



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE UM
EXCITADOR ELETRODINÂMICO COM IMÃ
PERMANENTE**

Por

Gustavo Carvalho Pereira

**Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal
da Paraíba para obtenção do grau de Mestre**

João Pessoa – Paraíba

Julho / 2022

GUSTAVO CARVALHO PEREIRA

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE UM
EXCITADOR ELETRODINÂMICO COM IMÃ
PERMANENTE**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre.

Orientador: Professor Dr. Cícero da Rocha Souto

João Pessoa – Paraíba

Julho / 2022

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

P436d Pereira, Gustavo Carvalho.

Desenvolvimento e caracterização de um excitador eletrodinâmico com imã permanente / Gustavo Carvalho Pereira. – João Pessoa, 2022.

135 f. : il.

Orientação: Cícero da Rocha Souto.

Dissertação (Mestrado) – UFPB/CT.

1. Engenharia mecânica. 2. Força e deslocamento. 3. Fenômenos ondulatórios. 4. Campo magnético. I. Souto, Cícero da Rocha. II. Título.

UFPB/BC

CDU 621(043)

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE UM EXCITADOR ELETRODINÂMICO COM ÍMÃ PERMANENTE

por

GUSTAVO CARVALHO PEREIRA

Dissertação aprovada em 29 de julho de 2022



Prof. Dr. CÍCERO DA ROCHA SOUTO
Orientador – UFPB



Prof. Dr. MARCELO CAVALCANTI RODRIGUES
Examinador Interno – UFPB



Prof. Dr. ALEXSANDRO JOSÉ VIRGINIO DOS SANTOS
Examinador Externo – UFPB



ATA DA DEFESA PÚBLICA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DO ALUNO **GUSTAVO CARVALHO PEREIRA**, DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA.

Aos vinte e nove dias do mês de julho do ano de dois mil e vinte e dois, às 9:00 horas, teve lugar, no auditório do PPGEM, a apresentação e defesa da dissertação intitulada **“DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE UM EXCITADOR ELETRODINÂMICO COM ÍMÃ PERMANENTE”** pelo aluno **Gustavo Carvalho Pereira**, com vistas à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. A Comissão Examinadora foi composta pelos Professores: Dr. Cícero da Rocha Souto – UFPB (Orientador), Dr. Marcelo Cavalcanti Rodrigues – UFPB (Examinador Interno) e Dr. Alexsandro José Virginio dos Santos - UFPB (Examinador Externo), tendo sido presidida, por indicação dos seus membros, pelo Prof. Dr. Cícero da Rocha Souto. Instalada a Banca Examinadora, o Senhor Presidente passou a palavra ao aluno para apresentar a defesa do seu trabalho de dissertação e este iniciou a apresentação declarando perante a Banca Examinadora e o público presente que o trabalho que irá apresentar é original e de sua autoria. A exposição oral iniciou às 9:15 horas, sendo concluída às 10:10 horas, tendo sido iniciada, logo a seguir, a arguição pelos examinadores, finalizando-a às 10:50 horas. Em seguida, o Senhor Presidente convidou a Banca Examinadora a reunir-se reservadamente para deliberação. Concluída a Reunião, o Senhor Presidente convocou o aluno e demais presentes para proclamar o resultado, tendo sido atribuído, por unanimidade, ao mestrando o conceito **Aprovado** nos termos do Regulamento Geral dos Cursos e Programas de Pós-Graduação *Stricto Sensu* da Universidade Federal da Paraíba (Resolução nº 34/2014-CONSEPE) e do Regulamento do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba (Resolução nº 13/2019-CONSEPE). Ao final da sessão, após os agradecimentos por parte do aluno, o Senhor Presidente, por recomendação dos membros da Banca, estabeleceu um prazo máximo de 30 dias para o mestrando providenciar as correções recomendadas, ficando a emissão do diploma do título de Mestre condicionada a essas retificações que serão verificadas pelo orientador. Às 11 horas e 5 minutos, o Senhor Presidente encerrou os trabalhos, determinando a leitura para fins de aprovação e a lavratura da presente ata que vai assinada por todos os membros da Comissão Examinadora.

