

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
MINAS GERAIS - *CAMPUS* AVANÇADO IPATINGA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Jorge Lucca da Rocha Cimini e Leticia Corrêa Gonçalves

**PIEZOELETRICIDADE COMO FORMA DE GERAÇÃO PARA
ALIMENTAÇÃO ELÉTRICA DE RODOVIAS: A CONSTRUÇÃO DE UM
DISPOSITIVO PARA A COLETA DE DADOS**

Ipatinga
2023

JORGE LUCCA DA ROCHA CIMINI E LETICIA CORRÊA GONÇALVES

**PIEZOELETRICIDADE COMO FORMA DE GERAÇÃO PARA
ALIMENTAÇÃO ELÉTRICA DE RODOVIAS: A CONSTRUÇÃO DE UM
DISPOSITIVO PARA A COLETA DE DADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Avançado Ipatinga, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Me. Felipe Antunes

Coorientador: Prof. Me. Luciano Silva

Ipatinga
2023

C573p Cimini, Jorge Lucca da Rocha; Gonçalves, Letícia Corrêa.

Piezoeletricidade como forma de geração para alimentação elétrica de rodovias: a construção de um dispositivo para a coleta de dados. Jorge Lucca da Rocha Cimini; Letícia Corrêa Gonçalves. – 2023.

91f.;il.

Orientador: Felipe Antunes.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus Ipatinga*, 2023.

1. Piezoeletricidade. 2. Energia Sustentável. 3. Geração Alternativa.
I. Antunes, Felipe. II. Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus Ipatinga*.
III. Título.

CDD 621.471

Catálogo: Rejane Valéria Santos - CRB-6/2907

Jorge Lucca da Rocha Cimini e Leticia Corrêa Gonçalves

**PIEZOELETRICIDADE COMO FORMA DE GERAÇÃO PARA
ALIMENTAÇÃO ELÉTRICA DE RODOVIAS: A CONSTRUÇÃO DE UM
DISPOSITIVO PARA A COLETA DE DADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Avançado Ipatinga, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovado em: ____ / ____ / 2023 pela banca examinadora:

Prof. Me. Felipe Antunes (Orientador) - IFMG

Prof. Me. Luciano Silva (Coorientador) - IFMG

Prof. Sandro Dornellas - IFMG

AGRADECIMENTOS

Os estudantes gostariam de agradecer aos parceiros que, de prontidão, auxiliaram na execução do trabalho durante a parte de projeto e construção das versões do protótipo apresentado. Os estudantes dedicam o agradecimento, também, ao orientador Felipe Antunes e ao coorientador Luciano Silva por investir tempo e trabalho em conjunto com os estudantes e, por muitas vezes, dedicação muito acima do comum.

Dedica-se também os agradecimentos ao grande "Mestre das Soluções", Júlio Olguin por fornecer as ferramentas necessárias para a produção da primeira versão do protótipo do módulo de aquisição de dados. Também, pode-se destacar a contribuição de Pablo Henrique Rodrigues que, com sua habilidade em desenho tridimensional, prontamente auxiliou na criação do suporte para fixação dos componentes da versão apresentada do protótipo. Os agradecimentos também são dedicados a João Lucas Nascimento Barroso, que forneceu equipamentos para a realização de testes com microcontrolador fora de laboratório, auxiliando no avanço do projeto. Os estudantes também são gratos ao Professor Willian Marlon Ferreira por auxiliar na impressão dos modelos "3D" utilizados no trabalho. Aos familiares, os estudantes agradecem pelo incentivo ao longo da jornada acadêmica, apoiando e dando suporte no que foi necessário para chegar ao fim do curso. Aos amigos que ajudaram na conclusão do trabalho, os estudantes demonstram sua gratidão por acreditar no projeto.

RESUMO

Com o avanço tecnológico, o estudo sobre as fontes de energias renováveis e a geração com baixa emissão de poluentes tem se tornado atrativo no ramo da Engenharia Elétrica. Ao observar o custo do espaço físico no Brasil é possível vislumbrar acerca de um tipo de geração de energia que não ocupa espaço. Tendo em vista esses aspectos, o estudo da geração por meio de cristais piezoelétricos nas rodovias torna-se indispensável, tendo em vista que gerar energia através da simples passagem de veículos em um local que originalmente seria destinado apenas para rodagem é uma grande vantagem que, a longo prazo, tornar-se-á lucrativo e sustentável. Durante o trabalho, para mensurar o potencial de geração de energia a partir de pastilhas piezoelétricas foi desenvolvido um protótipo de módulo de aquisição de dados para relacionar a geração de energia com a carga aplicada sobre as pastilhas, desse modo, pôde-se perceber, de maneira experimental, o potencial de geração do modelo apresentado.

Palavras-chave: Piezoeletricidade; Transdutor; Geração de Energia Sustentável; Experimento; Geração Alternativa.

ABSTRACT

With technological advancements, the study of renewable energy sources and low-pollution generation has become attractive in the field of Electrical Engineering. When considering the cost of physical space in Brazil, it is possible to envision a type of energy generation that doesn't occupy space. Given these aspects, the study of energy generation through piezoelectric crystals on highways becomes indispensable, as generating energy through the simple passage of vehicles in an area originally intended only for road use is a significant advantage that will, in the long run, become profitable and sustainable. During the project, a prototype data acquisition module was developed to measure the potential energy generation from piezoelectric patches and relate it to the applied load on the patches. In this way, the potential of the presented model for energy generation could be experimentally observed.

Keywords: Piezoelectricity; Transducer; Sustainable Energy Generation; Experiment; Alternative Generation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Balanço energético mundial 2022.	18
Figura 2 – Ilustração da relação (a) simetria e efeito apolar (b) assimetria e efeito polar.	20
Figura 3 – Aplicações da piezoeletricidade.	21
Figura 4 – Circuito de ligação do sistema de coleta de dados.	24
Figura 5 – Diagrama do circuito do sensor de carga de 50 kg com HX711.	27
Figura 6 – Ilustração da conexão do condutor do cristal piezoelétrico.	29
Figura 7 – Materiais utilizados como base. (A)Tampa superior do protótipo,(B)Interior do protótipo do módulo de aquisição de dados.	31
Figura 8 – Segunda versão do módulo de aquisição de dados (sem a plataforma).	32
Figura 9 – Fixação da célula de carga à base do protótipo.	34
Figura 10 – Solda da pastilha na parte central da cerâmica.	34
Figura 11 – Bornes de conexão fixados à base.	35
Figura 12 – Fratura do ponto de solda.	36
Figura 13 – Peça inferior do modelo 3D.	37
Figura 14 – Peça superior do modelo 3D.	38
Figura 15 – Disposição da pastilha no modelo impresso.	39
Figura 16 – Disposição dos componentes do experimento.	40
Figura 17 – Fita condutiva no formato da parte inferior do modelo 3D.	41
Figura 18 – Disposição final dos elementos do módulo.	42
Figura 19 – Experimento em laboratório.	43
Figura 20 – Curva de calibração.	44
Figura 21 – Código da curva de calibração.	45
Figura 22 – Tensão gerada em laboratório utilizando um piezo sem carga.	47
Figura 23 – Tensão gerada em laboratório utilizando um piezo sem carga e um passo.	48
Figura 24 – Tensão gerada em laboratório utilizando dois piezos em série sem carga.	49
Figura 25 – Tensão gerada em laboratório utilizando três piezos em série sem carga.	50
Figura 26 – Tensão gerada em laboratório utilizando quatro piezos em série sem carga.	51
Figura 27 – Tensão gerada em laboratório utilizando dois piezos em paralelo sem carga.	52
Figura 28 – Tensão gerada em laboratório utilizando três piezos em paralelo sem carga.	53
Figura 29 – Tensão gerada em laboratório utilizando quatro piezos em paralelo sem carga.	54
Figura 30 – Tensão gerada em laboratório utilizando um piezo com carga.	55
Figura 31 – Tensão gerada em laboratório utilizando dois piezos em paralelo com carga.	56
Figura 32 – Tensão gerada em laboratório utilizando três piezos em paralelo com carga.	57
Figura 33 – Tensão gerada em laboratório utilizando quatro piezos em paralelo com carga.	58
Figura 34 – Tensão gerada em laboratório utilizando dois piezos em série com carga.	59
Figura 35 – Tensão gerada em laboratório utilizando três piezos em série com carga.	60
Figura 36 – Tensão gerada em laboratório utilizando quatro piezos em série com carga.	61
Figura 37 – Código no Matlab para energia.	62

Figura 38 – Gráfico de energia.	63
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
SEP	Sistema Elétrico de Potência
IFMG	Instituto Federal de Minas Gerais
ANTT	Agência Nacional de Transporte Terrestres
APA	Asphalt Pavement Analyzer (Analisador de Pavimento Asfáltico)
PVDF	Fluoreto de Polivinilideno
PZT	Titanato Zirconato de Chumbo
TRL	Technology Readiness Level (Nível de Prontidão Tecnológica)
VDM	Volume Diário Médio
ADC	Conversor Analógico-digital

LISTA DE SÍMBOLOS

Ω	Ohm
C	Capacitância
C°	Grau Celsius
A	Amperes
cm	Centímetros
E	Energia Elétrica
F	Faraday
g	Gramas
kWh	Quilowatt-hora
i	Corrente Elétrica
J	Joule
m	Metros
mm	Milímetros
P	Potência Elétrica
R	Resistência Elétrica
s	Segundos
t	Tempo
U	Tensão Elétrica
V	Volt
W	Watt

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Justificativa	13
1.2	Objetivos	14
<i>1.2.1</i>	<i>Objetivo geral</i>	<i>14</i>
<i>1.2.2</i>	<i>Objetivos específicos</i>	<i>14</i>
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Cenário energético mundial	18
2.2	Piezoelasticidade	19
2.3	Utilização do efeito piezoelétrico em pavimentos	22
3	METODOLOGIA	23
3.1	Elementos de Circuito Elétrico	24
<i>3.1.1</i>	<i>Célula de Carga Piezoelétrica</i>	<i>25</i>
<i>3.1.2</i>	<i>Amplificador de Instrumentação (HX711)</i>	<i>26</i>
<i>3.1.3</i>	<i>Microcontrolador Arduino</i>	<i>26</i>
<i>3.1.4</i>	<i>Software MATLAB</i>	<i>26</i>
<i>3.1.5</i>	<i>Sensor Piezoelétrico e Osciloscópio</i>	<i>26</i>
<i>3.1.6</i>	<i>Exportação de Dados em Formato .CSV</i>	<i>26</i>
3.2	Procedimento Geral	26
3.3	Topologia do circuito das células de carga	27
<i>3.3.1</i>	<i>Configuração do osciloscópio</i>	<i>28</i>
3.4	Escolha dos transdutores piezoelétricos	29
3.5	Metodologia do Ambiente de Estudo	30
<i>3.5.1</i>	<i>Estrutura da primeira versão do módulo de aquisição de dados</i>	<i>30</i>
<i>3.5.2</i>	<i>Estrutura da segunda versão do módulo de aquisição de dados</i>	<i>31</i>
4	DESENVOLVIMENTO	33
4.1	Construção do primeiro protótipo	33
<i>4.1.1</i>	<i>Desafios do primeiro protótipo</i>	<i>36</i>
4.2	Construção do segundo protótipo	36
4.3	Coleta de dados	43

5	RESULTADOS	46
6	CONCLUSÃO	64
6.1	Principais realizações	64
6.2	Principais descobertas	65
6.3	Trabalhos Futuros	65
	REFERÊNCIAS	66
	APÊNDICE A – CÓDIGO DO EXPERIMENTO NO MATLAB	69
	APÊNDICE B – CÓDIGO DO EXPERIMENTO NO ARDUINO	71
	ANEXOS	73
	ANEXO A – FOLHA DE DADOS HX711	74
	ANEXO B – FOLHA DE DADOS CÉLULA DE CARGA	84
	ANEXO C – FOLHA DE DADOS TRANSDUTOR PIEZOELÉTRICO	86

1 INTRODUÇÃO

A presença cada vez mais frequente de dispositivos eletrônicos é um fenômeno comum na vida urbana. Esses dispositivos têm impacto em áreas cruciais da sociedade, como comunicação, segurança e transporte, e tendem a aumentar ainda mais a dependência dos usuários à medida que novas tecnologias surgem, como smartphones, tecnologias vestíveis, carros elétricos e autônomos, e automação residencial. A evolução tecnológica das estradas tem acompanhado esse cenário, levando ao surgimento das estradas inteligentes.

A geração de energia elétrica é uma das áreas mais importantes da engenharia e da tecnologia atualmente, e sua importância cresce à medida que o mundo busca alternativas mais sustentáveis e renováveis para a produção de energia. Nesse contexto, a tecnologia de pastilhas piezoelétricas se destaca como uma forma promissora e inovadora de geração de eletricidade, especialmente em aplicações que envolvem a conversão de energia mecânica em energia elétrica.

Conforme observado por James S. Reed, Jr. (1986), as pastilhas piezoelétricas são dispositivos que demonstram a capacidade de produzir eletricidade mediante deformações mecânicas, tais como pressões ou vibrações. Essas pastilhas são construídas com materiais piezoelétricos, como quartzo ou titanato de bário, que geram uma carga elétrica quando sujeitos a uma deformação mecânica.

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo apresentar uma análise completa da tecnologia de geração de energia elétrica através de pastilhas piezoelétricas, desde a teoria básica da piezoeletricidade até a aplicação prática desses dispositivos em sistemas de geração de energia. Serão abordados aspectos como a eficiência da conversão de energia, as principais aplicações da tecnologia, as limitações e desafios enfrentados, além de uma análise dos aspectos econômicos e ambientais envolvidos nessa forma de geração de energia.

Por meio dessa pesquisa, espera-se contribuir para o avanço da tecnologia de geração de energia elétrica através de pastilhas piezoelétricas, fornecendo informações importantes para a tomada de decisão em relação à sua utilização em diversos setores, como o industrial, o automotivo, o aeroespacial e o de energia renovável.

A utilização da piezoeletricidade como uma forma inovadora de geração de energia para a alimentação elétrica de rodovias representa um importante avanço no campo da sustentabilidade e da eficiência energética. Como o renomado físico Richard Feynman destacou, "Há muito espaço no fundo" (There's Plenty of Room at the Bottom), e isso se aplica não apenas à nanotecnologia, mas também à maneira como exploramos os recursos naturais para a produção de eletricidade (FEYNMAN, 1959). A piezoeletricidade é uma abordagem que demonstra que, mesmo nos menores detalhes, podemos encontrar soluções para nossos desafios energéticos.

A área de estudos relacionada à utilização da piezoeletricidade na geração de energia tem evoluído significativamente ao longo das últimas décadas. Um exemplo notável desse avanço é evidenciado por pesquisas e inovações em materiais piezoelétricos, sistemas de captação

de energia e aplicações práticas. Para citar um exemplo dessa evolução, podemos mencionar um estudo realizado por Wang et al. (2007) que explorou a eficiência da geração de energia piezoelétrica a partir do tráfego veicular em estradas.

No estudo de Wang et al., os pesquisadores investigaram a viabilidade de utilizar materiais piezoelétricos incorporados em pavimentos rodoviários para gerar energia a partir da pressão exercida pelos veículos que transitavam sobre a superfície da estrada. Os resultados demonstraram que essa abordagem tinha o potencial de fornecer uma fonte de energia sustentável e de baixo impacto ambiental.

Desde então, os estudos nessa área continuaram a progredir, com pesquisadores explorando novos materiais piezoelétricos, aprimorando a eficiência dos sistemas de captação de energia e ampliando as aplicações práticas, não apenas em estradas, mas também em outras infraestruturas, como calçadas, pisos de edifícios e até mesmo roupas inteligentes.

Essa evolução contínua na pesquisa e desenvolvimento da piezoelectricidade como fonte de geração de energia é fundamental para impulsionar a adoção prática dessa tecnologia e torná-la uma parte integrante de iniciativas mais amplas de sustentabilidade e eficiência energética.

1.1 Justificativa

De acordo com o artigo "Piezoelectric energy harvesting for road traffic applications: A review" de S. Babu et al. (2018), que afirma: "A aplicação de geradores piezoelétricos em rodovias é uma das formas mais promissoras de colher energia a partir da movimentação de veículos e transformá-la em eletricidade utilizável". (BABU; KAMARAJ; BALASUBRAMANIAN, 2018, p. 88).

Sendo uma forma promissora de geração de energia elétrica em rodovias, que pode contribuir para a redução da dependência de fontes de energia não renováveis, melhorar a infraestrutura de transporte, reduzir os custos de manutenção e mitigar os impactos das mudanças climáticas. Como afirma Uchino (2018, p.76):

"A energia piezoelétrica pode ser facilmente gerada a partir de vibrações mecânicas, como o movimento dos veículos em rodovias. Geradores piezoelétricos podem ser instalados no pavimento das rodovias para converter a energia cinética dos veículos em energia elétrica utilizável. A eficiência desses geradores depende do tipo de material piezoelétrico utilizado, da área de contato entre o gerador e o veículo, do peso e da velocidade do veículo. Além disso, é importante considerar os custos associados à instalação e manutenção dos geradores. Apesar desses desafios, a piezoeletricidade é uma forma promissora de geração de energia renovável para alimentar sistemas de iluminação pública, sinalização de trânsito e outros dispositivos em rodovias."(UCHINO, 2018, p. 76).

O Autor Uchino (2018) ressalta a importância de considerar os custos envolvidos na instalação e manutenção desses geradores, bem como as possíveis aplicações dessa tecnologia em sistemas de iluminação pública, sinalização de trânsito e outros dispositivos.

WANG, Y. et al. (2020) relata uma aplicação bem-sucedida da piezoeletricidade na geração de energia elétrica a partir do movimento dos veículos em rodovias. De acordo com o estudo, um gerador piezoelétrico foi instalado no pavimento de uma rodovia movimentada em Beijing, na China, e foi capaz de gerar eletricidade suficiente para alimentar uma série de luzes LED instaladas na via. A energia gerada pelo gerador piezoelétrico foi capaz de iluminar uma sessão de 20 metros da rodovia, reduzindo a dependência de fontes de energia convencionais. Isso mostra que a aplicação da piezoeletricidade em rodovias pode ser uma solução viável e eficaz para gerar energia renovável e reduzir o consumo de energia elétrica.

A tecnologia de piezoeletricidade tem despertado grande interesse no campo da geração de energia renovável devido ao seu potencial em converter energia mecânica em energia elétrica. O desenvolvimento de novos materiais piezoelétricos e a melhoria dos dispositivos geradores de energia piezoelétrica têm aumentado a eficiência e o desempenho desses sistemas, tornando-os cada vez mais atraentes para diversas aplicações. A técnica de captar energia do ambiente e

convertê-la em uma forma utilizável pelo ser humano é denominada no meio acadêmico como "Energy Harvesting".

Além de sua aplicação em rodovias, a tecnologia piezoelétrica possui um amplo potencial de uso em diversas outras áreas, como aeronaves, embarcações, calçadas, pisos, pontes, turbinas eólicas e edifícios. Por exemplo, sensores piezoelétricos podem ser empregados para monitorar a integridade de edifícios e pontes, identificando possíveis falhas e deformações estruturais, enquanto geradores piezoelétricos podem ser instalados em turbinas eólicas para aproveitar as vibrações mecânicas geradas pelo vento. A oscilação causada pelo deslocamento de pessoas em áreas urbanas, como ruas, calçadas, centros comerciais, festivais e locais de grande agitação, representa uma fonte de energia que pode ser utilizada pelos dispositivos piezoelétricos para a produção de eletricidade (Ferreira e Silva, 2016).

Outra possibilidade de desenvolvimento da tecnologia piezoelétrica é a sua combinação com outras fontes de energia renovável, como a energia solar e eólica. Isso pode ser feito através do uso de sistemas híbridos, que combinam a energia gerada por diferentes tecnologias para maximizar a eficiência e a produção de energia, como pode ser observado em "Renewable Energy Systems: A Smart Energy Systems Approach to the Choice and Modeling of 100% Renewable Solutions" de Henrik Lund (Academic Press, 2014).

1.2 Objetivos

1.2.1 *Objetivo geral*

O propósito principal deste trabalho é aprimorar a compreensão da microgeração de energia em pavimentos, utilizando como base a literatura existente e um experimento realizado em um protótipo que busca simular a geração piezoelétrica em rodovias.

1.2.2 *Objetivos específicos*

- a) Propor um protótipo de coletor de energia resistente às cargas e condições ambientais que possa ser aplicado em rodovias;
- b) Realizar um teste de conceito em um modelo de rodovia em operação para avaliar a durabilidade do gerador e seu potencial de geração;
- c) Realizar testes em laboratório com o objetivo de avaliar a capacidade de geração do modelo de transdutor utilizado;
- d) Avaliar a viabilidade de associação de pastilhas sem sistema de retificação de sinal;
- e) Produzir um protótipo para testes laboratoriais que será disponibilizado ao campus para novos trabalhos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo a literatura científica, a piezoeletricidade é uma propriedade única de certos materiais que permite a geração de uma carga elétrica em resposta a um estresse mecânico aplicado (MIAJA-AVILA et al., 2020). O uso de materiais piezoelétricos é amplamente difundido em várias áreas, incluindo ciência dos materiais, eletrônica e engenharia, e suas aplicações incluem dispositivos como sensores, atuadores, transdutores e dispositivos acústicos (ERTURK & Inman, 2011). Além disso, referências piezoelétricas, como cristais de quartzo e titanato zirconato de chumbo, são frequentemente usadas na calibração e medição de dispositivos piezoelétricos (YOKOYAMA et al., 2018).

A piezoeletricidade também tem sido estudada como uma forma de colher energia a partir do tráfego veicular em estradas pavimentadas. Sensores piezoelétricos são instalados no pavimento, e a energia gerada pelas vibrações dos veículos é convertida em eletricidade que pode ser usada para alimentar as luzes da estrada, sistemas de sinalização ou outros dispositivos elétricos (LI et al., 2018).

De acordo com Abdullah et al. (2018, p. 114), a utilização de dispositivos piezoelétricos pode contribuir para uma melhora na qualidade do ar e redução do efeito estufa, reduzindo o impacto ambiental da geração de energia, tendo em vista a longevidade do sistema e o descarte simples que pode ser comparado ao lixo eletrônico:

"A utilização de dispositivos piezoelétricos em pavimentos de rodovias pode trazer benefícios significativos para o meio ambiente e a sustentabilidade. Além da geração de energia elétrica limpa e renovável, esses dispositivos podem contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa e a melhoria da qualidade do ar, já que a energia gerada pode ser utilizada para alimentar sistemas de iluminação, semáforos e outros dispositivos urbanos que atualmente consomem energia elétrica proveniente de fontes não renováveis. Além disso, a utilização desses dispositivos pode contribuir para a redução da dependência de fontes não renováveis de energia elétrica e para a diversificação da matriz energética, o que é fundamental para a sustentabilidade do setor de energia" (ABDULLAH et al., 2018, p. 114).

Estudos mostram que o uso de sistemas de colheita de energia piezoelétrica em rodovias pavimentadas pode ser uma forma eficiente e sustentável de produzir energia, além de ter o potencial de prolongar a vida útil do pavimento por meio da redução das cargas dinâmicas aplicadas sobre ele ao ter a possibilidade de fiscalizar de forma eficiente a passagem de veículos pesados (CUI et al., 2020).

De acordo com Wang et al. (2019, p. 12), o impacto da instalação de dispositivos piezoelétricos em rodovias pode ser positivo em relação as questões que envolvem segurança pública, reduzindo o risco de acidentes:

"A instalação de dispositivos piezoelétricos em pavimentos de rodovias pode ter um impacto significativo na política de segurança pública. Esses dispositivos podem fornecer energia para sistemas de iluminação e sinalização em trechos de rodovias que atualmente não contam com esses recursos, o que pode aumentar a visibilidade e reduzir o risco de acidentes. Além disso, a geração de energia limpa e renovável a partir desses dispositivos pode contribuir para a redução da dependência de fontes de energia não renováveis, o que é uma prioridade para muitos governos ao redor do mundo. A utilização desses dispositivos também pode ser vista como um investimento em infraestrutura verde, que pode contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa e a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas"

(WANG et al., 2019, p. 12).

Diversos elementos influenciam o desempenho dos aparelhos piezoelétricos, como a composição do material utilizado, o formato do dispositivo, a frequência em que operam e a intensidade da vibração aplicada. Pesquisas indicam que, em situações favoráveis, a eficácia desses dispositivos pode ultrapassar os 80%. (KIM et al., 2019).

Segundo Li et al. (2021, p. 10), os geradores piezoelétricos não dependem de condições climáticas específicas, desse modo, sendo uma fonte confiável e previsível de energia elétrica:

"Os dispositivos piezoelétricos instalados em pavimentos de rodovias funcionam através da conversão de energia mecânica em energia elétrica. Quando um veículo passa sobre o pavimento, os dispositivos piezoelétricos são deformados, gerando uma carga elétrica. Essa carga pode ser armazenada em baterias ou enviada para a rede elétrica. O funcionamento desses dispositivos é contínuo e não depende de condições climáticas específicas, tornando-os uma fonte de energia confiável e previsível"

(LI et al., 2021, p. 10).

