

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

Marcelo Polastri
Mateus Henrique Augusto Santos Sousa

**SISTEMA AUTOMÁTICO DE MEDIÇÃO DE FLUXO DE PESSOAS PARA
ANÁLISE DA VIABILIDADE DE GERAÇÃO DE ENERGIA PIEZOELÉTRICA**

Ipatinga
2025

**SISTEMA AUTOMÁTICO DE MEDIÇÃO DE FLUXO DE PESSOAS PARA
ANÁLISE DA VIABILIDADE DE GERAÇÃO DE ENERGIA PIEZOELÉTRICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso Bacharelado em Engenharia Elétrica do
Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus*
Ipatinga para obtenção do grau de bacharel em
Engenharia Elétrica.

Orientador: Felipe Antunes

Ipatinga

2025

P762s Polastri, Marcelo; Sousa, Mateus Henrique Augusto Santos.

Sistema automático de medição de fluxo de pessoas para análise da viabilidade de geração de energia piezoelétrica. Marcelo Polastri; Mateus Henrique Augusto Santos Sousa.– 2025.

67f.;il.

Orientador: Felipe Antunes.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus Ipatinga*, 2025.

1. Piezoeletricidade. 2. Geração de energia. 3. Sustentabilidade energética. I. Antunes, Felipe. II. Instituto Federal de Minas Gerais - *Campus Ipatinga*. III. Título.

CDD 333.7932

Catálogo: Rejane Valéria Santos - CRB-6/2907

**SISTEMA AUTOMÁTICO DE MEDIÇÃO DE FLUXO DE PESSOAS PARA
ANÁLISE DA VIABILIDADE DE GERAÇÃO DE ENERGIA PIEZOELÉTRICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso Bacharelado em Engenharia Elétrica do
Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus*
Ipatinga para obtenção do grau de bacharel em
Engenharia Elétrica.

Orientador: Felipe Antunes

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

Nome do Professor

Nome do Professor

Nome do Professor

Dedicamos esta dissertação aos nossos
amados pais, maiores incentivadores
e fontes inesgotáveis de apoio,
amor e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a todos, aos nossos familiares por acreditarem no nosso desenvolvimento e pelo incentivo constante na realização deste trabalho.

Agradecemos ao nosso orientador e a todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

“Volte seus olhos para dentro, contemple suas profundezas, aprenda primeiro a conhecer- se então compreenderá porque está destinado a ficar doente e, talvez evite a adoecer no futuro.”

Sigmund Freud

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo desenvolver um sistema automatizado de medição de fluxo de pessoas e analisar a viabilidade da geração de energia elétrica por meio do efeito piezoelétrico. A proposta consistiu em investigar sensores adequados e métodos de detecção de passos, com foco na coleta de dados úteis para estimativas energéticas. A metodologia incluiu uma revisão bibliográfica sobre sensores piezoelétricos e resistivos, além do desenvolvimento de um protótipo funcional utilizando células de cargas conectados a um microcontrolador. Durante a implementação, foram realizadas análises comparativas entre sensores, testes práticos com a célula de carga e coleta de dados em diferentes cenários. Os resultados demonstraram que o sistema é capaz de identificar passos e com razoável precisão identificar a força exercida de cada passo no solo gerando informações suficientes para estimar a energia que poderia ser convertida por sistemas piezoelétricos. Conclui-se que o objetivo principal foi alcançado, e o sistema desenvolvido se mostrou funcional como ferramenta de análise de fluxo de pessoas e estimativa de geração energética. Como contribuição, o trabalho oferece uma base prática e teórica para projetos futuros que busquem integrar captação de energia e monitoramento de circulação humana.

Palavras-chave: Piezoeletricidade, Geração de energia, Contagem de passos, Célula de carga, Sensores FSR, Sustentabilidade energética.

ABSTRACT

This work aimed to develop an automated system for measuring pedestrian flow and to analyze the feasibility of generating electrical energy through the piezoelectric effect. The proposal consisted of investigating suitable sensors and step detection methods, focusing on collecting useful data for energy estimation. The methodology included a literature review on piezoelectric and resistive sensors, as well as the development of a functional prototype using load cells connected to a microcontroller. During implementation, comparative analyses between sensors were conducted, along with practical tests using a load cell and data collection in different scenarios. The results demonstrated that the system is capable of detecting steps and reasonably accurately identifying the force exerted by each step on the ground, generating sufficient information to estimate the energy that could be converted by piezoelectric systems. It is concluded that the main objective was achieved, and the developed system proved functional as a tool for analyzing pedestrian flow and estimating energy generation. As a contribution, this work provides a practical and theoretical foundation for future projects aiming to integrate energy harvesting and human traffic monitoring.

Keywords: Piezoelectricity. Energy generation. Step counting. Load Cell. FSR sensors. Energy sustainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Efeito Piezoelétrico.....	20
Figura 2 - Geradores piezoelétricos na superfície interna dos pneus.....	21
Figura 3 - Geradores piezoelétricos PAVEGEN dispostos em calçadas.	22
Figura 4 - Sensor capacitivo: representação da atuação (a) e simbologia (b).....	24
Figura 5 - Sensor ultrassônico: área de detecção (a) e simbologia (b).	25
Figura 6 - Sensor de barreira direta: funcionamento (a) e simbologia (b).	26
Figura 7 - Sensor de pressão capacitivo: detalhes construtivos (a) e detalhe do diafragma do sensor (b).	28
Figura 8 - Esquema básico do sensor de pressão piezoelétrico.....	29
Figura 9 - Esquema básico de um sensor pressão tátil.	29
Figura 10 - Esquema básico de um sensor pressão tátil com um polímero resistor sensível à força.....	30
Figura 11 - Esquema básico de um sensor pressão tátil com um material piezoresistivo sensível à força	31
Figura 12 – Matriz FSR da FSRTEK.....	32
Figura 13 – Strain gauges	33
Figura 14 – Célula de carga do tipo filme metálico em estrutura flexível	34
Figura 15 – Parte de cima do protótipo com as células de carga.....	37
Figura 16 – Parte de baixo do protótipo com as células de carga.	37
Figura 17 – Modelo para suporte da célula de carga.	38
Figura 18 –Módulo HX711.	39
Figura 19 – Modulo de cartão SD.	40
Figura 20 – Ponte de Wheatstone.....	41
Figura 21 – Esquemática da célula de carga e os strain gauges.	42
Figura 22 – Esquemática das conexões com as células de carga, semelhante a ponte de Wheatstone e o HX711	43
Figura 23 – Esquemática do projeto com as células de carga, o HX711 e um Arduino.....	43
Figura 24 – Gráfico do sinal obtido do protótipo.	46
Figura 25 – Gráfico do sinal com os tempos de subida.	46
Figura 26 – Gráfico da primeira derivada do sinal.	48
Figura 27 – Gráfico do sinal da balança e suas derivadas.....	49
Figura 28 – Gráfico final do sinal com tratamento.....	50
Figura 29 – Esquemática modelo de ladrilhos piezoelétricos V3 PAGEVEN.	51
Figura 30 – Modelo de ladrilhos piezoelétricos V3 PAGEVEN com LEDs.....	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
MME	Ministério de Minas e Energia
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
TPU	Poliuretano Termoplástico
LED	Light Emitting Diode (Diodo Emissor de Luz)
FSR	Force Sensitive Resistor (Resistor Sensível à Força)
FSRTEK	(Nome do fabricante – FSRTEK, especializado em sensores FSR)
MDF	Medium Density Fiberboard (Fibra de madeira de Média Densidade)
SPI	Serial Peripheral Interface (Interface Serial Periférica)

LISTA DE SÍMBOLOS

<	Menor que
>	Maior que
=	Igual
/	Tal que
μ	Micro (prefixo, 10^{-6}) – usado para microgeração
Ω	Ohm – unidade de resistência elétrica
V	Volt – unidade de tensão elétrica
A	Ampère – unidade de corrente elétrica
N	Newton – unidade de força
Pa	Pascal – unidade de pressão
kg	Quilograma – unidade de massa
d	Diâmetro (em alguns diagramas técnicos)
t	Tempo
P	Potência elétrica (em alguns trechos)
f	Frequência
W	Watt – unidade de potência
J	Joule – unidade de energia ou trabalho
Wh	Watt-hora – unidade de energia

Sumário

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Justificativa	13
1.2. Objetivos	14
1.2.1. Objetivo geral.....	14
1.2.2. Objetivos específicos.....	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1. Panorama Global da Demanda Energética.....	16
2.1.1. Crescimento da demanda e melhorias energéticas no Brasil	16
2.3. Energias Renováveis	17
2.3.1 – Necessidade de novas Fontes de Energia	18
2.4. Piezoelectricidade	18
2.4.1 – A geração piezoelétrica	20
2.5. Sistemas para contagem do fluxo de pessoas	22
2.5.1 – Sistema de monitoramento de fluxo de pessoas.....	23
2.5.1.1 Sensores capacitivos	23
2.5.1.2 Sensores Ultrassônicos	24
2.5.1.3 Sensores Fotoelétricos.....	25
2.5.1.4 Sensores de pressão	27
2.5.1.4.1 Sensores de pressão capacitivos	27
2.5.1.4.2 Sensores de pressão piezoelétricos	28
2.5.1.4.3 Sensores de força resistivos	29
2.5.1.4.3 Sensores de pressão do tipo strain gauges e as células de carga	33
3. DESENVOLVIMENTO.....	36
3.1. Escolha e Funcionamento do Sensor.....	36
3.1.1 – Critérios de Seleção	36
3.2. Estrutura Física e Eletrônica do Sistema.....	36
3.2.1 – Plataforma de Medição	36
3.2.2 – Suportes e Montagem Mecânica.....	38
3.2.3 – Módulo HX711	38
3.2.4 – Armazenamento de Dados.....	39
3.3. Funcionamento e Esquemática do Sistema	40
3.3.1 – Circuito e Conexões.....	40
3.3.2 – Resumo Esquemático	41
3.3.3 – Processamento dos Dados	44
3.3.4 – Influência da Estrutura Física e número de células.....	44

4. RESULTADOS	45
4.1. Calibração	45
4.2. Coleta de dados	45
4.3. Tratamento dos de dados.....	47
4.4. Exemplificando a utilização dos dados para o modelo Pavegen V3	50
5. CONCLUSÃO.....	54
6. REFERÊNCIAS	56
APÊNDICES	59

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por energia elétrica, aliada à necessidade de reduzir os impactos ambientais causados pelas fontes convencionais de geração, tem impulsionado a busca por soluções energéticas alternativas e sustentáveis. Entre as tecnologias emergentes, a piezoeletricidade se destaca como uma alternativa promissora, capaz de converter energia mecânica, proveniente de vibrações, pressões ou deformações, em energia elétrica.

A aplicação desse princípio em ambientes urbanos de alta circulação de pessoas oferece a possibilidade de transformar a movimentação cotidiana em uma fonte complementar de energia. No entanto, a viabilidade técnica e econômica dessa abordagem depende de uma análise criteriosa do fluxo de pessoas e da intensidade das forças envolvidas. Para isso, torna-se essencial o desenvolvimento de sistemas confiáveis de medição, capazes de caracterizar com precisão o padrão de movimentação em locais estratégicos.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema automatizado de medição de fluxo de pessoas, com foco na análise da viabilidade da geração piezoelétrica. O sistema utiliza sensores de pressão integrados a um microcontrolador, permitindo a coleta de dados sobre o número de passagens e a força aplicada ao solo. Esses dados são fundamentais para estimar o potencial de geração energética por meio de módulos piezoelétricos.

A proposta busca contribuir com a diversificação da matriz energética, aliando inovação tecnológica à sustentabilidade. Além disso, oferece uma ferramenta de apoio à tomada de decisões em projetos de infraestrutura urbana inteligente, nos quais a eficiência energética e o aproveitamento de fontes alternativas são cada vez mais valorizados.

1.1. Justificativa

A demanda energética mundial e brasileira estão crescendo de forma exponencial, impõe desafios significativos para a sustentabilidade e a segurança energética. As fontes tradicionais de energia, como combustíveis fósseis, apresentam restrições ambientais e de disponibilidade, fazendo com que se veja a necessidade de explorar alternativas inovadoras (IPEA, 2023).

Neste contexto, a piezoeletricidade tem se mostrado uma tecnologia promissora para a geração de energia limpa, especialmente em aplicações urbanas, como rodovias e ferrovias. Sistemas flexíveis baseados em polímeros piezoelétricos, como os desenvolvidos por

Jung *et al.* (2017), demonstram potencial para capturar energia mecânica em áreas de grande circulação, contribuindo para a sustentabilidade energética.

Justifica-se, portanto, o desenvolvimento de um sistema de geração piezoelétrico pela necessidade de diversificação da matriz energética brasileira e mundial, buscando soluções que possam complementar as fontes renováveis já existentes. Sistemas piezoelétricos reduzem a dependência de fontes não renováveis e mitigam impactos ambientais, trazendo benefícios econômicos.

Embora a microgeração piezoelétrica apresente potencial, sua aplicação prática ainda esbarra em limitações. Em comparação com outras fontes renováveis, como a energia solar e a eólica, a quantidade de eletricidade obtida por meio desse princípio costuma ser inferior. O desempenho do sistema depende fortemente da intensidade e da frequência das vibrações ou deformações mecânicas do ambiente onde é instalado. Por isso, é essencial realizar um estudo detalhado do local para verificar se o investimento é viável tanto do ponto de vista técnico quanto econômico. Fatores como o tipo de material piezoelétrico utilizado, a área de captação, a capacidade de armazenamento da energia, a intensidade e a frequência das distorções mecânicas influenciam diretamente o desempenho do sistema (JUNG *et al.*, 2017).

1.2 Objetivos

Este trabalho busca caracterizar vibrações em ambientes com alto fluxo de pessoas, analisando intensidade e frequência das deformações geradas pelos passos. Essas informações podem ser utilizadas para avaliar a viabilidade de projetos de sistema de microgeração piezoelétrica, identificando os locais com maior potencial para a geração de energia elétrica a partir das vibrações provocadas pelo tráfego de pessoas.

1.2.1. Objetivo geral

Desenvolver um protótipo capaz de medir o fluxo de pessoas em determinado ambiente, por meio da detecção do peso aplicado durante a passagem.

1.2.2. Objetivos específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre geração de energia elétrica por piezoeletricidade e sobre métodos de medição de fluxo de pessoas;

- Avaliar a dinâmica do sistema de medição proposto;
- Propor um método para compensação para a dinâmica lenta do sistema de medição.

1.3 Estrutura do texto

Este trabalho está organizado em cinco capítulos, distribuídos da seguinte forma:

O primeiro capítulo introduziu o tema, apresentando a contextualização, a justificativa e os objetivos gerais e específicos do trabalho.

O segundo capítulo consiste em uma revisão bibliográfica que aborda a matriz energética brasileira, as fontes de energia renovável com destaque para a piezoelectricidade, além dos principais métodos e tecnologias utilizadas na contagem de fluxo de pessoas utilizando sensores.

O terceiro capítulo apresenta o desenvolvimento do projeto, incluindo a escolha dos sensores, a lógica do sistema, os componentes utilizados e os esquemas de funcionamento.

No quarto capítulo, são apresentados o método para compensação para a dinâmica lenta do sistema de medição e os resultados do protótipo após compensação.

Por fim, o quinto capítulo traz as conclusões do trabalho, ressaltando os principais aprendizados, limitações e recomendações para pesquisas futuras.

O trabalho conta ainda com referências bibliográficas, apêndices, glossário, sumário, lista de ilustrações, lista de siglas e lista de símbolos, organizados de forma a proporcionar maior clareza e aprofundamento ao leitor.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Panorama Global da Demanda Energética

Desde tempos remotos, a sobrevivência e o desenvolvimento humano estiveram ligados à exploração de diferentes formas de energia disponíveis na natureza, como a força dos ventos, o movimento das águas e a queima da madeira (OLIVEIRA *et al.*, 2018).

O surgimento e a utilização em larga escala de combustíveis fósseis proporcionaram um avanço sem precedentes no progresso industrial e tecnológico. Entretanto, o crescimento acelerado da demanda, especialmente nos países industrializados, resultou no encarecimento do petróleo e de outras fontes fósseis, além de pressionar suas reservas naturais (ACHÃO *et al.*, 2016).

A crise do petróleo nos anos 1970 evidenciou a vulnerabilidade dessa dependência e impulsionou iniciativas voltadas à eficiência energética e à diversificação da matriz energética mundial. Diversos países destinaram recursos para pesquisas e projetos em energias renováveis, com a meta de reduzir o consumo de petróleo (SOUZA, GUERRA e KRUGER, 2011).

Esse movimento culminou no Protocolo de Kyoto, em 1997, que estabeleceu compromissos internacionais para a diminuição das emissões de gases de efeito estufa e fortaleceu políticas de uso racional da energia (CASTRO; SOUZA, 2015).

No Brasil, marcos como os choques do petróleo de 1973 e 1979, o primeiro seminário nacional sobre conservação energética em 1975 e a criação do Programa de Mobilização Energética em 1982 consolidaram o tema na agenda pública.

