

A PRODUÇÃO DE ENERGIA PIEZOELÉTRICA NAS CALÇADAS DE BENTO GONÇALVES

Nomes: Eduardo Garcia da Silva, Matheus Augusto Silveira, Orientador: Tiago Cassol Severo, Colégio Scalabriniano Nossa Senhora Medianeira

RESUMO: O crescimento contínuo do consumo de energia no Brasil, aliado à forte dependência da matriz hidrelétrica, reforça a necessidade de diversificar as fontes renováveis disponíveis. Diante desse cenário, este estudo investigou a viabilidade da aplicação do efeito piezoelétrico em calçadas no município de Bento Gonçalves, avaliando seu potencial como fonte complementar de energia sustentável. Para isso, foi construído e testado um protótipo contendo 12 pastilhas piezoelétricas conectadas em série, submetidas à compressão por massas de 0,5 kg, 1 kg e 1,5 kg. As medições de tensão e corrente foram realizadas com auxílio de multímetro digital, permitindo analisar o comportamento eletromecânico do sistema. Os resultados indicaram um aumento aproximadamente linear da tensão em função da massa aplicada, com incrementos médios de 16 V, enquanto a corrente permaneceu na faixa dos microampères. Ao extrapolar os dados para um fluxo urbano de cerca de 4.000 pedestres por dia, estimou-se que uma área de 1 m² equipada com dispositivos semelhantes poderia gerar aproximadamente 7,8 Joules diários. Conclui-se que a piezoelectricidade não substitui grandes matrizes energéticas, mas pode atuar como fonte complementar para sinalização e educação ambiental.

Palavras-Chave: Energia Piezoelétrica; Pisos Geradores de Energia; Energia Renovável; Sustentabilidade.

ABSTRACT: *The increasing demand for electricity in Brazil, combined with the country's strong dependence on hydroelectric power, highlights the need to diversify renewable energy sources. In this context, piezoelectricity appears as a complementary alternative capable of generating electrical energy from mechanical pressure on specific materials. This study aimed to evaluate the viability of applying this technology to sidewalks. A prototype composed of twelve piezoelectric discs connected in series was constructed and tested using controlled masses to measure the resulting voltage and current. The results showed that the voltage increased as the applied mass grew, while the current remained low, indicating limited instantaneous power. When the data were projected to an urban environment with moderate pedestrian flow, the potential for small-scale applications became evident. Therefore, piezoelectricity can be considered a complementary energy source, suitable for low-power lighting, signaling systems, and environmental awareness initiatives.*

Keywords: *Piezoelectric Energy; Urban Sustainability; Smart Sidewalks; Renewable Sources*

INTRODUÇÃO

Descoberta e Descoberta e trabalhada por diversos cientistas ao longo dos séculos, a energia elétrica tornou-se um dos pilares da sociedade contemporânea, estando presente em praticamente todos os setores da vida moderna e sendo indispensável para o desenvolvimento econômico, tecnológico e social. Sua aplicação inicial no mundo comercial e urbano remonta à Revolução Industrial, no século XIX, sendo ampliada de forma decisiva a partir das contribuições de Thomas Edison, especialmente com a criação da lâmpada elétrica incandescente em 1879, que viabilizou a popularização da iluminação artificial e impulsionou o uso da eletricidade em larga escala (MAIA, 2017). No Brasil, as primeiras implantações ocorreram no final do século XIX, destacando-se a utilização da energia elétrica na estação Rio da Estrada de Ferro D. Pedro II, conforme Imagem 1,0, com a instalação de seis lâmpadas a arco voltaico, conhecidas como “velas Jablochhoff”, alimentadas por dois dínamos do tipo “Gramme”, marco inicial da iluminação elétrica no país e símbolo do início da modernização urbana brasileira (PREFEITURA SP, 2024).

