

ENERGY HARVESTING EM TRATORES E IMPLEMENTOS AGRÍCOLAS, UMA REVISÃO

Guilherme Macena¹, Luiz F. P. Oliveira², Flávio J. O. Moraes³

¹Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP) câmpus Sorocaba, Sorocaba-SP, Brasil
(g.macena@unesp.br)

²Instituto Euvaldo Lodi (IEL), Pato Branco-PR, Brasil (luizoliveira@ieee.org)

³Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP) câmpus Tupã, Tupã-SP, Brasil
(flavio.moraes@unesp.br)

Resumo: A agricultura 4.0 exige sensores IoT, mas sua adoção é limitada. O Energy Harvesting mitiga essa limitação ao coletar energia do meio, dispensando alimentação tradicional. Este artigo apresenta uma Revisão da Literatura sobre essa tecnologia em tratores agrícolas e seus implementos. Foram constatadas poucas publicações na área, com predomínio dos coletores por vibração, e carência de pesquisas em fontes eólica, térmica e solar. Se conclui que, apesar do avanço, ainda há muito a ser explorado.

Palavras-chave: Energy Harvesting, Ultra low power, self-powered, Internet of Things, máquinas agrícolas, agricultura de precisão.

INTRODUÇÃO

A agricultura, inicialmente uma prática camponesa realizada através de intensa intervenção manual humana, porém de baixa produtividade (Agricultura 1.0), se utilizou do desenvolvimento tecnológico decorrido das posteriores revoluções industriais para atingir um gradual avanço em escala de produção. Ao passo em que na Indústria se operavam máquinas a vapor (Primeira Revolução Industrial), houve, também, benefícios à agricultura provenientes da mecanização em tarefas como irrigação, preparação do solo e colheita (Agricultura 2.0). Com a Segunda Revolução Industrial, a prévia fonte de energia, o vapor, deu a lugar aos combustíveis fósseis (óleo e gás), que, unidos às melhorias no setor de transporte, permitiram a transferência de produtos agrícolas a longas distâncias, o que permitiu a integração do setor à cadeia produtiva alimentícia. Já na sua terceira geração (Agricultura 3.0), com a agricultura de precisão, são exploradas tecnologias de informação, permitindo a coleta de dados sobre máquinas e colheitas para suprir informações relevantes aos agricultores perante suas tomadas de decisão. Junto a isso, recursos de automação alavancaram a produtividade e eficiência do setor. Por fim, dentre o vasto impacto que a Indústria 4.0 trouxe à agricultura, é notável a integração de dispositivos IoT (do inglês, *Internet of Things*, ou, Internet das Coisas) interconectados em Redes de Sensores sem Fio (RSSF), que possibilitam uma massiva coleta de dados em tempo real (*Big Data*) que servem, em última instância, para otimizar o

manejo de cultivos, reduzir impactos ambientais negativos, mitigar a exposição dos trabalhadores aos riscos ocupacionais e, também, aumentar a eficiência de produção, muitas vezes através do uso Inteligência Artificial. Esse conceito, denominado, segundo Liu et al. (2021), como Agricultura 4.0, esbarra em certos obstáculos para a sua utilização em larga escala, incluindo desafios ambientais e logísticos significativos oriundos da dependência dos sensores por cabeamento (infraestrutura própria) ou baterias, que possuem capacidade finita e ciclo de vida limitado (JAWAD et al., 2017; KHERNANE et al., 2024).

A substituição cíclica de baterias, quando num contexto de grande quantidade de sensores interconectados em uma RSSF distribuídos por uma vasta área agrícola em plantações ou embarcados em maquinários, torna-se uma prática insustentável física, financeira e ecologicamente. De forma a mitigar essa limitação, viabilizando a eliminação ou ao menos grande diminuição de tarefa de trocas de baterias, permitindo uma fácil e ágil implantação de dispositivos e também diminuindo a pegada de carbono, as técnicas de *Energy Harvesting* (EH). Esse artifício posa como um habilitador de sensores IoT, ao permitir a captura e transdução de energia do meio onde são utilizados, seja essa natural (como solar, eólica, térmica) ou provocada por algum fenômeno produzido pelo homem (calor e campo eletromagnético de motores, por exemplo), viabilizando a criação de dispositivos com vida útil energética de longa duração e até mesmo

autossustentáveis (ELAHI *et al.*, 2020; KU *et al.*, 2016).

