



Associação Propagadora Esdeva  
Centro de Ensino Superior de Juiz de Fora – CES/JF  
Curso de Engenharia Elétrica  
Trabalho de iniciação científica – Artigo

---

## TÍTULO: **Conversão de energia através de Energy Harvesting.**

*FERREIRA, Bruno Vieira<sup>1</sup>*

*PEDRO, Evandro José Pereira<sup>1</sup>*

*ALVES, Pedro Henrique Neves<sup>1</sup>*

*SOUZA, Tamiris Alves de<sup>1</sup>*

*VARGAS, Willerson Reis<sup>1</sup>*

*Centro Universitário Academia – UniAcademia*

*COSTA, Luís Guilherme da Silva<sup>2</sup>*

*Centro Universitário Academia – UniAcademia*

Linha de Pesquisa: Eficiência Energética

### RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise sobre Energy Harvesting (EH) e mostra como converter fontes externas de energias presentes no meio ambiente em energia elétrica, a partir de fontes solar, vento, vibrações, campos elétricos e magnéticos e através de ondas eletromagnéticas disponíveis no ambiente, tornando-se uma fonte gratuita, sustentável e pouco poluente. Deste modo, o presente estudo faz uma abordagem a tipos específicos de EH, com o intuito da análise do potencial de geração de energia elétrica que pode ser obtida a partir de cada fonte ou através de duas destas fontes simultaneamente. Deve-se, contudo, ponderar as vantagens/desvantagens dessa possibilidade de hibridização a fim de utilizar estrategicamente os recursos, como por exemplo, eólico e solar como fontes de energia híbridas aumentando a capacidade de geração de energia elétrica.

**Palavras-chave:** Colheita de energia. Energia sustentável. Energia renovável. Energia Híbrida.

## 1 – INTRODUÇÃO.

Colheita de energia (ou captura de energia), do inglês Energy Harvesting, é o processo pelo qual a energia é derivada de fontes externas, como por exemplo, energia solar, térmica, eólica, eletromagnética e cinética (vibrações) e convertidas em eletricidade. EH data dos moinhos de vento e rodas d'água como meio de converter energia através da água. Uma das motivações para a busca de novos métodos de EH é o desejo de abastecer redes de sensores, IoT (Internet of Things), Smart Grid e dispositivos eletrônicos sem o uso de baterias. EH também é motivada pelo desejo de lidar com a mudança climática e o aquecimento global (PRIYA, 2009).

Combater a mudança climática requer muito investimento e será necessário muito investimento na renovação de energias. Serão necessários enormes investimentos para substituir os combustíveis fósseis e proteger as pessoas contra os impactos climáticos, como o aumento das inundações. Os países desenvolvidos se comprometeram a arrecadar US\$ 100 bilhões por ano para ajudar os países em desenvolvimento a enfrentar os desafios climáticos, e na COP 26 pode ser a primeira vez que os países honrarão essa promessa. O financiamento climático necessário para ajudar os países em desenvolvimento virá em parte do financiamento climático internacional, em parte de seus próprios recursos e em parte de investimentos do setor privado (OXFORD, 2021). Neste contexto, a geração de energia por EH ganha substancial importância na substituição dos atuais métodos para obtenção de energias poluentes como o carvão e combustíveis fósseis.

Nos últimos anos com o avanço das pesquisas em EH, a ideia de utilizar energia ambiente tornou-se economicamente mais atraente, e muitos métodos para produzir eletricidade a partir destes diferentes tipos de fontes de energia foram desenvolvidos. A implementação dessas novas tecnologias estimulou notavelmente uma mudança na abordagem de design de sistemas eletrônicos na tentativa de otimizar a utilização da energia ambiente disponível para alcançar a autossuficiência energética em cada dispositivo. Esse desafio se tornará indiscutivelmente mais fácil de resolver com o tempo e o consumo de energia dos circuitos eletrônicos e conexões sem fio tem diminuído constantemente. Isso levou a uma expansão vertiginosa da tecnologia de coleta de energia em todos os campos de aplicação como automação residencial, medicina, área militar, transporte, etc. Em 2024, o mercado global de dispositivos movidos a energia ambiente deve totalizar 2,6 bilhões de unidades (CHETTO, 2016).

Neste artigo abordaremos um estudo apresentando as técnicas mais utilizadas para obtenção de EH, que engloba aplicações como energia solar, eólica, cinética, campos elétricos e magnéticos e a combinação de ambos os campos. Baseado nestas tecnologias, o trabalho visa analisar o uso destas técnicas de EH e mostrar como são obtidas na natureza com o mínimo de impacto ambiental e aplicações em energias híbridas onde poderemos aplicar duas ou mais das técnicas propostas para obtenção de energia pela abordagem híbrida aumentando a oferta de energia.

Neste contexto, a seção 2 apresenta as técnicas existentes para captação de energia solar, cinética e eletromagnética através de campos elétricos, magnéticos e a combinação de ambos por ondas eletromagnéticas. A seção 3 detalha a obtenção de energia através de sistemas híbridos. Por fim, a conclusão é apresentada na seção 5.

## **2 - TÉCNICAS EXISTENTES DE ENERGY HARVESTING.**

Nesta seção será abordado as técnicas de captação de energia solar.

### **2.1) Energia da luz - natural (solar).**

A energia solar é uma energia alternativa, renovável e sustentável, que opera utilizando a luz solar como fonte de energia e pode ser aproveitada, e utilizada por diferentes tecnologias, como: aquecimento solar, energia solar fotovoltaica e energia heliotérmica. Quanto maior a incidência da radiação solar nas placas solares, maior será a energia elétrica produzida.

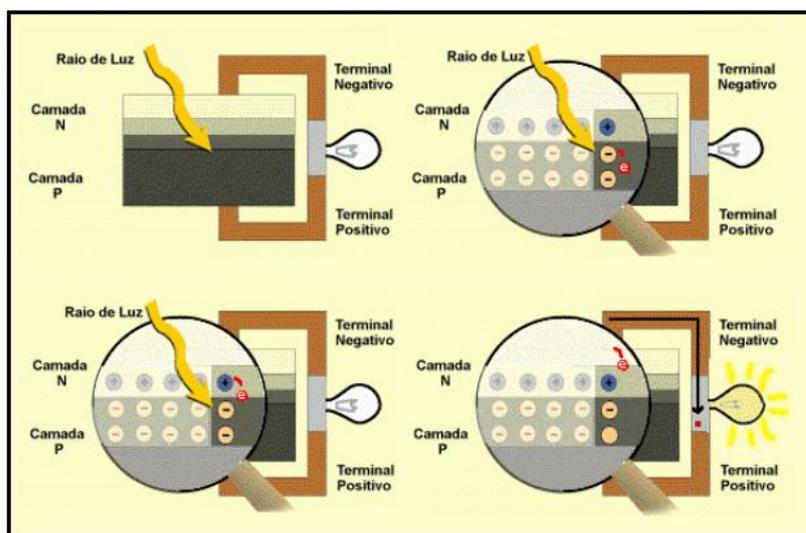
#### **2.1.1) Efeito Fotoelétrico.**

A conversão da luz solar em energia elétrica é dada pelo efeito fotovoltaico, que ocorre quando pequenas partículas solares colidem com os átomos em repouso no painel solar, que, por conseguinte movimentam os elétrons, criando assim a corrente elétrica. As células do painel solar têm a sua origem em semicondutores como o silício, telureto de cádmio, disseleneto de cobre e índio. A essência de uma célula consiste na junção de duas camadas semicondutoras, em que uma delas é dopada com elétrons e outra com lacunas, criando assim um campo elétrico entre as camadas cujo funcionamento é muito semelhante ao diodo de junção p-n.

#### **2.1.2) Fatores para Implementação.**

Anualmente a atmosfera terrestre recebe aproximadamente  $1,5 \times 10^{18}$  kWh de energia, cujo valor equivale a dez mil vezes o consumo mundial de energia em 1 ano (CRESEB, 2021). No entanto, para utilizarmos esta energia é necessário a conversão de corrente elétrica contínua, gerada pelo painel solar, em corrente elétrica alternada, através de um inversor solar.

Figura 1: Representação do efeito fotovoltaico.



Fonte: [http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com\\_content&lang=pt&cid=321](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=321)

Os aprisionamentos destas cargas dão origem a um campo elétrico permanente que limita a passagem de elétrons entre as camadas n e p. Este processo se equilibra quando o campo elétrico forma uma barreira capaz de barrar os elétrons livres que permaneceram no lado n, conforme ilustrado na Figura 1.