2.1.1. Crescimento da demanda e melhorias energéticas no Brasil

A matriz elétrica brasileira é marcada pela significativa participação de fontes renováveis, destacando-se a energia hidrelétrica, que mantém sua posição predominante. Nos últimos anos, houve um crescimento expressivo da geração fotovoltaica, bem como uma expansão contínua da energia eólica, que juntas representaram aproximadamente 24% da geração total de eletricidade em 2024. Conforme o Balanço Energético Nacional 2025, as fontes renováveis corresponderam a 88% da geração elétrica nacional nesse mesmo ano. (EPE, 2025)

Apesar disso, crises como a de 2001-2002 expuseram a vulnerabilidade do sistema, levando indústrias a adotar medidas emergenciais e consolidando a percepção de que eficiência energética se associa à redução do consumo (NASCIMENTO, 2017).

No ano de 2024, observou-se um aumento de 5,6% no consumo total de energia em comparação com o ano anterior, destacando-se o consumo industrial que apresentou um crescimento de 4,8% e o consumo residencial apresentou um crescimento de 7,2%. Observa-se que, apesar de o crescimento da capacidade instalada ter sido de 4,6%, a geração de energia apresentou um aumento superior, de 6,1%. Essa discrepância ligeiramente positiva para o lado da geração, pode sugerir uma melhora na eficiência operacional do sistema elétrico, indicando que a infraestrutura existente está sendo utilizada de forma mais otimizada melhorando a geração sem necessariamente aumentar a capacidade instalada. Além disso, fatores como condições climáticas favoráveis, também podem aumentar a produção em fontes renováveis intermitentes, e a otimização dos processos de operação e manutenção, contribuem para essa elevação na geração em relação ao crescimento da capacidade instalada. (EPE, 2025)

Esse cenário evidencia avanços na gestão de parques geradores, refletindo uma tendência de melhores estudos para otimização, eficiência, operação e manutenção dos meios geradores.

2.3. Energias Renováveis

Em função da crescente demanda por energia elétrica, pesquisadores vem direcionando seus esforços para buscar novas fontes de geração de energia, que estejam alinhadas as políticas de redução do impacto ambiental.

As fontes de energia renovável são essenciais para a transição de uma matriz energética mais sustentável e para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Abaixo, podem-se ver alguns exemplos delas:

- Energia Solar;
- Energia Eólica;
- Hidrelétricas;
- Biomassa;
- Hidrogênio Verde.

Devido à característica intrínseca das fontes naturais, sua disponibilidade pode variar ao longo do tempo, o que impõe desafios para garantir uma geração de energia completamente contínua.

2.3.1 – Necessidade de novas Fontes de Energia

A diversificação energética incentiva o crescimento econômico de um país. Obter energia de múltiplas fontes protege a nação de interrupções de energia em busca de evitar contextos de desabastecimento energético, uma situação que pode causar desdobramentos gigantescos no funcionamento de um país. Tal diversificação tem o poder de gerar o aumento de empregos e oportunidades de negócios no setor de energias renováveis, assim como contribuir com a diminuição das mudanças climáticas e garantir um futuro mais sustentável, gerando melhorias na qualidade de vida da população.

Com a crescente demanda por energia sustentável e a necessidade de diversificar a matriz energética tem sido incentivado o estudo de soluções inovadoras. Entre essas soluções, se destaca a piezoelectricidade como uma solução promissora.

2.4. Piezoelectricidade

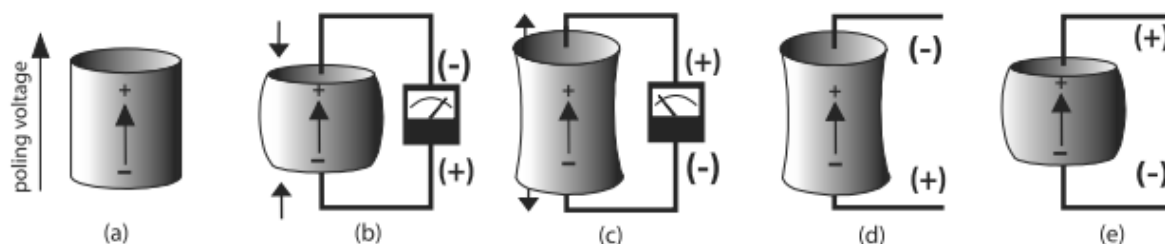
O efeito piezoelétrico foi descoberto na forma natural na década de 1880. No entanto, foi só na segunda guerra mundial que foram sintetizados materiais cerâmicos policristalinos que possuíam essa propriedade. Daquele momento em diante, encontrou-se aplicação para esses materiais em microfones, acelerômetros, transdutores ultrassônicos, sonares e sistemas de piezo-ignição e mais atualmente na indústria aeroespacial para controle de vibração em estruturas flexíveis (MOHEIMANI; FLEMING, 2006).

O termo piezo vem do grego “piezein” que significa pressão ou pressionar. Piezoelectricidade é a capacidade que alguns dielétricos têm de transformar tensões mecânicas em cargas elétricas, este é o efeito direto, podendo também realizar o efeito inverso onde são transformadas as cargas elétricas em deformações mecânicas (CALLISTER, 2006).

De acordo com Callister (2006), a piezoeletricidade é uma propriedade incomum exibida por alguns materiais cerâmicos, onde a polarização é induzida e um campo elétrico é estabelecido em uma amostra pela aplicação de forças externas. A inversão do sinal de uma força externa (ou seja, de tração para compressão) resulta na inversão da direção do campo elétrico.

As características de um elemento cerâmico piezoelétrico polarizado podem ser compreendidas por meio da sequência de imagens da Figura 1. A aplicação de uma força mecânica, seja compressiva ou tensional, modifica o momento dipolar do material, resultando no surgimento de uma tensão elétrica. Quando a compressão ocorre na mesma direção da polarização, ou a tração é aplicada perpendicularmente a essa direção, a tensão elétrica gerada apresenta a mesma polaridade da tensão de polarização (Figura 1 (b)). Por outro lado, quando a tração ocorre na direção da polarização, ou a compressão é perpendicular a essa orientação, a tensão gerada possui polaridade inversa à da tensão de polarização (Figura 1 (c)). Nesse modo de operação, o dispositivo funciona como um sensor, convertendo a energia mecânica proveniente da compressão ou tensão em energia elétrica. A tensão elétrica gerada em um elemento cerâmico piezoelétrico devido à aplicação de esforço mecânico é proporcional à carga aplicada até um determinado limite, definido pelas características do material. O mesmo princípio se aplica à relação entre a tensão elétrica aplicada e a deformação resultante (MOHEIMANI; FLEMING, 2006).

Quando uma tensão elétrica com a mesma polaridade da tensão de polarização é aplicada na direção dessa polarização, o elemento cerâmico se alonga enquanto seu diâmetro reduz (Figura 1 (d)). Por outro lado, se a tensão aplicada tiver polaridade oposta, o material se encurta e sua largura aumenta (Figura 1 (e)). Caso uma tensão alternada seja aplicada, o elemento se expandirá e contrairá repetidamente, seguindo a frequência da tensão imposta. Nesse modo de funcionamento, o dispositivo atua como um atuador, convertendo energia elétrica em energia mecânica (MOHEIMANI; FLEMING, 2006).

Figura 1 - Efeito Piezoelétrico

Fonte: MOHEIMANI; FLEMING (2006)

2.4.1 – A geração piezoelétrica

Dentre as diversas aplicações da piezoelectricidade voltadas à geração de energia renovável, o setor de transportes e locomoção se destacam como um campo promissor, principalmente por envolver sistemas com grande quantidade de movimento e pressão mecânica constante. Pneus, estradas, calçadas e trilhos de trem representam superfícies frequentemente submetidas a deformações, o que os torna alvos ideais para a conversão de energia mecânica em elétrica por meio de materiais piezoelétricos.

Pesquisadores desenvolveram um protótipo (Figura 2) no qual os geradores foram fixados na superfície interna dos pneus, aproveitando a deformação natural causada pela rotação durante o deslocamento do veículo. Testes mostraram que um pneu equipado com uma malha de fios piezoelétricos pôde gerar até 2,3 W a uma velocidade constante de 100 km/h, e o dobro desse valor com uma camada adicional. Grandes empresas, como a Goodyear, também apresentaram propostas semelhantes, como o protótipo BH03, que combina piezoelectricidade e termogeradores para aumentar a eficiência energética em veículos elétricos. (MAKKI; POPILIEV, 2011)

Figura 2 - Geradores piezoelétricos na superfície interna dos pneus.



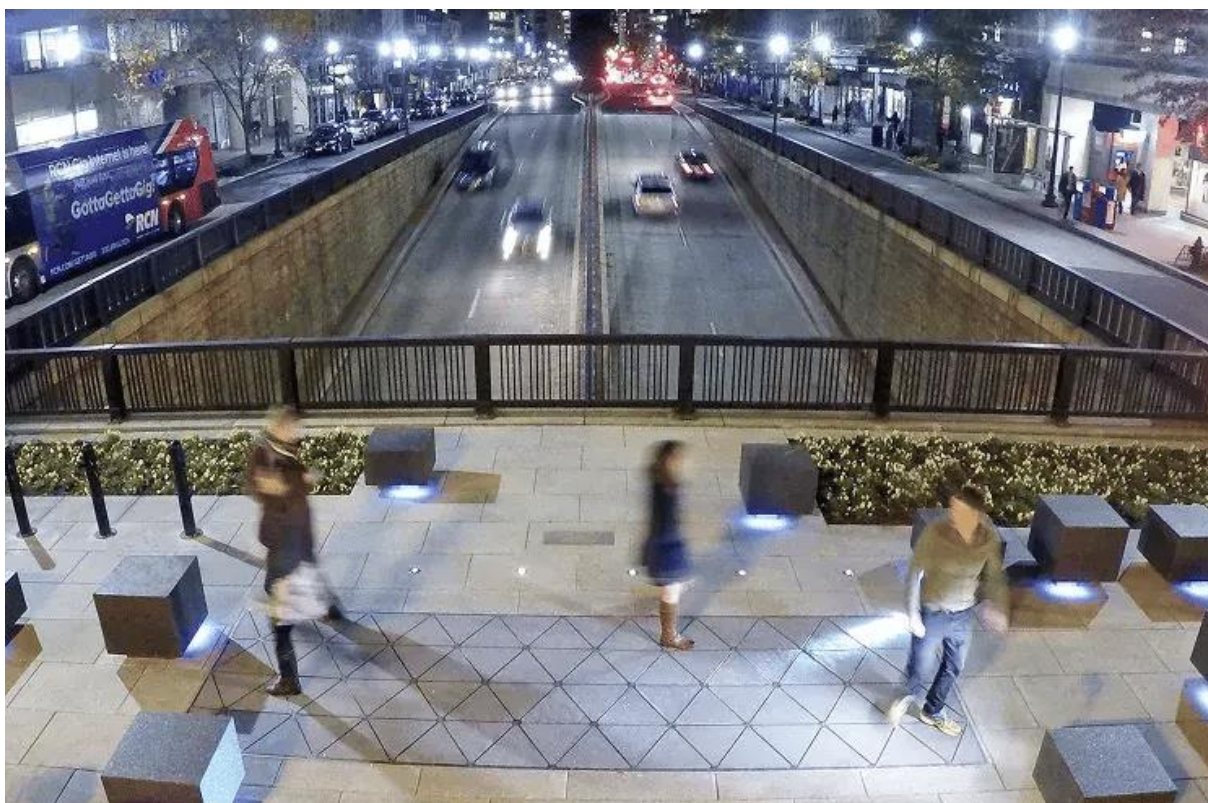
Fonte: (MAKKI; POP-ILIEV, 2011)

Aplicações em infraestrutura urbana também vêm sendo exploradas, como a implementação de geradores piezoelétricos em estradas. Nesse modelo, a energia gerada pela pressão dos pneus sobre o asfalto é captada por dispositivos instalados sob a camada superficial da via. (PERLINGEIRO; PIMENTA; SILVA. 2016).

O uso de materiais piezoelétricos também vem sendo explorado em calçadas e áreas de grande circulação de pessoas. Placas instaladas sob o piso captam a energia gerada pelos passos dos pedestres e convertem em eletricidade. Isso mostra que, mesmo em escalas urbanas, a movimentação humana pode se tornar uma fonte complementar de energia limpa. (PERLINGEIRO; PIMENTA; SILVA. 2016).

Como alternativa para geração de energia por meio da piezoelectricidade, existem módulos geradores piezoelétricos que produzem eletricidade a partir da compressão e vibração mecânica. Esses dispositivos, já comercializados em diversos países, ainda se encontram em fase de aprimoramento e desenvolvimento tecnológico. Sua capacidade de geração depende diretamente da aplicação específica a que se destinam. Um exemplo é o módulo V3 da empresa Pavegen (Figura 3), projetado para instalação em ruas e calçadas, convertendo a energia dos passos humanos em eletricidade.

Figura 3 - Geradores piezoelétricos PAVEGEN dispostos em calçadas.



Fonte: PAVEGEN, [s.d.]

2.5. Sistemas para contagem do fluxo de pessoas

A contagem de pessoas é fundamental para a análise de viabilidade do projeto, pois permite avaliar a eficiência da geração de energia por meio de pisos piezoelétricos. Através desse indicador, será possível determinar os locais com maior fluxo de pessoas, otimizando a instalação dos pisos e maximizando a produção de energia. Além disso, a relação entre o número de pessoas e a energia gerada servirá como um indicador de qualidade do sistema, permitindo a identificação de problemas para demais ajustes e melhorias no projeto.

A implementação de sistemas de contagem de pessoas em ambientes reais exige um tratamento dos dados coletados. A dinâmica de luzes, as pessoas estarem estáticas ou em movimentação contrária, condições climáticas, múltiplos alvos simultâneos interagindo entre si e até mesmo o vestuário podem comprometer a precisão e a confiabilidade das contagens. Desse modo, torna-se imprescindível estabelecer métodos de verificação do sistema, para

garantir que os resultados obtidos permaneçam dentro dos limites de confiança exigidos pelo projeto. (JÄHNE; HAUSSECKER; GEIßLER, 1999)

Alguns métodos podem ser empregados para contabilizar pessoas em ambientes reais, como câmeras, sensores e dispositivos mecânicos. No contexto de um projeto que visa analisar o fluxo de passos para gerar energia elétrica, os dispositivos de medição de pessoas tradicionais, como os torniquetes e catracas, apresentam limitações para acompanhar a movimentação e a dinâmica de indivíduos. Portanto, a implementação de dispositivos mecânicos no piso para contagem de passos seria o mais preciso e de menor custo, uma vez que o sistema de geração de energia dependerá única e exclusivamente de passos em determinada área do piso. (MAZZAROPPI, 2007)

2.5.1 – Sistema de monitoramento de fluxo de pessoas via sensores

O monitoramento preciso do fluxo de pessoas em ambientes reais demanda o emprego de tecnologias capazes de detectar e contabilizar o movimento individual. Entre os diversos tipos de sensores disponíveis, destacam-se para monitoramento de objetos os sensores indutivos, capacitivos, ultrassônicos, fotoelétricos, óticos e de infravermelho. Embora todos possam detectar movimento, sensores indutivos e capacitivos apresentam limitações para a contagem de pessoas, principalmente em ambientes dinâmicos, devido a suas características operacionais (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005).

Neste subcapítulo, será explorada a aplicabilidade desses sensores para detectar e contabilizar o fluxo de pessoas em determinado local.

2.5.1.1 Sensores capacitivos

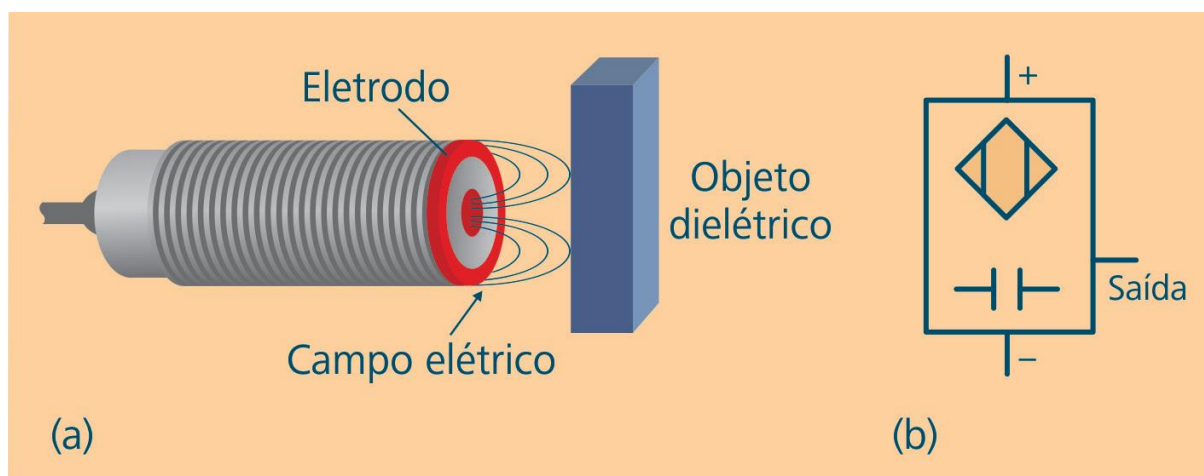
Os sensores capacitivos operam pela variação do campo elétrico ao aproximar um objeto da superfície sensora, formada por duas placas metálicas. A alteração nas propriedades dielétricas do meio entre as placas provoca uma mudança na capacitância, que é detectada e convertida em sinal elétrico pelo estágio de saída do sensor. (ROGGIA; CARDOZO FUENTES, 2016).