Se tratando de aparelhos majoritariamente pequenos em dimensão, os módulos *IoT* alimentados por EH têm a capacidade de captar níveis de energia proporcionalmente baixos (na ordem de micro ou nano Watts de potência) que precisam ser processados por componentes gerenciadores de alto rendimento. A eficiência geral de um dispositivo autossustentável é determinada não apenas pela capacidade de coleta do transdutor em si, mas, primordialmente, pelo desempenho dos circuitos eletrônicos empregados no condicionamento, regulação e armazenamento de energia. De modo geral, um sistema de EH é estruturado em três componentes principais: a fonte de energia (proveniente do ambiente externo); a arquitetura de coleta (composta pelos elementos mecânicos e eletrônicos responsáveis pela conversão e gerenciamento energético); e a carga (representada pelo dispositivo que será alimentado, como, por exemplo, um nó de sensor *IoT*) (Sudevalayam; Kulkarni, 2011).

Este artigo possui como objetivo uma investigação sobre o que tem sido desenvolvido no campo do *Energy Harvesting* em aplicações voltadas ao meio da agricultura, o que é capaz de permitir a identificação de potenciais padrões, características únicas e possíveis lacunas no conhecimento em relação a esse domínio. O conteúdo será organizado em quatro partes principais: Introdução, Material e Métodos, Resultados e Discussão e Conclusão.

MATERIAL E MÉTODOS

O método adotado para essa revisão bibliográfica se baseia nas diretrizes propostas por Torres-Carrion et al (2018), definidas no modelo denominado Revisão Sistemática de Literatura, que tem por objetivo auxiliar o pesquisador na estruturação de dados de busca, formulação de termos chave e seleção de fontes de qualidade, minimizando o viés subjetivo da pesquisa por meio de uma abordagem metódica de etapas bem delineadas. Considerando a aplicação do *Mentefacto Conceptual*, três sequências condicionadas distintas de termos de pesquisa foram criadas e imputadas nas ferramentas de pesquisa acadêmica *Google Scholar* e *IEEE Explore*, e, adicionalmente, no Portal de Periódicos da CAPES, permitindo um grande apanhado de literatura relacionada à área do conhecimento. Termos chave como “*Energy Harvesting*”, “*Ultra-low Power*”, “*Self-Powered*”, “*Agricultural Machinery*”, “*Tractor*” e “*Precision Agriculture*” foram utilizados. Ao início, como é sugerido por Torres-Carrion et al, revisões sobre o tema foram pesquisadas. Enquanto pesquisas diretamente relacionadas ao uso de EH em máquinas agrícolas não foram detectadas, outras que abordaram sobre o

uso da tecnologia em aplicações agrícolas no geral, foram. Somente após isso, foram pesquisadas publicações originais por meio dos métodos citados anteriormente, inclusive, com o adicional de investigação das referências dessas publicações de forma a aumentar as chances de obtenção de base bibliográfica sólida. A atenção majoritária foi enfatizada às pesquisas publicadas a não mais que 10 anos atrás, porém, devido à carência de volume de trabalhos publicados na esfera pesquisada, algumas obras relevantes publicadas há mais tempo também foram selecionadas.

O critério chave para a seleção ou não de estudos para uso na atual pesquisa passou pela verificação do uso de técnicas de EH voltadas a aplicações em máquinas agrícolas, explorando, principalmente, tratores e seus implementos. Algumas das informações relevantes coletadas para comparação se referem ao coletor (grandeza e tipo de coletor), tecnologia de comunicação, gerenciador de energia e *Microcontrolador* utilizado. Ademais, uma característica de muita relevância tomada como base comparativa nos trabalhos analisados foi a densidade de potência, que representa a potência gerada por um sistema de EH em relação a unidade de volume, área ou massa do seu coletor. Considerando que as diferentes fontes de energia disponíveis em um local podem exibir potencial de extração energético variável no tempo, ou até intermitente - como a energia solar, por exemplo - a densidade de potência também pode variar temporalmente, podendo, inclusive, exibir momentos de interrupção total (Ilyas et al., 2014). Portanto, avaliar como os valores apresentados se relacionam com o período de atividade de um coletor - se, por exemplo, representam uma mínima, média ou máxima - é sempre necessário. Diante disso, a densidade de potência assume posição de importante parâmetro para se prever o potencial de geração de energia de um sistema de coleta quando correlacionado com o seu contexto de uso, o que fundamenta a sua relevância na análise comparativa dos artigos estudados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No trabalho de Wei et al. (2025), é desenvolvido um sistema de medição de velocidade rotacional autônomo baseado em *TENG* (*Triboelectric Nano Generators*, ou, Nanogeradores Triboelétricos) com grande potencial de aplicação em máquinas agrícolas. Um *TENG* é capaz de gerar energia por indução eletrostática através do efeito que o nomeia, Triboelétrico, transformando fricção (energia mecânica) em energia elétrica. Na pesquisa desenvolvida, é empregada uma camada triboelétrica negativa em PTFE no estator do sistema, e uma positiva em nylon no rotor. Com o aumento da rotação do gerador, uma tensão proporcional é gerada