Com isso, é de suma importância abordar as questões e os problemas ambientais

relacionados a esses fatos. O setor energético é responsável por aproximadamente 40% das emissões globais de dióxido de carbono (CO₂), intensificando o aquecimento global e seus efeitos (SYVITSKI et al., 2020). Em 2024, o crescimento do consumo continuou acelerado: somente em julho, o consumo nacional de energia elétrica atingiu 44 803 GWh, representando uma alta de 6,6% em relação ao mesmo mês do ano anterior. (EPE, 2024). Tais números sinalizam que a demanda continua forte, impulsionada por fatores sazonais, aumento da atividade industrial e expansão do mercado livre de energia, que cresceu 12,6% no período (EPE, 2024). Embora o Brasil possua uma das matrizes mais limpas do mundo, com cerca de 45% de fontes renováveis, ela apresenta baixa diversificação, uma vez que depende fortemente da geração hidrelétrica (cerca de 55–60% da eletricidade gerada). Um exemplo é a Usina Hidrelétrica de Itaipu, Imagem 2,0, localizada no rio Paraná, na fronteira com o Paraguai. Considerada a principal hidrelétrica do país e uma das maiores do mundo, Itaipu possui 14.000 MW de potência instalada e gera, em média, mais de 90 milhões de MWh por ano, atendendo parte significativa da demanda de energia do Brasil e do Paraguai (ITAIPU BINACIONAL, 2024). Esse tipo de concentração torna o sistema vulnerável em períodos de estiagem, quando os reservatórios ficam em níveis baixos. Tal característica gera vulnerabilidades em períodos de estiagem, quando há necessidade de acionar usinas termelétricas, mais caras e poluentes (TOLMASQUIM, 2007).

Imagem1.0, Estação Rio da Estrada:



Fonte: (FERREZ, 1889)

Imagem 2,0, Usina de Itaipu:



Fonte: Itaipu Binacional (2021)

Diante desse cenário, este artigo propõe-se a investigar uma alternativa renovável e sustentável: a aplicação do efeito piezoelétrico em calçadas no município de Bento Gonçalves, como forma de produzir energia, contribuir para a diversificação da matriz elétrica e auxiliar no suprimento da demanda energética da população. A cidade, conhecida pelo turismo e pela movimentação intensa em áreas públicas, poderia ser um espaço de testes para esse tipo de tecnologia. O objetivo não é substituir grandes usinas, mas contribuir de forma local, fornecendo energia para iluminação pública, placas informativas ou sistemas de monitoramento urbano.

Além disso, este estudo se relaciona diretamente com a ODS 7 (Energia Acessível e Limpa) da Agenda 2030 da ONU, que tem como meta garantir acesso confiável e sustentável à energia. Ao propor o uso de pisos piezoelétricos em áreas urbanas, busca-se contribuir para a ampliação do uso de energias renováveis, diversificação da matriz energética e aumento da eficiência no consumo.

A piezoelectricidade foi descoberta em 1880 pelos físicos franceses Pierre Curie e Jacques Curie. Esse fenômeno consiste na produção de correntes elétricas por meio de materiais que, quando submetidos à compressão mecânica, geram energia a partir da pressão exercida, ocasionando uma diferença de potencial. Tal processo ocorre porque a compressão dos cristais piezoelétricos provoca uma redistribuição das cargas elétricas internas, resultando em tensão elétrica (UFRGS, 2014). Ao longo da história, a piezoelectricidade encontrou aplicação em diversos dispositivos, como microfones e toca-discos, sendo mais recentemente utilizada em projetos

urbanos inovadores. Em Tóquio, por exemplo, calçadas equipadas com placas piezoelétricas, conforme Imagem 3.0, permitem a geração de energia suficiente para alimentar letreiros luminosos e catracas eletrônicas. Já em Gloucester, na Inglaterra, um supermercado instalou placas piezoelétricas em seu estacionamento, com o objetivo de aproveitar o fluxo de veículos e pedestres para a geração elétrica (UNIVATES)

Imagem 3.0, Estação Shibuya



Fonte: Getty Images (2024)

