

Energy Harvesting em Smart Grids: Análise de Viabilidade para Alimentação de Nós de Sensores de Baixo Consumo

Natalia Pereira Menezes¹, Ananías Ambrosio Quispe¹, André de Souza Leone¹,
Luciana Michelotto Iantorno¹, Rodrigo Jardim Riella^{1,2}

¹(Centro de Competência Future Frid, Lactec, Brasil)

²(Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR, Brasil)

Resumo: As redes elétricas inteligentes (smart grids) apresentam amplas possibilidades para o aproveitamento de fontes alternativas de energia, como solar, campos elétricos e eletromagnéticos, vibração, pressão e gradientes térmicos. Paralelamente, a transição de parte das concessionárias para redes de comunicação avançadas tem impulsionado o uso de tecnologias de baixo custo e baixo consumo energético, como Wi-SUN e LoRaWAN, que dependem de milhares de nós de sensores com fornecimento de energia contínuo. Neste contexto, este estudo avalia a viabilidade do uso de diferentes fontes de energy harvesting para a alimentação de nós de sensores de baixo consumo em smart grids. A análise abrange a capacidade de geração de energia, as vantagens e limitações de cada fonte, sustentabilidade, facilidade de acesso, integração com tecnologias existentes e desafios técnicos. Os resultados evidenciam as fontes de energy harvesting mais promissoras para suprir a demanda energética de nós sensores em smart grids, oferecendo suporte para o desenvolvimento de soluções sustentáveis e de longo prazo para o setor elétrico.

Palavras-chave: Viabilidade; Smart grids; Energy Harvesting; Comunicação.

Date of Submission: 07-10-2025

Date of Acceptance: 17-10-2025

I. Introdução

As Redes Elétricas Inteligentes, ou *Smart Grid* (SG), têm um papel fundamental na transição energética, ao possibilitar o gerenciamento eficiente dos recursos e a melhoria da continuidade e disponibilidade da energia entregue ao consumidor. Para isso, essas redes incorporam sensores, tecnologias digitais e softwares, permitindo o monitoramento e controle em tempo real.

Para viabilizar a implantação e expansão das SG, é essencial contar com meios de comunicação confiáveis e sensores distribuídos. Entre as tecnologias de baixo custo e baixo consumo energético já empregadas em serviços utilitários, Wi-SUN FAN e LoRaWAN, são consideradas alternativas promissoras. O Wi-SUN [1] é um padrão especialmente projetado para aplicações *utilities*, que adota uma topologia malha, permitindo múltiplos saltos para estender a cobertura da rede. Já o LoRaWAN [2] opera em topologia estrela e tem como principal característica o uso de uma modulação proprietária, alcançando distâncias de até 15 km. Ambas as tecnologias apresentam baixo consumo energético, favorecendo a aplicação de *energy harvesting*, principalmente em cenários remotos, a partir de fontes de energia como solar, campos elétricos e eletromagnéticos, vibrações, pressão e gradientes térmicos.

Nos últimos anos, observou-se o crescimento nas SG, sobretudo em redes de distribuição de energia e em áreas urbanas. Entretanto, em linhas de transmissão ou em regiões remotas, esse avanço ocorre de forma mais lenta. Nesse contexto, um dos principais desafios para a implantação de sensores em tais locais é garantir a operação contínua sem a necessidade frequente de troca de baterias. A substituição desses componentes em um grande volume de sensores instalados em locais de difícil acesso representa uma atividade de alto custo e, em muitos casos, logisticamente inviável para as concessionárias. Diante desse cenário, a adoção de fontes de energias alternativas, sustentáveis, duráveis e de fornecimento contínuo mostra-se uma estratégia vantajosa.

Como solução para esse desafio, destaca-se o processo de *energy harvesting*, que consiste em capturar, armazenar, e condicionar a energia presente no ambiente ao redor do sensor para suprir suas demandas energéticas [3]. Para implementar soluções de *energy harvesting*, é essencial conhecer as condições do local de instalação do sensor, bem como estimar com precisão o consumo da carga. Como a energia capturada costuma apresentar baixa potência, essas variáveis são determinantes para a escolha do método de colheita mais adequado e para a estimativa do potencial energético disponível.