e, através desta, se torna possível de alimentar o próprio módulo de medição enquanto se mede a velocidade rotativa do eixo. O sistema foi capaz de carregar capacitores de 10 μF , 22 μF e 47 μF até tensões respectivas de 3,58 V, 2,22 V e 0,8 V em 140 segundos funcionando a uma velocidade de 100 RPM. Por tratar o coletor de energia como um ponto focal, os autores discorrem e desenvolvem em outros tópicos tais como gerenciamento de energia e transmissão de dados. No entanto, além do próprio elemento transdutor, é indicado que no experimento (vide Figura 1), se considerou o protocolo *Bluetooth* para a transmissão das informações, e um módulo *A/D* para a conversão dos valores analógicos do sensor rotativo em dados digitais passíveis de transmissão.

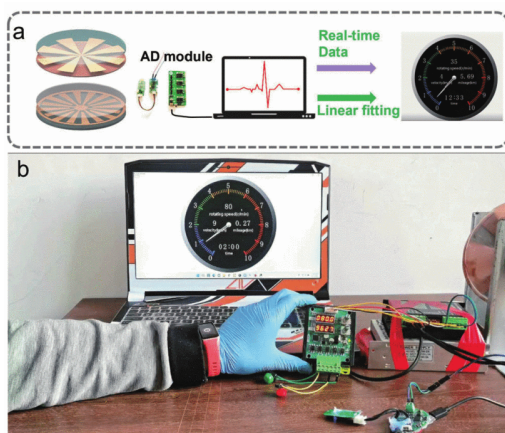


Figura 1. Esquema de funcionamento do sistema de colheita de energia (a) e protótipo em funcionamento (b). Fonte: Wei et al. (2025).

Já o artigo de Müller et al. (2010), diferentemente do anterior, tem por foco a otimização da transmissão e recepção de dados de uma RSSF voltada a máquinas agrícolas com módulos sensores inteiramente autônomos e alimentados através da colheita de energia vibracional (ver Figura 2). Os pesquisadores propõem um protocolo de comunicação customizado e totalmente síncrono, estruturado em intervalos de tempo (arquitetura *TDMA*). A abordagem foi levada em conta após o descarte, por parte dos autores, de outros protocolos não determinísticos e de longos cabeçalhos que exigiam um elevado consumo energético perante à aplicação. Ao garantir um comportamento rigoroso de tempo real, trabalhando com um cabeçalho consideravelmente menor no envio de dados, latência controlada e períodos restritos de atividade, o modelo proporciona um menor tempo de transmissão e consequente economia de energia. Com apenas um módulo de recepção, a rede é capaz de comportar 10 sensores interligados em uma topologia estrela, sendo esses módulos alimentados por um sistema de captura de energia vibracional composto por uma viga *cantilever*, fixada à estrutura do vagão, feita a partir de uma placa de aço com 3 mm de espessura com um gerador

piezoelétrico PZT-51 (espessura de 1 mm, área de 81 cm^2) fixado na sua parte de cima. O sistema de colheita, instalado na extremidade traseira de um vagão forrageiro conectado a um trator, foi projetado para uma frequência de ressonância de 60 Hz, visando coincidir com as vibrações geradas pelo motor a 1200 RPM. Em testes práticos, o coletor foi capaz de gerar potências entre 50 a 200 μW . Apesar do protótipo apresentar alguns possíveis problemas de comunicação, como potenciais erros decorrentes de interferência com dispositivos de mesma banda de transmissão, os autores foram capazes de desenvolver um sistema autossuficiente em energia e capaz de englobar uma vasta gama de sensores conectados a uma só máquina ou implemento. Essa obra se distingue das demais ao contar com uma aplicação de RSSF de forma direta.