O objetivo geral deste estudo é investigar a viabilidade da aplicação do efeito piezoelétrico em calçadas do município de Bento Gonçalves, avaliando seu potencial como fonte complementar de energia renovável e sua contribuição para a diversificação da matriz elétrica brasileira. De forma mais detalhada, os objetivos específicos envolvem analisar o crescimento do consumo de energia no Brasil nas últimas décadas e seus impactos ambientais, identificar a relação entre a dependência da matriz hidrelétrica e os riscos associados à baixa diversificação, revisar experiências nacionais e internacionais de utilização da piezoeletricidade em pisos e pavimentos urbanos, e estimar a aplicabilidade dessa tecnologia em espaços públicos de Bento Gonçalves considerando o fluxo de pedestres. Nesse sentido, a proposta de avaliar sua viabilidade em Bento Gonçalves se insere em um debate contemporâneo sobre inovação urbana e sustentabilidade, buscando alternativas que contribuam para uma matriz energética mais diversificada e ambientalmente responsável, ao mesmo tempo em que aproximam a população de práticas cotidianas de consciência energética.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A matriz energética brasileira é considerada uma das mais limpas do mundo, em razão da alta participação de fontes renováveis. Segundo o Balanço Energético Nacional, cerca de 88% da eletricidade produzida em 2023 teve origem em fontes renováveis, sendo que aproximadamente 55 a 60% dessa energia veio de hidrelétricas (EPE, 2024). Essa concentração, entretanto, cria uma vulnerabilidade: em períodos de seca, há necessidade de acionar termelétricas, mais caras e poluentes, o que compromete a sustentabilidade ambiental do setor (Tolmasquim, 2007). Nesse sentido, ampliar e diversificar as fontes energéticas é um desafio atual e estratégico.

Entre as alternativas renováveis que vêm sendo estudadas está a piezoeletricidade, descoberta em 1880 por Pierre e Jacques Curie. O fenômeno consiste na geração de eletricidade quando certos materiais, como cristais ou cerâmicas especiais, sofrem compressão mecânica, provocando uma diferença de potencial elétrico (UFRGS, 2014). Inicialmente, essa tecnologia foi aplicada em dispositivos como microfones e toca-discos, mas nas últimas décadas passou a ser investigada como forma de geração complementar de energia em ambientes urbanos.

Diversos estudos têm buscado compreender como pisos e pavimentos piezoelétricos podem ser utilizados para aproveitar o movimento de pedestres e veículos. No Japão, a empresa Soundpower desenvolveu um projeto na estação de metrô de Shibuya, em Tóquio. Cada passo sobre o piso gerava cerca de 0,1 watt, quantidade aparentemente pequena, mas que, diante do

enorme fluxo diário de passageiros, tornou-se suficiente para acender painéis de LED e alimentar catracas eletrônicas (Wired, 2008). Esse caso demonstrou que a piezoelectricidade pode ser eficiente em locais de grande circulação, onde a soma de pequenas quantidades de energia resulta em impactos relevantes.

Na Inglaterra, um supermercado em Gloucester instalou placas piezoelétricas em seu estacionamento. O objetivo foi aproveitar tanto os passos dos clientes quanto a passagem de veículos para produzir energia elétrica destinada ao próprio estabelecimento. Embora não tenham sido divulgados valores exatos da geração, o projeto mostrou que a tecnologia também pode ser aplicada em espaços comerciais, ampliando sua utilidade (Univates, 2016). Pesquisas em rodovias também foram realizadas. A empresa israelense Innowattech testou dispositivos piezoelétricos sob o asfalto, afirmando que um trecho de um quilômetro poderia gerar centenas de quilowatts por hora, sendo possível ver isso na Imagem 4,0. No entanto, avaliações independentes indicaram que os resultados práticos foram muito inferiores, revelando limitações quando se busca produção em larga escala (Reuters, 2009). De forma semelhante, um estudo na China monitorou a passagem de 1.200 veículos em três horas e conseguiu armazenar apenas 76 miliJoules em um capacitor — energia suficiente apenas para alimentar pequenos sensores (Zhang et al., 2022).

Imagem 4,0 - Asfalto Israelense



Fonte: Zero Energy Construction (2022)

Pesquisadores também têm se dedicado à análise dos materiais mais adequados para essa tecnologia. Sezer e Koç (2021) apontam que as cerâmicas PZT apresentam bom desempenho, mas trazem o problema do uso de chumbo, que gera impactos ambientais. Como alternativa, polímeros como o PVDF têm sido estudados, pois, embora gerem menor quantidade de energia, são mais sustentáveis. Moussa, Ismaeel e Solban (2021), por sua vez, compararam diferentes tipos de pisos piezoelétricos em uma estação de metrô e concluíram que, em locais de grande fluxo, é possível utilizar essa energia para reduzir parte do consumo de iluminação tradicional.