A Figura 2 mostra as regiões brasileiras que têm vantagem na produção de energia solar e mesmo as regiões com menor incidência de radiação solar têm potenciais maiores que a Europa para geração de energia fotovoltaica. As regiões com maior incidência solar são, Centro-Oeste, Nordeste e Sudeste, no entanto as regiões sudeste e nordeste são as que mais se destacam uma vez que conseguem produzir mais de 1500 kWh. Segundo dados divulgados em 2019 pela ANEEL e Absolar (Associação Brasileira de Energia Fotovoltaica), o estado de Minas Gerais ultrapassou a marca de 1 gigawatt (GW) de potência instalada de geração distribuída (GD), de energia solar fotovoltaica (ESTADO DE MINAS, 2021), devido ao investimento do governo no estado em iniciativas de geração de energia através de fontes de energia alternativas e renováveis. No entanto, o Nordeste tem como característica a abundante quantidade de luz solar que atinge os 9 estados da região, e obteve um recorde de 675 Megawatts (MW), segundo dados do ONS (Operador Nacional do Sistema). A radiação solar brasileira, dividida entre as regiões é dada da seguinte maneira, na respectiva ordem: Nordeste com 5,9 kWh/m<sup>2</sup>, Centro Oeste com 5,7 kWh/m<sup>2</sup>, Sudeste com 5,6 kWh/m<sup>2</sup>, Norte com 5,5 kWh/m<sup>2</sup> e Sul com 5 kWh/m<sup>2</sup>, deste modo, a média brasileira de geração de energia gira em

torno de 5,54 kWh/m<sup>2</sup>, dando ao Brasil a 14<sup>a</sup> posição no ranking de países com maiores capacidades instaladas de energia solar (ENERGYEASY, 2021).

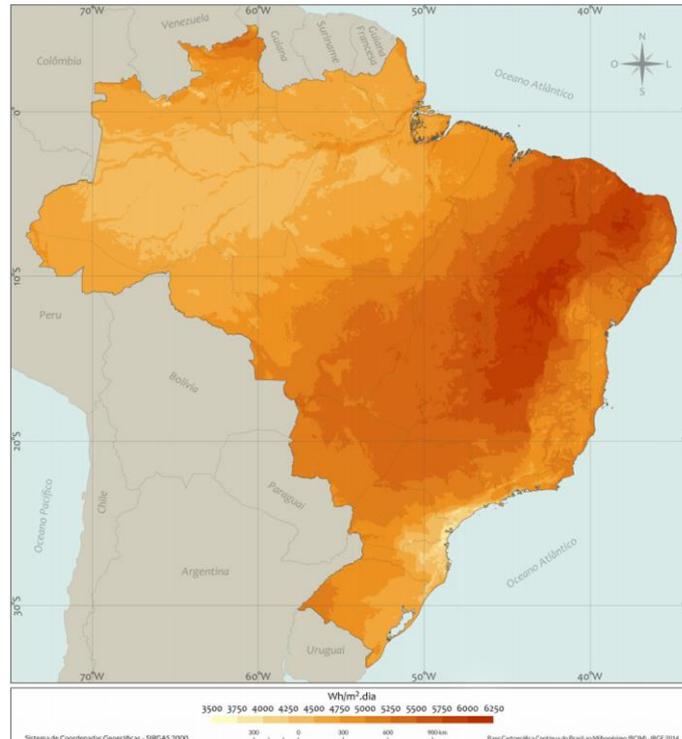
No planejamento e desenvolvimento de painéis solares, outros fatores além da radiação solar devem ser observados como, por exemplo, angulação e declinação solar, trajetória elíptica da terra, irradiação solar direta, irradiação solar difusa. A terra se movimenta com uma inclinação axial de 23°26'21", em relação ao plano equatorial, esta inclinação é a responsável pela variação da elevação do sol no horizonte, na mesma hora, ao longo dos dias. Deste modo, analisando a Figura 3, é notório que as estações do ano influenciam na captação de energia, uma vez que se tem uma constante irradiação solar durante toda a estação, como no caso do verão e da primavera. No entanto, a produção também se dá durante o outono e inverno, porém com uma menor eficiência.

### **2.1.3) Instalação de sistemas fotovoltaicos.**

Atualmente a produção de energia elétrica pelo método convencional é centralizada e longe dos pontos de consumo, resultando em perda de energia ao longo do sistema de distribuição, além de causar danos ao meio ambiente. Para instalação dos sistemas fotovoltaicos, pode-se escolher entre 2 kits para instalação de energia solar, denominados on grid e off grid. O kit solar fotovoltaico on grid é um sistema integrado à rede, capaz de transformar a energia captada através da luz do sol em energia elétrica, sendo composto pelos seguintes equipamentos: painéis solares, inversor solar, cabeamento e controlador de carga. Os kits de energia solar on grid geram energia durante o dia a partir do sol e quando não há presença do sol, recebe a energia gerada da concessionária de energia, ou seja, os sistemas on grid não utilizam armazenamento de energia. A energia elétrica fornecida pelas placas solares passa por um inversor grid-tie que realiza a conversão de corrente contínua (CC) em corrente alternada (AC) sincronizando-a com a frequência da rede de energia elétrica em 60 Hz a partir de um oscilador interno deste inversor que também tem como função limitar a tensão de saída, não permitindo que esta seja maior que a tensão da rede de energia elétrica (VIANA, 2008).

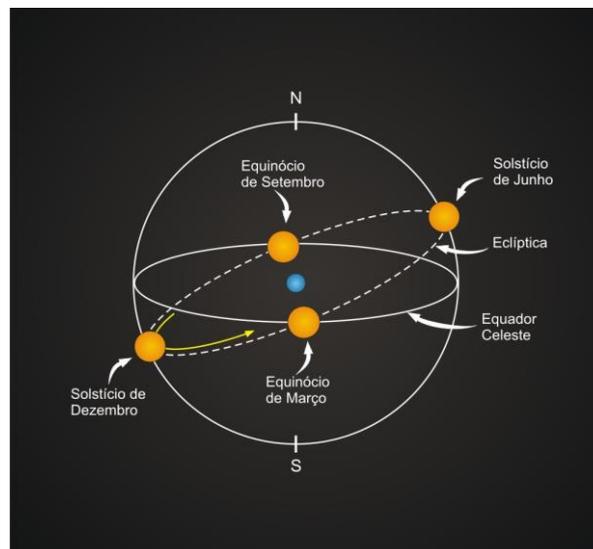
Assim, o medidor de energia elétrica antigo vai ser substituído por um medidor de energia elétrica bidirecional, que mede a entrada e a saída de energia. Desta forma ele será capaz de medir a energia que você consome da rede de energia elétrica e medir também a energia gerada em excesso pelo seu sistema fotovoltaico que é injetada na rede de energia elétrica gerando créditos de energia. A Figura 4 ilustra um sistema on grid instalado em uma residência (TIBA, 2000).

Figura 2: Mapa de radiação solar no Brasil.



Fonte: *Atlas Solar, 2017*

Figura 3: Posição angular do sol em relação ao plano equatorial.

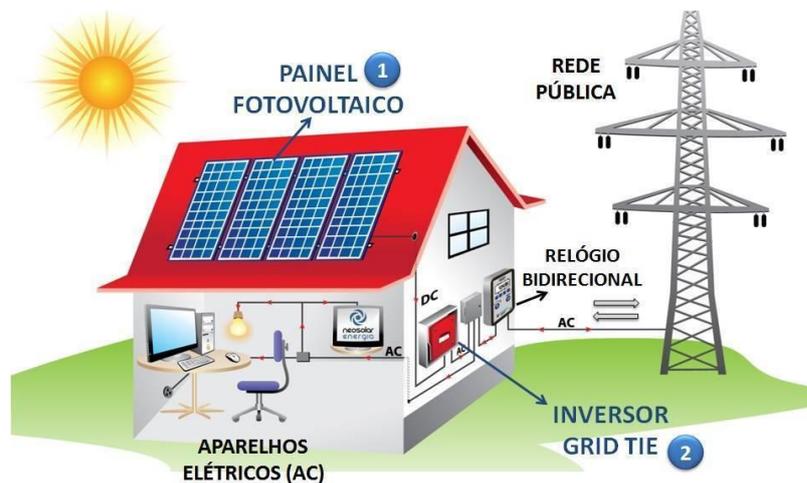


Fonte: UFRGS, Movimento anual do Sol e Estações do ano.