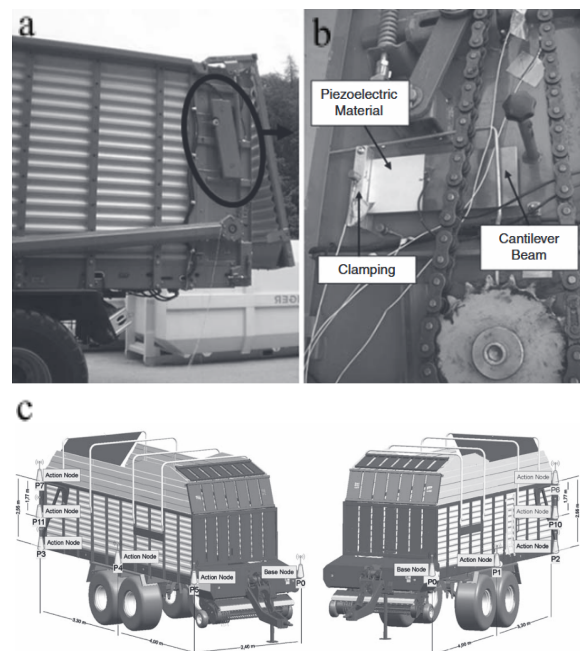


Figura 2. Posicionamento do coletor no vagão (a), exposição do coletor instalado (b) e posicionamento da rede de sensores no entorno do vagão (c). Fonte: Müller et al. (2010).

A obra de Dondi et al. (2012) exhibe um sistema de colheita de energia similar ao de Müller et al. Também para uso em tratores, porém, tendo em conta somente um módulo *IoT* (denominado como WED, ou *Wireless End Device*, do inglês, Dispositivo Sem Fio de borda) p/ sensoriamento de temperatura e vibração, com um coletor vibracional *ad hoc* e um microcontrolador de baixíssimo consumo MSP430. O WED, de outro modo, envia os dados adquiridos para o dispositivo mestre (WMD, que significa *Wireless Master Device*) que os encaminha à ECU do trator via rede Isobus. A representação visual do sistema é exibida na Figura 3. O estudo demonstra uma grande ênfase na otimização energética por meio da minimização dos períodos de atividade do

sistema. Através de recursos de software aliados ao comportamento do sensor de vibração de três eixos, o dispositivo WED é capaz de detectar quando o trator está em pleno funcionamento e só assim ativar o sensor *IoT* para medições. Contudo, se apresenta o potencial de ganho considerável na média de consumo energético ao diminuir o tempo de atividade ativa dos módulos *IoT*, atendendo concomitantemente, também, ao pleno funcionamento do monitoramento.



Figura 3. Ilustração conceitual do sistema. Fonte: Dondi et al. (2012).

Continuando na área dos geradores piezoelétricos, porém, de forma e com grandezas diferentes, um coletor piezoelétrico de metasuperfície é proposto na obra de Feng et al (2025). O intuito do protótipo é gerar energia realizando, adicionalmente, uma mútua mitigação de ruídos sonoros. Utilizando coletores piezoelétricos *ad hoc* multi camadas constituídos, principalmente, por filmes de *PVDF* e membranas ressonantes de *PET* encapsulados em resina fotossensível, o estudo apresenta resultados promissores de isolamento e absorção de som em ambientes com ruídos de baixa e média frequência em relação à geradores piezoelétricos monolíticos, com um coeficiente de absorção de 0,995 a 714 Hz e uma isolamento de som de 33,49 dB. Por meio do gerenciamento de energia de um CI LTC3588, uma densidade de potência de $23,9 \mu\text{W}/\text{m}^2$ é obtida quando o protótipo é submetido a um som de 82 Hz a uma intensidade de 100 dB, demonstrando um potencial para uso em sensores auto alimentados. O sistema de colheita passou pela sua principal validação tomando como base o som emitido por uma aeronave, porém, sua versatilidade foi comprovada através do teste em maquinário agrícola, que apesar de apresentar menor tensão gerada - 0,13 V sob 97 dB, em comparação aos 2,8 V máximos registrados - acaba por suscitar um distinto meio de colheita de energia em máquinas agrícolas, capaz de promover o duplo benefício de alimentação de sensores *IoT* e mitigação de ruídos, o que é benéfico, a exemplo, aos operadores de máquinas agrícolas, que podem estar expostos à riscos de perda auditiva, como demonstra o estudo de Cecchini et al (2024). Feng et al (2025) demonstram como mecanismos de colheita de energia podem ser utilizados para mitigar fenômenos e, simultaneamente, gerar energia.