Naturalmente, os estudos de *energy harvesting* para SG apresentam uma tendência de utilização do campo eletromagnético para a alimentação dos nós dos sensores [3,4]. Embora existam trabalhos que incluem estudos do uso de outras fontes de energia, muitos não definem qual tecnologia de comunicação será empregada entre os nós [5]. Em comparação com as fontes de energia solar ou vibracional, as baseadas em campos eletromagnéticos são geralmente mais acessíveis em SG e apresentam menor intermitência. No entanto, em

ambientes de transmissão de energia, o contato ou a proximidade com os condutores aumentam os riscos de instalação e manutenção dos sensores, além de poder provocar interferências na transmissão de dados. Até o momento, a literatura ainda carece de estudos focados em *energy harvesting* para suprir nós de comunicação que utilizem de forma explícita uma tecnologia sem fio específica, como Wi-SUN ou LoRaWAN, no contexto de SG.

Com o objetivo de reduzir ou eliminar a necessidade de baterias, um estudo foi conduzido para avaliar os diferentes métodos de *energy harvesting* para dispositivos de comunicação em SG [3]. O principal método de colheita de energia abordado pelos autores baseia-se em campos magnéticos variáveis e em campos elétricos gerados pela proximidade de condutores. Com o mesmo propósito, também são avaliadas as fontes de energia cinética, solar, e de campo elétrico [6]. Os autores destacam a viabilidade de utilização dessas fontes para o monitoramento e a comunicação entre os dispositivos de SG; contudo, a análise não apresenta as características elétricas de cada fonte.

Para preencher as lacunas identificadas, este trabalho tem como objetivo realizar um estudo de viabilidade do uso de diferentes fontes de *energy harvesting* em SG para alimentar nós de comunicação que utilizem os padrões Wi-SUN e LoRaWAN. Para tanto, são definidos critérios de avaliação que orientam a análise das diferentes fontes de energia. Como resultado, é elaborada uma tabela comparativa que sintetiza a viabilidade de uso de cada fonte e destaca suas principais características em relação aos critérios estabelecidos.

II. Consumo de energia Wi-SUN e LoRaWAN

Com base nos requisitos de funcionamento dos protocolos Wi-SUN e LoRaWAN, identificam-se aspectos relevantes para a aplicação de fontes de energia alternativas na alimentação de nós de comunicação que operam com baixa potência de transmissão e baixo consumo energético. A Tabela 1 apresenta os principais parâmetros de interesse para a avaliação do tipo de fonte de energia.

Tabela 1 - Parâmetros de Funcionamento dos Protocolos Wi-SUN e LoRaWAN.

Parâmetros	Wi-SUN	LoRaWAN
Taxa de dados (Kpbs)	Até 300	Até 100
Alcance máximo (km)	4	15
Consumo (repouso/RX/TX)	2µA/ 8mA/ <14mA	< 3µA/ 12mA/ 26mA
Potência (repouso/RX/TX)	6,6µW/ 26,4mW/ 46,2 mW	< 9,9 µW/ 39,6mW/ 85,8mW

Fonte: Adaptado de [7].

III. Tipos de energia alternativa para *Energy Harvesting*

A seguir, são apresentados os principais tipos de energia com maior potencial para suprir o consumo energético dos nós de comunicação Wi-SUN e LoRaWAN.

Fotovoltaica

A energia solar pode ser obtida da irradiação solar, destacando-se por ser amplamente disponível e adequada para aplicações em ambientes externos. A conversão para energia elétrica ocorre por meio de células fotovoltaicas, dispostas em painéis fotovoltaicos, como mostra a Figura 1. Entre as fontes de *energy harvesting*, a solar é uma das mais consolidadas, sendo possível alimentar dispositivos de menor porte com o uso de mini ou micro painéis.

Para maximizar a transferência de energia frente às variações de luminosidade e temperatura, utilizam-se técnicas avançadas de rastreamento do ponto de máxima potência, conhecidas como algoritmos MPPT (do inglês, *Maximum Power Point Tracking*). Tecnologias emergentes incluem painéis transparentes e flexíveis produzidos com materiais orgânicos [8], bem como algoritmos de MPPT em três dimensões que contribuem para uma maior eficiência do sistema. Além disso, novos materiais e arquiteturas têm possibilitado a captura de energia mesmo em condições de baixa incidência luminosa [9].

