TRANSPORTES
revistatransportes.org.br
anpet
associação nacional de pesquisa e ensino em transportes
anpet.org.br

Influência da resistência elétrica em um protótipo de geração de energia em pavimentos rodoviários a partir da piezoeletricidade

Influence of electrical resistance in a prototype for energy generation in road pavements using piezoelectricity

Bruno Cavalcante Mota[1], **Suelly Helena de Araújo Barroso**[2]

[1]Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil
[2]Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil

Contato: bruno.mota@coc.ufrj.br, (BCM); suelly@det.ufc.br, (SHAB)

Recebido:
10 de fevereiro de 2023
Revisado:
21 de março de 2024
Aceito para publicação:
6 de julho de 2024
Publicado:
30 de agosto de 2024
Editor de Área:
Kamilla Vasconcelos, Universidade de São Paulo, Brasil

Palavras-chave:
PZT.
Mistura asfáltica.
Sustentabilidade.

Keywords:
PZT.
Asphalt mixture.
Sustainability.

DOI: 10.58922/transportes.v32i2.2881

OPEN ACCESS
CC BY

RESUMO

A produção de energia elétrica a partir de elementos piezoelétricos no pavimento rodoviário tem sido objeto de estudo de pesquisas nacionais e internacionais. Contudo, um dos impasses é a equivalência das resistências elétricas interna e externa do protótipo. O objetivo deste artigo foi analisar a influência da variação das resistências externas em um protótipo de geração de energia. Para isso, foram aplicadas 5 cargas e 3 frequências distintas para simular o tráfego, e 5 valores de resistência elétrica. Como resultados, observou-se que para maiores frequências houve um incremento de até 90% na saída elétrica quando comparadas as menores resistências elétricas com as maiores. Ainda, a introdução do indutor e da caixa de resistência no circuito podem contribuir para a eficiência do protótipo quando aplicado em campo.

ABSTRACT

The production of electrical energy from piezoelectric elements in pavement has been the object of study of national and international research. However, one of the impasses is the equivalence of the internal and external electrical resistances of the prototype. The objective of this paper was to analyze the influence of the variation of the external resistances in a prototype of energy generation. For this, 5 loads and 3 different frequencies were applied to simulate traffic, and 5 values of electrical resistance. As results, it was observed that for higher frequencies there was an increase of up to 90% in the electrical output when comparing the lower electrical resistances with the higher ones. In addition, the introduction of the inductor and the resistance box in the circuit can contribute to the efficiency of the prototype when applied in the road area.

1. INTRODUÇÃO

O pavimento pode ser classificado como rígido, flexível ou semirrígido. No geral, a sua estrutura é composta por uma camada de revestimento, seguida das camadas granulares (base, sub-base e, se necessário, um reforço do subleito), construídas sob o subleito. É importante ressaltar que, no projeto de um pavimento, o estado de tensões e deformações aos quais a estrutura estará submetida deve ser determinado, de forma a possibilitar o dimensionamento para a vida útil de projeto sem a intercorrência de defeitos estruturais.

O pavimento rodoviário recebe em sua estrutura o tráfego de milhões de veículos que, consequentemente, geram vibrações e deformações em suas camadas. No Brasil, de acordo com o Ministério da Infraestrutura (2021), a frota veicular é composta por 108.222.494 veículos, sendo 58.125.111 apenas de automóveis. Essas vibrações podem, não só causar danos ao pavimento, mas também ocasionar um desperdício energético, visto a quantidade de energia mecânica liberada pelos veículos (Zhu, Chen e Liu, 2012).

Desde 2021, o Brasil vivencia um alerta crítico quanto ao consumo e oferta de energia elétrica. Destaca-se também que, por o Brasil ser um país com dimensões continentais, há uma limitação de geração de energia, e que existem muitas áreas onde não há disponibilidade de energia elétrica, devido à necessidade de uma rede que possibilite a chegada àquele ponto. Então, torna-se importante que sejam investigadas novas alternativas e tecnologias que possam complementar a matriz elétrica brasileira, inclusive utilizando estruturas já existentes, como é o caso das rodovias. Nessa análise é importante considerar se o tráfego existente gerará energia elétrica suficiente para compensar o investimento realizado.

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) prevê um crescimento de 3,6% ao ano até 2029 na demanda de energia no Brasil, um acréscimo de 2.900 megawatts médios anualmente (EPE, 2020). Portanto, atendê-la de modo eficiente, sustentável e acessível aos consumidores será um grande desafio para os próximos anos.

Dessa forma, a piezoeletricidade surge como uma alternativa de solução, destacada por diversos autores (Song et al., 2016; Moure et al., 2016; Najini e Muthukumaraswamy, 2017; Papagiannakis et al., 2017; Kim et al., 2018; Pinto, 2020; Wang et al., 2020; Mota et al., 2022; Heller et al., 2023; Wang et al., 2023; Yuan et al., 2024), permitindo a captação das vibrações e deformações ocasionadas. Contudo, autores como Roshani et al. (2018) e Mota e Barroso (2021) destacam que se não houver uma otimização do protótipo laboratorial, com a utilização de equipamentos para igualar as resistências internas e externas, a resposta elétrica não será máxima.

Zhu, Chen e Liu (2012) investigaram a associação de resistores em circuitos paralelos e em série para observarem a potência máxima gerada com elementos piezoelétricos. Dentre as observações, os autores destacaram uma eficiência do circuito em paralelo. Wang et al. (2023) e Yuan et al. (2024) constataram que a magnitude da potência de saída de um protótipo de geração de energia com elementos piezoelétricos varia muito com a mudança de resistência elétrica externa (0-1000 kΩ).

Nesse sentido, este artigo está inserido na problemática de identificar a resistência elétrica externa adequada para a proposição de um protótipo de geração de energia elétrica com elementos piezoelétricos e a forma de ligação do circuito entre eles. Logo, o objetivo geral deste trabalho foi analisar a resposta elétrica de um protótipo de geração de energia elétrica com células piezoelétricas, a partir da variação da resistência elétrica aplicada.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A captação de energia (do inglês *energy harvesting*) é descrita como o processo de conversão da energia ambiente em outras formas como, por exemplo, a energia elétrica (Kazmierski e Beeby, 2011). A energia é captada, convertida, armazenada e utilizada através de fontes diversas, empregando interfaces e dispositivos de armazenamento (Khaligh e Onar, 2010). Existem dois grupos principais de captação de energia: (i) as fontes de macro energia, associadas à energia hídrica, solar, eólica e oceânica e (ii) as fontes de micro energia, relacionadas às provenientes de vibrações mecânicas, movimento acústico, eletrostática, eletromagnética, calor e outras (Khaligh e Onar, 2010; Harb, 2011).

Como forma de micro geração de energia, a vibração se insere de forma promissora, podendo ser convertida por meio de sistemas eletromecânicos, eletromagnéticos e piezoelétricos (Harb, 2011). Assim, por meio das fontes de captação de energia investigadas, Harb (2011) destaca dois grupos de tecnologias com potencial para serem implementados em pavimentos: (i) utilizando a radiação solar, através de painéis fotovoltaicos e (ii) a energia mecânica proveniente das cargas dos veículos, por meio da piezoeletricidade.

2.1. A piezoeletricidade

De acordo com a Triunfo Concepa (2018), um elevado número de cristais (quartzo, turmalina, tartarato de potássio e sódio, etc.) sofrem o efeito piezoelétrico de forma natural quando apresentam estrutura interna sem simetria. Assim, ao ser aplicada uma força de tração ou compressão no material, há a ocorrência de uma polarização elétrica na sua superfície em decorrência da distância entre as cargas positivas e negativas serem alteradas.