A Tabela 1 apresenta os dados obtidos a partir das obras revisadas. Algumas lacunas podem ser observadas em determinados campos, e isso se deve ao fato de que nem todas as pesquisas consideravam todas as características anotadas, como é o caso das que tiveram como foco o coletor de energia em si. Além disso, outras obras não informaram grandezas relevantes para a apuração de certas informações, como algumas obras que não mencionaram diretamente valores de potência máxima e volume ativo do coletor para o cálculo da densidade de potência.

Nota-se uma prevalência de aplicações voltadas à colheita de energia por vibração através de geradores piezoelétricos, aparecendo em 6 dos 12 artigos estudados. O que pode, em parte, explicar essa predominância, é a alta suscetibilidade a vibrações que máquinas agrícolas apresentam, tanto devido ao seu próprio funcionamento (induzidas pelo movimento do motor) quanto pelas imperfeições do solo das fazendas e plantações (Singh et al., 2023). A segunda fonte de energia colhida que mais aparece é a de movimento rotacional, representando 4 das 12 obras. A colheita é realizada tanto por geradores triboelétricos e eletromagnéticos, quanto por sistemas híbridos.

Outro ponto de convergência observado é a proeminência da literatura vinda de instituições chinesas e italianas. É possível notar, também, que as pesquisas italianas consideradas foram realizadas por um mesmo núcleo de pesquisa.

O gerenciador de energia que mais aparece entre as pesquisas estudadas é o LTC3588, enquanto, o *MCU* mais utilizado é o *Texas Instruments* MSP430. Ambos os CIs são voltados ao baixo consumo.

Também, um aumento, nos últimos anos, na quantidade de artigos publicados sobre a subárea *Energy Harvesting* em máquinas agrícolas pode ser observado, sendo que 7 dos 12 artigos analisados foram publicados dentro dos últimos 5 anos.

É possível de se observar uma ausência na quantidade de obras sobre colheita de energia térmica, eólica e solar, fontes de energia que são utilizadas em aplicações de colheita de energia em outras áreas (Bizon et al., 2017), demonstrando uma oportunidade de expansão teórica com pertinência às máquinas agrícolas. Além disso, nenhuma aplicação em larga escala foi observada.



Tabela 1. Resumo das características das obras analisadas.