O principal desafio do uso de energia solar reside na intermitência da fonte, causada pelas variações de luminosidade e pela ausência de irradiação durante o período noturno. Para garantir a continuidade do fornecimento, torna-se essencial integrar sistemas de armazenamento de energia, como baterias ou supercapacitores, que assegurem o funcionamento contínuo dos dispositivos.



Figura 1 - Equipamento de rádio alimentado por painel solar.
Fonte: Autoria própria

Campo Elétrico

A colheita de energia proveniente do campo elétrico consiste em captar a energia irradiada ao redor das redes de transmissão e/ou distribuição de energia que compõem o sistema elétrico. Para capturar esse campo elétrico irradiante, faz-se necessário inserir um elemento coletor próximo às linhas, conforme exemplificado na Figura 2. Esses coletores são constituídos de materiais condutores de energia e posicionados paralelamente aos condutores da linha, de modo a aproveitar a corrente induzida no coletor em função do campo elétrico presente [10,11].



Figura 2 - Coletor de Campo Elétrico.
Fonte: Autoria própria

Entre as diferentes alternativas de *energy harvesting*, a obtenção de energia a partir do campo elétrico se destaca pela sua previsibilidade, confiabilidade e disponibilidade contínua, uma vez que está diretamente associada ao funcionamento das linhas de energia elétrica. Enquanto a linha estiver energizada, o campo elétrico estará presente ao seu redor, apresentando baixa suscetibilidade a interferências externas. Entretanto, devido à alta impedância desta fonte, a quantidade de energia gerada para alimentação de cargas é relativamente limitada, situando-se tipicamente na ordem de dezenas de miliwatts [10].

Vibração ou Pressão

A colheita de energia piezoelétrica baseia-se na capacidade de converter energia mecânica em energia elétrica por meio do efeito piezoelétrico. Esse fenômeno resulta da polarização elétrica induzida pela deformação mecânica do material, o que possibilita a geração de eletricidade através de diversas fontes. Entre elas, destacam-se vibrações ambientais, ondas de pressão, deformação de pneus, energia cinética de pessoas em movimento ou do tráfego, energia mecânica do fluxo da água, movimentos rotacionais e interações com campos magnéticos de

linhas de energia elétrica, ver Figura 3, além de vibrações em válvulas conversoras de sistemas HVDC (*High Voltage Direct Current*) [12,13].

Materiais piezoelétricos têm sido amplamente utilizados em sistemas de *energy harvesting* para alimentar sensores sem fio e dispositivos de Internet das Coisas (IoT), desempenhando um papel estratégico em SG. Nessas aplicações, a energia gerada pode suprir dispositivos de baixo consumo energético, promovendo a autonomia e a sustentabilidade.

Entretanto, existem desafios relevantes, como a dependência de frequências naturais de vibração para alcançar a máxima eficiência, a potência limitada gerada e a sensibilidade a fatores ambientais, como temperatura, umidade e variações estruturais [14]. Para otimizar a conversão do estímulo mecânico em energia elétrica, estratégias comuns incluem a seleção adequada de materiais piezoelétricos, a configuração otimizada dos componentes e o uso da frequência de ressonância, que permite obter a máxima tensão de saída [15].

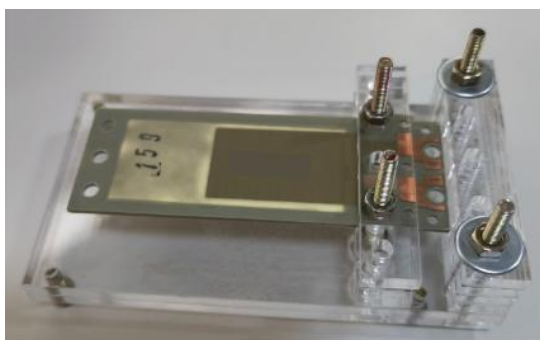


Figura 3 - Transdutor piezoelétrico com deflexão por acoplamento com o campo magnético da linha.
Fonte: Autoria própria