Sua estrutura básica inclui uma ponta sensora, um oscilador, um circuito de detecção e um circuito de saída. A aproximação de um objeto altera a capacitância do circuito, ativando o oscilador e, conseqüentemente, o circuito de saída. Apesar de serem eficazes na

detecção de materiais não metálicos, como corpos humanos, esses sensores apresentam limitações em ambientes com alto fluxo e movimentação de pessoas (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005).

A Figura 4(a) ilustra o funcionamento de um sensor capacitivo, cuja representação esquemática é fornecida em (b).

Figura 4 - Sensor capacitivo: representação da atuação (a) e simbologia (b).



Fonte: (ROGGIA; CARDOZO FUENTES, 2016).

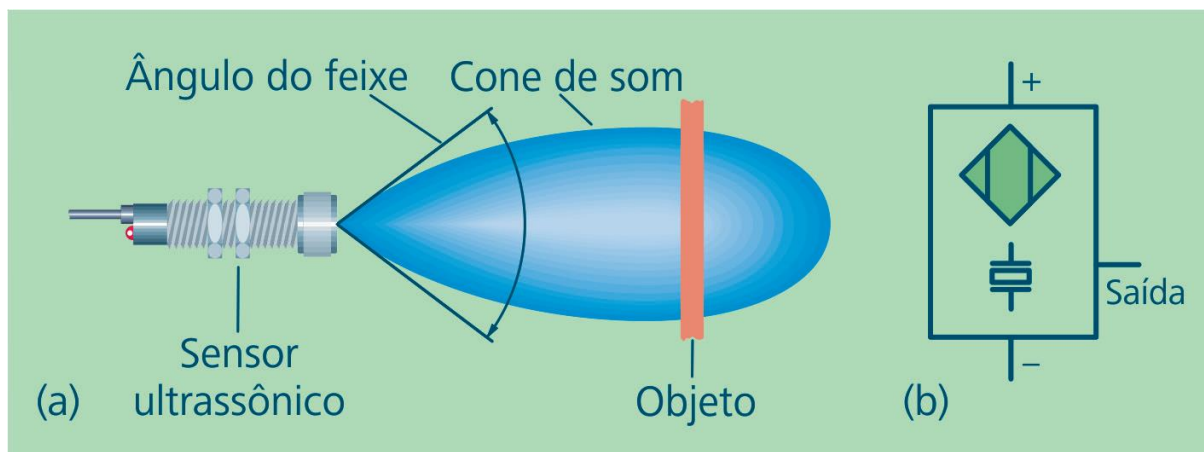
2.5.1.2 Sensores Ultrassônicos

Os sensores ultrassônicos operam emitindo ondas acústicas de alta frequência (ultrassônica, acima de 20 kHz) a partir de uma superfície. A propagação dessas ondas causa perturbações no meio, independentemente de seu estado físico, gerando compressões e rarefações. (FRADEN, 2003).

As ondas ultrassônicas emitidas pelos sensores interagem com o meio e os objetos presentes, sendo parcialmente refletidas de volta ao transdutor. A análise do tempo de trânsito e da amplitude do sinal refletido permite determinar parâmetros como distância, velocidade e posição dos objetos. No entanto, a qualidade da reflexão e, conseqüentemente, a precisão das medidas, são influenciadas por diversos fatores, incluindo: a geometria do objeto (formato e dimensões), o ângulo de incidência da onda sonora, as propriedades acústicas da superfície (rugosidade, absorção), bem como as condições ambientais, tais como temperatura e umidade, que podem afetar a velocidade de propagação do som no meio (FRADEN, 2003).

A representação gráfica na Figura 5(a) ilustra a região de detecção de um sensor ultrassônico, enquanto a Figura 5(b) apresenta seu símbolo esquemático.

Figura 5- Sensor ultrassônico: área de detecção (a) e simbologia (b).



Fonte: (ROGGIA; CARDOZO FUENTES, 2016).

Choi *et al.* (2017) propuseram uma abordagem para contagem de pessoas em ambientes complexos, utilizando um sensor de alta frequência. Ao invés de identificar individualmente cada pessoa, o algoritmo proposto explora as características estatísticas do sinal refletido, como a amplitude e a distribuição dos pulsos, para estimar o número de indivíduos presentes. Através da análise de dados experimentais coletados em diversos cenários, os autores demonstraram a robustez e a precisão do método proposto, mesmo em ambientes com alta reflexividade, como elevadores. Essa técnica apresenta um grande potencial para aplicações em sistemas de gerenciamento de fluxo de pessoas, monitoramento de espaços públicos e controle de acesso.

2.5.1.3 Sensores Fotoelétricos

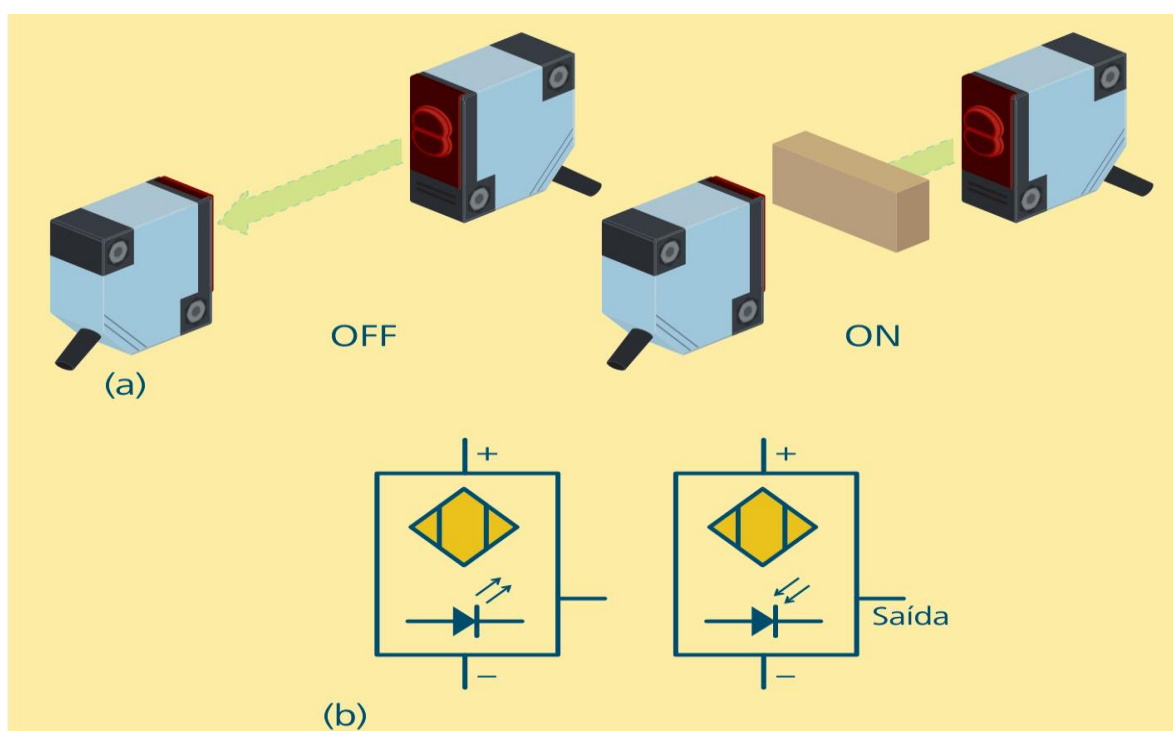
Os sensores fotoelétricos funcionam detectando um feixe de luz, seja visível ou invisível, e respondendo a variações na intensidade dessa luz. A estrutura básica consiste em dois componentes: o emissor e o receptor. O emissor abriga a fonte de luz, que pode ser um LED ou um laser, modulada por um oscilador. O receptor, por sua vez, detecta a luz do emissor e a converte em tensão elétrica. A intensidade luminosa convertida passa por um elemento optoeletrônico, onde é amplificada e modulada. O receptor é ajustado para a frequência do

emissor, com o objetivo de ignorar outras luzes ambientais e detectar qualquer objeto que interfira no feixe de luz (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2005).

O sensor de barreira, também conhecido como sensor de detecção de modos opostos, é o mais utilizado para detectar a movimentação de pessoas devido à sua alta confiabilidade e imunidade a interferências. Nesse tipo de sensor, o emissor e o receptor são posicionados em lados opostos, formando um feixe de luz que atravessa a área a ser monitorada. Qualquer interrupção desse feixe, causada pela passagem de uma pessoa ou objeto, é detectada pelo receptor. A Figura 6 exemplifica a configuração típica de um sensor de barreira em modo oposto, onde o emissor e o receptor são montados em locais distintos, visando a detecção de objetos que interrompam o feixe de luz incidente no receptor. (ROGGIA; CARDOZO FUENTES, 2016)

A forma de detecção é um fator crítico na seleção de um sensor fotoelétrico, pois determina a confiabilidade e o alcance da aplicação. Os principais tipos de sensores fotoelétricos são: reflexivo, difuso, retro reflexivo e barreira. Cada tipo possui características específicas, como distância de detecção, imunidade a interferências e resolução (HAYT JR., 2001).

Figura 6- Sensor de barreira direta: funcionamento (a) e simbologia (b).



Fonte: (ROGGIA; CARDOZO FUENTES, 2016).

2.5.1.4 Sensores de pressão

Os sensores de pressão capacitivos, piezoelétricos e piezorresistivos são os mais comuns para realizar medições de pressão, devido às suas características e aplicações específicas.

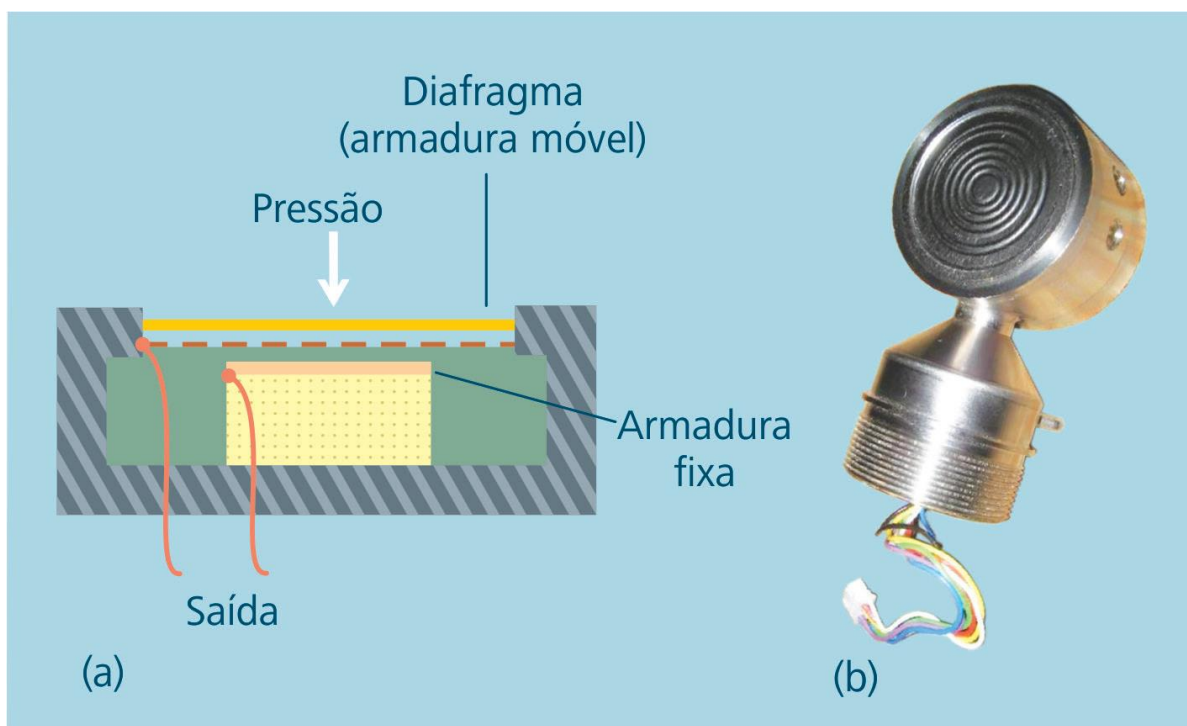
2.5.1.4.1 Sensores de pressão capacitivos

Na seção 2.5.1.1, discutiram-se os sensores capacitivos que detectam o movimento de pessoas através da variação da capacitância. A aproximação de um corpo dielétrico, como o corpo humano, perturba o campo elétrico entre as placas do sensor, causando uma alteração na capacitância que é detectada e convertida em um sinal digital.

Agora esse tipo de tecnologia é combinado com uma tecnologia de medição de pressão, onde um diafragma metálico flexível atua como uma das placas, enquanto a outra é fixa. Quando uma força de pressão é aplicada ao diafragma, ela se deforma, alterando a distância entre as placas e, conseqüentemente, modificando o valor da capacitância. Essa variação capacitiva é proporcional à magnitude da pressão aplicada. Um circuito eletrônico associado ao sensor detecta essa alteração na capacitância e a converte em um sinal elétrico proporcional à pressão. (ROGGIA; CARDOZO FUENTES, 2016).

A Figura 7(a) ilustra a estrutura básica de um sensor de pressão capacitivo, evidenciando o diafragma móvel, a placa fixa e o meio dielétrico que separa as placas. A Figura 7(b) apresenta um detalhe do diafragma, destacando sua flexibilidade e a importância de sua geometria para a sensibilidade do sensor.

Figura 7 - Sensor de pressão capacitivo: detalhes construtivos (a) e detalhe do diafragma do sensor (b).



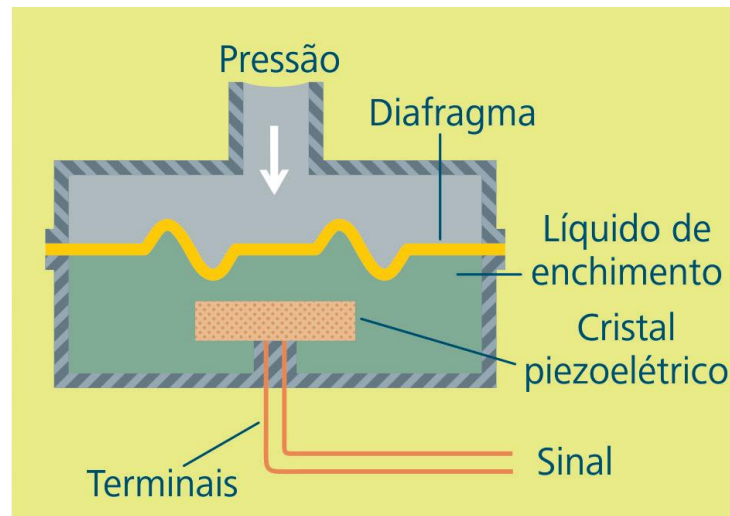
Fonte: ROGIA; CARDOZO FUENTES (2016).

2.5.1.4.2 Sensores de pressão piezoelétricos

A conversão direta de energia mecânica em elétrica, característica dos materiais piezoelétricos, os torna um dos principais componentes para sensores de pressão, acelerômetros e transdutores de força. Ao aplicar uma força sobre um material piezoelétrico, como o quartzo, ocorre uma deformação que induz uma tensão elétrica. Essa tensão pode ser medida e utilizada para determinar a magnitude da força aplicada (WILSON, 2005).

A base de funcionamento dos sensores piezoelétricos reside na geração de uma carga elétrica proporcional à força aplicada. Essa propriedade, combinada com sua construção robusta e dimensões reduzidas, o torna característico para medições de pressão em menores faixas de perímetro. A Figura 8 apresenta um diagrama simplificado de sua estrutura. A linearidade da resposta e faixa de medição, que pode variar de poucos milibares a dezenas de milhares de bares, exemplificam as possibilidades de aplicação desses sensores. (ROGGIA; CARDOZO FUENTES, 2016)

Figura 8- Esquema básico do sensor de pressão piezoelétrico

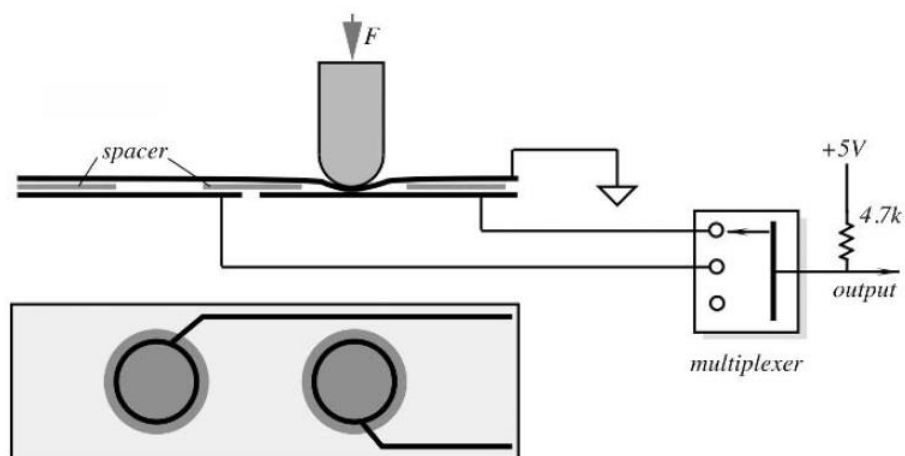


Fonte: ROGGIA; CARDOZO FUENTES (2016)

2.5.1.4.3 Sensores de força resistivos

Um outro tipo de sensor que merece destaque é o sensor de força resistivo. Essa tecnologia emprega materiais cuja resistência elétrica sofre alterações conforme são deformados, chamados de resistores sensíveis à força ou FSR (Figura 9).