Título	Autores	País	Ano de publicação	Sensores	Coletor	Grandeza de coleta	Tecnologia de comunicação	Gerenciador de energia	MCU	Densidade de potência
<i>A Novel Piezoelectric-Electromagnetic Vibration Energy Harvesting Device With Real-Time Adjustable Resonant Frequency</i>	(Xiu et al., 2025)	China	2025	-	Piezoeletrico	Vibração (energia cinética)	-	-	-	9,1 $\mu\text{W}/(\text{mm}^2\cdot\text{g})$
<i>A Self-Powered Rotational Speed Monitoring System Based on Triboelectric Nanogenerators</i>	(Wei et al., 2025)	China	2025	Velocidade rotacional	Triboeletrico	Movimento rotacional (fricção)	Bluetooth (versão não especificada)	-	-	-
<i>A wireless sensor network using energy harvesting for agricultural machinery</i>	(Müller et al., 2010)	Áustria	2010	Vibração; monitoramento de nível e posicionamento da porta do vagão	Piezoeletrico	Vibração (energia cinética)	Protocolo TDMA ad hoc	-	MSP430	2,47 nW/mm^2
<i>Design and Development of a Broadband Vibration Energy Harvester Suitable for Tractor Exhaust Cylinder Vibration</i>	(Ma et al., 2022)	China	2022	Pressão atmosférica (MS5607)	Piezoeletrico	Vibração (energia cinética)	Interfaces SPI e I2C	Circuito de extração MSI-SECE baseado em estrutura Buck	-	12,39 $\mu\text{W}/(\text{mm}^2\cdot\text{g}^2)$
<i>Energy harvesting from bearings rotation in a seeding agriculture machine</i>	(Repetto et al., 2023)	Itália	2023	Monitoramento de rotação/falha no disco de semeadura	Eletromagnético	Movimento rotacional (eletromagnetismo)	Transmissor Bluetooth ou Wireless	Não especificado	-	6,57 $\mu\text{W}/\text{mm}^2$
<i>Hierarchical piezoelectric metasurface for acoustic energy harvesting and noise mitigation</i>	(Feng et al., 2025)	China e EUA	2025	-	Piezoeletrico	Ondas acústicas (som)	Módulo BLE (Bluetooth Low Energy)	LTC3588	-	23,9 mW/m^2
<i>Planetary Gear-Enhanced Electromagnetic and Triboelectric Self-Powered Sensing System for Corn Seeders</i>	(Ma et al., 2025)	China	2025	Sensores infravermelhos e temperatura/umidade	Triboeletrico + Eletromagnético (Híbrido)	Movimento rotacional (fricção e eletromagnetismo)	Transmissão sem fio (Módulo Wi-Fi)	-	ESP32	-
<i>Self-powered flexible wireless sensing for smart farming machinery</i>	(Xiang et al., 2026)	China	2026	Pressão, temperatura (DHT20), umidade e velocidade (TVNG)	Tribovoltaico + Triboeletrico + Eletromagnético (Híbrido)	Movimento rotacional (fricção e eletromagnetismo)	Módulo Wi-Fi	Circuito PMC com módulos TP4056 e PW5100 para bateria de 1000 mAh	ESP32	-
<i>Wireless Sensor Systems with Energy Harvesting Capabilities for Safety Enhancement in Agricultural Vehicles</i>	(Bertacchini; Larcher, 2016)	Itália	2016	Acelerômetro 3D/Magnetômetro (LSM303DLHC), Temperatura (ADT7301)	Piezoeletrico	Vibração (energia cinética)	Transceptor IEEE 802.15.4 a 2.4 GHz (CC2500), SPI, I2C	Gerenciadores LTC3588-1, LTC4070 e reguladores LDOs	MSP430	2,4 mW/m^2
<i>System With RF Power Delivery Capabilities for Active Safety Enhancement in Industrial Vehicles Using Interchangeable Implements</i>	(Bertacchini et al., 2016)	Itália	2016	Acelerômetro de 3 eixos (STMicroelectronics LIS3DH)	Radiofrequência	Radiofrequência (RF)	Transceptor IEEE 802.15.4 a 2.4 GHz (CC2500)	LTC1516	MSP430	0,46 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
<i>Enhancing safety in vehicles with implement or trailer using an autonomous wireless sensor network system</i>	(Dondi et al., 2012)	Itália	2012	Acelerômetro de 3 eixos (LIS3DH) e Sensor digital de temperatura (ADT7301)	Piezoeletrico	Vibração (energia cinética)	Transceptor IEEE 802.15.4 a 2.4 GHz (TI CC2500)	LTC3553-2	MSP430	-
<i>A vibration-powered wireless system to enhance safety in agricultural machinery</i>	(Scorcioni et al., 2011)	Itália	2011	Identificação de presença de implementos	Piezoeletrico	Vibração (energia cinética)	Transceptor IEEE 802.15.4	Conversor customizado AC-DC e circuito gestor de bateria Li-Ion	MC13224	-

CONCLUSÃO

Em vista do exposto, se conclui que o uso *Energy Harvesting* na alimentação de sensores *IoT* para maquinário agrícola é uma prática viável, o que pode ser afirmado após a análise crítica das obras correlatas encontradas. Apesar da não existência, ainda, de dispositivos *IoT* para máquinas agrícolas dotados de tecnologia de colheita de energia com real potencial de uso em larga escala, o desenvolvimento de protótipos e métodos de otimização de energia, tal como as publicações científicas recentes nesse contexto, demonstram que avanços neste domínio estão sendo continuamente atingidos.

Como citado anteriormente, tecnologias das revoluções industriais são comumente empregadas na agricultura. Além disso, uma diversa gama de aplicações de EH são consideradas em sensores *IoT* industriais, como mencionado de antemão. Logo, é possível deduzir que há ainda um grande espaço para progresso quanto ao uso dessa tecnologia no âmbito da mobilidade agrícola. A extração de calor (energia térmica), aproveitamento do arrasto do vento (energia eólica) e captação de raios solares (energia solar) podem ser possíveis caminhos de novas pesquisas sobre a colheita energética em máquinas agrícolas, assim como ainda há espaço para aumento em eficiência naquelas fontes já exploradas, com a associação de métodos de otimização existentes e melhoramento daqueles já empregados.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Este trabalho foi realizado em partes com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa Luiz Oliveira (FAPLO).

