**Um coletor de energia vibracional inteligente para aplicações agrícolas**

**Auteliano A. Santos1, Matheus Valente Lopes 2, Luiz Fernando Pinto de Oliveira3, Itamar Tomio Neckel 4, Flávio José de Morais 5**

1 Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, São Paulo, Brasil. aute@fem.unicamp.br

2 Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, São Paulo, Brasil. matheus.val.lop@gmail.com

3 Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, São Paulo, Brasil. luizoliveira@ieee.org

4 Laboratório Nacional de Luz Síncrotron – LNLS, Campinas, São Paulo, Brasil. itamar.neckel@lnls.br

5 Universidade Estadual Paulista– UNESP, Tupã, São Paulo, Brasil. flavio.morais@unesp.br

**Resumo**

A agricultura inteligente e sustentável está entre os desafios deste século. Com unidades agrícolas cada vez maiores, a dificuldade em geri-las se eleva. Idealmente, sistemas totalmente inteligentes e autônomos seriam empregados, permitindo o monitoramento de indicadores de qualidade, da condição de operação e do estado dos equipamentos agrícolas. Entretanto, para isso é necessário desenvolver e utilizar sensores projetados para as máquinas agrícolas, que não empreguem cabeamento para a alimentação ou dados devido à agressividade da operação, além dos custos adicionais com essas conexões. Sistemas de sensoriamento assim devem ser autoalimentados, energeticamente autogeridos, medindo parâmetros e transmitindo dados de forma otimizada, dentro dos princípios da Agricultura 4.0. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de captura de energia piezelétrico, que obtém energia da própria vibração local, desenvolvido e otimizado para aplicações agrícolas. São avaliados os arranjos estruturais conhecidos como vigas simples e espiral ortogonal; associados a imãs permanentes para extensão da largura de banda de operação.

**Palavras-chave:** Coletor de Energia, piezeletricidade, sensores autônomos.

**Abstract**

Smart and sustainable agriculture is among the challenges of this century. With increasingly larger agricultural units, the difficulty to control them increases. Ideally, the use of fully intelligent and autonomous systems is necessary, allowing the monitoring of quality indicators, operating condition, and agricultural equipment condition. For that, it is necessary to develop and use sensors designed for agricultural machines, that do not employ cabling for power and data transmission, due to the harshness of the environment and the additional costs of these connections. Such sensing systems must be self-powered, energetically self-managed, measuring parameters and transmitting them optimally, within the principles of Agriculture 4.0. This work presents the development of a piezoelectric energy harvesting system, which captures energy from local vibration, developed and optimized for agricultural applications. Structural arrangements known as simple beams and orthogonal spirals, associated with permanent magnets to extend the operating bandwidth, are evaluated.

**Keywords:** Energy harvester, piezoelectricity, autonomous sensors.

# Introdução

À medida que máquinas e sensores inteligentes se fazem presentes nas propriedades agrícolas, o montante de dados cresce em quantidade e escopo. Com isso, os processos agrícolas se tornarão cada vez mais orientados e habilitados por dados. Isso cria um novo conceito de gerenciamento, o *Smart Farming*, que organiza as atividades não somente com base na localização, mas agora aprimorados pelas informações sobre o contexto real [1].

O sistema formado por essas máquinas e sensores requer também recursos de atuação em tempo real, visando a tomada de decisões ágeis. Esses recursos normalmente incluem assistência inteligente no ciclo de implementação, manutenção e gerenciamento. Em última análise, isso significa que os dispositivos inteligentes passam a controlar o sistema [2].

Atualmente, sensores são amplamente aplicados na agricultura inteligente, para o monitoramento e o controle do ambiente de cultura visando garantir um crescimento saudável. Entre os parâmetros medidos, pode-se mencionar o nível de umidade no solo e nas plantas, a distribuição de pesticidas, o gerenciamento de resíduos, o controle de animais, de máquinas, de condição dos bens e outros.

No entanto, atender aos requisitos de energia de sensores e dos nós da rede de comunicação sem fio nas máquinas móveis demonstra ser um desafio complexo. Não tem se mostrado viável utilizar uma fonte de energia fixa, e as fontes de alimentação móveis tradicionais (baterias) exigem substituição periódicas, em operações trabalhosas, devido à sua vida útil limitada [3], além dos resíduos que podem causar poluição ambiental [4]. O mais comum é ter uma bateria única para todo o sistema, alimentada por um gerador acionado pela fonte de energia da máquina, mas isso também mantém os cabos de alimentação, diminuindo os ganhos com a transmissão sem fio, já que, de qualquer forma, a energia teria que ser levada por cabos.