Figura 9- Esquema básico de um sensor pressão tátil.

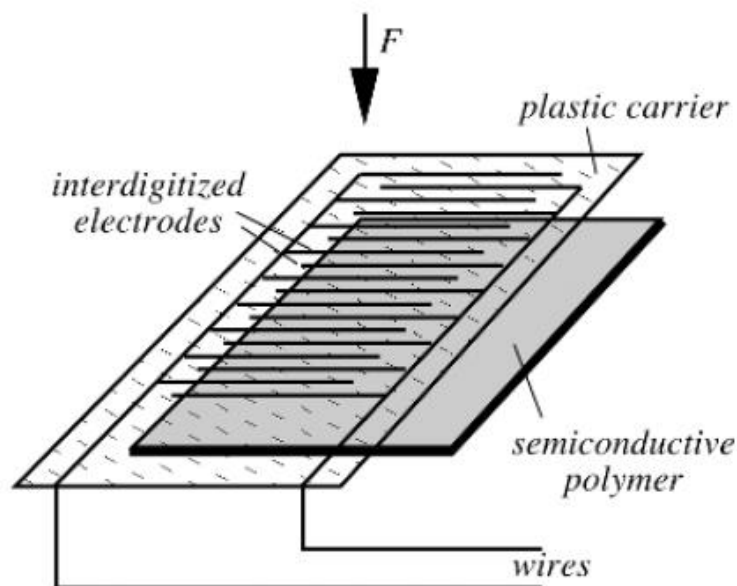


Fonte: FRADEN (2003)

Esses resistores podem ser compostos por uma camada espessa de polímero sobre um substrato flexível, com duas camadas condutoras separadas por um espaçador fino como na Figura 10. Quando a pressão é aplicada ao FSR, a camada de polímero se comprime, fazendo com que as duas camadas condutoras entrem em contato, o que resulta na diminuição da resistência (FRADEN, 2003).

De uma maneira mais aprofundada um sensor simples produzindo um sinal de "ligado-desligado" pode ser formado com duas folhas de alumínio e um espaçador. O espaçador possui buracos redondos (ou de qualquer outra forma adequada). Uma folha está aterrada e a outra está conectada a um resistor pull-up. Um multiplexador pode ser usado se mais de uma área sensora for necessária. Quando uma força externa é aplicada ao condutor superior sobre a abertura na camada do espaçador, o condutor flexiona e, ao atingir o condutor inferior, faz um contato elétrico, aterrando através do resistor pull-up. O sinal de saída torna-se zero, indicando a força aplicada. (FRADEN, 2003, p.327)

Figura 10- Esquema básico de um sensor pressão tátil com um polímero resistor sensível à força



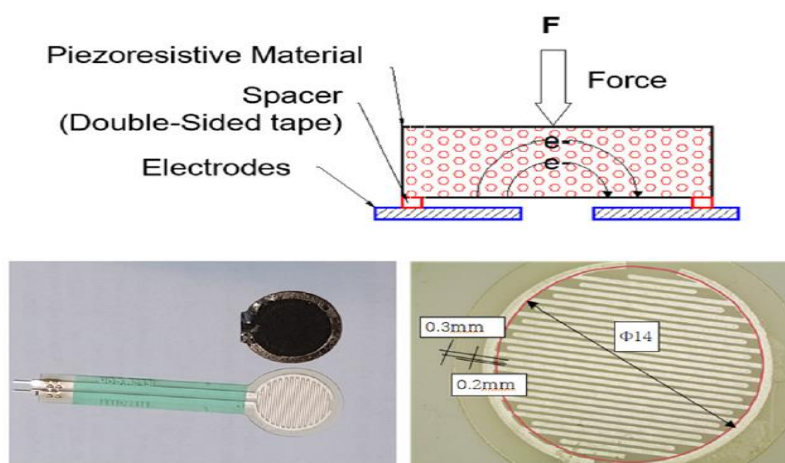
Fonte: FRADEN (2003).

Na robótica, por exemplo, esses sensores podem ser integrados aos "dedos" de um manipulador mecânico para fornecer *feedback* tátil ao entrar em contato com objetos, simulando a sensibilidade da pele humana. Na indústria eletrônica, encontram ampla aplicação na

fabricação de telas sensíveis ao toque, teclados e outros dispositivos que exigem a detecção de contato físico. No campo da saúde, a versatilidade dos sensores de força resistivos é notável. Em odontologia, são utilizados para avaliar a oclusão de coroas e pontes e analisar as forças exercidas pelos pés durante a locomoção. Na ortopedia, podem ser integrados a próteses de joelho para otimizar seu funcionamento. Na engenharia, esses sensores desempenham um papel crucial na análise de forças em dispositivos de fixação, contribuindo para o desenvolvimento de estruturas mais seguras e eficientes (FRADEN, 2003).

Existem múltiplos processos de fabricação para sensores táteis resistivos. Um método comum envolve a deposição de uma camada fina de material piezorresistivo (Figura 11). Um sensor tátil simplificado, com resposta binária, pode ser configurado com duas folhas metálicas e um espaçador perfurado. Uma das folhas é conectada à massa, enquanto a outra é ligada a um resistor de pull-up. Para múltiplos pontos de detecção, um multiplexador é empregado. A aplicação de uma força externa sobre a folha superior, em uma região correspondente a um orifício no espaçador, provoca a deflexão da folha, estabelecendo contato elétrico com a folha inferior e curto-circuitando o resistor de pull-up. A ausência de tensão na saída indica a detecção de força. As folhas condutoras podem ser produzidas por serigrafia de tinta condutora sobre um substrato apropriado. A disposição de linhas e colunas de tinta condutora permite a definição de múltiplos pontos de detecção. O contato em um ponto específico resulta na intersecção entre a linha e a coluna correspondentes, indicando a localização da força (JUNG, LEE; KIM, 2024).

Figura 11- Esquema básico de um sensor pressão tátil com um material piezorresistivo sensível à força



Fonte: JUNG, LEE e KIM (2024)

Como alternativa aos sensores FSR utilizados individualmente, pode-se empregar uma matriz FSR, como a fornecida pela FSRTEK (Figura 12), composta por 3.600 pontos sensoriais distribuídos na interseção de trilhas condutoras em linhas e colunas. Essa configuração permite o mapeamento da pressão com alta resolução espacial, sendo capaz inclusive de distinguir pegadas simultâneas. Cada ponto da matriz é projetado para suportar forças de até 100 kg.

Um Arduino pode interpretar os sinais da matriz em tempo real, possibilitando visualização precisa de pegadas. Com as linhas da matriz operando como saídas digitais (ativando a varredura), enquanto as colunas funcionam como entradas analógicas para captar os níveis de força.

Figura 12 – Matriz FSR da *FSRTEK*



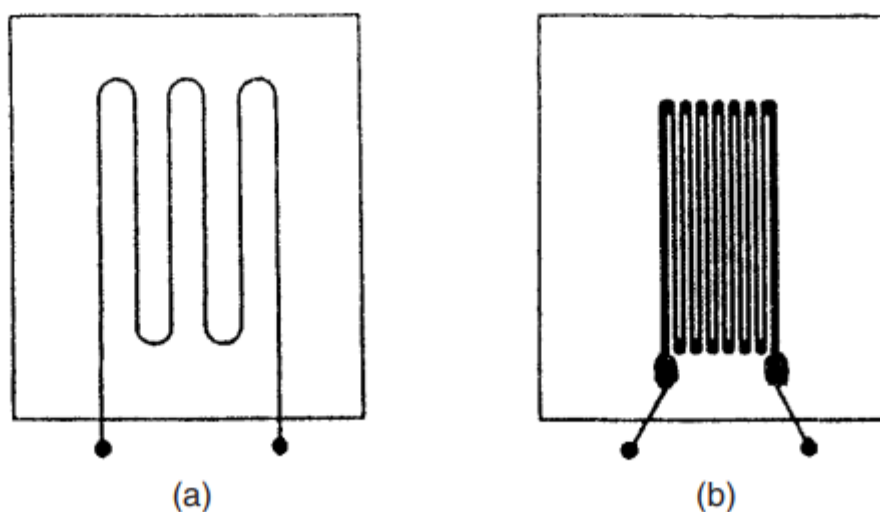
Fonte: Site de compras da FSRTEK, Disponível em: <https://www.fsrtek.com/standard-sensor/matrix-force-sensing-resistor-60x60> (2024).

2.5.1.4.3 Sensores de pressão do tipo *strain gauges* e as células de carga

Os *strain gauges*, ou extensômetros elétricos, são sensores utilizados para medir deformações em materiais. Esses dispositivos funcionam a partir da variação da resistência elétrica quando submetidos a uma deformação mecânica — seja por tração ou compressão. Ao serem colados sobre uma superfície que sofre deformações, os *strain gauges* acompanham essas variações físicas e convertem o alongamento ou o encurtamento em uma alteração de resistência elétrica. Essa alteração é então interpretada por circuitos eletrônicos, como a ponte de *Wheatstone*, que permite medir a força aplicada. (DALLY; RILEY, 1991)

O modelo clássico de *strain gauge* (Figura 13(a)) é composto por um fio metálico de resistência elétrica, organizado em um traçado em ziguezague e fixado sobre uma base flexível. Esse fio, geralmente com seção transversal circular, sofre deformações quando submetido a esforços mecânicos. Tais deformações alteram sua geometria, especialmente a área da seção transversal. Como a resistência elétrica por unidade de comprimento depende inversamente dessa área, qualquer modificação no formato do fio resulta em uma mudança correspondente na resistência elétrica do sensor. (MORRIS, 2001)

Figura 13—*Strain gauges*



Fonte: MORRIS, 2001.

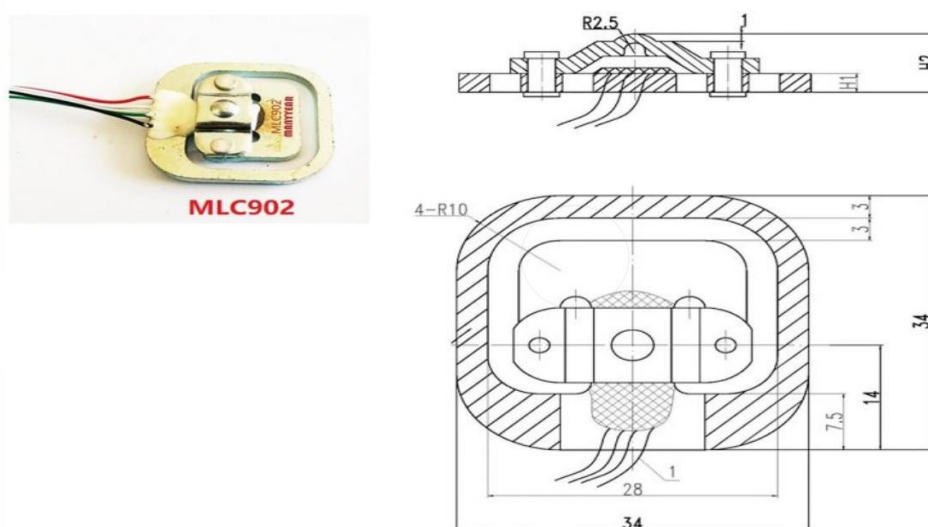
Os extensômetros do tipo fio têm sido substituídos por modelos mais modernos, como os do tipo folha metálica (Figura 13(b)). Os modelos com folha metálica funcionam de maneira semelhante aos de fio metálico, mas o elemento ativo é uma lâmina de metal recortada em formato de ziguezague. Esse método de fabricação — recorte da folha — é significativamente mais simples e econômico do que moldar um fio resistivo no mesmo padrão, o que contribui para a redução dos custos de produção. (MORRIS, 2001)

Um sensor comumente utilizado para medir a força exercida no solo com o uso de *strain gauges* são as células de carga. As células de carga (Figura 14) medem a força aplicada convertendo a deformação de um elemento elástico em variação elétrica. Essa deformação é proporcional à massa e ocorre de forma linear, com mínima interferência de forças laterais. Como a medição da força depende da deformação do material metálico, é necessário que a carga permaneça sobre a célula por um intervalo de tempo suficiente para que a deformação aconteça completamente e o valor do peso seja corretamente indicado. (ALCIATORE; HISTAND, 2012).

Entre suas vantagens estão:

- Ampla faixa de medição;
- Durabilidade e resistência;
- Facilidade de instalação.

Figura 14 – Célula de carga do tipo filme metálico em estrutura flexível



O modelo utilizado neste projeto é do tipo filme metálico em estrutura flexível, com dois *strain gauges* fixados em sua região sensível para detecção das deformações por variação ôhmica.

3. DESENVOLVIMENTO

Nesta etapa, são apresentadas as decisões técnicas, os componentes e as metodologias adotadas para o desenvolvimento do sistema de contagem de passos e análise da força aplicada em plataformas instrumentadas.

3.1. Escolha e Funcionamento do Sensor

3.1.1 – Critérios de Seleção

Foram analisados diferentes sensores de força, considerando suas vantagens, limitações e configurações. A célula de carga foi escolhida como sensor principal devido ao seu:

- Baixo custo;
- Fácil aquisição;
- Versatilidade de formatos;
- Capacidade de adaptação ao sistema proposto.

Além disso, esse sensor permite estimar a força individual aplicada ao solo, essencial para análises de fluxo de pessoas e estimativas de geração de energia piezoelétrica.

3.2. Estrutura Física e Eletrônica do Sistema

3.2.1 – Plataforma de Medição

A plataforma foi construída com placas de fibra de madeira (MDF), nas quais foram acopladas quatro células de carga (Figuras 15 e 16). Os principais componentes são:

- 1 estrutura de MDF;
- 4 células de carga (filme metálico, 50 kg);
- 4 suportes plásticos impressos em 3D;

- 1 Arduino;
- 1 módulo amplificador HX711;
- 1 módulo e cartão microSD.

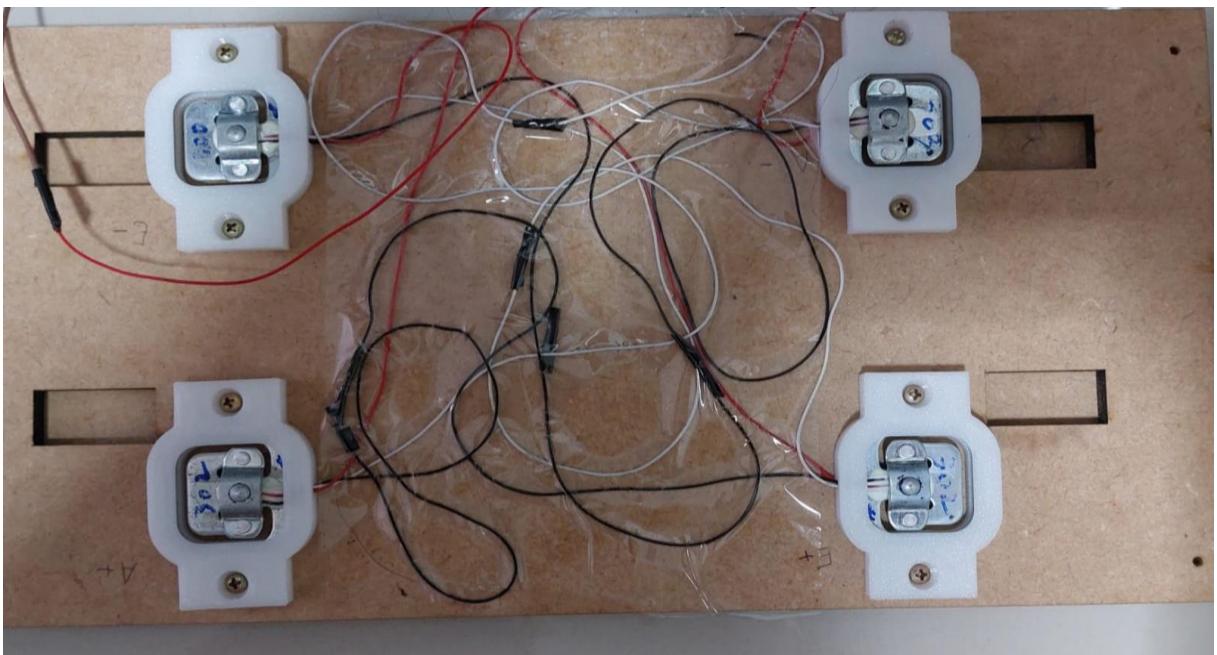
As células detectam a variação de pressão causada pelo contato do pé. O sinal analógico é amplificado pelo HX711, convertido para digital e enviado ao Arduino, que registra os dados em tempo real no cartão SD.