O kit de energia solar fotovoltaica off grid, sistema isolado, gera energia sem que o sistema seja conectado à rede elétrica da concessionária, garantindo o armazenamento de energia solar por meio de baterias solares, para momentos em que não há produção de energia pelos painéis fotovoltaicos (SIGNORINI, 2014). Um sistema off-grid é utilizado,

principalmente, para entregar eletricidade em locais que não há rede elétrica, ou para manter o funcionamento de algum equipamento fora da rede de energia elétrica. O princípio de instalação é semelhante ao sistema on grid, porém, em momentos onde a energia solar instantânea não é suficiente para a demanda, as baterias solares entram funcionando como forma de suprir, exatamente como faz a rede da concessionária no sistema on-grid. Os painéis solares são interligados a um controlador de carga, que é responsável pela proteção das baterias contra descargas profundas e excesso de carga. Essa energia armazenada pelas baterias passa pelo inversor de frequência que a converte de corrente contínua para corrente alternada, deixando-a pronta para ser consumida. A Figura 5 mostra um sistema off-grid de geração de energia elétrica.

Figura 4: Sistema on-grid.



Fonte: Neosolar

Fig. 5 - Sistema off-grid.



Fonte: Neosolar

#### 2.1.4) Potencial de Geração de Energia Fotovoltaica.

Para simular e quantificar a irradiação incidente sobre o plano dos painéis fotovoltaicos utilizou-se o programa Radiasol, desenvolvido pelo Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (DIEDRICH, 2013). Este programa leva em consideração alguns fatores importantes como a localização geográfica, a latitude e longitude, e por fim, a inclinação dos módulos em relação ao norte geográfico.

Segundo (TAKENAKA, 2010, p.58), após serem simulados sete ângulos de inclinação para o desvio azimutal ( $\alpha$ ) de zero e  $-12^\circ$ , com o propósito de verificar a influência do ganho por irradiação solar, verificou-se os valores que melhor atendiam a esta integração com a arquitetura existente e que oferecessem a menor perda de potencial de geração fotovoltaica possível. Os resultados dessas simulações podem ser analisados na Tabela 1.

Os valores obtidos de potência a ser instalada no sistema fotovoltaico ( $P_{cc}$ ) foi obtido pela equação,

$$P_{cc} = \frac{E}{\frac{G_{poa}}{R}} \quad (1),$$

onde,  $P_{cc}$  é potência média necessária em corrente contínua (kWpcc),  $G_{poa}$  é o ganho por irradiação solar: médio mensal do total diário ( $\text{kWh}/\text{m}^2/\text{dia}$ ),  $E$  é consumo médio diário durante o ano ( $\text{kWh}/\text{dia}$ ) e  $R$  é rendimento ou eficiência do sistema inversor e conexões, com valores aproximadamente entre 0,7 e 0,9, sendo adotado o valor 0,8 neste estudo.

Tabela 1. - Ângulo de inclinação ( $\beta$ ) X média anual do total diário de irradiação solar.

Ângulo $\beta$ (graus)	0°	10°	15°	20°	25°	33°	90°
Irradiação ( $\text{kWh}/\text{m}^2/\text{dia}$ ) para $\alpha = -12^\circ$	5,352	5,360	5,417	5,632	5,448	5,394	3,300
Irradiação ( $\text{kWh}/\text{m}^2/\text{dia}$ ) para $\alpha = 0^\circ$	5,352	5,364	5,424	5,655	5,458	5,406	3,298

Fonte: DIEDRICH, 2013.

Para estimar o valor da geração fotovoltaico de energia elétrica dos sistemas que foram selecionados utilizou-se a equação,

$$E = \frac{A \cdot E_{ff} \cdot G_{poa} \cdot R}{100} \quad (2),$$

onde  $A$  é a área total do sistema fotovoltaico ( $\text{m}^2$ ),  $E_{ff}$  é a eficiência de conversão da tecnologia fotovoltaica utilizada (potência instalada/área do módulo e  $G_{poa}$ , em %). Utilizando aproximadamente 8 painéis fotovoltaicos, o recomendado para uma residência de médio porte

na região sudeste, o que totaliza uma área de aproximadamente 13,2 m<sup>2</sup>, juntamente a dados levantados através da simulação utilizando o software Radasol, na cidade de Juiz de Fora, que conta com uma irradiação média global de 4,15 kWh/m<sup>2</sup>/dia, obtém-se os seguintes resultados.

$$E = \frac{13,2 \cdot 27 \cdot 4,15 \cdot 0,8}{100} = 11,8 \text{ kWh/dia.} \quad (3)$$

Obtivemos um valor de aproximadamente 11,8 kWh/dia, com geração mensal de aproximadamente 354 kWh/mês.

## 2.2) Energia cinética - movimento e vento.

Nesta seção será abordado a captação de energia através de piezoelectricidade e energia Eólica.

### 2.2.1) Piezoelectricidade

O princípio da piezoelectricidade foi descoberto em 1880 pelos irmãos Pierre e Jacques Curie, no qual perceberam que alguns cristais ao serem submetidos a um dipolo elétrico se deformam dando origem a um diferencial de potencial na saída do circuito. A piezoelectricidade é uma propriedade de alguns materiais que, através de uma tensão mecânica, se tornam eletricamente polarizados gerando uma diferença de potencial (ddp) quando sofrem uma deformação mecânica.

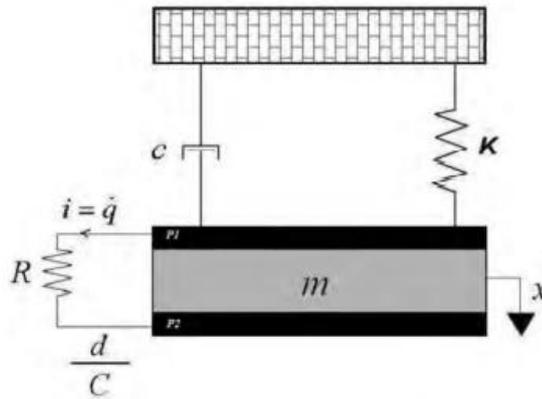
Um dos modelos propostos como dispositivo de captura de energia piezoelétrica é uma estrutura muito utilizada para a conversão de energia mecânica em elétrica denominada viga em balanço. A viga é revestida por algum material piezoelétrico em uma das faces ou nas duas faces da viga, e seu funcionamento consiste em uma haste de metal que é flexionada devido a vibração do ambiente e com isso comprime o material piezoelétrico, gerando energia. Um dos motivos pelos quais a viga é mais escolhida para este tipo de captação de energia é que a potência de saída é maior quando nos aproximamos da frequência de ressonância da viga (COTTONE, 2007).

Para projetar a estrutura mencionada anteriormente precisamos analisar o modelo matemático proposto por (TRIPLET and QUINN, 2009), baseado nas equações de Lagrange para se obter as equações do movimento através de um modelo simplificado que possa descrever a vibração do sistema piezoelétrico que consiste em um modelo massa, mola, amortecedor, acrescido de um acoplamento eletromecânico conforme mostrado na Figura 6.

De acordo com o modelo de (TRIPLET and QUINN, 2009), a variável  $m$  é a massa do sistema,  $x$  o deslocamento vertical do sistema,  $c$  é o coeficiente de amortecimento linear e  $K = -k_1x - k_2x^3$  é o coeficiente linear da mola, onde  $-k_1$  é o coeficiente linear da mola e  $-k_2$  é o

coeficiente não linear cúbico da mola.  $P_1$  e  $P_2$  representam as camadas de material piezoelétrico,  $i$  é a amplitude de excitação e  $j$  é o deslocamento angular na viga.

Figura 6: Sistema de Captura de Energia por vibração.



Fonte: (ROCHA, T M., 2012).

De acordo com (TRIPLÉT and QUINN, 2009),  $\frac{d(x)}{C}q$  representa o acoplamento piezoelétrico para o componente mecânico e  $q$  é a carga elétrica,  $d(x)$  representa o coeficiente de acoplamento, com isso a tensão  $V$  através do material piezoelétrico é representado como :

$$V = -\frac{d(x)}{C}x + \frac{q}{C}, \quad (4)$$

onde  $C$  é a capacitância piezoelétrica. Podemos deduzir então que  $V = -Rq$ , onde  $R$  é a resistência elétrica e  $i = \dot{q}$  é a corrente elétrica.