Além disso, a eficiência da colheita de energia piezoelétrica em estradas pavimentadas tem sido observada em vários estudos. Por exemplo, um estudo em larga escala conduzido na Califórnia mostrou que a colheita de energia piezoelétrica em estradas pavimentadas pode produzir energia suficiente para alimentar as luzes da estrada e os sistemas de sinalização, reduzindo assim a dependência de fontes de energia convencionais (WANG et al., 2018).

Um projeto pioneiro de instalação de dispositivos piezoelétricos em rodovias foi implementado em Minas Gerais, Brasil, com o objetivo de aproveitar a energia gerada pelos veículos em movimento. Esse projeto é resultado de uma parceria entre a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e a Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais (CODEMGE) e foi implementado em uma extensão de 220 metros da rodovia MG-010, próxima a Belo Horizonte (UFMG, 2017).

De acordo com Kumar et al. (2021, p. 145), a instalação do sistema de geração piezoelétrico pode auxiliar a economia, não somente com a produção de energia, mas também com a movimentação da economia local, através da geração de empregos na região:

"A implementação de dispositivos piezoelétricos em pavimentos de rodovias pode gerar empregos diretos e indiretos em vários setores da economia, incluindo a fabricação, instalação e manutenção desses dispositivos, bem como o processamento e armazenamento da energia gerada. Além disso, a geração de energia limpa e renovável pode contribuir para o crescimento de setores relacionados, como a indústria de energia solar e eólica, que também têm potencial para gerar empregos"

(KUMAR et al., 2021, p. 145).

Os dispositivos piezoelétricos foram instalados sob o pavimento da rodovia, e a energia gerada pelas vibrações dos veículos em movimento foi convertida em eletricidade e armazenada em baterias para alimentar sistemas de iluminação pública. Estudos mostraram que o sistema pode gerar energia suficiente para alimentar 12 postes de iluminação com lâmpadas LED (CODEMGE, 2017).

2.1 Cenário energético mundial

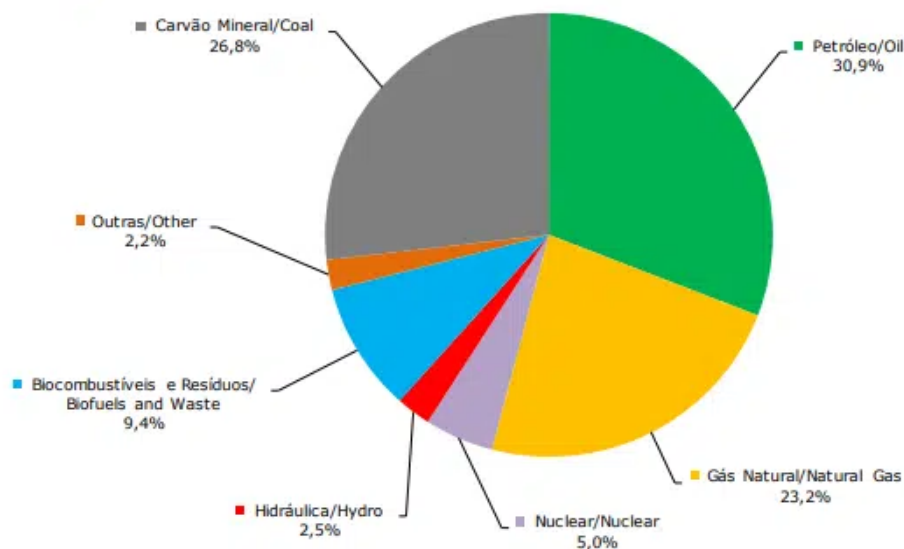
O setor energético mundial tem sido objeto de intensa transformação nas últimas décadas, motivada por uma série de fatores, que incluem preocupações ambientais, questões de segurança energética e avanços tecnológicos. Diversas tendências relevantes no contexto do cenário energético global são abordadas, com destaque para a transição em direção a fontes de energia renovável relacionadas à aplicação em rodovias inteligentes. Segundo Zhao (2020, p. 5), a qualidade de vida em grandes cidades é afetada pelo cenário da mobilidade urbana, fazendo com que a implantação de sistemas inteligentes sejam de grande auxílio nesse aspecto:

"A mobilidade urbana é um grande desafio em muitas cidades do mundo, e afeta diretamente a qualidade de vida dos cidadãos. A busca por soluções mais sustentáveis e eficientes para o transporte urbano tem sido cada vez mais urgente, e o uso de tecnologias inovadoras como dispositivos piezoelétricos em pavimentos de rodovias e calçadas pode ser uma forma de contribuir para essa transformação"

(ZHAO et al., 2020, p. 5).

A Figura 1 apresenta de forma resumida, na forma de gráfico, o balanço energético mundial do ano de 2022, de modo a destacar um panorama geral das fontes de energia do sistema energético.

Figura 1 – Balanço energético mundial 2022.



Fonte: BEN, 2022.

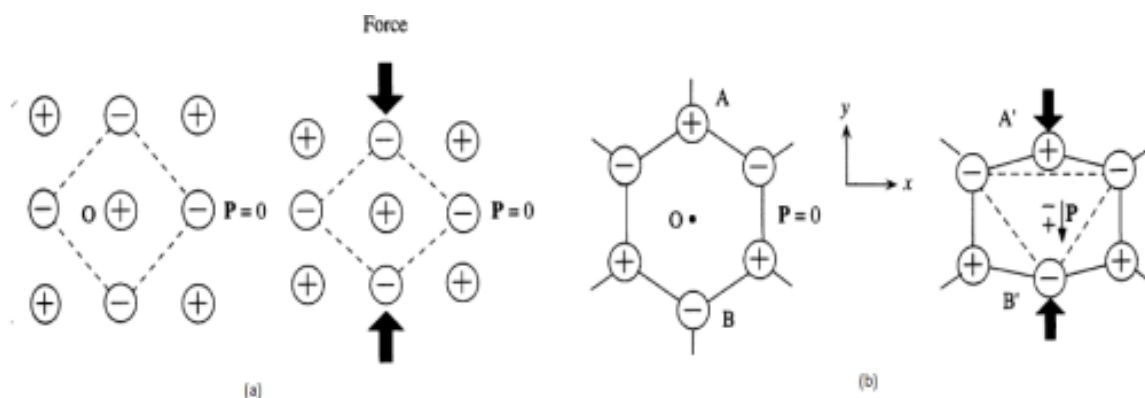
O aumento na geração de energia a partir de fontes como solar, eólica, hidrelétrica e biomassa é analisado, com ênfase na significativa redução dos custos associados a essas tecnologias, como destacado pelo IPCC (2018). A descarbonização das fontes de energia emerge como uma questão crítica, e a pesquisa discute políticas e estratégias implementadas em diversas regiões do mundo para reduzir as emissões de carbono, conforme relatado pela Agência Internacional de Energia (AIE, 2020). O debate sobre o papel da energia nuclear no contexto energético global é explorado, abrangendo preocupações relacionadas à segurança e à gestão dos resíduos nucleares, como documentado pela World Nuclear Association (2020).

A descentralização da geração de energia e a digitalização são contempladas em relação à transformação dos processos de produção, distribuição e consumo de energia, conforme evidenciado nos relatórios da Deloitte (2020). O cenário energético mundial se configura como um campo dinâmico e intrincado, caracterizado por mudanças substanciais na direção de fontes de energia mais limpas e eficazes. A transição para energias renováveis, a descarbonização, o debate sobre energia nuclear, a valorização da eficiência energética e a transformação digital figuram entre os principais impulsionadores dessas mudanças. A análise crítica apresentada neste trabalho sublinha a importância de compreender o cenário energético mundial como um sistema complexo, no qual múltiplos fatores se interligam. À medida que as mudanças continuam a moldar esse cenário, torna-se crucial que políticas e estratégias se adaptem às realidades regionais e globais, com o propósito de assegurar um futuro energético mais sustentável.

2.2 Piezoeletricidade

A piezoeletricidade é um fenômeno elétrico que ocorre em certos materiais quando são submetidos a pressão ou deformação mecânica. Nesses materiais, a tensão mecânica aplicada cria uma polarização elétrica interna que pode gerar uma corrente elétrica quando o material é submetido a vibrações ou movimentos. Essa propriedade tem diversas aplicações práticas, como na geração de energia elétrica a partir de vibrações mecânicas, na fabricação de sensores de pressão, acelerômetros e outros dispositivos eletrônicos. Na Figura 2, a distribuição irregular das cargas faz surgir uma tensão. (PATSKO, 2006).

Figura 2 – Ilustração da relação (a) simetria e efeito apolar (b) assimetria e efeito polar.



Fonte: KASAP, 2006, p. 886.

De acordo com Dias e Menezes (2018, p. 42), "o fenômeno piezoeétrico pode ocorrer em ambas as direções: no sentido direto e no sentido inverso. Na direção direta, ocorre a conversão de energia mecânica em energia elétrica por meio do deslocamento dos íons do material". Essa conversão ocorre quando uma pressão mecânica é aplicada ao material, o que faz com que os íons se movam em relação uns aos outros, gerando uma carga elétrica.

A primeira aplicação prática do efeito piezoeétrico foi em 1917, quando o cientista francês Paul Langevin utilizou cristais piezoeétricos para produzir ondas sonoras em um tanque de combustível de um submarino. Esse experimento pioneiro mostrou que os cristais piezoeétricos podem ser utilizados como transdutores, convertendo ondas elétricas em ondas sonoras, e vice-versa. Desde então, o efeito piezoeétrico tem sido utilizado em diversas aplicações na indústria, medicina, eletrônica e outras áreas, incluindo a fabricação de sensores de pressão, microfones, alto-falantes, atuadores e geradores de energia. De acordo com Dias et al. (2019, p. 38), "a utilização do efeito piezoeétrico tem sido crescente em diversas áreas, como na indústria, medicina, eletrônica, automobilística e aeroespacial, além de outras áreas como na geração de energia em edifícios e estruturas, ou mesmo em sapatos que geram energia a partir do movimento humano".

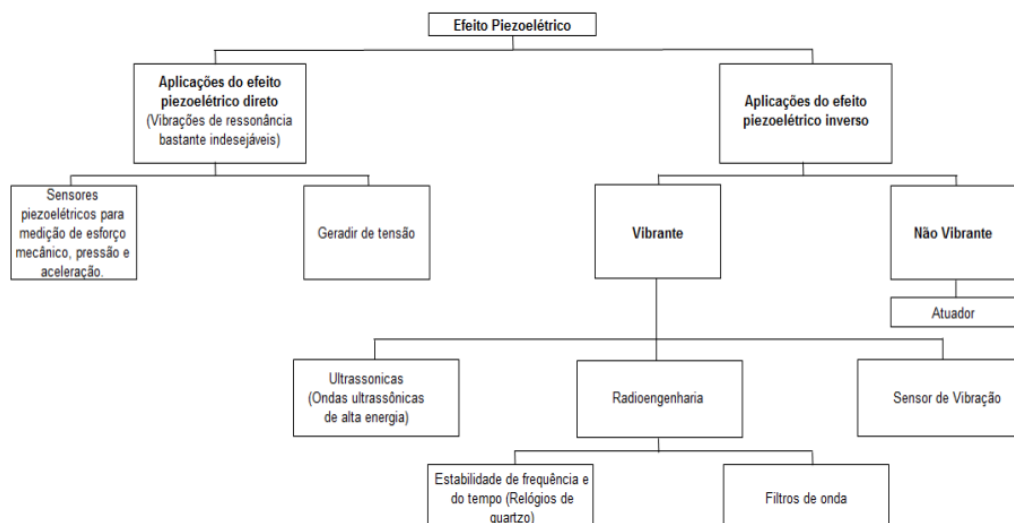
Atualmente, uma das cerâmicas piezoeétricas mais utilizadas pelos pesquisadores na busca por um coletor de energia em pavimentos é o Titanato Zirconato de Chumbo (PZT). Esse material é conhecido por suas propriedades piezoeétricas excepcionais, tais como alta constante piezoeétrica e baixa impedância mecânica, o que o torna ideal para a geração de energia a partir da vibração mecânica.

De acordo com Marzband et al. (2019, p. 1), a utilização da energia piezoelétrica tem se mostrado uma alternativa viável para a geração de energia em infraestruturas urbanas:

"A energia piezoelétrica tem atraído atenção considerável na última década devido à sua capacidade de converter energia mecânica em energia elétrica. Essa tecnologia é particularmente adequada para infraestruturas urbanas, como calçadas, estradas, aeroportos e estações de trem, onde a vibração mecânica pode ser convertida em eletricidade para alimentar sistemas de iluminação pública, sinais de trânsito e outras aplicações de baixa potência. Além disso, a energia piezoelétrica é uma fonte de energia renovável e limpa, que pode ajudar a reduzir a dependência de fontes de energia fósseis e mitigar as emissões de gases de efeito estufa." (MARZBAND, 2019, p. 1).

A Figura 3, baseia-se no vasto campo de aplicação como sensores e atuadores devido ao seu grande coeficiente de acoplamento eletromecânico. (GODOY et al., 2012)

Figura 3 – Aplicações da piezoeletricidade.



Fonte: TICHÝ et al., 2010, p. 205.

Na área de transportes terrestres, há tecnologias que utilizam materiais piezoelétricos para converter a pressão exercida pela passagem de veículos em energia elétrica por meio do efeito piezoelétrico direto. No transporte ferroviário, por exemplo, os elementos piezoelétricos podem ser aplicados nas travessas, onde as deformações e vibrações causadas pela passagem dos trens são convertidas em energia elétrica (GONZÁLEZ et al., 2017, p. 132).

De acordo com Ferreira e Silva (2016), o movimento vibracional causado pelo fluxo de pessoas em locais como ruas, calçadas, shopping centers e festas é uma fonte de energia que pode ser aproveitada pelos materiais piezoelétricos para a geração de energia elétrica. O

efeito piezoelétrico pode transformar a energia mecânica das vibrações em energia elétrica, possibilitando a utilização dessas fontes alternativas de energia em diferentes aplicações, como sistemas de iluminação e carregadores de dispositivos móveis.

2.3 Utilização do efeito piezoelétrico em pavimentos

Um estudo realizado por Singh et al. (2017) investigou a utilização de geradores piezoelétricos em rodovias para geração de energia elétrica. Os resultados indicaram que a instalação de geradores piezoelétricos em uma seção de rodovia com alta densidade de tráfego pode gerar uma quantidade significativa de energia elétrica, que pode ser utilizada para alimentar sistemas de iluminação e sinalização. Além disso, os autores destacam que a tecnologia de geradores piezoelétricos é uma alternativa promissora para a geração de energia limpa e renovável em ambientes urbanos e rurais. (SINGH et al., 2017).

O método consistiu em instalar transdutores piezoelétricos em uma seção de pavimento de concreto e medir a energia elétrica gerada durante a passagem de veículos. Foram realizadas medições em diferentes condições de velocidade e carga dos veículos para avaliar a influência desses fatores na geração de energia. Os resultados obtidos foram analisados e comparados com os dados de outros estudos na área para verificar a eficácia do método.

O estudo de Garg et al. (2019) aborda a utilização de geradores piezoelétricos em pavimentos rodoviários como fonte alternativa de energia renovável. Os autores desenvolveram um modelo computacional para simular a geração de energia piezoelétrica em diferentes tipos de pavimentos, incluindo asfalto, concreto e materiais compósitos. A partir dos resultados obtidos, concluiu-se que a energia gerada pelos geradores piezoelétricos é suficiente para alimentar sistemas de iluminação e sinalização em rodovias, tornando-se uma alternativa viável e sustentável para a geração de energia em infraestruturas rodoviárias.

O estudo de Singh et al. (2017) obteve resultados satisfatórios na geração de energia elétrica através do uso de geradores piezoelétricos em pavimentos. Os testes em laboratório mostraram que o sistema é capaz de gerar energia com eficiência, podendo ser aplicado em diversas situações, como em áreas urbanas com grande fluxo de pedestres e veículos.

Já o estudo de Garg et al. (2019) apresentou resultados promissores na geração de energia a partir de sistemas piezoelétricos instalados em trechos de rodovias com intenso tráfego de veículos. Foram obtidas taxas de geração de energia significativas, mostrando o potencial desse tipo de tecnologia para a produção de energia limpa e renovável.

Esses resultados reforçam a importância e a viabilidade da utilização de geradores piezoelétricos em pavimentos, contribuindo para a redução da dependência de fontes de energia não-renováveis e para a mitigação dos impactos ambientais causados pela geração de energia convencional.

3 METODOLOGIA

Este capítulo aborda a utilização de diversos materiais, o processo de criação do gerador piezoelétrico, a instalação dos protótipos em campo e os testes laboratoriais realizados para auxiliar a pesquisa.

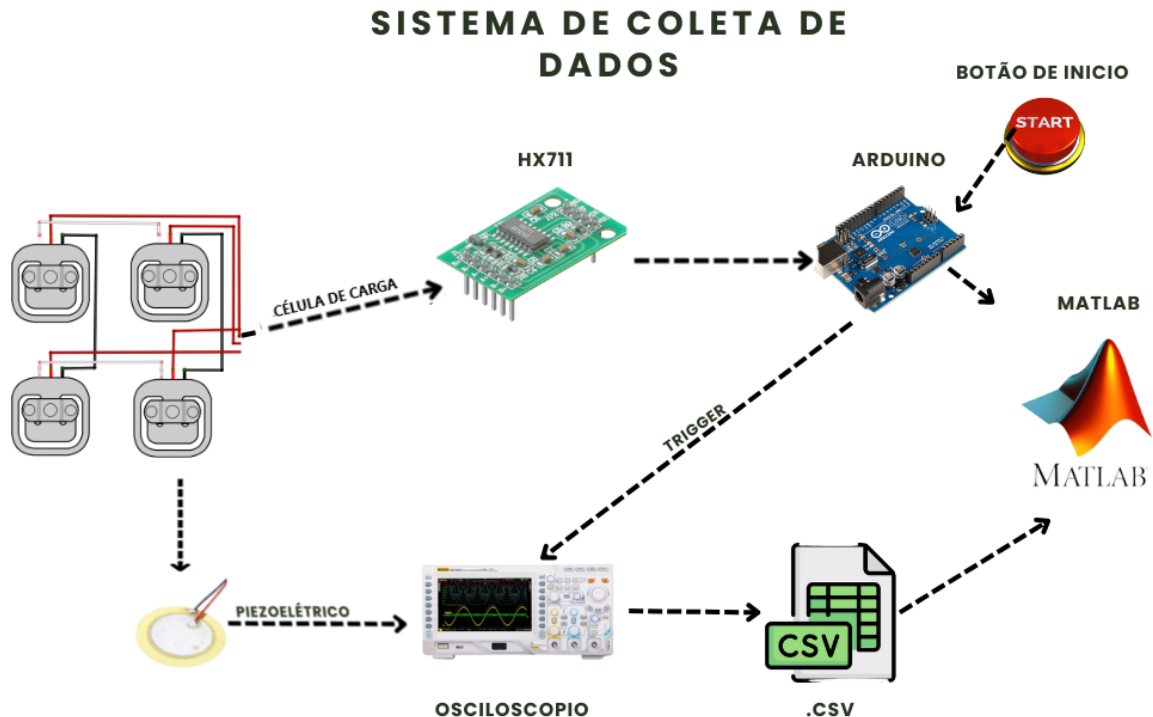
Durante o estudo, os autores julgaram necessário a criação de um protótipo para simulação de uma situação semelhante ao funcionamento do sistema instalado em rodovias, para tal, os estudantes construíram uma plataforma perfurada contendo quatro células de carga e, imediatamente abaixo das células de carga, foram instaladas quatro pastilhas piezoelétricas.

No estudo experimental, será utilizado um protótipo que incorpora pastilhas piezoelétricas, com o objetivo de converter energia mecânica em energia elétrica. Em linhas gerais, o experimento seguiu as etapas metodológicas a seguir:

1. Criar um protótipo e realizar testes com configurações de circuito em série e paralelo para determinar qual dessas configurações é mais eficaz na geração de energia elétrica.
2. Os dados foram coletados utilizando osciloscópio, para melhor analisar o comportamento elétrico que o transdutor pode produzir.
3. Os dados coletados são comparados para análise visual das curvas obtidas no experimento, observando o comportamento de cada configuração de pastilhas considerada.
4. Execução do experimento adicionando carga ao circuito dos transdutores para mensurar a energia produzida em joules.

A Figura 4 ilustra a metodologia adotada para a realização deste estudo, destacando o fluxo de dados e sinais existentes durante o funcionamento do sistema. Para o melhor entendimento do trabalho, foi construído um diagrama simplificado explicativo.

Figura 4 – Circuito de ligação do sistema de coleta de dados.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

3.1 Elementos de Circuito Elétrico

No processo experimental deste projeto, materiais adequados foram empregados para a conversão de energia, conforme anteriormente mencionado, optou-se pela utilização de pastilhas piezoelétricas, as quais se destacam por serem especialmente habilitadas para esse tipo de aplicação, devido à sua capacidade de gerar tensão e corrente elétrica a partir de uma deformação mecânica. A relação a seguir apresenta todos os materiais que foram empregados na construção:

- 4 - Célula de carga para arduino
- 1 - Módulo HX711
- 1 - Arduino Uno
- 4 - Pastilhas piezoelétricas
- 1 - Fita condutiva de cobre
- 1 - Botão
- 1 - Resistor de $1k\Omega$
- 1 - Resistor de $1M\Omega$
- 4 - Modelos 3D impressos com filamento PLA
- Fios para interligação

Cabo USB (aquisição de dados do módulo Arduino)

Madeira para montagem

Massa plástica para fixação

Osciloscópio Tektronix modelo: TBS 1102B

A crescente demanda por sistemas de medição de força precisos em diversas aplicações tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias avançadas de coleta e análise de dados. Nesse contexto, o sistema integrado de coleta de dados piezoelétrico, que envolve componentes como a célula de carga, amplificador de instrumentação HX711, microcontrolador Arduino, software MATLAB, sensor piezoelétrico e osciloscópio, representa uma abordagem robusta e abrangente para a mensuração e interpretação de forças mecânicas.

A célula de carga piezoelétrica, sensível a deformações mecânicas, desempenha o papel fundamental na conversão dessas deformações em sinais elétricos. O HX711, um amplificador de instrumentação especializado, amplifica e digitaliza esses sinais, proporcionando uma leitura precisa. O Arduino, por sua vez, atua como uma interface eficaz entre os componentes físicos e o ambiente computacional, viabilizando a comunicação e a transmissão eficiente dos dados coletados.

A utilização do MATLAB amplia as capacidades analíticas do sistema, permitindo a execução de análises estatísticas avançadas, visualizações gráficas e processamento de dados complexos. Além disso, a inclusão de um sensor piezoelétrico em conjunto com um osciloscópio possibilita a observação visual das variações elétricas associadas às forças mecânicas, enriquecendo a compreensão do comportamento do sistema.

A exportação de dados em formato .CSV adiciona versatilidade ao processo, facilitando análises posteriores em ferramentas adicionais. Além disso, a capacidade de configurar o Arduino como um trigger para o osciloscópio proporciona uma sincronização precisa entre os dados coletados e as medições visuais.

Em suma, esse sistema integrado representa uma solução abrangente para a coleta, processamento e análise de dados piezoelétricos, oferecendo um conjunto de ferramentas robusto para compreender e quantificar forças mecânicas em diversas aplicações científicas e industriais.

3.1.1 Célula de Carga Piezoelétrica

Uma célula de carga piezoelétrica é um dispositivo que gera uma carga elétrica em resposta a uma deformação mecânica. Nesse contexto, a célula de carga piezoelétrica é utilizada para medir forças, convertendo-as em sinais elétricos.

3.1.2 Amplificador de Instrumentação (HX711)

O HX711 é um amplificador de instrumentação especializado, frequentemente empregado para amplificar e digitalizar sinais provenientes de células de carga. Ele possui um conversor analógico-digital (ADC) integrado, proporcionando alta precisão na leitura dos dados.

3.1.3 Microcontrolador Arduino

O Arduino funciona como uma interface entre os componentes físicos do sistema e o computador. Programado para ler dados da célula de carga por meio do HX711, o Arduino desempenha um papel crucial na aquisição e transmissão dos dados.

3.1.4 Software MATLAB

MATLAB é uma plataforma de programação e análise numérica. No contexto deste sistema, o MATLAB é empregado para receber, processar e analisar os dados coletados pela célula de carga. Scripts ou programas são desenvolvidos para execução dessas tarefas.

3.1.5 Sensor Piezoelétrico e Osciloscópio

Um sensor piezoelétrico é utilizado para capturar variações na pressão ou aceleração. A conexão do sensor ao osciloscópio permite a visualização gráfica das mudanças na carga elétrica gerada pelo sensor em resposta a estímulos mecânicos.

3.1.6 Exportação de Dados em Formato .CSV

A exportação de dados em formato .CSV (Comma-Separated Values) é uma prática comum para armazenar dados tabulares. Após a coleta de dados, o MATLAB ou o Arduino podem exportar os resultados para um arquivo .CSV, facilitando análises adicionais em planilhas ou softwares de análise de dados.

3.2 Procedimento Geral

1 - Coleta de Dados com a Célula de Carga e HX711:

A célula de carga, conectada ao HX711, é submetida a forças mecânicas. O HX711 amplifica e converte os sinais gerados pela célula de carga em dados digitais.

