

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA
FONSECA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA**

**BEATRICE SOUZA BITENCOURT
MARIA EDUARDA GARCIA MENDES**

**ESTUDO DE CONTROLE DINÂMICO PARA MAXIMIZAÇÃO DE
GERAÇÃO DE ENERGIA POR IMPACTOS UTILIZANDO
MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

RIO DE JANEIRO

2025

BEATRICE SOUZA BITENCOURT
MARIA EDUARDA GARCIA MENDES

**ESTUDO DE CONTROLE DINÂMICO PARA MAXIMIZAÇÃO DE
GERAÇÃO DE ENERGIA POR IMPACTOS UTILIZANDO
MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica, do
Departamento de Engenharia
Mecânica, do Centro Federal de
Educação Tecnológica Celso Suckow da
Fonseca.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cesar da
Camara Monteiro Júnior

RIO DE JANEIRO

2025

- B624 Bitencourt, Beatrice Souza
Estudo de controle dinâmico para maximização de geração de energia por impactos utilizando materiais piezoelétricos / Beatrice Souza Bitencourt [e] Maria Eduarda Garcia Mendes – 2025.
65f : il. (algumas color.) ; enc.
- Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2025.
Bibliografia: f. 64-65.
Orientadora: Paulo Cesar da Camara Monteiro Junior.
1. Engenharia mecânica. 2. Geração de energia. 3. Energia – Fontes alternativas. 4. Sistemas não-lineares. I. Mendes, Maria Eduarda Garcia. II. Monteiro Júnior, Paulo Cesar da Camara (Orient.). III. Título.

CDD 620.1

Dedicamos este trabalho às nossas famílias, por todo apoio ao longo dessa jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos de Beatrice Souza Bitencourt

Primeiramente agradeço a Deus pela permissão de chegar ao final dessa trajetória.

Um agradecimento especial aos meus pais Washington Luís Bitencourt e Cristina Souza Bitencourt que diariamente me incentivam e me apoiam. Sem eles não teria sido capaz de chegar até aqui.

Gostaria de deixar registrado também, minha gratidão a minha avó Maria de Lourdes de Jesus e a toda a minha família pelo apoio ao longo de toda minha vida acadêmica.

Agradeço ao meu namorado Lucas Andrade Cunha dos Anjos pelo seu companheirismo e amor. A jornada até aqui foi mais leve por tê-lo em minha vida.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Paulo Cesar da Camara Junior pela dedicação e paciência durante todo processo de confecção do presente trabalho. Sou muito grata pelos conhecimentos adquiridos e pela oportunidade ímpar de tê-lo como orientador.

Agradeço a prof. Dra. Luciana Loureiro da Silva Monteiro por todo apoio ao longo da confecção deste trabalho.

Agradeço a Maria Eduarda Garcia Mendes, minha companheira de projeto final, pela troca e pela amizade durante essa caminhada.

Agradeço ao CEFET/RJ por disponibilizar o laboratório LASEI para a realização dos experimentos.

Agradeço pelos amigos que fiz ao longo da graduação, pois eles fizeram a minha experiência dentro da universidade ser incrível.

Agradecimentos de Maria Eduarda Garcia Mendes

Agradeço a Deus, que me concedeu força, sabedoria e serenidade para enfrentar cada desafio desta caminhada, que foi marcada por aprendizados, obstáculos e superações que me fizeram crescer como pessoa e como profissional.

À minha mãe, Renata Garcia, e à minha avó, Maria Emilia Garcia, que sempre foram meu alicerce e exemplo de amor, coragem e dedicação. Aos meus irmãos, Bernardo e Gabriel, que são minha fonte constante de ânimo. À minha família como um todo, pelo apoio incondicional ao longo dessa trajetória.

Ao meu marido, Renan, pelo amor, paciência, companheirismo e força que me sustentaram mesmo nos momentos mais difíceis.

À minha companheira de projeto final, Beatrice, por ter dividido comigo essa jornada com tanta parceria, comprometimento e amizade.

Aos amigos que fiz ao longo do curso, que tornaram essa caminhada mais leve e divertida, e que levo comigo para além da graduação.

Ao meu fiel companheiro Chico, que, com sua presença nos dias e noites de estudo, trouxe mais cor, alegria e afeto à minha vida.

Expresso minha sincera gratidão ao meu orientador, Professor Dr. Paulo Cesar Câmara Junior, por toda dedicação, paciência e orientação cuidadosa, que foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho. À Professora Dra. Luciana Loureiro da Silva Monteiro, pela colaboração, apoio e partilha de conhecimento durante essa etapa.

Ao CEFET/RJ, instituição que me permitiu realizar o sonho de seguir esta profissão, e ao laboratório LASEI, por disponibilizar a estrutura necessária para a fabricação do dispositivo e a realização dos experimentos.

A todos que, de alguma forma, fizeram parte desta conquista, meu mais sincero muito obrigada.

O desejo profundo da humanidade pelo conhecimento é justificativa suficiente para nossa busca contínua.

(HAWKING, Stephen, 2015)

RESUMO

BITENCOURT, Beatrice Souza e MENDES, Maria Eduarda Garcia. **Estudo de Controle Dinâmico para Maximização de Energia por Impactos utilizando Materiais Piezoelétricos**. 2025. 66 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2025.

A utilização de materiais piezoelétricos para colheita de energia apresenta-se como uma solução viável e eficiente em sistemas que demandam baixa potência ou tensão para o seu funcionamento, especialmente em cenários onde fontes de energia convencionais não estão disponíveis ou apresentam desafios significativos, como alto custo de implementação, baixa durabilidade ou dificuldades de acesso e manutenção. Essas características tornam essa tecnologia particularmente atrativa em setores como as indústrias de óleo e gás e aeroespacial, onde a operação em ambientes extremos é comum, como por exemplo para a alimentação do sensoriamento contínuo de sistemas, que são essenciais para garantir o monitoramento em tempo real de variáveis críticas, como pressão, temperatura e vazão, assegurando o desempenho e a segurança das operações. Para viabilizar esse monitoramento, é indispensável uma fonte de energia confiável e contínua, que permita tanto a aquisição dos dados quanto sua transmissão. Este trabalho busca explorar essa necessidade por meio do desenvolvimento de um dispositivo de geração de energia baseado em materiais piezoelétricos, visando a definição dos parâmetros ideais a serem definidos para uma possível operação de forma autônoma em condições adversas. O objetivo é oferecer futuramente uma alternativa eficaz às fontes de alimentação convencionais. Por isso, o estudo inclui o projeto e desenvolvimento de um dispositivo para fins experimentais, bem como a sua otimização buscando maximizar a geração de energia e ampliar a sua aplicabilidade. A proposta apresentada visa contribuir para o avanço das tecnologias de geração de energia sustentável e autônoma.

Palavras-chave: Piezoelectricidade. Energia. Choque. Tensão. Potência.

ABSTRACT

BITENCOURT, Beatrice Souza e MENDES, Maria Eduarda Garcia. **Study of Dynamic Control for Energy Maximization through Impact Using Piezoelectric Materials**. 2025. 66 pages. Final Course Work – Federal Center of Technological Education - Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2025.

The use of piezoelectric materials for energy harvesting presents itself as a viable and efficient solution in systems that require low power or voltage to operate, especially in scenarios where conventional energy sources are unavailable or pose significant challenges, such as high implementation costs, low durability, or difficulties in access and maintenance. These characteristics make this technology particularly attractive in sectors such as the oil and gas industry and the aerospace sector, where operation in extreme environments is common. For example, it can be used to power continuous system monitoring, which is essential to ensure real-time tracking of critical variables such as pressure, temperature, and flow, thereby guaranteeing operational performance and safety. To enable such monitoring, a reliable and continuous power source is indispensable, allowing both data acquisition and transmission. This work seeks to address this need through the development of an energy generation device based on piezoelectric materials, aiming to define the ideal parameters for potential autonomous operation under adverse conditions. The objective is to ultimately offer an effective alternative to conventional power sources. Therefore, the study includes the design and development of a device for experimental purposes, as well as its optimization to maximize energy generation and expand its applicability. The proposed approach aims to contribute to the advancement of sustainable and autonomous energy generation technologies.

Keywords: Piezoelectricity. Energy. Impact. Voltage. Power.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Estrutura do material piezoelétrico: (A) Estado natural, (B) Sob compressão, (C) Sob Tração.....	24
Figura 2- Sistema de referência.....	25
Figura 3- Fabricação de piezoelétrico sintético: Antes, durante e após polarização	27
Figura 4- Atuação por choque no piezoelétrico	30
Figura 5- Projeto do sistema mecânico de colisões	31
Figura 6- Mecanismo de transformação do movimento circular em linear.....	31
Figura 7- Motor de passo, suporte e material piezoelétrico.	32
Figura 8- Suporte do material piezoelétrico.	32
Figura 9- Impressora 3D.....	33
Figura 10- Montagem do sistema mecânico.....	33
Figura 11- Esquemático de funcionamento do sistema.....	34
Figura 12- Controlador e Driver do motor HT23-401	35
Figura 13- Caixa de suporte do controlador com driver	36
Figura 14- NI-CDAQ-9174	36
Figura 15- NI-9220	37
Figura 16- Piezoelétrico polimérico	38
Figura 17- Taxa de aquisição de dados	40
Figura 18- Ferramenta de filtro para obter a média.....	41
Figura 19- Banco de resistores.....	42
Figura 20- Posição 0 mm	44
Figura 21- Posição 5 mm	45
Figura 22- Potência x tempo para resistências de 10 a 100k Ω	47
Figura 23- Potência x tempo para resistências de 4 a 30 Ω	48
Figura 24- Potência média x resistência de 4 a 30 Ω	48
Figura 25- Tensão x tempo para resistência de 10 a 100k Ω	49
Figura 26- Tensão x tempo para resistências de 10k a 100k Ω	50
Figura 27- Tensão média x Resistência de 10k a 100k Ω	50
Figura 28- Potência média x velocidade de rotação para um circuito sem resistência	51
Figura 29- Potência média x frequência de impacto para um circuito com 100k Ω de resistência	52
Figura 30- Potência média x frequência de impacto para um circuito com 5 Ω de resistência	53
Figura 31- Tensão média x frequência de impacto para um circuito sem resistência	53
Figura 32- Tensão média x frequência de impacto para um circuito com 100k Ω de resistência	54

Figura 33- Tensão média x frequência de impacto para um circuito com 5 Ω de resistência	55
Figura 34- Potência média x deslocamento para circuito sem resistência.....	56
Figura 35- Potência média x deslocamento para circuito com resistência de 100k Ω	57
Figura 36- Potência média x deslocamento para circuito com resistência de 5 Ω	57
Figura 37- Tensão média x deslocamento para circuito sem resistência .	58
Figura 38- Tensão média x deslocamento para circuito com resistência de 100k Ω	59
Figura 39- Tensão média x deslocamento para circuito com resistência de 5 Ω	59

LISTA DE SIGLAS

E_i	Campo elétrico
S_i	Deformação mecânica
D_i	Deslocamento elétrico
e	Erro
K_p	Ganho proporcional
K_i	Ganho integral
K_d	Ganho derivativo
ϵ_{ij}	Permissividade
PID	Proporcional Integral Derivativo
t	Tempo
T	Tempo de integração
T_i	Tensão mecânica
PZT	Titanato de Zirconato de Chumbo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVO	15
1.2 ORGANIZAÇÃO	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA - ESTADO DA ARTE	17
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
3.1 MATERIAIS INTELIGENTES	23
3.2 A PIEZOELETRICIDADE	23
3.3 EFEITO DIRETO E INVERSO	24
3.4 EQUAÇÕES CONSTITUTIVAS	25
3.5 MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS SINTÉTICOS	26
3.6 EQUAÇÕES GERAIS DA ELETRICIDADE BÁSICA	27
3.6.1 Tensão elétrica (V)	27
3.6.2 Potência elétrica (P)	27
3.7 CASAMENTO DE IMPEDÂNCIA	28
3.8 MÉDIA RMS	28
4 METODOLOGIA	29
4.1 PROJETO E FABRICAÇÃO DO DISPOSITIVO	29
4.2 PARÂMETROS EXPERIMENTAIS	38
4.2.1 Aquisição e tratamento de dados	40
4.2.1 Ensaios de variação de resistência elétrica	41
4.4.2 Ensaios de variação da frequência dos impactos	43
4.4.3 Ensaios de variação de distância entre o atuador e o piezoelétrico	43
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
5.1 RESULTADOS	46
5.1.1 Testes de variação das resistências	46
5.1.2 Testes de variação das frequências de impactos	51
5.1.3 Testes de variação da distância entre o material piezoelétrico e o atuador	55
5.2 DISCUSSÃO	60
6 CONCLUSÃO	61
APÊNDICE A –	66

Capítulo 1

1 INTRODUÇÃO

A busca por novas fontes de energia limpa tem ganhado destaque no cenário energético global e nacional, como uma alternativa essencial para atender às necessidades das futuras gerações e mitigar os impactos ambientais associados às fontes fósseis de energia. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), projeta-se que o consumo de energia no Brasil aumente 16,89% no período de 2016 a 2026. Esse aumento na demanda energética segue um padrão observado em escala mundial, reforçando a urgência de soluções sustentáveis.

Nesse contexto, as fontes alternativas de energia surgem como uma escolha estratégica, devido ao seu baixo impacto ambiental e potencial para suprir a crescente demanda energética. O conceito de Energy Harvesting refere-se ao processo de captura, conversão e armazenamento de energia limpa, sendo uma abordagem que busca não apenas explorar novas fontes, mas também otimizar o uso dos recursos atuais por meio de métodos mais eficientes.

A geração de energia utilizando materiais inteligentes é um campo de estudo que remonta à sua descoberta em 1880 e, ao longo das décadas, tem ganhado ampla atenção na comunidade acadêmica. Entre essas tecnologias, destaca-se a utilização de materiais piezoelétricos, que possuem a capacidade de converter energia mecânica em energia elétrica e vice-versa. Essa propriedade única torna os materiais piezoelétricos uma alternativa promissora para o desenvolvimento de soluções inovadoras no campo da geração de energia sustentável.

Um dos desafios na geração de energia a partir de vibrações utilizando materiais piezoelétricos é a ocorrência de variações nas frequências de vibração ao longo do tempo. Para maximizar o rendimento do sistema gerador, é fundamental que sua frequência natural esteja sincronizada com a frequência da fonte, alcançando a condição de ressonância. No entanto, a falta de sintonia entre essas frequências pode comprometer significativamente a eficiência do sistema. Uma solução para esse problema é transformar o gerador, geralmente

caracterizado como um sistema de banda estreita, em um sistema de banda larga. Essa adaptação pode ser realizada ajustando a distância do atuador que possa causar impactos intermitentes em diferentes frequências em relação ao elemento piezoelétrico, o que resulta em diferentes níveis de dissipação de energia. Embora esse ajuste possa reduzir a energia gerada em determinadas condições, ele permite que o sistema opere eficientemente em uma faixa mais ampla de frequências, evitando a perda de sintonia e garantindo uma performance mais consistente.

1.1 OBJETIVO

A proposta deste trabalho é desenvolver um estudo para um sistema autônomo de geração de energia, que seja capaz de se adaptar dinamicamente às mudanças nos padrões de oscilação das fontes de vibração. Para isso, o objetivo principal é alcançar as máximas potência e tensão geradas, enquanto se assegura a preservação do equipamento, evitando que amplitudes excessivas resultem em danos ou em perdas de desempenho devido à atenuação inadequada. Essa abordagem visa não apenas melhorar a eficiência energética, mas também aumentar a confiabilidade e a vida útil do sistema.

Para alcançar esses objetivos, o trabalho será estruturado em duas frentes principais, que serão desenvolvidas de forma concomitante. A primeira frente envolve o projeto, fabricação e montagem do dispositivo que possa causar impactos intermitentes em elemento piezoelétrico estático, com foco na criação de uma estrutura robusta e eficiente, capaz de operar em diferentes condições de vibração, variando a frequência e intensidade dos impactos através do controle de distância entre o atuador mecânico e o elemento piezoelétrico e frequência de impacto. Essa etapa inclui o dimensionamento dos componentes, a escolha de materiais e a análise das características dinâmicas do sistema, considerando a interação entre os elementos mecânicos e piezoelétrico.

A segunda frente concentra-se na realização de experimentos, com variação de resistência, frequência de impacto e deslocamento, para análise dos parâmetros necessários para maximização da tensão e potência geradas, a fim de, futuramente, obter-se o desenvolvimento de um sistema de controle de desempenho, projetado para monitorar e ajustar continuamente o comportamento do gerador em resposta às variações das condições de

vibração. O projeto futuro inclui a implementação de algoritmos de controle e sistemas de monitoramento que otimizem a operação do dispositivo em tempo real, mesmo em cenários de ampla variabilidade.

Ao integrar essas duas frentes de trabalho, espera-se alcançar um sistema eficiente, adaptável e confiável, capaz de contribuir significativamente para o avanço das tecnologias de geração de energia sustentável baseadas em materiais piezoelétricos.

1.2 ORGANIZAÇÃO

O trabalho desenvolvido é formalizado no decorrer do presente texto, o qual contém seis capítulos e um apêndice. No capítulo de introdução são apresentados: uma contextualização do tema, a relevância e o impacto da pesquisa para a maximização da geração de energia por meio de colisões em materiais piezoelétricos e os objetivos gerais e específicos da pesquisa.

No capítulo 2, capítulo de revisão bibliográfica, evidenciando diferentes trabalhos pertinentes ao tema de pesquisa em foco. No capítulo 3, buscou-se realizar a fundamentação teórica de materiais piezoelétricos através da definição das propriedades e aplicações de materiais piezoelétricos, a descrição dos princípios físicos que explicam a conversão de energia mecânica em elétrica nesses materiais e métodos para otimização da produção de energia.

No capítulo 4, capítulo da metodologia, apresenta-se os métodos e os materiais para a confecção do sistema experimental, bem como a metodologia usada para a realização dos experimentos.

O capítulo de resultados e discussão, capítulo 5, contém os resultados alcançados e a interpretação dos experimentos, para possível aplicação em um sistema de controle.

O capítulo 6, capítulo da conclusão, resume os tópicos mais importantes do presente texto, as principais conclusões obtidas por meio do capítulo de resultados e discussões e os passos futuros da atual pesquisa. Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas para confecção do presente trabalho. E, posteriormente, o apêndice com os desenhos técnicos do projeto mecânico.

Capítulo 2

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA - ESTADO DA ARTE

Embora tenha havido especulações de que Coulomb foi o primeiro a sugerir a possibilidade de geração de eletricidade por meio da aplicação de pressão em um material específico, foi apenas em 1880, com os irmãos Pierre e Jacques Curie, que a piezoelectricidade foi oficialmente investigada. Eles descobriram que, ao aplicar pressão em um cristal de quartzo, geravam-se cargas elétricas em sua superfície.

A piezoelectricidade (do grego *piezein*, que significa 'pressionar') é a propriedade de certos materiais de gerar uma diferença de potencial elétrico quando submetidos a pressão mecânica. Esses materiais são capazes de gerar cargas elétricas ao sofrerem deformações mecânicas, assim como apresentam o efeito inverso, em que uma polarização elétrica induz uma deformação mecânica. No Capítulo 3, será realizada uma análise mais detalhada dessa fundamentação teórica.

Apesar da piezoelectricidade ter sido descoberta em 1880, foi somente após a Segunda Guerra Mundial que essa propriedade passou a ser amplamente explorada. Esse aumento no interesse deve-se aos avanços tecnológicos da época e à crescente demanda por dispositivos mais precisos e sensíveis. Durante o conflito, os materiais piezoeletricos demonstraram grande utilidade, especialmente em sensores de ultrassom e na geração de ondas acústicas, sendo empregados em sonares, detecção de submarinos e radares. Após a guerra, as pesquisas sobre piezoelectricidade foram ampliadas para diversas áreas, e, atualmente, esses materiais são amplamente aplicados no cotidiano, em produtos como guitarras, relógios, isqueiros e acelerômetros. Além disso, têm desempenhado um papel crucial na área da saúde, sendo usados em diagnósticos médicos e odontológicos.

Andrade et al. (1991) discutem as aplicações analíticas dos cristais piezoeletricos, destacando sua utilização em diversas áreas da química analítica desde o início dos anos 90, com ênfase especial em sensores. Os autores propõem a integração de múltiplos sensores, permitindo a correção de interferências por meio da análise das respostas e das diferentes capacidades

dos sensores combinados. Além disso, a obra apresenta possibilidades promissoras para o uso futuro dos materiais piezoelétricos, sugerindo um grande potencial de expansão em diversas áreas.

Williams e Yates (1996) perceberam a dificuldade na época da pesquisa em fornecer energia para microssistemas remotos que não possuem conexão com a rede elétrica, principalmente em casos em que o uso de bateria não se mostra viável. Diante disso, os autores desenvolveram um microgerador de energia que utiliza um material piezoelétrico. O microgerador desenvolvido pelos autores gera eletricidade a partir da diferença de potência promovida pela deflexão do material piezoelétrico, por intermédio da vibração do microgerador. Os resultados analíticos calculados pelos autores mostravam que a maximização da produção energética ocorre para maiores níveis de deflexões do material piezoelétrico e para maiores frequências de vibração. O modelo proposto estima que para um dispositivo cuja deflexão é de 50 μm a geração energética é de 0,1mW para uma frequência vibratória de 330 Hz. Além disso, os autores perceberam que para frequências menores a geração de energia reduzia significativamente.

Teixeira (2007) apresenta o uso do material piezoelétrico como atuador que regula um amortecedor ativo de vibrações que pode ser usado desde um sistema hidráulico até a uma perna mecânica. Para validação da eficiência do amortecedor proposto o autor acopla um amortecedor a um pequeno circuito hidráulico em que em seu meio possui dois foles flexíveis de tamanho variado. Diante da vibração dos foles dessa suspensão o fluido em seu interior é forçado através de um orifício de tamanho ajustável. Segundo o autor, o sistema piezoelétrico ajusta o tamanho do orifício por intermédio de um controlador PID, gerando assim o amortecimento do sistema. Além dos ensaios experimentais com excitações impulsivas e harmônicas o autor realizou a discretização do modelo, por meio do método de elementos finitos. Como resultado o autor observou o bom desempenho do amortecedor tendo em vista o baixo tempo de resposta do controlador, para obter esse baixíssimo tempo de resposta o controlador varia o coeficiente de amortecimento da suspensão.

Guistina et al. (2014) analisou o comportamento de vigas mono engastadas de materiais compósitos piezoelétricos a partir do Método Modificado da Função de Green Local (MMFGL). O autor avaliou laminados com

até três camadas, para cada um dos laminados foram feitos o cálculo analítico e comparados com o método MMFGL com 4 refinamentos de malha diferentes. Os resultados numéricos mostraram que o aumento do número de camadas reduz o deslocamento máximo obtido e o bom desempenho do Método Modificado da Função de Green Local para avaliação de problemas eletromecânicos.