Para obtermos as equações de movimento utilizamos as equações diferenciais para representarmos o sistema dinâmico sem perda das características dinâmicas do sistema estudado, considerando as energias do sistema. Aplicando as equações de Lagrange calculamos a energia cinética,

$$K = M\dot{x}^2 + Y\cos\phi. \quad (5)$$

A energia potencial:

$$T = \frac{1}{2}k_1x^2 + \frac{1}{4}k_2x^4 \quad (6)$$

A equação de Lagrange para esse sistema é:

$$L(x, \dot{x}) = \frac{1}{2}M\dot{x}^2 - \frac{1}{2}k_1x^2 - \frac{1}{4}k_2x^4 \quad (7).$$

Sendo a relação de força a partir da equação de Euler-Lagrange:

$$N_i = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) + \frac{\partial L}{\partial q_i} \quad (i=1,2) \quad (8).$$

Assim, para força causada no material:

$$N_1 = M\ddot{X} + k_1X = K_2 + \gamma \text{sen}\varphi \quad (9).$$

Outra contribuição no material é a contribuição piezoelétrica:

$$N_1 = c\dot{X} + \frac{D(X)}{C}q \quad (10).$$

Há também as relações das tensões que têm contribuição piezoelétrica e do resistor, que são respectivamente:

$$V_1 = -\frac{d(X)}{C}X + \frac{q}{C} \quad (11),$$

$$V_2 = -R\dot{q} \quad (12).$$

Comparando as relações,  $N_1=N_2$  e  $V_1=V_2$ , tem-se então as relações movimento do sistema, que são:

$$M\ddot{X} + c\dot{X} + k_1x + k_2X^3 + \gamma \text{sen}\varphi = \frac{d(X)}{C}q \quad (13),$$

$$R\dot{q} - \frac{d(X)}{C}X + \frac{q}{C} = 0 \quad (14).$$

Com o desenvolvimento das equações (4) a (14) tem-se a relação de movimento do sistema e com isso reproduzir os modelos de (TRIPLET and QUINN, 2009).

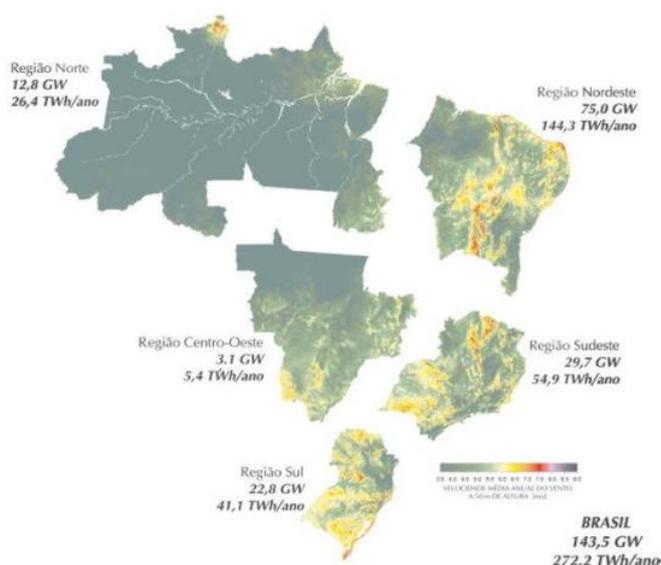
### 2.2.2) Energia Eólica.

A energia eólica vem sendo utilizada pela humanidade há milhares de anos, desde os moinhos de vento, utilizados para moagem de grão e bombeamento de água, passando pelas grandes navegações como força propulsora de navios, até chegar nos dias atuais onde vem sendo utilizada na geração de energia elétrica, sendo uma alternativa para obtenção de uma energia limpa e renovável (MARTINS, 2008). A Figura 7 mostra o potencial eólico-elétrico estimado das regiões brasileiras. O gráfico mostra que a velocidade média anual do vento será maior se a região se aproximar da cor violeta. As regiões Nordeste e Sul possuem os maiores

potenciais, totalizando quase 70% do potencial estimado do Brasil, que é de aproximadamente 143 GW.

Segundo (PICOLO et al, 2014), os geradores eólicos podem ser posicionados tanto no mar (Offshore) quanto no continente (Onshore), conforme mostrado na Figura 8, para isso é preciso a utilização de aerogeradores, que podem ser classificados quanto ao eixo em que o rotor gira. Os cata-ventos são os equipamentos responsáveis pela transferência de energia mecânica. Para que um cata-vento possa gerar energia elétrica é necessário que seja acoplado a ele um aerogerador para gerar energia elétrica a partir da energia mecânica gerada pelo cata-vento.

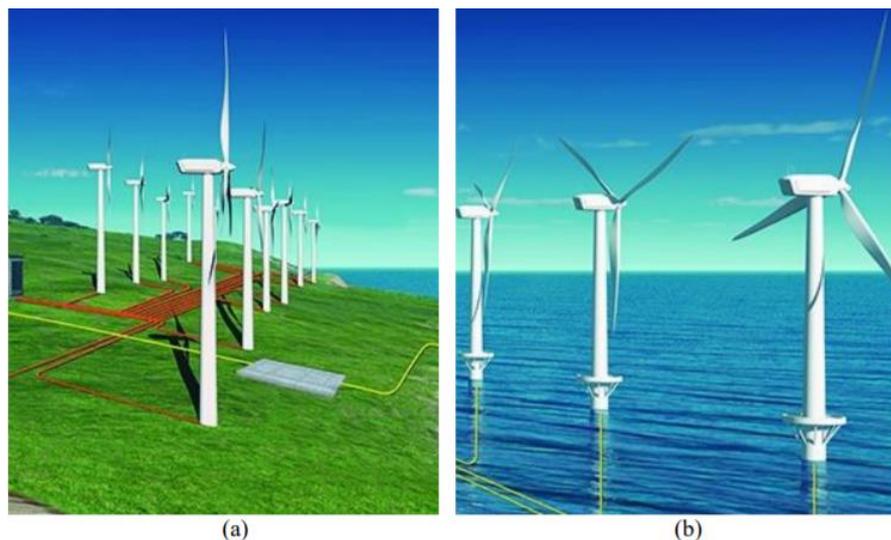
Figura 7: Potencial eólico estimado: vento médio anual igual ou superior a 7,0 m/s.



Fonte: (RESEARCH GATE, 2021).

Os três elementos principais dos aerogeradores são o rotor, o eixo e o gerador, e vários elementos secundários que variam de acordo com o tipo e projeto do aerogerador (TOLMASQUIM et al., 2016, p. 261).

Figura 8: Turbinas Eólicas (a) Offshore e (b) Onshore



Fonte: General Cable. Disponível em: <https://goo.gl/m1QH5D>.

A potência disponível do vento é calculada a partir da energia cinética associada ao ar que desloca em direção ao cata-vento a uma velocidade  $v$  (m/s), atravessando uma área  $A$  (m<sup>2</sup>) do rotor da turbina que irá deslocar uma massa  $\rho Av$  (kg/s), onde  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) é a massa do ar. A potência disponível é calculada pela equação 15 (CAMPOS, 2004),

$$P_d = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (15),$$

onde  $A = \pi r^2$  é a área de captação de vento pelo cata-vento,  $\rho$  a densidade do ar no local e  $v$  a velocidade do vento que tem maior influência na geração de energia devido a variação cúbica na conversão de energia.

### 2.3) Energia do campo magnético

Nesta seção os conceitos e obtenção de energia através de MEH (Magnetic Energy Harvesting) por campos magnéticos serão discutidos.

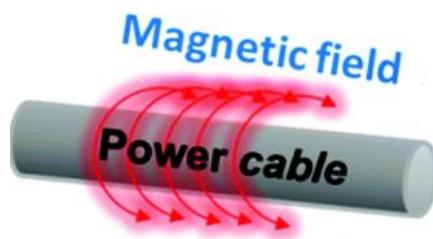
#### 2.3.1) Colheita de energia pelo campo magnético.

Na busca por fonte de energia sustentável, que também estão disponíveis na maioria dos locais onde as redes de sensores sem fio (Wireless Sensor Network ou WSNs) de Internet of Things (IoT) serão usadas, o campo magnético vem se destacando como uma fonte potencial de EH, comparado com os raios solares, vibração mecânica, calor e outras formas de energia renovável. Isto ocorre porque os campos magnéticos são uma consequência direta do fluxo de corrente. A maioria dos ambientes locais hoje em dia possuem campos magnéticos onipresentes decorrentes da infraestrutura de transmissão de energia elétrica, em edificações, linhas de

energia aéreas, maquinário industrial e dispositivos eletrônicos. Esses campos são geralmente considerados ruidosos e/ou prejudiciais ao corpo humano. Os cabos elétricos de transmissão geram baixo campo magnético ( $<1 \text{ mT} = 10 \text{ G}$  para uma distância de 10 mm com 50 A de condução de corrente no condutor) para uma frequência de 50/60 Hz. Estas energias magnéticas podem ser capturadas por bobinas e núcleos magnéticos operando no princípio da lei de indução de Faraday conforme mostrado na Figura 9.

A Lei de Faraday ou Lei de Indução Eletromagnética, foi definida pelo físico e químico britânico Michael Faraday, em 1831, devido a descoberta do fenômeno da indução eletromagnética, ou seja, quando houver uma variação do fluxo magnético através de um circuito, surgirá nele uma força eletromotriz induzida.