2 - Leitura e Transmissão pelo Arduino:

O Arduino é programado para ler os dados digitais do HX711 e transmiti-los para o computador. A comunicação pode ser realizada por meio de porta USB.

3 - Análise com o MATLAB:

Os dados recebidos pelo Arduino são processados no MATLAB. Scripts são desenvolvidos para realizar análises estatísticas, visualizações gráficas e qualquer processamento adicional necessário.

4 - Utilização do Sensor Piezoelétrico e Osciloscópio:

O sensor piezoelétrico, conectado ao osciloscópio, captura variações na carga elétrica em resposta a estímulos mecânicos. O osciloscópio exibe graficamente essas variações.

5 - Exportação de Dados em Formato .CSV:

Para facilitar análises adicionais, os dados processados no MATLAB ou coletados diretamente pelo Arduino podem ser exportados em formato .CSV.

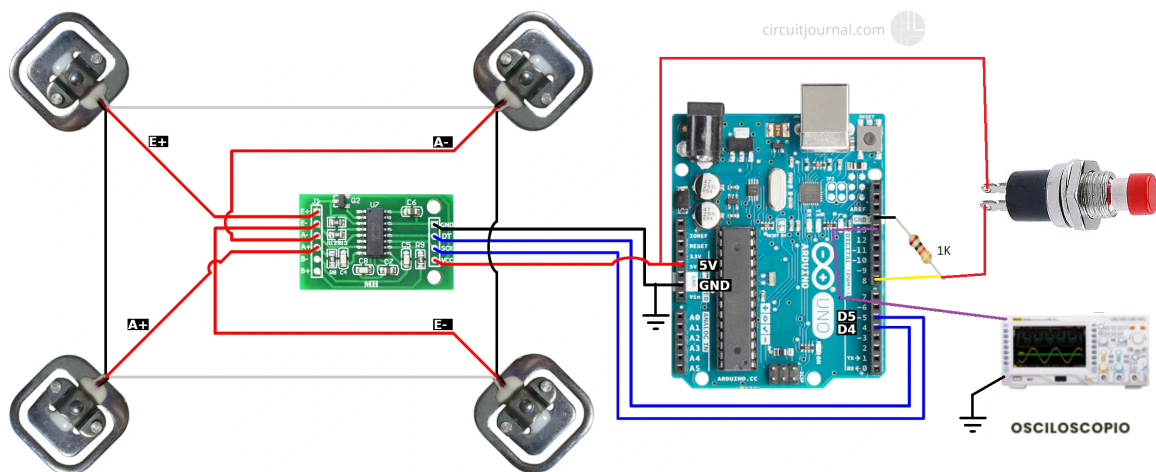
6 - Arduino como Trigger para o Osciloscópio:

O Arduino pode ser configurado como um trigger para o osciloscópio, permitindo a sincronização dos dados coletados com as medições realizadas pelo osciloscópio.

3.3 Topologia do circuito das células de carga

Como pode ser observado na Figura 5, a interligação entre as células de carga, módulo HX711 e o Arduino UNO deve ser feita da seguinte maneira para garantir o funcionamento do sistema:

Figura 5 – Diagrama do circuito do sensor de carga de 50 kg com HX711.



Fonte: JOURNAL, 2023.

O Circuito completo ainda conta com um botão com um dos terminais no 5V do arduino e o outro terminal no pino 8, utilizado como entrada digital. É necessário um resistor de $1K\Omega$ entre a entrada digital 8 e o GND. Para enviar o pulso de gatilho para o osciloscópio foi utilizado o pino 13 do arduino como saída digital, o canal 2 do osciloscópio deve ser ligado entre o pino 13 e o GND na ligação específica do protótipo apresentado.

Para a captura do sinal dos transdutores piezoelétricos foi utilizado o canal 1 do osciloscópio, dessa forma, obtendo uma medição precisa do sinal. Tal medição é gravada em um pendrive inserido na porta USB do osciloscópio, após a medição, pode-se observar o arquivo com extensão “.csv” que será aberto no software Matlab.

Para garantir a sincronia de medição do sinal das células de carga e das pastilhas piezoelétricas, foi feita a programação do microcontrolador arduino, tal programação, disponível em anexos, faz com que o botão ligado ao arduino, quando pressionado envia um sinal digital para o osciloscópio iniciar a medição e inicia a medição das células de carga simultaneamente.

A medição obtida através das células de carga são enviadas ao software Matlab via porta serial, de acordo com AVIA (2008), com frequência de amostragem de 10Hz, conforme pode ser observado na folha de dados em apêndice, desse modo, possibilitando o tratamento de dados obtidos pela leitura e plotagem dos gráficos para análise de resultados. Para a coleta dos resultados supracitados, é imprescindível a configuração prévia do osciloscópio, observando a devida atenuação e calibração das pontas de prova disponíveis.

3.3.1 Configuração do osciloscópio

Para a configuração do osciloscópio, devem ser seguidos os passos indicados:

- Trigger → Menu → Origem → Ch2
- Trigger → Menu → Modo → Normal
- Trigger → Menu → Tipo → Borda
- Trigger → Menu → Inclinação → Subida
- Trigger → Level → 2,50V
- Horizontal → Scale → M500ms
- Horizontal → Position → MPos. 2500s
- Inserir pen drive → Function → Log de dados → Origem Ch1
- Function → Log de dados → Lig.

Após a configuração, o osciloscópio estará pronto para a medição e aguardando o gatilho proveniente do microcontrolador. É importante ressaltar que nessa etapa é crucial que o microcontrolador esteja configurado e o osciloscópio esteja com as pontas de prova do canal dois prontas e ligadas aos pinos de gatilho do microcontrolador, assim como as do canal um ligadas às pastilhas piezoelétricas. Essa configuração faz com que o osciloscópio colete o sinal do canal um durante cinco segundos após o trigger em uma frequência de amostragem de 2500 Hz e no final salve a coleta em um arquivo com extensão “.csv” no pendrive.

3.4 Escolha dos transdutores piezoelétricos

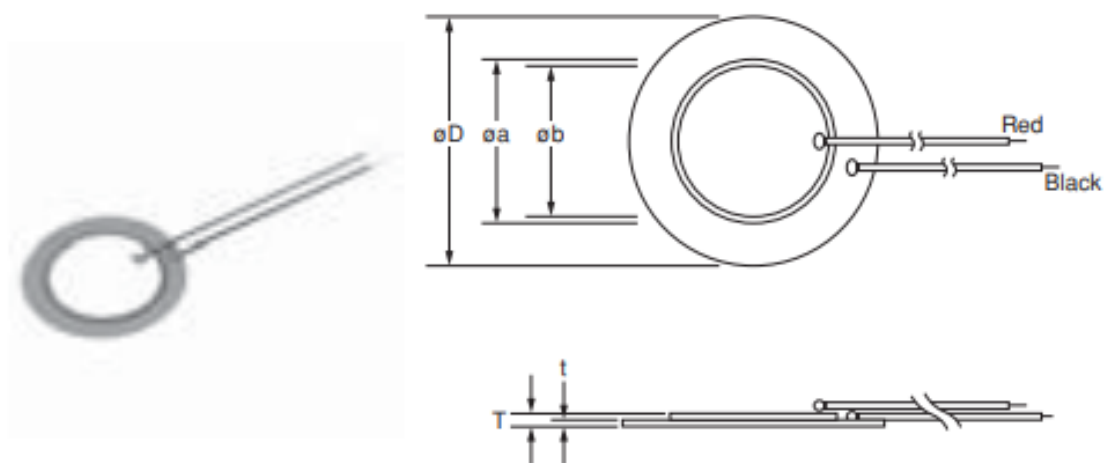
O titanato de bário é um material cerâmico que apresenta propriedades piezoelétricas e ferroelétricas, sendo amplamente utilizado na fabricação de capacitores, filtros de radiofrequência, sensores de pressão e dispositivos piezoelétricos em geral (WANG et al., 2019).

O titanato de bário é um material cerâmico com propriedades piezoelétricas, o que o torna adequado para uso na geração de energia piezoelétrica. Quando submetido a uma carga mecânica, o titanato de bário é capaz de gerar uma carga elétrica através do efeito piezoelétrico. Esse material tem sido utilizado em geradores piezoelétricos, como os utilizados em pavimentos inteligentes, que aproveitam as vibrações dos veículos para gerar energia elétrica. Além disso, o titanato de bário tem sido estudado em outras aplicações de geração de energia piezoelétrica, como em sistemas de colheita de energia de vibrações ambientais e em sensores piezoelétricos.

A eficiência do titanato de bário como material piezoelétrico depende de vários fatores, como sua pureza, estrutura cristalina e orientação do material. Em geral, o titanato de bário tem uma alta constante dielétrica e alta rigidez, o que permite uma boa resposta à deformação mecânica. Isso resulta em alta eficiência de conversão de energia mecânica em energia elétrica quando usado como material piezoelétrico em geradores piezoelétricos. No entanto, a eficiência também pode ser afetada por fatores externos, como a frequência e amplitude das vibrações mecânicas, geometria do transdutor piezoelétrico, método de excitação e carga elétrica aplicada. Em geral, o titanato de bário é um material piezoelétrico altamente eficiente para aplicações de geração de energia.

Conforme ilustrado na Figura 6, a conexão dos cabos com a pastilha piezoelétrica é comumente realizada através de solda eletrônica da seguinte forma:

Figura 6 – Ilustração da conexão do condutor do cristal piezoelétrico.



Na Tabela 1 constam os dados de referentes às características dos transdutores utilizados no trabalho, conforme pode ser observado a seguir:

Tabela 1 – Propriedades do piezoelétrico, Pastilha Piezoelétrico 35mm Transdutor Áudio Trigger.

Tensão Máxima Nominal (Vp-p):	30.0 Vp-p
Capacitância:	33.0nF $\pm 30\%$ [1kHz]
Frequência de Ressonância:	2.6kHz ± 0.5 kHz
Impedância de Ressonância:	200 Ohms
Temperatura de operação:	-20 a +70
Diâmetro da placa:	35mm
Diâmetro do elemento central:	25mm
Espessura da placa:	0.25mm
Espessura total com o elemento central:	0.47mm
Peso:	2g

Fonte: BESTAR, 2023, p. 2.

3.5 Metodologia do Ambiente de Estudo

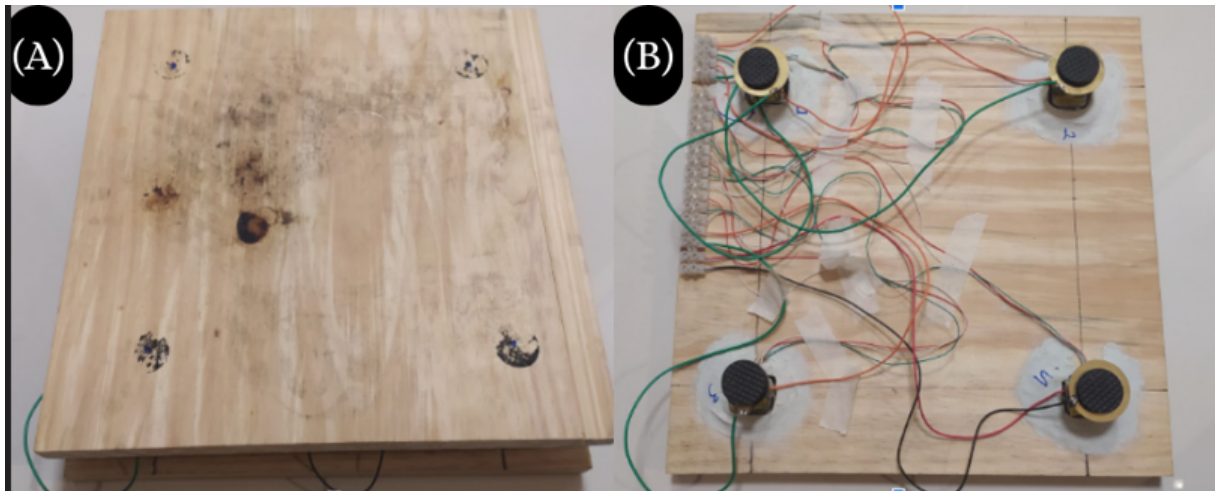
Foram utilizados dois ambientes para avaliar a capacidade do piezoelétrico como conversor de energia, sendo que tais ambientes foram nomeados de primeira versão do módulo de aquisição de dados e segunda versão do módulo de aquisição de dados, observados a seguir:

3.5.1 Estrutura da primeira versão do módulo de aquisição de dados

No primeiro teste, foi utilizada uma plataforma construída em madeira de pinus, com uma superfície plana e com discos piezelétricos acoplados à superfície. Estes materiais foram selecionados devido à facilidade de disponibilidade tendo com o propósito de facilitar a deformação das pastilhas piezoelétricas, contribuindo, assim, para a geração de energia elétrica.

Abaixo das pastilhas piezoelétricas são localizadas as células de carga, fixadas com massa plástica e pequenos suportes de metal. Os cabos para interligação entre as pastilhas foram ligados nos bornes de conexões fixados na lateral da estrutura, para facilitar a montagem das configurações série e paralelo posteriormente, conforme observa-se na Figura 7.

Figura 7 – Materiais utilizados como base. (A)Tampa superior do protótipo,(B)Interior do protótipo do módulo de aquisição de dados.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

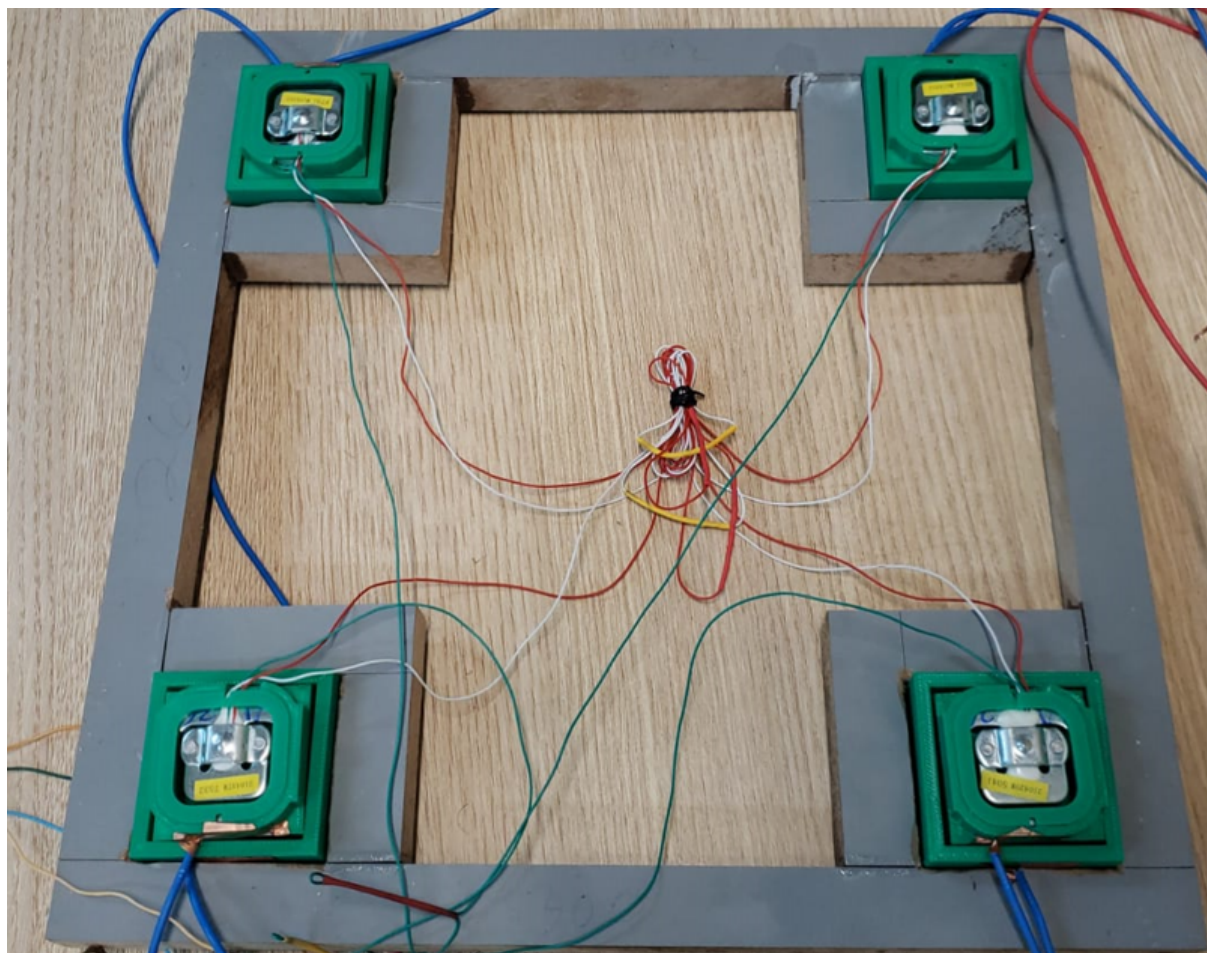
Durante as fases iniciais de testes e aquisição de dados, foram utilizados materiais disponíveis aos estudantes, com a intenção de reduzir custos e, ainda assim, ter resultados satisfatórios.

A primeira versão do módulo de aquisição de dados ajudou os estudantes a desenvolver a ideia do protótipo, porém, levantou alguns questionamentos que serão abordados no capítulo de desenvolvimento.

3.5.2 Estrutura da segunda versão do módulo de aquisição de dados

A segunda versão do módulo de aquisição de dados conta com uma estrutura mais elaborada, mas claro, com melhorias pertinentes à serem feitas em trabalhos futuros. A segunda versão conta com os modelos de encapsulamento das pastilhas piezoelétricas que suportam na parte superior as células de carga, conforme apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Segunda versão do módulo de aquisição de dados (sem a plataforma).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Os modelos impressos em PLA foram essenciais para o desenvolvimento da segunda versão do módulo, tendo em vista que esses elementos permitem a medição dos sinais das pastilhas e das células de carga simultaneamente, sem que ocorra a destruição das pastilhas no processo.

4 DESENVOLVIMENTO

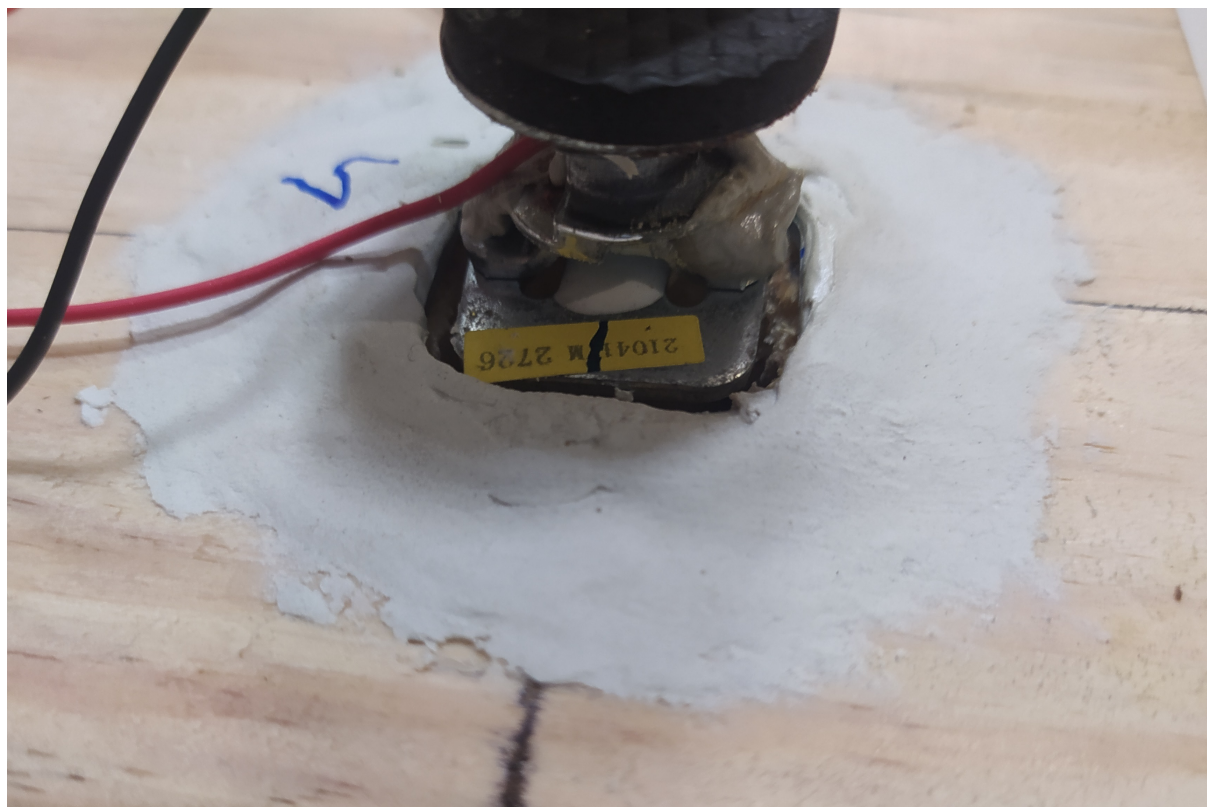
O contínuo avanço da tecnologia piezoelétrica tem sido um impulso significativo para a inovação no âmbito da coleta de dados. No presente capítulo, empreenderemos uma análise aprofundada do desenvolvimento de um protótipo de sistema de coleta de dados fundamentado em dispositivos piezoelétricos. Este sistema não apenas se propõe a explorar a capacidade de geração de energia renovável desses dispositivos, mas também visa aprimorar a eficiência na obtenção de informações relevantes. A exposição detalhada do processo de desenvolvimento, abordagem dos desafios enfrentados e apresentação dos resultados obtidos fornecerão uma perspectiva abrangente sobre o potencial e a aplicabilidade de um sistema de coleta de dados piezoelétrico inovador em ambientes rodoviários.

4.1 Construção do primeiro protótipo

O primeiro protótipo foi construído sobre uma tábua de madeira pinus com dimensões de 30cm x 30cm, a tábua continha quatro furos equidistantes que abrigavam as quatro células de carga. Acima das células de carga foram montados suportes metálicos e acima dos suportes eram fixadas as pastilhas piezoelétricas.

Para a fixação das células de carga ao suporte inferior do protótipo foi utilizada massa plástica automotiva, como pode ser observado claramente na Figura 9.

Figura 9 – Fixação da célula de carga à base do protótipo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A Figura 10 evidencia a pastilha piezoelétrica com a solda eletrônica realizada na parte central, inicialmente, foi definido tal local por existir a possibilidade de passagem do cabo que interliga a pastilha ao borne de conexões ocorrer de forma vertical, evitando assim, a quebra por pressão.

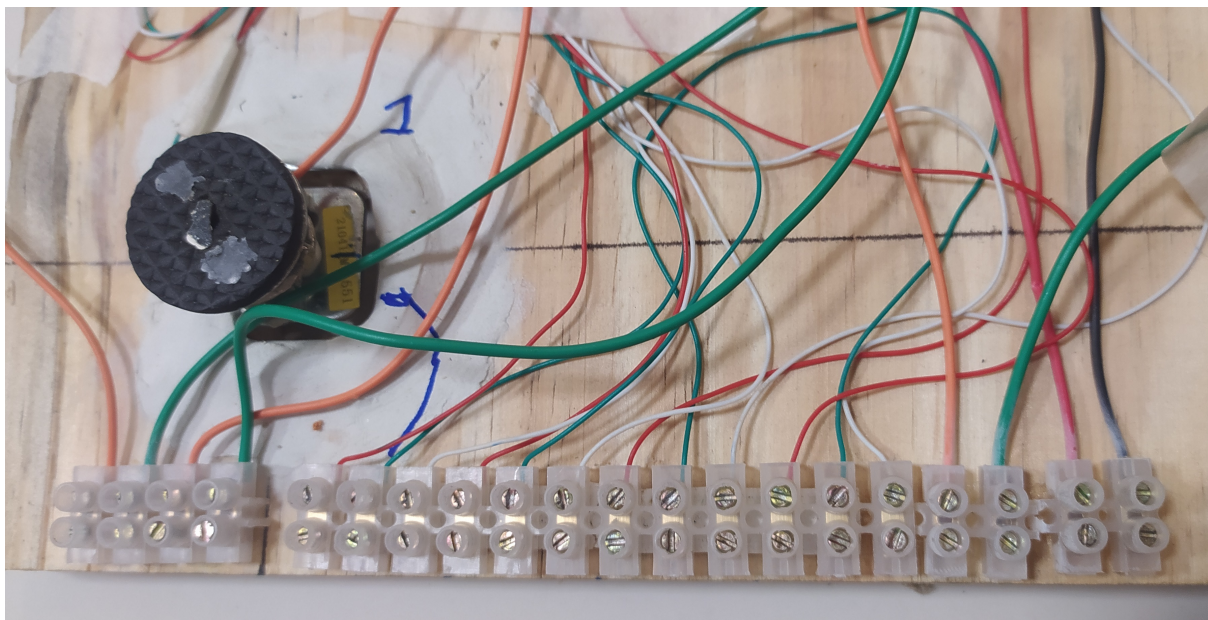
Figura 10 – Solda da pastilha na parte central da cerâmica.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Por fim, a fixação dos bornes de conexão, que permitiam a rápida montagem das ligações para testes de carga em laboratório, sem a necessidade de nova identificação dos condutores, agilizando o processo de aquisição de dados pode ser visto na Figura 11.