Figura 15 – Parte de cima do protótipo com as células de carga.



Fonte: Registro fotográfico do autor, 2025.

Figura 16 – Parte de baixo do protótipo com as células de carga.

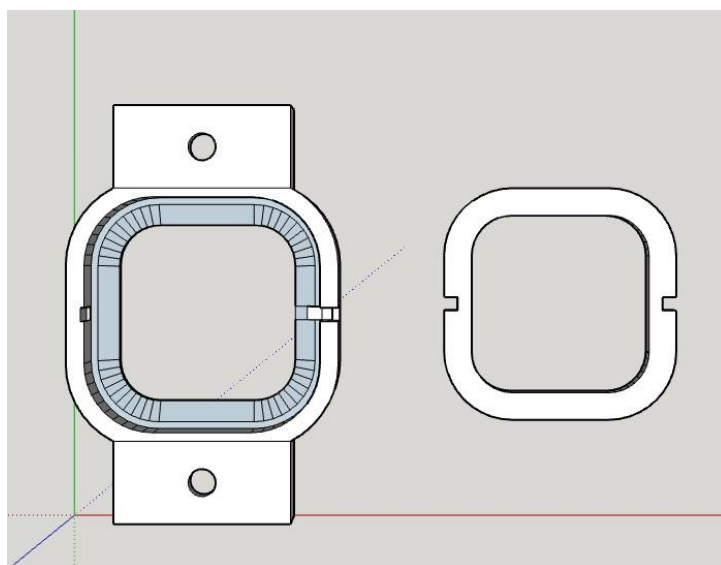


Fonte: Registro fotográfico do autor, 2025.

3.2.2 – Suportes e Montagem Mecânica

Para garantir deformações precisas e repetíveis, utilizou-se um suporte personalizado para cada célula de carga, obtido em bibliotecas de impressão 3D, como a Thingiverse (Figura 17). O material utilizado foi o ácido polilático (PLA). Foram utilizados parafusos e porcas para a fixação segura dos suportes à estrutura da plataforma.

Figura 17 – Modelo para suporte da célula de carga.

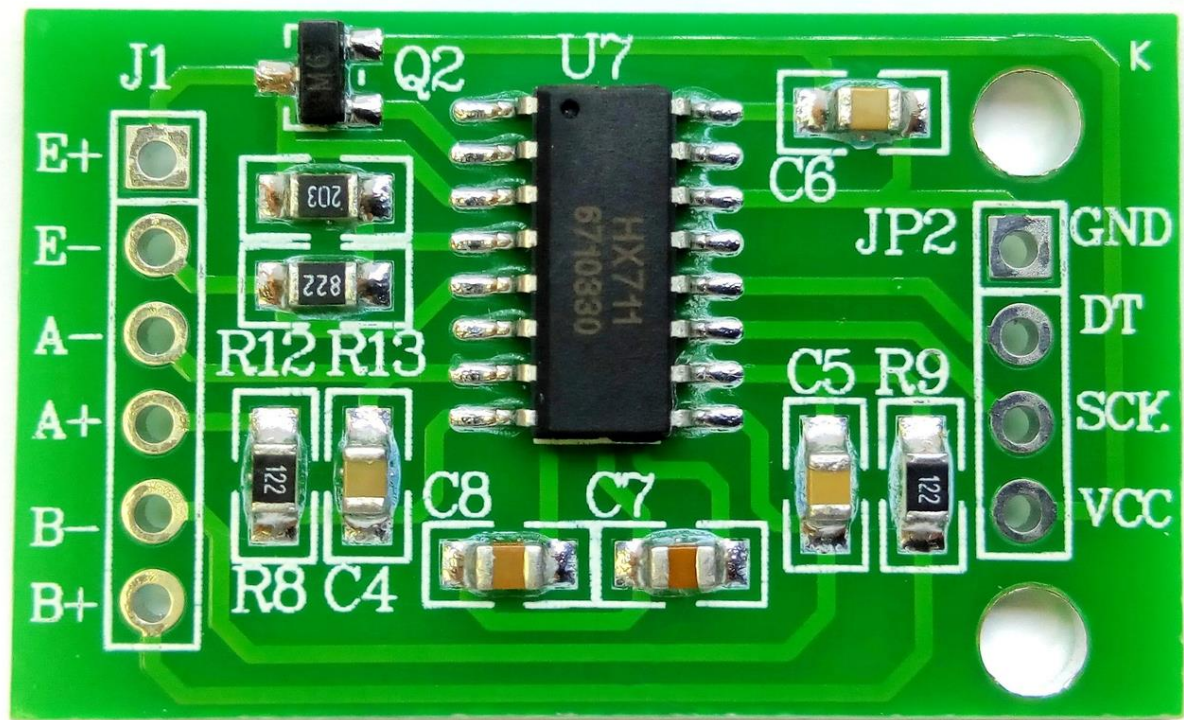


Fonte: Foto da versão produzida por patrick3345 in thingiverse.com (2017)

3.2.3 – Módulo HX711

O HX711 (Figura 18) é um circuito amplificador e conversor analógico-digital projetado especificamente para leitura de células de carga. Ele é capaz de detectar pequenas variações de peso com alta resolução e se comunica com o Arduino por meio de uma interface digital.

Figura 18 –Módulo HX711.



Fonte: Site de compras Arduino&eletrônica. Disponível em: <https://arduinoeeletronica.com.br> , 2025.

Cada plataforma deve contar com um módulo HX711 dedicado, permitindo medições independentes.

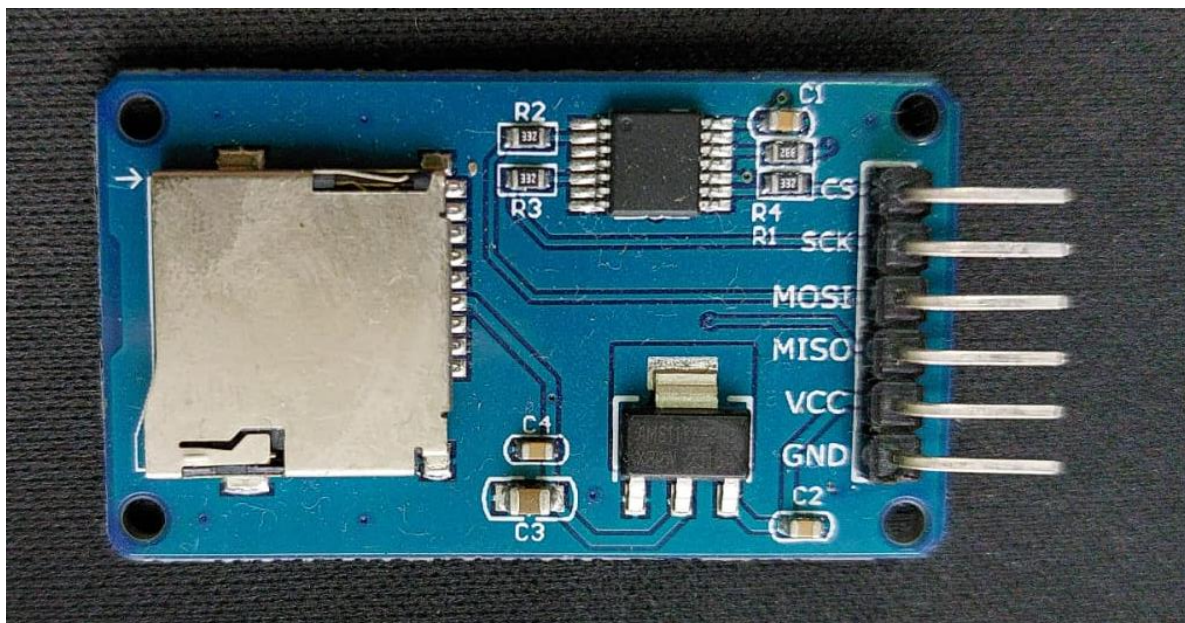
3.2.4 – Armazenamento de Dados

A coleta de dados é feita por meio de um módulo microSD (Figura 19), conectado ao Arduino através do protocolo SPI (*Serial Peripheral Interface*). Esse protocolo utiliza os seguintes sinais:

- MOSI: dados do Arduino para o cartão;
- MISO: dados do cartão para o Arduino;
- SCK: sinal de clock;
- CS: seleção do dispositivo.

As medições são salvas em arquivos .txt, permitindo análises futuras com *softwares* como Excel ou MATLAB.

Figura 19 – Módulo de cartão SD.



Fonte: Registro fotográfico do autor, 2025.

3.3. Funcionamento e Esquemática do Sistema

3.3.1 – Circuito e Conexões

As células de carga são interligadas entre si e aos pinos de excitação (E+ e E-) e a leitura (A+ e A-) do HX711.

O Canal A do HX711, com ganho programável, é utilizado para as leituras. O Canal B, com ganho fixo é destinado a aplicações menos sensíveis e não é utilizado.

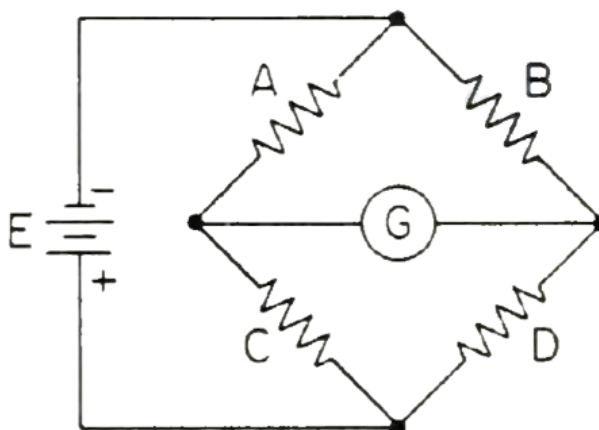
O HX711 é equipado com um multiplexador de entrada que alterna entre os canais diferenciais A e B. O Canal A, usado nas medições com células de carga, possui ganho programável de 128 ou 64, adequado para sinais de até ± 20 mV ou ± 40 mV. Já o Canal B tem ganho fixo de 32, sendo indicado para aplicações menos exigentes. O HX711 também conta com um regulador interno de alimentação, dispensando componentes externos e simplificando o circuito. (SPARKFUN ELECTRONICS, [s.d.])

A célula de carga precisa de uma tensão de excitação para funcionar corretamente, fornecida pelos pinos E+ e E- do módulo HX711. Essa tensão permite gerar um sinal proporcional ao peso aplicado, que será amplificado e convertido. (SPARKFUN ELECTRONICS, [s.d.])

As células são conectadas a um circuito de forma que possa detectar as variações quando os extensômetros sofrem deformações por compressão ou tração. Os fios de sinais da célula de carga (vermelho) são ligados ao canal A (medição) e ao canal E (excitação) do módulo HX711, e os fios negativo e positivos das células são interligados. (COOPER; HELFRICK, 1985).

Para captar essa variação, as células de carga foram interligadas em uma configuração semelhante à ponte de *Wheatstone*, com os pinos de excitação e medição posicionados de forma equivalente à fonte e ao galvanômetro da Figura 20. O módulo HX711 amplifica esse sinal e o converte em dados digitais para leitura. (ALCIATORE; HISTAND, 2012).

Figura 20 – Ponte de *Wheatstone*



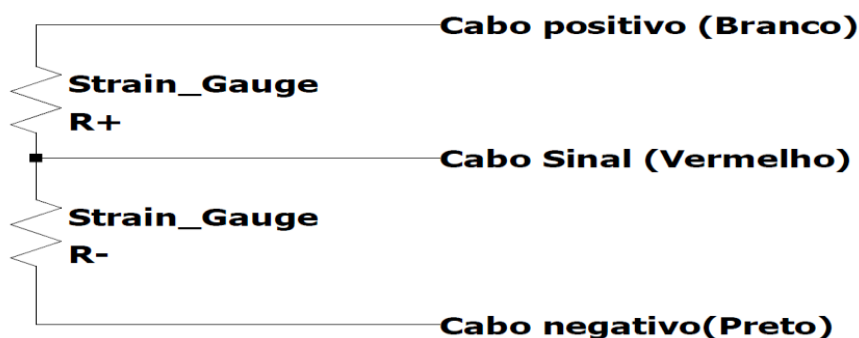
Fonte: COOPER; HELFRICK, (1985)

3.3.2 – *Resumo Esquemático*

Cada célula de carga é composta por dois *strain gauges* posicionados nas estruturas flexíveis; para facilitar a compreensão, esses *strain gauges* são considerados resistores comuns

na esquematização. Dessa forma, cada célula de carga pode ser representada como dois resistores com três conexões: o cabo negativo, o cabo positivo e o cabo de sinal, localizado entre os resistores, conforme ilustrado na Figura 21.

Figura 21 – Esquemática da célula de carga e os *strain gauges*.



Fonte: Elaborada pelo autor no LTspice®, 2025.

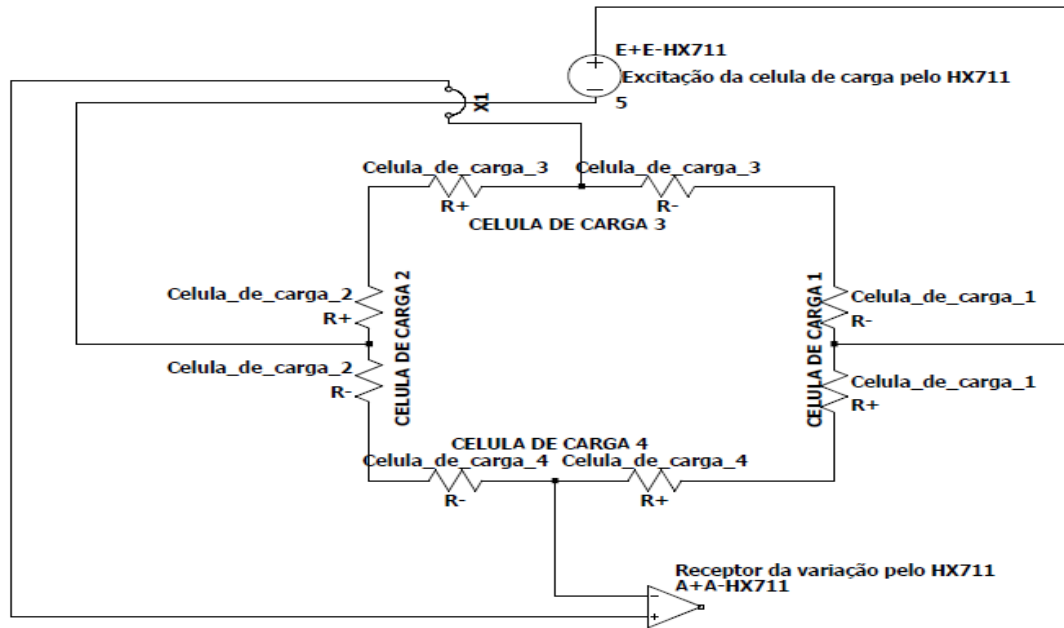
A Figura 22 apresenta uma representação aproximada das conexões entre as células de carga e os terminais de excitação (E+ e E-) e do canal diferencial (A+ e A-) do módulo HX711, configurando a ponte de *Wheatstone*.

As quatro células de carga são interligadas formando uma ponte de *Wheatstone* completa, o que permite a medição da deformação por meio do equilíbrio elétrico dessa configuração. Nesse arranjo, as células são conectadas de forma a maximizar a sensibilidade do sistema, ao mesmo tempo em que minimizam interferências externas. A ponte converte pequenas alterações na resistência dos *strain gauges* em uma tensão diferencial, que é amplificada pelo módulo HX711 para posterior processamento pelo Arduino.

Reinterpretando a Figura 20, os terminais de excitação do HX711 (E+ e E-) correspondem à fonte da ponte de *Wheatstone*, enquanto o canal diferencial (A+ e A-) funciona como o elemento de medição, equivalente ao galvanômetro da imagem. As resistências A, B, C e D são formadas pelos pares de *strain gauges* das células de carga com sinais semelhantes; por exemplo, a resistência A é composta pelos *strain gauges* positivos das células de carga 2 e 3.