Na literatura, as soluções mais frutíferas envolvem o uso de coletores de energia [5–7], que são dispositivos capazes de extrair eletricidade de diferentes fontes de energia e que, normalmente, produzem potência na ordem de micro e miliwatts. Essa energia é suficiente para alimentar sistemas de baixo consumo. A energia solar e eólica são as fontes mais conhecidas, devido à sua grande disponibilidade; no entanto, são extremamente dependentes da geografia e do clima [8] e apresentam altos custos de operação [9], além de perderem muito de capacidade de geração com a miniaturização necessária para uso em cada sensor. Dentre as outras fontes em estudo, tem se destacado a energia mecânica, sempre presente em ambientes que apresentam componentes móveis, condição encontrada em diversos locais de interesse [5], como nos ambientes agrícolas. A extração da energia cinética desperdiçada, a partir da vibração, não impacta o desempenho dos sistemas [10], ou seja, não influencia na sua eficiência global, embora possa produzir algum enrijecimento estrutural, mas mínimo.

Os coletores de energia vibracional piezelétricos (pVEH) têm sido amplamente estudados nas últimas décadas [11–13] devido ao seu mecanismo de conversão direta, flexibilidade, miniaturização simples [14], alta densidade energética [15] e alta tensão de saída [16]. Muito designs foram propostos, muitos deles baseados em vigas coletoras, por possuírem um comportamento conhecido. O objetivo principal desses designs é produzir a maior densidade de potência possível, além de possibilitar trabalho em um amplo espectro de frequências.

No ambiente da fazenda, uma fonte de vibração que pode ser apontada vem das máquinas plantadoras/semeadoras. A vibração que ocorre em serviço tem importância crítica na qualidade das lavouras, pois pode influenciar no espaçamento das plantas afetando a uniformidade espacial [17]. Tal amplitude de vibrações é influenciada diretamente pela condição do solo [18], tipo de lavoura [19], e velocidade de avanço [20]. Como características dessas vibrações, suas frequências são muito baixas, conforme observado por Zhai et al. [17], que mediram frequências in–situ de 3 a 10 Hz.

Projetar um coletor de energia que ressoe em uma frequência tão baixa quanto a das máquinas agrícolas exigiria uma viga muito longa, pois essas apresentam frequência fundamental diretamente relacionada à sua esbeltes. Essa grande dimensão pode torná-la inviável, já que o sensor influenciaria no espaço para os demais componentes críticos do processo agrícola. Assim, na busca de minimizar a frequência natural dos pVEHs, várias alternativas de projeto têm sido propostas, dentre quais destacam-se o ziguezague [21] e a espiral ortogonal (OSs) [22] devido a sua simples concepção, design compacto e modelagem direta.

No que se refere a viabilidade de utilização dos pVEHs como fonte de alimentação para circuitos sensores, um estágio preliminar de conversão DC-DC faz-se necessário, pois, além de permitir o gerenciamento dos níveis de tensão de carregamento dos elementos de armazenamento de energia (supercapacitores), algumas topologias de Circuitos Integrados (CIs) permitem realizar o algoritmo de *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) dos pVEHs, com é o caso dos CIs BQ25505 [23] e AEM30940 [24]. Parâmetros como range tensão de entrada, potência mínima de entrada, tensão de cold start e eficiência de conversão são determinantes para a escolha dos conversores DC-DC adequados para a aplicação. Em aplicações de *Internet of Things* (IoT) na área agrícola, os circuitos eletrônicos são em sua grande maioria circuitos de sensoriamento, como em [25–30] . Logo, reduzir o consumo energético de tais circuitos sensores significa buscar pela utilização de CIs e componentes eletrônicos de ultrabaixo consumo energético. Para o caso dos componentes ativos, os parâmetros de corrente no modo ativo e no modo de *deep sleep* devem ser minimizados. Já para o caso dos componentes passivos, os parâmetros de Resistência Série Equivalente (ESR) de indutores, capacitores e diodos devem ser minimizados. Dessa forma, com a maximização da geração de energia e a minimização do consumo e das perdas elétricas dos circuitos sensores, as técnicas de colheita de energia podem viabilizar a autonomia energética de dispositivos de IoT aplicados em atividades agrícolas.