De modo geral, os trabalhos apontam que a piezoelectricidade não deve ser entendida como substituta das grandes fontes de energia, mas sim como uma fonte complementar, útil para aplicações locais. Ela é especialmente promissora em ambientes de alto fluxo, como estações, calçadas centrais e espaços turísticos. Além disso, possui valor pedagógico e ambiental, pois desperta na população a consciência sobre o uso de energias renováveis e a importância da diversificação da matriz. Os transdutores piezoelétricos podem ser conectados entre si de duas formas básicas: em série, onde as tensões produzidas se somam, ou em paralelo, onde as correntes se acumulam. Um estudo avaliou vários atuadores piezoelétricos em configuração série e paralelo para entender sua performance na captação de carga elétrica e geração de energia para acionar um LED. Foi constatado que, ao aumentar o número de componentes em paralelo, o sistema apresentou funcionamento mais eficiente (Zhang et al., 2008)

Os piezos ligados em série (positivo com negativo) geram corrente alternada (AC). Essa energia alternada pode ser usada diretamente para acender um LED, que pisca conforme as deformações do piezo. Assim, mesmo com pulsos curtos, o LED pode permanecer aceso por tempo variado (Retificador de onda completa, 2025). Em experimentos práticos, um usuário ligou três

piezos a um retificador, seguido de um capacitor de 100 μF , e tentou acionar um LED. Apesar de haver carga acumulada — chegando a cerca de 6 V — o LED ficou apenas por frações de segundo aceso, indicando que mesmo com componentes simples, é possível gerar energia útil; mas ainda limitada (electronics.stackexchange.com, 2021). Em um estudo recente, sensores piezoelétricos foram colocados sob pisos padrão (455 $\times$ 405 mm). Os autores usaram um circuito simples de retificação e filtragem e conseguiram acionar dois LEDs como carga de demonstração. A energia máxima extraída foi de 249,6 mW por passo, com custo estimado em ~10,2 dólares por cada placa de piso piezoelétrico instalada (Selim et al., 2024).

METODOLOGIA

A presente pesquisa adota uma abordagem experimental e quantitativa, fundamentada na construção e análise de um protótipo gerador de energia piezoelétrica submetido a diferentes intensidades de impacto. O objetivo foi investigar a relação entre a massa aplicada, a altura da queda e a tensão elétrica produzida pelas pastilhas piezoelétricas. O protótipo construído inicialmente possuía dimensões de 13 cm x 10 cm, contendo 4 pastilhas piezoelétricas de 20 mm de diâmetro, distribuídas uniformemente entre duas placas de madeira MDF de 1 cm de espessura, formando uma cápsula mecânica de compressão. As pastilhas foram conectadas eletricamente em série, permitindo o somatório de tensões geradas individualmente. As massas de 0,5 kg; 1 kg; e 1,5 kg foram liberadas de uma altura constante de 0,25 m, gerando impactos controlados. A escolha dessa metodologia se baseia na energia potencial gravitacional relacionada ao impacto, expressa por:

$$E_{pg} = \text{massa (kg)} \cdot \text{gravidade (9,8 m/s}^2\text{)} \cdot \text{altura (0,25m)}$$

Essa energia é transferida para as pastilhas no momento da deformação mecânica. A força média aproximada exercida no impacto foi estimada pela relação:

$$F = E_{pg} / \text{Deformação}$$

A deformação aproximada da estrutura durante o impacto foi estimada em 0,5 mm; (valor obtido por testes). Também houve a simulação da pisada humana, considerando uma pessoa de massa média de 70 kg, resultando em uma força média:

$$\text{Força (Newtons)} = \text{massa (kg)} \cdot \text{gravidade (m/s}^2\text{)} = 70 \cdot 9,8 = 686$$

Esse valor serviu para estimar o limite mecânico suportado pelo protótipo sem comprometimento estrutural. As medições elétricas foram realizadas com um multímetro digital, registrando-se tensão (V) e corrente (mA) máximas de cada impacto. Para cada massa, foram realizadas três repetições, e o valor final considerado corresponde à média aritmética, reduzindo erros experimentais. Posteriormente, os dados coletados foram transformados em gráficos comparativos de tensão e corrente em função da massa aplicada, permitindo observar o comportamento eletromecânico do sistema.