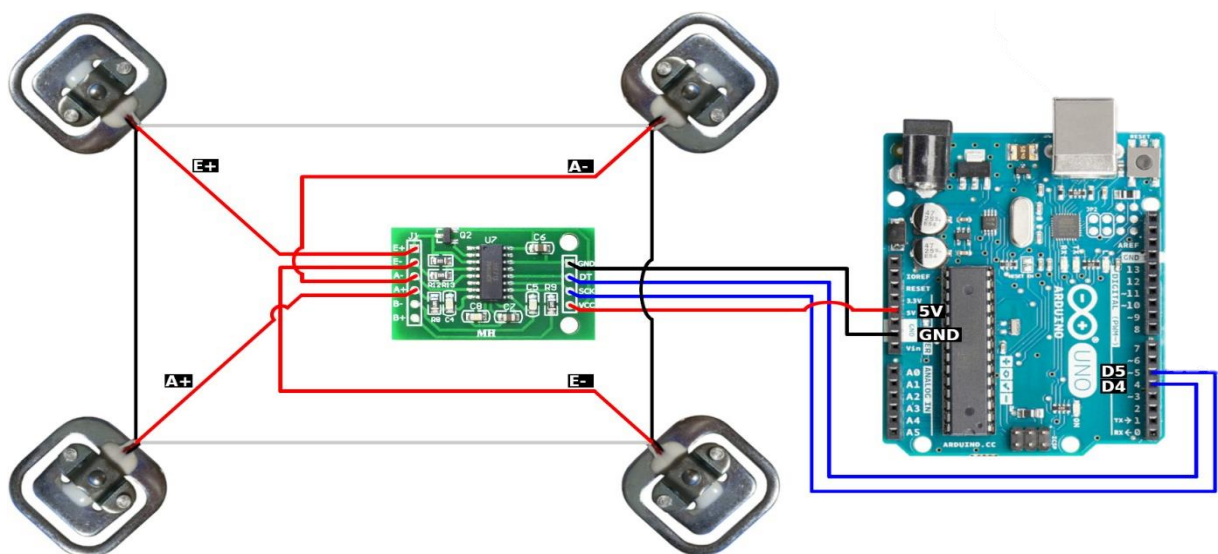
Por fim, a Figura 23 apresenta o diagrama completo do sistema, evidenciando a interligação entre as células de carga, o módulo HX711 e o Arduino.

Figura 22 – Esquemática das conexões com as células de carga, semelhante a ponte de *Wheatstone* e o HX711



Fonte: Elaborada pelo autor no LTspice®, 2025.

Figura 23 – Esquemática do projeto com as células de carga, o HX711 e um Arduino.



Fonte: Adaptado de CIRCUIT JOURNAL, [s.d.]

3.3.3 – Processamento dos Dados

O Arduino realiza leituras contínuas dos sinais, processando as informações para posterior armazenamento. A análise dos dados permite:

- Identificação dos instantes de impacto;
- Avaliação do comportamento dinâmico do sistema;
- Estudo da repetibilidade das medições;
- Estimativas de tempo de resposta e calibração.

3.3.4 – Influência da Estrutura Física e número de células

As placas de MDF garantem rigidez e transferência uniforme da carga às células. A dimensão da plataforma influencia diretamente a resolução espacial:

- Placas menores: maior precisão, porém maior custo;
- Placas maiores: menor custo por área, porém menor precisão posicional.

A utilização de quatro células de carga por plataforma oferece maior estabilidade, precisão e amplitude de medição; no entanto, é possível utilizar um número reduzido de células, desde que a configuração do circuito seja adaptada à nova topologia.

4. RESULTADOS

Nos resultados apresentados, destaca-se inicialmente o processo de calibração da balança. Após a calibração, foi realizado um teste prático com dois usuários, em que se observou que a balança possui uma resposta dinâmica lenta, que compromete sua eficácia em situações de caminhada normal.

Para contornar essa limitação, foi desenvolvido um algoritmo que processa os dados coletados e permite estimar o peso em um tempo menor. Os dados foram tratados e suavizados, e os sinais processados foram comparados com os reais para validar a estimativa. A partir disso, foram definidos critérios para contagem de passos e estimativa de energia piezoelétrica.

4.1. Calibração

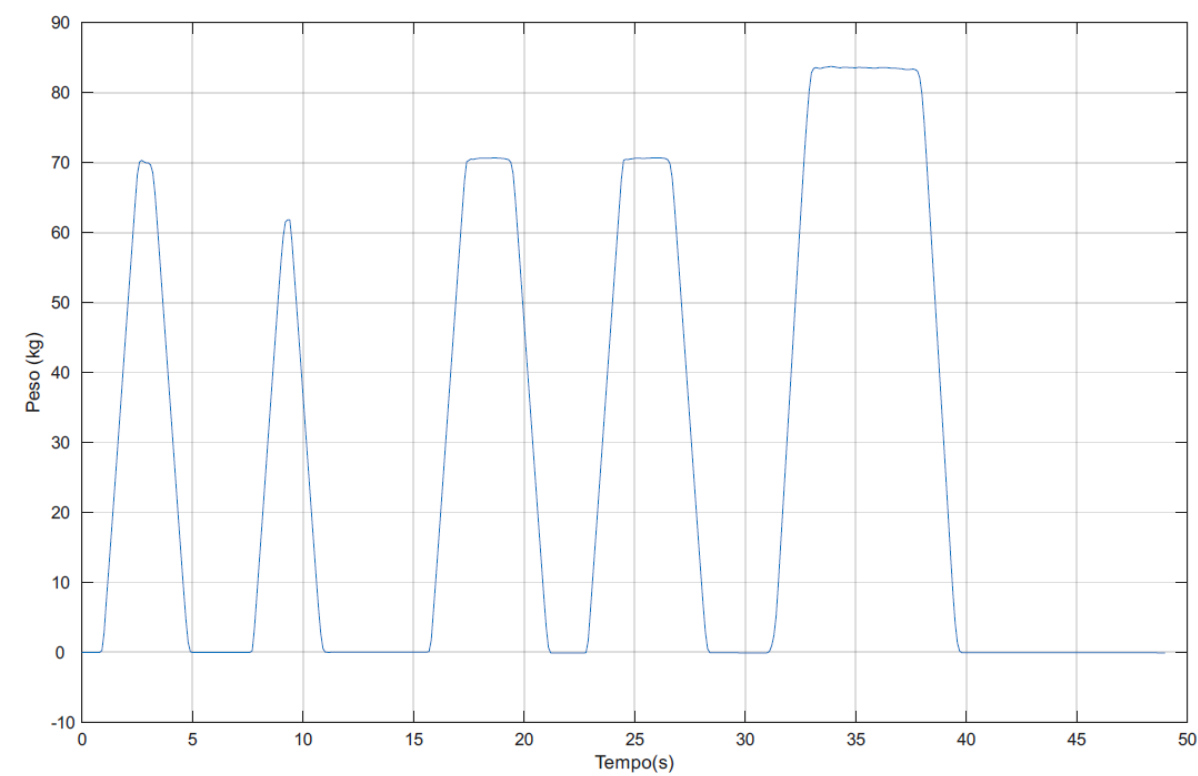
Para o funcionamento da balança, como um todo, utiliza-se o código 2 (ver apêndice), que realiza dois processos principais: a amostragem de dados e a calibração.

Após a realização da tara, em que se remove todo o peso da estrutura para zerar a leitura da célula de carga, aplica-se um peso conhecido sobre a balança para realizar a calibração. O valor desse peso é informado pelo usuário via monitor serial, e, a partir da diferença entre a leitura com peso e o valor zerado, calcula-se o fator de calibração, que indica quantas unidades brutas equivalem a um grama. Esse fator é armazenado na EEPROM, permitindo que o sistema mantenha a calibração mesmo após ser desligado. A relação entre leitura e peso segue uma equação linear.

4.2. Coleta de dados

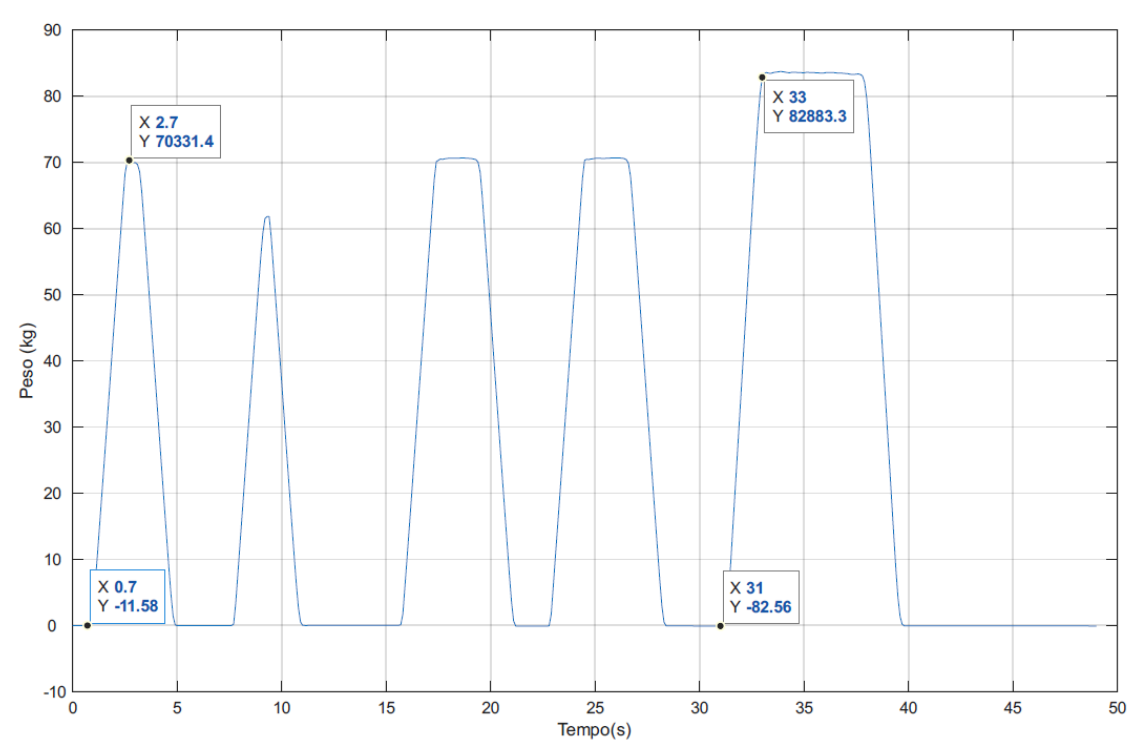
Foi utilizada uma frequência de amostragem de 10 Hz para a coleta dos dados. Após a calibração, realizou-se um teste prático com dois voluntários, pesando 70 kg e 83 kg, respectivamente, que se revezaram ao subir sobre a balança. O primeiro voluntário realizou quatro subidas, variando os tempos de permanência, enquanto o segundo realizou uma única subida. No total, foram registrados cinco passos com diferentes durações.

Figura 24 – Gráfico do sinal obtido do protótipo.



Fonte: Elaborada pelo autor no Matlab®, 2025.

Figura 25 – Gráfico do sinal com os tempos de subida.



Fonte: Elaborada pelo autor no Matlab®, 2025.

Conforme observado nas Figuras 24 e 25, a balança apresentou uma dinâmica lenta. Para que o sistema estabilizasse no peso final da pessoa, foi necessário que o usuário permanecesse sobre a balança por mais de 2 segundos. Esse tempo corresponde a um passo muito lento, o que comprometeria a eficácia do sistema em situações de caminhada normal. No segundo passo, em que o tempo sobre a balança foi mais curto, o sistema não conseguiu medir o peso da pessoa.

4.3. Tratamento dos dados

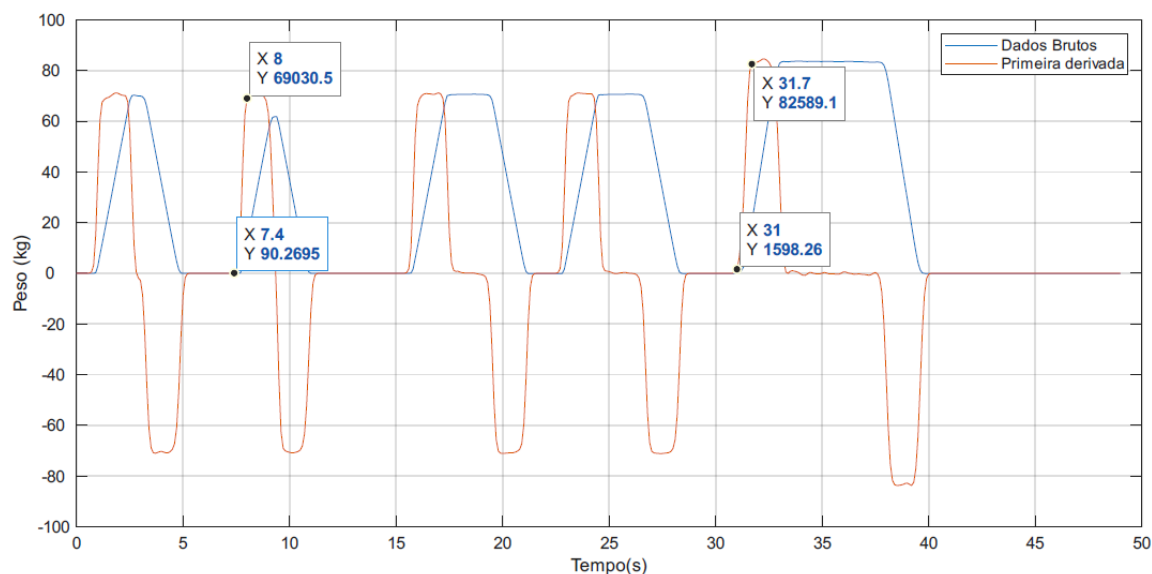
Foi observado um comportamento de reta na saída do sensor quando uma pessoa sobe na balança e que a inclinação dessa reta é proporcional ao peso da pessoa. Colocando em números para comparativo, foi possível observar que, mesmo com o aumento do peso aplicado (por exemplo, de aproximadamente 70 kg para 83 kg, um acréscimo de 13 kg), o tempo de subida do sinal permanece em torno de 2 segundos. Nota-se também a presença de pequenos distúrbios na balança, decorrentes da instabilidade da ponte de *Wheatstone* causada por pequenas diferenças ôhmicas entre os *strain gauges*. Apesar disso, o ruído é baixo, permanecendo abaixo de 100 g, como observado nos dois pontos que deveriam indicar zero, mas apresentaram essa variação.

O comportamento da subida indica que a dinâmica do sistema é mantida, mas a taxa de variação do sinal durante a subida se altera significativamente. Ou seja, diferentes massas resultam em diferentes inclinações na curva de subida, o que se traduz em diferentes taxas de variação. Assim, o sistema pode interpretar essas variações como uma forma de estimar, de maneira mais rápida, a massa da pessoa sobre a balança.

O objetivo desse algoritmo é compensar a dinâmica lenta de resposta do sensor, que naturalmente apresenta um tempo de estabilização. A estratégia adotada consiste em calcular a primeira derivada do sinal (Figura 26).

Como foi observado experimentalmente, cada valor de peso gera uma curva com inclinação característica. Assim, ao identificar a inclinação (ou taxa de variação) da subida, é possível estimar com boa precisão o peso final, mesmo antes de o sistema atingir sua estabilização completa.

Figura 26 – Gráfico da primeira derivada do sinal.



Fonte: Elaborada pelo autor no Matlab®, 2025.

Além disso, para melhorar a precisão e robustez da estimativa, foi implementado um filtro na derivada para suavizar ruídos e variações abruptas do sinal, bem como na segunda derivada (ou derivada da derivada), que auxilia na detecção de inflexões e transições mais bruscas no perfil da curva.

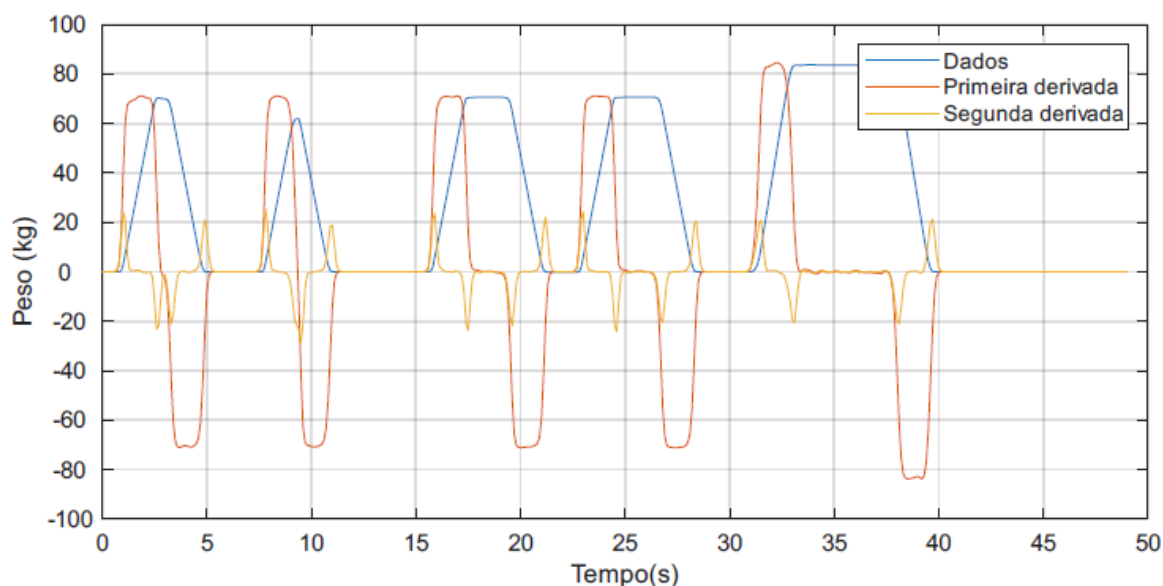
Para que a derivada se aproximasse do valor real do peso, foi necessário calibrar um fator de proporcionalidade. Dividiu-se o valor real do peso pela média da derivada durante a subida. Esse número foi utilizado como fator de escala no código para multiplicar os valores da derivada, permitindo que o sistema antecipasse uma estimativa do peso.