João Pessoa, 29 de julho de 2022.

Orientador:


Prof. Dr. CÍCERO DA ROCHA SOUTO

Examinador Interno:


Prof. Dr. MARCELO CAVALCANTI RODRIGUES

Examinador Externo:


Prof. Dr. ALEXSANDRO JOSÉ VIRGINIO DOS SANTOS

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a **minha família** que me apoiou de diversas formas durante o curso. Em especial à minha esposa **Juliana Sampaio**, que incentivou e ajudou na formatação do trabalho. Agradeço aos meus filhos **Breno de Carvalho Sampaio** e **Letícia Sampaio Pereira** pelo carinho nos momentos de aflição e insegurança.

Ao meu pai **Otacílio José Pereira**, à minha mãe **Sônia Maria Carvalho Pereira**, à minha sogra **Maria de Lurdes Aguiar** e à minha querida prima **Ângela Mendonça** que sempre apoiaram, mesmo em outra cidade, a minha escolha pela ciência e pelo conhecimento acadêmico.

À **Sérgio Pessoa de Lima Marques** técnico do Centro de Energias Alternativas e Renováveis.

À **Marconi Antônio Alves Filho**, que forneceu o alto-falante usado para a construção do protótipo.

Ao professor **Dr. Cícero da Rocha Souto** que me orientou, tirou dúvidas e amparou minhas inseguranças durante o curso, principalmente frente as dificuldades e desafios impostos pelo isolamento social devido à pandemia do COVID-19.

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE UM EXCITADOR ELETRODINÂMICO COM IMÃ PERMANENTE

RESUMO

O fenômeno ondulatório é objeto de estudo em diversas áreas das engenharias. Excitadores Eletrodinâmicos acoplados a corpos de prova são aplicados em experimentos onde requerem a vibração forçada. As respostas em aceleração podem revelar graficamente as variações de elasticidade, transformação de fase e resposta histerética de uma liga de memória de forma testada sob carregamento dinâmico vibratório, por exemplo. Dessa forma a possibilidade de se utilizar os excitadores eletrodinâmicos e controlar suas frequências de ressonância por amortecimento quando se utiliza sistemas massa-mola-amortecedor é factível. O presente trabalho propõe a elaboração do projeto, desenvolvimento e a caracterização de um excitador eletrodinâmico, e que seja capaz de produzir respostas em amplitudes de aceleração, força e deslocamento quando excitado eletricamente por sinal senoidal. A construção do protótipo, montagem, geração de sinal e captura são relatados. A metodologia aplicada na caracterização do excitador eletrodinâmico consistiu em analisar as respostas em frequências do protótipo a partir da instalação de quatro molas planas com espessuras diferentes pela captura de sinais por acelerômetro instalado no topo do conjunto dinâmico. A comparação dos resultados capturados com os sinais do circuito elétrico amplificado são discutidos. As frequências de excitação na faixa entre 1 Hz a 25 kHz foram aplicados nos experimentos. Os gráficos apresentam as respostas pela função de resposta em frequência, e expõe amortecimento em aceleração, força e deslocamento entre 40 Hz e 600 Hz. A distorção harmônica total demonstrada confronta os sinais resposta entre a tensão do acelerômetro e do amplificador. A contribuição da força magnética do ímã permanente em detrimento à força resultante que o equipamento produz é discutida. O estudo contribuiu no desenvolvimento do protótipo, e sua aplicação tem potencial para atuar em diversos experimentos os quais requerem cargas dinâmicas cíclicas por excitação ondulatória forçada incluindo liga de memória de forma.

Palavras chaves – Respostas em frequência e amplitude, conjunto dinâmico, aceleração, deslocamento, campo magnético.