Diante da ineficácia dos sistemas de controle nas baixas frequências sonoras, Pereira (2016) estudou a aplicabilidade de materiais piezoelétrico na absorção de ruído ativo com o objetivo de ultrapassar esse entrave. Na pesquisa a autora desenvolveu um dispositivo piezoelétrico para absorver ruído ativo por meio da interferência destrutiva da onda sonora. Na construção do dispositivo a autora aplicou dois tipos de controlador: manual e integral, objetivando maximizar o coeficiente de absorção sonora do dispositivo desenvolvido. Para avaliar a eficiência do dispositivo, a autora realizou testes experimentais e numéricos com o método de elementos finitos (FEA). E, Como resultado, a autora concluiu que o dispositivo desenvolvido, em condições ideais de operação, apresentou uma redução de até 10 dB para frequências sonoras de 500Hz, ou seja, o dispositivo apresentou um coeficiente de absorção sonora de aproximadamente 98%. Portanto, a autora constatou o significativo impacto que materiais piezoelétricos possuem para reduzir os níveis de pressão sonora em uma determinada faixa de frequências do tipo mono tonais.

Freitas et al (2017) apresentaram na pesquisa um dispositivo piezoelétrico acoplado a um Arduino para monitoramento de sistemas vibratórios. Tal dispositivo possui a capacidade de correlacionar a tensão elétrica e pressão mecânica aplicada no material, por meio de um código. Os autores buscavam o desenvolvimento de um sensor capaz de realizar um monitoramento em tempo real. No artigo os autores afirmam que o simples aparato experimental que compõe o dispositivo desenvolvido apresentou limitações relacionadas à segurança dos dispositivos eletrônicos e de estabilidade do sinal. Por exemplo, um dos pontos limitantes é que pode ser gerado danos aos componentes da placa do Arduino devido às elevadas tensões produzidas pelo material piezoelétrico. Outro ponto limitante apresentado foi o a baixa resistência mecânica do piezoelétrico utilizado. No artigo os autores indicaram que até mesmo cargas inferiores a 10 N foram suficientes para trincar o piezoelétrico

utilizado. Além disso, os autores mostraram que avarias no material piezoelétrico reduzem significativamente os sinais emitidos.

Moraes (2018) apontou que a abundante quantidade de energia vibracional a qual diversas estruturas presentes na cadeia industrial estão submetidas pode ser convertida em energia elétrica por meio de materiais piezoelétricos. Porém, a eficiência da conversão da energia vibracional em energia elétrica se mostra um desafio. Diante disso, o autor utilizou um dispositivo piezoelétrico comercial Q220-A4-503YBda Piezo Systems que como uma viga mono engastada para desenvolver um sistema de coleta de energia e gerenciamento de energia vibracional. No artigo o autor constata que há uma potência máxima gerada apenas quando há concordância entre a impedância e a carga. Porém, devido ao dinamismo dos sistemas vibratórios presentes na indústria o autor desenvolveu conversor DC/DC com a função *Maximum Power Point Tracking*. O programa embutido nesse conversor garante a máxima potência independente da carga acoplada apenas mudando a sua impedância. Como resultado o autor constatou que o uso da função MPPT dobrou a potência produzida e manteve a estabilidade para valores de cargas menores.

Massone et al. (2019) investigaram a colheita de energia vibracional por meio de materiais piezoelétricos, destacando os principais desafios para a geração de energia útil. O artigo discute o processo de conversão de vibrações em energia elétrica, apresentando-o como uma fonte promissora. Foram apresentados níveis de vibração que podem ser aproveitados em diversas aplicações, e as conclusões indicam a importância da não linearidade do sistema, que desempenha um papel significativo na eficiência da geração de energia.

Araújo et al. (2020) realizaram um estudo sobre a aplicação de pisos piezoelétricos em locais de grande movimentação, como a Feira dos Importados, a Feira da Torre de TV e a Plataforma Rodoviária de Brasília. O estudo incluiu análises do consumo energético e do custo-benefício nos três locais, que são caracterizados por alto fluxo de pessoas. Os resultados mostraram tanto aspectos positivos quanto negativos. Entre os pontos negativos, destacam-se o baixo fluxo de pessoas em determinados horários e o alto custo do piso. No entanto, em locais com elevado fluxo de pedestres e veículos, a aplicação do

piso piezoelétrico mostrou-se viável, com um custo-benefício favorável que justifica o investimento elevado nos materiais piezoelétricos.

Um estudo publicado por Mota et al. (2021) explora a viabilidade de utilizar pavimentos rodoviários como fonte de geração de energia elétrica, aproveitando a energia mecânica transmitida pelos veículos à sua estrutura por meio do conceito de piezeletricidade. As análises realizadas no artigo indicam que a espessura da célula é a principal variável geométrica que influencia o potencial elétrico gerado, com a duplicação da espessura resultando em um aumento de 120% na tensão gerada. Embora os resultados das análises sejam promissores, os autores, em uma análise financeira preliminar, concluem que o sistema levaria, em média, 25 anos para atingir o retorno do investimento, desconsiderando os custos de instalação e manutenção.

Ferreira et. al (2022) desenvolveram um cerâmico piezoelétrico para atuar como um sensor de detecção de falhas estruturais, por meio do sensoreamento da vibração mecânica de baixa frequência. No artigo, o material usado foi o Titanato de Zirconato de Chumbo (PZT) com óxidos de chumbo, titânio e zircônio. Os autores produziram as pastilhas do material piezoelétrico a partir da moagem dos reagentes, prensagem, calcinação e sinterização da mistura. Posteriormente fizeram ensaios estruturais, microestruturais e dielétricos para averiguar a qualidade das pastilhas produzidas. Por fim, os autores desenvolveram um leitor de sinais com o Arduino Uno R3 para captar os dados gerados pelas pastilhas piezoelétricas. Os resultados obtidos pelos autores mostram que as pastilhas de PZT produzidas se mostram promissoras para o sensoreamento estrutural.

Ceccato et al. (2023) desenvolveram um protótipo de escada revestida com pastilhas piezoelétricas conectadas a uma fita de LED, que se acende sempre que o usuário pressiona as pastilhas ao pisar, aproveitando o efeito piezoelétrico. O objetivo do protótipo é oferecer uma solução para áreas comuns, como cinemas e prédios, proporcionando iluminação eficiente para garantir a segurança do usuário ao caminhar. No entanto, a pesquisa enfrentou uma barreira econômica, pois, ao revestir uma escada de cinema, o custo das pastilhas seria 372% maior do que as tecnologias de iluminação atualmente utilizadas. Apesar disso, a pesquisa apresenta grande potencial para diversas outras aplicações.

Batista de Freitas et al. (2023) investigaram a captação de energia por meio de materiais piezoelétricos, que se apresentam como uma fonte alternativa promissora de energia. O estudo aborda as características desses materiais e apresenta um dimensionamento matemático, utilizado como base para os testes, com o objetivo de obter parâmetros que permitam avaliar a eficiência de diferentes materiais piezoelétricos. A pesquisa analisa aspectos como a área de aplicação, a conexão entre as pastilhas e a melhor forma de aplicação da força, visando otimizar a geração de corrente e tensão, além de buscar aprimoramentos para futuras aplicações.

Arias et al. (2023) propõem um gerador rotacional utilizando transdutores piezoelétricos para a colheita de energia, com uma estrutura física projetada para ser acoplada a um equipamento rotatório. O estudo apresenta uma análise de um modelo matemático desenvolvido anteriormente, cujos resultados simulados auxiliaram no aprimoramento do novo gerador. Este gerador é composto por uma viga equipada com dois transdutores piezoelétricos, cujas tensões geradas são defasadas em 180 graus, otimizando a geração de energia.

Conclui-se que os materiais piezoelétricos desempenham um papel fundamental no desenvolvimento de tecnologias de geração de energia limpa, sendo amplamente estudados devido à sua versatilidade e eficiência. O crescente esforço em pesquisa tem impulsionado avanços significativos, especialmente no que diz respeito à ampliação da aplicabilidade desses dispositivos em condições reais de operação.

Os avanços contínuos na engenharia de materiais, no design de dispositivos e nos sistemas de controle associados têm demonstrado o potencial dos materiais piezoelétricos como uma alternativa viável e sustentável para a geração de energia. Esse campo de pesquisa permanece em expansão, com perspectivas de contribuir significativamente para o avanço das tecnologias de energia renovável, atendendo às demandas energéticas de maneira eficiente e com baixo impacto ambiental.

Capítulo 3

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 MATERIAIS INTELIGENTES

Materiais inteligentes são aqueles que possuem a capacidade de responder de maneira controlada a estímulos externos, como temperatura, pressão, campo elétrico ou magnético, luz e umidade. Essa resposta pode se manifestar de diversas formas, incluindo mudanças em suas propriedades mecânicas, elétricas ou ópticas. Dentre os principais tipos de materiais inteligentes, destacam-se os piezoelétricos, magnetostritivos, memória de forma e eletroativos, que têm aplicações em áreas como engenharia, medicina e automação industrial.

Os materiais piezoelétricos, por exemplo, convertem energia mecânica em elétrica e vice-versa, sendo amplamente utilizados em sensores e atuadores. Já as ligas com memória de forma retornam à sua configuração original quando submetidas a um determinado estímulo térmico. Esses materiais representam um avanço significativo na tecnologia de dispositivos responsivos e adaptáveis, permitindo o desenvolvimento de sistemas mais eficientes e autônomos.

3.2 A PIEZOELETRICIDADE

A piezoelectricidade é uma propriedade presente em determinados materiais cristalinos, resultante da ausência de simetria central em sua estrutura. Essa característica faz com que a célula unitária do material apresente polaridade, ou seja, uma distribuição assimétrica de cargas elétricas em sua rede cristalina. Como consequência, esses materiais possuem dipolos elétricos naturais que reagem a estímulos mecânicos.

Quando um esforço mecânico é aplicado, ocorre um deslocamento interno dos íons na estrutura cristalina, alterando a polarização do material e gerando uma diferença de potencial elétrico entre suas superfícies. Essa conversão direta de energia mecânica em energia elétrica é a base do efeito piezoelétrico e tem diversas aplicações tecnológicas, como sensores, transdutores e sistemas de colheita de energia.

Alguns cristais, como quartzo, turmalina, sal de Rochelle e topázio, apresentam naturalmente o efeito piezoelétrico. No caso do quartzo, sua estrutura atômica é organizada em uma configuração helicoidal ao longo do eixo Z, composta por átomos de oxigênio, que possuem carga negativa, e átomos de silício, com carga positiva, conforme mostra a Figura 1. No plano XY, esses átomos formam um arranjo hexagonal, que, na ausência de tensões externas, mantém uma distribuição de carga total nula. Quando o cristal é submetido a forças de tração ou compressão nas direções X ou Y, ocorre um deslocamento das cargas internas, resultando na geração de cargas elétricas na superfície do material. No entanto, esforços aplicados ao longo do eixo Z não provocam esse efeito. O fenômeno também ocorre de forma inversa: ao aplicar um campo elétrico externo nas direções X ou Y, o material sofre deformação mecânica, cuja magnitude é proporcional à intensidade do campo aplicado (Leo, 2007).

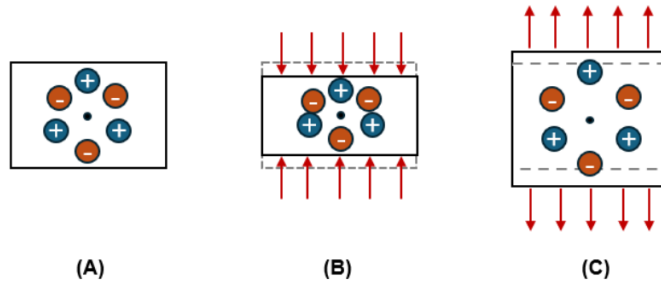


Figura 1- Estrutura do material piezoelétrico: (A) Estado natural, (B) Sob compressão, (C) Sob Tração

Fonte: Adaptado de <https://ddpizo.wordpress.com/2016/04/25/efeito-piezoelétrico/> (2016).

3.3 EFEITO DIRETO E INVERSO

O comportamento piezoelétrico pode ser descrito por dois efeitos fundamentais: o efeito direto e o efeito inverso. O efeito piezoelétrico direto ocorre quando um material piezoelétrico gera uma carga elétrica em resposta a um esforço mecânico aplicado. Esse fenômeno foi descoberto experimentalmente por Pierre e Jacques Curie em 1880 e é amplamente explorado em sensores, acelerômetros e sistemas de colheita de energia (UCHINO, 1996). Já o efeito piezoelétrico inverso refere-se à deformação mecânica do material quando um campo elétrico externo é aplicado. Esse

princípio é utilizado em atuadores, transdutores ultrassônicos e dispositivos de controle de precisão, permitindo a conversão de sinais elétricos em movimento mecânico (LEO, 2007).

3.4 EQUAÇÕES CONSTITUTIVAS

O comportamento tridimensional dos materiais piezoelétricos pode ser descrito a partir da interação entre grandezas mecânicas e elétricas fundamentais. Entre elas a deformação mecânica (S_i), a tensão mecânica (T_i), o deslocamento elétrico (D_i) e o campo elétrico aplicado (E_i). Além dessas, também temos as matrizes de conformidade elástica (s_{ij}), acoplamento piezoelétrico (d_{ij}), que estabelece a relação entre campos elétricos e mecânicos, e permissividade (ϵ_{ij}), que descreve a capacidade do material de armazenar carga elétrica em resposta a um campo aplicado.

O sobrescrito "E" indica que as variáveis são avaliadas em relação ao campo elétrico, enquanto o campo "T" indica medidas tomadas com tensão nula ou constante. Dessa forma, as equações constitutivas tridimensionais que descrevem os efeitos piezoelétricos direto e inverso são expressas por:

$$S_i = s_{ij}^E * T_j + d_{mi} * E_m \text{ (Efeito inverso)} \quad (\text{Eq. 01})$$

$$D_m = d_{mi} * T_i + \epsilon_{mk}^T * E_k \text{ (Efeito direto)} \quad (\text{Eq. 02})$$

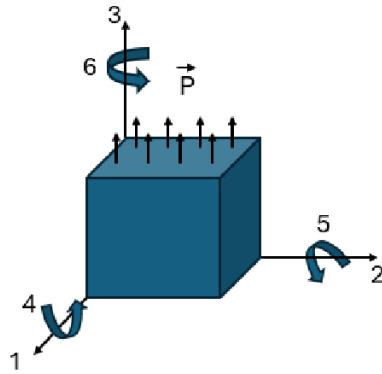


Figura 2- Sistema de referência

Assim, o modelo constitutivo dos materiais piezoelétricos pode ser expresso pela combinação das equações algébricas dos efeitos direto e inverso, de forma matricial, onde o sobrescrito “t” indica uma matriz transposta:

$$\begin{bmatrix} S \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S^E & d^t \\ d & \varepsilon^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ E \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 03})$$

Expandindo a equação 04 e realizando as devidas contrações, adotando o sistema de referência mostrado na Figura 2, temos o modelo constitutivo reduzido no formato matricial:

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} \\ s_{12}^E & s_{11}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} \\ s_{13}^E & s_{13}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & 0 & 0 & s_{55}^E & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55}^E & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & \varepsilon_{11}^T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{11}^T & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{33}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 04})$$

Quando trabalhamos com uma estrutura fina, é comum a modelagem piezoelétrica como vigas finas engastadas. Neste caso, consideramos apenas as tensões mecânicas nas direções 1, longitudinal da viga, e 3, de polarização. Então, a equação 05 torna-se:

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & d_{31} \\ d_{31} & \varepsilon_{33}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 05})$$

3.5 MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS SINTÉTICOS

Atualmente, é comum a utilização de materiais piezoelétricos sintéticos, ou seja, que são fabricados. Para essa fabricação, os materiais que não possuem o efeito piezoelétrico em seu estado natural, são inicialmente submetidos ao aquecimento acima da temperatura de Curie (temperatura de despolarização do material). Após isso, o material é submetido a um forte campo elétrico, então os dipolos elétricos ficam alinhados na direção do campo. Quando o material é resfriado e o campo elétrico é retirado, os dipolos mantêm seu

alinhamento, apresentando então características piezoelétricas. O processo de polarização (*polling*) é mostrado na Figura 3.

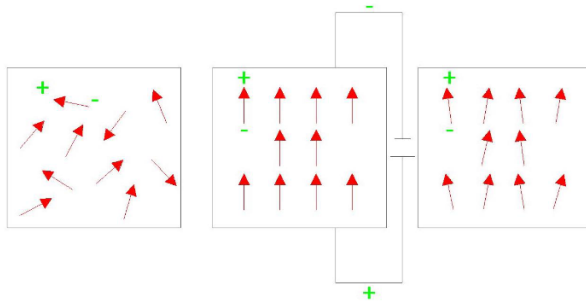


Figura 3- Fabricação de piezoelétrico sintético: Antes, durante e após polarização

3.6 EQUAÇÕES GERAIS DA ELETRICIDADE BÁSICA

Serão aplicados impactos mecânicos pelo dispositivo sobre o material piezoelétrico, que converte parte da energia mecânica em energia elétrica. Para analisar o desempenho do sistema, são utilizadas duas equações fundamentais da eletricidade:

3.6.1 Tensão elétrica (V)

A tensão elétrica é a diferença de potencial elétrico entre dois pontos, sendo responsável por movimentar as cargas elétricas em um circuito. A tensão elétrica é dada através da Lei de Ohm:

$$V = R * I \quad (\text{Eq. 06})$$

Onde:

V – Tensão entre dois pontos de um resistor (Volts - V)

R – Resistência (Ohm - Ω)

I – Corrente (Ampère – A)

3.6.2 Potência elétrica (P)

A potência elétrica representa a quantidade de energia gerada por unidade de tempo.

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (\text{Eq. 07})$$

3.7 CASAMENTO DE IMPEDÂNCIA

O casamento de impedância é o processo de ajustar as impedâncias de dois circuitos ou dispositivos conectados, com o objetivo de maximizar a transferência de potência ou minimizar reflexões de sinal.

De acordo com o teorema de máxima transferência de potência, a transferência de energia de uma fonte para uma carga é máxima quando a impedância da carga é igual à impedância interna da fonte. No caso de piezoelétricos, estes podem ser modelados como uma fonte elétrica associada a uma impedância interna. Dessa forma, para que a energia elétrica gerada pelo piezoelétrico seja transferida de forma eficiente para uma carga externa, é necessário que a impedância da carga seja compatível com a do piezoelétrico.

Em dispositivos submetidos a excitação mecânica intermitente, como impactos periódicos, a impedância interna do piezoelétrico pode sofrer variações em função da frequência de excitação, da amplitude de deformação e do tipo de contato mecânico.

Por esse motivo, embora exista teoricamente um valor ótimo de resistência para maximizar a potência transferida, na prática, os resultados experimentais podem apresentar um comportamento não linear. Isso ocorre porque variações nos parâmetros mecânicos e elétricos alteram a impedância dinâmica do sistema, dificultando a obtenção de um ponto de operação fixo e ideal.

3.8 MÉDIA RMS

Em dispositivos piezoelétricos submetidos a impactos e vibrações, a tensão gerada apresenta uma variação alternada ao longo do tempo. Esse comportamento é resultado da sobreposição da deformação residual provocada por impactos anteriores com a deformação causada por impactos atuais. Diante disso, se faz necessário estabilizar o sinal de tensão para, posteriormente, determinar um intervalo de potência ideal para a operação do piezoelétrico. Para esse fim, utiliza-se o método da raiz quadrada média (Root Mean Square - RMS) no qual se estabiliza um sinal senoidal. Nesse método, retira-se os pontos negativos de tensão usando a equação 08.

$$V = \sqrt{V^2} \quad (\text{Eq. 08})$$

Capítulo 4

4 METODOLOGIA

Neste capítulo, é apresentada a metodologia adotada para a elaboração do trabalho, que inclui o desenvolvimento do projeto e fabricação do dispositivo, além da realização de experimentos destinados a obter os valores máximos de tensão e potência geradas. O dispositivo projetado baseia-se na geração de energia a partir do impacto controlado de um atuador sobre um material piezoelétrico, cujo sinal é captado por um sistema de aquisição para posterior análise e tratamento dos dados.

4.1 PROJETO E FABRICAÇÃO DO DISPOSITIVO

O projeto do dispositivo, bem como os testes experimentais, tem como objetivo o desenvolvimento de um dispositivo autônomo de geração de energia, capaz de se adaptar dinamicamente às mudanças nos padrões de oscilação das fontes de vibração. Para essa finalidade, os estudos realizados neste trabalho a partir de testes experimentais visam alcançar as máximas potência e tensão geradas pelo dispositivo desenvolvido. Para isso, foram conduzidos experimentos paramétricos com objetivo de analisar a maneira com a qual um parâmetro influencia na amplitude de tensão e potência geradas pelo material piezoelétrico.

O sistema de geração de energia por impactos utilizando material piezoelétrico tem como inspiração aplicações reais e inovadoras que já utilizam esse princípio em escala prática. Um exemplo notável são pisos piezoelétricos instalados em ambientes de alto fluxo, como estações de metrô, aeroportos e calçadas, que captam a energia gerada pelas pisadas de pedestres e convertem em eletricidade. Nesses sistemas, o impacto mecânico exercido sobre o material piezoelétrico ativa o efeito direto, gerando pequenas quantidades de energia elétrica que, quando acumuladas, podem alimentar sistemas de iluminação, sensores ou dispositivos de baixa potência.

A analogia com esses sistemas reforça a viabilidade do projeto aqui proposto, que, embora em escala reduzida e experimental, segue os mesmos princípios físicos. O uso de um atuador para gerar impactos controlados no

material piezoelétrico busca simular, em ambiente de laboratório, o tipo de excitação que seria encontrado em aplicações reais. Assim, este trabalho serve como uma etapa inicial para o desenvolvimento de tecnologias aplicáveis à recuperação de energia mecânica residual em ambientes urbanos, industriais ou até mesmo em dispositivos portáteis e vestíveis.

A concepção do projeto mecânico partiu da ideia de criar um dispositivo capaz de transformar movimento circular em movimento linear, possibilitando que um atuador gerasse impacto por choque sobre o material piezoelétrico, conforme ilustrado nas Figura 4.

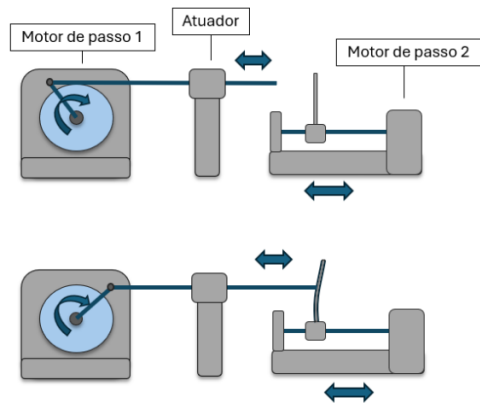


Figura 4- Atuação por choque no piezoelétrico

Dessa forma, o sistema é composto por: dois motores de passo, suporte do motor, base amortecedora, atuador, guia do atuador, parafusos, braço, rolamento para conexão e rotor, como ilustrado na Figura 5.