Figura 11 – Bornes de conexão fixados à base.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

4.1.1 Desafios do primeiro protótipo

Durante a primeira fase do experimento, os autores perceberam que o método de solda eletrônica descrito na Figura 6 não era conveniente para o objetivo desejado, desse modo, foi necessária a utilização de outro método. A Figura 12 demonstra a ineficiência do método utilizado para soldagem. Durante a liberação de pressão do sistema, o acúmulo de tensões no entorno da solda faz com que a pastilha se rompa.

Figura 12 – Fratura do ponto de solda.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Além da quebra da cerâmica da pastilha, posteriormente houve a quebra da fixação abaixo da pastilha, que era fixada com massa plástica, devido a massa aplicada sobre o protótipo.

4.2 Construção do segundo protótipo

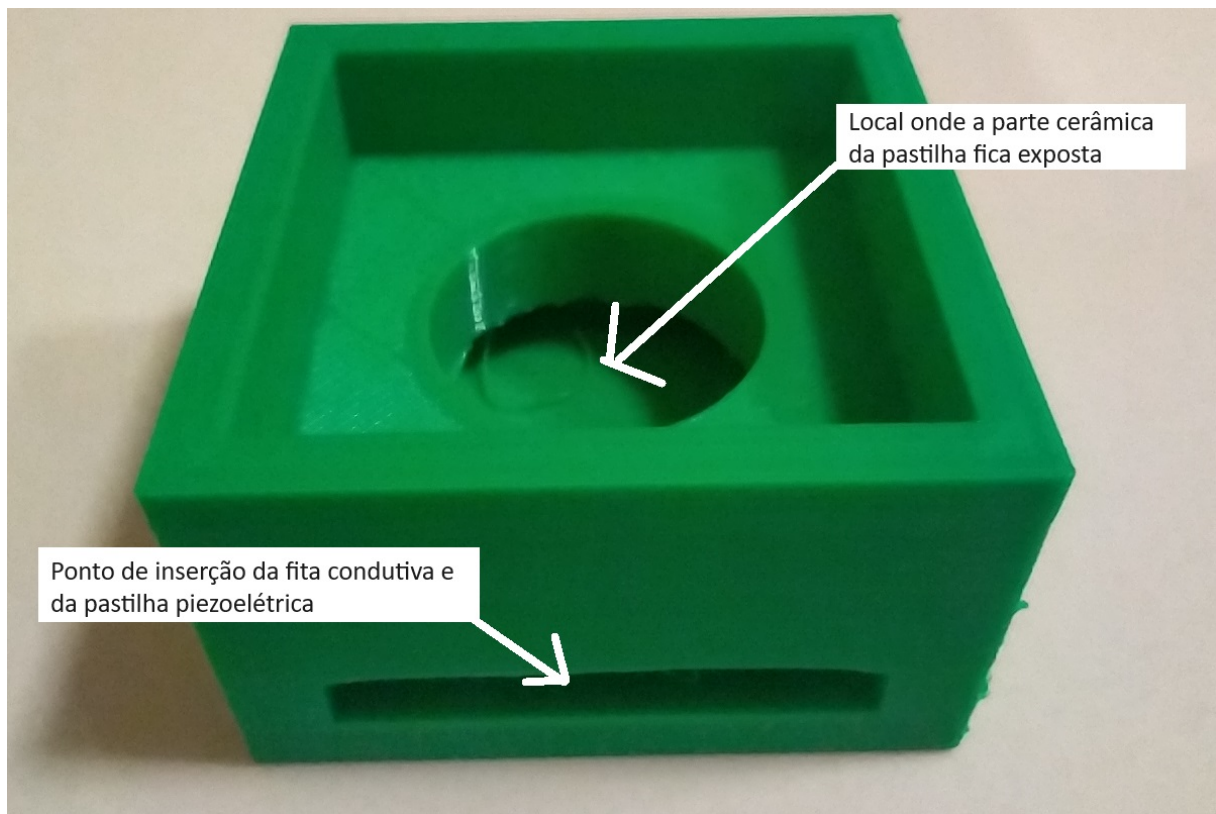
O segundo protótipo teve como objetivo superar os desafios encontrados na primeira versão. Desse modo, os estudantes optaram pelo auxílio da modelagem 3D para a construção dos elementos do módulo de fixação das células de carga e das pastilhas piezoelétricas.

Para evitar a quebra da pastilha durante a aquisição de dados do experimento foi feita a modelagem de um suporte para melhor fixação dos componentes do protótipo, tal modelo foi impresso na impressora 3D disponível no campus, como pode ser observado nas figuras 13 e 14.

Pode-se destacar no segundo protótipo, o encapsulamento desenvolvido para acomodar a pastilha piezoelétrica composta por três partes, a parte inferior, a parte superior e a trava que segura a célula de carga no topo da estrutura.

A figura 13 demonstra a parte inferior do modelo, a parte inferior é composta por uma estrutura que comporta a parte superior, na parte central da parte inferior existe um furo em formato cilíndrico pelo qual passa o pistão que pressiona a pastilha piezoelétrica. Na parte inferior do modelo, existe um compartimento de formato retangular onde é depositada a pastilha piezoelétrica, fazendo com que a parte cerâmica fique livre ao centro da peça.

Figura 13 – Peça inferior do modelo 3D.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A Figura 14 demonstra a peça superior do modelo 3D impresso, a peça superior contém uma estrutura de formato quadrado que encaixa na peça inferior, fazendo com que o movimento de rotação seja impossível, garantindo assim, a estabilidade do modelo. A parte superior contém ainda um pistão que pressiona a pastilha piezoelétrica quando chega ao fundo da parte inferior. Além disso, possui um suporte no topo onde fica acomodada a célula de carga.

Figura 14 – Peça superior do modelo 3D.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A Figura 15 apresenta a disposição da pastilha na parte inferior do modelo 3D impresso, desse modo, o pistão da parte superior pressiona a pastilha uniformemente, evitando fraturas por excesso de pressão em pontos isolados.

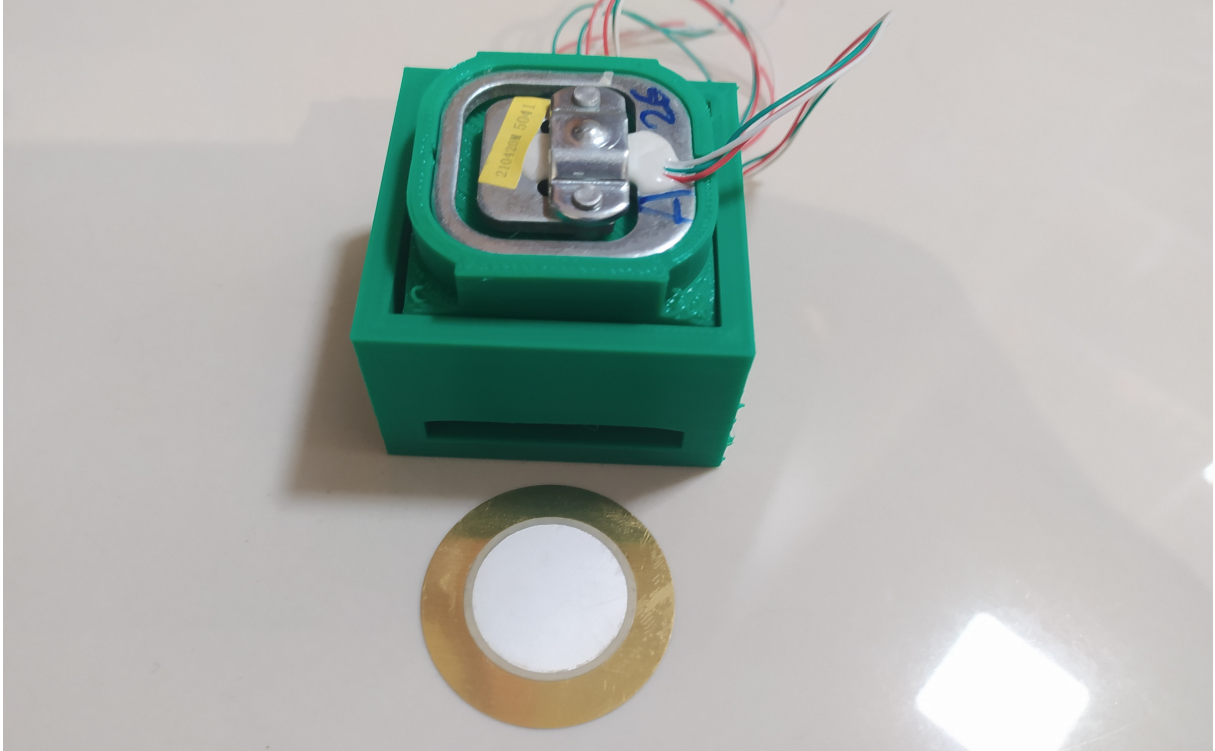
Figura 15 – Disposição da pastilha no modelo impresso.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A Figura 16 demonstra a célula de carga acoplada ao modelo impresso e indica a posição em relação à pastilha piezoelétrica, nesse caso, com a pastilha fora do modelo, porém, durante os testes a pastilha fica inserida na parte inferior do modelo.

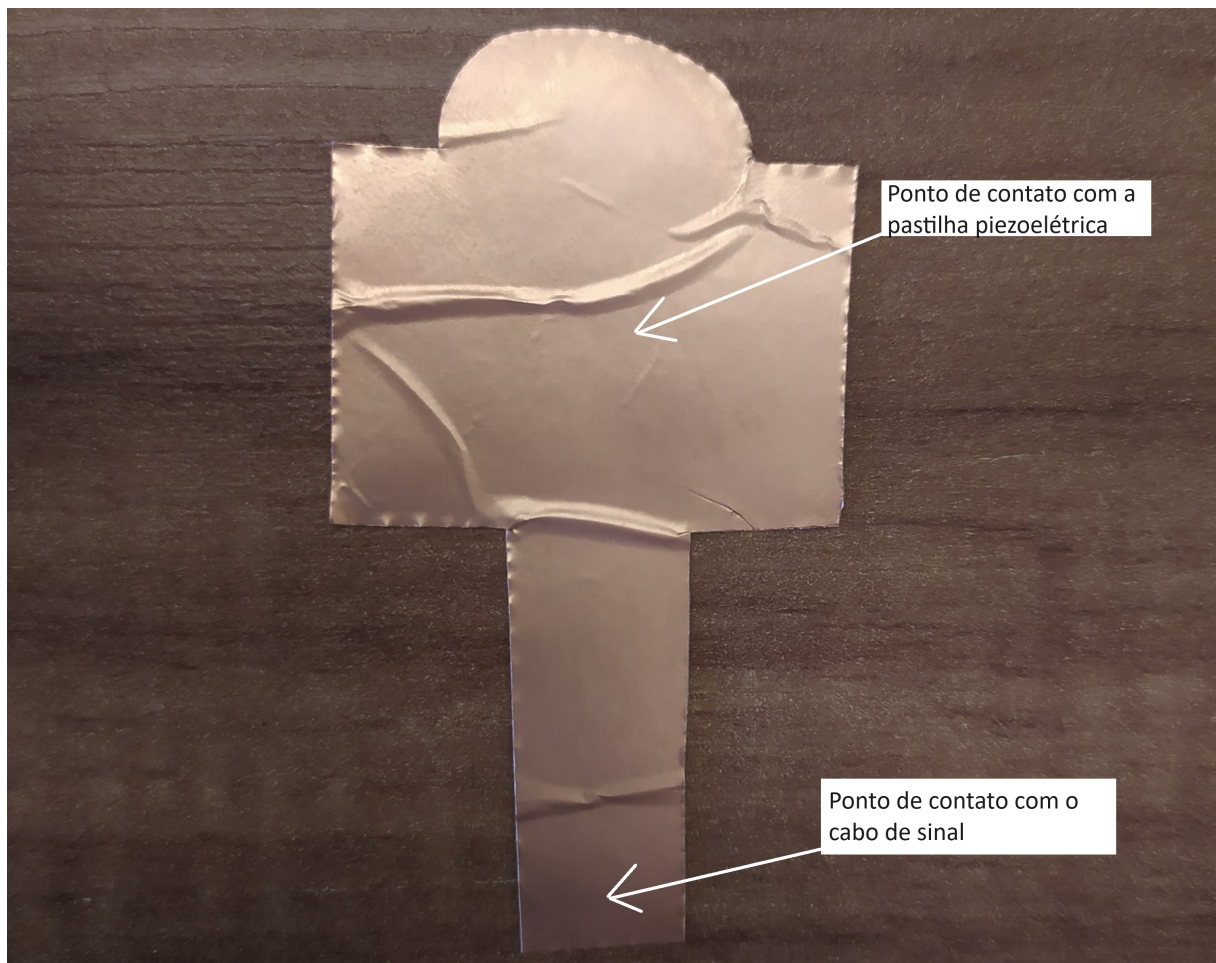
Figura 16 – Disposição dos componentes do experimento.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Para a conexão das pastilhas com os condutores de sinal que são interligados às ponteiras do osciloscópio, foi necessário criar uma interface livre de pontos de solda, ou seja, eliminando os pontos de acúmulo de tensões mecânicas que eventualmente causavam a quebra da pastilha. Para tal feito, foi utilizada uma fita condutiva de cobre fixada na parte inferior da peça inferior do modelo 3D, conforme pode ser observado na Figura 17. A fita condutiva também foi fixada na parte inferior do pistão que pressiona a pastilha. A fita condutiva foi escolhida como alternativa pois devido ao seu formato conveniente, consegue conduzir corrente e, simultaneamente, ser fina o suficiente para não gerar pontos de acúmulo de tensão mecânica relevantes.

Figura 17 – Fita condutiva no formato da parte inferior do modelo 3D.

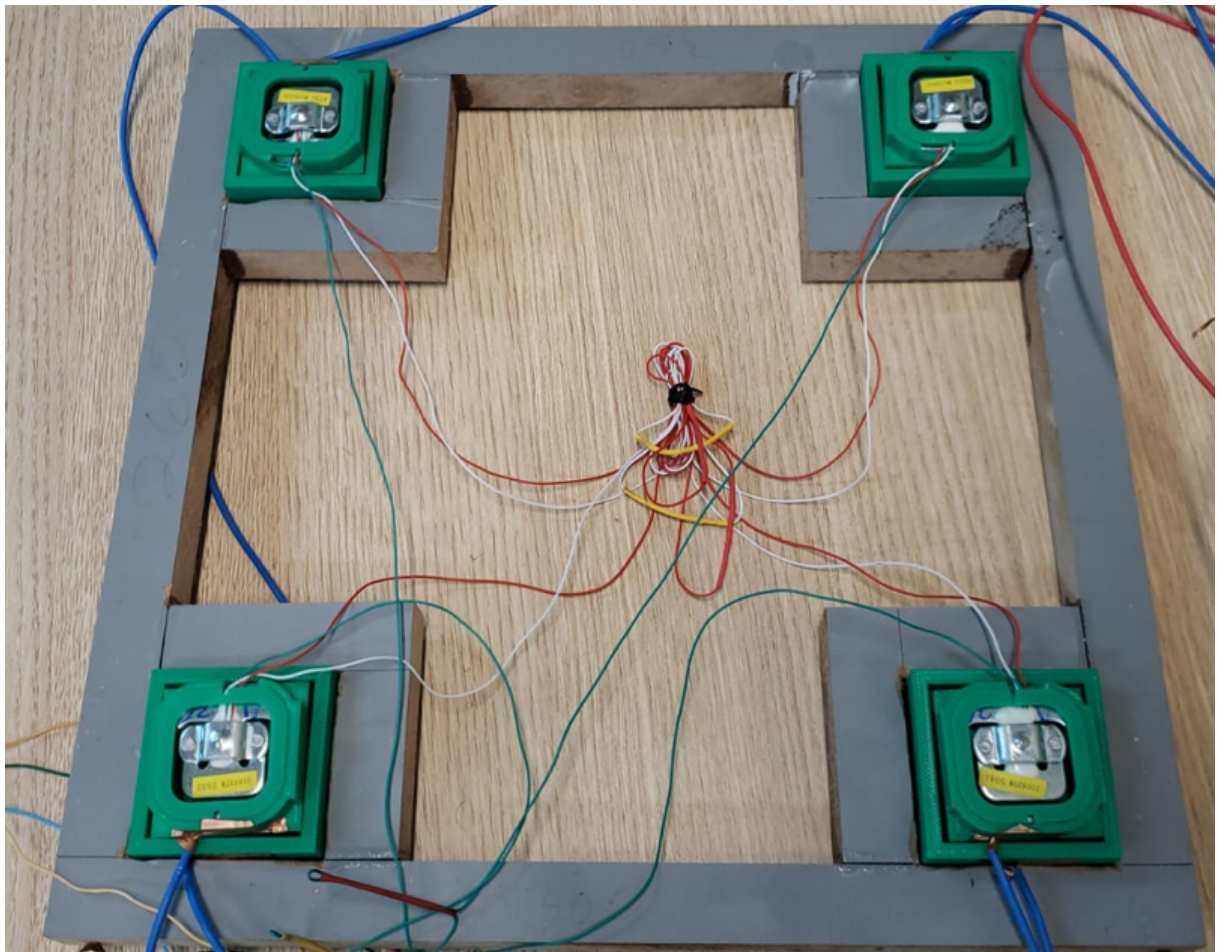


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Quando fixada na parte inferior, no interior do modelo 3D, onde fica depositada a pastilha, a superfície da fita condutiva torna-se lisa, livre de rugosidades e faz contato com a parte inferior da pastilha piezoelétrica.

A Figura 18 demonstra como ficou a disposição final dos elementos do módulo de aquisição de dados no suporte construído em madeira sem a plataforma, conforme pode-se observar, os modelos 3D impressos foram organizados de forma equidistante, fazendo com que o peso depositado na parte central da plataforma seja distribuído igualmente.

Figura 18 – Disposição final dos elementos do módulo.



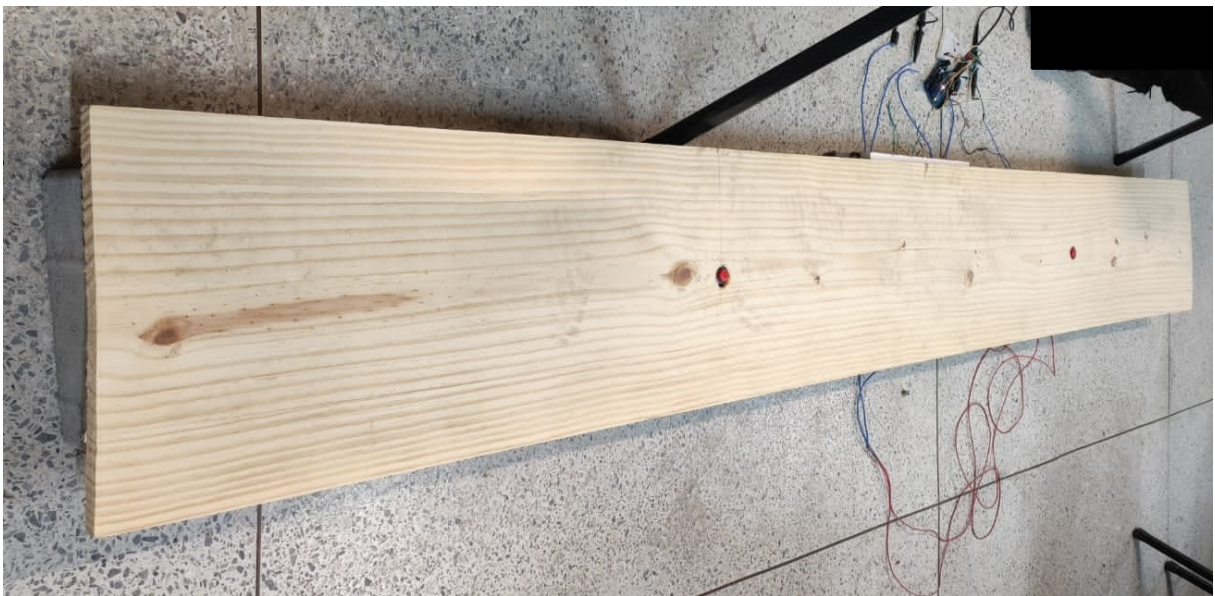
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

4.3 Coleta de dados

Para a aquisição de dados apresentada, foi utilizada a versão atual do módulo de aquisição de dados apresentado na Figura 18.

A Figura 19 demonstra a simulação de pavimento feita para obtenção dos resultados durante a aquisição de dados. Foi utilizada uma tábua de pinus, infelizmente não foi possível simular com asfalto sobre o módulo pois demandaria um alto custo, como o protótipo está em fase inicial de desenvolvimento, os estudantes julgaram suficientes os resultados obtidos a partir da simulação realizada.

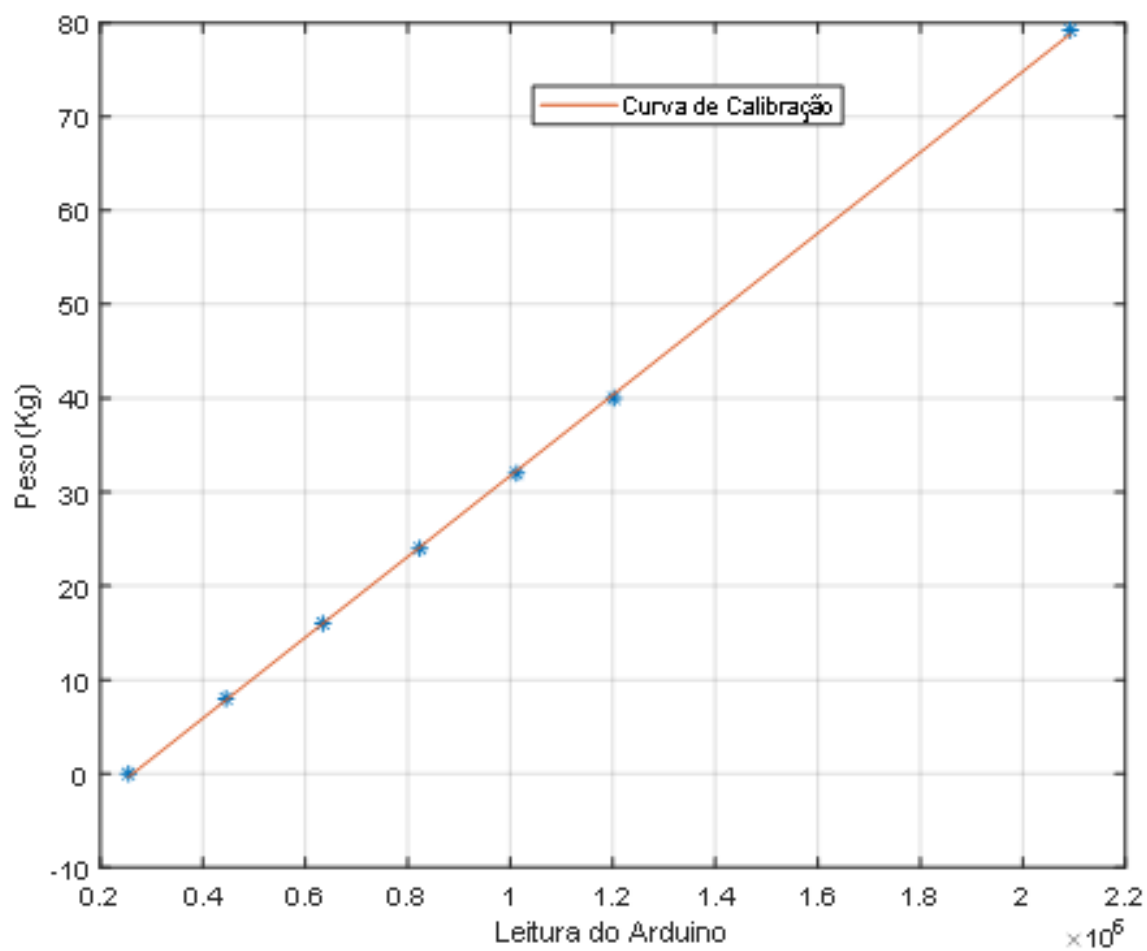
Figura 19 – Experimento em laboratório.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Inicialmente, na fase de coleta de dados, foi necessário realizar a calibração da balança do experimento, desse modo, foi feita a calibração com massas conhecidas, resultando na curva de carga apresentada na Figura 20.

Figura 20 – Curva de calibração.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A Figura 21 demonstra o código do Matlab utilizado para gerar a curva de calibração, o código contém, notavelmente, os valores utilizados como padrão para geração da curva de calibração, através do método de regressão linear. A curva de calibração obtida foi: $y = ax + b$, em que a e b são, respectivamente, $4,3 \times 10^{-5}$ e $-11,33$.

Figura 21 – Código da curva de calibração.

```
%% Calibração
clear
clc
y = [0 8 16 24 32 40 79.2]';
x = [255118 445300 634300 823600 1012400 1202100 2093000]';
X = [x ones(size(x))];
p = pinv(X)*y;
a = p(1);
b = p(2);
plot(x,y,'*');
hold on
p1 = plot(x,a*x+b);
grid on
xlabel('Leitura do Arduino')
ylabel('Peso (Kg)')
legend(p1,'Curva de Calibração')
```

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A Tabela 2 demonstra a leitura do arduino e as massas padrão utilizadas para realizar a calibração das células de carga do protótipo.

