



**UM ESTUDO PRELIMINAR SOBRE MICROGERAÇÃO DE ENERGIA  
PIEZOELÉTRICA EM SÍTIO AEROPORTUÁRIO**

**Felipe Dasnoy Ramos<sup>1</sup>  
Igor de Canha Rivelles<sup>2</sup>  
Jairo Afonso Henkes<sup>3</sup>**

**RESUMO**

Este artigo traz como principal objetivo mostrar a viabilidade da cogeração de energia a partir de cristais piezoelétricos e seu uso dentro de aeroportos internacionais. Foram escolhidas formas de aplicações tais como pavimento, trilho ferroviário, pneus e placas instaladas no piso onde o movimento de passageiros e veículos dentro ou fora do aeroporto gere energia elétrica. Tem-se também informações de aeroportos com iniciativa sustentável como BH *Airport* e Salvador *Airport* e como a piezoelectricidade pode ajudar na questão sustentável e redução de consumo energético. Para alcançar o seu propósito, foi necessário realizar uma pesquisa bibliográfica, descritiva e documental e para cumprir o objetivo, uma análise descritiva. Como resultado, percebeu-se que há algumas maneiras de possíveis aplicações, como por exemplo no piso de pavimento, trilho de trem, roldana de esteiras, pneus dos veículos do pátio e escada rolante. Há alguns problemas nas informações obtidas, deixando claro a necessidade de maiores

---

<sup>1</sup> Graduando em Ciências Aeronáuticas na Faculdade Tecnologia AEROTD. E-mail: [felipedasnoy@gmail.com](mailto:felipedasnoy@gmail.com)

<sup>2</sup> Graduando em Ciências Aeronáuticas na Faculdade Tecnologia AEROTD. E-mail: [igorcanha82@gmail.com](mailto:igorcanha82@gmail.com)

<sup>3</sup> Mestre em Agroecossistemas (UFSC, 2006). Especialista em Administração Rural (UNOESC, 1997). Engenheiro Agrônomo (UDESC, 1986). Professor e Pesquisador nas Áreas de Gestão Ambiental, Ciências Aeronáuticas, Agronomia, Administração e Engenharia Ambiental. AEROTD. <https://orcid.org/0000-0002-3762-471X>. E-mail: [jairohenkes333@gmail.com](mailto:jairohenkes333@gmail.com)

pesquisas para aplicações futuras e observou-se que com os dados obtidos é necessário um maior investimento na descoberta de materiais mais resistentes com uma vida útil maior.

**Palavras-chave:** Economia; Sustentabilidade; Zona Aeroportuária; Piezoelectricidade.

## **A PRELIMINARY STUDY ON PIEZOELECTRIC POWER MICROGENERATION AT AN AIRPORT SITE**

### **ABSTRACT**

*This article main objective is to show the feasibility of cogeneration of energy from piezoelectric crystals and its use within international airports. Application forms were chosen such as pavement, railway tracks, tires and plates installed on the floor where the movement of passengers and vehicles inside or outside the airport generates electrical energy. There is also information on airports with a sustainable initiative such as BH Airport and Salvador Airport and how piezoelectricity can help with sustainable issues and reducing energy consumption. To achieve its purpose, it was necessary to carry out bibliographic, descriptive and documentary research and to fulfill the objective, a descriptive analysis. As a result, it was realized that there are some possible applications, such as pavement, train tracks, track pulleys, yard vehicle tires and escalators. There are some problems in the information obtained, making clear the need for further research for future applications and it was observed that with the data obtained, greater investment is needed in the discovery of more resistant materials with a longer useful life.*

**Keywords:** Economy; Sustainability; Airport Zone; Piezoelectricity.

## **1 INTRODUÇÃO**

Muito tem se falado sobre novas opções de geração de eletricidade, a aplicação de energia piezoelétrica e novas aplicações de energia por fontes renováveis no âmbito da aviação. O mercado com grandes economias tem realizado investimentos em ensaios e pesquisas laboratoriais com o uso de materiais piezoelétricos que podem ser cristais encontrados na natureza com alto potencial de geração de corrente elétrica a partir de impactos diretos ou indiretos,

na intenção de aprimorar as condições de abastecimento de energia elétrica (ALMEIDA, 2018).

O uso de energia piezoelétrica na aviação pode ser um caminho possível para se explorar energia limpa a partir de fontes renováveis e o uso desta tecnologia também pode contribuir para a diminuição da emissão de gases que contribuem para o efeito estufa. No entanto, é necessário realizar um estudo aprofundado para avaliar sua viabilidade e aplicabilidade dentro de um aeroporto (CANCIO; GHISSONI, 2020).

A energia piezoelétrica é obtida a partir da conversão direta de energia mecânica em elétrica. Ela é produzida através de materiais piezoelétricos, que são materiais que possuem a capacidade de gerar uma corrente elétrica quando são submetidos a pressão ou à vibração podendo ser instalados nas dependências de um aeroporto (ALMEIDA, 2018).

Pelo estudo de Bruno Cavalcante Mota se obtém que:

A piezoelectricidade opera através de sensores piezoelétricos que, ao sofrerem modificações dimensionais, devido as tensões mecânicas aplicadas, geram energia. Isso ocorre pois os cristais piezoelétricos são formados de átomos eletricamente neutros em seu interior, sem arranjo simétrico e com cargas elétricas perfeitamente balanceadas. Ao aplicar uma pressão mecânica nesses cristais, ocorre uma deformação de sua estrutura fazendo com que alguns átomos fiquem mais próximos e outros mais distantes, perturbando o balanço entre cargas positivas e negativas, criando uma diferença de potencial (MOTA, 2014, p.28).

O Brasil possui 2.463 aeródromos e aeroportos registrados pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) – sendo 657 públicos e 1.806 privados, o que o torna como o segundo país com mais aeroportos em todo o mundo, seguido apenas dos Estados Unidos (ANAC, 2022). Em 2018 a INFRAERO e a ANAC informaram que os aeroportos mais movimentados, com o respectivo número de passageiros em 2017, são os de Guarulhos (SP) com 37.816.000PAX, Congonhas (SP) com 21.859.453 PAX e por fim o Juscelino Kubitschek (DF) com 16.912.680 PAX (INFRAERO, 2018).