Diferencia de Temperatura

Os geradores termoeletrônicos (TEG) são dispositivos constituídos por materiais semicondutores que possuem uma superfície quente e uma superfície fria, permitindo a coleta de energia através de diferentes gradientes de temperatura. A diferença de temperatura entre as duas faces de um TEG causa uma diferença de potencial entre o terminal positivo e negativo, fenômeno conhecido como efeito “*Seebeck*” [16]. Um exemplo de TEG é ilustrado na Figura 4, com as seguintes características construtivas: 30 mm de largura, 30 mm de comprimento e 3,5 mm de espessura. Para um diferencial de temperatura de 60 °C, com temperatura do lado frio de 50 °C e do lado quente de 110 °C, é possível atingir uma potência aproximada de 610 mW para uma carga de 5,72 Ω , em condições ideais [17].

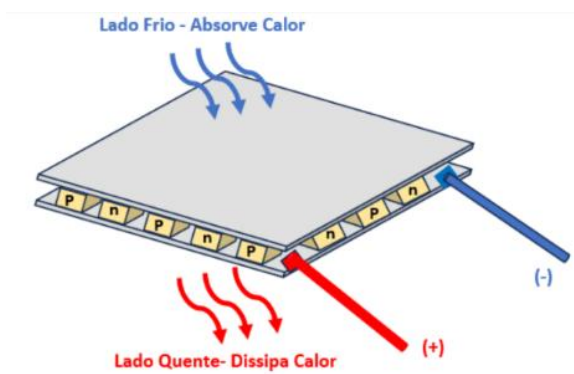


Figura 4 – Termogerador.
Fonte: Autoria própria.

Em aplicações reais, a manutenção do gradiente de temperatura e a garantia de isolamento térmico entre as superfícies fria e quente são fatores críticos que reduzem a eficiência dos TEGs em projetos de *energy harvesting*. Quando operando com condições de baixa eficiência, esses geradores podem ser arran-

topologias em série ou em paralelo para aumentar a potência do gerador [18,19]. Além disso, para reduzir a intermitência da fonte de calor, são aplicados sistemas de armazenamento de energia ou sistemas híbridos de geração [20-22].

No contexto de SG, a superfície quente do TEG pode aproveitar a energia térmica dissipada em equipamentos elétricos ou a energia solar em ambientes externos [21-23]. Em específico, a utilização de TEGs para alimentação de dispositivos de comunicação Wi-SUN, necessita de um arranjo em série para garantir 3 V e uma potência em torno de 50 mW, assegurando a operação contínua mesmo com baixos diferenciais de temperatura e fazendo uso de sistemas de armazenadores para evitar interrupções no fornecimento.

Campo Eletromagnético

A colheita de energia proveniente de campos eletromagnéticos, aplicada a redes de transmissão e distribuição de energia, baseia-se na indução magnética, explorando o acoplamento de um condutor com um núcleo bobinado [4]. Essa abordagem se fundamenta na Lei de Faraday da indução eletromagnética, que estabelece que a variação do fluxo magnético através de um condutor induz uma corrente elétrica. Os dispositivos de *energy harvesting* mais utilizados para esta aplicação incluem bobinas de indução simples, coletores baseados em ressonância eletromagnética e antenas acopladas a circuitos retificadores. A Figura 5 ilustra um esquema utilizado para a alimentação de um nó de comunicação com sensor integrado, no qual a energia é captada do campo eletromagnético presente em uma linha de energia em corrente alternada (AC).

Por meio da colheita de energia de campo eletromagnético, é possível extrair uma potência de até 42,2 W em linhas de alta tensão e alta corrente [24]. Linhas de transmissão com corrente mais elevada são, portanto, capazes de alimentar rádios LoRaWAN e Wi-SUN. Contudo, essa abordagem impõe desafios importantes: a necessidade de envolver os condutores, especialmente em condutores de alta potência; a variação da carga elétrica nos condutores, que aumenta a intensidade do campo eletromagnético e pode ultrapassar os níveis de isolamento do coletor e dos circuitos de condicionamento; e o risco de mau funcionamento de equipamentos eletrônicos e rádios operando em ambiente de alta interferência eletromagnética.