REFERÊNCIAS

BERTACCHINI, A. et al. System With RF Power Delivery Capabilities for Active Safety Enhancement in Industrial Vehicles Using Interchangeable Implements. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, [s. l.], v. 17, n. 12, p. 3471–3483, 2016.

DONDI, D. et al. Enhancing safety in vehicles with implement or trailer using an autonomous wireless sensor network system. In: *IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES)*, 2012, Istanbul. Proceedings [...]. Istanbul: IEEE, 2012. p. 234–240. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ICVES.2012.6294300>.

SCORCIONI, S. et al. A vibration-powered wireless system to enhance safety in agricultural machinery.

In: *Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, 37., 2011, Melbourne. Proceedings. Melbourne: IEEE, 2011. p. 3510–3515.

ELAHI, H. et al. Energy Harvesting towards Self-Powered IoT Devices. *Energies*, [s. l.], v. 13, n. 21, p. 5528, out. 2020.

KU, M.-L. et al. Advances in Energy Harvesting Communications: Past, Present, and Future Challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, [s. l.], v. 18, n. 2, p. 1384–1412, 2016.

BERTACCHINI, A.; LARCHER, L. A01-P02-007 Wireless sensor systems with energy harvesting capabilities for safety enhancement in agricultural vehicles. In: *Taipei, Taiwan: IEEE*, mar. 2016.

BIZON, Nicu et al. (ORGS.). *Energy Harvesting and Energy Efficiency: Technology, Methods, and Applications*. Cham: Springer International Publishing, 2017. v. 37

CECCHINI, Massimo et al. Noise Exposure, Prevention, and Control in Agriculture and Forestry: A Scoping Review. *Safety*, v. 10, n. 1, p. 15, 1 fev. 2024.

FENG, Yiyuan et al. Hierarchical piezoelectric metasurface for acoustic energy harvesting and noise mitigation. *Device*, v. 3, n. 8, p. 100756, ago. 2025.

ILYAS, Arqam et al. Wave electrical energy systems: Implementation, challenges and environmental issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 40, p. 260–268, dez. 2014.

JAWAD, H. M. et al. Energy-Efficient Wireless Sensor Networks for Precision Agriculture: A Review. *Sensors*, [s. l.], v. 17, n. 8, p. 1781, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/s17081781>.

KHERNANE, S.; BOUAM, S.; ARAR, C. Renewable Energy Harvesting for Wireless Sensor Networks in Precision Agriculture. *International Journal of Networked and Distributed Computing*, [s. l.], v. 12, p. 8–16, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44227-023-00017-6>.

LIU, Ye et al. From Industry 4.0 to Agriculture 4.0: Current Status, Enabling Technologies, and Research Challenges. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 17, n. 6, p. 4322–4334, jun. 2021.

MA, Longgang et al. Planetary Gear-Enhanced Electromagnetic and Triboelectric Self-Powered



Sensing System for Corn Seeders. *Energies*, v. 18, n. 16, p. 4236, 8 ago. 2025.

MÜLLER, G.; RITTENSCHÖBER, Th.; SPRINGER, A. A01-P01-004 A wireless sensor network using energy harvesting for agricultural machinery. *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, v. 127, n. 3, p. 39–46, mar. 2010.

SINGH, Amandeep *et al.* Real-time vibration monitoring and analysis of agricultural tractor drivers using an IoT-based system. *Journal of Field Robotics*, v. 40, n. 7, p. 1723–1738, out. 2023.

SUDEVALAYAM, Sujesha; KULKARNI, Purushottam. Energy Harvesting Sensor Nodes: Survey and Implications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 13, n. 3, p. 443–461, 2011.

TORRES-CARRION, Pablo Vicente *et al.* Methodology for systematic literature review applied to engineering and education. In: *2018 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*. Tenerife: IEEE, abr. 2018.

WEI, Xiangyu *et al.* A Self-Powered Rotational Speed Monitoring System Based on Triboelectric Nanogenerators: An Innovative Solution for Industry 4.0. In: *2025 IEEE 15th International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*. Shanghai, China: IEEE, 15 jul. 2025.

XIANG, Pengcheng *et al.* Self-powered flexible wireless sensing for smart farming machinery. *Nano Energy*, v. 148, p. 111663, fev. 2026.