Observando apenas a primeira derivada do sinal, é possível identificar, a balança já chegou no peso final da pessoa por volta de 0,5 segundo, que a primeira pessoa, com aproximadamente 69 kg, realizou quatro passos com durações variadas. O quinto passo, por sua vez, foi realizado por uma segunda pessoa, com cerca de 83 kg, utilizando um tempo diferente dos anteriores.

Entretanto, por se tratar de uma célula de carga a resposta é relativamente lenta, tanto a entrada (pisada) quanto a saída (retirada do pé) não são imediatamente refletidas no valor bruto lido. Por isso, definiu-se que o tempo de queda (saída da balança) também deveria

ser tratado com cuidado. A fim de tornar a transição mais precisa, utilizou-se também a segunda derivada como recurso auxiliar (Figura 27).

Figura 27 – Gráfico do sinal da balança e suas derivadas.



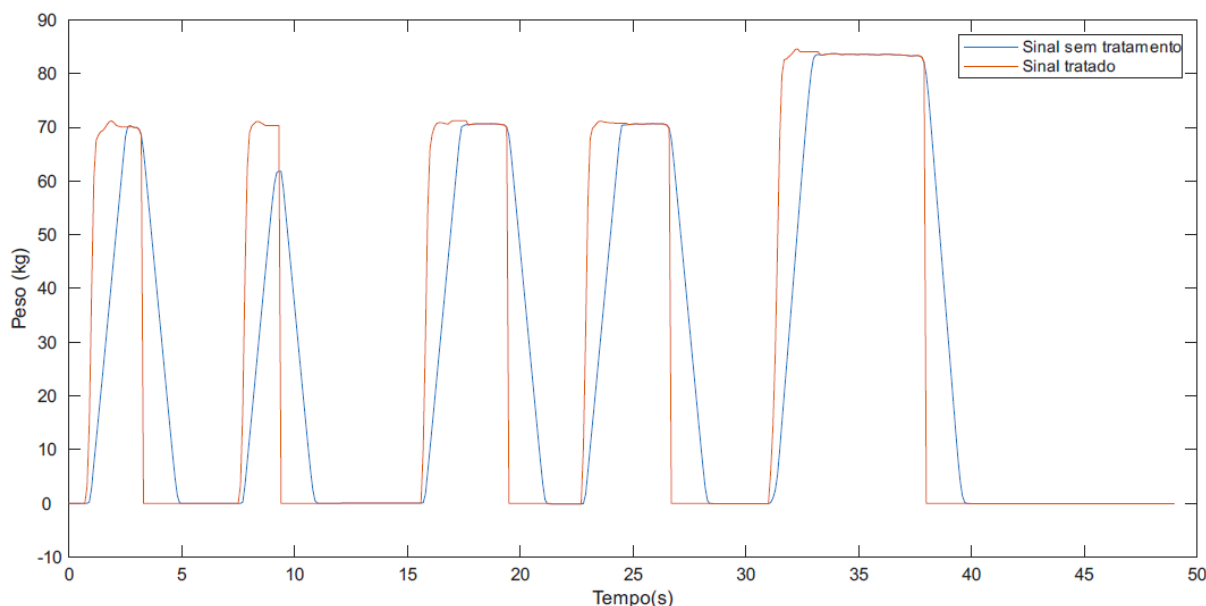
Fonte: Elaborada pelo autor no Matlab®, 2025.

Durante a subida, enquanto a primeira derivada é positiva e a segunda derivada também é positiva, entende-se que o peso ainda está sendo aplicado, mas o valor bruto da balança ainda não alcançou o nível correspondente. Neste caso, o valor da derivada corrigida é utilizado como peso estimado.

Quando a primeira derivada continua positiva, mas a segunda derivada se torna negativa, o sistema reconhece o início da estabilização — a balança aproxima-se do valor real, e os dados brutos passam a ser mais confiáveis, porém ainda não é o valor do peso, logo se mantém o último valor lido pela derivada, já que esse valor agora estará em queda, permanecerá até que a derivada se torne negativa.

Quando a primeira derivada se torna negativa, interpreta-se que o usuário iniciou a saída da balança, e o peso deve ser considerado igual a zero.

No final dessa programação, se cria algo próximo a um degrau, com tempo de subida próximos a 0,5 segundo e tempo de queda a 0,1 segundo, como mostra a Figura 28, no peso corresponde do pedestre e com o tempo corresponde ao tempo da força exercida sobre a balança, gerando assim um dado robusto, onde se torna a criação de uma formula baseada nessa amostra para possível geração de energia piezoelétrica.

Figura 28 – Gráfico final do sinal com tratamento.

Fonte: Elaborada pelo autor no Matlab®, 2025.

4.4. Exemplificando a utilização dos dados para o modelo Pavegen V3

Após a calibração do sistema e com o Arduino já conectado, o projeto começa a medir o peso com uma precisão de aproximadamente $\pm 1\text{kg}$, o que é adequado para o funcionamento do sistema. Para facilitar a contagem de passos e a estimativa da geração piezoelétrica, também pode-se definir um intervalo de peso mínimo e máximo para a ida e volta, considerando como um passo qualquer variação de peso que ultrapasse 50 kg e volte para pelo menos 30 kg.

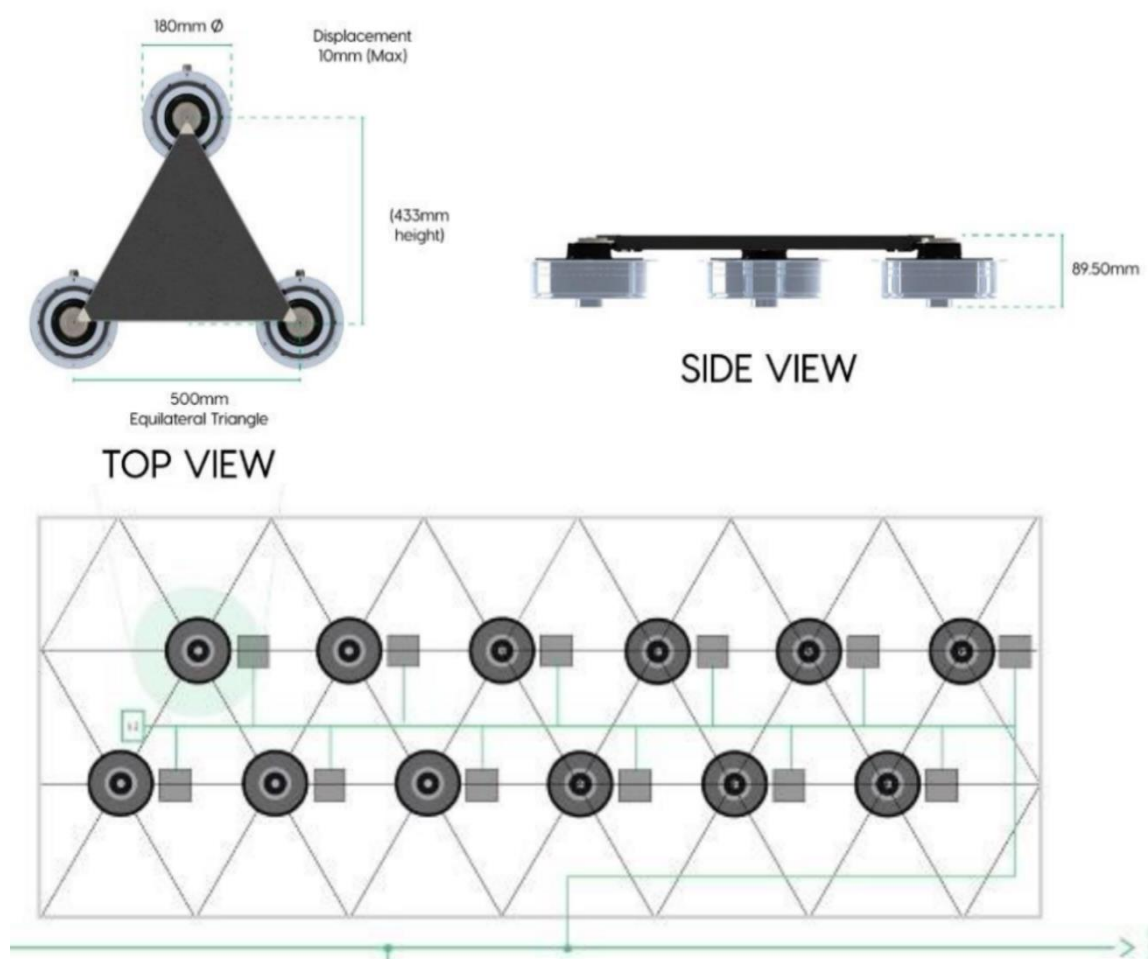
A empresa britânica Pavegen desenvolve um sistema de piso que utiliza o princípio da piezoelectricidade para geração de energia. O modelo V3 desse piso é capaz de produzir até 5 watts de potência a cada pisada.

O custo de um módulo da Pavegen está em torno de 75 a 160 dólares por pé quadrado, equivalente a aproximadamente entre 800 a 1700 dólares por metro quadrado. A empresa oferece tanto instalações fixas quanto móveis, embora os valores mencionados não incluam despesas com transporte dos equipamentos.

Com base nisso, pode-se calcular a quantidade de energia gerada por hora (W/h), utilizando uma especulação piezoelétrica exclusivamente para o modelo V3. Vale ressaltar que

o sistema continuará registrando os dados dos mapas de força exercida na microrregião, permitindo também a criação de um mapa de força para diferentes modelos de geração piezoelétrica ou demais atividades.

Figura 29 – Esquemática modelo de ladrilhos piezoelétricos V3 PAGEVEN.



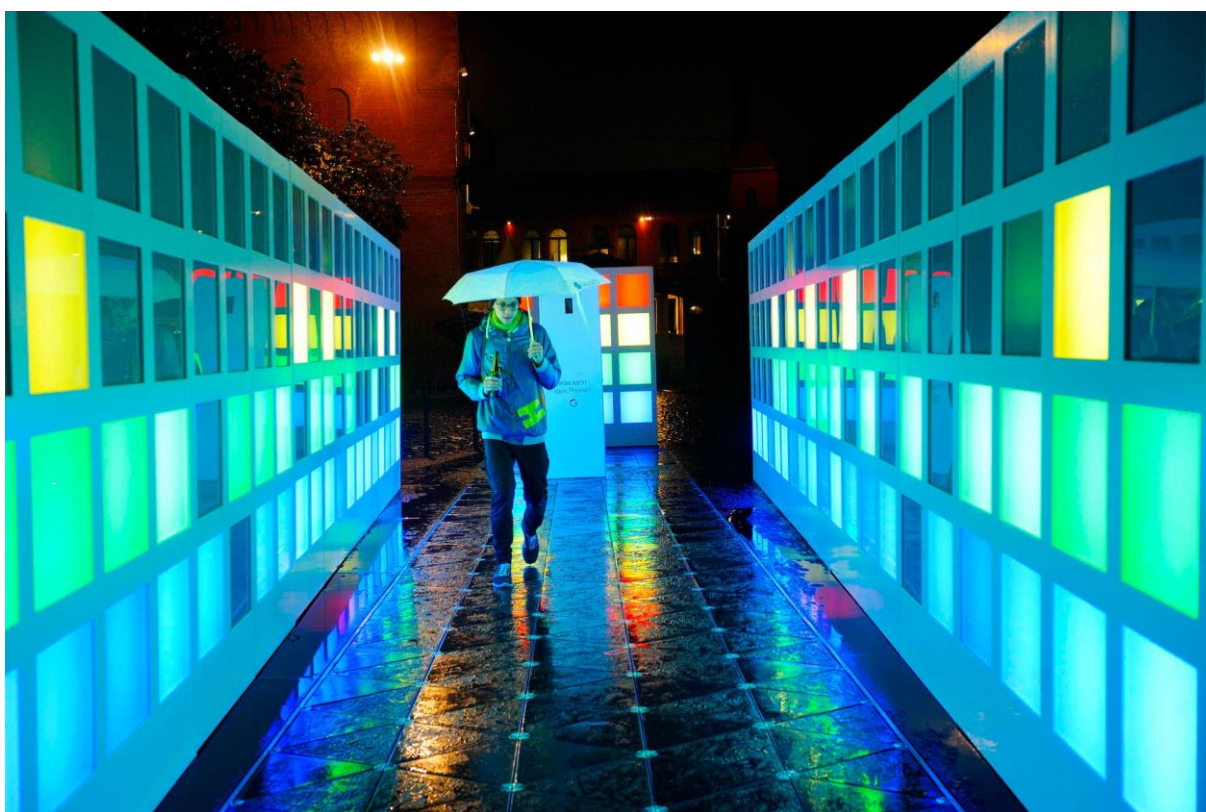
Fonte: Adaptado de PAVEGEN, [s.d.]

A Pavegen não distribui informações sobre um valor exato e fixo para o tempo o qual a potência de 5 W é mantida por pisada, pois isso varia conforme o peso da pessoa e o design da instalação do piso. No entanto, para fins de estimativa, uma pisada típica é suficiente

para gerar a quantidade de energia fora da rede necessária para acender uma lâmpada de LED pequena por aproximadamente 20 segundos, segundo a empresa.

Se a lâmpada de LED pequena consome, por exemplo, 0,5 W (potência típica de uma LED pequena), então: $0,5 \text{ W} * 20 \text{ s} = 10 \text{ J} / 5 \text{ W} = 2 \text{ s}$. A potência de 5 W criada por uma pisada é mantida por cerca de 2 segundos.

Figura 30 – Modelo de ladrilhos piezoelétricos V3 PAGEVEN com LEDs.



Fonte: PAVEGEN, [s.d.]

Também é importante considerar que a geração de energia piezoelétrica ocorre apenas durante os movimentos de subida e descida (compressão e liberação) sobre o cristal piezoelétrico — ou seja, o tempo em que a pessoa permanece parada sobre a superfície não contribui para a produção energética.

Utilizando o Pavegen V3 como referência e com base na análise do gráfico gerado, foram identificados quatro passos de uma pessoa com aproximadamente 70 kg e um passo de outra com cerca de 80 kg. Considerando que cada passo gera, em média, 5 W, ou como estima-se uma energia total 10 J por passo, independentemente do intervalo de tempo. Isso pode gerar

cerca de 50 J durante o teste com os 5 passos. Sabemos que 1Wh é 3600 J, a geração do teste fica por volta de $50/3600$ aproximadamente 0,0139Wh.

Essa produção energética se refere à geração pontual na área onde o módulo está instalado. Quanto menor e mais localizada for a célula de detecção (como no caso de uma balança experimental), maior será a resolução espacial da medição e, conseqüentemente, melhor será a definição do mapa de fluxo de pessoas a ser construído com base nos dados.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo principal analisar e implementar um sistema de medição de pressão capaz de fornecer dados para a estimativa da geração de energia piezoelétrica e para a contagem de passos, utilizando sensores.

Durante a fase de seleção dos sensores, foram avaliadas tecnologias promissoras. A célula de carga, apesar de apresentar menor precisão, mostrou-se adequada para validar o conceito e atender aos requisitos básicos do sistema proposto, com um custo acessível.

A construção do protótipo e a coleta dos dados permitiram demonstrar a viabilidade de um sistema acessível para monitoramento de pressão em plataformas, com potencial aplicação na estimativa de energia piezoelétrica e contagem de fluxo de pessoas. O trabalho também oferece informações para comparações entre diferentes tecnologias de sensores, servindo como base para decisões em projetos semelhantes.

No entanto, algumas limitações comprometeram a abrangência dos resultados obtidos:

- Quantidade reduzida de testes, devido ao curto intervalo entre a elaboração do texto e o desenvolvimento do protótipo, a quantidade de testes realizados foi limitada, o que restringiu a profundidade da análise estatística e comprometeu a robustez das conclusões obtidas;
- Construção de apenas uma plataforma de medição, impossibilitando a verificação de variações entre dispositivos;
- Ausência de testes em locais com circulação real de pedestres, o que impediu a validação do sistema em condições práticas de uso;

Apesar dessas limitações, os objetivos propostos foram atingidos, e o sistema demonstrou ser funcional e tecnicamente viável para aplicações básicas de monitoramento e análise de pressão.