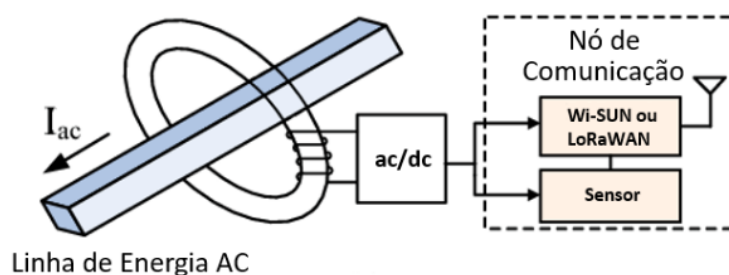


Figura 5 - Coleta de Energia por Campo Eletromagnético (topologia de núcleo fixo).
Fonte: Adaptado de [25].

IV. Metodologia de Avaliação

A tecnologia de *energy harvesting* oferece grande potencial para tornar as redes de sensores sem fio independentes de fontes de energia externas, eliminando a necessidade de baterias e ampliando significativamente suas aplicações em ambientes remotos ou de difícil acesso. As fontes de colheita de energia para a análise de viabilidade são listadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Listagem das Fontes de Energia e seus Fenômenos Físicos.

Fonte de Energia	Fenômeno físico
Solar (Fotovoltaico)	Conversão de luz em eletricidade por meio de polarização de materiais semicondutores.
Campo Elétrico	Colheita de energia através do efeito capacitivo das linhas de transmissão
Vibração/Pressão	Materiais piezoelétricos geram uma carga elétrica quando são submetidos a uma deformação mecânica.

Diferencial de Temperatura	Geração de diferença de potencial elétrico a partir de gradiente de temperatura entre dois pontos de um material condutor ou semicondutor.
Eletromagnético	Efeitos eletromagnéticos em linhas de transmissão com o uso de acoplamento magnético.

Os critérios utilizados para avaliação das fontes de energia foram: (i) possibilidade de colheita de energia próxima das redes de transmissão e distribuição; (ii) disponibilidade da fonte; e (iii) capacidade de associação dos transdutores. Além disso, características intrínsecas de cada fonte, tais como a eficiência de conversão do fenômeno físico em energia elétrica e a complexidade na extração da energia coletada, serviram como critérios de comparação. Também foi conduzida uma análise complementar contemplando critérios de sustentabilidade, condições de acesso, integração com outras tecnologias, bem como os desafios técnicos e de inovação de cada fonte de colheita indicada como viável.

A colheita de energia configura-se como solução estratégica para alimentar nós de comunicação que monitoram e gerenciam a infraestrutura crítica da rede. A capacidade desses dispositivos de funcionarem sem necessidade de manutenção frequente garante a continuidade e a confiabilidade da rede, especialmente em áreas remotas.

A possibilidade de utilizar diferentes fontes de energia de forma integrada, como solar, térmica, vibracional e eletromagnética, permite que as SGs se adaptem a uma variedade de condições ambientais e operacionais, garantindo uma operação eficiente e confiável, independentemente das circunstâncias. Para sustentar dispositivos e sensores em tempo real, é igualmente essencial que a energia seja utilizada de maneira eficiente, evitando o comprometimento da estabilidade da rede.

A busca por eficiência energética contínua não apenas maximiza o aproveitamento dos recursos disponíveis, como também prolonga a vida útil dos componentes da rede. Nesse contexto, a crescente demanda por tecnologias sustentáveis, especialmente no contexto das SG, evidencia a urgência em reduzir a dependência de fontes de energia não renováveis. Tecnologias que captam energia de fontes renováveis, como a solar e a térmica, favorecem a operação autossustentável de componentes críticos, enquanto a integração com baterias, supercapacitores e sistemas de gerenciamento de energia potencializa a eficiência e a capacidade de lidar com variabilidades na geração e na demanda de energia.