Como um primeiro passo no desenvolvimento de novos sensores, com circuitos otimizados para a captura de energia, este estudo busca avaliar o uso de estruturas multivigas como coletores de energia vibracional piezelétricos no ambiente agrícola. A meta é alimentar sensores de baixos consumos, viabilizando a construção de sistemas autônomos de monitoramento e transmissão de dados em máquinas agrícolas.

# Método(s)

As configurações de coletor a serem estudadas são as vigas coletoras tradicionais, Figura 1a, e a espiral ortogonal, Figura 1b, com acoplamento magnético.

|  |
| --- |
| Figura 1- Configurações de coletores estudados: a. Viga; b. OSs |

Neste trabalho foram considerados coletores com substrato em Titânio de espessura *h*, e um filme de PZT-5A de 3 μm, responsável pela conversão de energia, que é extraído através de eletrodos interdigitados. Os demais materiais presentes foram considerados desprezível para os termos deste estudo. As propriedades utilizadas estão presentes na Tabela 1.

Tabela 1- Propriedades dos Materiais

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  | Titânio | PZT-5A |
|  |  | 103 | 64,93 |
|  |  | 45 | 24,75 |
|  |  | 0,37 | 0,3214 |
|  |  | 4.510 | 7.800 |
|  |  | – | 190 |
|  |  | – | 390 |
|  |  | – | 24 |

## Previsão dos modos de vibrar

O modelo proposto inicialmente por [21] se baseia na solução das equações de Euler-Bernoulli. Esses modelos partem das equações que descrevem a flexão,

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |

e a torção,

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2) |

Baseadas nas propriedades da seção transversal da viga, como o modulo de rigidez a flexão, *EI* [Nm²], e a torção, *GJ* [Nm²], a densidade linear, *ρA* [kg/m] e o momento de polar de inercia, *Ip* [kgm]; é possível estabelecer a deflexão, *wi* [m], e o ângulo de torção, *βi* [rad], para a posição *ri* ao longo do comprimento da *i*-ésima viga, no instante de tempo *t* [s].

Considerando a independência da parcela temporal e espacial, para prever o comportamento da estrutura, é possível adotar a forma dos modos de vibrar como a combinação de funções exponenciais. Assim o deslocamento,

|  |  |
| --- | --- |
| , | (3) |

e o ângulo,

|  |  |
| --- | --- |
| , | (4) |

são definidos.

Nessas equações, a *j*-ésima raiz do elemento *i*, *sij* [1/m], é definida pela frequência natural do sistema, *ωn*[rad/s], e as propriedades da seção transversal,

|  |  |
| --- | --- |
| . | (5) |

Os passos até este momento descrevem o comportamento de uma viga simples em condições genéricas e livre de restrições. Porém, as estruturas consistem em uma série de vigas conectadas, seja pelo engaste com sua base ou a vigas subsequentes.

A partir da forma e características da estrutura, o primeiro elemento é engastado à base, o que produz restrições em três graus de liberdade: posição,

|  |  |
| --- | --- |
| , | (6) |

 inclinação,

|  |  |
| --- | --- |
| , | (7) |

 e ângulo,

|  |  |
| --- | --- |
| , | (8) |

que podem ser agrupadas de forma matricial,

|  |  |
| --- | --- |
|  | (9) |

Observando a extremidade livre da estrutura, sabe-se que nela não existe restrição ao movimento. Assim, a estrutura apresenta esforços internos nulos, que são: força cortante,

|  |  |
| --- | --- |
|  | (10) |

momento fletor,

|  |  |
| --- | --- |
|  | (11) |

e torque,

|  |  |
| --- | --- |
| . | (12) |

Semelhantemente, também podem ser agrupadas em

| . | (13) |
| --- | --- |

Para completar o sistema, uma estrutura multivigas necessita das equações de continuidade, que são descritas em [22] e produzem um sistema,

|  |  |
| --- | --- |
| **.** | (14) |

No caso especial da viga simples, a matriz de continuidade, ***P***, é reduzida a matriz identidade.