DEVELOPMENT AND CHARACTERIZATION OF AN ELECTRODYNAMIC EXCITER WITH PERMANENT MAGNET

ABSTRACT

The wave phenomenon is the object of study in several areas of engineering. Electrodynamic Exciters coupled to specimens are applied in experiments where forced vibration is required. Accelerating responses can graphically reveal variations in elasticity, phase transformation, and hysteretic response of a shape memory alloy tested under dynamic vibratory loading, for example. Thus, the possibility of using Electrodynamic Exciters and controlling their resonant frequencies by damping when using the spring-damper-mass system is feasible. The present work proposes the design, development and characterization of an Electrodynamic Exciter, capable of producing responses in acceleration, force and displacement amplitudes when electrically excited by a sinusoidal signal. Prototype construction, assembly, signal generation and capture are reported. The Electrodynamic Exciter characterization methodology consisted in analyzing the prototype frequency responses from the installation of four flat springs with different thicknesses by capturing signals by an accelerometer installed on dynamic set top. Comparison of the captured results with the amplified electrical circuit signals are discussed. The excitation frequencies in the range between 1 Hz to 25 kHz were applied in the experiments. The graphs present the responses by the frequency response function, and expose damping in acceleration, force and displacement between 40 Hz and 600 Hz. The total harmonic distortion demonstrated compares the response signals between the accelerometer and amplifier voltages. The permanent magnet force contribution to the resultant force which the equipment produces is discussed. The study contributed to prototype development, and its application has the potential to act in several experiments which require cyclic dynamic loads by forced wave excitation including shape memory alloy.

Keywords – Frequency and amplitude responses, dynamic set, acceleration, displacement, magnetic field.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - ‘Shaker’ em corte (a), e a comparação das respostas em frequência do ‘shaker’ real e virtual (b)
- Figura 2 – Projeto em corte do EED proposto (1), Mini Shaker BRÜEL & KJÆR 4810 (2)
- Figura 3 – Sistema magnético padrão de alto-falante convencional
- Figura 4 – Corte do Circuito Magnético
- Figura 5 – Deslocamento máximo da BM dentro do *GAP*
- Figura 6 – Ilustração entre EED: experimento de Machado et. al. (2019) (a) e projeto EED-01 (b)
- Figura 7 – Usinagem do anel centralizador
- Figura 8 – Fluxograma da estrutura de testes
- Figura 9 – Acelerômetro tipo 4507
- Figura 10 – Condicionador de Sinal PCB-480E09
- Figura 11 – Amplificador de Potência CL-500
- Figura 12 – Placa NI USB 6216
- Figura 13 – Fluxograma dos experimentos com o EED-01
- Figura 14 – Molas do Excitador Eletrodinâmico EED-01
- Figura 15 – Molas do Excitador Eletrodinâmico EED-01
- Figura 16 – Bancada de teste vibracional do EED
- Figura 17 – Fluxograma do processo analítico de sinal do amplificador CL-500
- Figura 18 – Bancada de captura V_{RMS} experimental amplificador CL-500
- Figura 19 – Bancada de captura I_{RMS} experimental amplificador CL-500
- Figura 20 – Circuito indutivo da BM aplicado no projeto do EED-01
- Figura 21 – Bancada de captura do B experimental: (a) e (b) da BM; (c) e (d) do IPAF
- Figura 22 – Bancada de captura do B experimental do GAP: (a) Tyoke; (b) PPN
- Figura 23 – Arquitetura do software CAD
- Figura 24 – Primeira proposta do EED
- Figura 25 – Possibilidade de torção das molas na primeira versão do EED-01
- Figura 26 – Disposição das molas no projeto definitivo do EED-01

Figura 27 – Vista em 3D suprimida do AC com rolamento LM12UU instalado no AR

Figura 28 – Modelo DCL de molas em paralelo assumido na versão virtual definitiva do EED

Figura 29 – Renderização da versão definitiva em 3D do EED-01

Figura 30 – Montagem do EED-01

Figura 31 – Esquema virtual construtivo do EED-01

Figura 32 – EED-01 definitivo e real após sua montagem

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Catalografia dos Desenhos do EED-01