Os materiais com propriedades piezoelétricas são capazes de gerar uma diferença de potencial entre suas extremidades quando são submetidos a deformações. De acordo com Dutoit, Wardle e Kim (2005), um sistema piezoelétrico possui um modo de acoplamento – denominado d31 ou d33. O modo d31 ocorre quando a força é aplicada perpendicularmente a direção dos polos e o d33 quando essa força é aplicada na mesma direção. Dutoit, Wardle e Kim (2005) descobriram que o modo d33, normalmente, gera uma maior quantidade de energia.

Entre os materiais piezoelétricos cerâmicos estão incluídos os titanatos de bário e chumbo ($BaTiO_3$ e $PbTiO_3$), o zirconato de chumbo ($PbZrO_3$), o zirconato-titanato de chumbo (PZT) [$Pb(Zr,Ti)O_3$], e o niobato de potássio ($KNbO_3$). A piezoeletricidade passa a ser identificada em materiais que possuem estruturas cristalinas complexas e com baixo grau de simetria. Aquecer uma amostra policristalina acima da sua temperatura de Curie, a qual um material ferromagnético ou um ímã perde suas propriedades magnéticas, possibilita o aprimoramento do seu comportamento piezoelétrico (Callister, 2016). Heywang e Thomann (1984) ressaltam quem as propriedades das cerâmicas do tipo PZT dependem da sua composição.

Mitcheson et al. (2008) ressaltam que o efeito piezoelétrico direto pode ser utilizado para micro geração de energia. Isso torna-se possível devido ao armazenamento de parte do trabalho mecânico, gerado por meio da aplicação de uma força externa, como energia de tensão elástica e parte no campo elétrico associada com a polarização induzida do material.

2.2. A utilização da piezoeletricidade em pavimentos rodoviários

Yao et al. (2011) testaram duas geometrias para um transdutor piezoelétrico do tipo *Bridge* (arco e trapezoidal). Eles foram testados em uma *Universal Test Machine* (UTM) sob diferentes frequências e cargas distribuídas. A saída de tensão foi registrada por um osciloscópio, sendo obtidos 4 grupos de dados. A máxima tensão de saída registrada foi de 232 V, a partir do transdutor de arco, com a aplicação de uma pressão de 0,4 MPa e frequência de 5 Hz. Para o formato trapezoidal, o máximo de tensão obtido foi de 106 V, mostrando uma maior eficiência do tipo arco.

Wang e Sun (2016) desenvolveram um protótipo com elementos piezoelétricos quadrados de 16 mm, com 0,2 mm de espessura, inseridos em um anel de indução. Os autores obtiveram os efeitos dos parâmetros da estrutura sobre a tensão em circuito aberto. A partir da instalação do protótipo 4 cm abaixo do topo da camada de revestimento, obtém-se uma tensão de saída de,

aproximadamente, 64,4 V, com a aplicação de uma pressão de 0,7 MPa. Ainda, para uma frequência proveniente do veículo de 15 Hz, foi possível observar uma potência de saída de 0,705 mW.

Song et al. (2016) criaram e otimizaram um sistema de captação de energia mecânica com a utilização de elementos piezoelétricos em modelo de viga. Para isso, ajustaram a frequência natural dos feixes com a utilização de uma massa em sua extremidade, considerando a vibração em pavimentos ocasionada pela frequência de veículos trafegando entre 60 km/h e 80 km/h. O sistema foi composto com 48 elementos piezoelétricos, com dimensões de 30 × 30 × 10 cm, e implementado a 5 cm da superfície do revestimento asfáltico. A partir dos resultados obtidos, os autores afirmaram que a coletora de energia pode gerar até 8,19 mW/m^2, com uma potência de saída máxima de 736 mW. Esses autores ainda estimaram que com o tráfego de 600 veículos por hora, a densidade total de energia de saída seria de 4,91 Wh/m^2.

Najini e Muthukumaraswamy (2017) apresentaram um sistema baseado em simulação técnica para apoiar o conceito de geração de energia a partir do tráfego rodoviário utilizando materiais piezoelétricos. Para isso, foi simulada a implantação de um sistema real de rodovia com a utilização dos cristais piezoelétricos no software MATLAB. Com a instalação de 3.280 células piezoelétricas em 1 km de rodovia, um tráfego de 500 veículos por hora, a uma velocidade de 100 km/h, seria possível gerar 187,23 kWh de energia. Ainda, analisaram o investimento que possuía vantagem econômica ao ter seu custo nivelado ao de outras fontes renováveis de energia para o caso de aplicação nos Emirados Árabes.

Ding et al. (2018) utilizaram vigas elásticas de camada dupla, inseridas sobre o solo da sub-base do pavimento, no intuito de investigar experimentalmente a coleta de energia piezoelétrica em estradas por meio do tráfego de veículos. O máximo de potência obtido foi $1,5 \times 10^{-3}$ W, para a condição de solo seco da sub-base com 60 cm de espessura, uma placa de concreto de 5 cm de espessura e uma força de 7.500 N sendo aplicada. Os resultados mostraram, ainda, que a influência da posição do transdutor sobre a tensão de saída e potência deve ser considerada e que a espessura do painel de concreto e a condição do solo da sub-base pode afetar a tensão e a potência de saída do transdutor piezoelétrico.

Mota e Barroso (2021) realizaram simulações multifísicas em diferentes geometrias de elementos piezoelétricos, de forma estacionária e dinâmica. Os autores verificaram que a espessura da célula é a propriedade geométrica que mais influenciou no potencial elétrico gerado, sendo capaz de produzir até 306,37 MW de potência elétrica por ano.

Zhang, Ding e Wang (2021) destacaram que em uma situação prática, o terminal de saída do circuito do transdutor piezoelétrico será conectado a equipamentos elétricos de diferentes valores de resistência. Os valores de resistência de diferentes características terão um impacto significativo sobre a corrente e a tensão. Os autores ainda ressaltam que os elementos piezoelétricos existentes têm um problema comum: a grande tensão é acompanhada por uma pequena corrente, mas a corrente é essencial para a coleta de energia elétrica. Os resultados mostraram que a corrente efetiva de um transdutor piezoelétrico diminui com o aumento da resistência de carga, enquanto que com o aumento da frequência de carga, a corrente de saída aumenta em graus variados.

Zhu, Chen e Liu (2012) e Jiang et al. (2014) testaram formas de associação dos resistores para atingir a resistência adequada. Enquanto que Cao et al. (2020) testaram a resistência de carga em paralelo na extremidade do modelo de fonte de carga desenvolvido por eles. Nesse sentido, são realizados testes da saída de corrente dos transdutores piezoelétricos em configurações distintas de empilhamento ou de conexão de circuito, seja em série ou em paralelo.

3. MÉTODO DE PESQUISA

O método de pesquisa consistiu da realização de simulações computacionais com as células piezoelétricas arranjadas em um protótipo, a partir de um *software* de análises multifísicas, o COMSOL Multiphysics. Assim, foram simulados quatro arranjos com as células piezoelétricas entrepostas entre placas de cobre e um corpo de prova (CP) de mistura asfáltica. O protótipo concebido foi submetido à aplicação de cargas, frequências e resistências, permitindo verificar a voltagem e a potência obtida.