Figura 9: Técnicas de captação de energia de campos magnéticos.



Fonte: (ANNAPUREDDY, 2017).

A equação que representa a Lei de Faraday, foi idealizada pelo físico alemão Franz Ernst Neumann e é representada por,

$$\varepsilon = \frac{\Delta t}{\Delta \Phi} (16),$$

onde,  $\varepsilon$  é a força eletromotriz induzida (fem) (V),  $\Delta \Phi$  a variação do fluxo magnético (Wb) e  $\Delta t$  intervalo de tempo (s). O sinal negativo da fórmula indica que o sentido da (fem) induzida está em oposição a variação do fluxo magnético.

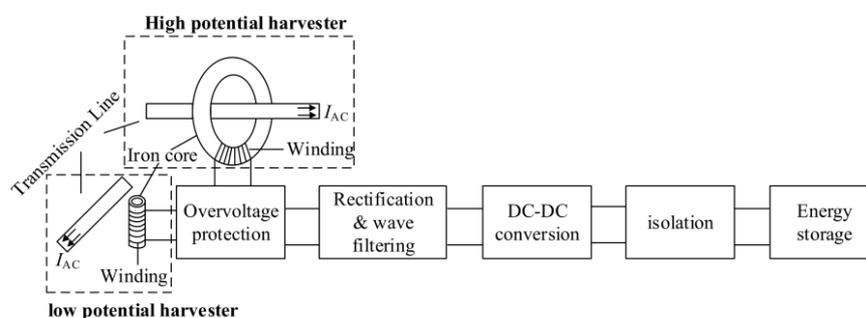
### 2.3.2) Fundamentos de MEH (Magnetic Energy Harvesting)

De acordo com as equações de Maxwell ou Lei de Ampère, a densidade do fluxo magnético  $B$  a uma distância  $P$  e distância  $r$  de um condutor infinitamente longo com uma corrente elétrica alternada com amplitude  $I$  e frequência angular é  $\omega$  dada por,

$$B = \frac{\mu_0 I \sin(\omega t)}{2\pi r} (17),$$

onde  $\mu m$  é permeabilidade magnética do núcleo. Os condutores de energia elétrica nos sistemas elétricos de potência, como linhas aéreas, cabos e barramentos que transportam correntes elétricas de alta amplitude, geram um campo magnético devido à passagem da corrente elétrica no condutor. Devido a existência desse campo magnético, uma tensão induzida pode ser obtida através da indução magnética usando uma bobina (toróide) chamada de Captação de Energia Indutiva. A Figura 10 mostra um diagrama de captação de energia magnética devido a passagem de uma corrente alternada  $I_{AC}$  pelo condutor da linha de alta tensão. As tensões alternadas induzidas passam por um circuito de proteção contra transientes (overvoltage protection) e serão retificadas e filtradas convertendo a corrente alternada em corrente contínua. O módulo conversor DC-DC de baixa tensão regula a tensão de acordo com o dispositivo ou carrega a bateria do dispositivo. No circuito de isolamento, o transformador forma uma barreira dielétrica que isola eletricamente as malhas de entrada e de saída, acoplando-as magneticamente. A realimentação entre a saída do conversor e o bloco de controle também deve apresentar isolamento, que pode ser por transformador (acoplamento magnético) ou através de dispositivos optoeletrônicos (acoplamento óptico) (YANG, 2020).

Figura 10: Diagrama esquemático de um sistema de coleta de energia magnética.



Fonte: (YANG, 2020).

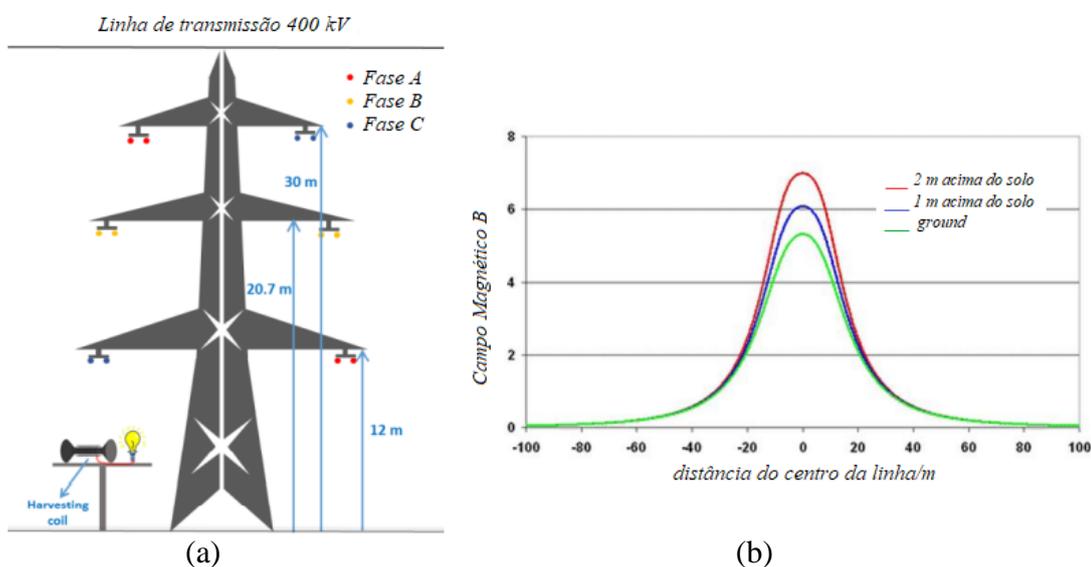
De acordo com os diversos modos de aplicação do circuito de captação do campo magnético da Figura 10, o projeto de um MEH pode ser dividido em alto e baixo potencial de geração de energia. O projeto do circuito MEH é dimensionado de acordo com a amplitude de corrente e o potencial de tensão do condutor da rede de energia elétrica (MOGHE, 2015).

Uma limitação deste projeto de captação de energia magnética conectando o dispositivo na rede de energia elétrica em média ou alta tensão é que os mesmos precisam ser montados nas linhas de energia elétrica. Isso limita o tamanho e o peso dos sensores, pois aumentaria

ainda mais a catenária da linha de transmissão além do custo de instalação. Uma outra proposta de captação de MEH é captar esta energia sob a linha de energia elétrica de alta tensão desde que a densidade do fluxo não exceda os níveis de segurança perto do solo, conforme mostra a Figura 11(a) para uma linha de transmissão de 400 kV. Porém a intensidade do campo magnético, que varia devido a passagem da corrente elétrica pelo condutor, também pode ser afetada por variação da umidade relativa do ar, queda das linhas de transmissão e desequilíbrio das fases (YANG, 2015).

Figura 11: (a) Estrutura física de uma linha de transmissão de 400kV.

(b) Distribuição do fluxo magnético sob a linha de transmissão de 400 kV.



Fonte: (YANG, 2015).

A Figura 11(b) mostra o valor médio da densidade do fluxo magnético sob as linhas de transmissão de 400 kV. A densidade de fluxo magnético diminui conforme a distância horizontal da linha central de condutores de energia aéreos aumenta. Quando a altura do dispositivo de captação de energia magnética é de 1 m acima do solo, o fluxo magnético a densidade é aproximadamente de  $6 \mu\text{T rms}$  (NATIONAL GRID, 2021).

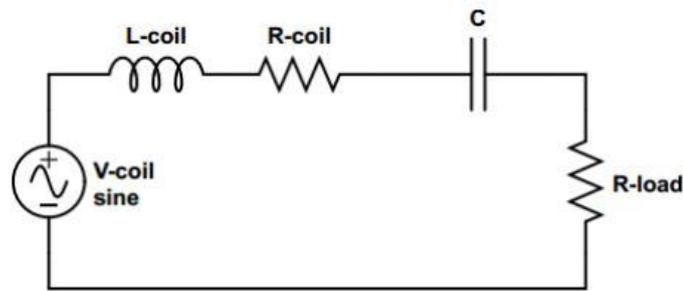
Para captar a energia do campo magnético é empregado bobinas enroladas em materiais com núcleo ferromagnético. Embora a bobina de captação de energia possa ser instalada a 10 metros de distância das linhas de alta tensão, ainda é um sistema de acoplamento indutivo cuja potência máxima dependem do campo magnético circundante nos condutores, mas também de outros parâmetros tais como a resistência efetiva da bobina e a carga otimizada. A Figura 12

mostra o circuito equivalente de uma bobina de captação de campo magnético conectada ao capacitor C de compensação para eliminar o efeito indutivo de L-coil e um resistor de carga (R-load) com o mesmo valor de R-coil. A tensão induzida na bobina V-coil é em função da densidade de fluxo magnético circundante e das propriedades da bobina aplicando a Lei de Faraday,

$$V\text{-coil} = N\omega B_{ex} A \mu_{eff}. \quad (18)$$

onde, V-coil é o valor de pico da onda senoidal captada, N é o número de voltas na bobina,  $B_{ex}$  é a densidade de fluxo magnético em T aplicado à bobina, A representa a seção transversal efetiva da bobina em  $m^2$ ,  $\omega$  é a frequência angular em rad/s e  $\mu_{eff}$  é a permeabilidade efetiva relacionada ao núcleo e geometria do material.