Em aeroportos há vários problemas com relação ao consumo de eletricidade que ocorrem em todo mundo, com a demanda de uso cada vez maior de energia, sendo fornecida em boa parte pelo uso de fontes não renováveis

(INFRAERO, 2018). Em 2013 o Brasil através da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) e da Secretaria de Aviação Civil (SAC), apresentou o Plano de Emissões de CO<sub>2</sub>. Em cooperação junto à Organização de Aviação Civil Internacional (OACI) para que se reduza o impacto causado pela aviação civil internacional na mudança do clima. Em 2016 ocorreu uma atualização com a entrega do 2º Plano de Ação. No mesmo ano a Infraero intensificou as ações nos aeroportos para diminuir o consumo de energia, as medidas tomadas foram as substituições de lâmpadas fluorescentes por lâmpadas que utilizam LED, monitoramento de equipamentos de ar-condicionado e regulagem no sistema de corrente de energia. Essas são algumas das medidas executadas em aeroportos da Rede Infraero, na região Sudeste, com reflexos significativos na diminuição da utilização de energia elétrica (AEROFLAP, 2016).

A redução de consumo de energia é importante para a economia de energia (valores) e meio ambiente, reduzindo o impacto ambiental e a emissão de CO<sub>2</sub>. A geração de energia elétrica através de fontes renováveis e menos agressivas à natureza, como a energia solar, a energia eólica e a piezoelectricidade, também pode contribuir para a redução do impacto ambiental. A IATA é uma entidade que congrega 270 membros em mais de 140 países representando a indústria da aviação e sustenta que ao mesmo tempo que a demanda por serviços aéreos é continuamente pressionada de forma positiva, a indústria procura incrementar a performance ambiental de suas atividades econômicas. Sustenta que a interpretação de sustentabilidade como crescimento sem nenhum impacto não contempla os valores socioeconômicos que este trás, destacando que sustentabilidade não deve ser “confundida” com conservacionismo ambiental, entendendo que o amplo contexto de desenvolvimento sustentável deve atingir um balanceamento com os objetivos sociais e econômicos (IATA, 2007; AEROFLAP, 2016).

Para Henkes e Pádua (2017), mesmo os aeroportos sendo um dos maiores segmentos econômicos do país, trazendo diversos lucros e benefícios para o mesmo, eles ainda acabam por trazer danos a população que reside em seu redor e ao meio ambiente. Apesar da ICAO ter diversas metas para reduzir esses impactos, o problema vai muito além das práticas ambientais, por muitas vezes

depende da gestão dos aeroportos, porque o seu entorno geralmente é beneficiado economicamente, porém, os gestores geralmente não buscam as soluções cabíveis para diminuir os impactos ambientais que também são causados nesses lugares. O Brasil é um potencial promissor para geração de energia por meio de fontes renováveis dentre elas o uso de cristal piezoelétrico, que consiste em transformar energia por impacto em eletricidade, a utilização deste meio é uma boa opção para complementar o fornecimento de energia e a utilização desta fonte em terminais aeroportuários geraria uma boa economia ao longo dos anos (SILVEIRA. 2010).

Conforme Dhingra *et al.*, (2012) o uso da piezoelectricidade também pode ser empregado em ferrovias, aeroportos, e em locais com grande movimento como por exemplo em terminais com alto fluxo de pessoas. Foram efetuados ensaios em duas estações de trem em Tóquio pela empresa japonesa *Soundpower*, onde o fluxo é alto e passam 2,5 milhões de pessoas em média durante um único dia da semana e aproximadamente 390 mil somente às oito horas da manhã (G1, 2010). No ano de 2006 foi realizado o primeiro ensaio onde uma pessoa com 60 quilogramas "gerava" 0,1 watt por segundo, quando o teste foi repetido no ano seguinte, essa capacidade de "geração de energia elétrica" aumentou para 1 watt por segundo (CELSIAS, 2009).

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo desse trabalho é investigar a substituição de fontes não renováveis de energia elétrica por novas fontes renováveis em aeroportos, visando a sustentabilidade e eficiência.

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral foi de investigar possíveis formas de cogeração de energia elétrica, de forma renovável através do uso de cristais piezoelétricos em diversos setores de sítios aeroportuários.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Estudar as possibilidades de aplicação de Cristais Piezoelétricos em segmentos dos sítios aeroportuários.
- Descrever vantagens ou desvantagens dos cristais piezoelétricos na geração de energia elétrica.
- Propor caminhos para a utilização de cristais piezoelétricos como fonte de energia limpa alinhando sustentabilidade e economia.

## 2 MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS

Objetos comuns do cotidiano como os alto-falantes, impressoras com jato de tinta, guitarras elétricas e até mesmo imagens por ultrassom necessitam de um dispositivo piezoelétrico para funcionar. A utilização da piezoeletricidade define-se pela capacidade que alguns materiais possuem de reproduzir diferença potencial por conta da polarização de suas cargas no momento em que são pressionados por uma força externa, que é uma escolha viável e sustentável, adequada às necessidades energéticas do futuro e é encontrada em vários materiais cristalinos e pode ser direta ou inversa. As formas mais comuns são atuadores (efeito inverso), sensores (efeito direto) e transdutores (efeito inverso). Quando há a aplicação de um esforço mecânico sobre o material é criada uma modificação na polarização elétrica do mesmo, denominando-se efeito direto. Já o efeito inverso equivale na aplicação de um campo elétrico que resulta na deformação do material (JESUS; DIAS, 2020).

O material piezoelétrico comercial mais amplamente utilizado trata-se do Titanato de zirconato de chumbo (PZT), mas infelizmente, os transdutores são frágeis e é muito difícil produzi-los em tamanhos maiores. Além disso, esses materiais piezoelétricos têm uma impedância acústica relativamente alta, exigindo um amortecimento complexo e técnicas de correspondência para induzir sinais de banda larga. Os materiais piezoelétricos de polímeros são conhecidos desde o final dos anos 20, mas a descoberta do Fluoreto de Polivinilideno, durante os anos

60, tornou-os úteis para aplicações comerciais de transdutores ultrassônicos. Os polímeros piezoelétricos estão associados a um baixo ruído e amortecimento inerente que os torna receptores muito eficazes, bem como transmissores de banda larga para tarefas de altas frequências (BAR-COHEN; XUE; LYH, 1996). Os estudos no Laboratório de Avaliação Não Destrutiva e Atuadores Avançados (NDEAA) têm se concentrado no uso de pilhas piezoelétricas e novos designs aproveitando o potencial piezoelétrico para fornecer alta densidade de torque/atuação de força e alta eficiência de conversão eletromecânica (BAR-COHEN, 1996).