Tabela 2 – Valores para calibração do módulo.

Leitura do arduino	Massa (Kg)
255118	0
445300	8
634300	16
823600	24
1012400	32
1202100	40
2093000	79,2

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Para melhor análise dos dados coletados, foi definido um procedimento padronizado ao adicionar carga no sistema para deformação das pastilhas. Durante o experimento, foi definido que a medição deve ser feita adicionando a carga de um passo, ou seja, um estudante sobe e desce no módulo depositando todo seu peso com apenas um dos pés. Apesar de uma pequena variação observada entre as curvas de carga, foi obtido um resultado satisfatório, de modo que o resultado pode ser extrapolado para um passo de uma pessoa comum no pavimento.

5 RESULTADOS

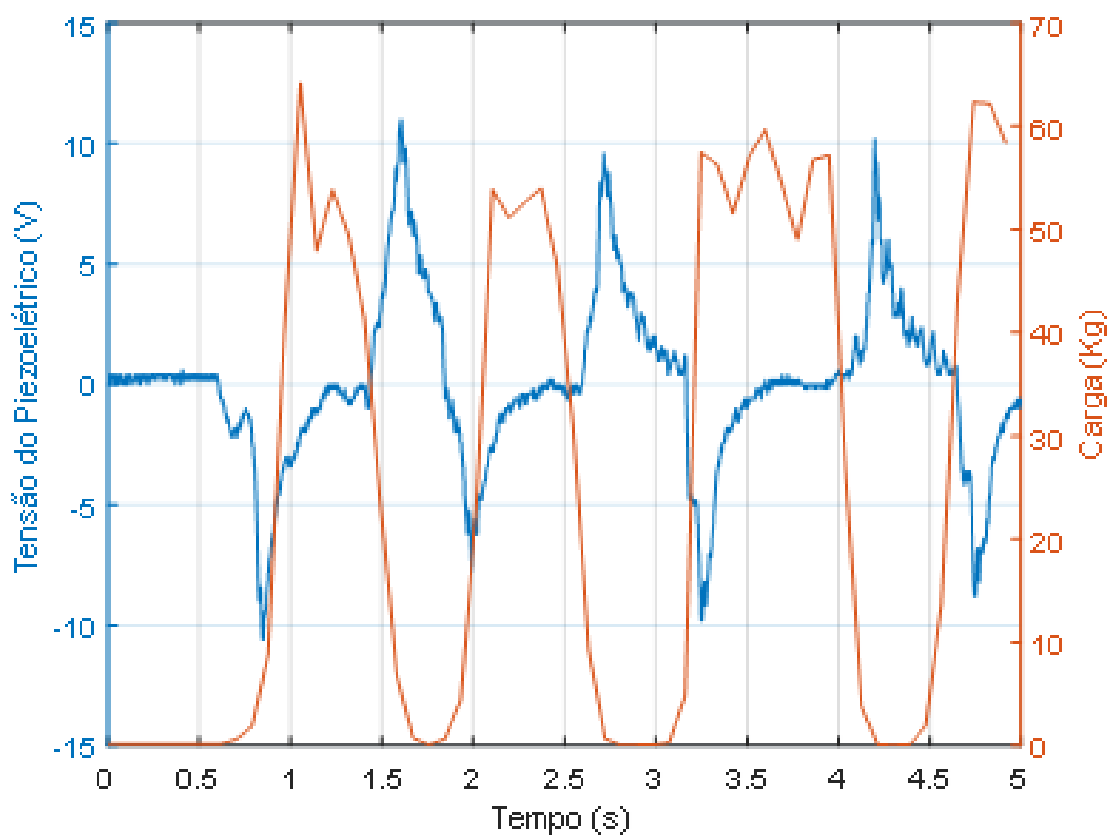
Com o objetivo de observar a relação entre a carga aplicada no sistema e a tensão gerada pelo transdutor, o experimento realizado contou com a leitura do sinal da célula de carga pelo Arduino e a leitura do sinal gerado pela pastilha piezoelétrica. Tais sinais foram analisados utilizando a ferramenta computacional Matlab para melhor precisão dos resultados.

A curva de carga, representada pela cor alaranjada é relacionada à massa que passa sobre a estrutura do módulo de aquisição de dados com o tempo do experimento, assim como a curva obtida através das células de carga, representada pela cor azul, torna-se imprescindível destacar os resultados obtidos através do osciloscópio. Observando o gráfico da tensão no tempo, é possível visualizar a resposta das pastilhas piezoelétricas em relação à carga aplicada, de acordo com as figuras seguintes, que representam os resultados do experimento.

O elemento piezoelétrico produz uma tensão que segue um padrão semelhante a uma onda senoidal, ou seja, com cristas e vales que passam pelo eixo de 0V, mas para a sua utilização em sistemas eletrônicos, é necessário aplicar um processo de retificação de tensão, como exemplo de um dos elementos desse sistema retificador, pode-se citar a ponte retificadora de tensão com diodos para que a energia produzida torne-se "utilizável". O sistema comportou-se, conforme ilustrado na Figura 22, a deformação de tensão x carga, com uma pessoa subindo e descendo durante 5 segundos. Devido à resistência elevada do circuito aberto, os valores associados à tensão são elevados.

A Figura 22 demonstra a primeira coleta obtida sem levar em consideração a regra do passo, para fins de verificação do funcionamento do sistema:

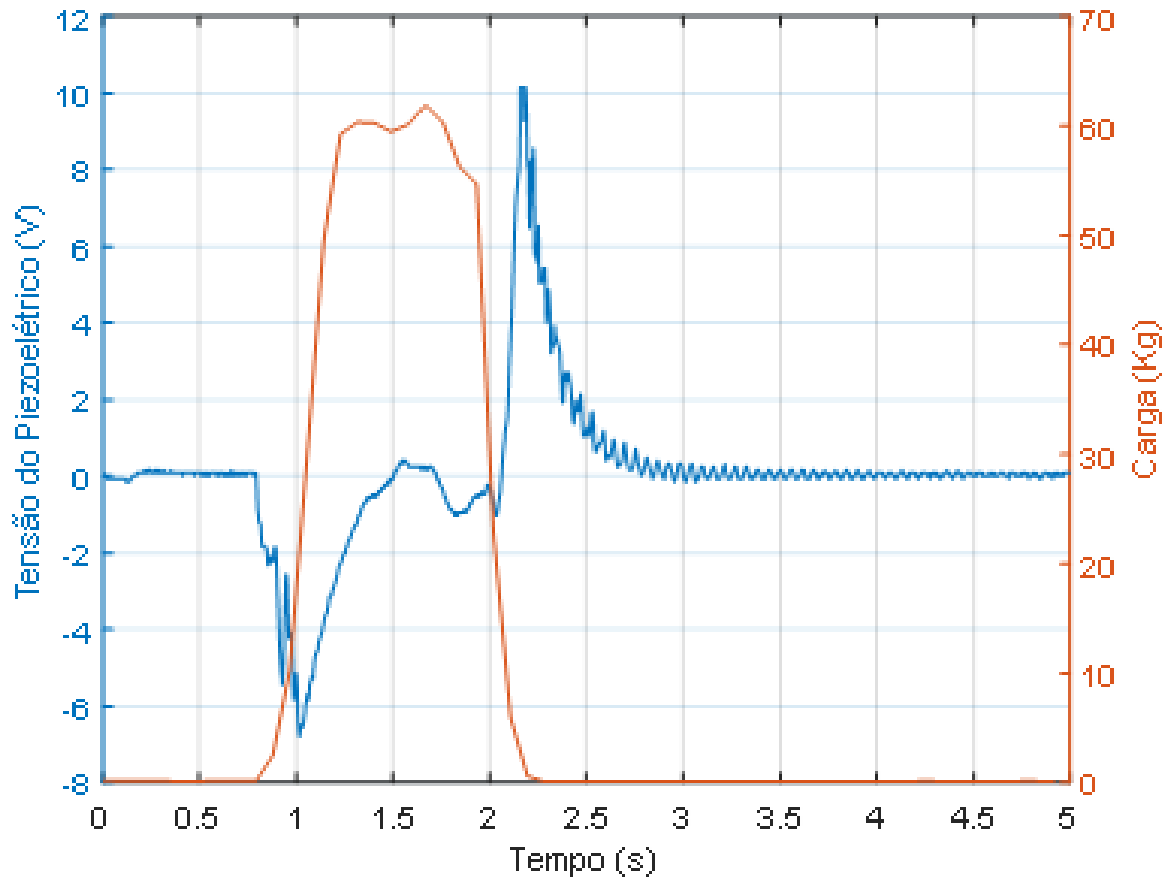
Figura 22 – Tensão gerada em laboratório utilizando um piezo sem carga.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Observa-se, pela Figura 23, a deformação de tensão x carga, simulando uma pessoa subindo e descendo no protótipo apenas uma vez, nesse caso, com apenas um piezo sem carga.

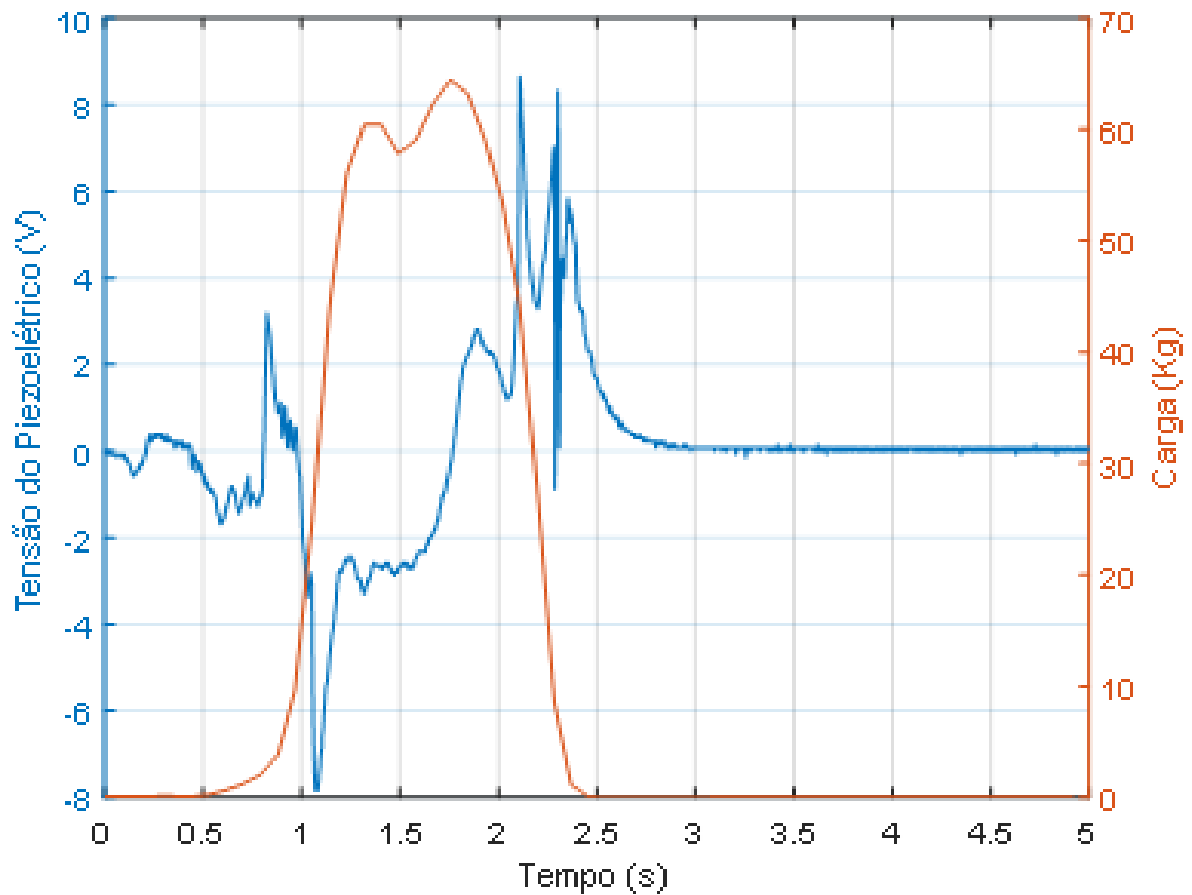
Figura 23 – Tensão gerada em laboratório utilizando um piezo sem carga e um passo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Observa-se, pela Figura 24, a deformação de tensão x carga, simulando uma pessoa subindo e descendo no protótipo apenas uma vez, nesse caso, com dois piezos em série sem carga.

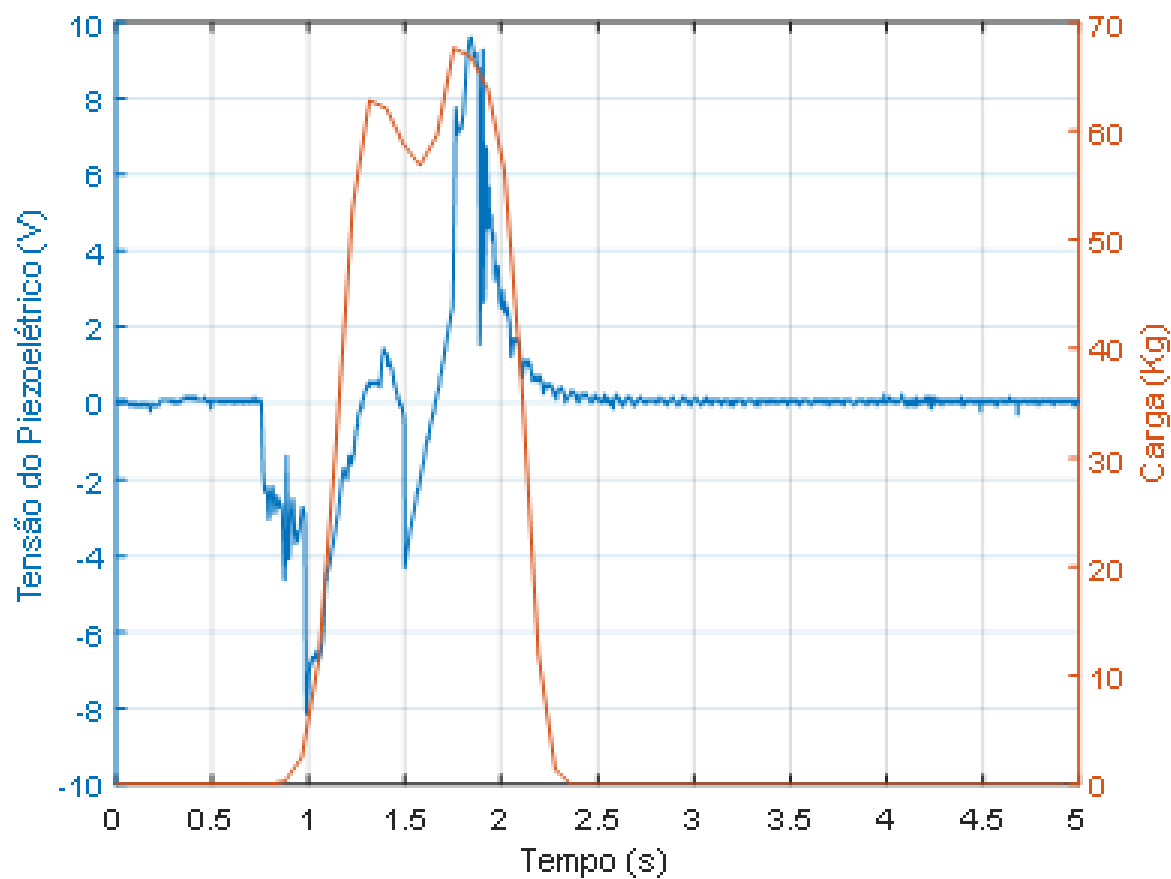
Figura 24 – Tensão gerada em laboratório utilizando dois piezos em série sem carga.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Observa-se, pela Figura 25, a deformação de tensão x carga, simulando uma pessoa subindo e descendo no protótipo apenas uma vez, nesse caso, com três piezos em série sem carga.

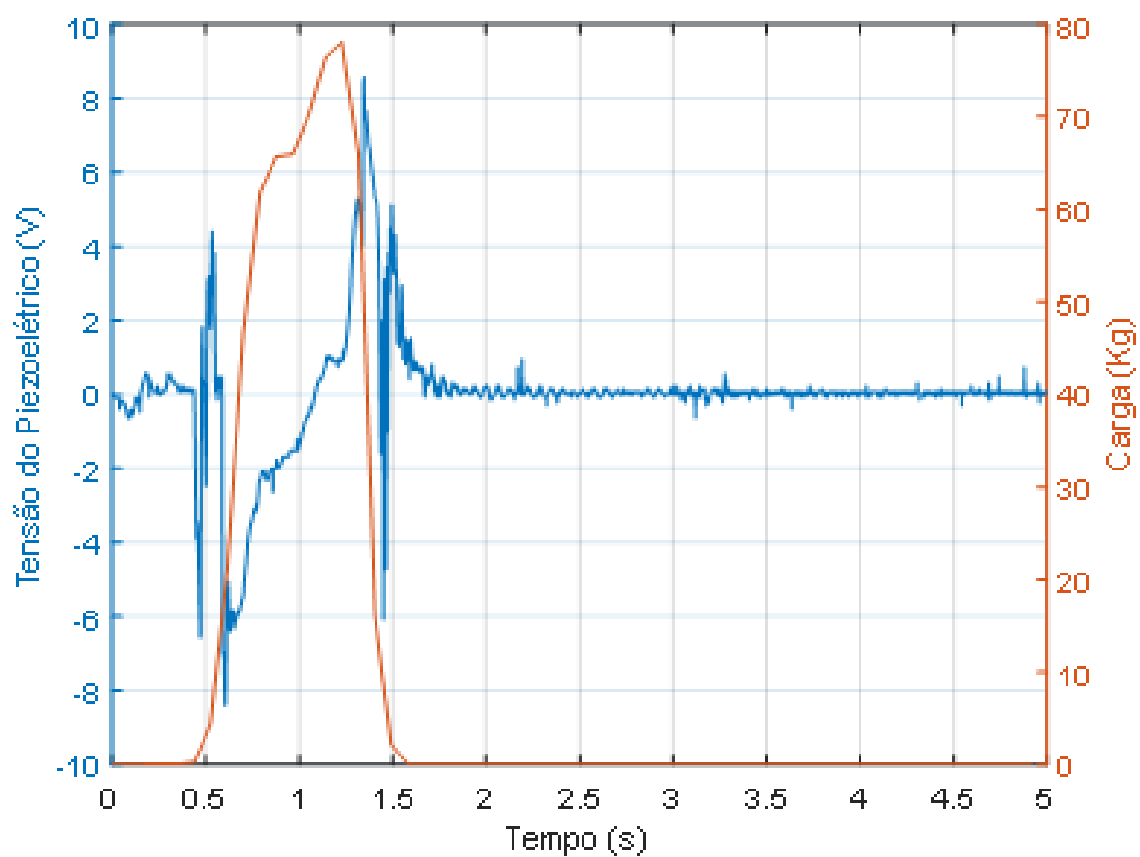
Figura 25 – Tensão gerada em laboratório utilizando três piezos em série sem carga.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Observa-se, pela Figura 26, a deformação de tensão x carga, simulando uma pessoa subindo e descendo no protótipo apenas uma vez, nesse caso, com quatro piezos em série sem carga.

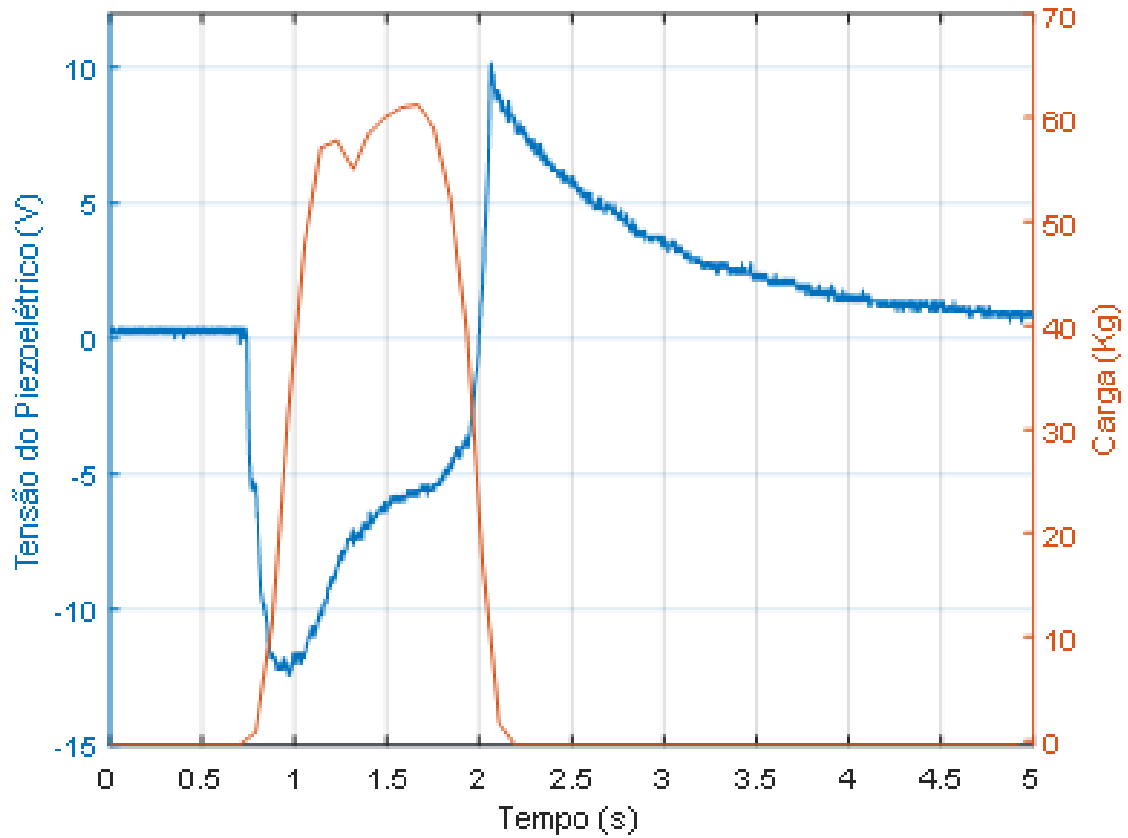
Figura 26 – Tensão gerada em laboratório utilizando quatro piezos em série sem carga.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Observa-se, pela Figura 27, a deformação de tensão x carga, simulando uma pessoa subindo e descendo no protótipo apenas uma vez, nesse caso, com dois piezos em paralelo sem carga.

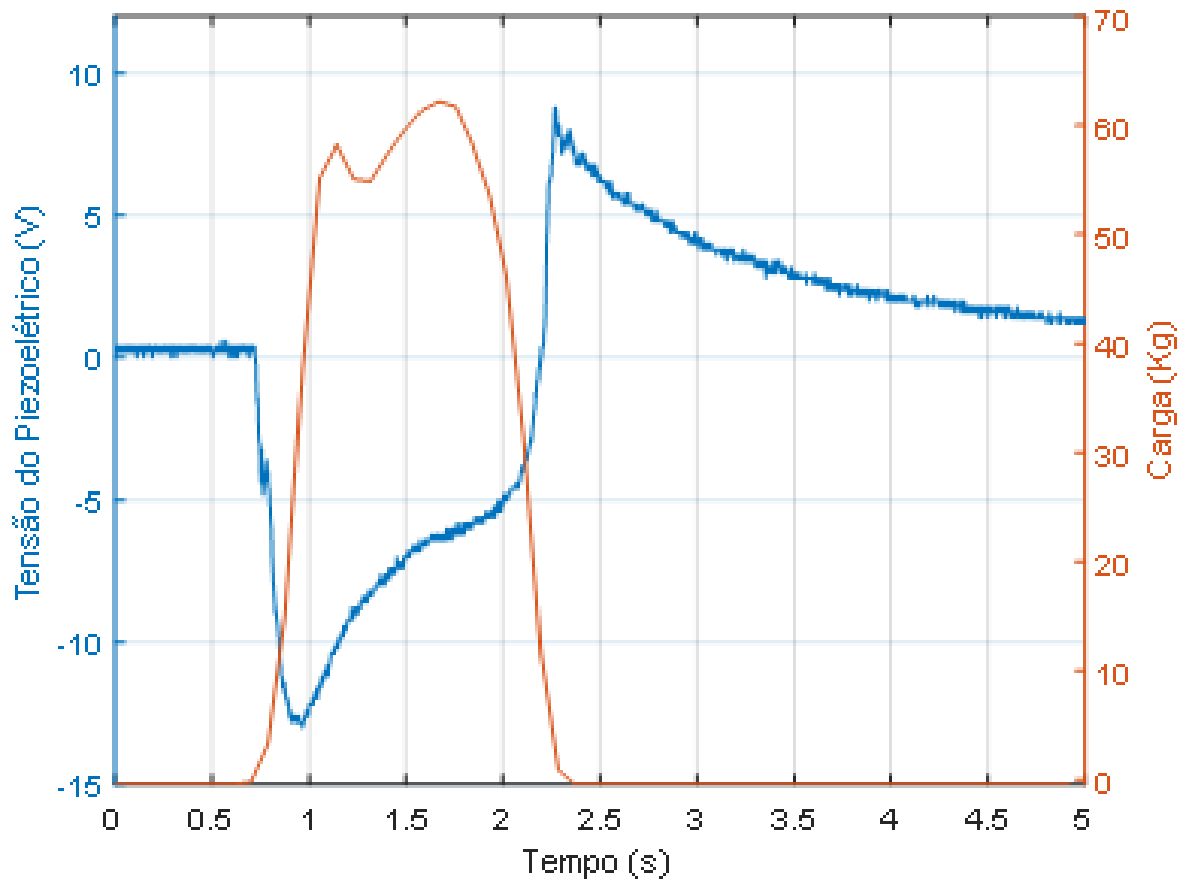
Figura 27 – Tensão gerada em laboratório utilizando dois piezos em paralelo sem carga.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Observa-se, pela Figura 28, a deformação de tensão x carga, simulando uma pessoa subindo e descendo no protótipo apenas uma vez, nesse caso, com três piezos em paralelo sem carga.