A partir da união de (9), (13) e (14), tem-se um sistema de equações em função da frequência, *ω*:

|  |  |
| --- | --- |
| . | (15) |

A equação (15) resulta em um sistema homogêneo. Assim, busca-se um ***N*** singular, que leva a soluções não nulas de ***Aij***. Os valores de *ω* que satisfazem esta condição são as ressonâncias do sistema. Desta forma, pode-se obter as frequências naturais do sistema com

|  |  |
| --- | --- |
| . | (16) |

Sendo possível assim estabelecer valores para *ωn* e ***Aij***, que são então normalizados pela massa [21] de forma a obter a forma modal normalizada, [m].

## Modelo eletromecânico

Buscando estabelecer um modelo eletromecânico de predição do comportamento, utilizou-se o princípio de Hamilton, relacionando a Energia Cinética, [J], Potencial, [J], o trabalho das forças externas [J] e as coordenadas generalizadas, [°], em função da posição da base excitadora, *y* [m], que relacionam a resposta física do sistema a todas as formas modais, já estabelecidas e denotadas pelo contador *k*. Neste estudo são considerados até o terceiro modo abaixo de 500 Hz. A resposta física pode ser escrita da seguinte maneira,

|  |  |
| --- | --- |
|  | (17) |
|  | (18) |

A energia cinética,

|  |  |
| --- | --- |
|  | **(19)** |

pode ser expressa em função da posição da seção do coletor no tempo, *t* [s], ao longo da estrutura,

|  |  |
| --- | --- |
| , | **(20)** |

e das propriedades da seção,

Já o termo de Energia potencial, [J], do sistema em estudo apresenta dois componentes principais devido as diferentes influências: a energia potencial elástica devido a deformação da estrutura com a energia potencial elétrica devido ao comportamento capacitivo do filme piezelétrico, *Ue* [J]; e a energia potencial magnética devido aos imãs permanentes utilizados na melhoria do desempenho da estrutura, *Um* [J].

Desta maneira, a deformação e a tensão elétrica, *v* [V], constroem a energia potencial eletromecânica,

|  |  |
| --- | --- |
|  | **(21)** |

em função da capacitância equivalente do filme piezelétrico, *Ceq* [F], do coeficiente de acoplamento eletromecânico,

|  |  |
| --- | --- |
|  | **(22)** |

e das frequência naturais, *ωn,k* [rad/s].

A energia potencial proveniente da interação entre os imãs permanentes de NdFeB foi estimada segundo Lan & Qin [31], que relaciona o vetor de momento magnético, ******, e a densidade de fluxo magnético, ***BXA***,

|  |  |
| --- | --- |
|  | **(23)** |

Tendo estabelecido os principais termos de energia relevantes ao problema proposto, é possível relacioná-los pelo princípio de Hamilton,

|  |  |
| --- | --- |
|  | **(24)** |

Substituindo e reagrupando as expressões tem-se um sistema,

|  |  |
| --- | --- |
|  | **(25)** |

que relaciona excitação da base, *y* [m], com a resposta mecânica, , e elétrica, *v*, através das propriedades da estrutura e do circuito extrator, representado pela resistência equivalente neste sistema, *Ropt* [Ω], aqui calculado ótima, segundo Erturk e Inman [32].

## Otimização

Visando aumentar a potência produzida e a extensão da banda de frequência ao mesmo tempo, foi proposto um problema de otimização multicritério. O problema foi resolvido por meio do algoritmo genético interativo com pesos adaptativos, I - AWGA [33].

### Formulação do problema

Foi adotado como teste para levantamento da produção de um coletor, uma varredura na frequência de 1 a 10 Hz, com amplitude de aceleração igual a 1 g (9,8 m/s2), tal valor é comumente utilizada em estudos de pVEHs, explorando assim a não-linearidade da proposta. Os critérios de otimização, *fi*, foram definidos como: o critério *f1* é maximizar o pico de potência,

|  |  |
| --- | --- |
| , | **(26)** |

e o critério *f*2 é maximizar a banda de desempenho,

|  |  |
| --- | --- |
| , | **(27)** |

definida aqui como a fração temporal no qual o design produz potência igual ou superior a metade do máximo de potência simulado,

|  |  |
| --- | --- |
|  | **(28)** |

As variáveis de configuração a serem otimizadas são armazenadas no vetor cromossomo,

|  |  |
| --- | --- |
| . | **(29)** |

O processo todo está sujeito às restrições

|  |  |
| --- | --- |
|  , | **(30)** |

que estabelecem os limites para uma solução possível. Outros valores poderiam ser aplicados, mas este conjunto apresenta valores adequados para um coletor pequeno para máquinas agrícolas.