## 2.1 O USO DE CRISTAIS PIEZOELÉTRICOS EM PISOS

O uso de materiais piezoelétricos através de transdutores em ruas e estradas poderia gerar eletricidade de maneira acessível através da pressão causada pelo movimento dos carros e outros veículos. O primeiro país do mundo a realizar ensaios perante essa tecnologia foi a França e os lugares escolhidos foram as ruas da cidade de Toulouse. Essa tecnologia também poderá gerar energia elétrica em áreas de grande movimento, não somente por conta da passagem de carros, mas também de pessoas a pé. Sendo assim, existe a possibilidade de aplicação levando em conta o caminhar das pessoas com os cristais piezoelétricos presentes no piso de estabelecimentos. No ano de 2008, duas casas noturnas uma em Holanda, o Club Watt, e outra no Club Surya em Londres, Inglaterra, instalaram pisos com tecnologia piezoelétrica nas pistas de dança. O movimento causado pelos clientes dançando faz com que o piso seja pressionado, que por sua vez, através da geração de energia elétrica, ilumina as pistas. Como dito anteriormente, foi realizada a instalação de sistemas piezoelétricos no piso de duas estações de trem pela empresa *Soundpower*, na cidade de Tóquio no Japão, onde a escolha se dá por conta de que passam em torno de 3,0 milhões de pessoas semanalmente com o objetivo de gerar energia para a alimentação de placas eletrônicas e letreiros (SAKAMOTO, 2008; SILVEIRA, 2010).

## 2.2 ECONOMIA E SUSTENTABILIDADE

A questão da sustentabilidade ainda é vista, por alguns, como algo estereotipado. Atualmente o consumo de energia tem crescido e isso está diretamente relacionado ao desenvolvimento da economia, da sociedade e do meio ambiente. A energia piezoelétrica surge como uma opção de energia limpa para diminuir os estragos ambientais e que ao mesmo tempo consegue prover o sistema, pois sua aplicação é mais simples e não depende do clima (REVISTA TECNOLOGIA, 2021).

## 2.3 APLICAÇÃO IMEDIATA E FUTURA

A aplicação dos materiais piezoelétricos vem sendo feita de forma restrita no mercado. Com a evolução da tecnologia e novos estudos, a possibilidade da piezoeletricidade deixar de ser algo concentrado em atividades específicas e se tornar algo macro, ou seja, do cotidiano de todos, é bem possível, visto que cada vez mais é necessário dar importância para a sustentabilidade. O armazenamento da energia é a grande questão, já que ela pode ser usada sem problemas à medida que é gerada. O desafio está em como armazená-la para usos futuros. Hoje em dia, são necessárias grandes áreas para a instalação de capacitores, considerados grandes, os quais possuem um alto valor, sendo eles os únicos capazes de armazenar uma grande quantidade de energia. Com esse empecilho, a solução pode estar na nanotecnologia, com a preferência de armazenar energia em um espaço menor e com um custo mais baixo. Porém, como a utilização para consumo instantâneo já existe, ela pode ser aproveitada, explorada e inserida no mercado, pois a tendência é que a piezoeletricidade seja a energia limpa e renovável num futuro bem próximo (SAKAMOTO, 2008).

### 3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Nesse capítulo serão abordadas as questões metodológicas utilizadas para realizar essa pesquisa preliminar, com o intuito de fazer um estudo de caso da sua aplicação.

#### 3.1 TIPO DE PESQUISA

Essa pesquisa pode ser classificada como bibliográfica, descritiva e documental e também usou como artigos científicos, revistas e projetos similares para identificar a viabilidade do uso de microgeração de energia em um sítio aeroportuário através de cristais piezoelétricos. Os trabalhos científicos devem ser iniciados pela pesquisa bibliográfica, pois ela é feita por meio de referências teóricas já analisadas, como páginas da web, livros e artigos científicos, permitindo que o pesquisador conheça melhor o assunto que está estudando (Fonseca, 2002).

#### 3.2 PROCEDIMENTOS PARA COLETA DE DADOS

As técnicas utilizadas para a realização desta pesquisa de artigo foram as pesquisas em artigos científicos, pesquisa bibliográfica e referências teóricas. Trata-se de estudo inicial que tem como propósito encontrar e analisar as especificidades da produção científica referente a classificação facetada. Como procedimentos metodológicos vão ser usadas técnicas quantitativas e qualitativas como a Bibliometria e Análise de Conteúdo (JESUS; DIAS, 2020).

O procedimento de coleta de dados caracterizou-se como bibliográfico e documental, a pesquisa bibliográfica foi feita a partir do levantamento de referências teóricas através do Google Acadêmico e Scielo, já analisadas com palavras-chave como cristal piezoelétrico, piezoeletricidade, cogeração de energia piezoelétrica, fonte de energias renováveis e economia de consumo energético. Pesquisas publicadas por meios escritos e eletrônicos, como livros, artigos

científicos da qual a quantidade é em torno de 32 artigos que foram realizados uma leitura completa para subsidiar este trabalho e páginas de web sites que abrange EPE (Empresa de Pesquisa Energética) com relevância em projetos similares com diferentes aplicações. Já na pesquisa documental que pode ser confundida com a bibliográfica, buscou-se em fontes diversificadas, tais como: tabelas estatísticas, jornais, relatórios, relatórios de empresas e artigos científicos.

A pesquisa foi realizada em bases científicas, buscando artigos sobre o assunto, e sites institucionais abordando eixos: o legal que apresenta as normas e regulamentos oficiais a respeito do tema; institucional que informa o que a indústria faz ou tem feito a respeito; e por fim o científico que nos informa o que a academia e pesquisadores tem publicado sobre o assunto.