Para dar continuidade a esta linha de pesquisa e aprimorar o sistema desenvolvido, recomenda-se:

- Ampliar a quantidade de balanças instaladas, visando aumentar a resolução espacial das medições e permitir a identificação mais precisa do fluxo de pessoas em cada faixa da via analisada;
- Implementar a matriz FSR em versões futuras do sistema, com o objetivo de melhorar a precisão das medições e a qualidade dos dados coletados;
- Realizar a instalação dos protótipos em locais com circulação real de pedestres, possibilitando a obtenção de dados em condições práticas de operação e maior representatividade estatística;
- Explorar novas arquiteturas eletrônicas e algoritmos de filtragem de sinais, buscando compensar as limitações dos sensores;
- Realizar uma análise de viabilidade econômica com base nos dados coletados em um ambiente real e nos modelos de geração piezoelétrica disponíveis para compra, de forma a avaliar o retorno real de um potencial investimento em um ambiente urbano.

6. REFERÊNCIAS

ACHÃO, C. C. L.; MATOS, R. A. S.; SOARES, F. K.; LOUREIRO, L. S. S. M. Balanço Energético Nacional 2016. Brasília: Empresa de Pesquisa Energética, 2016. Disponível em <http://www.cbdb.org.br/informe/img/63socios7.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2023.

AGUIRRE, Luis Antonio. *Fundamentos de Instrumentação*. Pearson, 2013. 354 p.

ALCIATORE, David G.; HISTAND, Michael B. ***Introduction to Mechatronics and Measurement Systems***. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2012.

ARDUINO&ELETRONICA. *Módulo HX711 com amplificador para célula de carga*. Disponível em: <https://www.arduinoeeletronica.com.br/modulo-hx711>. Acesso em: 12 jul. 2025.

CALLISTER, William D. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

CASTRO, Thiago; SOUZA, Mônica Maria Martins de. Direito ambiental e créditos de carbono. In: *Anais do II Seminário Internacional de Integração Étnico-Racial e as Metas do Milênio*, 2015, v. 1, n. 2, p. 139-155. Disponível em: https://ojs.eniac.com.br/index.php/Anais_Sem_Int_Etn_Racial/article/view/252. Acesso em: 13 mar. 2025.

CHOI, J.; YIM, D.; CHO, S. People counting based on an IR-UWB radar sensor. *IEEE Sensors Journal*, v. 17, p. 5717-5727, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2723766>. Acesso em: 18 out. 2024.

CIRCUIT JOURNAL. 50kg Load Cells with HX711. Disponível em: <https://circuitjournal.com/50kg-load-cells-with-HX711>. Acesso em: 28 abr. 2025.

COOPER, William D.; HELFRICK, Albert D. *Electronic Instrumentation and Measurement Techniques*. 3. ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1985. 466 p.

DALLY, J. W.; RILEY, W. F. *Experimental Stress Analysis*. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1991.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Anuário Estatístico de Energia Elétrica* 2025. Rio de Janeiro: EPE, 2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>. Acesso em: 08 ago. 2025.

FRADEN, Jacob. *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*. 3. ed. New York: Springer, 2003.

GUERREIRO, Amílcar. *Notas do seminário tecnologias energéticas do futuro: novas perspectivas energéticas, eficiência energética e regulação*. Curitiba, 2006.

HAYT JR., William H. *Eletromagnetismo*. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (Ipea). *Revista Planejamento e Políticas Públicas (PPP)*, n. 68, dez. 2023. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/16872> . Acesso em: 13 mar. 2025.

JÄHNE, Bernd; HAUSSECKER, Horst; GEIßLER, Peter (Orgs.). *Handbook of computer vision and applications: from images to features*. v. 1. San Diego: Academic Press, 1999.

JUNG, Inki; SHIN, Youn-Hwan; KIM, Sangtae; CHOI, Ji-young; KANG, Chong-Yun. *Flexible piezoelectric polymer-based energy harvesting system for roadway applications*. Republic of Korea 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.04.020> . Acesso em: 13 mar. 25.

JUNG, Jinwoo; LEE, Kihak; KIM, Bonghwan. Precision Calibration and Linearity Assessment of Thin Film Force-Sensing Resistors. *Departamento de Engenharia de Robótica, Universidade Católica de Daegu*, Gyeongsan-si, República da Coreia, 38430, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/16/6859> . Acesso em: 13 mar. 2025.

MAKKI, Noaman; POP-ILIEV, Remon. Piezoceramic benders attached to pneumatic tires use the cyclic deformation of the contact patch to generate energy for onboard electronics. University of Ontario, 2011.

MANYYEAR TECHNOLOGY CO., LTD. *MLC902 Bobby Scale Flat Load Cell*. Shenzhen: Manyyear Technology, [s.d.]. Disponível em: <https://www.manyyear.com/mlc902-bobby-scale-flat-load-cell/>. Acesso em: 15 abr. 2025.

MARGOLIS, Michael. *Arduino Cookbook*. 1. ed. Sebastopol, CA: O'Reilly Media, 2011.

MAZZAROPPI, Marcelo. *Sensores de Movimento e Presença*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica), UFRJ, 2007.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME. Relatório de gestão do exercício de 2016. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/aceso-a-informacao/auditorias/processo-de-contas-anuais/Contas%20Anuais/Relatorio%20De%20Gestao%20EPE%20-%202016.pdf>. Acesso em: 18 de ago. 2022.

MOHEIMANI, S. O. Reza; FLEMING, Andrew J. *Piezoelectric Transducers for Vibration Control and Damping*. Berlin: Springer, 2006.

MORRIS, Alan S. *Measurement and Instrumentation Principles*. 3. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001.

NASCIMENTO, R. L. *Energia solar no Brasil: situação e perspectivas*. Brasília: Câmara dos Deputados, 2017.

de OLIVEIRA, A. P. M., FUGANHOLI, N. S., CUNHA, P. H. de S., BARELLI, V. A., BUNEL, M. P. M. e NOVAZZI, L. F. (2018) “Análise técnica e econômica de fontes de energia renováveis”, *The Journal of Engineering and Exact Sciences*. Viçosa/MG, BR, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.18540/jcecvl4iss1pp0163-0169> . Acesso em: 18 de ago. 2022.

PAVEGEN. Pavegen: Geração de energia piezoelétrica a partir do movimento humano. Pavegen. 2025. Disponível em: <https://www.pavegen.com>. Acesso em: 28 abr. 2025.

PERLINGEIRO, Antônio Ramos; PIMENTA, Gilberto Maia; SILVA, Salviano Evaristo. *Geração de energia através de materiais piezoelétricos*. 2016. Projeto final (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca – CEFET/RJ, Rio de Janeiro, 2016.

ROGGIA, Leandro; CARDOZO FUENTES, Rodrigo. *Automação industrial*. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 2016. 102 p.

SCHLEGL, T.; SEEBÖCK, P.; WALDSTEIN, S.; SCHMIDT-ERFURTH, U.; LANGS, G. Unsupervised anomaly detection with generative adversarial networks to guide marker discovery. In: *IPMI 2017: Information Processing in Medical Imaging*, 2017.

SOUZA, Andréa de; GUERRA, Jorge Carlos Correa; KRUGER, Eduardo Leite. Os programas brasileiros em eficiência energética como agentes de reposicionamento do setor elétrico. *Revista Tecnologia e Sociedade*, 2011. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/2571> . Acesso em: 03 mar.2025.

SPARKFUN ELECTRONICS. HX711 Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales. Disponível em: https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/hx711_english.pdf. Acesso em: 28 abr. 2025. SPARKFUN ELECTRONICS. *HX711 24-Bit Analog-to-*

THOMAZINI, Daniel; ALBUQUERQUE, Pedro U. B. *Sensores Industriais – Fundamentos e Aplicações*. 5. ed. São Paulo: Érica, 2005. 222 p.

WILSON, Jon S. (Ed.-Chefe). *Sensor Technology Handbook*. Burlington, MA: Newnes, 2005.

APÊNDICES

Código 1 – Código para contagem de passos e energia gerada para o PAVEGEN V3

```
// Variáveis para contagem de passos e cálculo de energia
int stepCount = 0;

long previousWeight = 0; // Armazena o peso anterior para verificar a variação
bool isCounting = false; // Flag para saber se a contagem está ativa
float powerPerStep = 5.0; // Potência gerada por passo (em watts)
float totalEnergy = 0.0; // Energia total gerada (em watts)

void loop() {
  static boolean newDataReady = 0;
  const int serialPrintInterval = 0; //aumente o valor para desacelerar a atividade de impressão serial

  // check for new data/start next conversion:
  if (LoadCell.update()) newDataReady = true;

  // get smoothed value from the dataset:
  if (newDataReady) {
    if (millis() > t + serialPrintInterval) {
      float currentWeight = LoadCell.getData();
      Serial.print("Load_cell output val: ");
      Serial.println(currentWeight);
      newDataReady = 0;
      t = millis();

      // Verifique se o valor passou de 50.000 e voltou para 30.000
      if (previousWeight <= 50000 && currentWeight > 50000) {
        isCounting = true; // Começa a contar quando passar de 50.000
      }
      else if (isCounting && previousWeight >= 30000 && currentWeight < 30000) {
        stepCount++; // Conta o passo quando voltar para abaixo de 30.000
        Serial.print("Step Count: ");
        Serial.println(stepCount);

        // Calcula a energia gerada (energia = número de passos * potência por passo)
        totalEnergy = stepCount * powerPerStep;
        Serial.print("Total Energy Generated: ");
        Serial.print(totalEnergy);
      }
    }
  }
}
```

```

    Serial.println(" W");

    isCounting = false; // Interrompe a contagem até o próximo ciclo
}

// Atualiza o peso anterior
previousWeight = currentWeight;
}
}

// receive command from serial terminal
if (Serial.available() > 0) {
    char inByte = Serial.read();
    if (inByte == 't') LoadCell.tareNoDelay(); //tare
    else if (inByte == 'r') calibrate(); //calibrate
    else if (inByte == 'c') changeSavedCalFactor(); //edit calibration value manually
}

// check if last tare operation is complete
if (LoadCell.getTareStatus() == true) {
    Serial.println("Tare complete");
}
}

```

Código 2 – Código do Arduino para a célula de carga, calibração + dados

```

#include <HX711_ADC.h>
#if defined(ESP8266) || defined(ESP32) || defined(AVR)
#include <EEPROM.h>
#endif // Inclui as bibliotecas

const int HX711_dout = 4;
const int HX711_sck = 5; // Pinos de conexão com o HX711

HX711_ADC LoadCell(HX711_dout, HX711_sck); // Criação do objeto LoadCell

const int calVal_eeepromAdress = 0;
const int tareOffset_eeepromAdress = sizeof(float); // endereço após o fator

unsigned long t = 0;
float eeepromCalFactor;
long eeepromTareOffset;

```

```

void setup() {
  Serial.begin(57600);
  delay(10);
  Serial.println();
  Serial.println("Iniciando...");

  #if defined(ESP8266) || defined(ESP32)
    EEPROM.begin(512);
  #endif

  EEPROM.get(calVal_eeepromAdress, eeepromCalFactor);
  EEPROM.get(tareOffset_eeepromAdress, eeepromTareOffset);

  Serial.print("Fator de calibração restaurado da EEPROM: ");
  Serial.println(eeepromCalFactor);

  Serial.print("Valor da tara restaurado do EEPROM: ");
  Serial.println(eeepromTareOffset);

  LoadCell.begin();
  LoadCell.start(2000, false); // NÃO faz tara automática
  LoadCell.setCalFactor(eeepromCalFactor);
  LoadCell.setTareOffset(eeepromTareOffset);

  if (LoadCell.getTareTimeoutFlag() || LoadCell.getSignalTimeoutFlag()) {
    Serial.println("Erro: verifique os fios e pinos do HX711.");
    while (1);
  }

  while (!LoadCell.update());
  Serial.println("Sistema pronto.");
}

void loop() {
  static boolean newDataReady = 0;
  const int serialPrintInterval = 100;

  if (LoadCell.update()) newDataReady = true;

  if (newDataReady && millis() > t + serialPrintInterval) {
    float i = LoadCell.getData();
    Serial.println(i);
  }
}

```

```

    newDataReady = 0;
    t = millis();
}

if (Serial.available() > 0) {
    char inByte = Serial.read();
    if (inByte == 't') salvarTara();
    else if (inByte == 'r') calibrar();
    else if (inByte == 'c') alterarCalibracaoManual();
}
}

void salvarTara() {
    Serial.println("Realizando tara...");
    LoadCell.tareNoDelay();

    while (!LoadCell.getTareStatus()) {
        LoadCell.update();
    }

    long novoOffset = LoadCell.getTareOffset();

    #if defined(ESP8266) || defined(ESP32)
        EEPROM.begin(512);
    #endif

    EEPROM.put(tareOffset_eepromAdress, novoOffset);
    #if defined(ESP8266) || defined(ESP32)
        EEPROM.commit();
    #endif

    Serial.print("Tara concluída e salva na EEPROM: ");
    Serial.println(novoOffset);
}

void calibrar() {
    Serial.println("Iniciando calibração...");
    Serial.println("Retire todos os pesos da célula...");

    delay(3000); // Tempo para retirar os pesos

    Serial.println("Realizando tara automaticamente...");

```

```

LoadCell.tare(); // Aguarda a finalização
Serial.println("Tara concluída.");

long novoOffset = LoadCell.getTareOffset();

#if defined(ESP8266) || defined(ESP32)
  EEPROM.begin(512);
#endif
  EEPROM.put(tareOffset_eepromAdress, novoOffset);
#if defined(ESP8266) || defined(ESP32)
  EEPROM.commit();
#endif
  Serial.print("Tara salva na EEPROM: ");
  Serial.println(novoOffset);

  Serial.println("Coloque um peso conhecido e envie seu valor (ex: 100.0)");

float pesoConhecido = 0;
bool pronto = false;
while (!pronto) {
  LoadCell.update();
  if (Serial.available() > 0) {
    pesoConhecido = Serial.parseFloat();
    if (pesoConhecido != 0) {
      Serial.print("Peso conhecido: ");
      Serial.println(pesoConhecido);
      pronto = true;
    }
  }
}

LoadCell.refreshDataSet();
float novoCal = LoadCell.getNewCalibration(pesoConhecido);

Serial.print("Novo fator de calibração: ");
Serial.println(novoCal);
Serial.println("Deseja salvar na EEPROM? (y/n)");

pronto = false;
while (!pronto) {
  if (Serial.available() > 0) {
    char inByte = Serial.read();

```

```

    if (inByte == 'y') {
#if defined(ESP8266) || defined(ESP32)
        EEPROM.begin(512);
#endif
        EEPROM.put(calVal_eeepromAddress, novoCal);
#if defined(ESP8266) || defined(ESP32)
        EEPROM.commit();
#endif
        Serial.print("Fator de calibração ");
        Serial.print(novoCal);
        Serial.println(" salvo na EEPROM.");
        pronto = true;
    } else if (inByte == 'n') {
        Serial.println("Fator de calibração não salvo.");
        pronto = true;
    }
}

LoadCell.setCalFactor(novoCal);
}

void alterarCalibracaoManual() {
    float antigoCal = LoadCell.getCalFactor();
    Serial.print("Fator atual: ");
    Serial.println(antigoCal);
    Serial.println("Digite o novo fator de calibração:");

    float novoCal;
    bool pronto = false;
    while (!pronto) {
        if (Serial.available() > 0) {
            novoCal = Serial.parseFloat();
            if (novoCal != 0) {
                LoadCell.setCalFactor(novoCal);
                pronto = true;
            }
        }
    }

    Serial.print("Salvar novo fator ");
    Serial.print(novoCal);

```

```

Serial.println(" na EEPROM? (y/n)");

pronto = false;
while (!pronto) {
  if (Serial.available() > 0) {
    char inByte = Serial.read();
    if (inByte == 'y') {
#ifdef defined(ESP8266) || defined(ESP32)
      EEPROM.begin(512);
#endif
      EEPROM.put(calVal_eeepromAdress, novoCal);
#ifdef defined(ESP8266) || defined(ESP32)
      EEPROM.commit();
#endif
      Serial.print("Fator ");
      Serial.print(novoCal);
      Serial.println(" salvo na EEPROM.");
      pronto = true;
    } else if (inByte == 'n') {
      Serial.println("Novo fator não salvo.");
      pronto = true;
    }
  }
}
}
}

```

Código 3 – Código tratamento de dados

```

a=dados.peso;
t=(0:length(a)-1) * 0.1;
%plot(t,a)
hold on
d = [0;16.0588*diff(a)];
[bf,af] = butter(1,0.4);
d = filtfilt(bf,af,d);
dd = [0;diff(d)];
p = a;
aux=p(1);
for i = 1:length(p)
  if(d(i)>2000&&dd(i)>-500)
    p(i) = d(i);
    aux = p(i);
  end
end

```

```
if(d(i)>2000&&dd(i)<=-500)
    p(i) = aux;
end
if(d(i)<=-2000&&aux-p(i)>2000)
    p(i) = 0;
end
end
plot(t,p)
%plot(t,d)
%plot(t,dd)
```