Para a composição do protótipo, foram selecionados três materiais: (i) CP de mistura asfáltica padrão; (ii) placas de cobre e (iii) células piezoelétricas. As dimensões adotadas foram de 100 mm × 100 mm para as placas de cobre, 100 mm de diâmetro e 50 mm de altura para o CP e 8,56 mm de diâmetro e 6,20 mm de altura para as células piezoelétricas. As placas de cobre foram selecionadas para a avaliação do potencial elétrico gerado dos sensores ser medido numa associação em paralelo, permitindo a condução de eletricidade. O CP da parte inferior não foi incluso na análise, por não interferir na potência gerada (ver Figura 1).

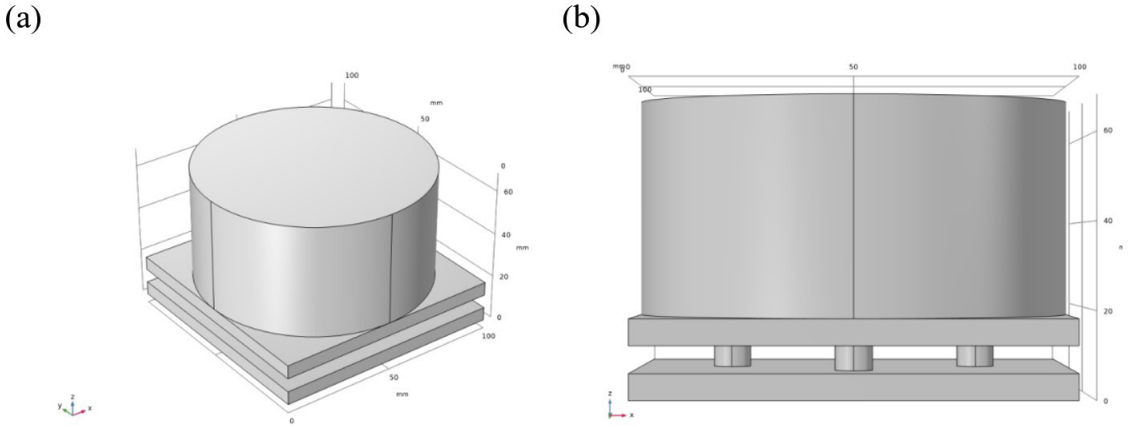


Figura 1. Protótipo analisado. (a) visão 3D do protótipo (b) visão lateral do protótipo.

A mistura asfáltica possui módulo de elasticidade (E) igual a 8.082 MPa, simulando a presença de cal em sua composição; massa específica (δ) de 2.240,00 kg/m^3 e coeficiente de Poisson (υ) de 0,35. As placas de cobre possuem E de 110 GPa, δ de 9.310,83 kg/m^3, υ de 0,35 e condutividade térmica igual a 400 W/m×K. Esses dados são referentes aos dados fornecidos no próprio *software*, com exceção das densidades e do módulo de elasticidade da mistura, proveniente de Vale (2020). As células piezoelétricas foram definidas com o material PZT-5H, uma constante piezoelétrica (d33) de 450 × 10^{-12} C/N, δ de 7.816,63 kg/m^3 e temperatura de Curie (TC) de 250 °C, conforme o fabricante. O PZT-5H foi escolhido com base nas aferições da análise bibliográfica, sendo o material mais utilizado e com melhores respostas dielétricas.

A escolha da quantidade de células baseou-se na observação de problemas de fraturamento precoce dos elementos piezoelétricos quando submetidos às cargas muito elevadas. Dessa forma, foram escolhidas 4, 8 e 16 células para verificar o ponto ótimo entre a potência gerada e a quantidade de elementos, de modo que o sistema resista às cargas dinâmicas as quais o pavimento rodoviário é submetido. Não foram testadas quantidades inferiores a 4 devido a proporção de 6:1.000 entre a área da célula piezoelétrica e a área da placa de cobre, possibilitando que, ao utilizar menores quantidades de célula, as tensões não se distribuíssem de forma efetiva aos elementos (ver Figura 2).

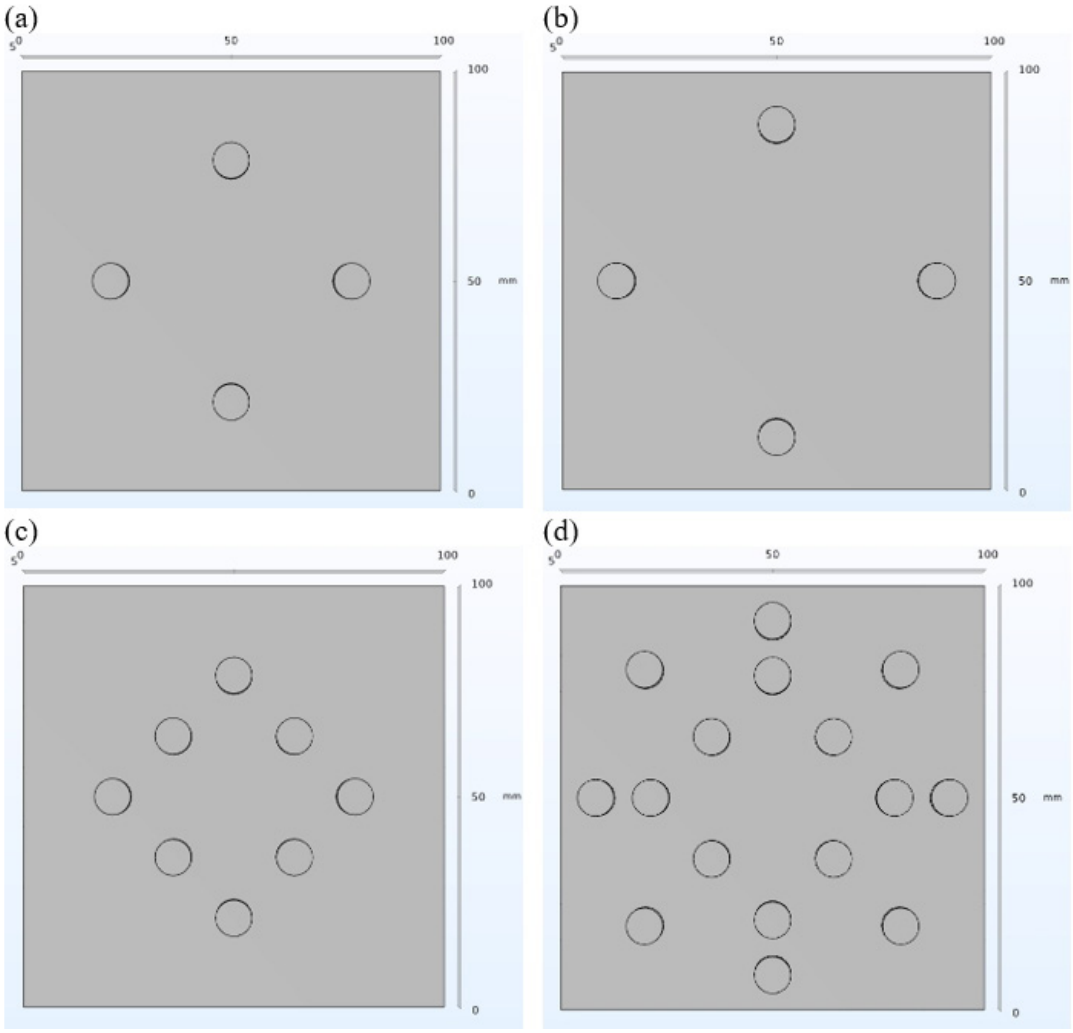


Figura 2. Distribuição das células piezoelétricas entre as placas (a) 4 células; (b) 4 células mais espaçadas; (c) 8 células e (d) 16 células.