Tabela 2 – Materiais empregados na construção do EED-01

Tabela 3 – Ficha Técnica Elétrica da Bobina Magnética Multicamada

Tabela 4 – Calibração do acelerômetro Delta Tron[®]

Tabela 5 – Ficha Técnica Placa NI USB – 6216

Tabela 6 – Ficha Técnica Condicionador de Sinal PCB-480E09

LISTA DE GRÁFICOS

- Gráfico 1 – Distribuição do B no Tyoke (a) e na PPN (b)
- Gráfico 2 – Ensaio experimental: investigação da constante de rigidez elástica das molas
- Gráfico 3 – Resposta individual em aceleração do EED-01
- Gráfico 4 – Resposta em aceleração dos quatro sinais associados às molas do EED-01
- Gráfico 5 – Resposta em aceleração dos quatro picos máximos do EED-01
- Gráfico 6 – Decaimento da aceleração durante o experimento com o EED-01
- Gráfico 7 – Resposta em aceleração dos pontos de máximo em frequências superiores a 900 Hz
- Gráfico 8 – Resposta em deslocamento do conjunto dinâmico do EED-01
- Gráfico 9 - Pontos de condução no deslocamento do conjunto dinâmico do EED-01
- Gráfico 10 – Harmônicos no deslocamento do conjunto dinâmico
- Gráfico 11 – Resposta de força do EED-01
- Gráfico 12 – Resposta em pico de força do EED-01
- Gráfico 13 – Resposta em pico de força do EED-01 acima de 1 kHz
- Gráfico 14 – Curva de reposta em frequência do amplificador CL-500
- Gráfico 15 – Resposta em frequência da Z, XL e R do CRL
- Gráfico 16 – Resposta em frequência da reatância indutiva e indutância
- Gráfico 17 – Resposta em frequência da V_R , V_{XL} e Fase
- Gráfico 18 – Resposta em frequência do campo magnético e corrente I_{RL} na bobina
- Gráfico 19 – Respostas entre o EED-01 e o Amplificador CL-500: (1 Hz – 1,5 kHz)
- Gráfico 20 – Confronto das DHT (%): (1 Hz – 25 kHz)
- Gráfico 21 – Confronto das DHT (%): (1 Hz – 160 Hz)
- Gráfico 22 – Confronto das respostas da força magnética da bobina e elástica
- Gráfico 23 – Confronto das respostas da força dinâmica e força do ímã

ÍNDICE DE SIGLAS

2D – Segunda Dimensão
3D – Terceira Dimensão
AC – Anel Centralizador
Acm – Acelerômetro
AE – Anel da Estrutura
AEM – Anel Estabilizador das Molas
AISI – American Iron and Steel Institute
AISI 304 – Aço Inox
ASTM – American Society for Testing and Materials
BM – Bobina Móvel
BMPS – Base Magnética Polar Sul
CAD – Desenho Assistido por Computador
 C_{RL} – Circuito Indutivo
DAQmx – Data Acquisition System
DCL – Diagrama de Corpo Livre
DHT – Distorção Harmônica Total
DWT – Discrete Wavelet Time
EED – Excitadores Eletrodinâmicos
EED-01 – Excitador Eletrodinâmico (Projeto da Dissertação)
FFT – Transformada Rápida de Fourier
FRF – Função Resposta em Frequência
GAP – Vão entre Dipolos
1GDL – Um Grau De Liberdade
IPAF – Imã Permanente Anelar de Ferrite
LASEA – Laboratório de Estruturas Ativas
LMF – Liga de Memória de Forma
LV – LabVIEW
MB – Metal Bivalente
ML – MATLAB
MIR – Medição Espectroscópica por Laser

Ms – Curva de Saturação Magnética

NI – National Instruments

PID – Controladores Proporcionais Integrativos e Derivativos

POM – Polyoxymethylene (Poliacetal)