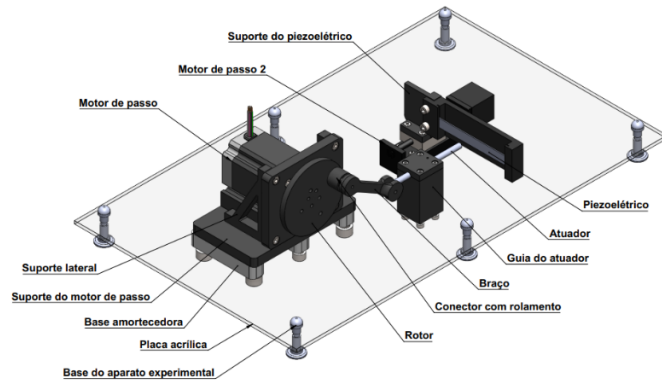


Figura 5- Projeto do sistema mecânico de colisões

O primeiro motor de passo, adotado como motor de atuação, é responsável por fornecer o movimento circular ao sistema. Um rotor foi acoplado ao eixo do motor, a fim de possibilitar a conexão com o mecanismo, que é composto por um braço mecânico e um atuador, conforme ilustrado na Figura 6.

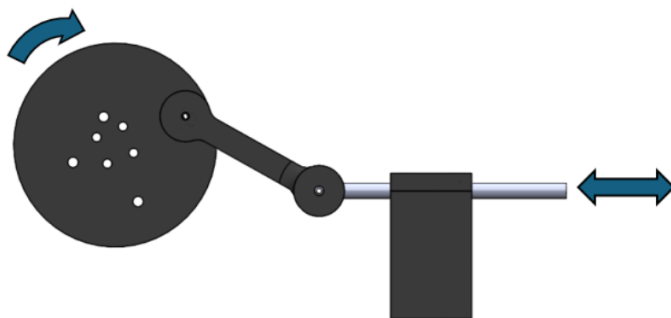


Figura 6- Mecanismo de transformação do movimento circular em linear

Através do movimento linear, o atuador colide de forma controlada no material piezoelétrico, que possui formato retangular e foi acoplado a um suporte sobre o segundo motor de passo, adotado como motor de deslocamento. O segundo motor tem como função permitir o deslocamento do piezoelétrico em relação ao atuador, conforme mostrado na Figura 7, possibilitando maior ou menor deformação.

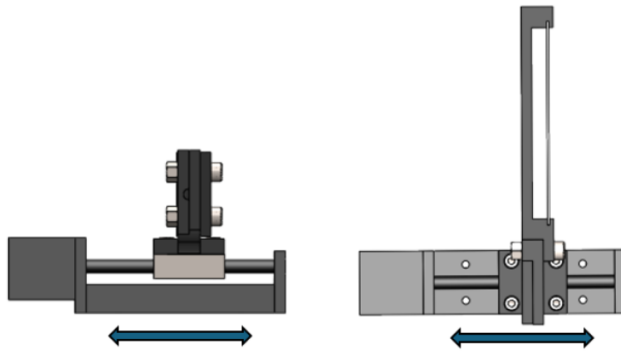


Figura 7- Motor de passo, suporte e material piezoelétrico.

Este modelo permite um avanço preciso de 1mm por rotação, tanto para frente quanto para trás. Para acoplamento do piezoelétrico ao motor, foi confeccionado um suporte por meio de impressão 3D, conforme ilustrado na Figura 8.

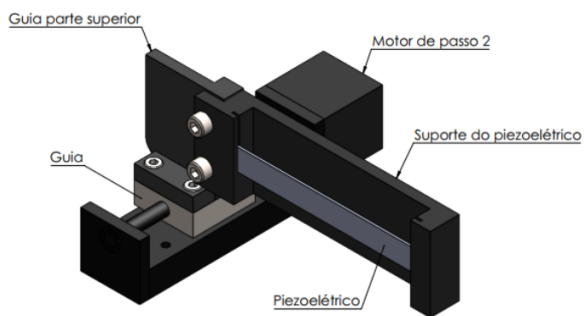


Figura 8- Suporte do material piezoelétrico.

O projeto mecânico foi desenvolvido utilizando o software SolidWorks, empregado para a elaboração dos desenhos dos suportes necessários a cada parte do dispositivo, os quais foram posteriormente fabricados por impressão 3D.

Para implementação do projeto, as peças foram fabricadas com a utilização de impressora 3D do modelo Criality K1 MAX, disposta no Laboratório de Estruturas Inteligentes, conforme Figura 9. Para isso, foi utilizado o filamento PLA de 1,75 mm de diâmetro como material para fabricação das peças, que

apresenta facilidade de impressão como principal vantagem em comparação com outros disponíveis no mercado.

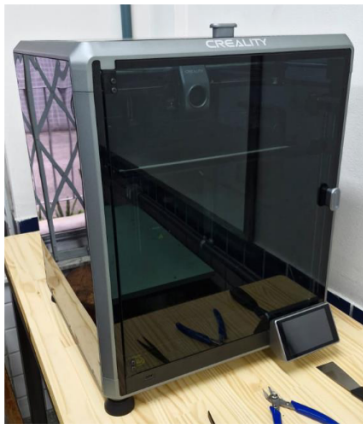


Figura 9- Impressora 3D

Após a impressão das peças, estas foram montadas conforme os desenhos de montagem, disponíveis no apêndice A do presente trabalho e mostrados na Figura 10.

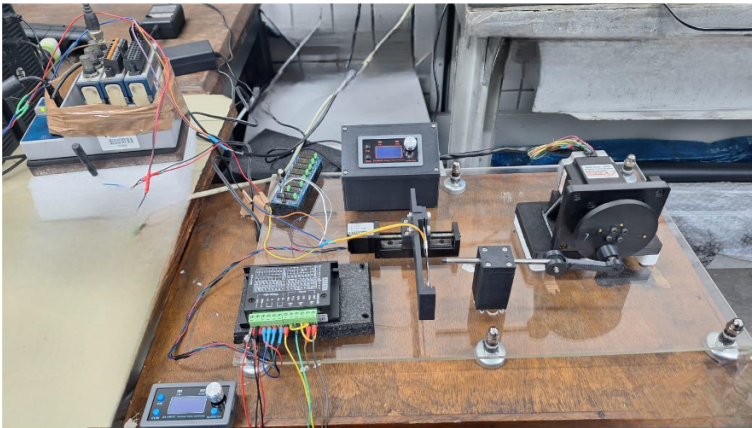


Figura 10- Montagem do sistema mecânico

O projeto de alimentação elétrica, aquisição de dados e controle manual do sistema é ilustrado na Figura 11. Dessa forma, é prevista a alimentação de duas fontes distintas, do modelo KA-7091, da marca KAPBOM, ambas conectadas à rede elétrica: uma destinada ao sistema de aquisição, responsável por captar os dados de tensão gerada e enviá-los para o software NI Signal Express, e outra destinada ao sistema de geração, ligada aos dois motores. A fonte do sistema de geração fornece 12V em corrente contínua ao controlador com driver, que alimenta o primeiro motor, e permite ao operador acionar e ajustar manualmente a frequência de impacto do cursor sobre o piezoelétrico. Além disso, essa mesma fonte também alimenta outro driver e seu respectivo controlador, responsáveis pelo acionamento e controle do segundo motor de passo, que possibilita o deslocamento do piezoelétrico para frente e para trás.

O atuador se choca com o piezoelétrico gerando uma deformação capaz de gerar energia. A placa de aquisição de dados recebe o sinal de energia gerada e envia para o software NI Signal Express. Um banco de resistências foi incorporado ao sistema, permitindo a realização de testes com resistências de valores diferentes. Para realização de testes sem resistência, o banco de resistores deve ser desconectado do sistema.

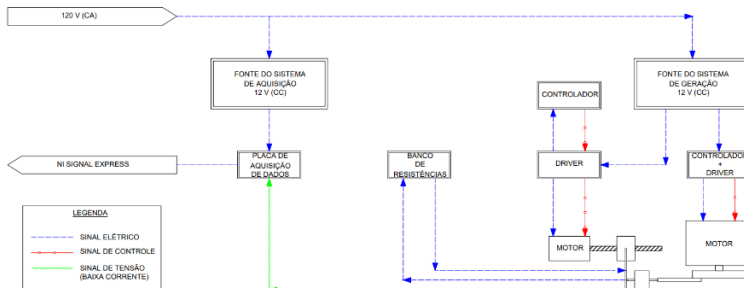


Figura 11- Esquemático de funcionamento do sistema

O primeiro motor, que responsável pelo acionamento e controle do atuador sobre o piezoelétrico, é um motor de passo, que se movimenta em incrementos quantificáveis, permitindo um controle mais preciso da frequência de impacto. O motor escolhido é do modelo HT23-401 do fabricante KALATEC Automação, cuja especificações técnicas estão resumidas na Tabela 1.

Tabela 1 – Especificações do motor de passo

Parâmetros	Valores
Corrente unipolar	3 A/fase
Passo em ângulo	1,8°
Torque estático bipolar	1,9 N.m
Resolução	200 PPR
Inercia	480 g.Cm²
Qualidade	ISO9001, 2008

Fonte: KALATEC Automação (2024).

O controle do motor é feito através do controlador com driver acoplado do modelo ZK-SMC02, ilustrado na Figura 12.



Figura 12- Controlador e Driver do motor HT23-401
Fonte: Adaptado Aliexpress (2024)

O dispositivo foi acoplado ao sistema com a utilização de uma caixa, fabricada através da impressão 3D, como mostra a Figura 13.



Figura 13- Caixa de suporte do controlador com driver

O sistema de aquisição, responsável pelo recebimento e envio de dados para análise, é um modelo da empresa National Instrument, que conta com o chassi NI-CDAQ-9174, mostrado na Figura 14, utilizando o módulo NI-9220.



Figura 14- NI-CDAQ-9174

O módulo de entrada de tensão NI-9220 da Série C, mostrado na Figura 15, possui 16 canais de entrada analógica diferencial simultânea. Esse módulo é responsável pela aquisição de sinais analógicos e opera com faixa de entrada de ± 10 V, oferecendo isolamento de 250 Vrms CAT II ou 60 VCC CAT I entre os canais e o sistema de aquisição, garantindo maior segurança e integridade nos dados adquiridos.



Figura 15- NI-9220

Inicialmente, para fins de experimento, foi utilizado um cerâmico piezoelétrico, que permite a geração de altas tensões. Entretanto, com o objetivo futuro de fazer o controle do sistema de forma automatizada, através de um sistema de controle PID, com uma placa de Arduino UNO, que tem como limite 5V de tensão, optou-se pela mudança do material. Dessa forma, o material piezoelétrico utilizado para o sistema foi do tipo polimérico e é mostrado na Figura 16. Este material, quando comparado aos cerâmicos piezoelétricos, se mostra mais flexível e leve e, por isso, suporta maiores deformações mecânicas sem quebrar, apresentando boa resposta em frequências relativamente altas. Entretanto, eles possuem menor constante piezoelétrica, gerando menor tensão para uma mesma deformação.

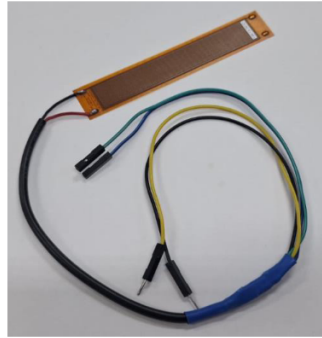


Figura 16- Piezoelétrico polimérico

4.2 PARÂMETROS EXPERIMENTAIS

Os experimentos realizados objetivaram determinar as máximas potências e tensões geradas com o dispositivo a partir da variação de parâmetros, tais como: resistência elétrica, frequência de impacto e distância entre o piezoelétrico e o atuador. Dessa forma, a proposta dos experimentos foi analisar a maneira com a qual um parâmetro influencia na amplitude de potência e tensão elétricas geradas pelo material piezoelétrico.

Na geração de energia com materiais piezoelétricos, a inclusão de uma resistência elétrica ao sistema permite um mapeamento da amplitude de tensão, definição da potência, buscando o casamento de impedâncias, e permitir testes experimentais para a caracterização da condição ótima de operação.

A variação da frequência de impacto do atuador sobre o piezoelétrico tem influência direta no número de vezes que o piezoelétrico será deformado por segundo. Em teoria, o aumento da frequência pode aumentar a potência total gerada, uma vez que haverá mais ciclos de geração de tensão. Entretanto, se os impactos ocorrerem em frequência muito alta, pode não haver tempo suficiente para que o piezoelétrico descarregue completamente entre um impacto e outro, afetando o formato da onda de tensão gerada. Por outro lado, frequências muito baixas tendem a reduzir a quantidade de energia gerada por unidade de tempo. A frequência ideal de impacto deve garantir as máximas potências e tensões geradas considerando contribuições construtivas e destrutivas. No dispositivo desenvolvido, a frequência de impacto é controlada pelo motor de passo 1, de acordo com o movimento do atuador.

No sistema desenvolvido, é possível controlar a distância entre o piezoelétrico e o atuador, ajustando o deslocamento do piezoelétrico no sentido de se aproximar ou afastar do ponto de choque. Com a aproximação do piezoelétrico com o atuador, o impacto ocorre com maior profundidade, provocando maior deformação mecânica do material. A variação controlada do deslocamento permite identificar a relação entre o grau de deformação e a quantidade de energia elétrica gerada, além de estudar o comportamento do sistema para altos níveis de deformação. No dispositivo desenvolvido, o ajuste de deslocamento do piezoelétrico em relação ao atuador é realizado por meio do motor de passo de deslocamento.

Dessa forma, os experimentos realizados foram divididos em três grupos de acordo com os parâmetros supracitados. Para isso, cada grupo de experimentos manteve dois parâmetros fixos, enquanto o parâmetro em análise era variado. A Tabela 2 apresenta os intervalos de variação de cada parâmetro, bem como os incrementos utilizados.

Tabela 2 – Variação dos parâmetros nos experimentos

Experimento	Parâmetros	Intervalo	Incremento
Grupo 1	Resistência elétrica	10 a 100 k Ω	-
Grupo 2	Frequência de impacto	0,5 a 3 Hz	0,5 Hz
Grupo 3	Deslocamento	0 a 5 mm	1 mm

Para definição dos intervalos de resistências, definiu-se a resistência mínima para a análise que atendesse a máxima potência suportada pelo banco de resistência. Os valores de resistência foram definidos com o objetivo de identificar a ordem de grandeza na qual se encontra a resistência ótima de operação.

O intervalo de variação das frequências de impacto buscou atender aos limites mínimo e máximo que preservem a integridade do equipamento. O incremento de 0,5 Hz tem o objetivo de permitir uma análise melhor dos resultados.

Da mesma forma, o intervalo de variação de deslocamento visa atender aos limites de integridade do equipamento, com a utilização de um incremento que permita a análise deste parâmetro.

Em todos os experimentos, o sistema é alimentado pela rede elétrica em 110V com corrente alternada, passando para as duas fontes (de geração e de aquisição), responsáveis por garantir 12V em corrente contínua. Cada um dos testes experimentais foi realizado durante um período de 5 minutos

4.2.1 Aquisição e tratamento de dados

Para aquisição, análise e tratamento dos dados, foram utilizados os softwares NI Signal Express 2015 e OriginPro. Para aquisição dos dados de tensão, foi adotada uma taxa de aquisição de 100 Hz. Para essa definição, considerou-se a boa prática de adotar uma aquisição 10 vezes maior que a frequência máxima adotada, uma vez que a taxa de aquisição de dados está diretamente relacionada com a frequência. É importante que a taxa permita uma aquisição razoável entre impactos, a fim de garantir uma melhor resolução da curva provenientes dos dados adquiridos. Portanto, a cada 100 pontos medidos pelo sistema de aquisição, o software foi programado para gerar 1 ponto que representa a média entre eles, como ilustrado na Figura 17.

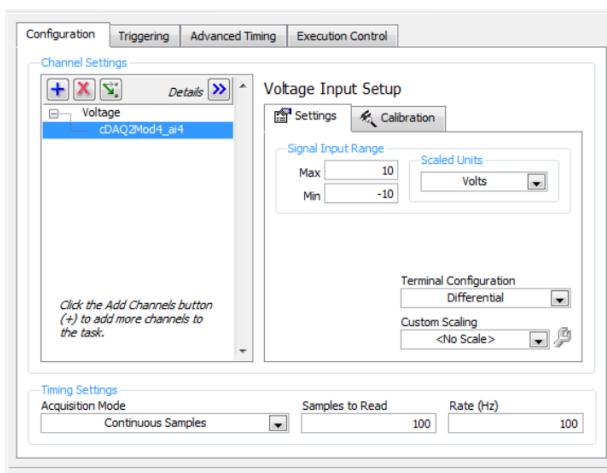


Figura 17- Taxa de aquisição de dados

Para a análise dos dados de potência gerada, que são relacionados a resistência gerada foram comparados os resultados medidos pelos sistemas de aquisição NI Signal e os calculados no OriginPro através dos dados obtidos para

tensão, utilizando a equação 07. Os resultados obtidos se mostraram semelhantes quando comparados.

Os resultados dos testes, com duração de 300 segundos cada (5 minutos), apresentaram um período transiente inicial até o equilíbrio do funcionamento. Esse período apresenta um comportamento de instabilidade de tensão e potência produzidas. Por isso, para uma análise mais precisa dos resultados obtidos, foi determinada uma limitação entre 100 e 250 segundos, a fim de mitigar a influência do período no qual os dados obtidos não retratam um comportamento equilibrado que permita uma análise mais precisa. A Figura 18 a determinação desses limites, utilizando a ferramenta de filtro disponível no OriginPro.

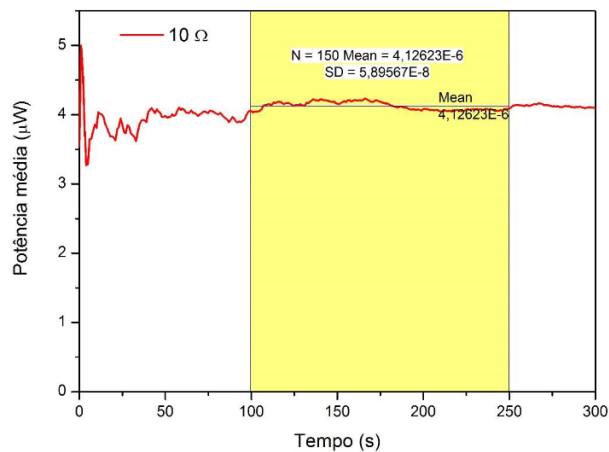


Figura 18- Ferramenta de filtro para obter a média

4.2.1 Ensaios de variação de resistência elétrica

Para os experimentos realizados com variação da resistência elétrica, foi incluído ao sistema um banco de resistores, mostrado na Figura 19, que permitiu a variação das resistências atribuídas definidas na Tabela 2. Além disso, para fins comparativos, também foram realizados testes sem a utilização de resistência no sistema.

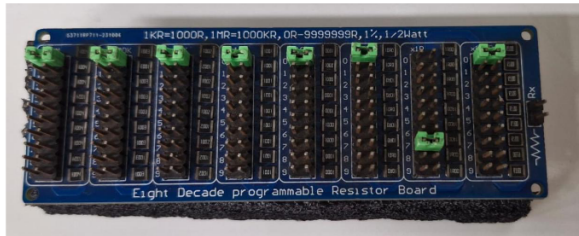


Figura 19- Banco de resistores

Na primeira etapa dos testes com variação de resistência, os valores definidos inicialmente visavam identificar em qual ordem de grandeza se encontra a resistência ótima de operação. A partir dos resultados obtidos na primeira etapa, uma segunda etapa de testes foi realizada para discretização dos valores de resistência que pertencem as ordens de grandeza que apresentaram os melhores resultados de tensão e potência geradas. A Tabela 3 apresenta os intervalos de resistência utilizados para cada análise.

Tabela 3 – Discretização das resistências

Parâmetros	Intervalo
Resistência elétrica para geração de maior potência	4 a 30 Ω
Resistência elétrica para geração de maior tensão	10k a 100k Ω

Para os testes de variação de resistência, os parâmetros de frequência de impactos e de deslocamento foram fixados. O deslocamento definido como $x = 0$ mm é aquele no qual o atuador, em seu máximo avanço, apenas encosta no material piezoelétrico. Essa configuração apresenta menores valores de tensão e potência geradas, entretanto, como objetivo desses testes visa a análise da variação das resistências, a definição de um deslocamento mínimo atende a necessidade de garantir um controle da distância entre o piezoelétrico e o atuador em um primeiro momento. Do mesmo modo, a fixação da frequência de impactos de 1 Hz visa garantir a padronização dos testes.

4.4.2 Ensaios de variação da frequência dos impactos

Para os ensaios de variação da frequência de impacto, foi adotado um intervalo de rotação do motor de passo que fornece movimento ao atuador, conforme apresentado na Tabela 2, atendendo aos limites de integridade do equipamento.

Para a definição das resistências a serem utilizadas, usou-se como base os resultados obtidos nos testes de resistência supracitados. Os ensaios foram subdivididos em três configurações de resistência: sem resistência, com a resistência que gera a máxima potência e com a resistência que gera a máxima tensão.

O deslocamento adotado para a realização dos testes de variação de frequência de impactos foi fixado em $x = 0$ mm, onde o atuador, em seu máximo avanço, apenas encosta no material piezoelétrico. Essa configuração apresenta menores valores de tensão e potência geradas, entretanto, como objetivo desses testes visa a análise da variação da frequência de impactos, a definição de um deslocamento mínimo atende a necessidade de garantir um controle da distância entre o piezoelétrico e o atuador em um primeiro momento.

4.4.3 Ensaios de variação de distância entre o atuador e o piezoelétrico

Nos ensaios de variação da distância entre o atuador e o piezoelétrico, utilizou-se o intervalo da distância de 0 mm a 5 mm, com variações de 1mm. A distância zero compreende a posição na qual o atuador, em seu curso máximo, apenas encosta no piezoelétrico, conforme Figura 20.

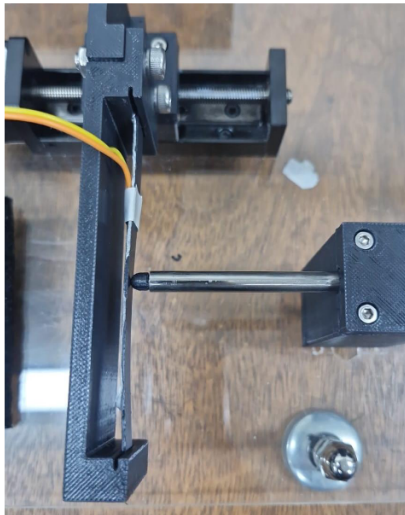


Figura 20- Posição 0 mm

A distância máxima de 5 mm, mostrada na Figura 21, foi estabelecida visando preservar a integridade do equipamento e do material piezoelétrico. Além disso, há uma limitação física inerente ao suporte utilizado para o piezoelétrico.