### 3.3 ANÁLISE DE DADOS

A análise de dados foi feita com a intenção de verificar a viabilidade da implantação de cristais piezoelétricos em um aeroporto com alto fluxo diário de passageiros. Para tanto realizou-se a análise de diversos tipos de testes e ensaios com cristais piezoelétricos para verificar diferentes maneiras de uso dos cristais para cogeração de energia.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O aumento da demanda no transporte aéreo mostra que a área está em franca reabilitação desde o ano de 2022. Referente ao mercado doméstico, a porcentagem de passageiros pagos chegou a 92,5% da totalidade apontada nos três anos anteriores. Em 2021, ainda com vestígios da pandemia de COVID-19, o veredicto aponta diminuição de aproximadamente 43,4% se comparado com números obtidos na mesma época no ano de 2019, quando 119 milhões de pessoas foram transportadas. Levando em conta somente o mercado doméstico, o recuo entre esses anos foi de 34,3%. No total do ano, houve o transporte de 62,6 milhões

de pessoas em rotas nacionais, sendo 7,3 milhões apenas no mês de agosto de 2022 (ANAC, 2022).

Sobre a economia energética em aeroportos, a energia é um fator que está ligado diretamente ao desenvolvimento econômico, tecnológico e social de um país, juntamente com o saneamento básico, os transportes e as telecomunicações (ANEEL, 2008). Aeroportos como o de Brasília já demonstram atenção na área de redução de consumo de energia elétrica onde informam ter um comprometimento com o assunto e para isso o seu gerenciamento é efetuado pelo Centro de Controle de Manutenção (CCM), 24 horas por dia, 7 dias por semana, por meio de um sistema automatizado, que consegue monitorar as principais fontes com maior consumo de energia do aeroporto, como ar-condicionado, elevadores, esteiras, sistema de iluminação e outros equipamentos. Algumas ações já foram iniciadas para atingir a meta de redução do consumo como a troca de 100% das lâmpadas convencionais para LED e a implantação de usina fotovoltaica que atende atualmente 7% da demanda do Aeroporto (BSB, 2022).

Outros aeroportos também tomaram ações para redução de consumo, terminais regionais como os de Uberaba (MG), Imperatriz (BA) e Carajás/Parauapebas (PA) instalaram lâmpadas LED com o objetivo de melhorar a eficiência energética, já que o produto gera uma economia de energia de cerca de 75%, além de ser 95% reciclável. No aeroporto mais movimentado do País, Guarulhos (SP), foram substituídas mais de 1500 lâmpadas halógenas por iluminação de LED em todo o sistema de pistas do aeroporto (INSTITUTO BRASILEIRO DE AVIAÇÃO, 2016).

O Salvador Bahia *Airport* desenvolve ações para redução dos seus impactos ambientais utilizando práticas da *Airpact*, uma estratégia global ambiental da rede de aeroportos VINCI *Airports*. Os esforços levaram o Salvador Bahia *Airport* a ter o reconhecimento de um “*GreenAirport*” certificação concedida pelo Conselho Internacional de Aeroportos – América Latina e Caribe (ACI – LAC) e a também receber Certificações de Acreditação em Carbono (*ACA Certification*) em primeiro e segundo níveis. O aeroporto possui o compromisso de gerenciar o consumo de energia elétrica, buscando sua redução através de uma melhor eficiência energética, além de priorizar o uso de energias limpas ou menos poluentes. A meta

é reduzir 5% do consumo de energia elétrica até 2030. Para isso, foi instalada no aeródromo uma usina solar com 4.215kWp (quilowatt-pico) de potência (SALVADOR BAHIA AIRPORT, 2022).

Já o Aeroporto de Belo Horizonte (BH AIRPORT) obteve fonte 100% renovável de energia elétrica para o ano de 2021, o que assegurou a sua conquista referente a Certificação CEMIG REC. O documento confirma a origem da energia conseguida no Ambiente de Contratação Livre (ACL) onde tem como princípios em seus projetos, o emprego de práticas sustentáveis de engenharia, que partiram da sua etapa de conceituação até finalmente a fase de implementação, como exemplo o Terminal de Passageiros 2 que desde a sua concepção, foi construído observando as melhores técnicas de acordo com a eficiência energética, com a totalidade das luminárias em LED e sistema de verificação e acionamento remoto, juntamente do aproveitamento da luz natural por meio de novíssimo projeto arquitetônico. E para o futuro, está sendo aguardada a finalização da reforma da sala de embarque do Terminal 1, com a instalação de periféricos de última geração, possibilitando vantagens em competência energética e sua conversão para uma edificação mais sustentável. Além disso, para regiões como a de pátios de aviões e estacionamentos de automóveis, o já ultrapassado sistema de iluminação também será renovado com a inserção da tecnologia LED, provendo economia através de um corte de 25% dos gastos gerados pela energia elétrica utilizada para essas atividades (BH AIRPORT, 2022).

Há algumas aplicações que podem corroborar com a geração e uso de energia piezoelétrica em um sítio aeroportuário, tais como estudos feitos sobre viabilidade de uso do material em projetos semelhantes como o uso da pista e dos pátios com movimentação de diversos veículos no aeroporto para cogeração de energia, áreas de embarque e desembarque que pelo alto movimento podem trazer uma cogeração significativa de eletricidade. Da mesma forma os saguões aeroportuários, onde há um movimento geralmente intenso de pessoas, tornam-se outra boa opção para aplicação de pisos com cristais piezoelétricos, que poderão gerar energia com a circulação de pessoas nestes ambientes.

Foram realizados três testes com diferentes fluxos passantes acima do piso vibratório, simulação de passos semelhantes a caminhada (lentos) denominada M1, R. bras. Av. civil. ci. Aeron., Florianópolis, v. 3, n. 4, p. 153-176, ago-out. 2023.

com a velocidade intermediária denominada M2 e ensaios de passos de corrida denominada M3. A quantidade de energia gerada foi aumentando à medida que a intensidade dos passos ia aumentando, ou seja, de maneira crescente. Com a aplicação da piezoelectricidade em ambientes com alto fluxo de pessoas, o uso dessa tecnologia em aeroportos pode ser benéfico, com várias possibilidades, como em praças de alimentação, banheiros próximos, lojas, em saguões aeroportuários de grandes cidades, os quais reúnem telas informativas, possuem diferentes tipos de iluminação e outras inúmeras maneiras de aplicação (KAUFMANN, THANITY BRAUN, 2021).

#### 4.1 GERAÇÃO PIEZOELÉTRICA EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

Foi construído um sistema de cogeração de energia a partir de cristais piezoelétricos para implantação em um pavimento (asfalto ou concreto). No ano de 2010, a empresa Innowattech realizou em um percurso de 10 metros de comprimento de uma estrada a instalação de geradores piezoelétricos com 5,5 cm de espessura que foram inseridos a 6cm do nível superior da estrada, na camada compacta do asfalto, conforme retratado na Figura 1 (PERLINGEIRO; PIMENTA; SILVA, 2016).