Além dos parâmetros dimensionais máximos e mínimos da estrutura, definidos pelas oito primeiras expressões nos componentes ***C***, foram implementados critérios de potência (*P*max), largura de banda (*B*), restrições de massa total (*Mt*) e critérios de falha (*Nf*), segundo Lopes et al. [15]. Essas restrições foram adicionadas a fim de levar a soluções com valores viáveis para essas variáveis de projeto e evitar a formação de superpopulação, o que pode atrapalhar o ritmo de evolução do conjunto de soluções.

Assim, foram estabelecidos valores mínimos de 100 *μ*W para potência e 3% para banda, além de um limite de massa total de 750,00 g, para evitar dispositivos com dimensões excessivas. Também foi estabelecido um critério de segurança superior a 1,20, devido às inúmeras incertezas e simplificações que podem separar o projeto da aplicação prática de uma nova proposta.

### I-AWGA

Primeiramente, um conjunto de cromossomos definido aleatoriamente, sujeitos a ***C***(***X***), são simulados e armazenados na população. Essas soluções são então avaliadas pela função de aptidão do algoritmo,

|  |  |
| --- | --- |
|  | **(31)** |

Esta função permite a comparação multiobjetivo entre os cromossomos.

A expressão da função objetivo é definida usando cada critério de otimização do cromossomo analisado, , e o máximo e mínimo deste critério na população atual, e , respectivamente. Em adição, há um parâmetro adiciona*,* que beneficia os indivíduos na fronteira de Pareto, que recebem *Pr*(***X***) = 1.

A evolução populacional ocorre devido ao cruzamento e mutação de cromossomos a cada geração. Esse processo começa com a seleção de dois cromossomos na população, ***XM1*** e ***XM2***, aleatoriamente segundo a técnica da roleta, na qual a probabilidade de cada indivíduo ser selecionado é proporcional a sua aptidão (*Ft*). Essa seleção é realizada até que 40 pares de cromossomos sejam selecionados.

A operação de cruzamento consiste em combinar aleatoriamente características dos pais, ***XM1*** e ***XM2***, produzindo um novo cromossomo, ***Xcr***. Se o resultado desse cruzamento apresentar ao menos uma característica de cada progenitor e satisfizer as restrições em ***C***, esse indivíduo é adicionado à população. Se as restrições não forem atendidas, um novo ***Xcr*** é gerado até que seja encontrado um cromossomo que atenda às condições de entrada na população.

Para introduzir novas características na população, um processo de mutação é realizado nos indivíduos selecionados e seus descendentes, ***XM1***, ***XM2*** e ***Xcr***; produzindo até três novas configurações possíveis (***Xmt1***, ***Xmt2*** e ***Xmtc***). O processo de mutação é definido pelo operador *Mo*, que é um valor aleatório entre 0 e 1. Este operador determina se algum parâmetro específico sofre mutação, de acordo com as regras estabelecidas na Tabela 2.

Tabela 2 – Regra de Mutação

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| *XM1**XM2**Xcr* | Operador de Mutação*Mo* [0,1] | *Xmt1**Xmt2**Xmtc* |
| Se *Mo* <0,5 | Se *Mo* ≥0,5 |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |

Os novos cromossomos estão sujeitos a restrições dimensionais (sete primeiras expressões de ***C***). Caso satisfaçam e apresentem ao menos uma mutação em relação ao original, serão avaliados. Caso contrário, o processo de mutação é refeito até que haja um indivíduo com características satisfatórias. Este conjunto de cromossomos mutado é simulado. Apenas os cromossomos que satisfazem as restrições são adicionados à população; o restante é descartado.

A população inicial é composta por 100 cromossomos gerados aleatoriamente. Em cada nova geração, até 160 novos cromossomos (***Xcr***, ***Xmt1***,***Xmt2,***e ***Xmtc*** de cada par selecionado) são adicionados, desde que satisfaçam as restrições.

Para direcionar o processo evolutivo, a população é reclassificada a cada geração segundo *Ft* e limitada a 250 indivíduos inicialmente. Quando o tamanho da população excede este valor, os piores indivíduos são removidos da população. Se algum desses indivíduos a ser removido pertencer à fronteira de Pareto, eles não são removidos e o limite populacional é estendido em 50 indivíduos.

A convergência do algoritmo é definida pela estagnação do processo evolutivo, representado pela repetição da fronteira de Pareto por mais de 100 gerações [34].