Para verificar a potência (em mW) e a tensão elétrica (em V), foram aplicadas cargas de 3,4 kN, 5,1 kN, 6,8 kN, 8,5 kN e 10,2 kN no topo do corpo de prova, de forma distribuída por toda a área, correspondendo às pressões de 0,43 MPa, 0,65 MPa, 0,87 MPa, 1,08 MPa e 1,30 MPa, respectivamente. Yoder e Witczak (1975) e Medina e Motta (2015) destacam que a pressão dos pneumáticos no pavimento rodoviário varia de 0,15 a 0,70 MPa. Dessa forma, as forças escolhidas abrangem uma ampla variedade de tensões, possibilitando obter a potência específica para qualquer valor ao qual o pavimento esteja submetido. Para simular as velocidades dos veículos foram adotadas as frequências de 5 Hz, 10 Hz e 20 Hz, que correspondem a velocidades de 30 km/h, 60 km/h e 120 km/h, respectivamente.

Outra consideração importante foi acerca da resistência do protótipo. Conforme Roshani et al. (2018) e Mota (2019), para que se obtenha uma potência elétrica máxima, a resistência interna (R_I) do protótipo deve ser igual a resistência externa (R_E). A R_I é obtida a partir da Equação 1 e foi utilizada nas simulações realizadas nessa etapa.

$$R_I = \frac{1}{2\pi cf} \tag{1}$$

em que, c é a capacitância interna do protótipo (em F) e f é a frequência aplicada no protótipo (em Hz). O valor de R_l é obtido em MΩ. A capacitância interna do protótipo depende do número de discos piezoelétricos. A Tabela 1 apresenta todos os parâmetros piezoelétricos adotados para as combinações de células. Esses são os valores ótimos de resistência para cada situação de frequência e quantidade de células aplicadas, que possibilitarão retornar a máxima potência elétrica obtida no protótipo, calculados a partir da Equação 1.

Após a análise de variação de resistências, foi verificada a influência de implementação de uma bobina no circuito elétrico, em conjunto com a caixa de resistência elétrica para controle da potência de saída. Para isso, foi necessário recorrer à teoria de circuitos elétricos, constituídos por indutores, capacitores e resistores, que está baseada nas leis de Kirchhoff que diz que: (i) O fluxo líquido de corrente em cada nó de uma rede é nulo e (ii) O somatório das quedas de voltagem numa malha fechada de uma rede é nulo. Além das leis de Kirchnoff, tem-se as relações entre a corrente e a voltagem dadas nas Equações 2 a 4.

Tabela 1: Parâmetros físicos e elétricos para o protótipo.

Quantidade de células	**4**			**8**			**16**		
Espessura (m)	0,0062			0,0062			0,0062		
Área (m^2)	$2{,}3020 \times 10^{-4}$			$4{,}6039 \times 10^{-4}$			$9{,}2078 \times 10^{-4}$		
d33 (C/N)	450×10^{-12}			450×10^{-12}			450×10^{-12}		
ε_0 (F/m)	3400			3400			3400		
ε_r (F/m)	$8{,}85 \times 10^{-12}$			$8{,}85 \times 10^{-12}$			$8{,}85 \times 10^{-12}$		
Capacitância (F)	$1{,}1172 \times 10^{-9}$			$2{,}2344 \times 10^{-9}$			$4{,}4688 \times 10^{-9}$		
Frequência (Hz)	5	10	20	5	10	20	5	10	20
Resistência (MΩ)	28,4919	14,2460	7,1230	14,2460	7,1230	3,5615	7,1230	3,5615	1,7807

$$V = RI \tag{2}$$

$$C\frac{dV}{dT} = I \tag{3}$$

$$L\frac{dI}{dt} = V \tag{4}$$

em que R é a resistência em ohms; I é a corrente em ampère; V é a voltagem em volts; C é a capacitância em farads; L é a indutância em henrys.

Para gerar energia elétrica a partir de elementos piezoelétricos, é necessário haver um circuito integrado de capacitor, resistor e indutor, conectados em paralelo (ver Figura 3). Na Figura 3, o protótipo, representado pelas placas de cobre e células piezoelétricas, é identificado como o capacitor (Ca). Esse Ca simula a situação para a quantidade de células que retorna os melhores valores de potência elétrica. Os demais elementos são externos para observar o comportamento da corrente e voltagem desse sistema e, assim, permitir igualar a resistência interna do protótipo à externa para retornar os valores ótimos de potência elétrica.

O indutor, também chamado de bobina, é um dispositivo elétrico capaz de armazenar energia criada em um campo magnético formado por uma corrente alternada (CA). Esse componente é usado em circuitos elétricos, eletrônicos e digitais, para armazenar energia através de um campo magnético.

Assim, ele é utilizado nesse sistema para impedir variações de corrente elétrica. Os elementos piezoelétricos funcionam como capacitores e a caixa de resistência externa como um resistor.

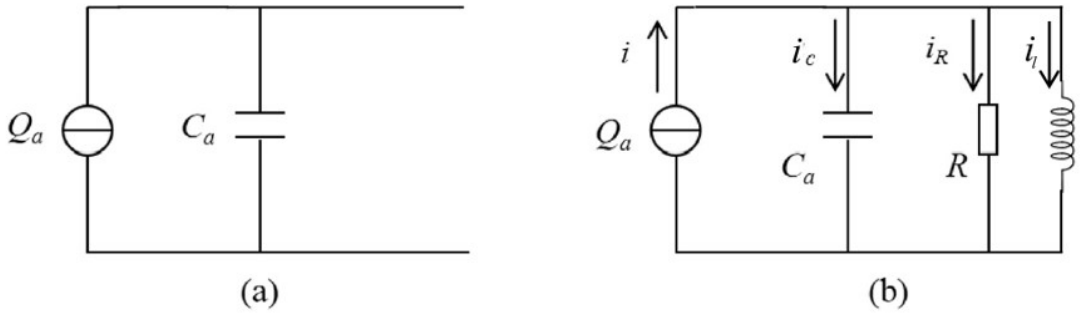


Figura 3. Modelo equivalente e circuito de saída de energia. (a) sem controle de resistência externa; (b) com controle de resistência externa.

3.1. Limitações do estudo

As análises realizadas neste artigo dizem respeito às simulações computacionais. Nesse sentido, o estudo apresenta limitações quanto a previsão de comportamento do protótipo em campo. Quanto à rigidez da mistura asfáltica: quando ela é modificada, há variação direta na potência elétrica final. Quanto menor a rigidez da mistura, menor será a potência elétrica. Para essa observação, foi simulada a resposta elétrica de uma mistura com módulo de elasticidade inferior ao adotado neste artigo, resultando em valores inferiores de potência elétrica máxima.

Outra limitação esperada em campo é com relação ao ponto de aplicação da carga. Ela precisa ser centrada para oferecer uma distribuição uniforme das tensões para os elementos piezoelétricos. Nesse sentido, quando a roda do veículo não passar exatamente no centro, haverá a minoração da potência elétrica máxima prevista nas simulações. Essa minoração só é possível de investigar com a construção de trechos experimentais.