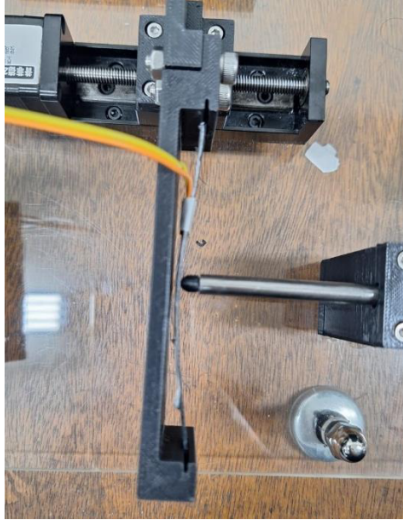


Figura 21- Posição 5 mm

Os ensaios de variação de deslocamento foram realizados em três configurações quanto às resistências: sem resistência, com a resistência que gera a máxima potência e com a resistência que gera a máxima tensão. Todos os testes experimentais utilizaram frequência de impacto de 3 Hz, estabelecida de acordo com os resultados dos ensaios anteriores.

Capítulo 5

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são apresentados e analisados os principais resultados obtidos a partir dos experimentos realizados. Com isso, visou-se compreender a resposta de produção de tensão e potência do piezoelétrico mediante a mudança de parâmetros como: frequência de impactos, resistência do circuito e a variação de distância entre o piezoelétrico e o atuador. Inicialmente, serão apresentados os dados coletados nos experimentos para posteriormente ser realizado uma análise crítica e a comparação desses resultados com a literatura existente. Ao final do capítulo são discutidas as implicações desses achados e suas possíveis limitações.

5.1 RESULTADOS

5.1.1 Testes de variação das resistências

Conforme descrito no capítulo 4, seção 4.2, os primeiros experimentos foram realizados visando a definição da resistência elétrica na qual o piezoelétrico gera máxima potência. Para isso, foram realizados experimentos com uma frequência de impacto de 1 Hz e deslocamento em $x = 0$ mm para as resistências de 10 Ω , 100 Ω , 1.000 Ω , 10.000 Ω e 100.000 Ω . A Figura 22 apresenta os resultados obtidos para esta análise, que revela os melhores resultados de potência se encontram próximos à resistência de 10 Ω .

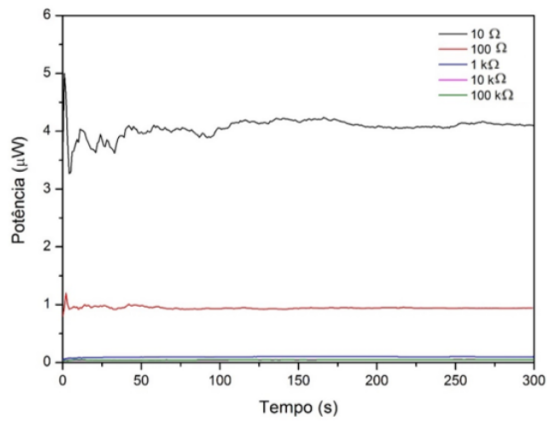


Figura 22- Potência x tempo para resistências de 10 a 100k Ω

A partir do resultado obtido, foram realizados novos testes para analisar com maior precisão o comportamento das potências geradas em resistências próximas ao valor 10 Ω , que apresentou a maior potência no experimento anterior. O objetivo foi identificar, de forma mais detalhada, qual resistência resulta na maior potência gerada para um intervalo dentro da mesma ordem de grandeza. Para isso, com a fixação dos mesmos parâmetros dos testes anteriores, os novos testes visaram a análise do intervalo de resistência de 4 Ω a 30 Ω . A Figura 23 apresenta um resultado melhor para a geração de potência com resistência de 5 Ω quando comparada às demais.

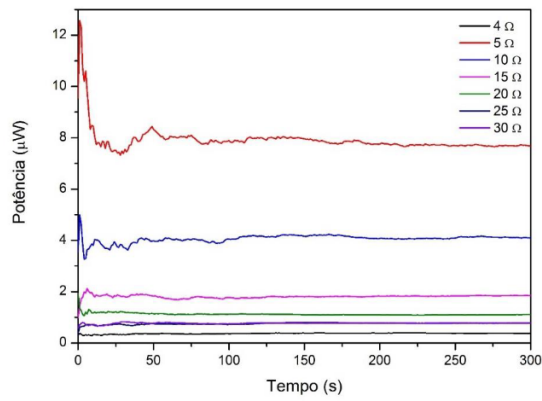


Figura 23- Potência x tempo para resistencias de 4 a 30 Ω

Para uma melhor avaliação da influência da resistência na geração de potência, foi calculada a potência média por meio de uma média aritmética no intervalo de 100 a 250 segundos. Os resultados apresentados na Figura 24, confirmam uma maior geração de potência para a resistência de 5 Ω na faixa de 7,9 μW e um comportamento assintótico com o aumento dos valores das resistências. Esse comportamento pode ser justificado pelo casamento de impedâncias.

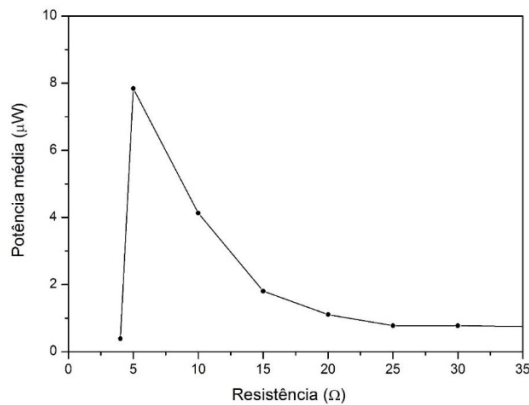


Figura 24- Potência média x resistência de 4 a 30 Ω

Para a análise da maior tensão gerada, foram realizados experimentos com uma frequência de impacto de 1 Hz e deslocamento em $x = 0$ mm para as resistências de 10 Ω , 100 Ω , 1.000 Ω , 10.000 Ω e 100.000 Ω . A Figura 25 apresenta os resultados obtidos para esta análise, que revela os melhores resultados de tensão próximas à resistência de 100k Ω .

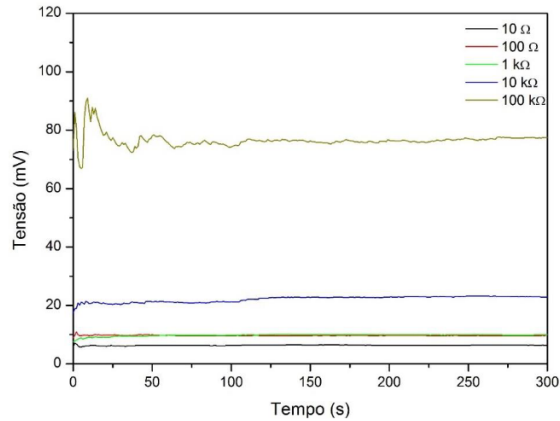


Figura 25- Tensão x tempo para resistência de 10 a 100k Ω

Com base nos resultados obtidos anteriormente, foram realizados novos testes para analisar com maior precisão o comportamento das tensões geradas em resistências próximas ao valor que apresentou a maior tensão no experimento anterior. O objetivo foi identificar, de forma mais detalhada, qual resistência resulta na maior potência gerada.

A partir do resultado obtido, foram realizados novos testes para analisar com maior precisão o comportamento das tensões geradas em resistências próximas ao valor 100k Ω de resistência que apresentou a maior tensão no experimento anterior. O objetivo foi identificar, de forma mais detalhada, qual resistência resulta na maior potência gerada. Para isso, com a fixação dos mesmos parâmetros dos testes anteriores, os novos testes visaram a análise do intervalo de resistência de 10k Ω a 100k Ω . A Figura 26 apresenta um resultado melhor para a geração de tensão com resistência de 100k Ω quando comparada às demais.

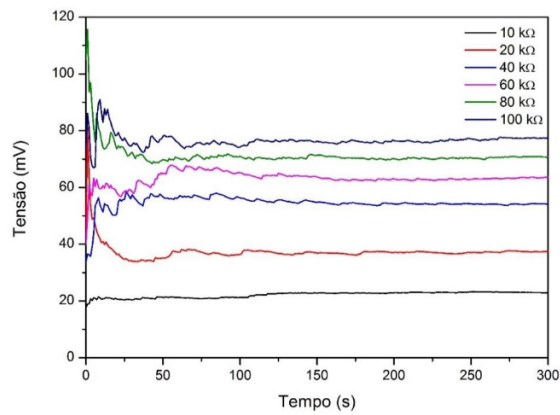


Figura 26- Tensão x tempo para resistências de 10k a 100k Ω

Para uma melhor avaliação da influência da resistência na geração de tensão, foi calculada a tensão média por meio de uma média aritmética no intervalo de 100 a 250 segundos. Os resultados apresentados na Figura 27 confirmam uma maior geração de tensão para a resistência de 100k Ω na faixa de 76 mV e um comportamento crescente com o aumento dos valores de resistência.

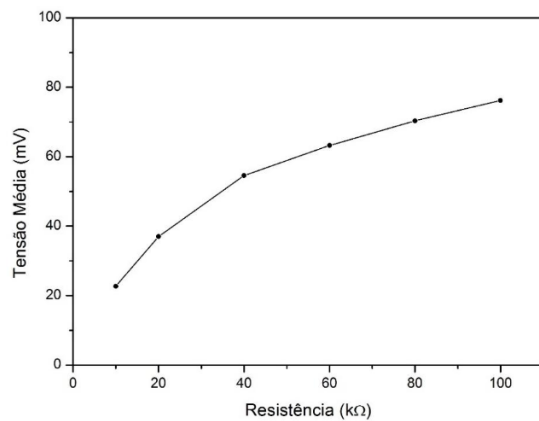


Figura 27- Tensão média x Resistência de 10k a 100k Ω

5.1.2 Testes de variação das frequências de impactos

Os testes de variação das frequências de impactos foram realizados com a fixação do deslocamento em $x = 0$ mm e a adoção das resistências que apresentaram os melhores resultados para geração de potência e tensão, além de testes sem a utilização de resistência.

A Figura 28 apresenta os resultados para as potências médias, calculadas a partir de médias aritméticas, no intervalo de 100 a 250 segundos, com variação da frequência de impactos de 0,5 a 3 Hz e sem resistência. O gráfico mostra um resultado crescente de potência média com o aumento da frequência de impactos.

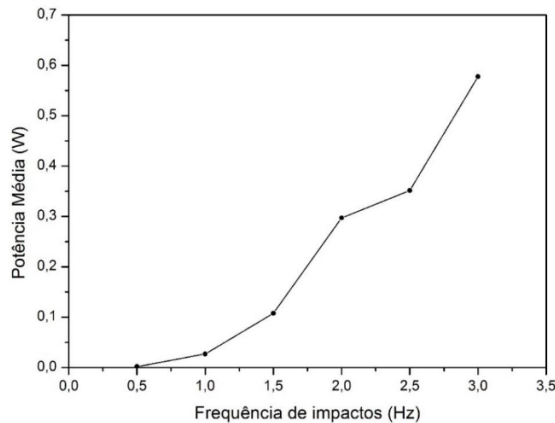


Figura 28- Potência média x velocidade de rotação para um circuito sem resistência

A Figura 29 apresenta os resultados para as potências médias, calculadas a partir de médias aritméticas, no intervalo de 100 a 250 segundos, com variação da frequência de impactos de 0,5 a 3 Hz e com resistência de 100k Ω , a qual os testes anteriores apresentaram maiores valores de tensão. O gráfico mostra um resultado crescente de potência média com o aumento da frequência de impactos.

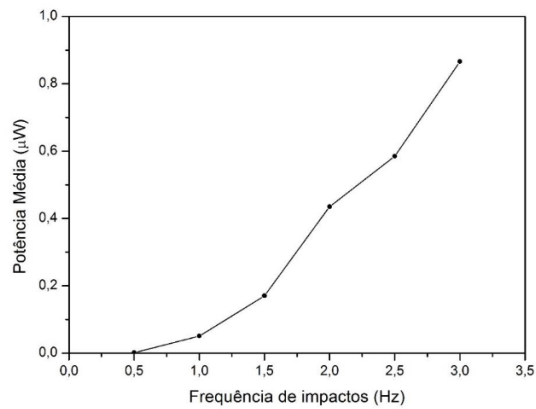


Figura 29- Potência média x frequência de impacto para um circuito com 100k Ω de resistência

A Figura 30 apresenta os resultados para as potências médias, calculadas a partir de médias aritméticas, no intervalo de 100 a 250 segundos, com variação da frequência de impactos de 0,5 a 3 Hz e com resistência de 5 Ω, a qual os testes anteriores apresentaram maiores valores de potência. O gráfico mostra um resultado que se distancia do comportamento linear. Esse comportamento pode ser justificado pelo efeito da sobreposição de impactos, que podem gerar uma interferência construtiva ou destrutiva.

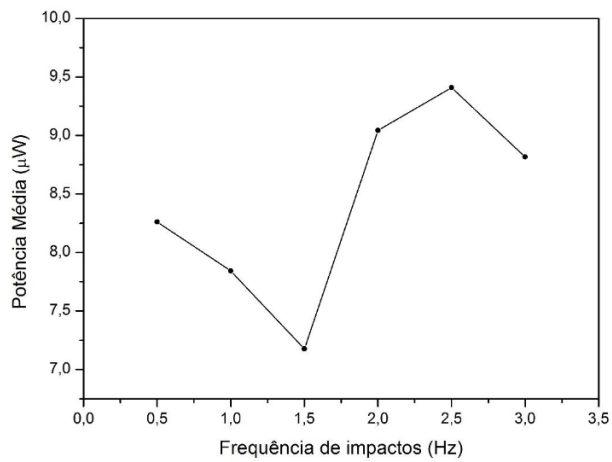


Figura 30- Potência média x frequência de impacto para um circuito com 5 Ω de resistência

A Figura 31 apresenta os resultados para tensões médias, calculadas a partir de médias aritméticas, no intervalo de 100 a 250 segundos, com variação da frequência de impactos de 0,5 a 3 Hz e sem resistência. O gráfico mostra um resultado crescente de tensão média com o aumento da frequência de impactos.

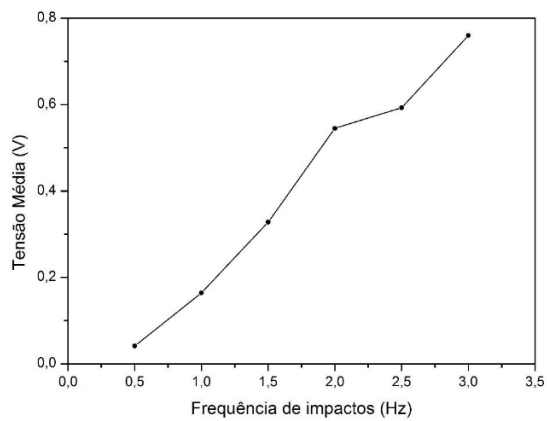


Figura 31- Tensão média x frequência de impacto para um circuito sem resistência

A Figura 32 apresenta os resultados para as tensões médias, calculadas a partir de médias aritméticas, no intervalo de 100 a 250 segundos, com variação da frequência de impactos de 0,5 a 3 Hz e com resistência de 100k Ω , cuja qual os testes anteriores apresentaram maiores valores de tensão. O gráfico mostra um resultado crescente de tensão média com o aumento da frequência de impactos.

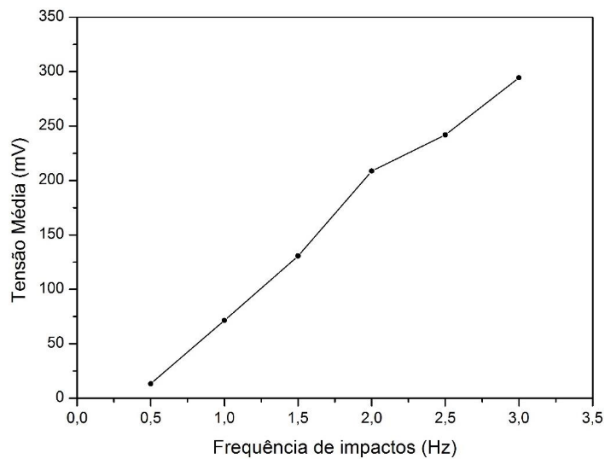


Figura 32- Tensão média x frequência de impacto para um circuito com 100k Ω de resistência

A Figura 33 apresenta os resultados para as tensões médias, calculadas a partir de médias aritméticas, no intervalo de 100 a 250 segundos, com variação da frequência de impactos de 0,5 a 3 Hz e com resistência de 5 Ω , a qual os testes anteriores apresentaram maiores valores de potência. O gráfico mostra um resultado que se distancia do comportamento linear. Esse comportamento pode ser justificado pelo efeito da sobreposição de impactos, que podem gerar uma interferência construtiva ou destrutiva.

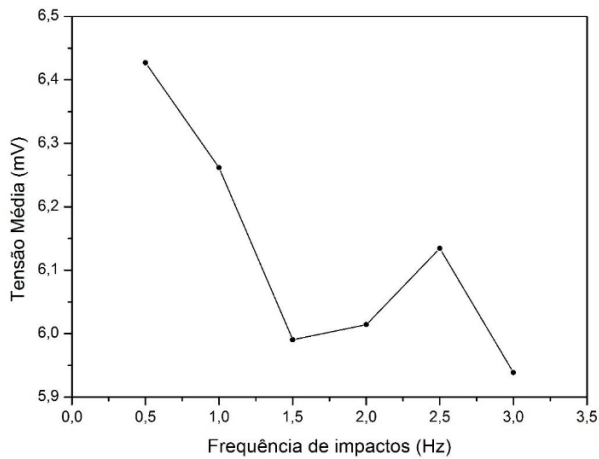


Figura 33- Tensão média x frequência de impacto para um circuito com 5 Ω de resistência

5.1.3 Testes de variação da distância entre o material piezoelétrico e o atuador

Os testes de variação da distância entre o material piezoelétrico e o atuador foram realizados com a fixação da frequência de impacto em 3 Hz, cuja qual apresentou os melhores resultados de potência e tensão para maior parte das análises da variação de frequência. Para a execução desses testes, a distância entre material piezoelétrico e o atuador foi variada de 0 e 5 mm. As resistências utilizadas para os testes foram as definidas como ótimas para geração de potência e tensão a partir dos testes anteriores, além da realização de testes sem resistência.

Os testes sem resistência foram limitados a uma variação do deslocamento de 3 mm, pois apresentaram valores de tensão gerada próximos a 5V quando aproximados dos 4 mm de deslocamento, sendo esse o limite máximo de tensão possível para a aplicação do sistema dinâmico de controle com Arduino.

A Figura 34 apresenta os resultados para as potências médias, calculadas a partir de médias aritméticas, no intervalo de 100 a 250 segundos, com frequência de impactos de 3 Hz e sem resistência. O gráfico mostra um resultado

crescente de potência média com a proximidade entre o material piezoelétrico e o atuador.

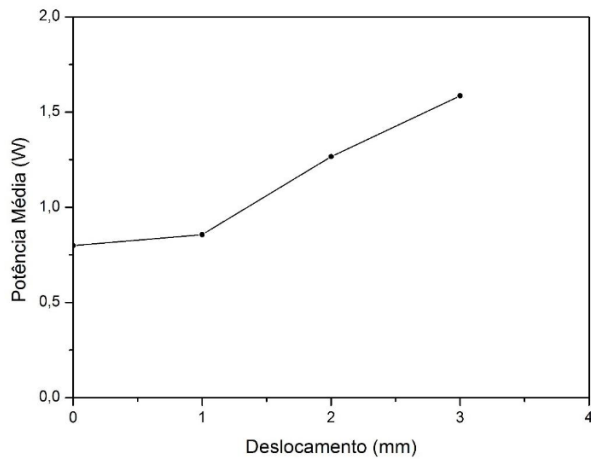


Figura 34- Potência média x deslocamento para circuito sem resistência

A Figura 35 apresenta os resultados para as potências médias, calculadas a partir de médias aritméticas, no intervalo de 100 a 250 segundos, com frequência de impactos de 3 Hz e resistência de 100k Ω , cuja qual os testes anteriores apresentaram maiores valores de tensão. O gráfico mostra um pico de potência para o deslocamento de 3 mm, indicando um comportamento não linear.

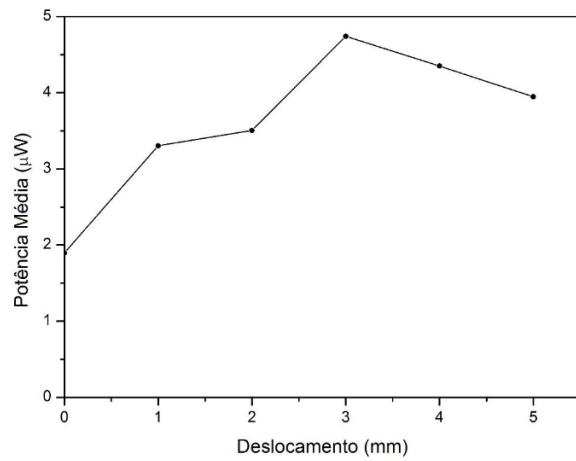


Figura 35- Potência média x deslocamento para circuito com resistência de 100k Ω

A Figura 36 apresenta os resultados para as potências médias, calculadas a partir de médias aritméticas, no intervalo de 100 a 250 segundos, com frequência de impactos de 3 Hz e resistência de 5 Ω , cuja qual os testes anteriores apresentaram maiores valores de potência. O gráfico mostra uma potência máxima entorno de 36 μW para o deslocamento de 5 mm, indicando um comportamento não linear.

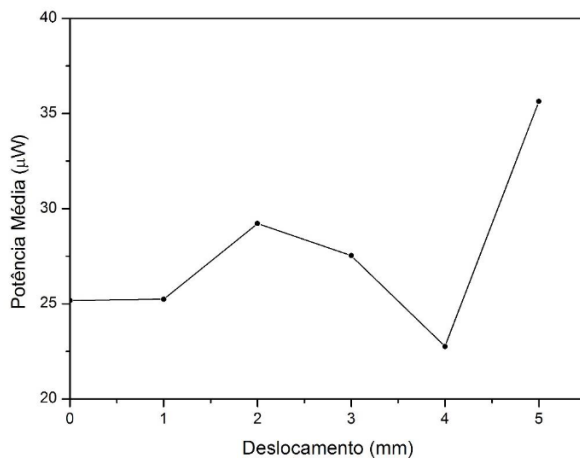


Figura 36- Potência média x deslocamento para circuito com resistência de 5 Ω

A Figura 37 apresenta os resultados para as tensões médias, calculadas a partir de médias aritméticas, no intervalo de 100 a 250 segundos, com frequência de impactos de 3 Hz e sem resistência. O gráfico mostra um resultado crescente de tensão média com a proximidade entre o material piezoelétrico e o atuador.