Além disso, os valores obtidos experimentalmente, que representam condições ideais de impacto controlado em laboratório, mostraram-se superiores aos valores projetados para a simulação urbana. Essa diferença ocorre porque, no experimento, a aplicação de força sobre o protótipo é concentrada, vertical e sem perdas significativas por dissipação mecânica, enquanto, em um ambiente real, parte da energia do impacto é dissipada pelo calçado, pela deformação do solo, por irregularidades da superfície e pela distribuição não uniforme da pisada. Dessa forma, a extrapolação dos dados para o cenário urbano foi realizada de maneira conservadora, considerando perdas energéticas inerentes ao uso em campo.

Com isso, buscou-se obter uma estimativa mais realista da energia que poderia ser efetivamente aproveitada em uma calçada de fluxo moderado em Bento Gonçalves, evitando superestimativas dos resultados e tornando a análise mais fiel às condições práticas de aplicação

do sistema. Somente após essa ponderação dos efeitos reais de uso é que se procedeu à estimativa da geração energética média por meio da relação:

$$P = V \cdot I$$

Para tanto, o grupo se encontrou na UCS no dia 25/05/25 para a realização do primeiro protótipo, conforme apresentado na Imagem 5.0. Após essa etapa inicial, foi projetada a versão final do protótipo, apresentada na Imagem 6.0, na qual foram adicionados 8 piezos, totalizando 12 cápsulas piezoelétricas, aprimorando a capacidade de geração do sistema.

Imagem 5,0 – Versão 1 do protótipo

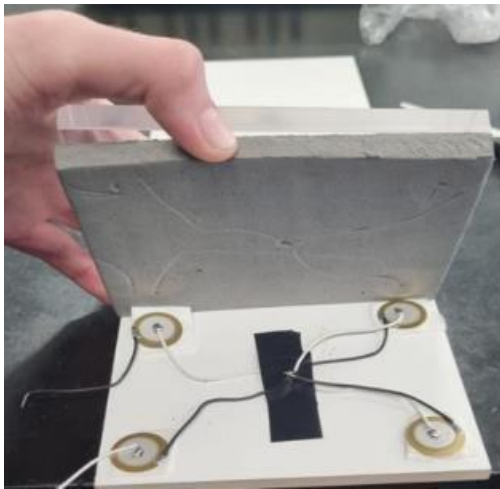
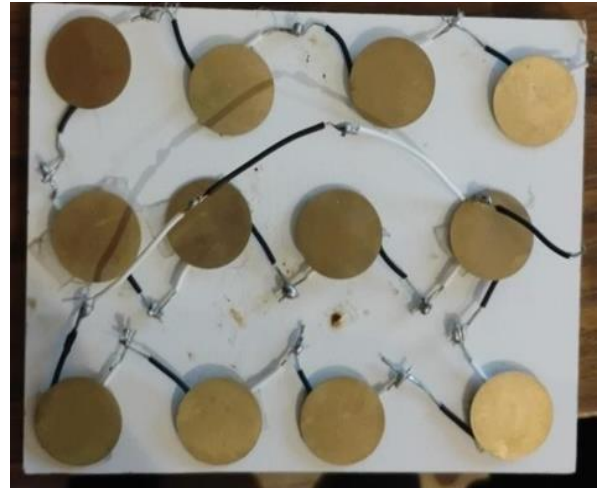


Imagem 6,0 – Versão 2 do protótipo



Fontes: Autores, 2025

RESULTADOS E ANÁLISES

Como resultado dos ensaios realizados, observou-se uma relação aproximadamente linear entre a massa aplicada e a tensão elétrica gerada pelo conjunto piezoelétrico, evidenciando um comportamento regular, previsível e coerente com os princípios físicos que regem o efeito piezoelétrico. A cada incremento de 0,5 kg aplicado sobre o sistema, verificou-se um aumento médio de aproximadamente 16 V na tensão total em circuito aberto, o que indica um bom aproveitamento da energia mecânica convertida em energia elétrica pelo protótipo desenvolvido. Esse comportamento demonstra que, sob as mesmas condições experimentais de altura de queda e de geometria do protótipo, a força de compressão exerce influência diretamente proporcional sobre a resposta piezoelétrica das pastilhas, reforçando a eficiência do sistema na geração de picos de tensão elétrica. Além disso, a linearidade observada entre as variáveis analisadas contribui para a confiabilidade dos resultados obtidos, uma vez que indica estabilidade no funcionamento do dispositivo dentro da faixa de massas testadas. Esse efeito pode ser visualizado de forma clara na Tabela 1.0 apresentada a seguir, na qual se observa a evolução progressiva dos valores de tensão conforme o aumento da massa aplicada ao dispositivo, permitindo uma análise direta da relação entre força aplicada e resposta elétrica do sistema ao longo dos ensaios.