Outros fatores podem influenciar na minoração das respostas elétricas, como: o IRI, o afundamento de trilha de roda (ATR), a distribuição das tensões no protótipo, a posição de aplicação da carga, o sistema de drenagem, entre outros fatores. Para evitar problemas com drenagem, umidade e segurança quanto a choque elétricos, o protótipo deve ser instalado em caixas de proteção, similares a adotada por Duarte, Champalimaud e Ferreira (2016). Nesse sentido, para obras de recuperação, as caixas seriam retiradas e instaladas novamente após os procedimentos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram testadas as resistências apresentadas na Tabela 1, para aplicação das frequências analisadas. A Figura 4 apresenta os valores de potência, conforme a resistência aplicada e a quantidade de células piezoelétricas.

Assim, pelos gráficos da Figura 4, observa-se a sensibilidade da potência à variação da resistência interna do protótipo. Para a frequência de 5 Hz, em resistências mais altas (gráficos de 4a a 4d) apresentou-se um coeficiente angular mais elevado, abrangendo um maior intervalo de potências geradas para as forças aplicadas. Para as situações de 4 células, 4 células mais espaçadas, 8 células e 16 células, esse intervalo abrange 17,9-160,1 mW; 17,9-160,7 mW; 9,0-81,1 mW e 4,7-41,8 mW; respectivamente. Para a situação de resistências mais baixas, esse intervalo é de 7,6-68,3 mW; 7,7-68,6 mW; 3,9-34,6 mW e 2,0-17,8 mW; em sequência para 4, 4+e, 8 e 16 células. Ressalta-se que

as resistências foram reduzidas em 75%, quando comparadas as mais baixas com as mais altas. Contudo, as potências diminuíram 57,4% para o intervalo citado. Ainda, notou-se a proximidade da curva a uma reta para as resistências mais baixas, na situação de 5 Hz de frequência.

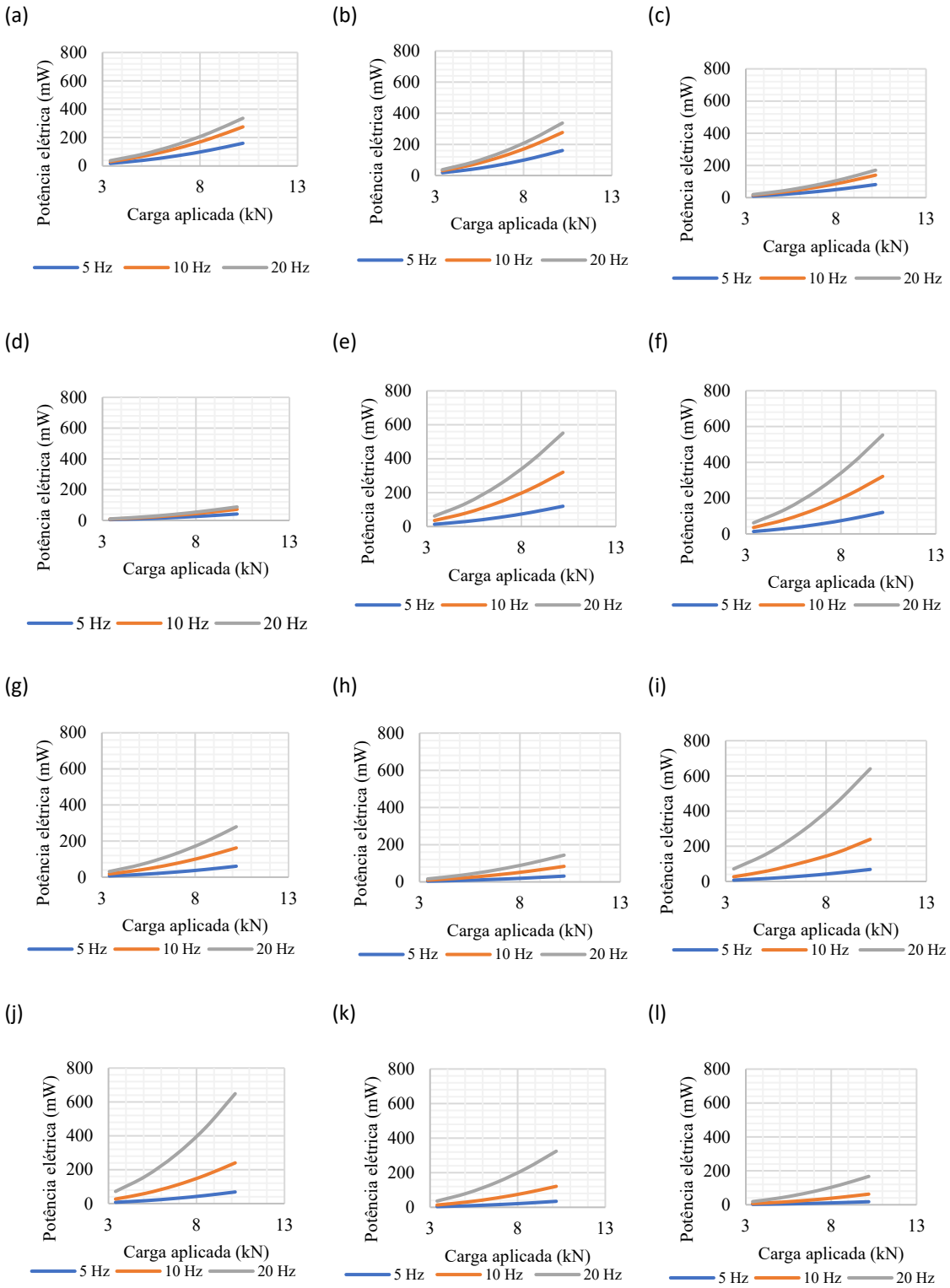


Figura 4. Saídas elétricas para as variações de resistência. Resistências de 28,4919 MΩ (a, b); 14,2460 MΩ (c, e, f); 7,1230 MΩ (d, g, i, j); 3,5615 MΩ (h, k) e 1,7807 MΩ (l); 4 células (a, e, i); 4+espaçadas (b, f, j); 8 células (c, g, k) e 16 células (d, h, l).

Com relação à frequência de 10 Hz, o seu melhor comportamento ocorreu para a resistência intermediária testada (gráficos de 4e a 4h), em ambas as situações de variação de quantidade de células piezoelétricas. Como exemplo, cita-se a potência obtida para a carga de 10,2 kN na situação de 4 células mais espaçadas, no valor de 321,4 mW para a resistência de 14,2460 MΩ. Esse valor é reduzido para 276,4 mW na resistência de 28,4919 MΩ, representando uma queda de 14,0% para uma resistência 50% superior a ótima. Ainda, decai para 240,4 mW, representando 25,2% a menos para a resistência de 7,1230 MΩ, que corresponde à 50% da ótima.

Para a frequência de 20 Hz, a menor resistência testada para cada combinação de células foi a que apresentou o máximo de potência. Quando comparados os valores de potência elétrica para R = 7,1230 MΩ com R = 28,4919 MΩ, houve um aumento de, em média, 90,6%. Na situação de 4 células mais espaçadas, com aplicação de 10,2 kN, a potência máxima obtida para a menor resistência foi de 648,8 mW, enquanto que para a maior foi 337,2 mW. Nos gráficos de 4i a 4l foram apresentadas as potências em função da frequência, para cada situação de resistência, de acordo com a aplicação da força de 10,2 kN em 4, 4+e, 8, e 16 células, possuindo como coeficiente de variação apenas a quantidade de células piezoelétricas. O comportamento das curvas repete-se para as demais forças testadas.