PPN – Placa Polar Norte

SMA – Shape Memory Alloy

TDMI – Sistema Harmônico Amortecedor de Massa Inerte

T_{yoke} – Núcleo de Ferro

VI – Instrumentos Virtuais

V_{BM} – Volume da BM

V_{GAP} – Volume do GAP

ÍNDICE DE SÍMBOLOS

% - Porcentagem

B – Densidade de Fluxo

Φ_B – Fluxo Magnético

Cm – Campo Magnético

Cr – Cromo

Co – Cobalto

Fb – Força Magnética da Bobina

Fd – Força Dinâmica

Fg – Força Gravitacional

Fk – Força Elástica

Fi – Contribuição da Força Magnética do Ímã Permanente

Fm – Força Magnética

Fm₊ - Força Magnética Positiva

Fm₋ - Força Magnética Negativa

f – Frequência de Excitação

fe- α – Ferro Alfa

g – Pico em Aceleração ($m \cdot s^{-2}$)

H – Campo Magnético Relacional

Hc – Campo Magnético Relacional à Temperatura de Curie

Hz – Hertz

I – Corrente

I – Corrente Alternada em Amperes

I_{DC} – Corrente Contínua em Amperes

I_{RL} – Corrente do Circuito Indutivo

I_{RMS} – Corrente Eficaz em Amperes

kHz – Quilo Hertz

kN – Quilo Newton

kt – Constante Elástica Equivalente

L – Indutância Experimental

L_{BM} – Altura da BM

L_{PPN} – Altura da PPN

m – massa

N – Newtons

$NdFeB$ – Neodímio – Ferro – Boro (Terras Raras)

Ni – Níquel

O – oxigênio

o – Grau

R – Resistência Experimental

t – Tempo de Onda

SI – Sistema Internacional

Sm – Samário

T – Tesla

T_c – Temperatura de Curie

v – velocidade (v)

$v(t)$ – Resposta em Velocidade

V – Tensão Elétrica em Volts

V_{DC} – Tensão Contínua

V_R – Tensão Resistiva

V_L – Tensão Indutiva

V_{RMS} – Tensão Eficaz em Volts

V_{pp} – Tensão Sinusoidal de Pico a Pico

XL – Reatância Indutiva

X_{MAX} – Deslocamento de trabalho da BM

Y_p – Amplitude Máxima de Deslocamento do Sistema de Molas

$Y(t)$ – Resposta em Deslocamento de Pico

Z – Impedância

β - Coeficiente de Temperatura Coerciva

μ_o – Permeabilidade Magnética no Vácuo

μ_r – Permeabilidade Magnética Relativa

ϕ – Ângulo de Fase

ω – Frequência do Sinal

Ω – Ohms

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

- 1.1 – Força dinâmica proporcional a força elásticas
- 1.2 – Variáveis relacionadas às força dinâmicas proporcionais as forças elásticas
- 1.3 – Deslocamento máximo a partir da origem de repouso
- 1.4 – Resposta em deslocamento do conjunto dinâmico
- 1.5 – Impedância do circuito indutivo
- 1.6 – Reatância do sistema do circuito indutivo
- 1.7 – Indutância do sistema do circuito indutivo
- 1.8 – Fase das tensões resistivas e indutivas
- 1.9 – Força produzida pela bobina magnética
- 1.10 – Resposta das Distorções Harmônicas Totais (DHT)
- 1.11 – Relação entre as DHT das Tensões do CL-500 e EED-01
- 1.12 – Contribuição da força magnética produzida pelo ímã permanente anelar de ferrite.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	17
2 OBJETIVOS.....	21
2.1 GERAL.....	21
2.2 ESPECÍFICO.....	21
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
3.1 EXCITADORES ELETRODINÂMICOS (EED).....	22
3.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DOS EED.....	24
3.3 VALIDAÇÃO E ANÁLISE EXPERIMENTAL DOS EED PELAS RESPOSTAS EM FREQUÊNCIA COM BASE NO TEMPO DISCRETO.....	29
4. MÉTODOS E MATERIAIS.....	33
4.1 PROJETO DO EXCITADOR ELETRODINÂMICO EED-01.....	34
4.2 DETERMINAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO COMPATÍVEL PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL.....	46
4.3 OBTENÇÃO DAS RESPOSTAS EM FREQUÊNCIA DO EED-01.....	53
4.4 DETERMINAÇÃO DAS RESPOSTAS EM FREQUÊNCIA DO AMPLIFICADOR DE SINAIS CL-500 UTILIZADO NO EED-01.....	58
4.5 APRESENTAÇÃO COMPARATIVA DAS RESPOSTAS EM FREQUÊNCIA ENTRE: O PROTÓTIPO EED-01 E AMPLIFICADOR DE POTÊNCIA CL-500, E FORÇAS ATUANTES.....	63
5. RESULTADOS.....	65
5.1 PROJETO DO EXCITADOR ELETRODINÂMICO EED-01.....	65
5.2 DETERMINAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO COMPATÍVEL PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL.....	73
5.3 OBTENÇÃO DAS RESPOSTAS EM FREQUÊNCIA DO EED-01.....	76
5.4 DETERMINAÇÃO DAS RESPOSTAS EM FREQUÊNCIA DO AMPLIFICADOR DE SINAIS CL-500 UTILIZADO NO EED-01.....	85
5.5 APRESENTAÇÃO COMPARATIVA DAS RESPOSTAS EM FREQUÊNCIA ENTRE O PROTÓTIPO EED-01 E O AMPLIFICADOR DE POTÊNCIA CL-500.....	90
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	96
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97
APÊNDICE I.....	107