# Resultados

Resolvendo o problema de otimização proposto, foi possível levantar fronteiras de Pareto, que são apresentadas nas Figura 2 e Figura 3 para cada um dos designs avaliados. Nestes, estão destacadas as três principais configurações, que são os vencedores de cada critérios de otimização: máximapotência, máxima banda, e máxima aptidão, [**✮**]. As características destes cromossomos de destaque estão presentes nas Tabela 3 e Tabela 4.

|  |
| --- |
| Figura – População –Viga Simples |

|  |
| --- |
| Figura – População – OSs |

Tabela 3 – Vencedores da população de vigas

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  [✮] |  |   |
|  | [mW] | 0,357 | 0,357 | 0,095 |
| *B* | [ ] | 0,493 | 0,493 | 8,693 |
| *Ft* | [ ] | 2,000 | 2,000 | 2,000 |
| *h* | [mm] | 4,96 | 4,96 | 4,96 |
| *b* | [mm] | 29,17 | 29,17 | 29,17 |
| *lf* | [mm] | 165,12 | 165,12 | 97,26 |
| *mt,mms* | [g] | 53,10 | 53,10 | 139,58 |
| *dhm* | [mm] | 24,01 | 24,01 | 24,11 |
| *mmo* | [g] | 72,85 | 72,85 | 111,65 |

Tabela 4 – Vencedores da população de espirais OSs

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  [✮] |   |   |
|  | [mW] | 3,955 | 3,955 | 0,183 |
| *B* | [ ] | 0,588 | 0,588 | 11,806 |
| *Ft* | [ ] | 2,060 | 2,060 | 2,003 |
| *n* | [ ] | 13 | 13 | 5 |
| *h* | [mm] | 2,27 | 2,27 | 2,28 |
| *b* | [mm] | 23,69 | 23,69 | 23,69 |
| *c* | [mm] | 6,06 | 6,06 | 1,43 |
| *lf* | [mm] | 145,13 | 145,13 | 142,25 |
| *mt* | [g] | 37,17 | 37,17 | 4,43 |
| *mms* | [g] | 41,45 | 41,45 | 18,54 |
| *dhm* | [mm] | 13,19 | 13,19 | 13,19 |
| *mmo* | [g] | 166,5 | 166,5 | 160,45 |

É importante destacar inicialmente que a maior aptidão coincidiu com os limites de produção da população, com o cromossomo de máximo pico de potência. Isso ocorreu pois não foi encontrado uma solução que produzisse um equilíbrio entre os critérios de otimização, resultando na convexidade de ambas as fronteiras.

Ao analisar as características dos cromossomos vencedores, pode-se identificar algumas tendências, como a predominância de valores elevados para *lf*, que produzem estruturas mais flexíveis, sendo limitados pelas propriedades dos materiais.

Ao compararmos ambas as populações, podemos observar que o OSs foi capaz de atingir patamares mais elevados na produção, sendo capaz de produzir até 1000% acima da viga simples dentro do problema proposto.

Dentre os resultados apresentados, pode ser observado que alguns dos parâmetros dos vencedores foram constantes. Este fator pode indicar que a evolução se restringiu a um aparente ótimo local, sendo assim em estudo futuros a população inicial avaliada de maneira a evitar tal ocorrência e/ou reformulado o problema proposto.

# Conclusões

A agricultura inteligente requer o uso de sistemas inteligentes e autônomos, cada vez mais completos e complexos. Assim novas fontes de energia se mostram necessárias para alimentar tal conjunto.

Este estudo apresentou o desenvolvimento preliminar de um sistema de captura de energia piezelétrico otimizado para aplicações agrícolas. O foco foi na proposição e otimização das estruturas. Visando obter um resultado real e aplicável em ambiente não convencional de extração, como o ambiente agrícola, devido à baixa frequências presentes, uma otimização multicritério foi desenvolvida com o objetivo de maximizar a potência e a banda de atuação.

Os resultados demonstram ser possível construir um coletor em viga com produção de até 0,357 mW, ou ainda um OSs com até 3,955 mW. A estrutura OSs demonstrou também ser possível uma configuração com banda de atuação próxima aos 11,8% com pico de produção de 183 *μ*W.