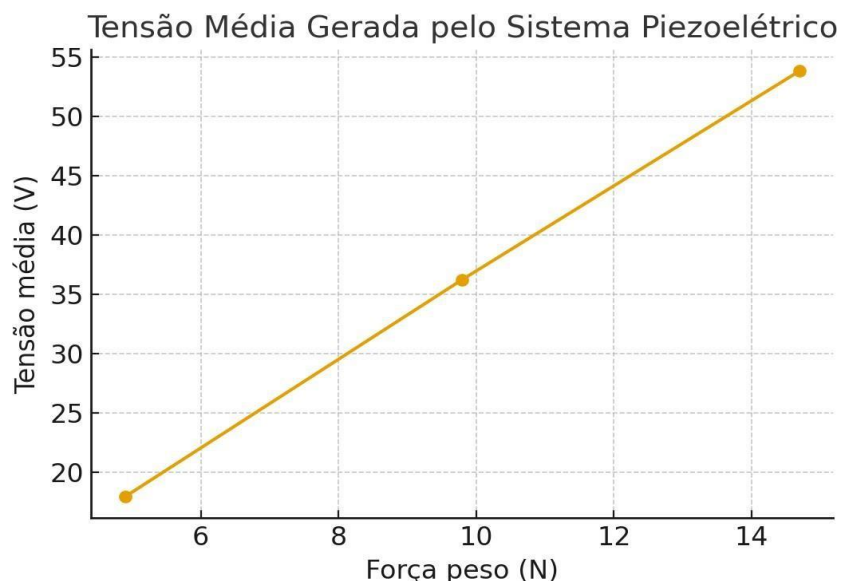
Tabela 1,0 - Tensões geradas para diferentes forças peso (Newtons):

Força peso (N)	Tensão 1 (V)	Tensão 2 (V)	Tensão 3 (V)	Tensão média (V)
4.90	17.1	18.18	18.54	17.94
9.80	34.2	36.72	37.8	36.24
14.70	51.84	53.46	56.16	53.82

Fonte: Autores, 2025

Além disso, o grupo elaborou um gráfico comparativo para representar visualmente as diferenças de tensão geradas pelo sistema. No gráfico, foram traçadas três retas correspondentes às três repetições experimentais, o que permite observar com clareza o comportamento elétrico do protótipo diante das diferentes massas aplicadas. Esse recurso visual evidencia a tendência de aumento gradual da tensão conforme a força de compressão sobre as pastilhas piezoelétricas se intensifica, reforçando a relação direta entre massa aplicada e resposta elétrica, como é possível ver a seguir no Gráfico 1,0:

Gráfico 1,0 - Tensão elétrica (volts) em função da força aplicada (Newtons):