1. INTRODUÇÃO

Os impactos da temporalidade científica com iluminismo após o obscurantismo medieval trouxeram novas perspectivas concretas na produção do conhecimento. O processo contínuo na avaliação de fenômenos físicos naturais foi a base utilizada pelos estudiosos na área experimental. As vibrações mecânicas foi intensamente explorada quando as observações desses fenômenos produziam questionamentos e problemas relacionados ao cotidiano de uma comunidade, em particular a científica. Marinca et. al. (2021) e Pierce (2021) aborda a contribuição de Galileu Galilei nos estudos das vibrações mecânicas a partir da observação do efeito oscilatório do pêndulo. Essa análise propôs que todo corpo material possui relação entre seu comprimento e o seu período de oscilação. Isola (2021) apresenta a fundamentação da teoria vibratória dos cientistas Wallis e Sauveur, os quais identificaram os fenômenos modais das vibrações mecânicas pela observação do comportamento das cordas nos instrumentos musicais, e formularam a teoria das harmônicas fundamentais. Abdounur e De Campos (2021) expõe as contribuições de Daniel Bernoulli, que propôs a superposição linear de sinais harmônicos que explana a variação dos modos de vibração dos corpos materiais pela alteração de sua massa. De acordo com a pesquisa de Stén (2021), Daniel Bernoulli e Leonhard Euler, amparados pelos conceitos de elasticidade de Robert Hooke determinaram experimentalmente a relação de deflexão de uma barra prismática pela aplicação da força de excitação, e permitiu a formulação da equação matemática do fenômeno vibratório. Na década de 70 do século XIX o pesquisador John William Strutt utilizou a teoria da conservação da energia para embasar o método determinístico da frequência natural dos corpos materiais. Elishakoff (2019) descreve a história e vida acadêmica de Stephen Prokopovich Timoshenko, que utilizou o trabalho de John William Strutt para referenciar seus estudos sobre vigas e problemas de vibrações na engenharia. Por fim, Piccirillo (2021) cita o trabalho de Hermann Frahm, o qual demonstra projetos aplicáveis à indústria de transportes, máquinas e equipamentos, e ilustra-os como aparatos direcionados a evitar frequências ressonantes em corpos de massa elevada pela adição de um sistema massa, mola e amortecedor a um conjunto vibratório principal.