Figura 12: Circuito equivalente de captação de energia de campo magnético.



Fonte: (YANG, 2015).

Para fornecer a potência máxima da bobina para a carga, devemos aplicar a teoria da máxima transferência de potência. Para isto, temos que utilizar uma capacitância de compensação capacitor  $C = 1/(\omega^2 L\text{-coil})$  que é adicionado em série com a bobina para eliminar a indutância da bobina L-coil. A resistência de carga R-load deve ser a mesma da resistência da bobina R-coil. Sob esta condição, como mostrado na Figura 12, a potência entregue à carga é dada pela equação (19),

$$P_{load} = (V\text{-coil}/2)^2 / R\text{-coil}. \quad (19)$$

## 2.4) Energia do campo elétrico.

Nesta seção os conceitos e obtenção de EH por campos elétricos serão discutidos.

### 2.4.1) Colheita de energia pelo campo elétrico.

A ideia principal da colheita e energia de campo elétrico origina-se dos princípios básicos da eletrostática em que um material condutor energizado ao adquirir um nível de tensão emite um campo elétrico. Dessa forma, em uma rede de tensão alternada o campo elétrico variável no tempo resulta em uma corrente de deslocamento em que é usada para carregar placas condutoras, armazenando a energia do campo elétrico em um elemento de armazenamento, como por exemplo, um capacitor.

#### **2.4.2) Efeito do campo elétrico.**

O método da coleta de energia do campo elétrico tem como base os fundamentos da eletrostática a partir das equações de Maxwell em que as cargas elétricas livres distribuídas em uma superfície fechada sucedem em um campo elétrico radial e este campo variável no tempo produzindo uma corrente de deslocamento  $I_d$ .

A captação da energia do campo elétrico é realizada pela utilização de um material condutor, como por exemplo uma antena, em que o campo elétrico emitido é captado pelo condutor, resultando em uma corrente de deslocamento a ser convertida em corrente contínua para alimentar uma carga. Uma característica de destaque é que o campo elétrico é o único tipo fonte não intermitente, isto é, não ocorrem interrupções e nem depende de uma carga. A amplitude e a frequência do campo elétrico são constantes, logo, o campo elétrico possui um comportamento estável (CETINKAYA, 2017, tradução nossa).

Os princípios básicos da eletrostática, qualquer condutor energizado em algum nível de tensão tem um campo elétrico  $E$  radial. Para linhas de corrente alternada, este campo variável com o tempo produz uma corrente de deslocamento que pode ser expressa com a seguinte equação de Maxwell,

$$I_d = \epsilon \int_S \frac{dE}{dt} ds \quad (20),$$

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (21),$$

onde  $\epsilon$  é a constante dielétrica,  $E$  é a intensidade de campo elétrico,  $I_d$  é a corrente de deslocamento,  $C$  é a capacitância e  $V$  a tensão armazenada.

#### **2.4.3) Desempenho da energia de campo elétrico captada.**

O principal objetivo do sistema de captação de energia de campo elétrico é fornecer uma fonte de alimentação apropriada para uma carga final a partir de um condutor energizado. No entanto, essas fontes de captação de campo elétrico possuem uma impedância interna muito alta que restringe a quantidade de corrente de saída que pode ser conduzida pela sua fonte. Logo, para ser usada diretamente por dispositivos eletrônicos, a fonte de captação precisa ser condicionada e convertida em uma forma utilizável por circuitos de carga práticas, como, por exemplo, microcontroladores, dispositivos eletrônicos, entre outros, fornecendo uma tensão e corrente reguladas à carga (YANG, 2016). O processo de captação de energia de fontes de RF foi proposto a partir de muitos aspectos diferentes, como densidade espectral de potência (TAKHEDMIT, 2010, tradução nossa) distância máxima de transmissão (KIM, 2014 tradução nossa), largura de banda do sinal (REHMAN 2017, tradução nossa) e outros. Os avanços recentes neste campo estão aumentando a importância dos retificadores de RF e no desenvolvimento de dispositivos responsáveis por converter o sinal de RF para um sinal de nível DC com consumo de energia da ordem de microwatts.

#### **2.4.4) Possíveis áreas de aplicação com captação de energia de campo elétrico.**

O desenvolvimento de sensores sem fio está avançando de acordo com a criação de novas tecnologias de integração de dispositivos, visando o aprimoramento dos sistemas de sensoriamento remoto e fatores limitantes à medida que a vida útil do dispositivo está em foco. As redes estruturadas com fonte de colheita de energia de campo elétrico com sensores especializados podem ajudar a prevenir os desperdícios, minimizar as perdas e aumentar a eficiência operacional, gerenciando a operação de sistemas, como por exemplo, ar-condicionado, aquecimento e iluminação em residências e edifícios comerciais.

A crescente implantação de dispositivos IoT oferece muitos desafios para a indústria e pesquisadores acadêmicos. Um desafio crucial é como fornecer energia para um número tão grande de dispositivos. Estes dispositivos necessitam de alimentação em corrente contínua e normalmente usam baterias, com o tamanho impondo restrições à quantidade de energia que pode ser armazenada. Essa limitação entra em conflito direto com a tendência de aumento da funcionalidade do aplicativo, normalmente exigindo mais energia, apresentando um desafio crucial. Essa tendência significa que a vida útil de muitos dispositivos inteligentes móveis, é limitada a horas ou dias, com a recarga da bateria levando de minutos a horas. Em algumas aplicações, por exemplo dispositivos de monitoramento implantados na infraestrutura, a recarga ou substituição da bateria pode ser inconveniente ou impossível. Para suprir esta demanda, a

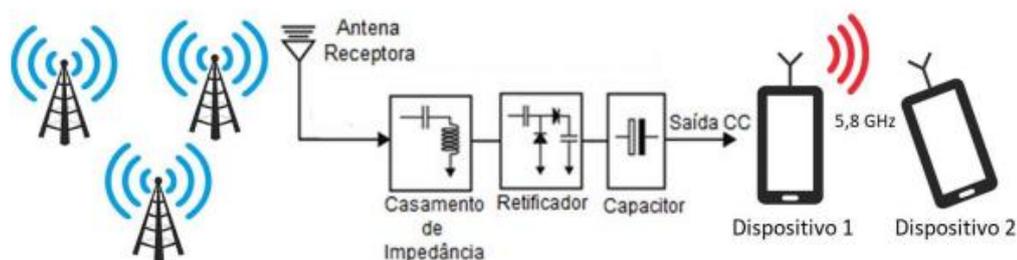
energia do campo elétrico apresenta diversas vantagens e são tecnologias promissoras que oferecem potencial para suprir alimentação a estes dispositivos e carregar as baterias dos dispositivos de pequeno consumo (MENÉNDEZ, 2019).

## 2.5) Energia das ondas de rádio (RF EH)

A captação de energia de RF significa essencialmente converter a energia eletromagnética do ambiente em energia elétrica utilizável. Essas ondas eletromagnéticas disponíveis no ambiente são captadas por uma antena proveniente das estações de TV, FM, roteadores WiFi ou torres de telefonia celular com o objetivo de converter essas ondas eletromagnéticas em corrente contínua para alimentar um dispositivo ou carregar uma bateria.

O diagrama em blocos da Figura 13 mostra a conversão de energia em três blocos principais, onde o primeiro bloco, projetado para melhorar o casamento de impedância entre a antena e o diodo, permite maximizar a transferência de potência do sinal captado pela antena e transferir para o diodo. O segundo bloco é constituído por um diodo ou pontes retificadoras de diodos para conversão da onda eletromagnética em corrente contínua. Esses diodos são diodos Schottky e são escolhidos devido à baixa queda de tensão no sentido direto, que é extremamente baixa se comparada com a queda de tensão de outros modelos de diodos, pequenas dimensões do componente, baixa capacitância e indutância parasita (LEE, 2015). Por fim, no terceiro bloco, o capacitor armazena energia e elimina o ripple da onda eletromagnética gerada pelo processo de retificação do diodo Schottky (SILVA, 2019).

Figura 13: Diagrama em blocos de conversão de energia de ondas eletromagnéticas.