Figura 1 – Posicionamento do Sensor Piezoelétrico em Rodovia Pavimentada



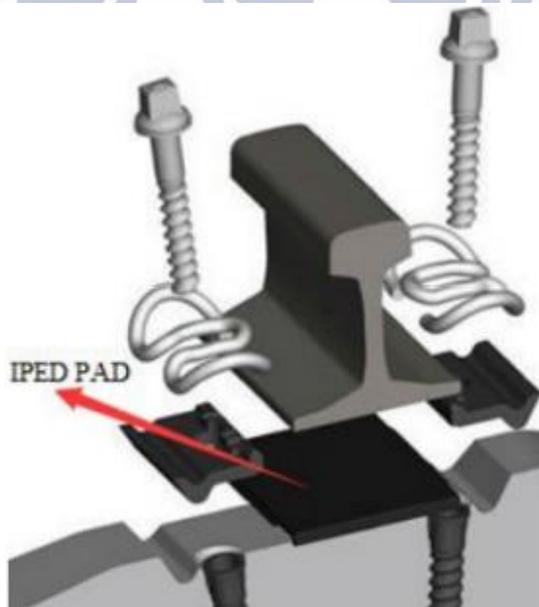
Fonte: Empresa de Planejamento e Logística - EPL, 2018.

O resultado da produção energética foi de 1 KW/H (Quilowatt-hora) sobre os geradores instalados. Para definir a quantidade de energia elétrica gerada levou-se em consideração a frequência, a velocidade do caminhão (1000 caminhões por hora com velocidade média de 72 KM/h (quilometro/hora) e as condições físicas da autoestrada (SILVA, 2018).

#### 4.2 GERAÇÃO PIEZOELÉTRICA EM TRILHOS FERROVIÁRIOS

Utilizando um princípio semelhante à de geração de energia nas estradas, a empresa Innowattech desenvolveu coxins utilizados em trilhos de trem implantando nestes um material piezoelétrico. Este projeto teve como parceira a Companhia Nacional Ferroviária de Israel, com objetivo de realizar a substituição dos coxins de trilhos tradicionais produzidos com borracha, por este novo material desenvolvido pela Innowattech conforme Figura 2 (PERLINGEIRO; PIMENTA; SILVA, 2016).

Figura 2– Novos Coxins - IPED PAD



Fonte: Zur Reduktion der Schlupfwellenbildung, 2012.

Como é apresentado na Figura 2, o desenvolvimento realizado através da Innowattech denominado como IPED PAD possui dimensões semelhantes à dos coxins tradicionais utilizados, tendo sua diferença na produção com elementos

R. bras. Av. civil. ci. Aeron., Florianópolis, v. 3, n. 4, p. 153-176, ago-out. 2023.

piezoelétricos que acabam utilizando o princípio de conversão direta, transformando tensões mecânicas em energia elétrica. Em testes preliminares substituindo 32 coxins em uma determinada área, onde possui um tráfego de 10 a 20 trens por hora pode ser produzindo até 120 KW/h (PERLINGEIRO; PIMENTA; SILVA, 2016). O projeto inicialmente teve 32 coxins substituídos e ensaios iniciais exibiram que áreas nas quais passam de 10 a 20 trens por hora são capazes de gerar até 120 KW/h (SILVA, 2018).

#### 4.3 GERAÇÃO PIEZOELÉTRICA EM PNEUS

Outra possível aplicação é o dispositivo dentro de pneus, essa inserção possibilita que o pneu junto aos cristais se altere naturalmente com o rodar do veículo, por conta da sua maleabilidade e vibrações das rodovias. Papagiannakis *et al.*, (2016) conceberam um sistema de captação de energia com elementos piezoelétricos em que foram aplicadas cargas compressivas sinusoidais a uma frequência de 10 Hz (Hertz), com uma magnitude de pico a pico variando de 0,5 kN (KiloNewton) a 3,5 kN.

Foi observada uma potência elétrica de 3,5 mW (Megawatt) e 2 mW para os dois protótipos, respectivamente, ao serem aplicadas pressões de 9.000 kPa (Quilopascal) para o primeiro e 600 kPa para o segundo elemento. Ainda, para uma única passagem de um pneu de caminhão de 44,48 kN, a potência elétrica gerada foi estimada entre 1,0 e 1,8 W (Watt) (SILVA, 2018).

A energia elétrica produzida é depositada inicialmente em um capacitor, e transmitida para o interior do veículo através de um comutador, que mantém um contato contínuo entre o chassi e a roda em locomoção. Segundo Xiong *et al.*, (2012) foram realizados estudos em um simulador com pneus múltiplos que relacionam o movimento de transportes motorizados com ajustes de cargas e velocidade, conforme demonstrado na Figura 3.

Figura 3 – Nanogeradores Piezoelétricos no interior dos Pneus



Fonte: Inovação Tecnológica, 2011.

Quando há o deslocamento de um veículo, o pneu com a instalação piezoelétrica gera na superfície uma pressão vertical no qual há uma resultante que advém da sua velocidade e do seu peso, essa pressão é enviada a um gerador que produz eletricidade.

#### 4.4 GERAÇÃO PIEZOELÉTRICA EM PISOS INTERNOS E EXTERNOS

Outro tipo de geração vem ganhando atenção de pesquisadores da Innawattech, contando já com sua utilização em estradas e ferrovias, explorando a geração de energia em calçadas e pisos, aplicando a tecnologia em áreas nas quais transita um alto número de pessoas a energia gerada pode ser bem elevada (PERLINGEIRO; PIMENTA; SILVA, 2016).

Figura 4 - Geração de energia utilizando placas instaladas no piso



Fonte: VOLTIMUM, 2014.

Há a estimativa que poderá ser originado 1 kW para cada 100 metros de piso com o material piezoelétrico se cerca de três mil pessoas circularem a cada hora pelo local que pode ser o saguão ou parte das salas de embarque/desembarque (PERLINGEIRO; PIMENTA; SILVA, 2016). A seguir na Figura 5, há uma representação de cápsulas piezoelétricas de 35 mm de diâmetro, captando e armazenando energia elétrica gerada.