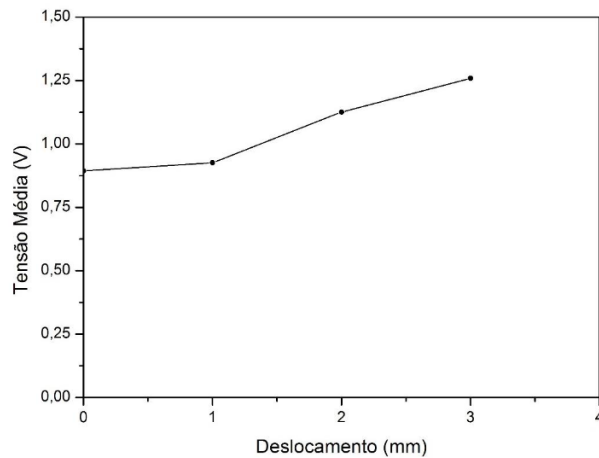


Figura 37- Tensão média x deslocamento para circuito sem resistência

A Figura 38 apresenta os resultados para as tensões médias, calculadas a partir de médias aritméticas, no intervalo de 100 a 250 segundos, com frequência de impactos de 3 Hz e resistência de 100k Ω , cuja qual os testes anteriores apresentaram maiores valores de tensão. O gráfico mostra um pico de tensão média para o deslocamento de 3 mm, indicando um comportamento não linear.

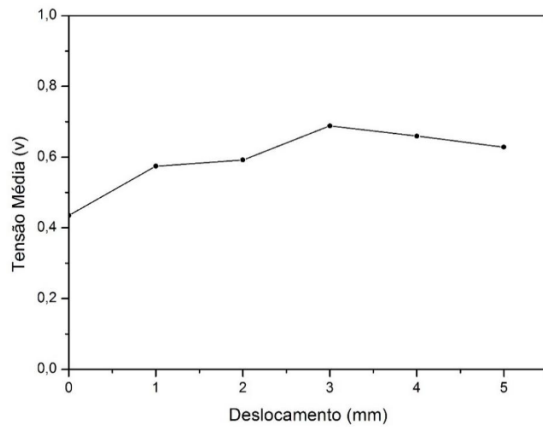


Figura 38- Tensão média x deslocamento para circuito com resistência de 100k Ω

A Figura 39 apresenta os resultados para as tensões médias, calculadas a partir de médias aritméticas, no intervalo de 100 a 250 segundos, com frequência de impactos de 3 Hz e resistência de 5 Ω , cuja qual os testes anteriores apresentaram maiores valores de potência. O gráfico mostra uma tensão máxima entorn de 13,5 mV para o deslocamento de 5 mm, indicando um comportamento não linear.

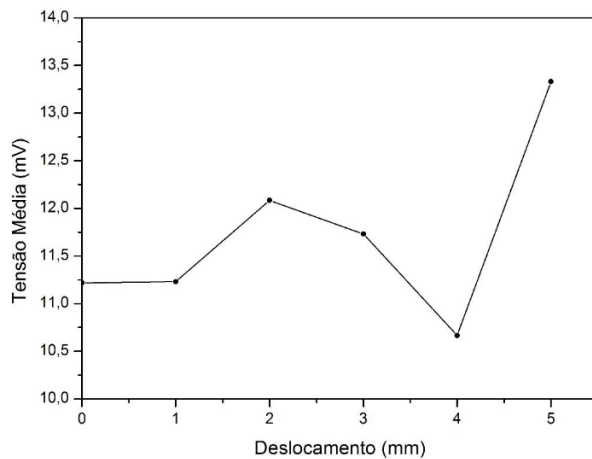


Figura 39- Tensão média x deslocamento para circuito com resistência de 5 Ω

5.2 DISCUSSÃO

Os gráficos apresentados para os três grupos de testes com variação dos parâmetros de resistências, frequências de impactos e distância entre o piezoelétrico e o atuador mostram, em sua maioria, comportamentos não lineares. Os resultados apresentam valores de resistências diferentes e possibilitam as maiores tensões e potências médias.

Para os testes de variação da frequência de impactos, apesar da não linearidade dos resultados com o aumento da frequência, a resistência de 5 Ω resultou em maiores valores de potências geradas, reforçando os resultados obtidos nos testes de variação de resistência. Da mesma forma, a resistência de 100k Ω apresentou maiores valores de tensão geradas, também reforçando os resultados obtidos nos testes de variação de resistência. Para a utilização de resistência de 100k Ω , com a maior geração de tensão, a frequência de impactos de 3 Hz se mostrou a mais adequada para estes parâmetros. Em contrapartida, para a resistência de 5 Ω , com a maior geração de potência, a frequência de impactos que apresentou os melhores resultados foi a de 2,5 Hz.

Os testes com variação da distância entre o piezoelétrico e o atuador apresentaram resultados que também reforçam os testes anteriores, com maiores valores de potência para a resistência de 5 Ω , apesar da não linearidade, e maiores valores de tensão para a resistência de 100k Ω . As maiores tensões foram encontradas com o deslocamento máximo de 5 mm, enquanto as maiores potências foram encontradas com deslocamentos de 3 mm.

Para fins comparativos, não foram considerados os resultados para testes sem resistência. Uma vez que a atribuição de uma resistência ao sistema assegura o funcionamento deste. Todavia, conforme esperado, para todos os testes realizados, os valores de potência e tensão geradas sem resistência são maiores quando comparados aos testes com atribuição das resistências.

Capítulo 6

6 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos nos testes experimentais e das discussões acerca destes, a Tabela 4 apresenta um resumo dos parâmetros ótimos de operação para a obtenção dos maiores valores de tensão e potência gerados pelo sistema, bem como os maiores valores de geração alcançados.

Tabela 4 – Parâmetros ótimos de operação

Análise	Resistência ótima	Valores máximos	Deslocamento ótimo	Frequência de impactos ótima
Potência	5 Ω	36 μ W	5 mm	2,5 Hz
Tensão	100k Ω	0,7 V	3 mm	3 Hz

Os maiores valores de potência e tensão geradas com as resistências ótimas para cada finalidade foram alcançados com a utilização dos deslocamentos ótimos. Sendo esse o parâmetro que se mostra mais influente na busca pela otimização de energia gerada. No entanto, observou-se um padrão recorrente no comportamento especificamente para o deslocamento de 4 mm. Assim, recomenda-se uma reavaliação dos testes relacionados a esse deslocamento, com o objetivo de compreender a origem dessa repetição.

A não linearidade dos resultados com a utilização da resistência de 5 Ω pode ser justificada pela rapidez da circulação da corrente no sistema, onde, devido a carga muito baixa de resistência, o circuito se comporta como um filtro RC de constante de tempo muito curta, de forma que a tensão gerada não acompanhe linearmente a variação da frequência de impacto ou da deformação.

Presume-se que os resultados de potência encontrados para a resistência ótima sofrem influência do casamento de impedância. E, há evidências que sugerem que, em frequências de impactos mais altas, existem contribuições construtivas e destrutivas na deformação do piezoelétrico, interferindo nas tensões e potências geradas.

O comportamento crescente observado nos gráficos referentes à variação da frequência de impactos pode ser justificado pela significativa distância entre

as frequências aplicadas nos testes e a frequência natural do sistema, modelado como uma viga bi-engastada. Nessas condições, não é possível identificar uma tendência de comportamento Gaussiano nos resultados, uma vez que o sistema opera fora da região de ressonância.

A frequência natural fundamental de uma viga bi-engastada é determinada pela equação:

$$f = \frac{1}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}} \quad (\text{Eq.09})$$

Onde,

f - Frequência natural [Hz]

L - Comprimento da viga[m]

E - Módulo de elasticidade do material [Pa]

I - Momento de inércia da seção transversal [m⁴]

M – Massa [Kg]

O material piezoelétrico polimérico utilizado nos testes foi o M-2807-P2, cujos parâmetros adotados para o modelo foram:

- Comprimento (L): 0,028m
- Largura(b): 0,007 m
- Espessura (h): 0,0003 m
- Módulo de elasticidade (E): 20 GPa (estimado para o material)
- Momento de inércia (I): 1,575 x 10⁻⁴ m⁴
- Massa total da viga (m): 0,0002352 kg

Com base nesses valores, a frequência natural fundamental calculada para o piezoelétrico, modelado como viga bi-engastada, foi de 39,16 Hz. Esse valor está substancialmente acima das frequências aplicadas nos testes experimentais (0,5 a 3 Hz), o que justifica o comportamento crescente dos gráficos de tensão e potência geradas. Como o sistema ainda opera longe do ponto de ressonância, não é possível observar o pico de resposta característico de um comportamento Gaussiano.

Dessa forma, considerando os testes experimentais realizados, para determinação dos parâmetros ótimos de operação para inserção em um possível sistema de controle dinâmico, os valores máximos de potência e tensão geradas correspondem a 36 µW e 0,7 V respectivamente.

Tensões na faixa de 0,7 Volts, embora baixas, permitem aplicações em sistemas simples, tais como: acionamento de LEDs indicadores, alimentação de circuitos analógicos de baixo consumo, além de poderem ser utilizados para carregar capacitores possibilitando, após acúmulo e elevação da tensão, alimentar dispositivos de maior consumo de forma intermitente.

Potências nas faixas de 36 μW , apesar de baixas, são capazes de alimentar sensores de ultrabaixo consumo, acionar brevemente LEDs indicadores, contar ciclos de operação de dispositivos mecânicos e carregar capacitores para gerar pulsos curtos de transmissão de dados em sistemas *wireless* passivos.

Para possíveis fases futuras deste estudo, recomenda-se a realização de novos testes que complementem e validem os resultados obtidos até o momento. Em especial, destaca-se a necessidade de investigar múltiplos elementos piezoelétricos associados, como forma de contornar a limitação observada na baixa geração de tensão e potência. Além disso, sugere-se o aprimoramento da instrumentação utilizada, visando aumentar a confiabilidade dos dados experimentais. Também é recomendada a discretização de valores de resistência de carga mais próximos de 100 k Ω , a fim de detalhar o comportamento observado nos experimentos atuais.

No que diz respeito a aplicações práticas, os resultados obtidos demonstram viabilidade para o uso em sistemas de controle PID, especialmente em dispositivos autônomos que demandem operação intermitente. Um exemplo relevante é o uso como sensor de pressão para poços de petróleo, cuja operação em curtos períodos é compatível com a natureza de fornecimento energético dos materiais piezoelétricos testados. Outras possíveis aplicações são acelerômetros. Outra direção promissora inclui a implementação de testes com tapetes piezoelétricos tecnologia esta que foi avaliada em pequena escala durante este estudo, mas que apresenta potencial aplicação em projetos de maior porte.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, J. F. et al. **Aplicações analíticas dos cristais piezoelétricos**. Química Nova, v. 14, n. 4, p. 272-277, 1991.
- ARAÚJO, Eliete de Pinho; GUERREIRO, Laura de Castro Oliveira. **Piezeletricidade: a energia sob os pés e rodas em três estudos de casos / Piezoelectricity: energy under feet and wheels in three case studies**. Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 10, 2020.
- ARIAS, Wendell Pereira de; SOUTO, Cícero da Rocha; CASTRO, Alexandre C. **Gerador rotacional piezoelétrico baseado no conceito de colheita de energia**. 2023.
- BATISTA DE FREITAS, Vincentte Weber; DA COSTA E SILVA, Jusciane. **Captação de energia com materiais piezoelétricos**. Serviços Acadêmicos Intercontinentales, v. 21, n. 8, 2023.
- CECCATO, Camila Campanholi; NUNES, Glécilla Colombelli de Souza; MINCACHE, Anuar José; TUPAN, Lillian Felipe da Silva. **Desenvolvimento de um protótipo de escada empregando o efeito piezoelétrico**. Arquitetura e Urbanismo, v. 27, n. 2, 2023.
- FERREIRA, M. W. et al. **Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Material Cêramico piezoelétrico**. Revista Matéria, v.27 n.22, p. xx, 2022.
- FREITAS, V. W. B. e SILVA, J. C. **Sensor de Vibração Mecânica Utilizando Plataforma Arduino e Material Piezoelétrico**. Anais do Encontro de Computação do Oeste Potiguar ECOP/UFERSA, v. 1, p. 174-182, 2017.
- GIUSTINA, E. D. **Análise Estática Linear de Viga Laminada de PVDF**. CNMAT, P. 1 a 11, novembro de 2014.
- LEO, Donald J. **Engineering Analysis of Smart Material Systems**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007.
- MASSONE, Ana Carolina Cellular; REIS, Sabrina De Oliveira; VIOLA, Flavio M. **Colheita de energia vibracional utilizando materiais piezoelétricos**. Revista Científica Digital, v. 11, n. 25, 2019.
- MORAES, R. M. **Desenvolvimento de Sistema para Coleta de Energia Vibracional Utilizando Dispositivos Piezoelétricos**. Tese de mestrado. Universidade Estadual de Campinas. P. 1 a 108, 2018.
- MOTA, Bruno Cavalcante; BARROSO, Suelly Helena de Araújo. **O uso do pavimento para geração de energia e desenvolvimento sustentável de cidades inteligentes**. Transportes, v. 29, n. 2, 2021.

SILVA, L. L.; SAVI, M. A.; JR; P. C. C. M.; NETTO, T. A. **Effect of the Piezoelectric Hysteretic Behavior on the Vibration-Based Energy Harvesting**. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol 24, pp. 1278-1285, 2013.

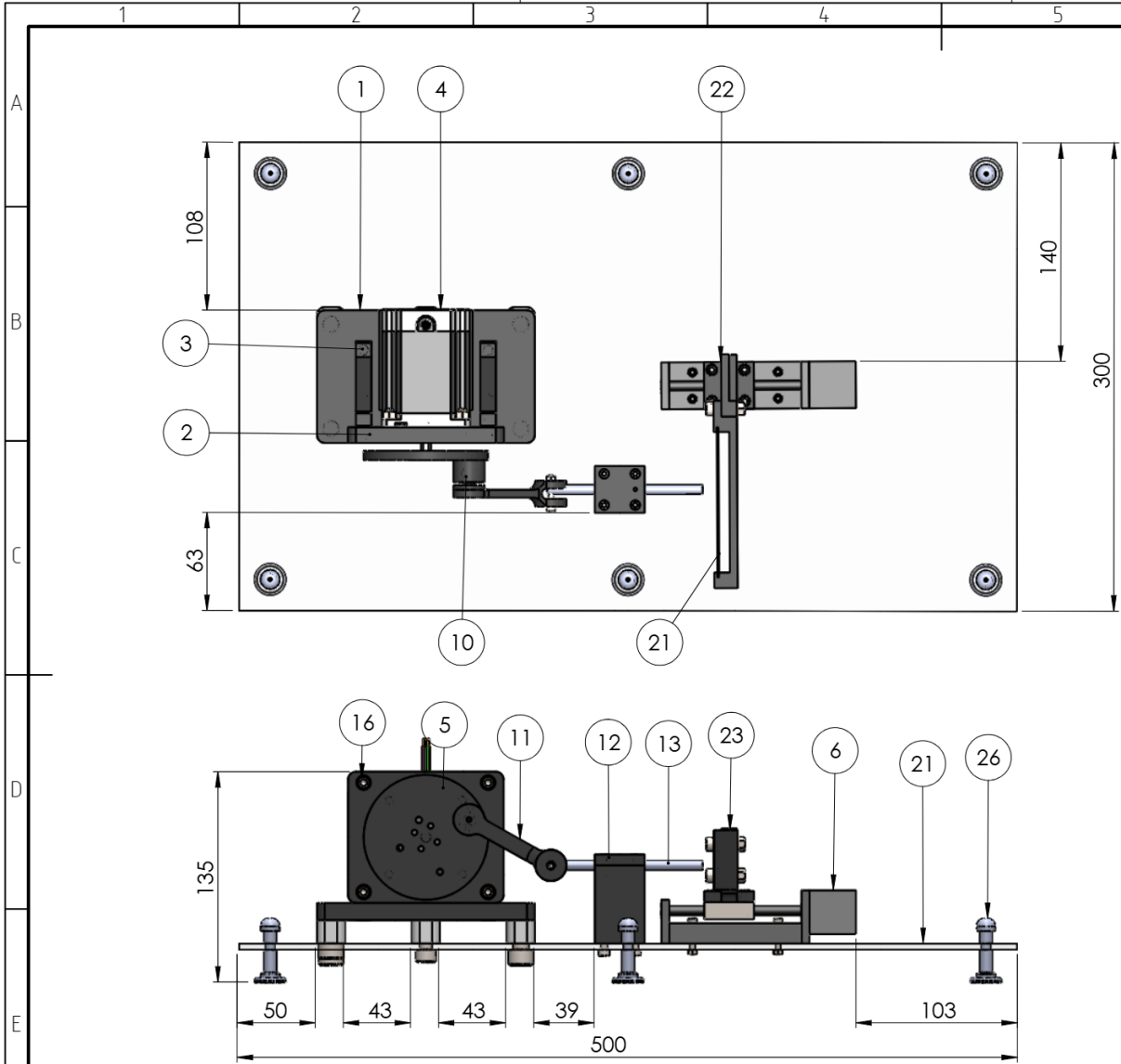
TEIXEIRA, R. L. **Projeto, Construção e Caracterização de um Amortecedor Ativo Controlado por Atuador Piezoelétrico**. Tese de doutorado. Universidade Federal de Uberlândia, 2007.

UCHINO, Kenji. **Piezoelectric Actuators and Ultrasonic Motors**. Springer Science & Business Media, 1996.

PEREIRA, F. A. **Estudo de um Absorvedor de Ruído Utilizando Material Piezoelétrico**. Tese de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 2016.

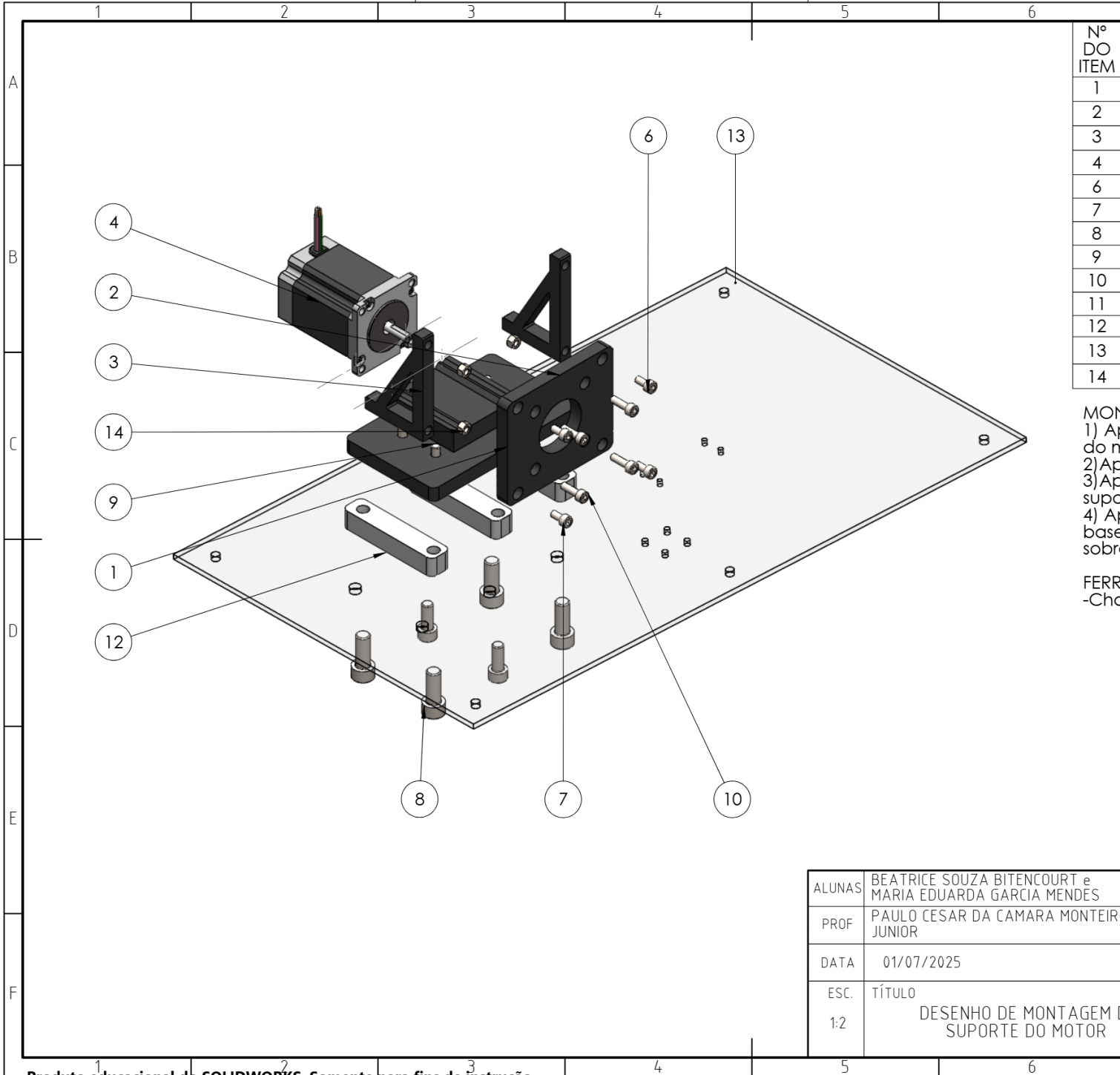
WILLIAMS, C. B. e YATES R. B. **Análise de um microgerador elétrico para microsistemas**. Revista Elsevier, v.52 n.1-3, p. 8 a 11, 1996.