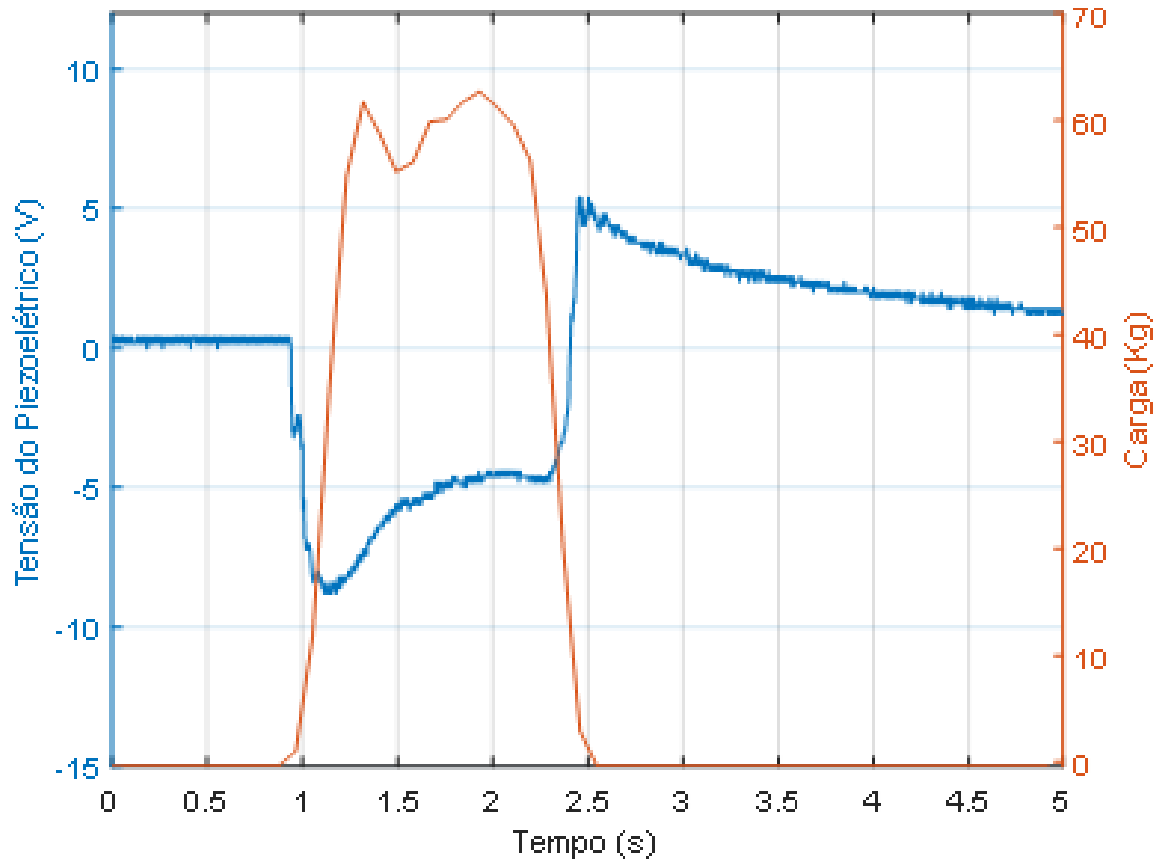
Figura 28 – Tensão gerada em laboratório utilizando três piezos em paralelo sem carga.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Observa-se, pela Figura 29, a deformação de tensão x carga, simulando uma pessoa subindo e descendo no protótipo apenas uma vez, nesse caso, com quatro piezos em paralelo sem carga.

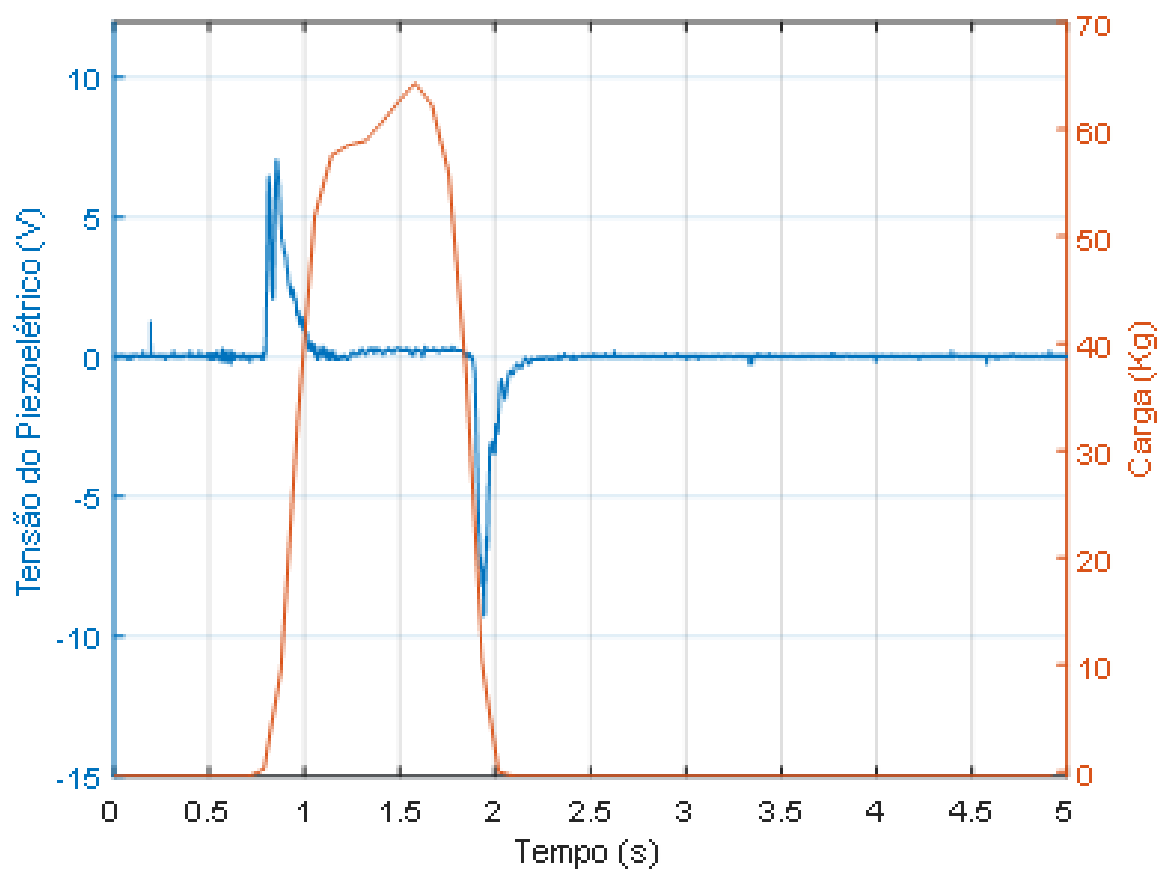
Figura 29 – Tensão gerada em laboratório utilizando quatro piezos em paralelo sem carga.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Observa-se, pela Figura 30, a deformação de tensão x carga, simulando uma pessoa subindo e descendo no protótipo apenas uma vez, nesse caso, com apenas um piezo com carga de $1M\Omega$.

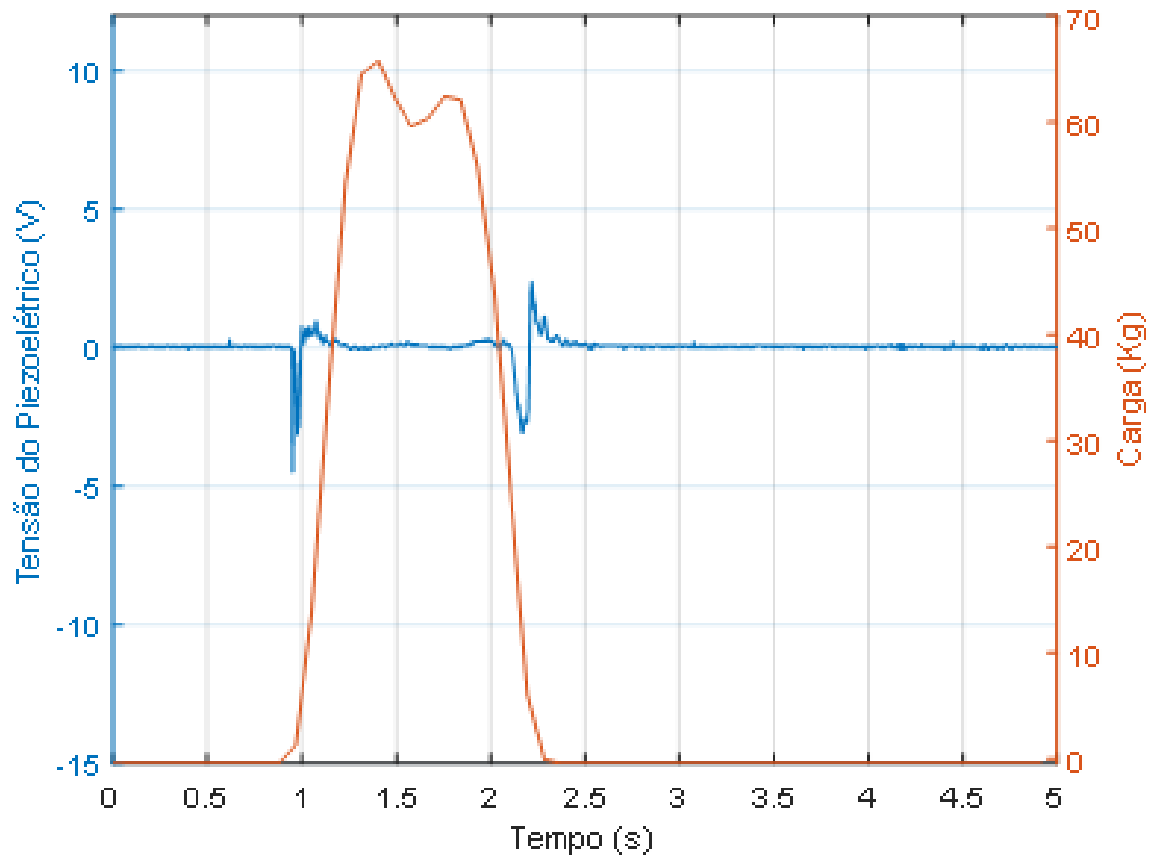
Figura 30 – Tensão gerada em laboratório utilizando um piezo com carga.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Observa-se, pela Figura 31, a deformação de tensão x carga, simulando uma pessoa subindo e descendo no protótipo apenas uma vez, nesse caso, com dois piezos em paralelo com carga de $1\text{M}\Omega$.

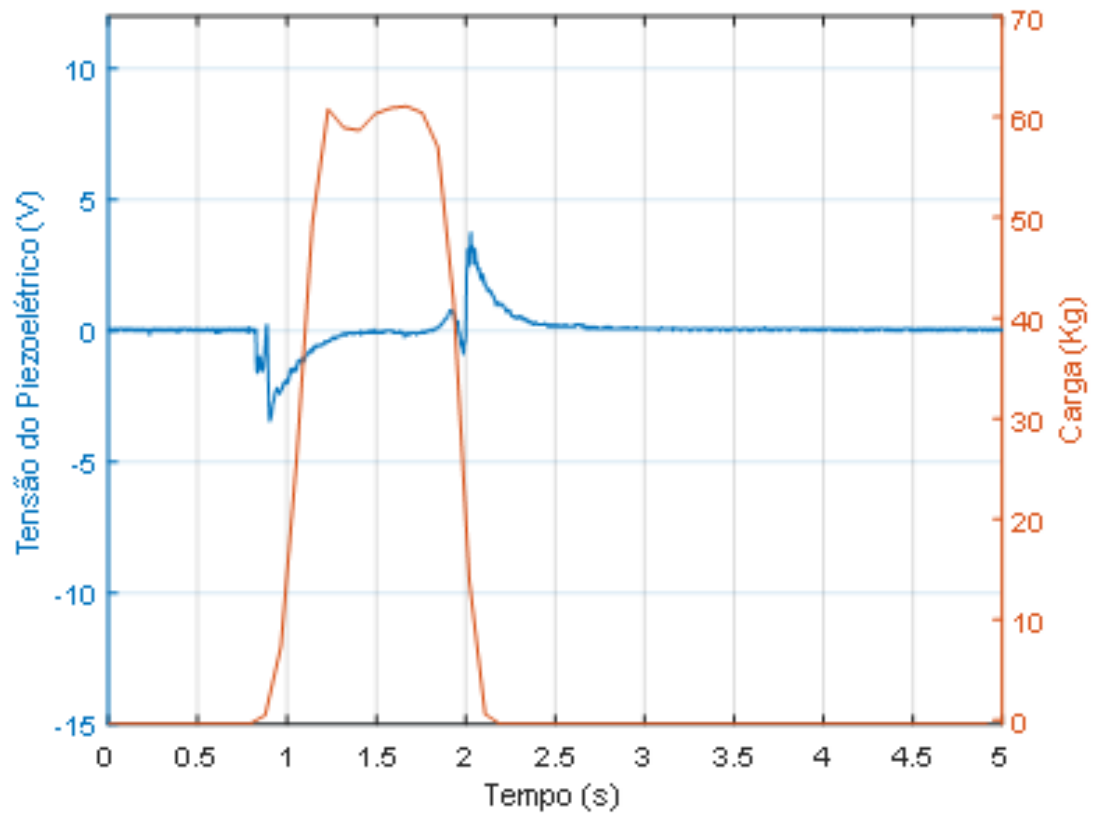
Figura 31 – Tensão gerada em laboratório utilizando dois piezos em paralelo com carga.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Observa-se, pela Figura 32, a deformação de tensão x carga, simulando uma pessoa subindo e descendo no protótipo apenas uma vez, nesse caso, com três piezos em paralelo com carga de $1M\Omega$.

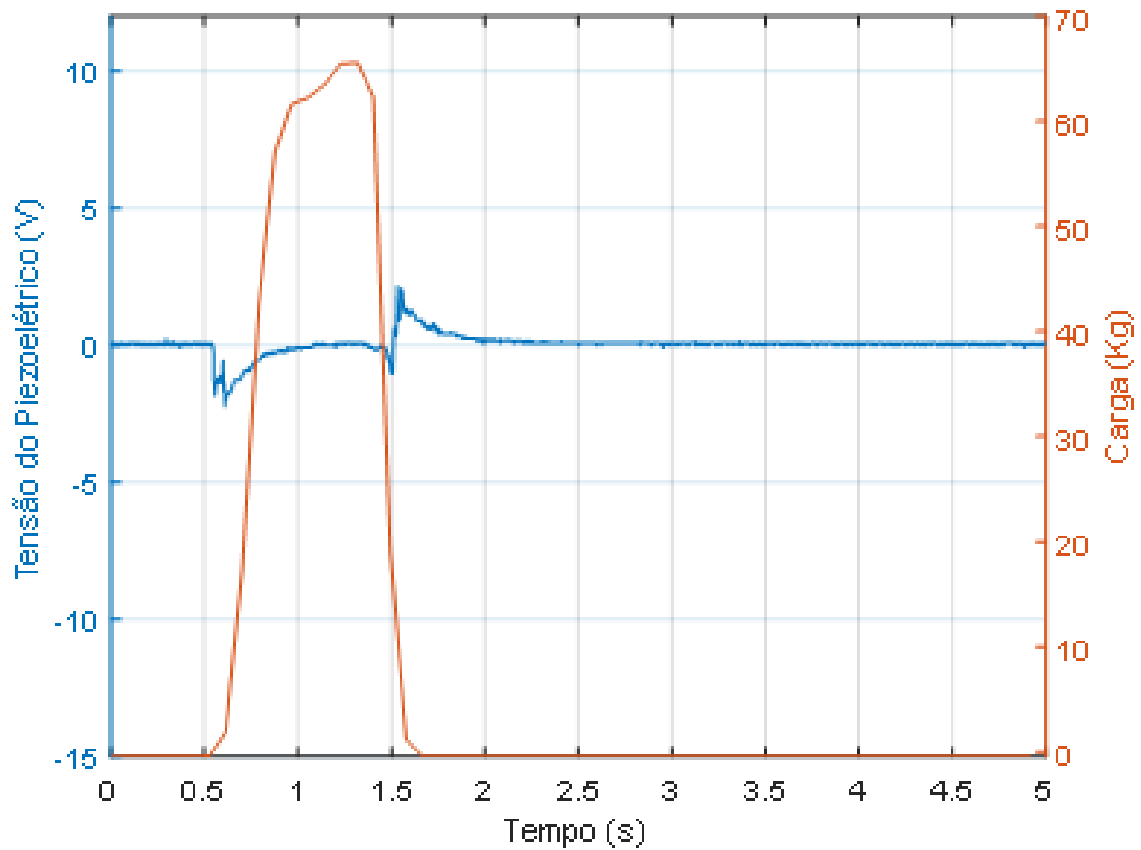
Figura 32 – Tensão gerada em laboratório utilizando três piezos em paralelo com carga.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Observa-se, pela Figura 33, a deformação de tensão x carga, simulando uma pessoa subindo e descendo no protótipo apenas uma vez, nesse caso, com quatro piezos em paralelo com carga de $1M\Omega$.

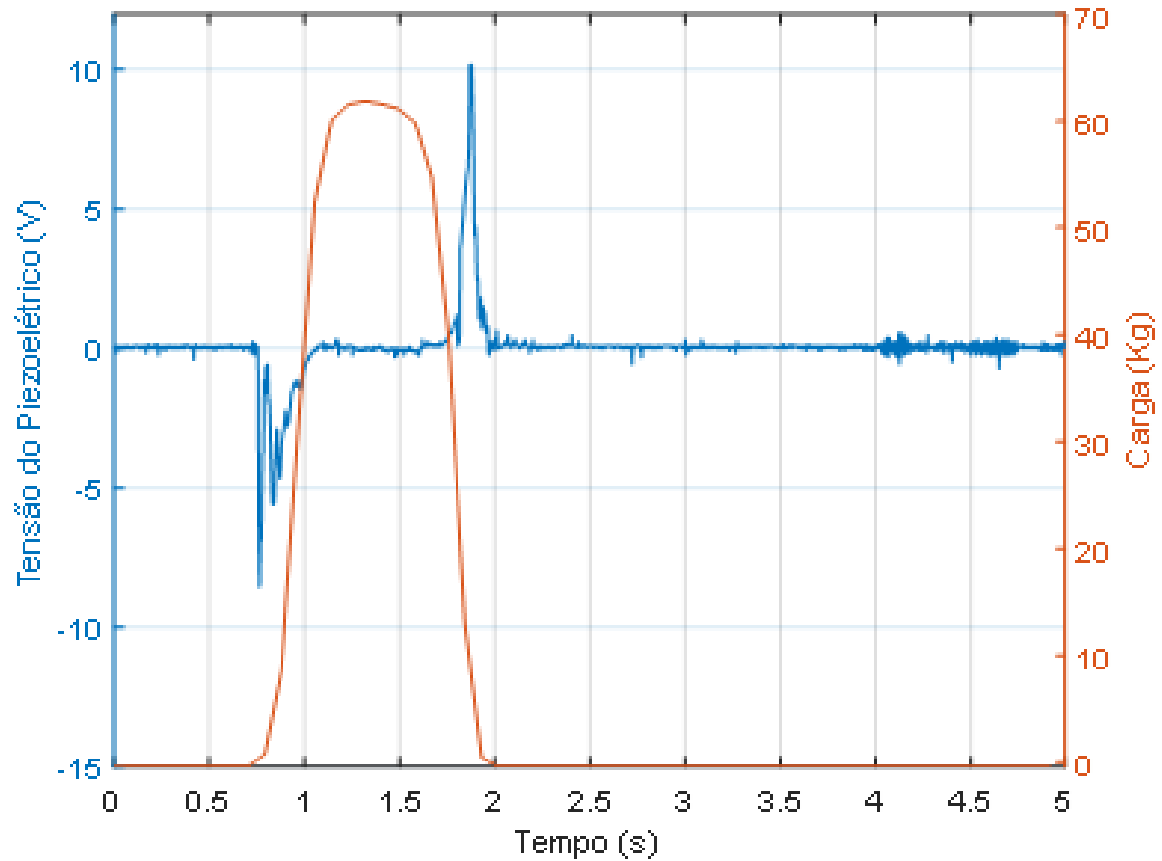
Figura 33 – Tensão gerada em laboratório utilizando quatro piezos em paralelo com carga.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Observa-se, pela Figura 34, a deformação de tensão x carga, simulando uma pessoa subindo e descendo no protótipo apenas uma vez, nesse caso, com dois piezos em série com carga de $1M\Omega$.

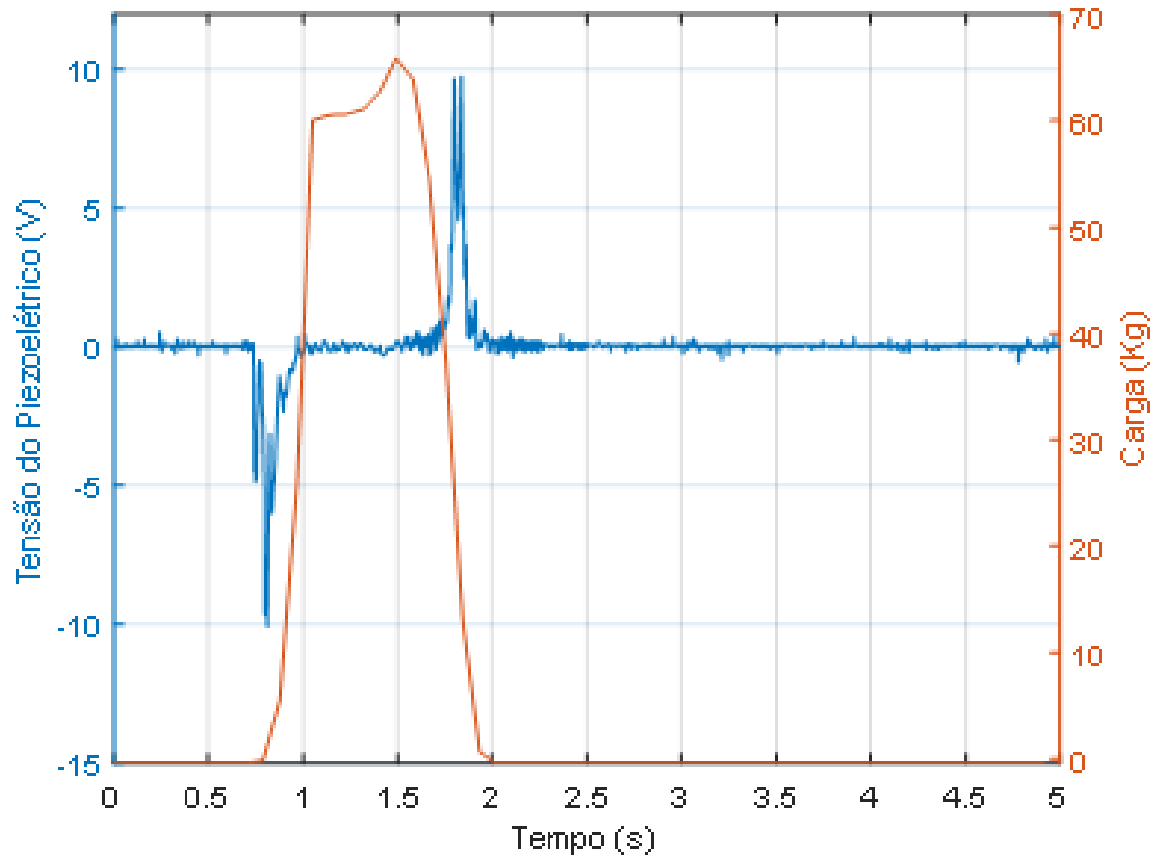
Figura 34 – Tensão gerada em laboratório utilizando dois piezos em série com carga.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Observa-se, pela Figura 35, a deformação de tensão x carga, simulando uma pessoa subindo e descendo no protótipo apenas uma vez, nesse caso, com três piezos em série com carga de $1M\Omega$.