O aproveitamento da movimentação de pessoas ou de veículos nos grandes centros urbanos para a geração de energia renovável e limpa pode sim ser considerado uma forma de aliviar um pouco de sobrecargas que o sistema elétrico vem sofrendo, tendo em vista que o custo de transmissão seria quase nulo, pois, a fonte geradora estaria próxima do consumidor (EPE, 2023).

Figura 5 - Cápsula piezoelétrica



Fonte: Mekanus, 2017.

Analisando a Figura 5, a cápsula piezoelétrica é composta por uma placa metálica em conjunto com um adesivo no centro da mesma contendo o eletrodo de condução elétrica em suas bordas. ANAC e INFRAERO mostram comprometimento com a redução de consumo energético em aeroportos, seja na implantação de luzes LED ou placas fotovoltaicas. A maioria dos aeroportos no Brasil tiveram atualizações para uma redução de consumo de um modo mais sustentável onde ainda não há aplicação de cristais piezoelétricos, porém não há nenhuma proibição quanto tal uso ou o teste do mesmo (ANAC, 2022).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os cristais piezoelétricos podem em breve ser considerados parte de um sistema de geração de energia elétrica com menor agressão ao meio ambiente, tendo seu aproveitamento principalmente em dispositivos móveis ou táteis, pois são pastilhas pequenas com pouca manutenção e que podem ser inseridos em diversos dispositivos que podem variar de calçados até pavimentos como asfalto. De acordo com a ANAC não há empecilhos quanto ao uso de cristais piezoelétricos dentro de aeroportos ou em partes de movimentação de veículos e aeronaves. Os sítios aeroportuários dependem de energia elétrica para funcionar com segurança, há aeroportos com problemas frequentes de quedas de energia, um exemplo prático que poderia ser apresentado é o aeroporto de Manaus que sofre em decorrência de fornecimento de energia elétrica, dentro disso o uso de cristais piezoelétricos para cogeração de energia pode vir a ser benéfico, tendo em vista que os cristais podem ser aplicados nas áreas de movimento de pessoas como por exemplo em saguões, acesso (*finger*), trilho do trem (dependendo do aeroporto), escada rolante e o pátio. No lugar onde transitam as veículos e aeronaves, pode haver aplicações no piso pavimentado ou nos pneus dos veículos de suporte e por fim, ter o uso do cristal incorporado junto a roldana da esteira de bagagem. Aeroportos com preocupações com geração própria de energia e sustentabilidade como por exemplo o de Salvador podem incorporar o uso do

material piezoelétrico para a cogeração de energia a partir de aplicações como saguão aeroportuário, movimento de veículos no pátio próximo ao local de embarque e desembarque.

Mesmo com os grandes benefícios que o uso desta tecnologia pode proporcionar, se faz necessário o investimento na descoberta de materiais mais resistentes com uma vida útil maior já que os materiais atuais são muito frágeis. Os cristais desenvolvidos até hoje podem se quebrar com pouco tempo de uso e torna-se necessário o desenvolvimento de modelos mais resistentes ao impacto e as variações bruscas de temperatura, para que mantenham a capacidade de geração de energia elétrica.

Recomenda-se um estudo mais aprofundado sobre o tema de uso do material piezoelétrico, já que seu campo de estudo ainda é novo e possui limitações devido à falta de pesquisas. Necessita também o monitoramento do seu desempenho, especialmente seu aproveitamento em aeroportos internacionais com uma movimentação maior de passageiros, para que a cogeração de energia seja maior e traga mais benefícios ao consumo energético.

## REFERÊNCIAS

### Revista Brasileira de Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas

AEROFLAP. **Infraero intensifica ação nos aeroportos para diminuir consumo de energia.** Brasil, 2016. Disponível em: <https://www.aeroflap.com.br/infraero-intensifica-acao-nos-aeroportos-para-diminuir-consumo-de-energia/> Acesso em: 03 nov. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil.** 3. ed. Brasília, DF: Aneel, 2008. 236p. Disponível em: <https://biblioteca.aneel.gov.br/acervo/detalhe/9546?guid=1688002032303&ret urnUrl=%2fresultado%2flistar%3fguid%3d1688002032303%26quantidadePaginas%3d1%26codigoRegistro%3d9546%239546&i=11>. Acesso em: 20 abr. 2023.

ALMEIDA, L. R. V. **Aplicação de Materiais Piezoelétricos.** Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 03, Ed. 08, Vol. 11, pp. 117-143. Brasil, 2018. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-eletrica/geracao-de-energia> Acesso em: 02 jun. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Aeroportos Sustentáveis. 2022.** Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/meio-ambiente/aeroportos-sustentaveis/aeroportos-sustentaveis-2022>. Acesso em: 25 jun. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Plano De Ação Para Redução De CO2 No Transporte Aéreo.** Disponível em: <http://www.anac.gov.br/assuntos/paginas-tematicas/meioambiente/plano-de-acao-para-reducao-de-co2-no-transporte-aereo>>. Acesso em: 10 abr. 2023.

ANAC. **Demanda e oferta no mercado doméstico em 2021 tiveram recuo ante período pré-pandemia.** Brasil, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/noticias/2022/demanda-e-oferta-no-mercado-domestico-em-2021-tiveram-recuo-ante-periodo-pre-pandemia> Acesso em: 06 mai. 2023.

ANAC. **Demanda e oferta do transporte aéreo atingiram 99% do percentual apurado no período pré-pandemia.** Brasil, 2022. Disponível em: [https://www.gov.br/anac/pt-br/noticias/2022/demanda-e-oferta-do-transporte-aereo-atingiram-99-do-percentual-apurado-no-periodo-pre-pandemia#:~:text=Demanda%20e%20oferta%20do%20transporte,Nacional%20de%20Avia%C3%A7%C3%A3o%20Civil%20\(ANAC\)](https://www.gov.br/anac/pt-br/noticias/2022/demanda-e-oferta-do-transporte-aereo-atingiram-99-do-percentual-apurado-no-periodo-pre-pandemia#:~:text=Demanda%20e%20oferta%20do%20transporte,Nacional%20de%20Avia%C3%A7%C3%A3o%20Civil%20(ANAC)) Acesso em: 29 abr. 2023.

ANTUNES, E. G.; SOUSA. **Piso que transforma energia mecânica em eletricidade.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/projenergia3/projetos/trabalhos-2014/trabalhos-2014-2/GRUPOH.pdf>. Acesso em 18 abr. 2023.