A partir desses resultados, realizou-se uma simulação para a situação de inserção do indutor no circuito elétrico. Para isso, utilizou-se das Equações de 2 a 4 para elaborar um sistema de equações, encontrando-se o valor da tensão elétrica gerada pelas células (capacitor) e a corrente do indutor. Considerando-se um circuito elétrico paralelo como o da Figura 3, i_c, i_r e i_L são as correntes que passam no capacitor, resistor e indutor, respectivamente, no sentido indicado pelas setas. Desse modo, pelas leis de Kirchhoff, tem-se o sistema de Equações 5:

$$\begin{cases} i_c + i_r + i_L = 0 \\ V_c - V_r = 0 \\ V_r - V_i = 0 \end{cases} \tag{5}$$

Aplicando o sistema de Equações 5 nas Equações 2 e 4, obtém-se o sistema de Equações 6:

$$\begin{cases} \dfrac{dV_c}{dt} = -\dfrac{V_c}{RC} - \dfrac{i_L}{C} \\ \dfrac{dI_L}{dt} = \dfrac{V_c}{L} \end{cases} \tag{6}$$

Esse sistema retorna autovalores e autovetores complexos. Assim, a solução geral é dada por (Equação 7):

$$\vec{x}(t) = c_1 \begin{bmatrix} -e^{-t}\cos(-t) - e^{-t}sen(-t) \\ e^{-t}\cos(-t) \end{bmatrix} + c_2 \begin{bmatrix} e^{-t}\cos(-t) - e^{-t}sen(-t) \\ e^{-t}sen(-t) \end{bmatrix} \tag{7}$$

Sendo, $\vec{x}(t) = \begin{bmatrix} V_c \\ I_l \end{bmatrix}$.

Por ser um problema real, como condições iniciais, tinha-se apenas que a voltagem no tempo igual a zero seria nula, visto ser necessário um carregamento inicial para a geração de tensão elétrica. Assim, apenas com essa condição inicial não seria possível encontrar os valores de C1 e C2 da solução geral. Então, para realizar uma análise paramétrica, foram estipulados valores de C1 e C2 para verificar o

comportamento da tensão no capacitor e da corrente no indutor (x1 e x2). Foram adotados valores iguais e observado o comportamento. A Figura 5 apresenta esses resultados.

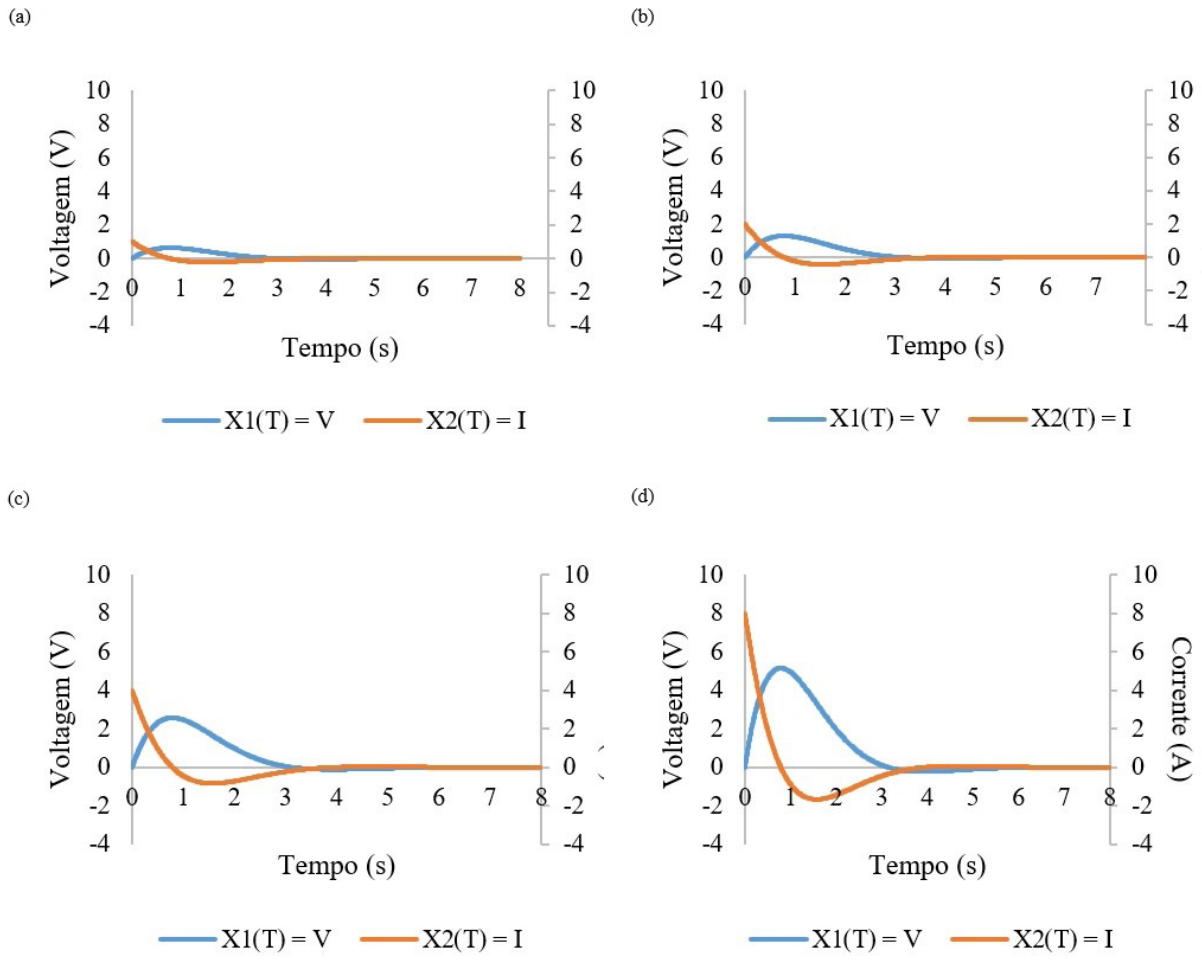


Figura 5. Variação da tensão elétrica a partir das células e da corrente do indutor. (a) C1 e C2 iguais a 1; (b) C1 e C2 iguais a 2; (c) C1 e C2 iguais a 4; (d) C1 e C2 iguais a 8.

Os gráficos da Figura 5 mostram que a tensão cresce com o tempo de carregamento no protótipo e decai com o tempo, tendendo a zero. Pelas demonstrações, mostra-se que o pico de tensão ocorre com um tempo próximo a 1 segundo de carregamento no protótipo. Também se percebe que quando as constantes C1 e C2 aumentam, esse valor de tensão e da corrente no indutor também crescem.

Quanto à introdução do indutor no circuito, o campo magnético produzido pela bobina colocada à distância r das células piezoelétricas, representadas pelo capacitor, provoca tensão mecânica sobre as placas de cobre de uma base quadrada. Tais tensões sobre o PZT geram a compressão e descompressão da cerâmica PZT que, por sua vez, influencia para a ocorrência de um sinal elétrico em sua saída, manifestado pelo pico de tensão nos gráficos da Figura 5. O sinal gerado pelo material piezoelétrico é proporcional ao valor da corrente monitorada, sendo acrescido pela força mecânica aplicada pelos veículos.