V. Considerações e Resultados

Do ponto de vista da sustentabilidade, todas as fontes estudadas podem ser consideradas sustentáveis, pois capturam energia disponível no meio ambiente. Dessa forma, reduzem a dependência de combustíveis fósseis e contribuem para a diminuição das emissões de carbono, favorecendo um modelo energético mais sustentável. Entre as fontes avaliadas, o campo eletromagnético apresenta potencial de funcionamento contínuo sem a necessidade de armazenamento de energia, enquanto as fontes piezoelétrica, termoeétrica e solar requerem dispositivos de armazenamento para garantir a operação ininterrupta dos nós de comunicação, tornando-as relativamente mais dependentes de sistemas de apoio.

Apesar de algumas fontes operarem independentemente de integração com sistemas de armazenamento de energia, todas se mostraram compatíveis com baterias, supercapacitores e sistemas de gerenciamento de energia. Essa integração permite que os dispositivos lidem com variações na geração e na demanda de energia, como, por exemplo, o aumento repentino da potência necessária para a transmissão de dados por parte do nó de comunicação.

Para melhorar o desempenho e a eficiência das diferentes fontes, destacam-se duas estratégias principais: a otimização dos parâmetros construtivos e, a seleção de transdutores com maior eficiência de conversão. No que se refere à otimização dos parâmetros construtivos, em todos os tipos de colheita de energia é possível aumentar o desempenho mediante o aumento da área dos transdutores. Contudo, essa estratégia apresenta limitações, pois a proximidade com as fontes geradoras pode restringir o tamanho físico dos dispositivos, inviabilizando sua aplicação em determinados contextos. Além disso, as características intrínsecas dos transdutores, como os materiais e tecnologias empregadas em sua fabricação, influenciam diretamente a eficiência de conversão.

Dependendo do tipo de transdutor utilizado, a energia eletromagnética pode ser coletada em linhas de alta e baixa tensão, mas sua aplicação fica limitada à proximidade dessas linhas. Já as fontes piezoelétrica e termoeétrica oferecem maior flexibilidade, pois podem utilizar uma variedade de recursos. No caso da piezoelétrica, diferentes tipos de vibração e pressão, presentes em ambientes urbanos, industriais, residenciais e comerciais, podem ser explorados. A termoeétrica, por sua vez, é adaptável a distintos ambientes e demandas, captando energia de fontes térmicas como resíduos industriais, calor corporal ou radiação solar. A fonte solar apresenta alta disponibilidade, desde que haja incidência direta de radiação, e sua confiabilidade pode ser ampliada com a combinação de diferentes tipos de fontes, formando sistemas híbridos de colheita.

Entre os principais desafios de aplicação, destaca-se a intermitência da fonte solar, que impõe a necessidade de armazenamento de energia. Para a colheita de energia de campo elétrico, é essencial o

desenvolvimento de dispositivos eficientes capazes de operar em diferentes condições ambientais. No caso de energia eletromagnética, os desafios envolvem processos de conversão e miniaturização dos dispositivos, além da possibilidade de interferência eletromagnética que pode afetar o desempenho dos nós de comunicação.

As fontes piezoelétricas, por sua vez, apresentam desafios relacionados à durabilidade e eficiência dos materiais, pois a exposição contínua a vibrações reduz sua vida útil, exigindo projetos robustos para mitigação. A fonte termoeétrica enfrenta limitações na geração de tensão e na eficiência dos conversores quando submetidos a baixos gradientes de temperatura, exigindo inovação contínua.

De modo geral, todas as fontes avaliadas demonstraram ser viáveis para a alimentação de nós de comunicação utilizando Wi-SUN e LoRaWAN. A fonte solar requer instalação em ambientes externos, enquanto as fontes elétrica e eletromagnética dependem de redes aéreas de transmissão e distribuição, apresentando limitações em locais com linhas subterrâneas ou afastados das redes principais. A fonte piezoelétrica, embora adaptável a diferentes contextos, é mais indicada para ambientes urbanos. Já a fonte termoeétrica é especialmente adequada para monitoramento ambiental e industrial, sendo capaz de operar também em ambientes remotos.

As principais características de cada uma das fontes analisadas durante o desenvolvimento do trabalho foram resumidas na Tabela 3.