A GERADORA. **E se acabar a energia em um aeroporto?** Brasil, 2018. Disponível em: <https://www.ageradora.com.br/e-se-acabar-energia-em-um-aeroporto/>. Acesso em: 15 nov. 2022. ISSN 2763-7697

AEROPORTO INTERNACIONAL DE BRASÍLIA. **Sustentabilidade e Responsabilidade Ambiental.** Brasil, 2022. Disponível em: [https://www.bsb.aero/pdf/metas\\_sbbr\\_sustentabilidade.pdf](https://www.bsb.aero/pdf/metas_sbbr_sustentabilidade.pdf). Acesso em: 27 abr. 2023.

BH AIRPORT. **Meio Ambiente e Sustentabilidade.** Brasil, 2023. Disponível em: <https://site.bh-airport.com.br/SitePages/pt/bh-airport/responsabilidade.aspx>. Acesso em: 27 abr. 2023.

CELSIAS. **Foot Powering Tokyo Train Station.** 2009. Disponível em: <http://www.celsius.com/article/footpowering-tokyo-train-station/>. Acesso em: 20 abr. 2023.

CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DE MATERIAIS FUNCIONAIS. **Professor Walter Sakamoto fala sobre sensores capazes de gerar energia.** Brasil, 2017.

Disponível em:<http://cdmf.org.br/2017/08/14/professor-walter-sakamoto-fala-sobre-sensores-capazes-de-gerar-energia/> Acesso em: 06 mai. 2023.

D24AM. **Manutenção programada na energia elétrica afeta serviços do aeroporto de Manaus.** Disponível em:

<https://d24am.com/amazonas/manutencao-programada-na-energia-eletrica-afeta-servicos-do-aeroporto-de-manaus/-eletrica-afeta-servicos-do-aeroporto-de-manaus/>. Acesso em: 25 jun. 2023.

DE JESUS, M. C.; DIAS, C. **Estudo preliminar da produção científica sobre classificação facetada no Brasil.** Minas Gerais, Jan, 2020. Disponível em:

<https://periodicos.ufmg.br/index.php/moci/article/view/19133#:~:text=Trata%2Dse%20de%20estudo%20preliminar,e%20a%20An%C3%A1lise%20de%20Conte%C3%BAdo>. Acesso em: 10 abr. 2023.

DHINGRA, P. *et al.* Energy Harvesting using Piezoelectric Materials. **Special Issue of International Journal of Computer Applications (0975 – 8887).** Acesso em: 12 abr. 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Consumo Mensal de Energia Elétrica por Classe (regiões e subsistemas).** Brasil, 2023. Disponível em:

<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/consumo-de-energia-eletrica> Acesso em: 06 mai. 2023.

EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA. **Seminário do Observatório Nacional de Transporte e Logística.** Brasil, 2018. Disponível

em:<https://ontl.epl.gov.br/wp-content/uploads/2020/09/gerenciamento-de-dados.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2023.

FARIAS, G.; SALLUM, Al. Projeto de geradores piezoelétricos para iluminação no restaurante universitário da UNICAMP. Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação/UNICAMP. **Revista Ciências do Ambiente On-Line.** Volume 9, Número 2. novembro, 2013. Disponível em:

<http://sistemas.ib.unicamp.br/be310/index.php/be310/article/viewFile/386/307>. Acesso em: 29 abr. 2023.

G1. **Unesp tenta criar versão nacional de piso que gera eletricidade.** Brasil, 2010. Disponível em: <https://g1.globo.com/Noticias/Ciencia/0,,MUL1557609-5603,00->

[UNESP+TENTA+CRIAR+VERSAO+NACIONAL+DE+PISO+QUE+GERA+ELETRICIDADE.html](https://g1.globo.com/Noticias/Ciencia/0,,MUL1557609-5603,00-UNESP+TENTA+CRIAR+VERSAO+NACIONAL+DE+PISO+QUE+GERA+ELETRICIDADE.html). Acesso em: 05 mai. 2023.

HAOCHENG, X.; LINBING, W.; DONG, W.; DRUTA, C. Piezoelectric Energy Harvesting from Traffic Induced Deformation of Pavements. **International Journal of Pavement Research & Technologic.** 5(5):333-337. 2012. Disponível em: <http://www.ijprt.org.tw/reader/pdf.php?id=256>. Acesso em: 26 abr. 2023.

HENKES, J. A.; PÁDUA, A. D. B. de. Desenvolvimento Sustentável na Aviação R. bras. Av. civil. ci. Aeron., Florianópolis, v. 3, n. 4, p. 153-176, ago-out. 2023.

Brasileira: Histórico, Principais Avanços e Desafios. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 6, n. 2, p. 534. Santa Catarina, 2017. Disponível em: [https://portaldeperiodicos.animaeducacao.com.br/index.php/gestao\\_ambiental/article/view/5153/3190](https://portaldeperiodicos.animaeducacao.com.br/index.php/gestao_ambiental/article/view/5153/3190). Acesso em: 21 abr. 2023.

ICAO. **Promovendo a sustentabilidade da aviação e dos aeroportos para o Dia Mundial do Meio Ambiente**. Disponível em: <https://www.icao.int/Newsroom/Pages/Promo-tingaviation-and-airport-sustainability-for-World-Environment-Day.aspx>. Acesso em: 11 abr. 2023.

INFRAERO. **Estatísticas**. Brasil, 2022. Disponível em: <https://transparencia.infraero.gov.br/estatisticas/> Acesso em: 05 nov. 2022.

INFRAERO. **Medidas sustentáveis reduzem em 60% custos de energia elétrica do Aeroporto de Teresina**. Brasil, 2018. Disponível em: <https://www4.infraero.gov.br/noticias/medidas-sustentaveis-reduzem-em-60-custos-de-energia-eletrica-do-aeroporto-de-teresina/> Acesso em: 27 abr. 2023.

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. **Pneus produzem energia para recarregar baterias**. Brasil, 2011. Disponível em: <https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=geradores-piezoeltricos-pneus-geradores-energia&id=010170110524>. Acesso em: 27 abr. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE AVIAÇÃO. **Ações sustentáveis em aeroportos reduzem danos ao meio ambiente**. Brasil, 2016. Disponível em: <https://institutoaviacao.org/noticias/infraestrutura/acoes-sustentaveis-em-aeroportos-reduzem-danos-ao-meio-ambiente/?n=acoes-sustentaveis-em-aeroportos-reduzem-danos-ao-meio-ambiente>. Acesso em: 27 abr. 2023.