Para o caso de aplicações IoT de baixa periodicidade de monitoramento (um pacote de dados por dia) e grande cobertura de rede (>500 m), a potência produzida pelos pVEHs do presente trabalho permitiria a autonomia de dispositivos que utilizam as tecnologias de LoRaWAN (5,1 µW) [35], Sigfox (304,9 µW) [36] e NB-IoT (109,7 µW) [37]. Para o caso de alta periodicidade e baixa cobertura, aplicações com o uso de Bluetooth Low Energy (BLE) também poderiam se tornar autossustentáveis com níveis de potência gerada dos pVEHs do presente trabalho.

Em próximos estudos devem ser avaliados experimentalmente estes designs, incluindo estudos com circuitos coletores otimizados.

# Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por financiar essa pesquisa, processo 315304/2018-9.

# Referências

1. Wolfert S, Goense D, Sorensen CAG (2014) A future internet collaboration platform for safe and healthy food from farm to fork. Annual SRII Global Conference, SRII 266–273. https://doi.org/10.1109/SRII.2014.47

2. Wolfert S, Ge L, Verdouw C, Bogaardt M-J (2017) Big Data in Smart Farming – A review. Agricultural Systems 153:69–80. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023

3. Sharma H, Haque A, Jaffery ZA (2019) Maximization of wireless sensor network lifetime using solar energy harvesting for smart agriculture monitoring. Ad Hoc Networks 94:101966. https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2019.101966

4. Khandelwal G, Chandrasekhar A, Alluri NR, et al (2018) Trash to energy: A facile, robust and cheap approach for mitigating environment pollutant using household triboelectric nanogenerator. Applied Energy 219:338–349. https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2018.03.031

5. Maamer B, Boughamoura A, Fath El-Bab AMR, et al (2019) A review on design improvements and techniques for mechanical energy harvesting using piezoelectric and electromagnetic schemes. Energy Conversion and Management 199:111973. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111973

6. Tran N, Ghayesh MH, Arjomandi M (2018) Ambient vibration energy harvesters: A review on nonlinear techniques for performance enhancement. International Journal of Engineering Science 127:162–185. https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2018.02.003

7. Yang Z, Zhou S, Zu J, Inman DJ (2018) High-Performance Piezoelectric Energy Harvesters and Their Applications. Joule 2:642–697. https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.03.011

8. Sampaio PGV, González MOA (2017) Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. Renewable and Sustainable Energy Reviews 74:590–601. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.02.081

9. Mohtasham J (2015) Review Article-Renewable Energies. Energy Procedia 74:1289–1297. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.774

10. Lopes MV, Eckert JJ, Martins TS, Santos AA (2021) Multi-objective optimization of piezoelectric vibrational energy harvester orthogonal spirals for ore freight cars. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering 43:295. https://doi.org/10.1007/s40430-021-03014-4

11. Anton SR, Sodano HA (2007) A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003-2006). Smart Materials and Structures 16:R1–R21. https://doi.org/10.1088/0964-1726/16/3/R01

12. Safaei M, Sodano HA, Anton SR (2019) A review of energy harvesting using piezoelectric materials: state-of-the-art a decade later (2008–2018). Smart Materials and Structures 28:113001. https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab36e4

13. Kim HS, Kim J-HJ, Kim J-HJ (2011) A review of piezoelectric energy harvesting based on vibration. International journal of precision engineering and manufacturing 12:1129–1141. https://doi.org/10.1007/s12541-011-0151-3

14. Wei C, Jing X (2017) A comprehensive review on vibration energy harvesting: Modelling and realization. Renewable and Sustainable Energy Reviews 74:1–18. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.073

15. Lopes MV, Eckert JJ, Martins TS, Santos AA (2020) Optimizing strain energy extraction from multi-beam piezoelectric devices for heavy haul freight cars. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering 42:1–12. https://doi.org/10.1007/s40430-019-2150-8

16. Roundy S, Wright PK, Rabaey J (2003) A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes. Computer Communications 26:1131–1144. https://doi.org/10.1016/S0140-3664(02)00248-7

17. Zhai C, Long J, Taylor R, et al (2020) Field scale row unit vibration affecting planting quality. Precision Agriculture 21:589–602. https://doi.org/10.1007/s11119-019-09684-4

18. Cujbescu D, Găgeanu I, Persu C, et al (2021) Simulation of Sowing Precision in Laboratory Conditions. Applied Sciences 11:6264. https://doi.org/10.3390/app11146264