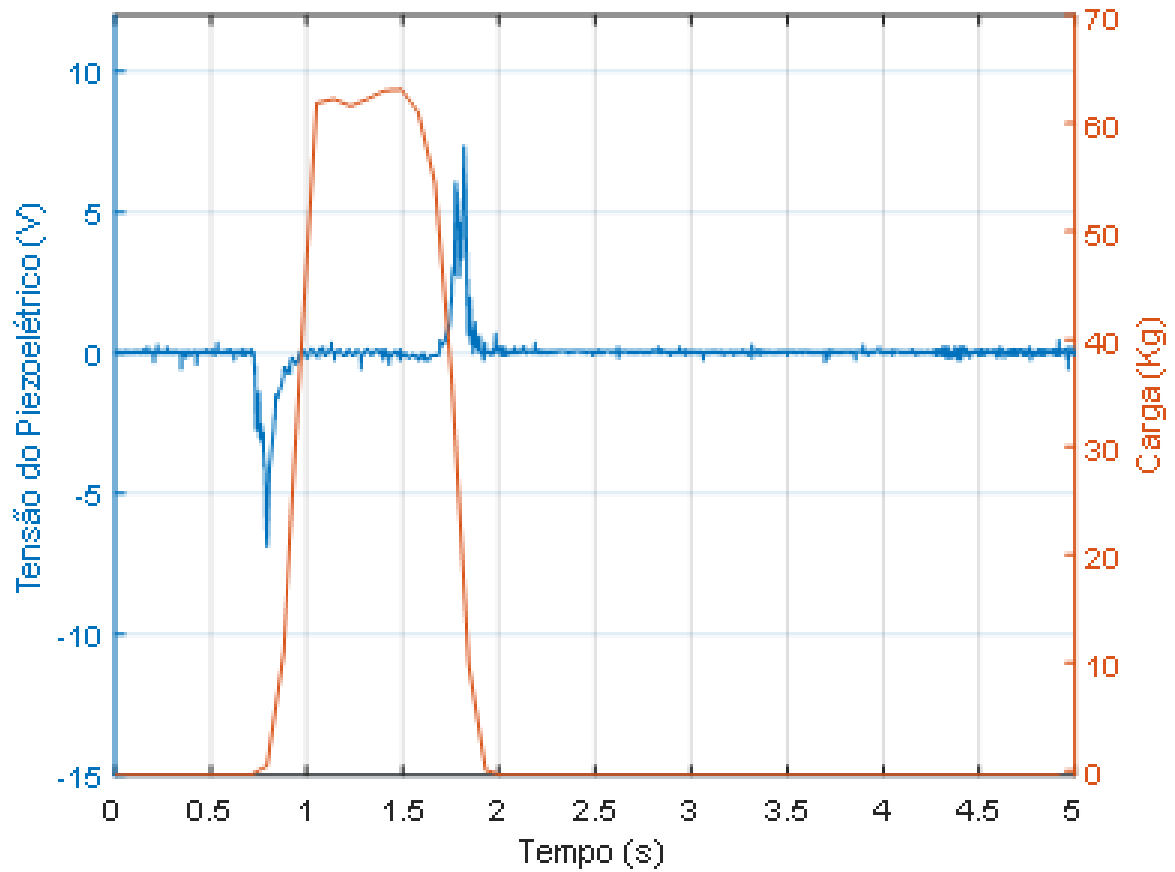
Figura 35 – Tensão gerada em laboratório utilizando três piezos em série com carga.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Observa-se, pela Figura 36, a deformação de tensão x carga, simulando uma pessoa subindo e descendo no protótipo apenas uma vez, nesse caso, com quatro piezos em série com carga de $1M\Omega$.

Figura 36 – Tensão gerada em laboratório utilizando quatro piezos em série com carga.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A Tabela 3 apresenta os valores de energia obtidos em todas as configurações do experimento.

Tabela 3 – Valores de energia em Joules.

Configuração	Energia (J)
Um piezo	6.9379×10^{-6}
Dois piezos em paralelo	8.8527×10^{-7}
Três piezos em paralelo	2.0242×10^{-6}
Quatro piezos em paralelo	7.3717×10^{-7}
Dois piezos em série	6.7891×10^{-6}
Três piezos em série	6.5559×10^{-6}
Quatro piezos em série	3.4297×10^{-6}

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A Figura 37 apresenta o código no Matlab utilizado para obtenção da energia em cada caso.

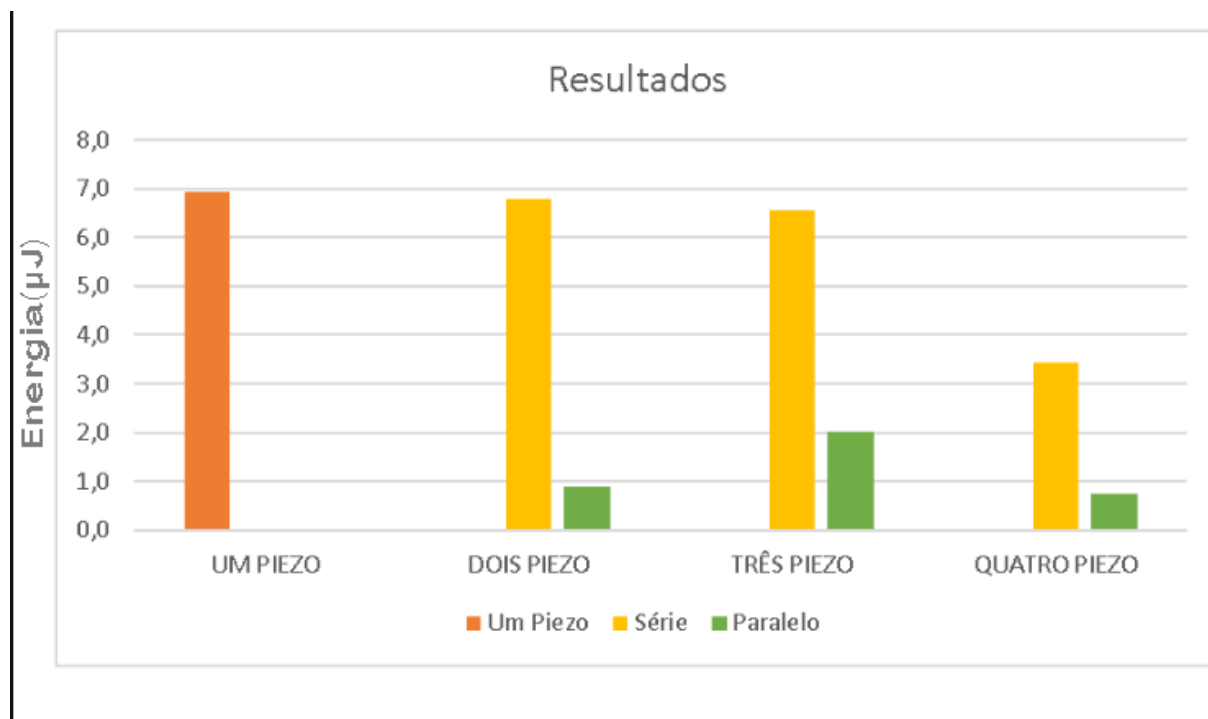
Figura 37 – Código no Matlab para energia.

```
%% Cálculo da energia
clear
clc
load('piezo_2_s_carga.mat')
R = 1e6;
Ts = 0.002;
p = piezo.^2/R; % Potência Instantânea
E = sum(p(1:end-1)+p(2:end))*Ts/2; % Energia Gerada
```

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A Figura 38 apresenta de maneira gráfica os resultados de energia obtidos através das configurações propostas durante o experimento.

Figura 38 – Gráfico de energia.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

6 CONCLUSÃO

Neste capítulo, serão destacadas as principais contribuições deste estudo, juntamente com as principais descobertas derivadas da análise dos resultados e sua correlação com as pesquisas discutidas na revisão bibliográfica. Além disso, dado que o tema está em fase inicial de desenvolvimento no contexto brasileiro, serão oferecidas recomendações para investigações futuras.

6.1 Principais realizações

A principal contribuição deste estudo reside na análise comparativa entre ensaios laboratoriais e simulações computacionais relacionadas à captação e geração de energia por meio da piezoeletricidade no pavimento rodoviário. Durante esses ensaios, foram registradas potências elétricas resultantes da aplicação de diferentes arranjos de células piezoelétricas. Os resultados indicaram que a resposta elétrica do protótipo é diretamente influenciada por fatores como tensão mecânica, frequência, arranjo e quantidade de células piezoelétricas, como pode ser observado ao comparar os resultados disponíveis na Tabela 3, ao variar a disposição e quantidade de pastilhas piezoelétricas, é notável a variação da energia obtida. Além disso, por meio da simulação da aplicação do protótipo, foi possível estimar a geração de energia elétrica de um passo, desse modo, é possível a extrapolação do experimento para estimar a quantidade de energia gerada a partir de vários passos ou outras cargas, como a passagem de carros em rodovias. A partir da etapa inicial (simulações), observou-se que a potência elétrica aumenta com o incremento da carga mecânica e da frequência aplicadas, demonstrando um crescimento de natureza exponencial. De maneira similar, a tensão elétrica também aumenta, porém, sua curva não apresenta uma tendência linear.

No que diz respeito à quantidade de células, na fase inicial, observou-se que tanto a potência quanto a tensão elétrica diminuem à medida que o número de elementos piezoelétricos aumenta. Isso ocorre pois não existe no experimento nenhum sistema de retificação acoplado às pastilhas, resultando em uma redução na voltagem e, por conseguinte, na potência elétrica. A resistência elétrica teve um impacto significativo na tensão elétrica das células, com uma diminuição notável ocorrendo quando a resistência elétrica foi reduzida de resistência de circuito aberto para a resistência com carga de $1M\Omega$.

Os resultados obtidos a partir dos experimentos realizados em laboratório indicam que o protótipo piezoelétrico demonstrará eficácia e eficiência em cenários nos quais temos apenas uma deformação mecânica. Além disso, ao ajustar a resistência elétrica, é viável obter valores otimizados de potência para diversas situações de aplicação de carga.

No entanto, essa aplicação demanda mais estudos e, por meio de investimentos destinados à redução dos custos de materiais, poderia ser considerada como uma alternativa viável para a complementação da matriz elétrica do Brasil, possibilitando a entrega de energia em todo o território do país.

6.2 Principais descobertas

As principais conclusões do estudo derivam das análises realizadas durante análises computacionais e ensaios laboratoriais, focalizando as propriedades de:

- carga mecânica
- frequência
- resistência elétrica
- quantidade de elementos piezoelétricos
- espaçamento das células no protótipo.

Portanto, as observações resultantes da avaliação dos dados são descritas de acordo com as etapas metodológicas.

6.3 Trabalhos Futuros

Devido a ser um tema recente de pesquisa no Brasil, ainda há muito a ser investigado em nível computacional, laboratorial e, principalmente, em campo. Destacam-se algumas sugestões para trabalhos futuros:

- a) simulação computacional e laboratorial da variação da carga para influência da geração;
- b) verificação da influência da temperatura da mistura asfáltica em nível laboratorial e em campo;
- c) elaboração de modelos matemáticos com o auxílio de ferramentas computacionais para a obtenção da potência elétrica;
- d) mudança de material piezoelétrico e fabricação de elemento otimizado para maximizar a resistência mecânica e diminuir o risco de fraturamento do mesmo;
- e) construção de um trecho experimental para teste das variáveis simuladas computacionalmente e laboratorialmente, verificando se há correlação entre os resultados das distintas etapas;
- f) teste com circuito retificador de tensão associado para mensurar a energia extraída com a otimização do circuito de colheita energética.

REFERÊNCIAS

- ABDULLAH, A. M. *et al.* Piezoelectric materials for clean energy harvesting: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 114–129, 2018. Citado na página 15.
- ASSOCIATION, W. N. **The World Nuclear Industry Status Report 2020**. Londres, Reino Unido: [s.n.], 2020. Citado na página 19.
- BABU, S.; KAMARAJ, P.; BALASUBRAMANIAN, V. Piezoelectric energy harvesting for road traffic applications: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 89, p. 88–97, Jul 2018. Citado na página 13.
- CODEMGE. **Piezoeletricidade é usada para gerar energia elétrica em rodovia em MG**. 2017. Disponível em: <<https://www.codemge.com.br/noticias/piezoeletricidade-e-usada-para-gerar-energia-eletrica-em-rodovia-em-mg>>. Citado na página 17.
- CUI, J.; LI, H.; WEI, X.; LIU, Z.; LI, Y. A review on piezoelectric energy harvesting from pavement. **Journal of Cleaner Production**, v. 276, p. 124–149, 2020. Citado na página 15.
- DELOITTE. **Global Renewable Energy Trends**. 2020. Citado na página 19.
- DIAS, A.; MENEZES, E. **Fenômenos de Transporte: Fundamentos e Aplicações**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018. Citado na página 20.
- DIAS, L. A. S. *et al.* Energia piezoelétrica: Uma revisão sistemática. In: UFPR. **Anais da 5ª Semana de Energia da UFPR**. Curitiba, 2019. p. 38–39. Citado na página 20.
- ENERGIA), A. A. I. de. **World Energy Outlook 2020**. Paris, França: IEA, 2020. Citado na página 19.
- ENERGIA, M. de Minas e. **Balanco Energético Nacional 2022**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2022. Citado na página 18.
- ERTURK, A.; INMAN, D. J. **Piezoelectric Energy Harvesting**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. Citado na página 15.
- FERREIRA, R. G.; SILVA, E. M. Piezoelectric energy harvesting from pedestrian-induced vibrations: A review. **Energy Conversion and Management**, v. 112, p. 174–188, 2016. Citado na página 21.
- FERREIRA, S. S.; SILVA, D. M. Materiais piezoelétricos na geração de energia limpa. **CEUMA, Imperatriz**, v. 7, n. 1, 2016. Citado na página 14.
- FEYNMAN, R. P. **There's Plenty of Room at the Bottom**. 5. ed. [S.l.]: Engineering and Science, 1959. Citado na página 11.
- GARG, A.; BHATTACHARYA, A.; SAMANTA, A. Piezoelectric energy harvesting from road pavements: A modeling and experimental investigation. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 66, n. 4, p. 2967–2976, 2019. Citado na página 22.
- GODOY, T. C.; ERHART, M. A.; DEU, J. F. Topological optimization of piezoelectric energy harvesting devices for improved electromechanical efficiency and frequency range. In: **World Congress on Computational Mechanics**. São Paulo: [s.n.], 2012. Citado na página 21.

GONZÁLEZ, J. A. *et al.* Piezoelectric materials in transport infrastructure: a state-of-the-art review. **Smart Materials and Structures**, v. 26, n. 11, p. 1–24, 2017. Citado na página 21.

IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas). **Special Report on Global Warming of 1.5°C**. Genebra, Suíça: [s.n.], 2018. Citado na página 19.

JOURNAL, C. **Diagrama do circuito do sensor de carga de 50 kg com HX711**. 2023. Disponível em: <https://circuitjournal.com/img/articles/10_50kg_load_cell/HX711_4x50kg_load_cell_diagram.webp?v=19>. Citado na página 27.

KASAP, S. O. **Principles of Electronic Materials and Devices**. 3rd. ed. New York: McGraw-Hill, 2006. 866 p. Citado na página 20.

KIM, J. H.; LEE, H. K.; KIM, J. Piezoelectric energy harvesting: Fundamentals, materials, devices, and applications. **Progress in Materials Science**, v. 100, p. 33–83, 2019. Citado na página 16.

KUMAR, P. *et al.* Piezoelectric energy harvesting for sustainable transportation infrastructure. In: LEE, J. (Ed.). **Handbook of clean energy systems**. [S.l.]: John Wiley Sons, 2021. p. 143–159. Citado na página 17.

LI, C. *et al.* Piezoelectric energy harvesting for sustainable transportation: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 137, p. 1–17, 2021. Citado na página 16.

LI, Y.; ZHANG, T.; HUANG, Y.; CAO, J. The feasibility analysis of piezoelectric energy harvesting for pavement. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1065, n. 2, 2018. Citado na página 15.

MARZBAND, M. *et al.* A review of energy harvesting from roads. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, p. 1–14, 2019. Citado na página 21.

MIAJA-AVILA, L.; CROOKER, S. A.; FURIS, M. **Handbook of Spintronics**. [S.l.]: CRC Press, 2020. Citado na página 15.

PATSKO, L. F. **Tutorial: Aplicações, Funcionamento e utilização de sensores**. Paraná: Maxwell Bohr, 2006. 83 p. Citado na página 19.

REED, J. S. **Introduction to the Principles of Ceramic Processing**. New York: John Wiley and Sons, 1986. Citado na página 11.

SEMICONDUCTOR, A. **HX711 Datasheet**. 2008. Disponível em: <<https://www.digikey.com/htmldatasheets/production/1836471/0/0/1/hx711.html>>. Citado na página 28.

SINGH, S.; SHARMA, A.; YADAV, N.; KAUR, M. Energy harvesting using piezoelectric materials on roadways. **International Journal of Engineering Research Technology**, v. 6, n. 8, p. 207–213, 2017. Citado na página 22.

TICHÝ, J.; ERHART, J.; KITTINGER, E.; PRÍVRATSKÁ, J. **Fundamentals of Piezoelectric Sensorics: Mechanical, Dielectric, and Thermodynamical Properties of Piezoelectric Materials**. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. 205 p. ISBN ISBN. Citado na página 21.

UCHINO, K. Piezoelectric materials for energy harvesting. **Journal of Electroceramics**, v. 40, n. 1-3, p. 73–78, Dec 2018. Citado na página 13.

UFMG. **Projeto piloto testa sistema que capta energia de veículos em movimento**. 2017. Disponível em: <<https://www.ufmg.br/online/arquivos/049354.shtml>>. Citado na página 17.

WANG. Performance evaluation of piezoelectric energy harvesters for powering led lighting on highways. **International Journal of Energy Research**, v. 44, n. 1, p. 68–78, January 2020. Citado na página 13.

WANG, K.; MA, L.; XIE, L.; ZHANG, Z. Field test and analysis of a piezoelectric energy harvesting system on a california freeway. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 29, n. 16, p. 3227–3236, 2018. Citado na página 16.

WANG, X. *et al.* Piezoelectric energy harvesting for sustainable transportation infrastructure: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 109, p. 1–14, 2019. Citado na página 16.

WANG, X.; SONG, J.; LIU, J.; WANG, Z. L. Direct-current nanogenerator driven by ultrasonic waves. **Science**, v. 316, n. 5821, p. 102–105, 2007. Citado na página 12.

WANG, Y. *et al.* Barium titanate-based ceramics for piezoelectric energy harvesting. In: LU, J. *et al.* (Ed.). **Piezoelectric Energy Harvesting**. Singapore: Springer, 2019. p. 191–215. Citado na página 29.

YOKOYAMA, S.; TAKEDA, H.; OHNUKI, S. A new method of measuring piezoelectric coefficient using a piezoelectric reference material. **Japanese Journal of Applied Physics**, 2018. Citado na página 15.

ZHAO, X. *et al.* Application of piezoelectric energy harvesting technology in smart cities: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 271, p. 1–14, 2020. Citado na página 18.

APÊNDICE A – CÓDIGO DO EXPERIMENTO NO MATLAB

```
function Celula_Carga_GUI
% Projeto TCC - IFMG Campus Ipatinga
% Professor: Felipe Antunes
% Alunos: Jorge Cimini e Letícia Corrêa
%% Interface Gráfica
% Cria a figura
f = figure('Name','Medidas - Célula de Carga',...
    'DeleteFcn',@Fechar);
% Cria o espaço do gráfico
G_cell = axes(f);
%% Abrindo comunicação serial
s = serial('COM11');
s.BytesAvailableFcnCount = 4;
s.BytesAvailableFcnMode = 'byte';

% Cria um objeto de porta serial associado à porta serial COM 10
% Quantidade de bytes recebidos para acionar a Callback
% Evento gerado quando a quantidade de bytes estiver disponível no buffer.

s.BytesAvailableFcn = @Leitura_Callback;
% Callback aciona após o evento de bytes disponíveis
fopen(s); % Abre a comunicação serial
%% Variáveis
DADOS = nan(10000,1);
L = 100;
t = (0:L-1)/10;
ct = 1;
% Variável que armazenará os as leituras feitas da célula de carga
% Quantidade máxima de amostras exibida no gráfico
% Vetor de tempo (Frequência de amostragem = 10Hz)
% Contador de amostras coletadas
a = 4.307530941180214e-05;
b = -11.331015850057121;
%% Inicializando o gráfico
p1 = plot(G_cell,t,DADOS(1:L,1));
grid(G_cell,'on')
xlim(G_cell,[0 t(end)])
```

```
ylabel(G_cell,'Célula de Carga')
xlabel(G_cell,'Tempo (s)')
%% Funções
% Função acionada a cada 4 bytes recebidos da porta serial
function Leitura_Callback(hObject, eventdata, handles)
    % Leitura de dados do arduino
    DADOS(ct,1) = fread(s,1,'long');
    % Atualiza os dados do gráfico
    if ct<=L
        p1.YData = a*DADOS(1:L,1)+b;
    else
        p1.YData = a*DADOS(ct-(L-1):ct,1)+b;
    end
    ct = ct + 1;
end
% Função acionada ao clicar no botão de fechar da figura
function Fechar(hObject, eventdata, handles)
    assignin('base','DADOS',DADOS(~isnan(DADOS(:,1)),:))
    % Envia os dados coletados para o Workspace
    delete(f); % Fecha a figura
    fclose(s); % Fecha a comunicação serial
end
end
```

APÊNDICE B – CÓDIGO DO EXPERIMENTO NO ARDUINO

```

/*
Projeto TCC - IFMG Campus Ipatinga
Professor: Felipe Antunes
Alunos: Jorge Cimini e Letícia Corrêa
*/

#include "HX711.h"    // Biblioteca HX711
#define DOUT  2      // HX711 DATA OUT = pino 2 do Arduino
#define CLK   3      // HX711 SCK IN = pino 3 do Arduino
HX711 balanca;      // define instancia balança HX711

// Configuração do TIMER2
// Período = count * (256 - tcnt2) * prescaler * ciclo de máquina
// ciclo de máquina = 1/Fosc = 1/16e6 = 62.5ns
// prescaler configurado em 1024
int count = 13;
int tcnt2 = 135;
int N = 1;
// Período = 13 * (256 - 135) * 1024 * 62.5e-9 = 0.1007
// Frequência de amostragem = 9.9332 Hz

long leitura = 0;
byte enviar[sizeof(long)];
int qa = 57;
int ct = 0;
// Variável que recebe o valor da célula de carga
// Vetor para transmitir a leitura da célula de carga pela porta serial
// Quantidade de amostras enviadas a cada trigger
// Contador de amostras
// Rotina de Interrupção
ISR(TIMER2_OVF_vect)
{
    TCNT2 = tcnt2; // Reinicializa o registrador do TIMER2
    N++;
    if (N >= count)
    {
        N = 1;
        leitura = balanca.read();
        for(int i = 0; i < sizeof(long); i++){

```

```
// Leitura da célula de carga
// Atribui os bytes da leitura ao vetor enviar
    enviar[i] = leitura >> i*8 & 0xFF;
}
Serial.write(enviar,sizeof(long));
// Envia a leitura pela porta serial
ct++;
}
}

void setup()
{
    Serial.begin(9600);
    pinMode(8,INPUT);          // Configura o pino 8 como entrada
    pinMode(13,OUTPUT);        // Configura o pino 13 como saída
    balanca.begin(DOUT, CLK);  // inicializa a balança
    TCCR2A = 0x00; // Timer operando em modo normal
    TCCR2B = 0x07; // Prescale 1:1024
    TCNT2 = tcnt2; // Contador (256-TCNT2)
    TIMSK2 = 0x00; // Desabilita interrupção do TIMER2
}

void loop(){

    if(digitalRead(8)){
        digitalWrite(13,HIGH);
        TIMSK2 = 0x01;
        // Trigger - Nível alto no pino 8
        // Coloca pino 13 em nível alto - Serve de trigger para o osciloscópio
        // Habilita interrupção do TIMER2
    }
    if(ct >= qa){          // Identifica que foi enviado qa amostras
        TIMSK2 = 0x00;    // Desabilita interrupção do TIMER2
        digitalWrite(13,LOW); // Coloca pino 13 em nível baixo
        ct = 0;
    }
}
```

ANEXOS

ANEXO A – FOLHA DE DADOS HX711

24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales

DESCRIPTION

Based on Avia Semiconductor's patented technology, HX711 is a precision 24-bit analog-to-digital converter (ADC) designed for weigh scales and industrial control applications to interface directly with a bridge sensor.

The input multiplexer selects either Channel A or B differential input to the low-noise programmable gain amplifier (PGA). Channel A can be programmed with a gain of 128 or 64, corresponding to a full-scale differential input voltage of $\pm 20\text{mV}$ or $\pm 40\text{mV}$ respectively, when a 5V supply is connected to AVDD analog power supply pin. Channel B has a fixed gain of 32. On-chip power supply regulator eliminates the need for an external supply regulator to provide analog power for the ADC and the sensor. Clock input is flexible. It can be from an external clock source, a crystal, or the on-chip oscillator that does not require any external component. On-chip power-on-reset circuitry simplifies digital interface initialization.

There is no programming needed for the internal registers. All controls to the HX711 are through the pins.