As vibrações mecânicas se destacam nas pesquisas científicas devido ao seu grau de importância e impacto nos estudos das engenharias e ciências da natureza. Não só como disciplina nos cursos correlatos, o conhecimento de vibrações mecânicas em si remonta das culturas antigas até os dias atuais. Segundo Gardner (2012), as diferentes civilizações utilizavam a mecânica vibracional do corpo humano para explicar a somatização de patologias no indivíduo, como os

Chakras na Hindu, bem como desenvolviam utensílios que modelavam, captavam e avaliavam fenômenos ondulatórios naturais. Essas ações revelavam os interesses de comunidades antigas em entender e aplicar os conceitos de ondas mecânicas.

Na aplicabilidade de vibrações mecânicas tem-se os instrumentos musicais que geram ondas sonoras produzidas pelo sopro ou pelo estímulo mecânico em cordas para produzir sons, e Russel e Cohn (2013) apresenta o sismógrafo que captura as ondas sísmicas de um terremoto e aponta onde foi o epicentro e qual magnitude, como o Cata Vento de Terremoto do engenheiro chinês Zhang Heng. O controle das vibrações mecânicas nasce da percepção prática do cotidiano em convergência com a necessidade de viver com segurança, harmonia e maior qualidade de vida. Então, existe a necessidade de se interpretar fenômenos físicos ondulatórios através de instrumentos experimentais, e tal propósito vem impulsionando o desenvolvimento de pesquisas na área de vibrações mecânicas.

Na atualidade, novos materiais em diversos ramos da engenharia estão sendo desenvolvidos, as ligas de memória de forma (LMF) são um exemplo, e faz-se necessário o estudo por caracterização experimental através de ensaios destrutivos ou não destrutivos. De acordo com Wang et. al. (2019) é possível controlar frequências de ressonância por amortecimento quando se utiliza as LMF conectadas a um sistema vibratório,

Os excitadores são instrumentos que aplicam vibração forçada a corpos e se dividem em mecânicos e eletrodinâmicos. O primeiro transfere a energia cinética de movimento entre corpos através do acoplamento de dispositivos rotacionais excêntricos ou lineares à amostra. O segundo carece de indução magnética por tensão e corrente com campo magnético (C_m) permanente associado, como os agitadores (*'shakers'*). Os eletrodinâmicos são subdivididos em duas categorias conforme o funcionamento do mecanismo ondulatório. A primeira espécie dispõe de solenoide com bobinas induzidas de C_m estático e outro dinâmico. A segunda espécie propõe a interação de C_m dinâmicos da bobina induzida móvel com o C_m constante do ímã permanente. As bobinas dinâmicas de ambos instrumentos respondem a uma alimentação de tensão elétrica (V) e corrente elétrica (I) sinusoidal com frequência em Herz (Hz) variável. O movimento ondulatório no experimento com excitadores eletrodinâmicos (EED) podem ser controlados por malha aberta ou malha fechada. A aceleração é capturada por sensores conectados à placa de aquisição de sinais. Esse equipamento envia dados analógicos de tensão ao computador. As respostas dos sinais no domínio do tempo e da frequência são observadas pela plotagem de gráficos em tempo real e os dados numéricos são gravados. O algoritmo construído no *software* permite programar os parâmetros de testes do experimento de acordo com a metodologia de captura. Os critérios de

operação do equipamento variam de acordo com o objetivo do ensaio. Assim, de acordo com a Vibration Research (2022) os sinais senoidal, aleatório, de impacto e replicação são escolhidos na configuração de entrada de variáveis e definem a característica do modo de vibração que a amostra será submetida.

A elaboração do projeto e desenvolvimento de um excitador eletrodinâmico de bobina com campo magnético variável e ímã permanente com campo magnético constante objetiva utilizar o emaranhamento desses campos magnéticos como mecanismo principal na produção de movimento. Assim, essa tecnologia permite que o projeto proporcione resultados experimentais onde haja a possibilidade de se estudar tanto o movimento quanto a excitação por campos diferentes. Ou seja, tem-se dois tipos de saídas de dados: tensão de captura e tensão de excitação.

A caracterização do equipamento qualifica as faixas ideais de trabalho que o instrumento deve funcionar sem apresentar distorções significativas nas respostas em aceleração. A leitura dos picos de tensão na faixa de frequência entre 1 Hz a 25 kHz foi aplicada como metodologia de captura.