APÊNDICE A – Desenhos técnicos do projeto mecânico



ITEM	N
1	Base do supa
2	Suporte front
3	Suporte later
4	Motor atuada
5	Rotor
6	Motor desloc
8	Guia
9	Mancal de ra
10	Encaixe com
11	Braço do me
12	Suporte supe
13	Atuador
14	Parafuso M5
15	Parafuso M3
16	Parafuso M10
17	Parafuso M4
18	Parafuso M6
19	Parafuso M8
20	Base amorte
21	Base Acrílico
22	Suporte guia
23	Suporte do p
24	Material piez
25	Suporte inferi
26	Base do disp

ALUNAS	BEATRICE SOUZA BITENCOURT e MARIA EDUARDA GARCIA MENDES
PROF	PAULO CESAR DA CAMARA MONTEIRO JUNIOR
DATA	01/07/2025
ESC. 1:3	TÍTULO DESENHO DE CONJUNTO

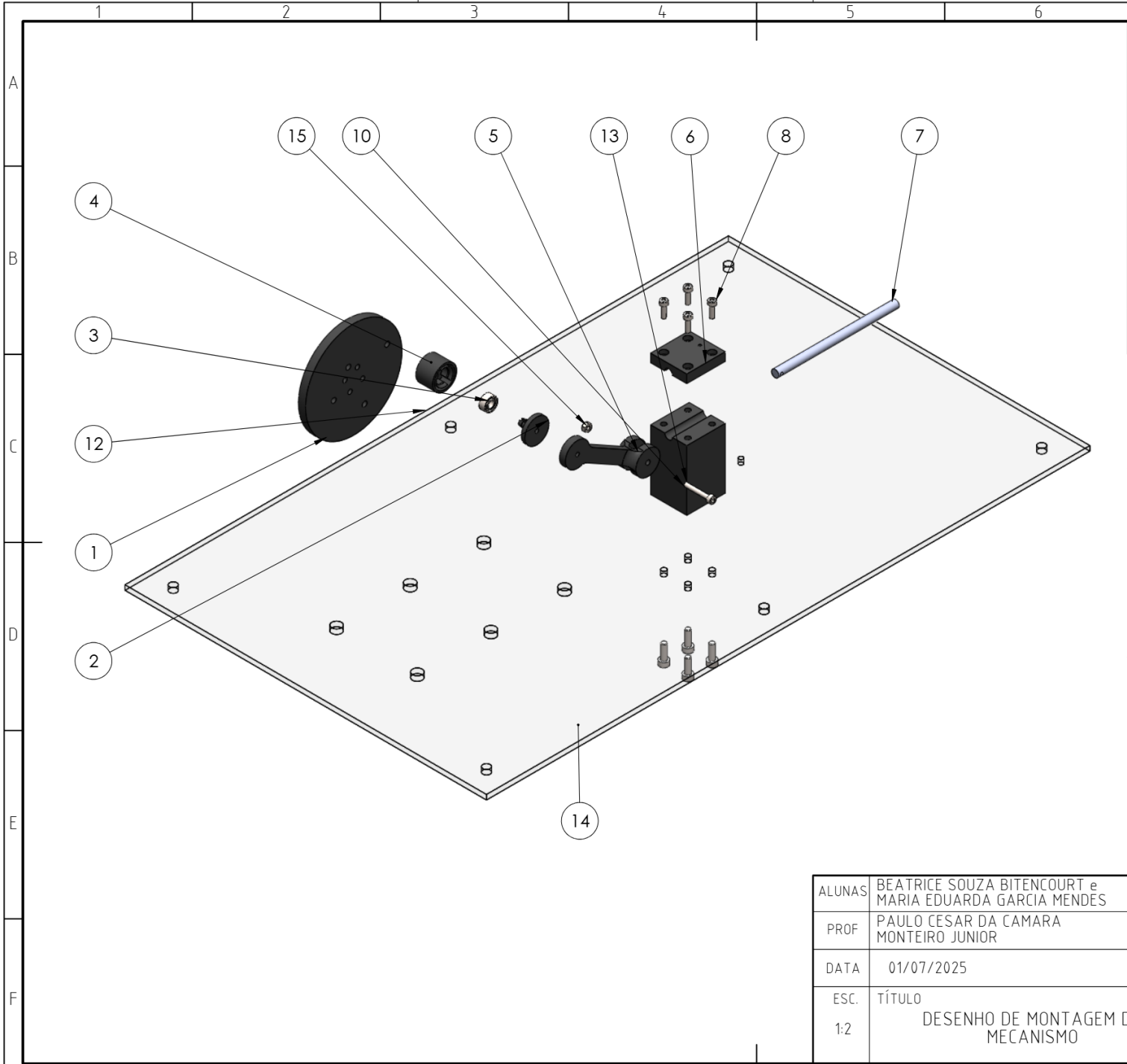


Nº DO ITEM	
1	
2	
3	
4	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	
14	

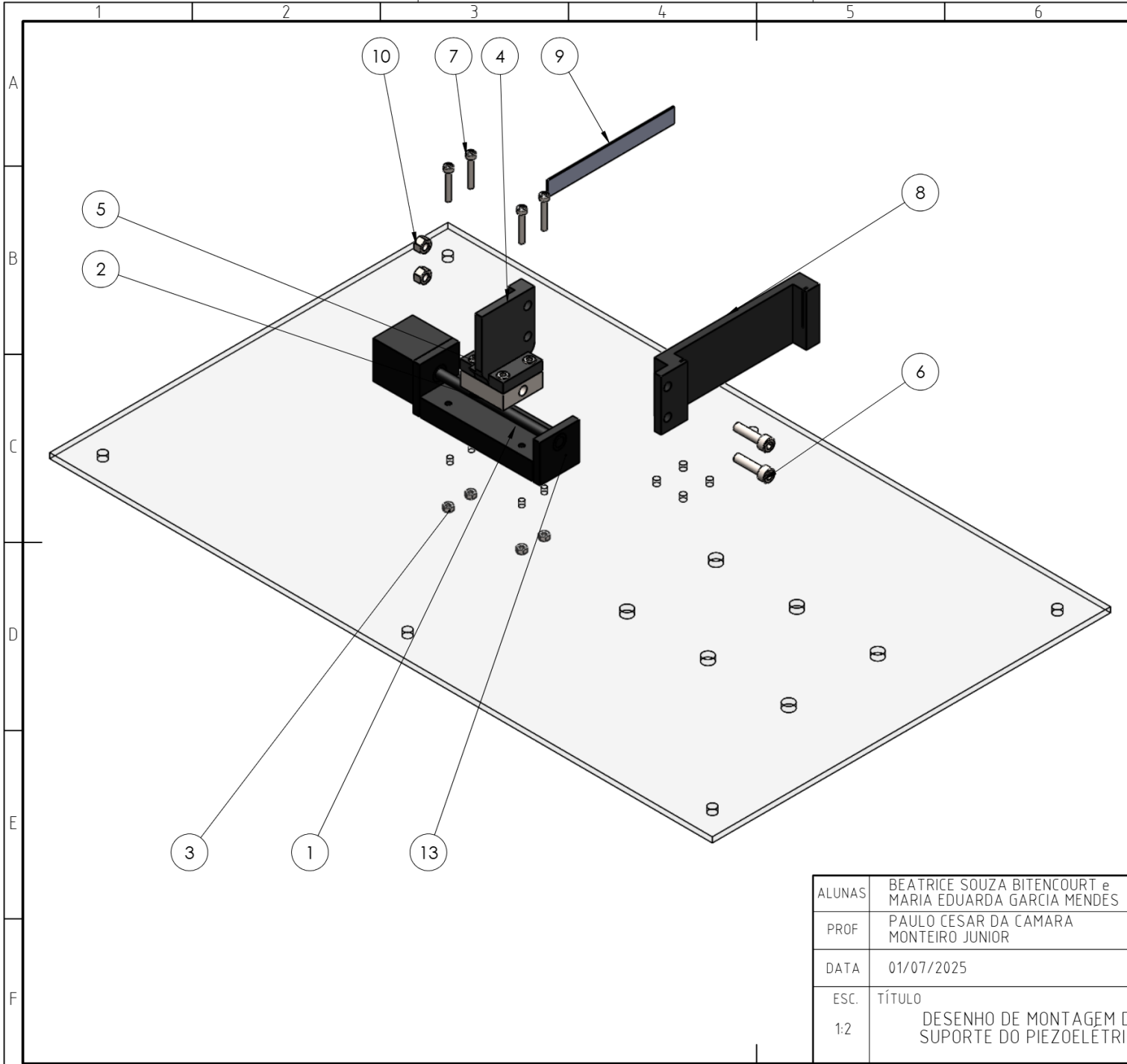
MON
1) Ap
do m
2) Ap
3) Ap
supo
4) Ap
base
sobre

FERR
-Cha

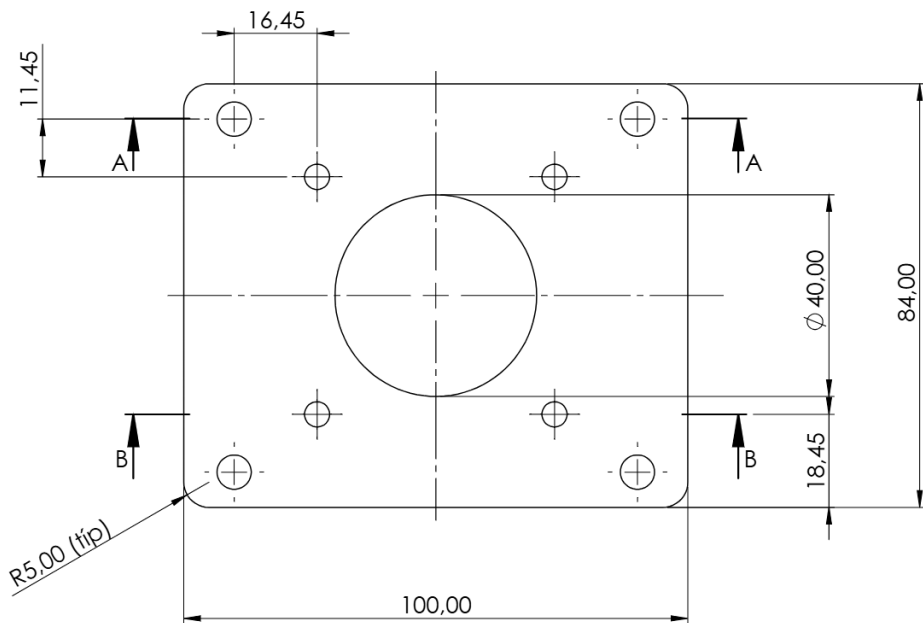
ALUNAS	BEATRICE SOUZA BITENCOURT e MARIA EDUARDA GARCIA MENDES
PROF	PAULO CESAR DA CAMARA MONTEIRO JUNIOR
DATA	01/07/2025
ESC. 1:2	TÍTULO DESENHO DE MONTAGEM D SUPORTE DO MOTOR



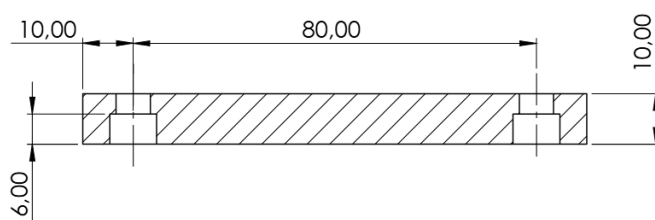
ALUNAS	BEATRICE SOUZA BITENCOURT e MARIA EDUARDA GARCIA MENDES
PROF	PAULO CESAR DA CAMARA MONTEIRO JUNIOR
DATA	01/07/2025
ESC. 1:2	TÍTULO DESENHO DE MONTAGEM D MECANISMO



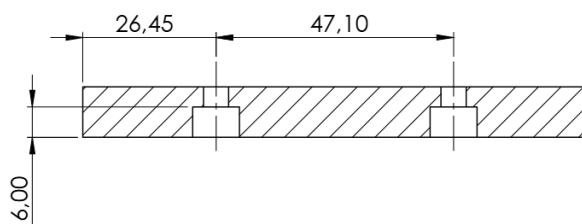
ALUNAS	BEATRICE SOUZA BITENCOURT e MARIA EDUARDA GARCIA MENDES
PROF	PAULO CESAR DA CAMARA MONTEIRO JUNIOR
DATA	01/07/2025
ESC. 1:2	TÍTULO DESENHO DE MONTAGEM D SUPORTE DO PIEZOELETRIC



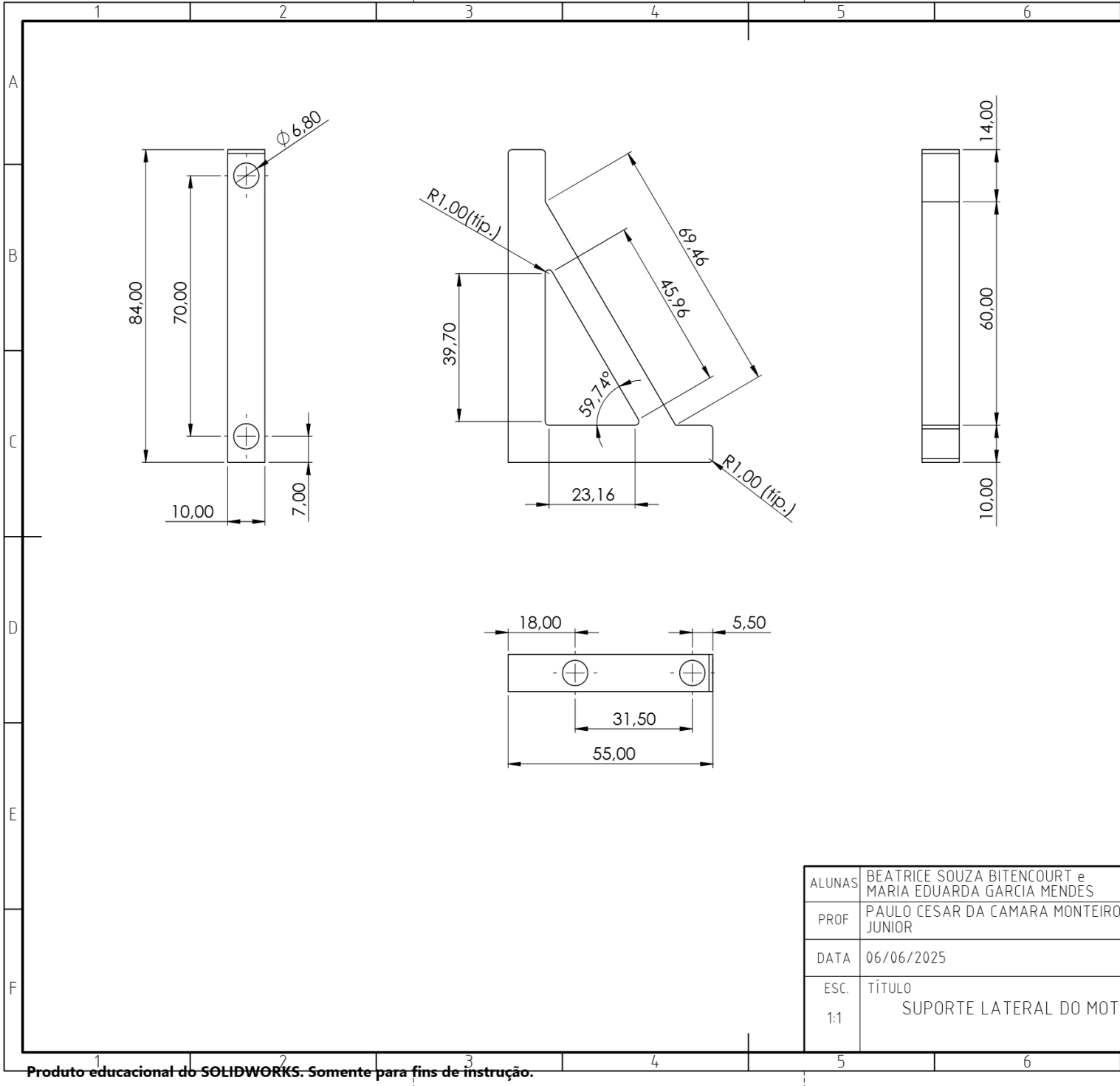
CORTE A-A



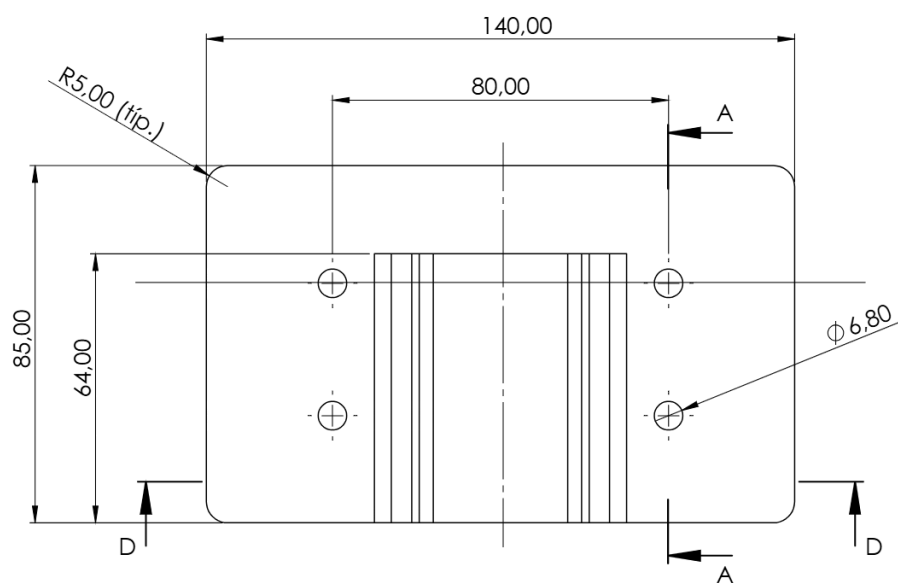
CORTE B-B



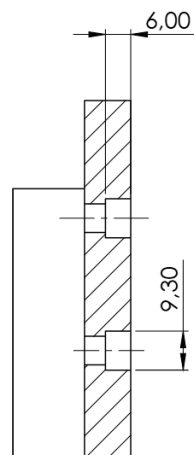
ALUNAS	BEATRICE SOUZA BITENCOURT e MARIA EDUARDA GARCIA MENDES
PROF	PAULO CESAR DA CAMARA MONTEIRO JUNIOR
DATA	06/06/2025
ESC. 1:1	TÍTULO SUPORTE FRONTAL DO MOT



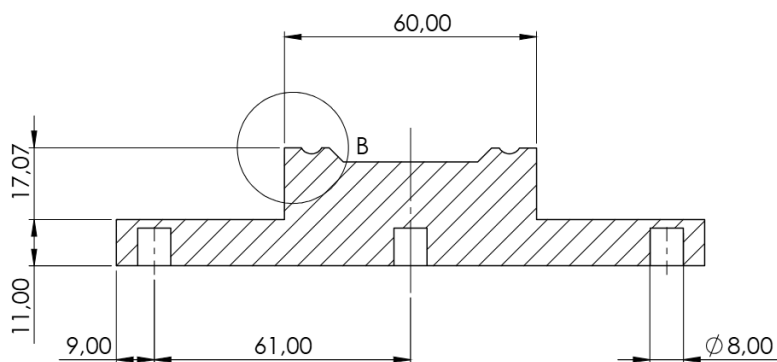
ALUNAS	BEATRICE SOUZA BITENCOURT e MARIA EDUARDA GARCIA MENDES
PROF	PAULO CESAR DA CAMARA MONTEIRO JUNIOR
DATA	06/06/2025
ESC. 1:1	TÍTULO SUPORTE LATERAL DO MOT



CORTE A-A



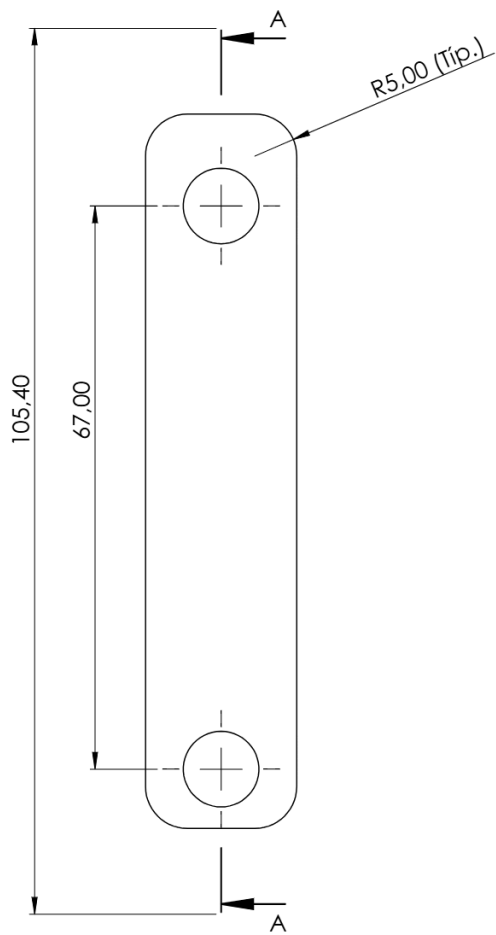
CORTE D-D
ESCALA 1 : 1,2



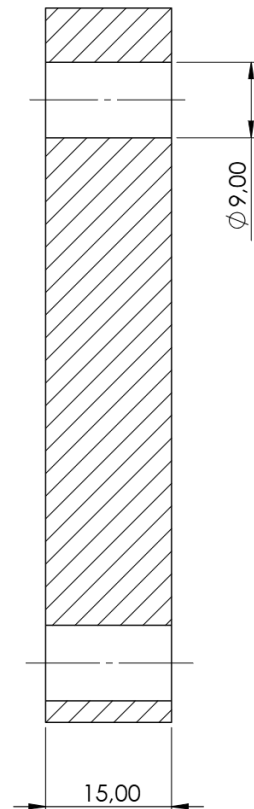
ALUNAS	BEATRICE SOUZA BITENCOURT e MARIA EDUARDA GARCIA MENDES
PROF	PAULO CESAR DA CAMARA MONTEIRO JUNIOR
DATA	07/03/2025
ESC. 1:1	TÍTULO BASE DO MOTOR ATUADO