Fonte: Autores, 2025

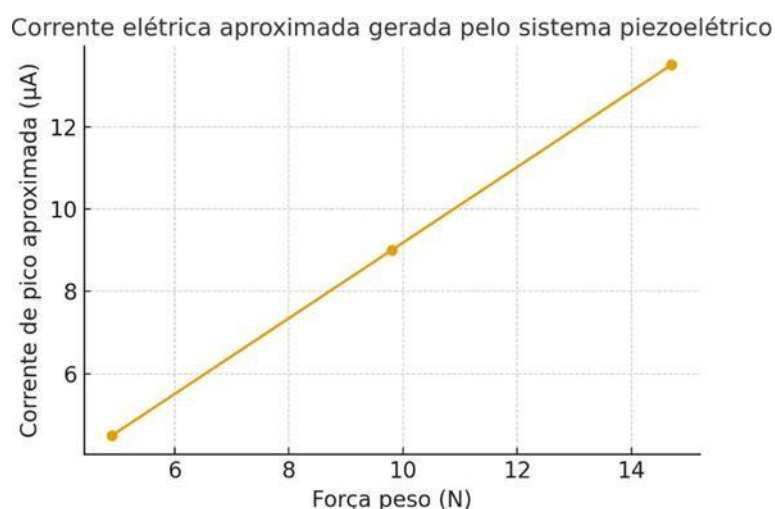
Além da análise da tensão elétrica, também foi estimada a corrente elétrica gerada durante os impactos aplicados ao sistema piezoelétrico. Observou-se que os valores de corrente apresentam um aumento proporcional à massa utilizada, seguindo o mesmo comportamento de variação da tensão. No entanto, os valores de corrente obtidos são relativamente baixos, situando-se na ordem de microampères, o que é característico de sistemas piezoelétricos conectados em série. Este resultado indica que, embora o protótipo seja eficiente na geração de picos de tensão, sua capacidade de entregar correntes elevadas é limitada, tornando necessário o uso de circuitos de armazenamento (como capacitores ou baterias) e condicionamento energético caso se pretenda alimentar dispositivos eletrônicos de maior demanda. A seguir, apresenta-se a Tabela 2,0 com os valores aproximados de corrente elétrica gerada e, logo abaixo, o Gráfico 2,0, que representa visualmente esse comportamento.

Tabela 2,0 - Valores da corrente elétrica (microampères):

Força peso (N)	Corrente aproximada (μA)
4.90	4.5
9.80	9.0
14.70	13.5

Fonte: Autores, 2025

Gráfico 2,0 – Corrente elétrica (microampères) em função da força aplicada (Newtons):



Fonte: Autores, 2025

Para estimar a aplicação desse sistema em um cenário real, considerou-se um trecho da Rua Delvino, no centro de Bento Gonçalves, onde se observa um fluxo diário aproximado de 4.000 pedestres em dias úteis. A partir desse valor, estimou-se que, se cada pessoa realizasse ao menos um passo útil sobre a superfície equipada com o dispositivo piezoelétrico, o total diário de energia acumulada seria de cerca de 0,13 Joules por unidade do protótipo. Ao expandir essa área para 1 m² de piso, o que corresponde a aproximadamente 60 unidades do dispositivo distribuídas lado a lado, a energia acumulada poderia alcançar cerca de 7,8 Joules por dia.

Apesar de modesto quando comparado às grandes fontes de geração de energia, esse valor se mostra relevante dentro da proposta de microgeração distribuída e é coerente com estudos que defendem o uso da piezoelectricidade como fonte complementar, especialmente voltada para aplicações de baixo consumo, como sinalização, ativação de LEDs, sensores urbanos e ações pedagógicas de conscientização energética junto à população (Selim et al., 2024).

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo demonstram que o protótipo piezoelétrico desenvolvido apresentou comportamento eletromecânico consistente, evidenciando uma relação aproximadamente linear entre a força aplicada e a tensão gerada. A cada incremento de 0,5 kg ($\approx$

4,9 N), observou-se aumento médio de cerca de 16 V, indicando boa eficiência na produção de picos de tensão pelo conjunto de 12 pastilhas conectadas em série. Em contrapartida, a corrente elétrica manteve-se na faixa dos microampères, o que limita a potência instantânea disponível e reforça a necessidade de circuitos de armazenamento para aplicações práticas. Ao extrapolar os dados para um cenário urbano, estimou-se que uma área de 1 m² equipada com dispositivos semelhantes poderia gerar cerca de 7,8 Joules diários, valor modesto, mas compatível com propostas de uso para sinalização, LEDs e ações educativas.

Ao comparar esses resultados com os trabalhos encontrados na literatura, observa-se que diferentes estudos apresentam comportamentos semelhantes ao que foi identificado neste protótipo. Pesquisas como as de Selim et al. (2024) e Zhang et al. (2022) também apontam que pisos piezoelétricos são capazes de gerar picos de tensão significativos, porém produzem correntes reduzidas, resultando em potência limitada — característica igualmente verificada neste experimento. Da mesma forma, iniciativas aplicadas em ambientes urbanos, como as da estação de Shibuya (Wired, 2008) e do supermercado de Gloucester (Univates, 2016), mostram que a tecnologia tende a ser mais adequada para aplicações de baixo consumo, como sinalização, iluminação leve e dispositivos informativos. Portanto, os dados obtidos neste estudo se aproximam do que já foi relatado por outros autores, reforçando a ideia de que a piezoelectricidade funciona de forma mais eficaz como fonte complementar em locais de alto fluxo, contribuindo para a diversificação energética e para iniciativas de conscientização ambiental.