FEATURES

- Two selectable differential input channels
- On-chip active low noise PGA with selectable gain of 32, 64 and 128
- On-chip power supply regulator for load-cell and ADC analog power supply
- On-chip oscillator requiring no external component with optional external crystal
- On-chip power-on-reset
- Simple digital control and serial interface: pin-driven controls, no programming needed
- Selectable 10SPS or 80SPS output data rate
- Simultaneous 50 and 60Hz supply rejection
- Current consumption including on-chip analog power supply regulator:
 - normal operation $< 1.5\text{mA}$, power down $< 1\mu\text{A}$
- Operation supply voltage range: $2.6 \sim 5.5\text{V}$
- Operation temperature range: $-40 \sim +85^\circ\text{C}$
- 16 pin SOP-16 package

APPLICATIONS

- Weigh Scales
- Industrial Process Control

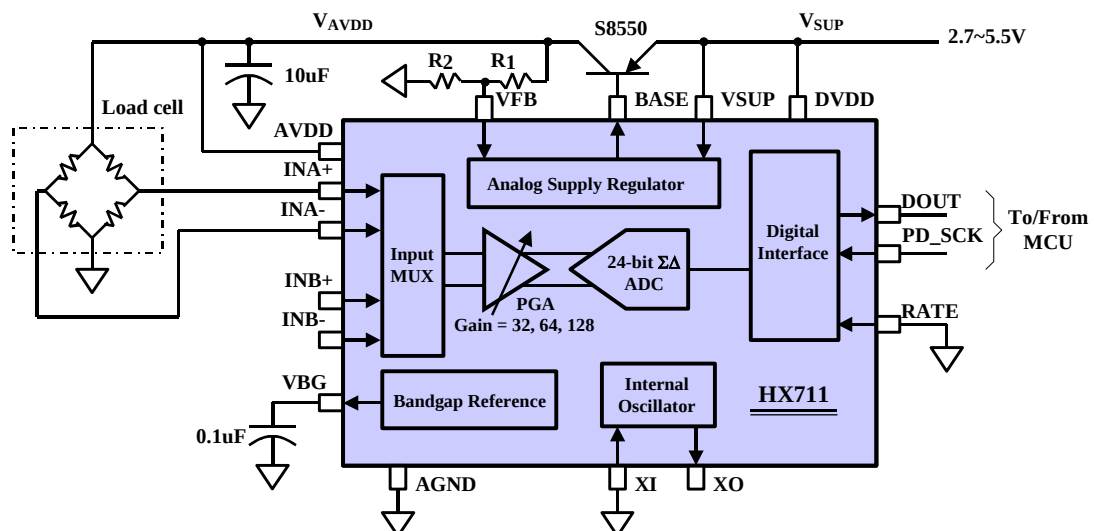


Fig. 1 Typical weigh scale application block diagram

Pin Description

Regulator Power	VSUP	1	16	DVDD	Digital Power
Regulator Control Output	BASE	2	15	RATE	Output Data Rate Control Input
Analog Power	AVDD	3	14	XI	Crystal I/O and External Clock Input
Regulator Control Input	VFB	4	13	XO	Crystal I/O
Analog Ground	AGND	5	12	DOUT	Serial Data Output
Reference Bypass	VBG	6	11	PD_SCK	Power Down and Serial Clock Input
Ch. A Negative Input	INNA	7	10	INPB	Ch. B Positive Input
Ch. A Positive Input	INPA	8	9	INNBNB	Ch. B Negative Input

SOP-16L Package

Pin #	Name	Function	Description
1	VSUP	Power	Regulator supply: 2.7 ~ 5.5V
2	BASE	Analog Output	Regulator control output (NC when not used)
3	AVDD	Power	Analog supply: 2.6 ~ 5.5V
4	VFB	Analog Input	Regulator control input (connect to AGND when not used)
5	AGND	Ground	Analog Ground
6	VBG	Analog Output	Reference bypass output
7	INA-	Analog Input	Channel A negative input
8	INA+	Analog Input	Channel A positive input
9	INB-	Analog Input	Channel B negative input
10	INB+	Analog Input	Channel B positive input
11	PD_SCK	Digital Input	Power down control (high active) and serial clock input
12	DOUT	Digital Output	Serial data output
13	XO	Digital I/O	Crystal I/O (NC when not used)
14	XI	Digital Input	Crystal I/O or external clock input, 0: use on-chip oscillator
15	RATE	Digital Input	Output data rate control, 0: 10Hz; 1: 80Hz
16	DVDD	Power	Digital supply: 2.6 ~ 5.5V

Table 1 Pin Description

KEY ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Parameter	Notes	MIN	TYP	MAX	UNIT
Full scale differential input range	$V(\text{inp})-V(\text{inn})$	$\pm 0.5(\text{AVDD}/\text{GAIN})$			V
Common mode input		AGND+1.2		AVDD-1.3	V
Output data rate	Internal Oscillator, RATE = 0		10		Hz
	Internal Oscillator, RATE = DVDD		80		
	Crystal or external clock, RATE = 0		$f_{\text{clk}}/1,105,920$		
	Crystal or external clock, RATE = DVDD		$f_{\text{clk}}/138,240$		
Output data coding	2's complement	800000		7FFFFFFF	HEX
Output settling time ⁽¹⁾	RATE = 0		400		ms
	RATE = DVDD		50		
Input offset drift	Gain = 128		0.2		mV
	Gain = 64		0.4		
Input noise	Gain = 128, RATE = 0		50		nV(rms)
	Gain = 128, RATE = DVDD		90		
Temperature drift	Input offset (Gain = 128)		± 6		nV/°C
	Gain (Gain = 128)		± 5		ppm/°C
Input common mode rejection	Gain = 128, RATE = 0		100		dB
Power supply rejection	Gain = 128, RATE = 0		100		dB
Reference bypass (V_{BG})			1.25		V
Crystal or external clock frequency		1	11.0592	20	MHz
Power supply voltage	DVDD	2.6		5.5	V
	AVDD, VSUP	2.6		5.5	
Analog supply current (including regulator)	Normal		1400		μA
	Power down		0.3		
Digital supply current	Normal		100		μA
	Power down		0.2		

(1) Settling time refers to the time from power up, reset, input channel change and gain change to valid stable output data.

Table 2 Key Electrical Characteristics

Analog Inputs

Channel A differential input is designed to interface directly with a bridge sensor's differential output. It can be programmed with a gain of 128 or 64. The large gains are needed to accommodate the small output signal from the sensor. When 5V supply is used at the AVDD pin, these gains correspond to a full-scale differential input voltage of $\pm 20\text{mV}$ or $\pm 40\text{mV}$ respectively.

Channel B differential input has a fixed gain of 32. The full-scale input voltage range is $\pm 80\text{mV}$, when 5V supply is used at the AVDD pin.

Power Supply Options

Digital power supply (DVDD) should be the same power supply as the MCU power supply.

When using internal analog supply regulator, the dropout voltage of the regulator depends on the external transistor used. The output voltage is equal to $V_{AVDD} = V_{BG} * (R1 + R2) / R1$ (Fig. 1). This voltage should be designed with a minimum of 100mV below VSUP voltage.

If the on-chip analog supply regulator is not used, the VSUP pin should be connected to either AVDD or DVDD, depending on which voltage is higher. Pin VFB should be connected to Ground and pin BASE becomes NC. The external 0.1uF bypass capacitor shown on Fig. 1 at the VBG output pin is then not needed.

Clock Source Options

By connecting pin XI to Ground, the on-chip oscillator is activated. The nominal output data rate when using the internal oscillator is 10 (RATE=0) or 80SPS (RATE=1).

If accurate output data rate is needed, crystal or external reference clock can be used. A crystal can be directly connected across XI and XO pins. An external clock can be connected to XI pin, through a 20pF ac coupled capacitor. This external clock is not required to be a square wave. It can come directly from the crystal output pin of the MCU chip, with amplitude as low as 150 mV.

When using a crystal or an external clock, the internal oscillator is automatically powered down.

Output Data Rate and Format

When using the on-chip oscillator, output data rate is typically 10 (RATE=0) or 80SPS (RATE=1).

When using external clock or crystal, output data rate is directly proportional to the clock or crystal frequency. Using 11.0592MHz clock or crystal results in an accurate 10 (RATE=0) or 80SPS (RATE=1) output data rate.

The output 24 bits of data is in 2's complement format. When input differential signal goes out of the 24 bit range, the output data will be saturated at 800000h (MIN) or 7FFFFFFh (MAX), until the input signal comes back to the input range.

Serial Interface

Pin PD_SCK and DOUT are used for data retrieval, input selection, gain selection and power down controls.

When output data is not ready for retrieval, digital output pin DOUT is high. Serial clock input PD_SCK should be low. When DOUT goes to low, it indicates data is ready for retrieval. By applying 25~27 positive clock pulses at the PD_SCK pin, data is shifted out from the DOUT output pin. Each PD_SCK pulse shifts out one bit, starting with the MSB bit first, until all 24 bits are shifted out. The 25th pulse at PD_SCK input will pull DOUT pin back to high (Fig.2).

Input and gain selection is controlled by the number of the input PD_SCK pulses (Table 3). PD_SCK clock pulses should not be less than 25 or more than 27 within one conversion period, to avoid causing serial communication error.

PD_SCK Pulses	Input channel	Gain
25	A	128
26	B	32
27	A	64

Table 3 Input Channel and Gain Selection

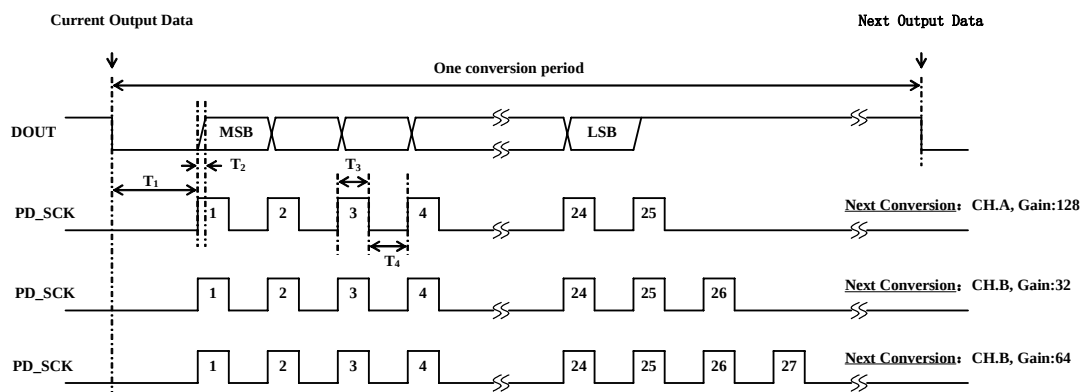


Fig.2 Data output, input and gain selection timing and control

Symbol	Note	MIN	TYP	MAX	Unit
T ₁	DOUT falling edge to PD_SCK rising edge	0.1			μs
T ₂	PD_SCK rising edge to DOUT data ready			0.1	μs
T ₃	PD_SCK high time	0.2	1	50	μs
T ₄	PD_SCK low time	0.2	1		μs

Reset and Power-Down

When chip is powered up, on-chip power on rest circuitry will reset the chip.

Pin PD_SCK input is used to power down the HX711. When PD_SCK Input is low, chip is in normal working mode.

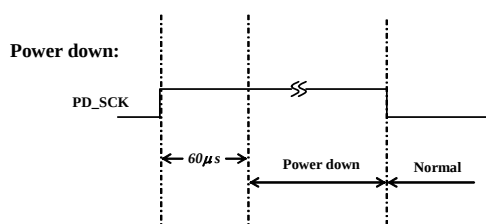


Fig.3 Power down control

When PD_SCK pin changes from low to high and stays at high for longer than 60μs, HX711 enters power down mode (Fig.3). When internal regulator is used for HX711 and the external transducer, both HX711 and the transducer will be

powered down. When PD_SCK returns to low, chip will reset and enter normal operation mode.

After a reset or power-down event, input selection is default to Channel A with a gain of 128.

Application Example

Fig.1 is a typical weigh scale application using HX711. It uses on-chip oscillator (XI=0), 10Hz output data rate (RATE=0). A Single power supply (2.7~5.5V) comes directly from MCU power supply. Channel B can be used for battery level detection. The related circuitry is not shown on Fig. 1.

Reference PCB Board (Single Layer)

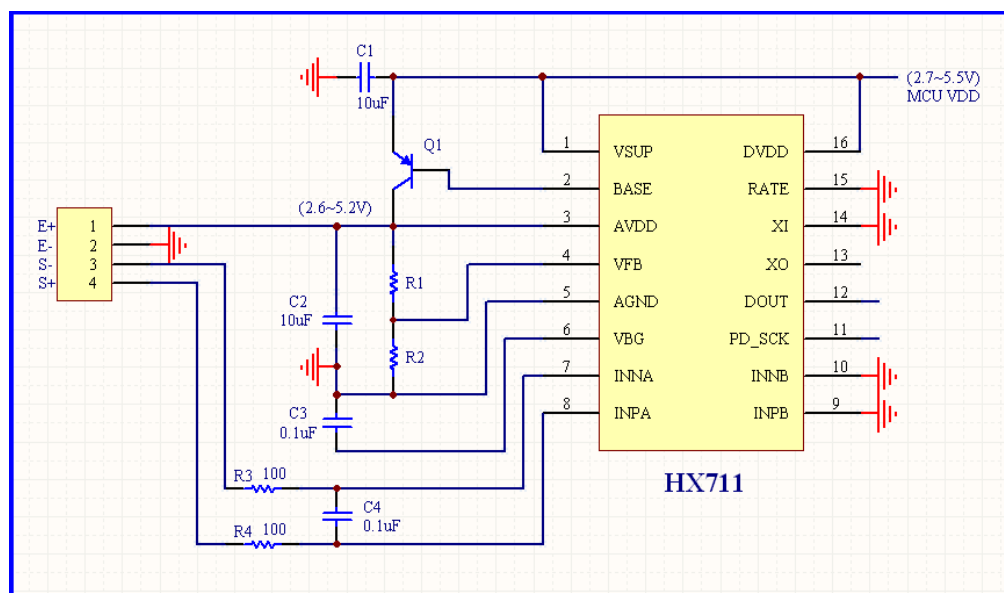


Fig.4 Reference PCB board schematic

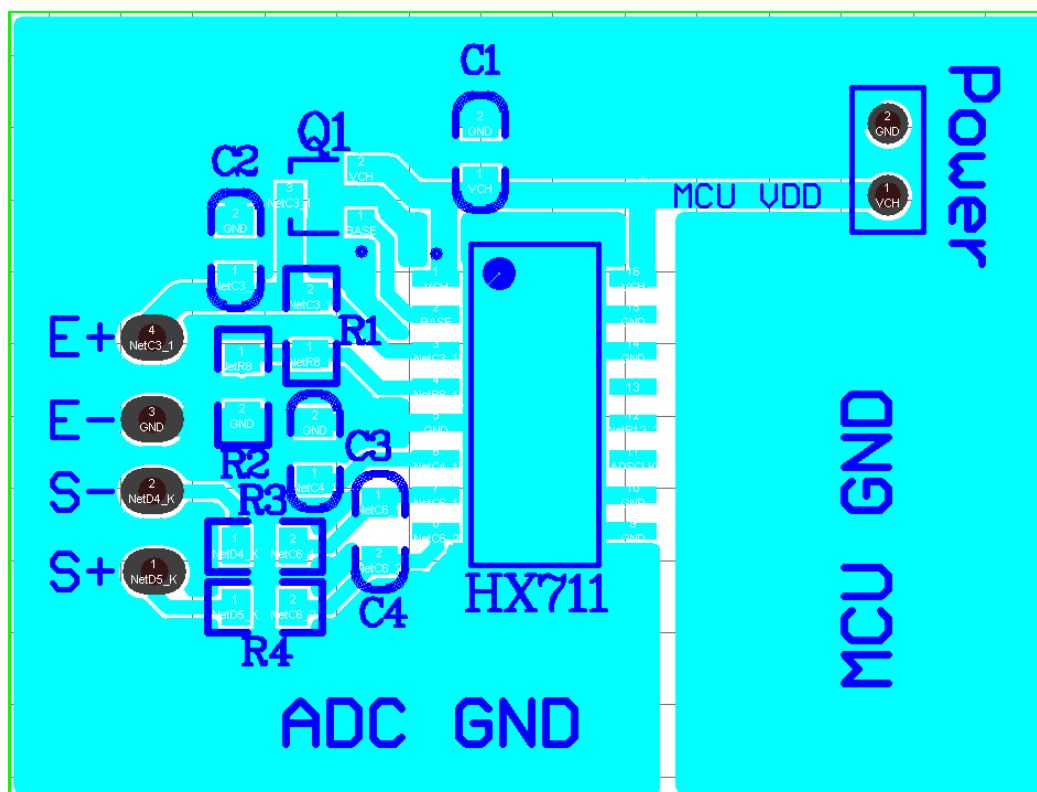


Fig.5 Reference PCB board layout

Reference Driver (Assembly)

```

/*-----
Call from ASM:      LCALL   ReaAD
Call from C:      extern unsigned long ReadAD(void);
                    .
                    .
                    unsigned long data;
                    data=ReadAD();
                    .
                    .
-----*/

PUBLIC      ReadAD
HX711ROM    segment   code
rseg       HX711ROM

sbit       ADD0 = P1.5;
sbit       ADSK = P0.0;
/*-----
OUT:      R4, R5, R6, R7   R7=>LSB
-----*/

ReadAD:
    CLR     ADSK           //AD Enable (PD_SCK set low)
    SETB    ADD0          //Enable 51CPU I/O
    JB      ADD0,$         //AD conversion completed?
    MOV     R4,#24

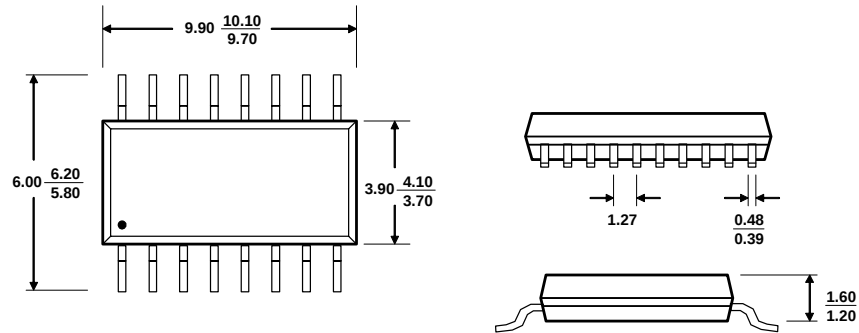
ShiftOut:
    SETB    ADSK           //PD_SCK set high (positive pulse)
    NOP
    CLR     ADSK           //PD_SCK set low
    MOV     C,ADD0         //read on bit
    XCH     A,R7           //move data
    RLC     A
    XCH     A,R7
    XCH     A,R6
    RLC     A
    XCH     A,R6
    XCH     A,R5
    RLC     A
    XCH     A,R5
    DJNZ    R4,ShiftOut    //moved 24BIT?
    SETB    ADSK
    NOP
    CLR     ADSK
    RET
    END

```

Reference Driver (C)

```
//-----  
sbit  ADD0 = P1^5;  
sbit  ADSK = P0^0;  
unsigned long ReadCount(void) {  
    unsigned long Count;  
    unsigned char i;  
    ADD0=1;  
    ADSK=0;  
    Count=0;  
    while(ADD0);  
    for (i=0;i<24;i++) {  
        ADSK=1;  
        Count=Count<<1;  
        ADSK=0;  
        if(ADD0) Count++;  
    }  
    ADSK=1;  
    Count=Count^0x800000;  
    ADSK=0;  
    return(Count);  
}
```

Package Dimensions



Typ MAX
 MIN

Unit: mm

SOP-16L Package

ANEXO B – FOLHA DE DADOS CÉLULA DE CARGA

Capacity	kg	40-50	
Comprehensive Error	mv/v	0.05	
Output Sensitivity	mv/v	1.0±0.1	
Nonlinearity	%FS	0.03	
Repeatability	%FS	0.03	
Hysteresis	%FS	0.03	
Creep	(3min)%FS	0.03	
Zero Drift	(1min)%FS	0.03	
Temp. Effect on Zero	%FS/10°C	1	
Temp. Effect on Output	%FS/10°C	0.05	
Zero Output	mV/V	±0.1	
Input Resistance	Ω	1000±20	
Output Resistance	Ω	1000±20	
Insulation Resistance	MΩ	≥5000	
Excitation Voltage	V	≤10	
Operation Temp. Range	°C	0--+50	
Overload Capacity	%FS	150	

ANEXO C – FOLHA DE DADOS TRANSDUTOR PIEZOELÉTRICO

Piezo Element

Customer	
Customer P/O	
BeStar Model Name	FT-35T-2.6A1
Product No.	161900
Issue No.	BS/TEY01.064A
Issue Date	04/01/16

Approval:

- 1.Technical Terms
- 2.Drawing
- 3.Characteristics



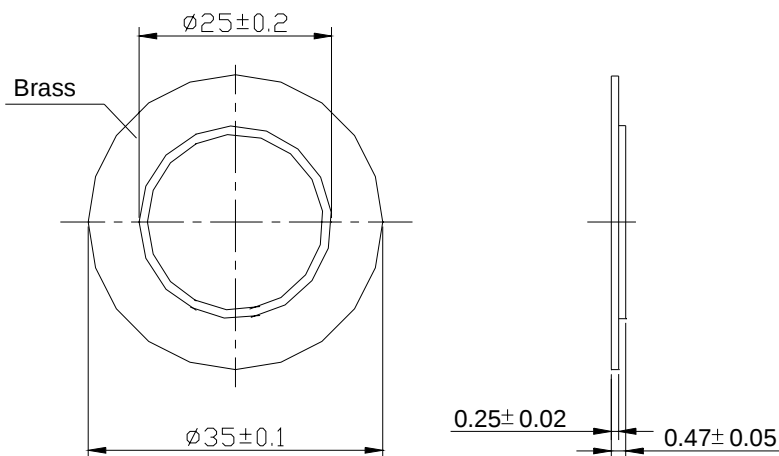
BESTAR ELECTRONICS INDUSTRY CO.,LTD
TianAn Industry Park4/F,Site B ChangZhou New District
Tel:86-519-5103228
Fax:86-519-5131010
Http:www.be-star.com
E-Mail:bestarco@pub.cz.jsinfo.net

FT-35T-2.6A1

1. Technical Terms:

No.	Item	Specification
1.	Resonant Frequency	2.6 ± 0.5 K Hz
2.	Resonant Impedance	200max ohm
3.	Capacitance	$33 \pm 30\%$ nF
4.	Input Voltage	Max. 30 Vp-p
5.	Operating Temperature	-20...+70° C
6.	Storage Temperature	-30...+80° C
7.	Metal Material	Brass

2. Drawing



DIS.		DATE		Page:1 of 2
CHEC.		DATE		3rd angle projection
APPR.		DATE		



BESTAR ELECTRONICS INDUSTRY CO.,LTD
TianAn Industry Park 4/F,Site B ChangZhou New District
E-Mail:bestarco@ pub.cz.jsinfo.net Http:www.be-star.com

FT-35T-2.6A1

Piezo Element

DRG NO
BS/TEY01.077A

FT-35T-2.6A1

3.Characteristics:

3.1 Solderability

300± 10° C Temperaure of Merited Solder,2± 0.5sec Duration of Dipping.

3.2 Lead pull off test

a) Wire to be soldered on ceramic at the edge. It should withstand minimum 1 kg force applied in 180°. The wire should not come out before this. The ceramic can be either glued on a surface of can be held in hand.(Fig.2)

b) Wire to be soldered on ceramic at the edage&should be pulled up at 90° The element should be hold on bottom and wire should be pulled up .It should withstand at least for 388g force(Fig.1)

3.3Bend Test

The element should be bend on to a pipe of 35mm diameter.The bend should be in only one direction. The length of pipeshould be at least 1.5 times the diameter of the brass.

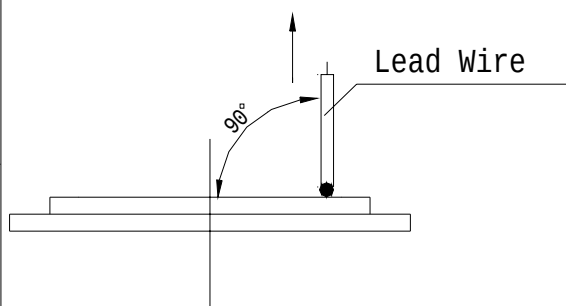


Fig.1 Direction of Lead Wire

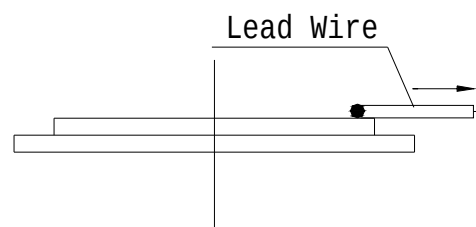


Fig.2 Direction of Lead Wire

DIS.		DATE		Page:2 of 2	FT-35T-2.6A1
CHEC.		DATE		3rd angle projection	
APPR.		DATE			Piezo Element
BESTAR ELECTRONICS INDUSTRY CO.,LTD TianAn Industry Park 4/F,Site B ChangZhou New District E-Mail:bestarco@ pub.cz.jsinfo.net Http:www.be-star.com					DRG NO BS/TEY01.064A