KAUFMANN, T. B. Universidade Federal Da Fronteira Sul. **Repositório Digital UFFS: Micro colheita de energia através de piso vibratório com sistema piezoelétrico**, 2021. Disponível em: <https://rd.uffs.edu.br/bitstream/prefix/5273/1/KAUFMANN.pdf> Acesso em: 24 abr. 2023.

L. D. Cancio; S. Ghissoni, Piezoelectricidade: a Geração de Energia Limpa e Suas Aplicações. **Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão**, 2013. Disponível em: <http://seer.unipampa.edu.br/index.php/siepe/article/view/6035>. Acesso em: 01 out. 2022.

LENZI, G. K. S.; Melo, M. T. **METODOLOGIA CIENTÍFICA**. Florianópolis, 2022. Acesso em: 17 Jul. 2022.

**MOTA, B. C. O PAVIMENTO COMO INSTRUMENTO DE GERAÇÃO DE ENERGIA PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DE CIDADES INTELIGENTES.** Disponível em:

[https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/48544/1/2019\\_tcc\\_bcmota.pdf](https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/48544/1/2019_tcc_bcmota.pdf). Acesso em: 14 abr. 2023.

**MOTA, B. C.; NETO, B. C.; DE ALMEIDA, S. G. F.; MARANHÃO, T. F.; REIS, F. D. C. S.; BARROSO, S. H. A. Estudo preliminar da produção científica sobre classificação facetada no Brasil.** Disponível em:

<https://periodicos.ufmg.br/index.php/moci/article/view/19133#:~:text=Trata%2Dse%20de%20estudo%20preliminar,e%20a%20An%C3%A1lise%20de%20Conte%C3%BAdo>. Acesso em: 22 mai. 2023.

**PERLINGEIRO, A. R.; PIMENTA, G. M.; SILVA, E, Geração De Energia Através De Materiais Piezoelétricos, Monografia de graduação, Rio de Janeiro – RJ. Brasil, Centro Federal De Educação Tecnológica Celso Suckow Da Fonseca - CEFET/RJ. Brasil, 2016.** Disponível em: <http://www.cefet-rj.br/attachments/article/2943/Gera%C3%A7%C3%A3o%20de%20Energia%20atrav%C3%A9s%20de%20Materiais%20Piezoel%C3%A9tricos.pdf>. Acesso em: 06 abr. 2023.

**ROSHANI, H.; JAGTAP, P.; DESSOUKI, S.; MONTOYA, A.; PAPAGIANNAKIS, A. T. (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, 2018.** Roshani, H.; P. Jagtap; S. Dessouky; A. Montoya; A. T. Papagiannakis (2018). Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/A-Papagiannakis/publication/321228506\\_Theoretical\\_and\\_Experimental\\_Evaluation\\_of\\_Two\\_Roadway\\_Piezoelectric-Based\\_Energy\\_Harvesting\\_Prototypes/links/5a2ef1110f7e9bfe81700f28/Theoretical-and-Experimental-Evaluation-of-Two-Roadway-Piezoelectric-Based-Energy-Harvesting-Prototypes.pdf](https://www.researchgate.net/profile/A-Papagiannakis/publication/321228506_Theoretical_and_Experimental_Evaluation_of_Two_Roadway_Piezoelectric-Based_Energy_Harvesting_Prototypes/links/5a2ef1110f7e9bfe81700f28/Theoretical-and-Experimental-Evaluation-of-Two-Roadway-Piezoelectric-Based-Energy-Harvesting-Prototypes.pdf). Acesso em: 06 mai. 2023.

**SILVEIRA, E. Eletricidade do aperto.** Pesquisa FAFESP. Edição 171, Brasil, 2010. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/eletricidade-do-aperto/#:~:text=Para%20Sakamoto%2C%20a%20solu%C3%A7%C3%A3o%20pode,um%20tamanho%20pequeno%E2%80%9D%2C%20diz>. Acesso em: 06 mai. 2023.

**SALVADOR BAHIA AIRPORT. SUSTENTABILIDADE.** Brasil. 2022. Disponível em: <https://www.salvador-airport.com.br/pt-br/sustentabilidade>. Acesso em: 19 abr. 2023.

**SILVA, R. PIEZOELETRICIDADE COMO FONTE DE ENERGIA ALTERNATIVA.** Brasil, 2018. Disponível em:

<https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/robson.pdf>. Acesso em: 02 abr. 2023.

VOLTIMUM. **Inovación e generación de energía a través de la pisadas humanas.** Mexico, 2014. Disponível em: <https://www.voltimum.com.co/noticias-del-sector/competitividad-energetica>. Acesso em: 26 abr. 2023.

XIONG, H.; WANG, L.; WANG, D.; DRUTA, C. INTERNATIONAL JOURNAL OF PAVEMENT RESEARCH & TECHNOLOGY 5, 2012. Energy Harvesting from Traffic Induced Deformation of Pavements. **International Journal of Pavement Research & Technologic.** 5(5):333-337. Disponível em: [https://scholar.google.com.br/scholar?hl=pt-BR&as\\_sdt=0%2C5&q=piezoelectric+energy+harvesting+from+tr%C3%A1fico+induced+deformation+of+pavements+&btnG=#d=gs\\_qabs&t=1687181932111&u=%23p%3D30SlSEhiCTIJ](https://scholar.google.com.br/scholar?hl=pt-BR&as_sdt=0%2C5&q=piezoelectric+energy+harvesting+from+tr%C3%A1fico+induced+deformation+of+pavements+&btnG=#d=gs_qabs&t=1687181932111&u=%23p%3D30SlSEhiCTIJ). Acesso em: 26 abr. 2023.

ZUR REDUKTION DER SCHLUPFWELLENBILDUNG.  
**Konstruktive Möglichkeiten zur Verzögerung der Schlupfwellenbildung an den bogeninneren Schienen in engen Gleisbögen.** Alemanha, 2012. Disponível em: <https://docplayer.org/50723073-Zur-reduktion-der-schlupfwellenbildung.html>. Acesso em: 19 abr. 2023.