Fonte: (SILVA, 2019).

A energia de RF é continuamente irradiada por várias fontes de energia por diferentes polarizações e uma ampla faixa de frequências, porém a densidade de potência de RF disponível é baixa (PINUELA, 2013), e um bom projeto do sistema de colheita de energia de RF se faz

necessário para tirar o máximo aproveitamento dos níveis de potência disponíveis. A densidade de potência ( $S$ ) é obtida através da equação (22),

$$S = P_{EIRP} / 4\pi d^2, \quad (22)$$

onde  $P_{EIRP}$  é a potência efetivamente irradiada pelo transmissor,  $d$  a distância entre o transmissor e o receptor.

O maior problema de captação e conversão de ondas eletromagnéticas em energia é a baixa densidade de potência disponível no ambiente. A potência disponível na antena depende de vários fatores como frequência, distância entre transmissor e receptor, densidade de potência transmitida, ganho das antenas do transmissor e receptor e um circuito retificador de RF que seja capaz de captar o sinal de RF e fornecer uma tensão DC suficiente para alimentar uma carga (CHANG, 2015). Às vezes é necessário instalar a antena para captação de energia muito próximo a antena do transmissor, como por exemplo, no WiFi onde a potência transmitida varia de +18 dBm a +20 dBm. Portanto, no estudo do reaproveitamento, normalmente pequenas potências são manipuladas e por isso a eficiência desses sistemas se torna tão importante. Em diversos trabalhos para uma análise mais detalhada do reaproveitamento de energia, é necessário um estudo do ambiente em que a captação de energia está imersa (KIM, 2014).

Segundo (CASELLA, 2019), devido às perdas no caminho de propagação entre transmissor e a antena do circuito retificador de RF, para obter uma potência de entrada acima de -10 dBm, o sistema precisa estar localizado a alguns centímetros do transmissor. Por este motivo, não é suficiente somente aumentar a eficiência do retificador apenas para níveis elevados de potência na antena, como é considerado em alguns trabalhos relacionados ao projeto de retificadores de RF (TAKHEDMIT, 2010), (LIN, 2018), (CHUMA, 2018). O estudo e caracterização de cada nível de potência de entrada do retificador de RF são essenciais para aumentar sua eficiência para aplicações reais de colheita de energia por ondas eletromagnéticas, operando em níveis de potência abaixo de -10 dBm.

Nesse contexto, o aprimoramento do projeto dos retificadores de RF, avaliando os efeitos da impedância do diodo, as diferentes abordagens para o projeto do filtro capacitivo de saída e a topologia do retificador são importantes para que o circuito corresponda adequadamente às aplicações de coleta de energia de RF do ambiente, aumentando a sensibilidade do dispositivo. Além disso, a caracterização do sistema também é válida para

fontes de energia dedicadas, tornando possível aumentar a distância máxima de transferência de energia.

### **3 GERAÇÃO HÍBRIDA DE ENERGIA**

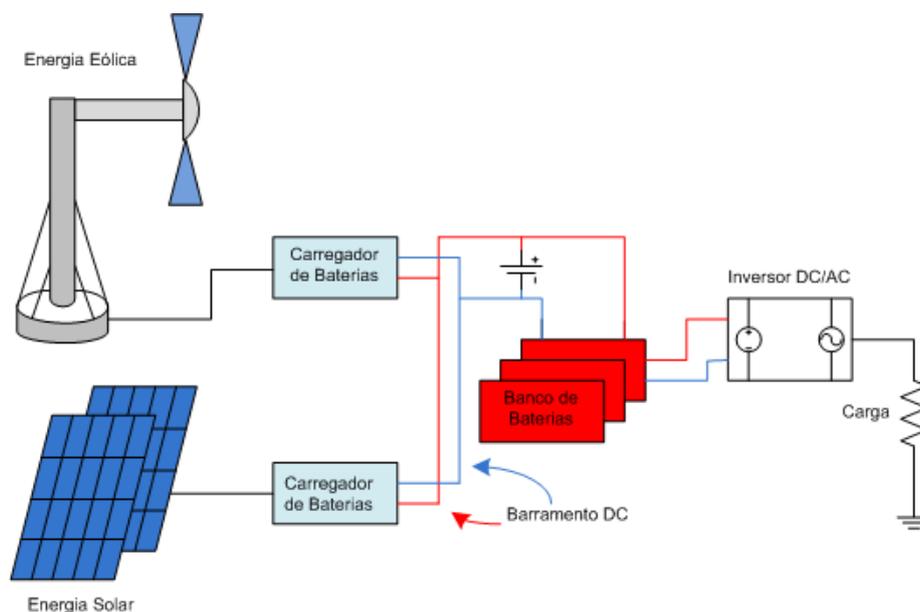
A definição básica de usina híbrida é a de um sistema que combina duas ou mais formas de produção de energia ou de potência que, além disso, pode incluir o armazenamento desta energia (ANEEL, 2021). Para (MOHAMMED et al, 2014), várias combinações de sistemas híbridos podem ser projetadas para geração de potência que envolve uma combinação de diferentes sistemas de energia. A Figura 13 mostra um diagrama híbrido utilizando painéis solares e energia eólica armazenando energia em um banco de baterias através de um carregador de baterias. Enquanto houver fornecimento de energia pelo sol ou vento o sistema carrega o banco de baterias e fornece alimentação AC através do inversor DC/AC para uma carga. Se uma das fontes, eólica ou vento, interromper o fornecimento de energia, o banco de baterias irá suprir alimentação para a carga através do inversor DC/AC. A combinação de duas fontes renováveis de energia possibilita métodos de integração de sistemas de potência, aumento de confiabilidade e fornecimento contínuo de energia quando uma das fontes não cessar o fornecimento de corrente.

### **4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.**

De maneira geral, este artigo dedica-se ao estudo de captação de energia de recursos naturais no meio ambiente e a conversão em energia elétrica. A partir dos modelos de captação de energia elétrica propostos foi apresentado como estas energias são convertidas em corrente contínua e corrente alternada e em alguns modelos foram apresentados o potencial de geração de energia elétrica através de modelos matemáticos e simulação por software. Por fim, foi apresentado como podemos aumentar a oferta de geração e não interrupção do fornecimento de energia elétrica utilizando a técnica de hibridização utilizando energia solar em conjunto com energia eólica.

Uma das principais colaborações deste trabalho foi mostrar as formas mais usuais de captação de energia existentes definindo-as conforme suas principais características. Através dos modelos de captação de energia apresentados, foi possível identificar o potencial de geração de energia que pode ser aproveitado como forte aliada na redução dos impactos ambientais causados na geração de energia elétrica, seguindo o caminho da sustentabilidade e consciência verde.

Fig. 14 - Exemplo de sistema híbrido.



Fonte: Autor

### **ABSTRACT**

This work discusses and analyze Energy Harvesting (EH) and shows how to convert external sources of energy present in the environment into electrical energy, from solar, wind, vibrations, electric and magnetic fields, and through electromagnetic waves available in the environment, which is free, sustainable and low-polluting source of energy. Thus, this study specifies types of EH, with the aim of analyzing the potential for generating electrical energy that can be obtained from each source or from two of these sources simultaneously. However, the advantages/disadvantages of this possibility of hybridization must be considered in order to strategically use resources, such as wind and solar as hybrid energy sources, increasing the capacity to generate electricity.

### **REFERÊNCIAS**

PRIYA, S., INMAN, D.J., **Energy Harvesting Technologies**. Springer Science Business Media, LLC, 2009.

CHETTO, Maryline and Audrey Queudet. **Harnessing Ambient Energy for Embedded Systems**. November, 2016.

OXFORD

Oxford Policy Management. <https://www.opml.co.uk/our-expertise/climate-natural-resources/cop26>. Acessado em: 02. Novembro 2021.

CRESEB. [http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com\\_content&lang=pt&cid=301](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=301). Acessado em: 02. Novembro 2021.

ESTADO DE MINAS

[https://www.em.com.br/app/noticia/economia/2021/05/21/internas\\_economia,1269004/minas-e-o-1-estado-a-atingir-1gw-em-potencia-instalada-de-energia-solar.shtml](https://www.em.com.br/app/noticia/economia/2021/05/21/internas_economia,1269004/minas-e-o-1-estado-a-atingir-1gw-em-potencia-instalada-de-energia-solar.shtml). Acessado em: 02. Novembro 2021.

ENERGYEASY

<https://energeasysolar.com.br/category/dicas/>. Acessado em: 02. Novembro 2021.

TAKENAKA, F. O. **Avaliação do potencial de geração de energia solar fotovoltaica na cobertura das edificações do campus I - CEFET- MG, interligado à rede elétrica.** Dissertação. UFSC. 2010.