A
B
C
D
E
F

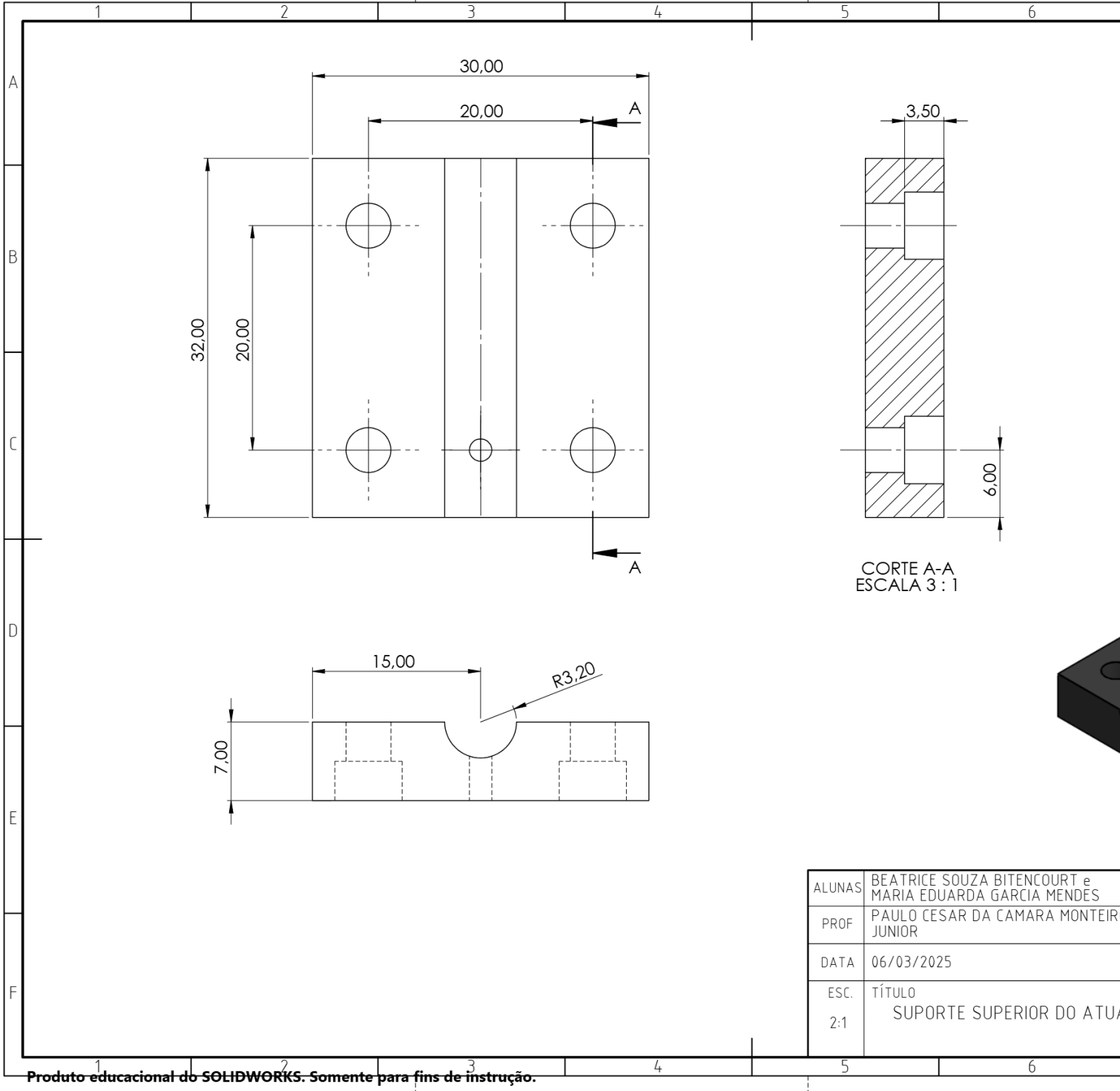
1 2 3 4 5 6



SEÇÃO A-A
ESCALA 2 : 1.2

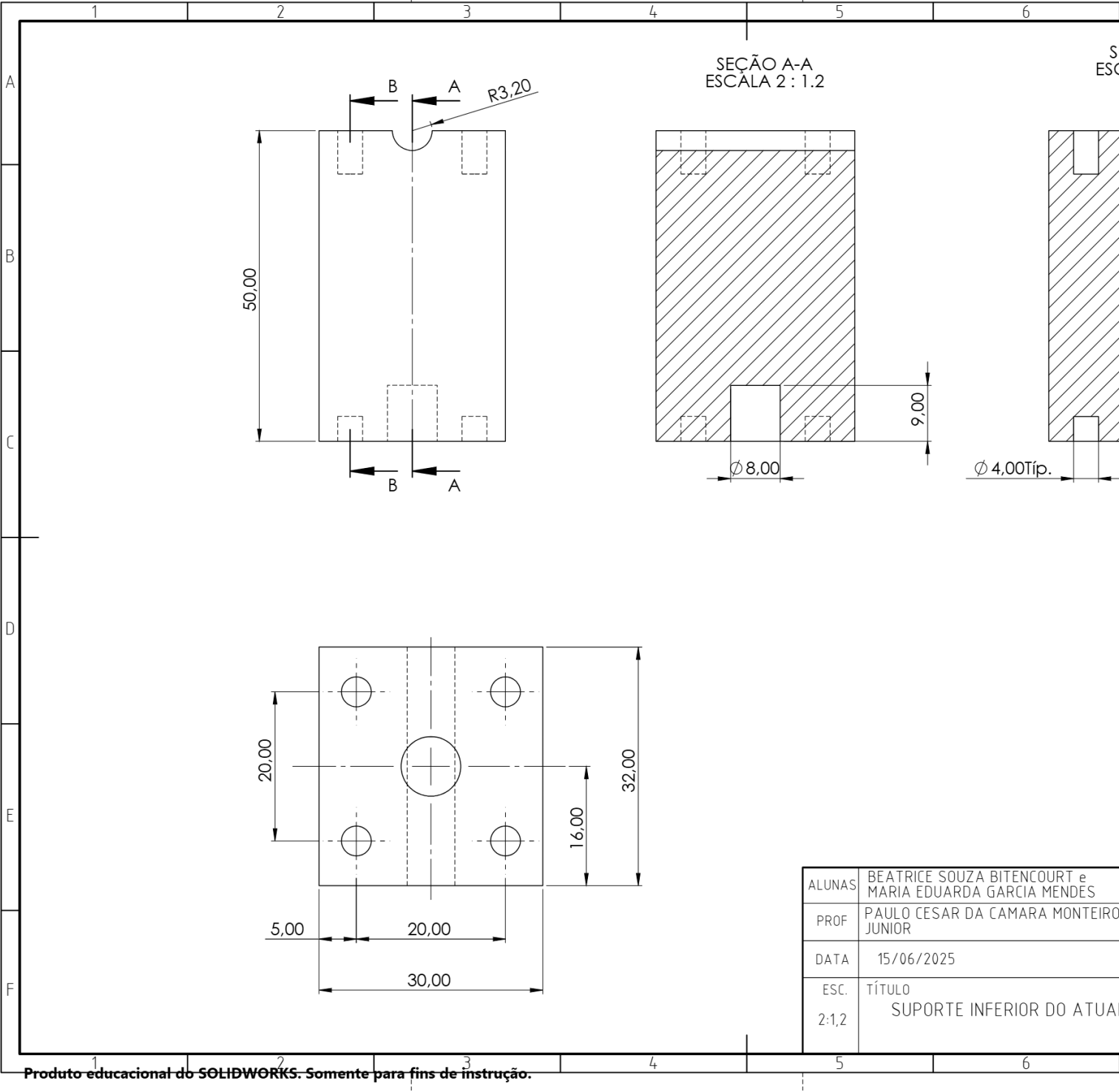


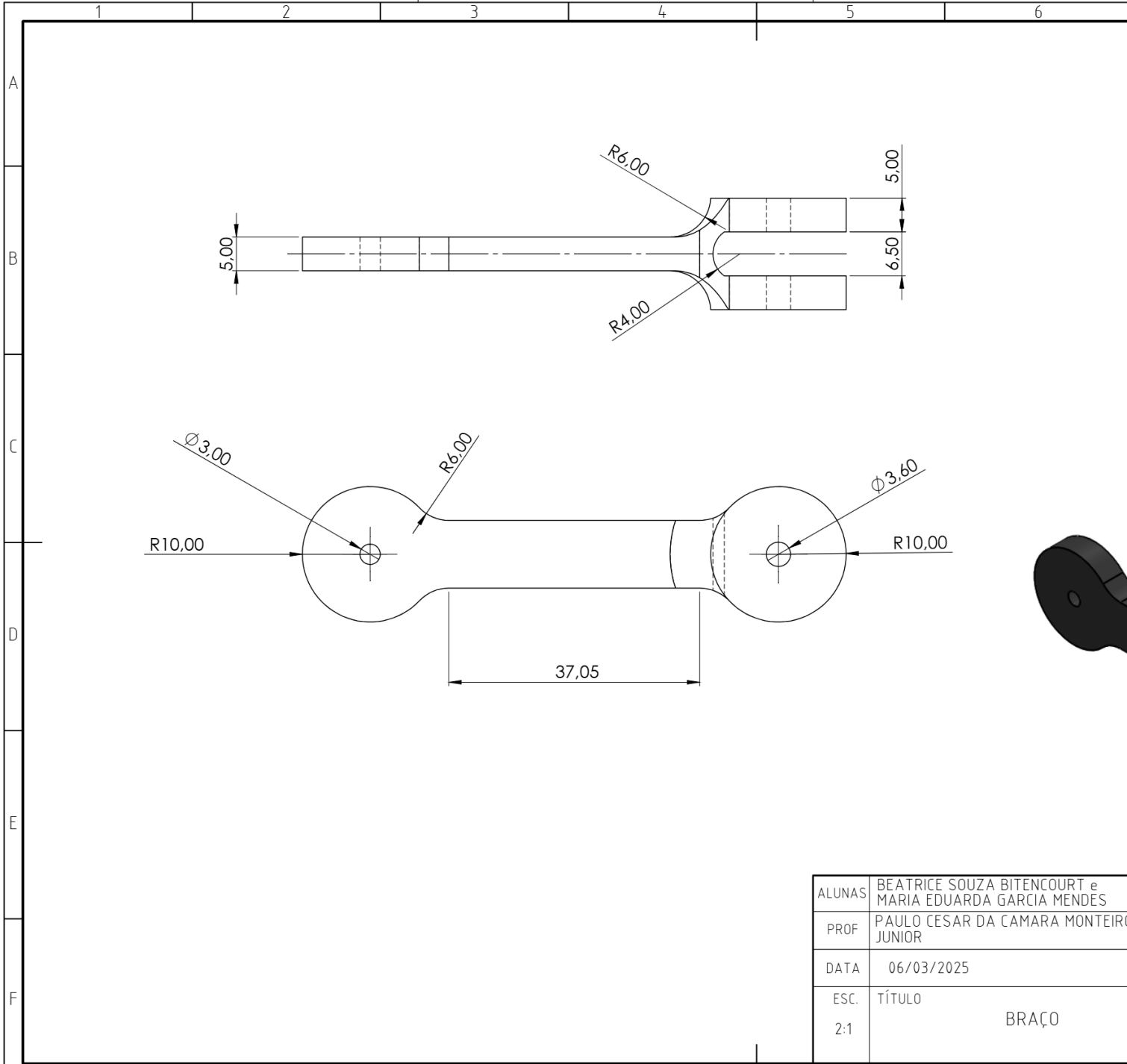
ALUNAS	BEATRICE SOUZA BITENCOURT e MARIA EDUARDA MENDES GARCIA
PROF	PAULO CESAR DA CAMARA MONTEIRO JUNIOR
DATA	15/06/2025
ESC. 2:1,5	TÍTULO BASE AMORTECEDORA



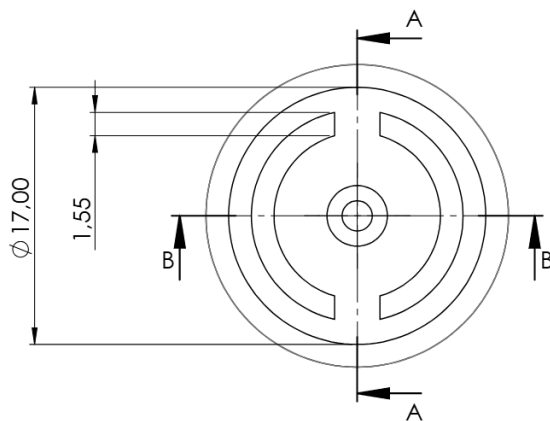
CORTE A-A
ESCALA 3 : 1

ALUNAS	BEATRICE SOUZA BITENCOURT e MARIA EDUARDA GARCIA MENDES
PROF	PAULO CESAR DA CAMARA MONTEIRO JUNIOR
DATA	06/03/2025
ESC. 2:1	TÍTULO SUPORTE SUPERIOR DO ATUA

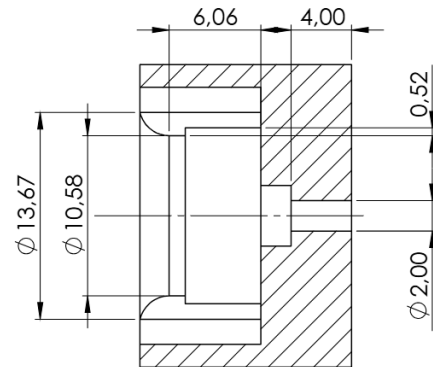




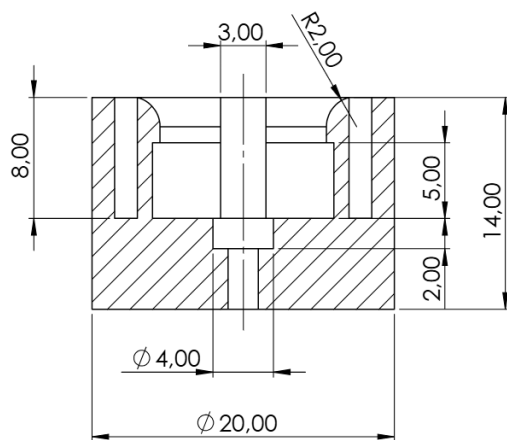
ALUNAS	BEATRICE SOUZA BITENCOURT e MARIA EDUARDA GARCIA MENDES
PROF	PAULO CESAR DA CAMARA MONTEIRO JUNIOR
DATA	06/03/2025
ESC. 2:1	TÍTULO BRAÇO



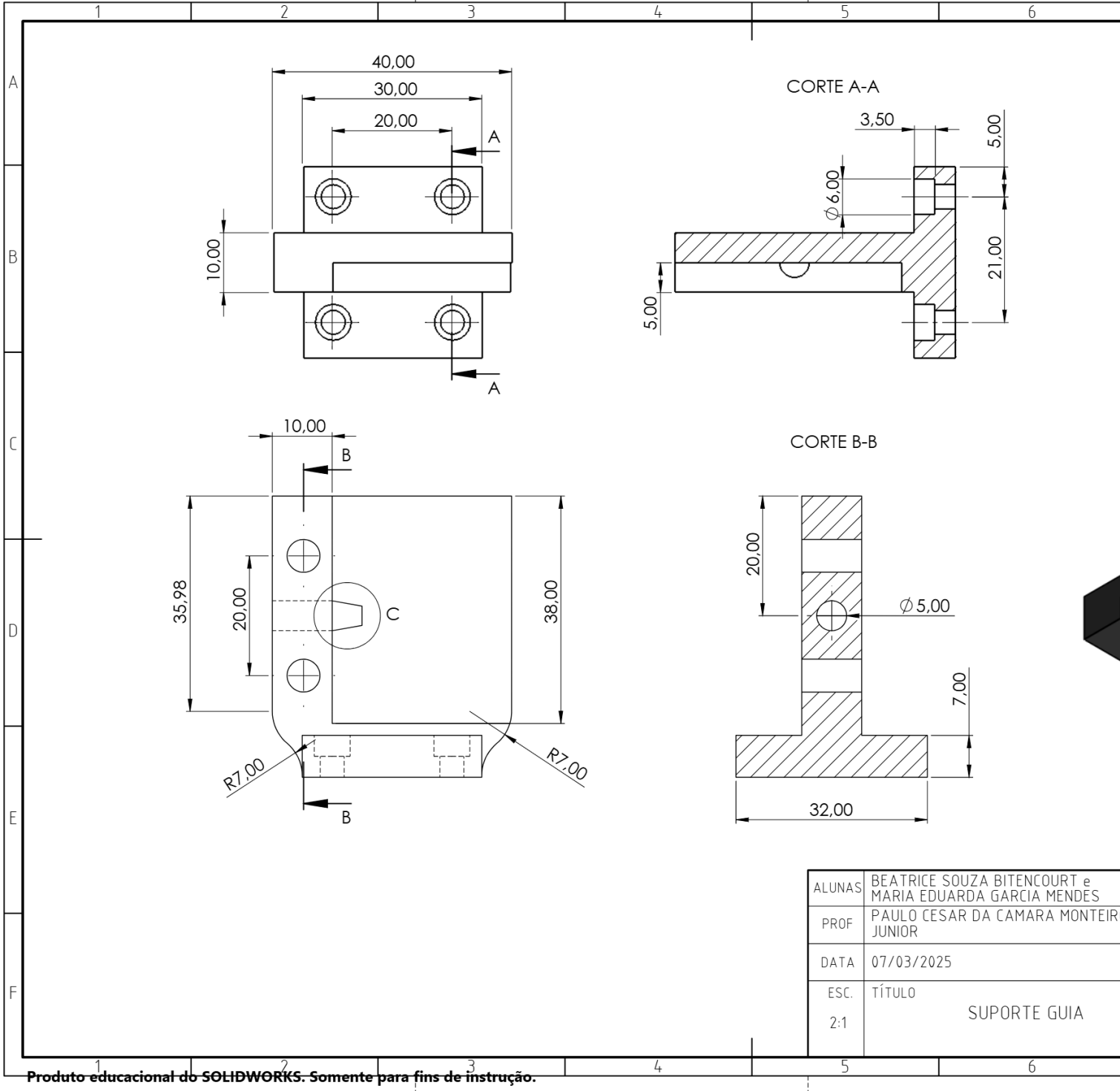
CORTE A-A

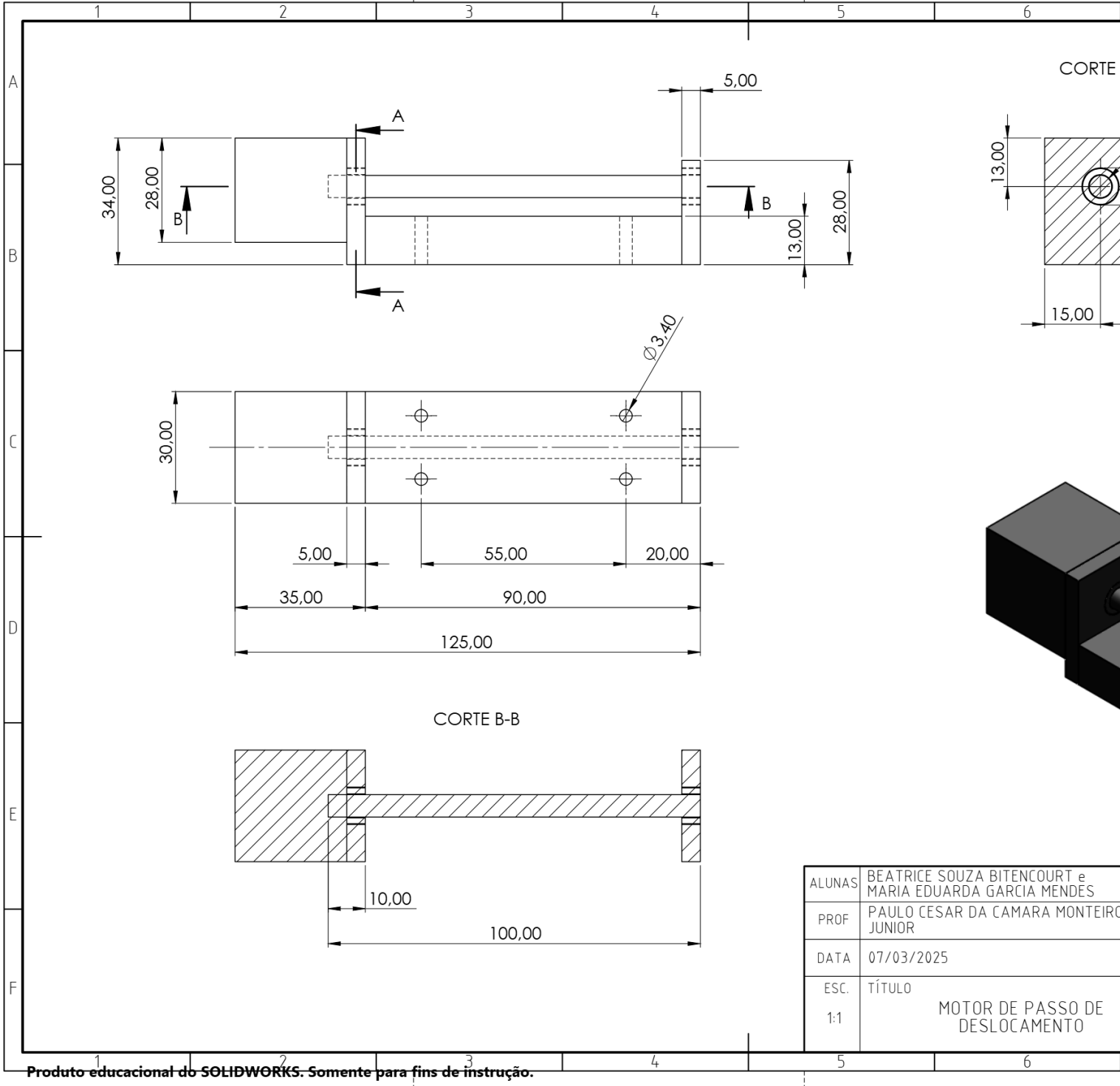


CORTE B-B

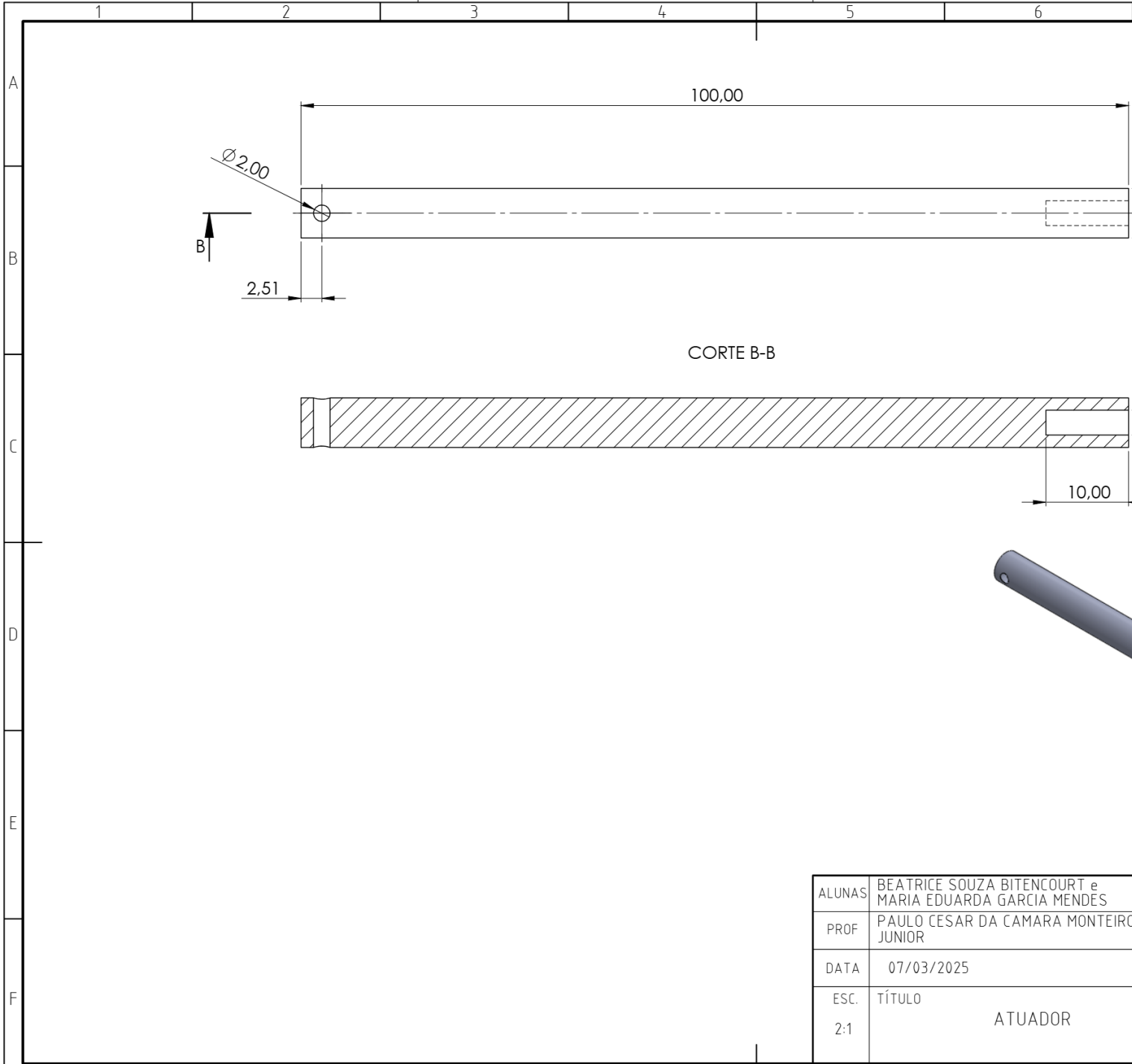


ALUNAS	BEATRICE SOUZA BITENCOURT e MARIA EDUARDA GARCIA MENDES
PROF	PAULO CESAR DA CAMARA MONTEIRO JUNIOR
DATA	06/03/2025
ESC. 3:1	TÍTULO CONECTOR COM ROLAMENTO

