. I.; KHODAPRAST, H. Haddad; ADHIKARI, S. Non-linear energy harvesting from coupled impacting beams. *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 96-97, pp. 101-109, 2015.

WORLD POPULATION REVIEW. Gini Coefficient by Country 2022. Disponível em: <https://worldpopulationreview.com/>. Acesso em: 17 jun. 2024.

ZHANG, H.; MA, T. Roles of the Excitation in Harvesting Energy from Vibrations. *PLoS One*, USA, v. 10, p. 1-10, out. 2015.