TIBA, C. **Atlas Solarimétrico do Brasil** - Banco de dados terrestres: Recife: Editora Universitária da UFPE, 2000.

SIGNORINI, V. B. **Análise do potencial de geração de energia solar fotovoltaica em um sistema integrado à edificação e interligado à rede - estudo de caso no prédio administrativo do campus porto da UFPEL.** Julho 2014.

VIANA, T. S. **Potencial de Sistemas Fotovoltaicos concentradores no Brasil.** II Congresso de Energia Solar. Florianópolis, 2008.

MENÉNDEZ, O., KOURO, S., PÉREZ, M., AUAT, CHEEIN F. **Mechatronized maximum power point tracking for electric field energy harvesting sensor.** July, 2019.

KIM S., VYAS R., BITO J., NIOTAKI K., COLLADO A. C, GEORGIADIS A., and TENTZERIS M. M. **Ambient RF energy-harvesting technologies for self-sustainable standalone wireless sensor platforms.** November, 2014.

REHMAN, M. ur, AHMAD, W. and KHAN W. T. **Highly efficient dual-band 2.45/5.85 GHz rectifier for RF energy harvesting applications in ISM band.** November, 2017.

ZHANG, J.; LI, P.; WEN, Y.; ZHANG, F.; YANG, C. **A Management Circuit with Upconversion Oscillation Technology for Electric-Field Energy Harvesting.** August, 2016.

MOGHE, R. et al. **A Low-Cost Electric Field Energy Harvester for an MV/HV Asset-Monitoring Smart Sensor**. Abril de 2015.

CETINKAYA, OKTAY; OZGUR B. AKAN. **Electric-Field Energy Harvesting From Lighting Elements for Battery-Less Internet of Things**. Fevereiro de 2017.

CHANG K.; KANG S.; PARK K.; SHIN S.; KIM H. S.; KIM H. **Electric Field Energy Harvesting Powered Wireless Sensors for Smart Grid**. Dezembro de 2012.

COTTONE, F., **Nonlinear Piezoelectric Generators for Vibration Energy Harvesting**. Università Degli Studi Di Perugia, Dottorato Di Ricerca In Fisica, XX Ciclo, 2007.

TRIPLETT, A., QUINN, D. D., **The Effect of Non-linear Piezoelectric Coupling on Vibration-based Energy Harvesting**. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 20 p. 1959-1967—November 2009.

ROCHA, T. R., **Colheita de energia usando dispositivos baseados em materiais piezoelétrico**, UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA Instituto de Geociências e Ciências Exatas Campus de Rio Claro, Rio Claro 2012.

PICOLO A. P., RULHER J. A. e RAMPINELLI A. G. **Uma abordagem sobre a energia eólica como alternativa de ensino de tópicos de física clássica**. Artigos Gerais. Rev. Bras. Ensino Fís. 36 (4). Dezembro de 2014.

TOLMASQUIM, M. T. Et al. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. Rio de Janeiro: EPE, 2016.

CAMPOS, F. **Geração de Energia Eólica a Partir de Fonte Eólica com Gerador Assíncrono Conectado a um Conversor Estático Duplo**. Tese Doutorado. PUC-SP, 2004.

ANEEL.

[https://www.aneel.gov.br/consultas-publicas-antigas?p\\_p\\_id=participacaopublica\\_WAR\\_participacaopublicaportlet&p\\_p\\_lifecycle=2&p\\_p\\_state=normal&p\\_p\\_mode=view&p\\_p\\_cacheability=cacheLevelPage&p\\_p\\_col\\_id=column-](https://www.aneel.gov.br/consultas-publicas-antigas?p_p_id=participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet&p_p_lifecycle=2&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_cacheability=cacheLevelPage&p_p_col_id=column-)

2&p\_p\_col\_pos=1&p\_p\_col\_count=2&\_participacaopublica\_WAR\_participacaopublicaportlet\_ideDocumento=38278&\_participacaopublica\_WAR\_participacaopublicaportlet\_tipoFaseReuniao=fase&\_participacaopublica\_WAR\_participacaopublicaportlet\_jspPage=%2Fhtml%2Fpp%2Fvisualizar.jsp, acessado em 06/11/2021.

MOHAMMED, Y.S.; MUSTAFA, M.W.; BASHIR, N. **Hybrid renewable energy systems for off-grid electric power: Review of substantial issues**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014.

MARTINS, F.R.; GUARNIERI, R.A. e PEREIRA, E.B. **O aproveitamento da energia eólica**, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos, São José dos Campos, SP, Brasil. Artigos Gerais. Rev. Bras. Ensino Fís. 30. 2008

PEREIRA A.H.A. **Cerâmicas piezoelétricas, funcionamento e propriedades**, ATCP engenharia Física são Carlos Brasil 2010.

MAYRINCK, Caroline de, FONSECA, André Felipe Vale da SCHIAVON, Marco Antônio. **NANOCRISTAIS DE PEROVSKITAS COLOIDAI: HISTÓRICO, PROPRIEDADES E APLICAÇÕES**. Setembro de 2020. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170597>.

YANG, Feng; DU, Lin; YU, Huizong; HUANG, Peilin. **Magnetic and Electric Energy Harvesting Technologies in Power Grids: A Review**. May, 2020.

GOUVEIA, Rosimar. **Lei de Faraday**. Disponível em <<https://www.todamateria.com.br/lei-de-faraday/>>. Acessado em 06/11/2021

YUAN, Sheng et al. **Magnetic field energy harvesting under overhead power lines**. IEEE transactions on power electronics, v. 30, n. 11, p. 6191-6202, May, 2015.

NATIONAL GRID

National Grid, EMF.info Electric and Magnetic Field, <http://www.emfs.info/sources/overhead/factors/height/>. Acessado em: 12. Novembro 2021.

SILVA, Daniel T. da, CARDOSO, João V. N., GUIMARÃES, Ana Paula P.; MENDES, Pedro FERNANDES, V. A. R., **CAPTURE DE ENERGIA AMBIENTE: O POTENCIAL DOS SINAIS DE RADIOFREQUÊNCIA**, Dezembro, 2019.

LEE T. J., PATIL P., HU C. Y., RAJABI M., **Design of Efficient Rectifier for Low-Power Wireless Energy Harvesting at 2.45 GHz**, IEEE Radio and Wireless Symposium, 2015.

PINUOLA M., YATES D.C., LUCYSZYN S., MITCHESON P. D., **London RF survey**, 7th European Conference on Antennas and Propagation, June, 2013.

CAPOVILLA Carlos Eduardo, SILVA Vinícius S., PAZ Humberto P., CAMBERO Eduardo V. V., ARAÚJO Humberto X., CASELLA R.S. Ivan. **A Survey on Low Power RF Rectifiers Efficiency for Low Cost Energy Harvesting Applications**, International Journal of Electronics and Communications (2019).

TAKHEDMIT, B. MERABET, L. C., B. ALLARD, F B. Costa, VOLLAIRE C., PICON O. P, **A 2.45- GHz dual-diode RF-to-DC rectifier for rectenna applications**, in: The 40th European Microwave Conference, 2010, pp. 37–40.

LIN C.-H., CHUI C.-W., GONG J.-Y., **A wearable rectenna to harvest low-power RF energy for wireless healthcare applications**, in: 2018 11th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI), 2018, pp. 1–5.

CHUMA E. L., RODRIGUEZ L. D. L. T., IANO Y., ROGER L. L. B., SORIANO M. S., **Compact rectenna based on a fractal geometry with a high conversion energy efficiency per area**, IET Microwaves, Antennas Propagation 12 (2018) 173–178

ANNAPUREDDY, V.; PALNEEDI, H.; HWANG, G. T.; PEDDIGARI, M.; JEONG, D. Y. YOON, W. H.; KIM, Kw.H.; RYU J. **Magnetic Energy Harvesting with magnetoelectrics: an emerging technology for self-powered autonomous systems**. Royal Society of Chemistry. September 2017.

RESEARCH GATE

[https://www.researchgate.net/publication/281776062\\_Tapajos\\_hidretricas\\_infraestrutura\\_e\\_caos\\_elementos\\_para\\_a\\_governanca\\_da\\_sustentabilidade\\_em\\_uma\\_regiao\\_singular/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/281776062_Tapajos_hidretricas_infraestrutura_e_caos_elementos_para_a_governanca_da_sustentabilidade_em_uma_regiao_singular/figures?lo=1). Acessado em: 15. Novembro 2021.

DIEDRICH, V. A. **Geração Distribuída baseada em um Sistema Fotovoltaico**. UFRGS, Porto Alegre, 2013.