Tabela 3 - Tipos de Fontes: Vantagens, Desafios e Aplicações em Smart Grids

Tipo de Fonte	Vantagens	Desafios	Aplicação em smart grids
Solar (Fotovoltaico)	Fonte abundante e renovável, baixo custo operacional, possibilidade de arranjos em série e paralelo.	Intermitência em função da incidência solar e da sazonalidade; necessidade de aplicação de algoritmos de MPPT.	Alimentação de nós de comunicação com sensoriamento próximos às redes elétricas e medidores de energia externos.
Campo Elétrico	Energia disponível em sistemas de transmissão e distribuição; não requer contato elétrico direto.	Alta impedância da fonte; restrito a áreas com alta tensão; necessidade de isolamento adequado dos circuitos eletrônicos.	Medição de grandezas elétricas em redes de transmissão e distribuição, em estrutura de sustentação como torres e postes.
Campo Eletromagnético	Energia abundante em sistemas de transmissão e distribuição; disponibilidade de alta potência.	Flutuações de corrente podem danificar os circuitos; necessidade de circuitos de condicionamento mais complexos.	Alimentação de nós de comunicação próximos aos cabos de transmissão e distribuição, em ambientes confinados ou estruturas de sustentação.
Piezoelétrico	Sustentável, com alto ganho de tensão; fornecimento de energia a partir de vibrações de diferentes intensidades e frequência.	Dependência da intensidade da vibração; necessidade de dispositivos de fixação; possível baixa vida útil devido à exposição constante a vibrações.	Locais com vibrações provenientes de vento ou equipamentos elétricos em baixas ou altas frequências.
Termoeétrico	Aproveitamento da energia térmica desperdiçada; alto ganho de tensão sob grandes gradientes de temperatura; possibilidade de arranjos em série e paralelo.	Baixa eficiência de conversão quando o equilíbrio térmico é atingido; intermitência na geração; difícil isolamento entre áreas quente e fria.	Alimentação de nós de comunicação e sensores próximos a fontes de calor gerado por equipamentos, cabos e conversores; aplicações de menor potência a partir da irradiação solar.

VI. Financiamento

Este trabalho foi totalmente financiado pelo projeto Sustentabilidade Energética para Dispositivos Eletrônicos – *Energy Harvesting* Campo Elétrico suportado pelo Future Grid - Centro e Competência Embrapil Lactec em *Smart Grid* e Eletromobilidade, com recursos financeiros oriundos do PPI HardwareBR do MCTI, através do Termo de Cooperação 054/2023, firmado com a EMBRAPIL.

Referências

- [1] Rei H., Mizutani K., Harada H. Specification and performance analysis of Wi-SUN FAN. IEEE Open Journal of Vehicular Technology (2023).
- [2] Slim L., et al. Analysis of LoRaWAN 1.0 and 1.1 protocols security mechanisms. Sensors 22.10 (2022): 3717.
- [3] Pavana H., Deshpande R. Energy Harvesting Techniques for Monitoring Devices in Smart Grid Application. In 2020 Third International Conference on Advances in Electronics, Computers and Communications (ICAEC), Bengaluru, India, 2020, pp. 1-6.
- [4] An G., Han C., Zhang F., Liu K. Research on Electromagnetic Energy Harvesting Technology for Smart Grid Application. In 2022 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), Beijing, China, 2022, pp. 441-443.