19. Kuş E (2021) Field-scale evaluation of parameters affecting planter vibration in single seed planting. Measurement 184:109959. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109959

20. Liu YQ, Zhao MQ, Liu F, et al (2014) Vibration Test and Analysis of No-Tillage Planter on the Maize Stubble Surface. Advanced Materials Research 1061–1062:788–793. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1061-1062.788

21. Karami MA, Inman DJ (2009) Vibration analysis of the zigzag micro-structure for energy harvesting. In: Ahmadian M, Ghasemi-Nejhad MN (eds) Proc. SPIE. p 728809

22. Santos AA, Hobeck JD, Inman DJ (2016) Analytical modeling of orthogonal spiral structures. Smart Materials and Structures 25:115017. https://doi.org/10.1088/0964-1726/25/11/115017

23. Sidibe A, Loubet G, Takacs A, Dragomirescu D (2022) A Multifunctional Battery-Free Bluetooth Low Energy Wireless Sensor Node Remotely Powered by Electromagnetic Wireless Power Transfer in Far-Field. Sensors 2022, Vol 22, Page 4054 22:4054. https://doi.org/10.3390/S22114054

24. Chen J, Dai Y, Kang S, et al (2021) A Concurrent Plantar Stress Sensing and Energy Harvesting Technique by Piezoelectric Insole Device and Rectifying Circuitry. IEEE Sensors Journal 21:26364–26372. https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3064235

25. Tang X, Wang X, Cattley R, et al (2018) Energy Harvesting Technologies for Achieving Self-Powered Wireless Sensor Networks in Machine Condition Monitoring: A Review. Sensors 18:4113. https://doi.org/10.3390/s18124113

26. Zeadally S, Shaikh FK, Talpur A, Sheng QZ (2020) Design architectures for energy harvesting in the Internet of Things. Renewable and Sustainable Energy Reviews 128:109901. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2020.109901

27. Kong Q, Chen H, Mo YL, Song G (2017) Real-Time Monitoring of Water Content in Sandy Soil Using Shear Mode Piezoceramic Transducers and Active Sensing—A Feasibility Study. Sensors 2017, Vol 17, Page 2395 17:2395. https://doi.org/10.3390/S17102395

28. Javier García-Ramos F, Vidal M, Boné A, et al (2012) Analysis of the Air Flow Generated by an Air-Assisted Sprayer Equipped with Two Axial Fans Using a 3D Sonic Anemometer. Sensors 2012, Vol 12, Pages 7598-7613 12:7598–7613. https://doi.org/10.3390/S120607598

29. Oliveira LFP, Moreira AP, Silva MF (2021) Advances in Forest Robotics: A State-of-the-Art Survey. Robotics 2021, Vol 10, Page 53 10:53. https://doi.org/10.3390/ROBOTICS10020053

30. Oliveira LFP, Moreira AP, Silva MF (2021) Advances in Agriculture Robotics: A State-of-the-Art Review and Challenges Ahead. Robotics 10:52. https://doi.org/10.3390/robotics10020052

31. Lan C, Qin W (2017) Enhancing ability of harvesting energy from random vibration by decreasing the potential barrier of bistable harvester. Mechanical Systems and Signal Processing 85:71–81. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.07.047

32. Erturk A, Inman DJ (2011) Piezoelectric Energy Harvesting. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK

33. Gen M, Cheng R, Lin L (2008) Network models and optimization: Multiobjective genetic algorithm approach. Springer Science & Business Media

34. Eckert JJ, Santiciolli FM, Silva LCA, Dedini FG (2021) vehicle drivetrain design multi-objective optimization. Mechanism and Machine Theory 156:104123. https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.104123

35. Leenders G, Callebaut G, van der Perre L, de Strycker L (2020) An Experimental Evaluation of Energy Trade-Offs in Narrowband IoT. IEEE World Forum on Internet of Things, WF-IoT 2020 - Symposium Proceedings. https://doi.org/10.1109/WF-IOT48130.2020.9221010

36. Gomez C, Veras JC, Vidal R, et al (2019) A Sigfox Energy Consumption Model. Sensors 2019, Vol 19, Page 681 19:681. https://doi.org/10.3390/S19030681

37. Singh RK, Puluckul PPP, Berkvens R, Weyn M (2020) Energy Consumption Analysis of LPWAN Technologies and Lifetime Estimation for IoT Application. Sensors 2020, Vol 20, Page 4794 20:4794