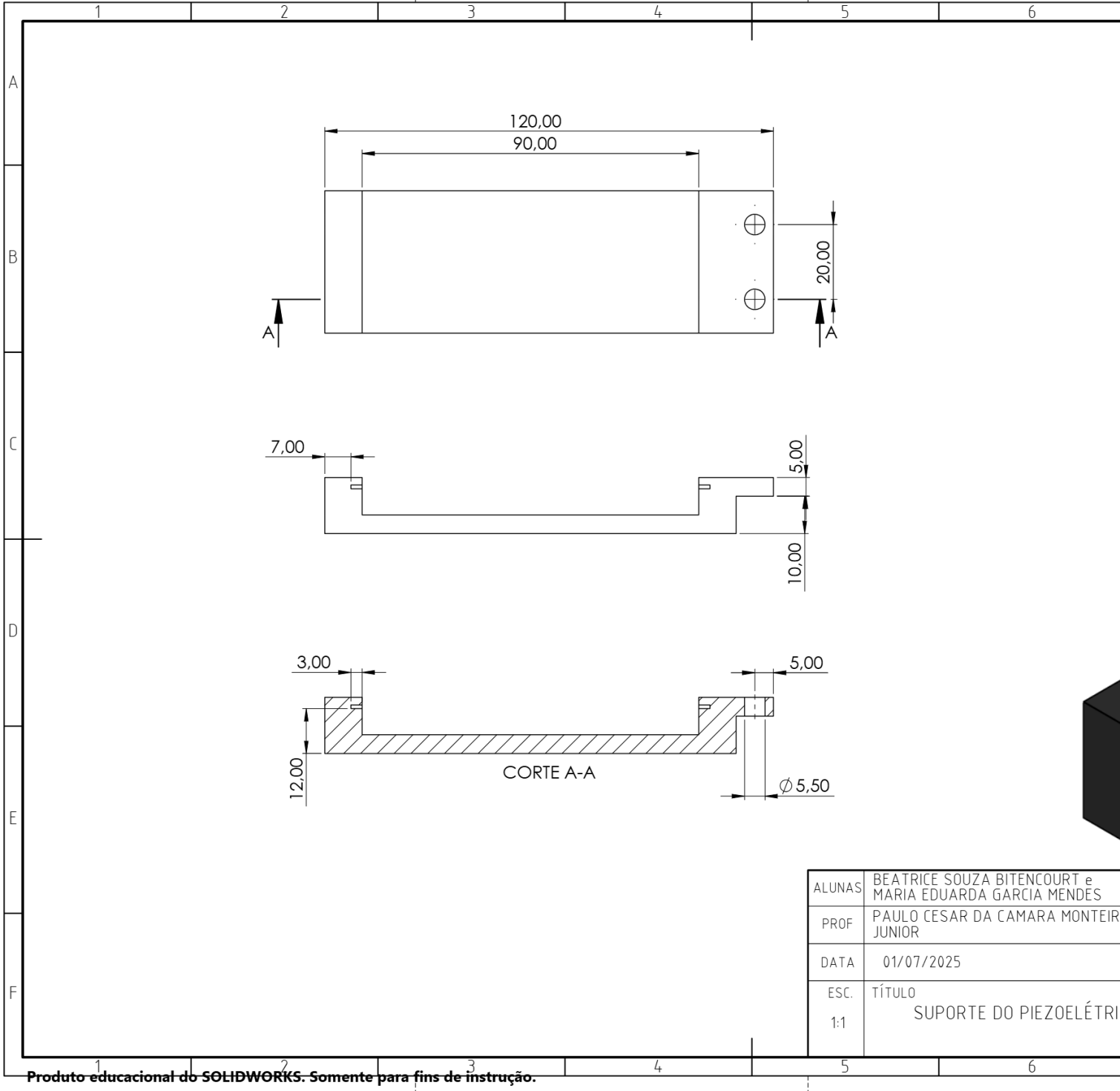




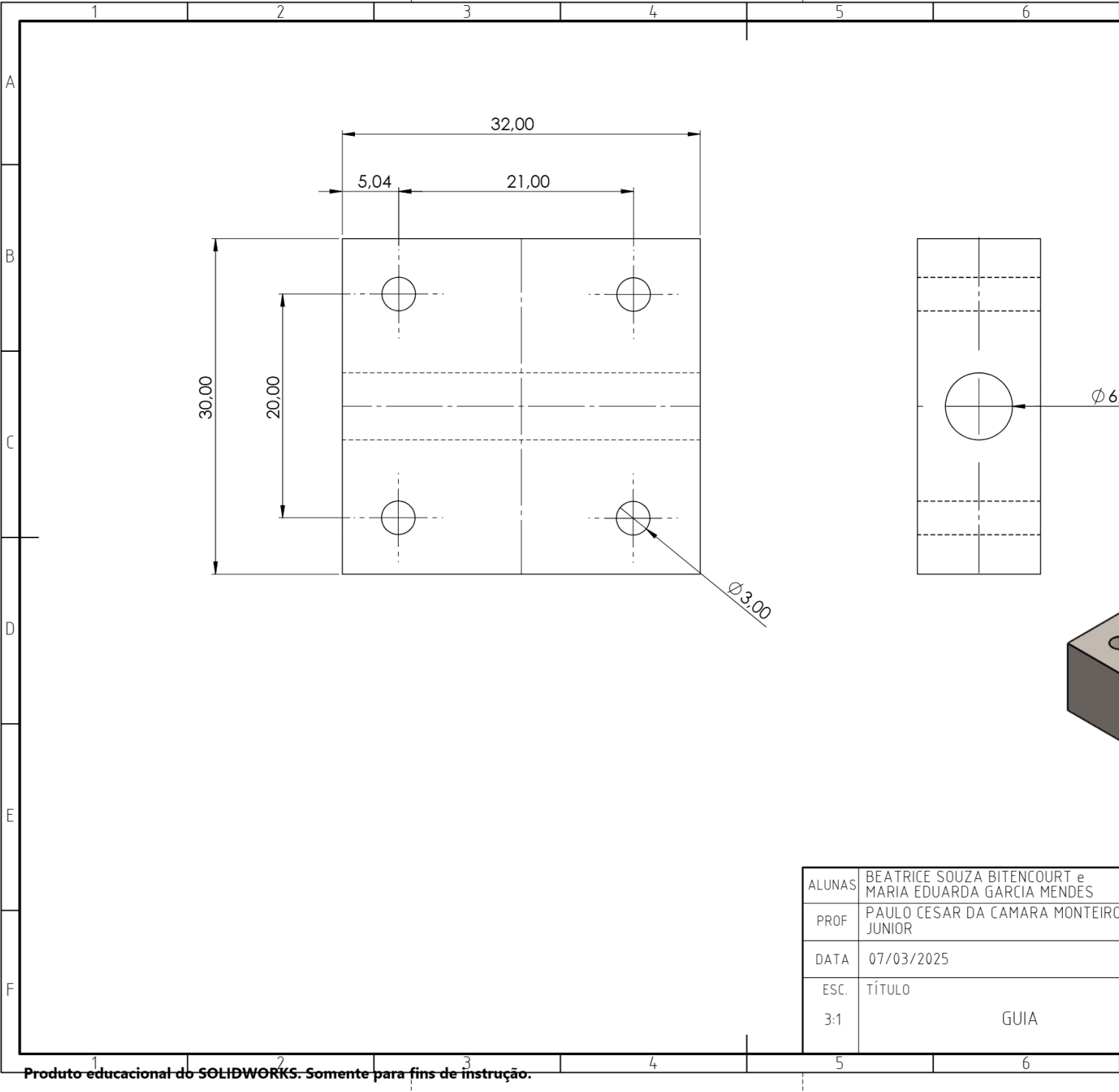
ALUNAS	BEATRICE SOUZA BITENCOURT e MARIA EDUARDA GARCIA MENDES
PROF	PAULO CESAR DA CAMARA MONTEIRO JUNIOR
DATA	07/03/2025
ESC.	TÍTULO
1:1	MOTOR DE PASSO DE DESLOCAMENTO

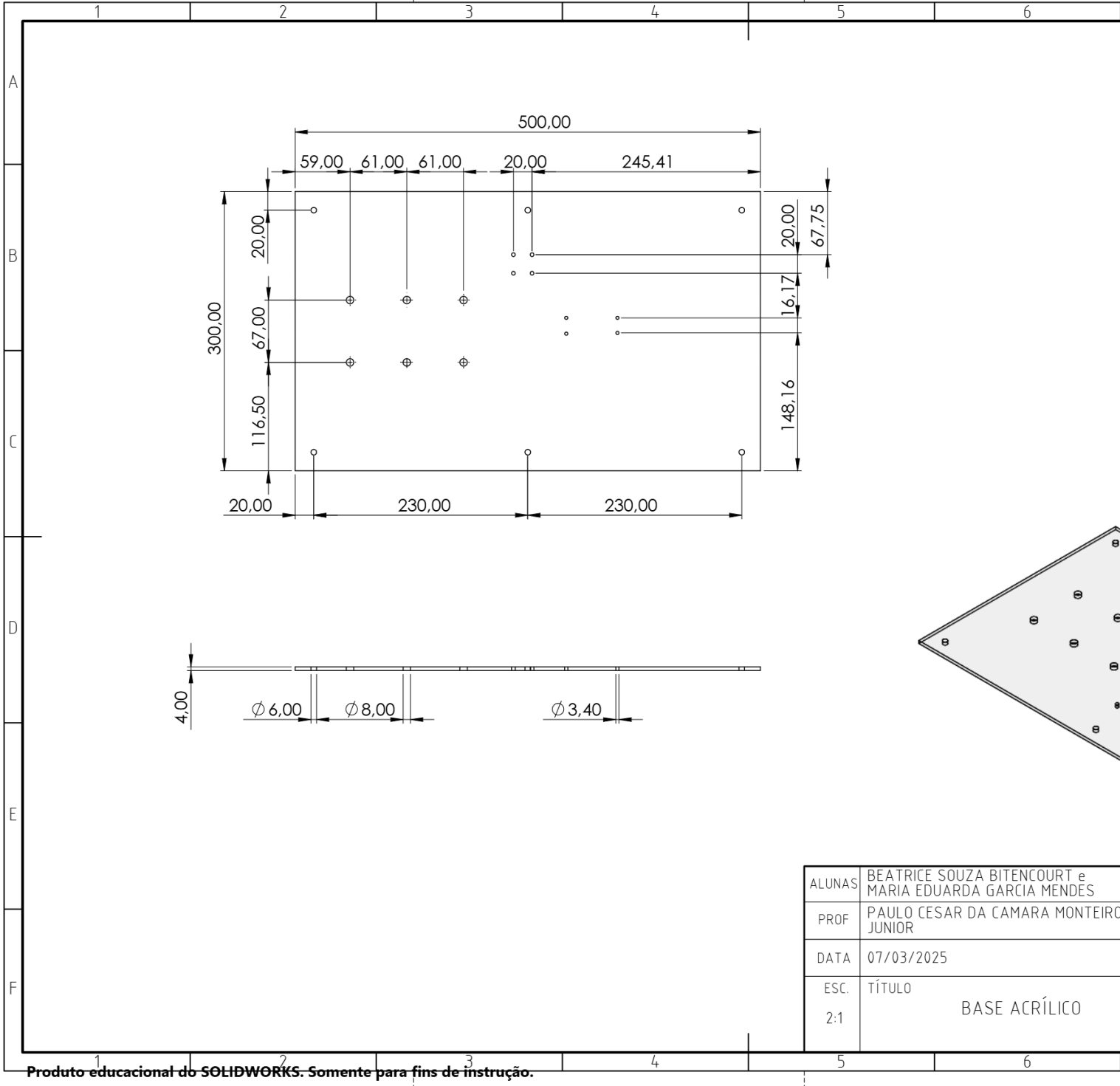


ALUNAS	BEATRICE SOUZA BITENCOURT e MARIA EDUARDA GARCIA MENDES
PROF	PAULO CESAR DA CAMARA MONTEIRO JUNIOR
DATA	07/03/2025
ESC. 2:1	TÍTULO ATUADOR

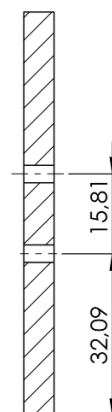
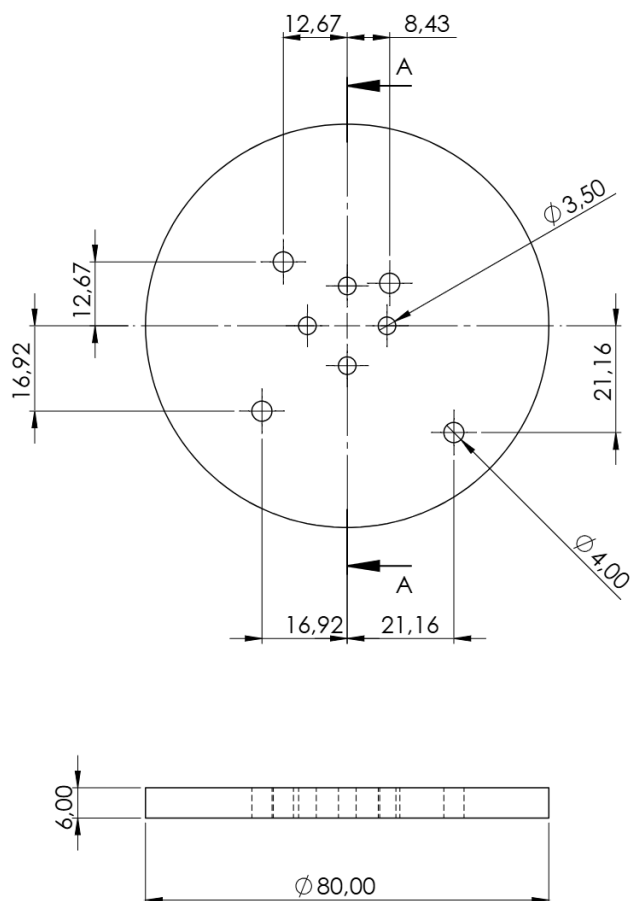


ALUNAS	BEATRICE SOUZA BITENCOURT e MARIA EDUARDA GARCIA MENDES
PROF	PAULO CESAR DA CAMARA MONTEIRO JUNIOR
DATA	01/07/2025
ESC. 1:1	TÍTULO SUPORTE DO PIEZOELÉTRICO



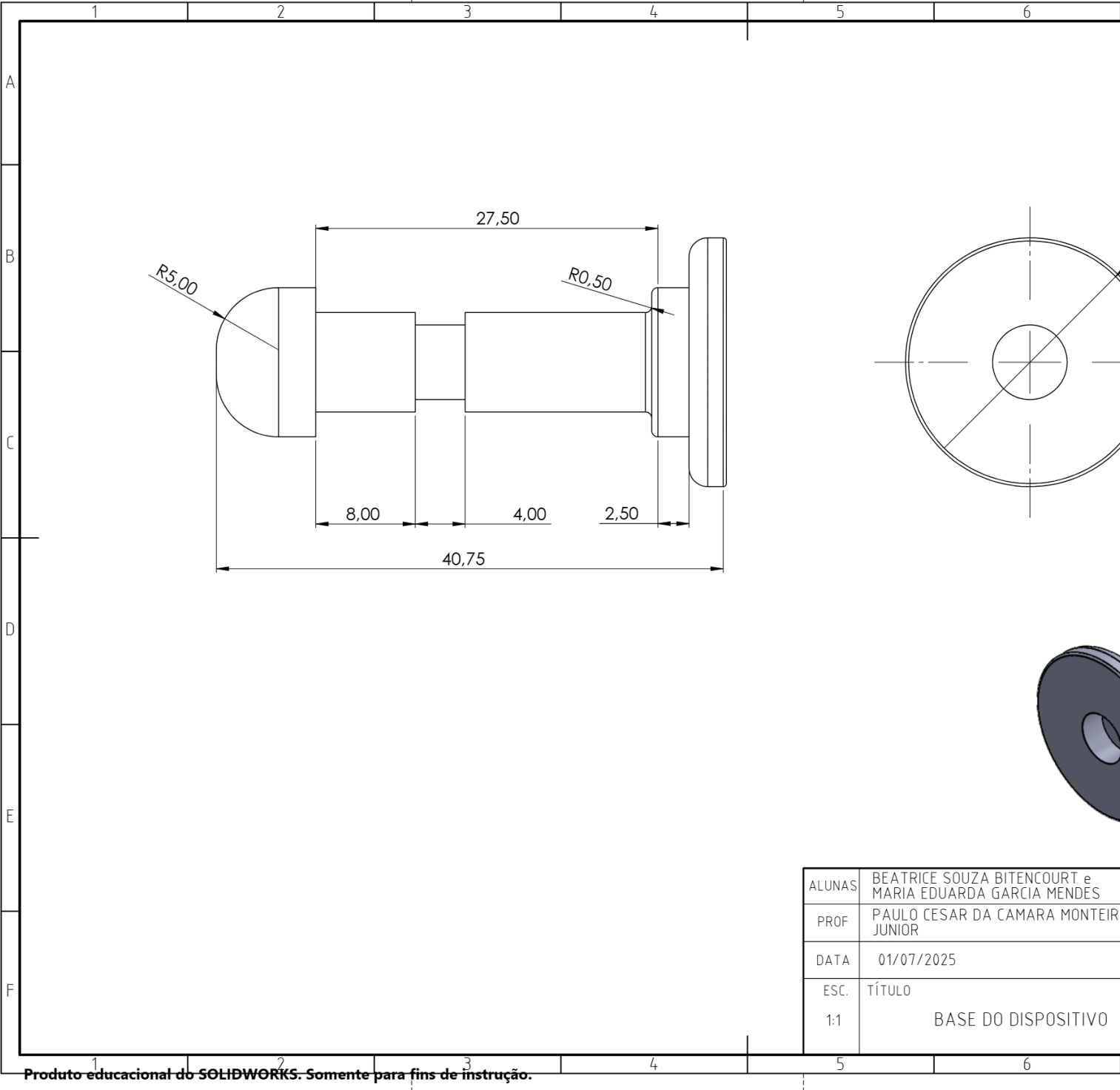


ALUNAS	BEATRICE SOUZA BITENCOURT e MARIA EDUARDA GARCIA MENDES
PROF	PAULO CESAR DA CAMARA MONTEIRO JUNIOR
DATA	07/03/2025
ESC. 2:1	TÍTULO BASE ACRÍLICO

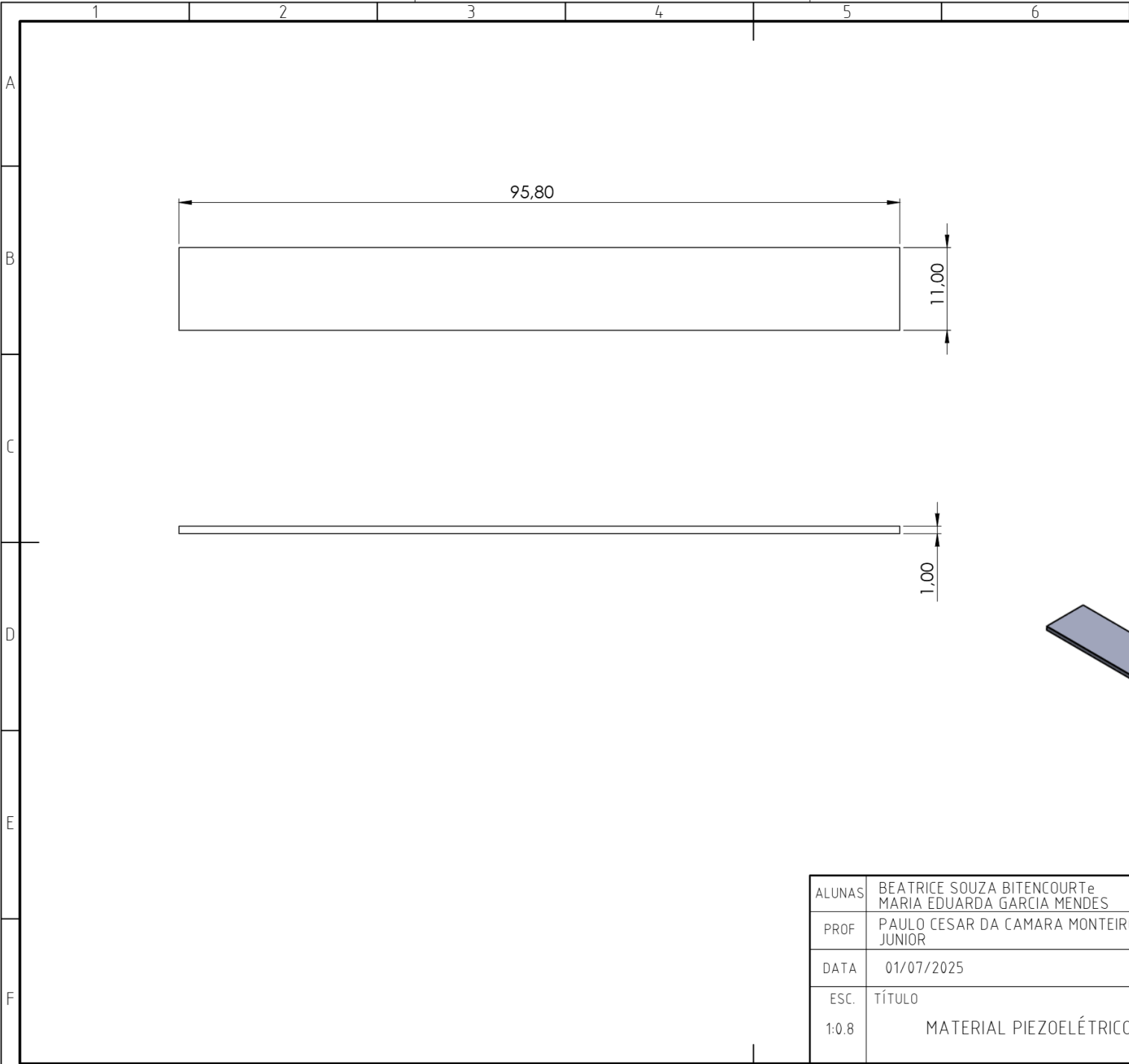


SEÇÃO A-A

ALUNAS	BEATRICE SOUZA BITENCOURT e MARIA EDUARDA GARCIA MENDES
PROF	PAULO CESAR DA CAMARA MONTEIRO JUNIOR
DATA	07/03/2025
ESC. 1:1	TÍTULO ROTOR



ALUNAS	BEATRICE SOUZA BITENCOURT e MARIA EDUARDA GARCIA MENDES
PROF	PAULO CESAR DA CAMARA MONTEIR JUNIOR
DATA	01/07/2025
ESC.	TÍTULO
1:1	BASE DO DISPOSITIVO



ALUNAS	BEATRICE SOUZA BITENCOURT e MARIA EDUARDA GARCIA MENDES
PROF	PAULO CESAR DA CAMARA MONTEIRO JUNIOR
DATA	01/07/2025
ESC.	TÍTULO
1:0.8	MATERIAL PIEZOELÉTRICO