No campo, nos gráficos da Figura 5 está representado o momento em que os veículos incidem sob o protótipo, gerando a voltagem por meio do efeito piezoelétrico direto. Essa voltagem tende a zero quando o veículo cessa a aplicação da carga. Os resultados mostram que a corrente efetiva do protótipo diminui com o aumento da resistência de carga, o que está de acordo com a lei de Ohm.

Da mesma forma, com o aumento da força de carga vertical, a corrente aumenta. Com o aumento do valor da resistência de carga, a corrente decai mais rapidamente e se torna mais moderada.

Assim, considerando um tráfego de 100 veículos por hora, sendo 70 veículos de passeio e 30 com eixo padrão simples de 80 kN, a uma velocidade de 60 km/h, seria possível gerar até 64,69 MWh de energia acumulada para 10.000 protótipos aplicados em 1 km de rodovia, em um mês. Essa análise parte do princípio de que todos os veículos teriam contato com o protótipo e teriam a resistência interna do protótipo igual a externa, controlada pela caixa de resistência e pelo indutor. Em vias expressas, por exemplo, em que a velocidade pode ser superior a 120 km/h, a energia acumulada pode chegar a ser 260% maior que a de 60 km/h.

Para obter esse resultado, foi utilizada a equação do gráfico da Figura 4j (Equação 8), que representa os valores ótimos de potência elétrica para 4 células mais espaçadas, considerando 10 Hz de frequência, que seria equivalente a 60 km/h. Os valores de carga para veículos de passeio foram de 1,98 kN e de 6,9 kN para eixo padrão de veículos pesados, conforme Medina e Motta (2015).

$$y = 2,6026x^2 + 0,9639x - 2,72 \quad (8)$$

A análise dos custos foi realizada de forma simples, considerando apenas os custos com aquisição de material para a instalação da situação ideal do protótipo: (i) 10.000 caixas de resistência; (ii) 20.000 placas de cobre e (iii) 40.000 células piezoelétricas. Os valores obtidos foram consultados diretamente com empresas especializadas no tipo de produto requerido. A Tabela 2 apresenta os preços unitários e totais de cada elemento, consultados em janeiro de 2023.

Tabela 2: Preços dos equipamentos.

Material	Especificação	Preço unitário	Preço total
Caixa de resistência	Caixa de Resistência Padrão; Megabras CPR-15G	R$ 2.909,99	R$ 29.099.900,00
Placa de cobre	Chapa cobre M/D CH 6,35 × 100 mm × 100 mm	R$ 350,00	R$ 7.000.000,00
Células piezoelétricas	Ultrasonic Piezoelectric Ceramic Cylinder 8,56×6,2 mm - PZT5H	R$ 12,95	R$ 518.000,00

Logo, apenas com material para otimização do protótipo seriam gastos R$ 36.617.900,00. Ainda devem ser considerados os procedimentos de execução de obras rodoviárias, apreciando os custos para instalação dos protótipos entre as camadas de revestimento e *binder* no trecho.

Para a análise de comparação dos custos, foi considerada a situação simuladas de geração de energia que resultaria em 64,69 MWh/mês. Essa quantidade de energia seria capaz de abastecer até 417 residências no entorno da rodovia, considerando um consumo médio de 155 kWh/mês. O preço médio do kWh no Ceará é R$ 0,68, considerando o adicional da bandeira vermelha (ENEL, 2023). Dessa forma, com a inserção dos protótipos em rodovia seria possível economizar R$ 43.951,80. Então, para suprir os gastos com material e execução do revestimento, seriam necessários 69 anos, no mínimo tornando-se inviável do ponto de vista econômico.

Ao considerar outras fontes de energia existentes no Ceará como a eólica que produz 523,25 GWh/mês e a solar com 39,08 GWh/mês (referência de janeiro de 2023), a energia produzida em 1 km de rodovia por intermédio da piezoeletricidade representaria 0,015% do total da energia eólica

e 0,19% do total de energia solar produzidas no estado. Contudo, caso fosse instalada em uma extensão maior, poderia ter chances de expandir a parcela de contribuição na matriz elétrica.

Os custos com aerogeradores de energia eólica podem chegar a R$ 4,64 milhões por MWh instalados, enquanto que para a energia solar esse valor fica na faixa de R$ 3,4 milhões (Blue Sol, 2020). Esses valores tornaram-se viáveis com a instalação de equipamentos durante o passar dos anos, permitindo que o retorno do investimento ocorresse de forma mais acelerada.

O mesmo pode acontecer com a energia piezoelétrica. Apesar dos custos serem elevados e até difíceis de estimar, como é o caso deste artigo, com o avanço das pesquisas na área e da fabricação de tecnologia local, como elementos piezoelétricos otimizados, a alternativa pode se tornar viável e contribuir para a matriz elétrica brasileira de forma efetiva, permitindo que chegue luz a qualquer ponto do país de forma também sustentável.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando os resultados obtidos pelas simulações computacionais, constatou-se que a resistência está inversamente proporcional à potência elétrica para a situação de 20 Hz, em que as maiores respostas elétricas ocorreram para a menor resistência calculada. Quando a frequência é igual a 5 Hz, as potências máximas são obtidas para os valores máximos de resistência. Enquanto que a frequência de 10 Hz passou por um ponto de máximo com relação à potência para a resistência intermediária testada. Dessa forma, para obter os valores máximos de resposta elétrica é necessário igualar as resistências externa e interna do protótipo, que reduz substancialmente a potência elétrica obtida.

Ainda, a partir das análises dos resultados, percebeu-se que a introdução do indutor e da caixa de resistência melhoram o comportamento do protótipo piezoelétrico, otimizando a sua resposta de saída elétrica, tanto para voltagem quanto para potência elétrica. Por fim, foi possível observar que para maiores frequências de carregamento, a caixa de resistência poderá ser utilizada em menor intensidade para responder o valor máximo. Então, ressalta-se que, para a futura aplicação em campo, deve haver um estudo paramétrico do circuito montado e o controle das resistências e quedas de corrente do sistema, para que retornem os valores máximos obtidos em simulação. Também, é válido destacar que a aplicação desse tipo de sistema apresentará melhores resultados se aplicado em vias expressas, em que o fluxo de tráfego seja contínuo e a velocidade permitida possa chegar a 120 km/h. Logo, reduzindo o tempo de contato do veículo com o protótipo, maximizando a voltagem e, consequentemente, a potência elétrica de saída.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Agência Nacional de Petróleo (ANP) por meio do PRH-04, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Ao Laboratório de Telecomunicações e Ciência e Engenharia de Materiais (LOCEM) pela licença cedida do software.

REFERÊNCIAS

Blue Sol (2020) *Energia Solar e Eólica: Preço, Diferenças e Melhores Locais*. Disponível em: <https://blog.bluesol.com.br/energia-solar-e-eolica/> (acesso em 16/01/2021).

Callister, W.D. (2016) *Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução* (9a ed.). Rio de Janeiro: LTC.

Cao, Y.; A. Sha; Z. Liu *et al*. (2020) Electric energy output model of a piezoelectric transducer for pavement application under vehicle load excitation. *Energy*, v. 211, p. 118595. DOI: 10.1016/j.energy.2020.118595.

Ding, G.; X. Zhao; F. Sun *et al*. (2018) Effect of subgrade on piezoelectric energy harvesting under traffic loads. *The International Journal of Pavement Engineering*, v. 19, n. 8, p. 661-674. DOI: 10.1080/10298436.2017.1413241.