AGRADECIMENTOS

Pela contribuição na elaboração deste projeto, o grupo agradece à Universidade de Caxias do Sul (UCS) pela disponibilização do espaço e pelo apoio na fabricação do protótipo. Agradecemos também a Luciano Oliveira da Silva pelo auxílio na obtenção da madeira MDF e do LED utilizados. Além disso, expressamos nossos agradecimentos aos familiares, pelo incentivo e suporte ao longo do desenvolvimento do trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CIGOGNINI, T. A. et al. *Caminho da Energia*. Revista Destaques Acadêmicos, v. 8, n. 4, Univates, 2016. Disponível em: <https://www.univates.br/bdu/handle/10737/1134>. Acesso em: 09 out. 2025.

ELECTRONICS STACKEXCHANGE. *Piezoelectric disks + bridge rectifier + capacitor → LED only flashes briefly*. 2021. Disponível em: <https://electronics.stackexchange.com/questions/140629>. Acesso em: 09 out. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Balanco Energético Nacional 2024: Relatório Síntese*. Rio de Janeiro, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional>. Acesso em: 09 out. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Resenha Mensal do Mercado de Energia Elétrica – Agosto/2024*. Rio de Janeiro, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br>. Acesso em: 09 out. 2025.

FERREZ, Marc. *Estrada de Ferro Central do Brasil – Estação Central (c.1889)*. Brasileira Fotográfica / Instituto Moreira Salles. Disponível em: <https://brasilianafotografica.bn.br>. Acesso em: 10 out. 2025.

GOLDEMBERG, J. *Energia e desenvolvimento*. Estudos Avançados, v. 12, n. 33, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-40141998000100006>. Acesso em: 10 out. 2025.

ITAIPU BINACIONAL. *Nossos números*. 2024. Disponível em: <https://www.itaipu.gov.br/nossanergia/nossos-numeros>. Acesso em: 10 out. 2025.

PREFEITURA DE SÃO PAULO. *História da Iluminação Pública*. SP Regula, 2024. Disponível em: <https://www.spregula.prefeitura.sp.gov.br>. Acesso em: 11 out. 2025.

REUTERS. *Israel tests piezoelectric road that generates electricity*. 13 nov. 2009. Disponível em: <https://www.reuters.com/article/us-israel-energy-idUSTRE5AC2G520091113>. Acesso em: 11 out. 2025.

SEZER, N.; KOÇ, M. *A comprehensive review on the state-of-the-art of piezoelectric energy harvesting*. Nano Energy, v. 80, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105567>. Acesso em: 11 out. 2025

SELIM, A. et al. *Piezoelectric floor for low-power devices in public spaces*. Materials Today: Proceedings, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.12.215>. Acesso em: 11 out. 2025.

SYVITSKI, J. et al. *Human, Ecosystem and Earth System Planetary Synthesis*. Communications Earth & Environment, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00057-6>. Acesso em: 12 out. 2025.

TOLMASQUIM, M.; GUERREIRO, A.; GORINI, R. *Matriz Energética Brasileira: uma prospectiva*. Novos Estudos CEBRAP, n. 78, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0101-33002007000100006>. Acesso em: 12 out. 2025.

UFRGS. *Materiais Piezoelétricos – Departamento de Engenharia de Materiais*. Porto Alegre, 2014. Disponível em: <https://www.ufrgs.br>. Acesso em: 12 out. 2025.

WIRED. *Power-Generating Floor in Train Stations Light Up Holiday Displays*. 17 dez. 2008. Disponível em: <https://www.wired.com/2008/12/piezo-floor/>. Acesso em: 13 out. 2025.

ZHANG, Z. et al. *Performance of piezoelectric energy harvesting system on low-speed road sections*. Energy Reports, v. 8, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.02.021>. Acesso em: 13 out. 2025.