- [5] Faheem M., Ashraf M. W., Butt R. A., Raza B., Ngadi M. A., Gungor V. C. Ambient Energy Harvesting for Low Powered Wireless Sensor Network based Smart Grid Applications. In 2019 7th International Istanbul Smart Grids and Cities Congress and Fair (ICSG), Istanbul, Turkey, 2019, pp. 26-30.
- [6] Ozger M., Centinkaya O., Akan O.B. Energy Harvesting Cognitive Radio Networking for IoT-enabled Smart Grid. *Mobile Netw Appl* 23, p. 956–966 (2018).
- [7] Hoo F. et al. 5G-Wi-SUN for Building Management System. In 2023 6th International Conference on Applied Computational Intelligence in Information Systems (ACIIS). IEEE, 2023. p. 1-6.
- [8] Hamzat A. K. et al. Application of nanofluid in solar energy harvesting devices: A comprehensive review. *Energy Conversion and Management*, v. 266, p. 115790, 2022.
- [9] Sharma H., Haque A., Jaffery Z. An efficient solar energy harvesting system for wireless sensor nodes. In 2018 2nd IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES). IEEE, 2018. p. 461-464.
- [10] Zeng X. et al. Power source based on electric field energy harvesting for monitoring devices of high-voltage transmission line. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 8, pp. 7083–7092, Ago. 2021.
- [11] Srilaket A. et al. An electric-field high energy harvester from medium or high voltage power line with parallel line. *Energy Harvesting and Systems*, 2023.
- [12] Wang X., Zha X., Tu Y., Shi G., Ye Y., Xia Y. A synchronous charge extraction piezoelectric energy harvesting circuit based on precision active control peak detection with supplement energy. In IEEE 12th International Conference on ASIC (ASICON), Guiyang, China, 2017, pp. 275-278.
- [13] Illias H. A., Ishak N. S., Mokhlis H., Hossain M. Z. IoT-based hybrid renewable energy harvesting system from water flow. In IEEE International Conference on Power and Energy (PECon), Penang, Malaysia, 2020, pp. 204-208.
- [14] Almobaied M., Al-Nahhal H. S., Salman M., Boccaletti C. Design of an efficient energy harvesting system for smart grid connection based on piezoelectric technology. In IEEE Fifth International Conference on DC Microgrids (ICDCM), Auckland, New Zealand, 2023, pp. 1-6.
- [15] Schifferli Y. Maximizing the energy harvested from piezoelectric materials for clean energy generation. In IEEE Canada International Humanitarian Technology Conference (IHTC), Toronto, ON, Canada, 2017, pp. 154-160.
- [16] Goldsmind H. J. *The Physics of Thermoelectric Energy Conversion*, IOP Concise Physics, Morgan & Claypool Publishers, 2017. Acesso em: 13 set. 2025. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1088/978-1-6817-4641-8ch1>.
- [17] Marlow Industries Inc. Single-Stage Thermoelectric Generator TG12-4 Power Generators Single-Stage Thermoelectric Module, 2022. Acesso em: 13 set. 2025. Disponível em: <https://www.coherent.com/resources/datasheet/materials/single-stage-thermoelectric-generator-tg12-4-ds.pdf>.
- [18] Yousri D., Farag H. E. Z., Sukanya V., Bijukumar B., El-Saadany E. Optimized static configuration for output power maximization of thermoelectric generator arrays with hardware validation. *Applied Energy*, vol. 377, 2025.
- [19] Terashima S., Sorimachi R., Iwase E. Series/parallel switching for increasing power extraction from thermoelectric power generators. *Micromachines*, vol. 15, no. 8, 2024.
- [20] Sharshir S. W., Joseph A., Elsayad M. M., Kandeal A. W., Abdullah A. S., Wang C., Jang S. H., An M., Ghazaly N. M., Yuan Z. Energy harvesting via thermoelectric generators for green hydrogen production: Methods and techniques. *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 190, pp. 443-463, 2024.
- [21] De Oliveira L. F. P., De Oliveira Morais F. J., Manera L. T. Development of a hybrid energy harvesting system based on thermoelectric and electromagnetic generators for use in industrial electric motors. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 66, 2024.
- [22] Di Persio F., Blecua M., Chainé A. C., Daue T., Mateo-Mateo C., Ezpeleta I., Pötschke P., Krause B., Inci E., Pionteck J., Punkari T., Keskinen J., Mäntysalo M., Melo A., Esteves D. Recyclability of novel energy harvesting and storage technologies for IoT and wireless sensor networks. *Journal of Cleaner Production*, vol. 435, 2024.
- [23] Du Y., Chen Y., Liu J., Liang Y., Yang X., Chao Y., Wang C., Yuan J., Wang W., Zhang S., Liu H., Zhou Z. Boosting thermoelectric generator (TEG) performance with tandem radiative/evaporative/phase change cooler. *Nano Energy*, 2024.
- [24] Duong V., Ebeid E. Advanced magnetic energy harvesting for charging drones from overhead powerlines. In 25th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'23 ECCE Europe), Sept. 2023.
- [25] Hosseinimehr T., Tabesh A. Magnetic field energy harvesting from AC lines for powering wireless sensor nodes in smart grids. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, pp. 4947-4954, 2016.