Duarte, F.; J.P. Champalimaud e A. Ferreira (2016) Waynergy vehicles: an innovative pavement energy harvest system. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Municipal Engineer*, v. 169, n. 1, p. 13-18. DOI: 10.1680/muen.14.00021.

Dutoit, N.E.; B.L. Wardle e S. Kim (2005) Design considerations for mems-scale piezoelectric mechanical vibration energy harvesters. *Integrated Ferroelectrics*, v. 71, n. 1, p. 121-160. DOI: 10.1080/10584580590964574.

ENEL (2023) *Taxas, Tarifas e Impostos*. Disponível em: <https://www.enel.com.br/pt-ceara/Tarifas_Enel.html> (acesso em 16/01/2023).

EPE (2020) Demanda de energia. In EPE (ed.) *Plano Decenal de Expansão de Energia 2029*. Brasília: Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-423/topico-481/02%20Demandada%20de%20Energia.pdf> (acesso em 28/06/2022).

Harb, A. (2011) Energy harvesting: state-of-the-art. *Renewable Energy*, v. 36, n. 10, p. 2641-2654. DOI: 10.1016/j.renene.2010.06.014.

Heller, L.F.; L.A.T. Brito; M.A.J. Coelho *et al*. (2023) Development of a pavement-embedded piezoelectric harvester in a real traffic environment. *Sensors*, v. 23, n. 9, p. 4238. DOI: 10.3390/s23094238. PMid:37177442.

Heywang, W. e H. Thomann (1984) Tailoring of piezoelectric ceramics. *Annual Review of Materials Science*, v. 14, n. 1, p. 27-47. DOI: 10.1146/annurev.ms.14.080184.000331.

Jiang, X.; Y. Li; J. Li *et al*. (2014) Piezoelectric energy harvesting from traffic-induced pavement vibrations. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, v. 6, n. 4, p. 043110. DOI: 10.1063/1.4891169.

Kázmierski, T.J. e S. Beeby (2011) *Energy Harvesting Systems: Principles, Modeling and Applications*. New York: Springer. DOI: 10.1007/978-1-4419-7566-9.

Khaligh, A. e O.G. Onar (2010) *Energy Harvesting: Solar, Wind, and ocean Energy Conversion Systems*. Boca Raton: CRC Press Inc.

Kim, S.; I. Sternb; J. Shen *et al*. (2018) Energy harvesting assessment using PZT sensors and roadway materials. *International Journal of Thermal & Environmental Engineering*, v. 16, n. 1, p. 19-25. DOI: 10.5383/ijtee.16.01.003.

Medina, J. e L.M.G. Motta (2015) *Mecânica dos Pavimentos* (3a ed.). Rio de Janeiro: Interciência.

Ministério da Infraestrutura (2021) *Frota de Veículos – 2021*. Brasília. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/conteudo-denatran/frota-de-veiculos-2021> (acesso em: 31/03/2022).

Mitcheson, P.D.; E.M. Yeatman; G.K. Rao *et al*. (2008) Energy harvesting from human and machine motion for wireless electronic devices. *Proceedings of the IEEE*, v. 96, n. 9, p. 1457-1486. DOI: 10.1109/JPROC.2008.927494.

Mota, B.C. (2019) *O Pavimento como Instrumento de Geração de Energia para o Desenvolvimento Sustentável de Cidades Inteligentes*. Monografia (conclusão de curso). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

Mota, B.C. e S.H.A. Barroso (2021) O uso do pavimento para geração de energia e desenvolvimento sustentável de cidades inteligentes. *Transportes*, v. 29, n. 2, p. 1-15. DOI: 10.14295/transportes.v29i2.2380.

Mota, B.C.; B. Albuquerque Neto; S.H.A. Barroso *et al*. (2022) Characterization of piezoelectric energy production from asphalt pavements using a numerical-experimental framework. *Sustainability*, v. 14, n. 15, p. 9584. DOI: 10.3390/su14159584.

Moure, A.; M.A.I. Izquierdo Rodríguez; S. Rueda *et al*. (2016) Feasible integration in asphalt of piezoelectric cymbals for vibration energy harvesting. *Energy Conversion and Management*, v. 112, p. 246-253. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.01.030.

Najini, H. e S.A. Muthukumaraswamy (2017) Piezoelectric energy generation from vehicle traffic with technoeconomic analysis. *Journal of Renewable Energy*, v. 2017, p. 1-16. DOI: 10.1155/2017/9643858.

Papagiannakis, A.T.; A. Montoya; S. Dessouky *et al*. (2017) Development and evaluation of piezoelectric prototypes for roadway energy harvesting. *Journal of Energy Engineering*, v. 143, n. 5, p. 04017034. DOI: 10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000467.

Pinto, P.C. (2020) Simulação da implantação de dispositivo de energia piezoelétrica em pavimento de cruzamentos urbanos. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, v. 24, e39.

Roshani, H.; P. Jagtap; S. Dessouky *et al*. (2018) Theoretical and experimental evaluation of two roadway piezoelectric-based energy harvesting prototypes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 30, n. 2, p. 04017264. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002112.

Song, Y.; C.H. Yang; S.K. Hong *et al*. (2016) Road energy harvester designed as a macro-power source using the piezoelectric effect. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 41, n. 29, p. 12563-12568. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.04.149.

Triunfo Concepa (2018) *Estratégias de Eficiência Energética em Praças de Pedágio Rodoviários*. Porto Alegre: ANTT.

Vale, A.C.F. (2020) *Analisys of the Evolution of Permanent Deformation of Asphalt Mixtures Using the Stress Sweep Rutting (SSR) Test Methodology*. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

Wang, H. e C. Sun (2016) Finite element analysis on a square canister piezoelectric energy harvester in asphalt pavement. *World Journal of Engineering and Technology*, v. 4, n. 2, p. 361-373. DOI: 10.4236/wjet.2016.42035.

Wang, S.; C. Wang; G. Yu *et al*. (2020) Development and performance of a piezoelectric energy conversion structure applied in pavement. *Energy Conversion and Management*, v. 207, p. 112571. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.112571.

Wang, S.; C. Wang; H. Yuan *et al*. (2023) Size effect of piezoelectric energy harvester for road with high efficiency electrical properties. *Applied Energy*, v. 330, p. 120379. DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.120379.

Yao, L.; H.D. Zhao; Z.Y. Dong *et al*. (2011) Laboratory testing of piezoelectric bridge transducers for asphalt pavement energy harvesting. *Key Engineering Materials*, v. 492, p. 172-175. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.492.172.

Yoder, E.J. e M.W. Witczak (1975) *Principles of Pavement Design* (2nd ed., 711 p.). New York: John Wiley & Sons. DOI: 10.1002/9780470172919.

Yuan, H.; J. Liu; C. Wang *et al*. (2024) Optimization of piezoelectric device with both mechanical and electrical properties for power supply of road sensors. *Applied Energy*, v. 364, p. 123113. DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.123113.

Zhang, W.; G. Ding e J. Wang (2021) Road energy harvesting characteristics of damage-resistant stacked piezoelectric ceramics. *Ferroelectrics*, v. 570, n. 1, p. 37-56. DOI: 10.1080/00150193.2020.1839254.

Zhu, L.; R. Chen e X. Liu (2012) Theoretical analyses of the electronic breaker switching method for nonlinear energy harvesting interfaces. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 23, n. 4, p. 441-451. DOI: 10.1177/1045389X11435433.