De acordo com o Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (2016), novas tecnologias produzem possibilidades e intenções futuras de aprimoramento operacional, e o projeto se enquadra nas perspectivas do desenvolvimento de tecnologia nacional. Esse processo impacta diretamente na qualidade do ensino e aprendizagem do aluno de graduação e pós-graduação que estuda vibrações mecânicas. Aludindo os trabalhos de Scaccabarozzi et. al. (2017) e Jacob et. al. (2021) os experimentos com o EED-01 traz possibilidades futuras na elaboração de novos experimentos na perspectiva investigativa das ligas de memória de forma, bem como análise sísmica em estruturas miniaturizadas, ensaios de deflexão sob tensão alternada, e muitas outras formas experimentais que utilizem os movimentos isodinâmicos em seu escopo metodológico.

A justificativa da presente pesquisa foi produzir conhecimento sobre o processo de elaboração de projetos, o entendimento das respostas em frequência de um excitador eletrodinâmico de médio porte em consonância com seu sistema elétrico, e a possibilidade de múltiplas aplicações em experimentos na área de vibração mecânica.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Caracterização de um excitador eletrodinâmico com ímã permanente denominado EED-01 para uso laboratorial na área de vibração mecânica.

2.2 ESPECÍFICO

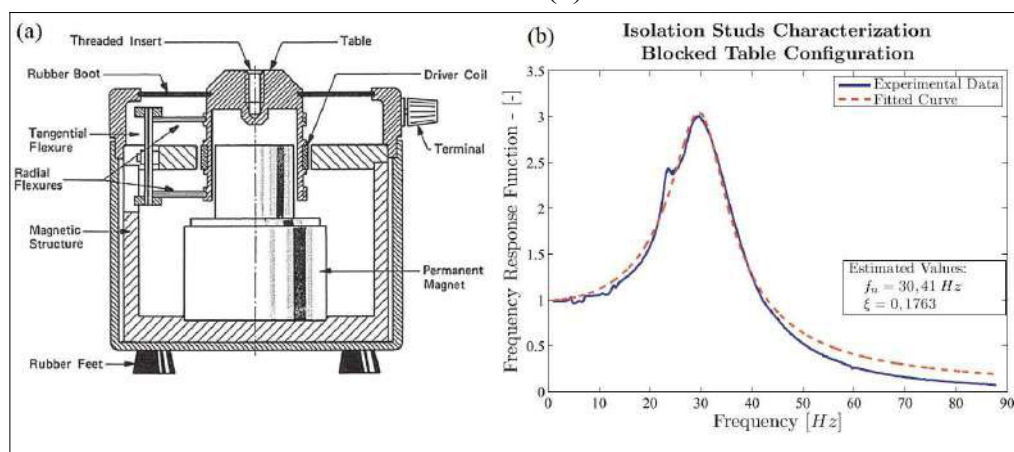
1. Projetar um excitador eletrodinâmico;
2. Determinação da instrumentação compatível para análise experimental;
3. Obtenção das respostas em frequência do EED-01;
4. Determinação das respostas em frequência do amplificador de sinais CL-500 utilizado no EED-01;
5. Apresentação comparativa das respostas em frequência entre o protótipo EED-01 e o amplificador de potência CL-500.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 EXCITADORES ELETRODINÂMICOS (EED)

Os excitadores eletrodinâmicos apresentados como EEDs produzem fenômenos vibratórios com o objetivo de simular cargas dinâmicas em estruturas estáticas, caracterizar materiais e calibrar acelerômetros. Certos ensaios dinâmicos apresentam montagens não adaptáveis e requerem a construção de dispositivos EEDs customizados, pois ocasionalmente os disponíveis comercialmente não suprem a faixa de resposta em frequência que o teste exige, Neri (2018). A tipificação do EED depende da carga de força aplicada em Newtons (N) dentro da faixa da frequência de resposta o qual foi dimensionado. O intuito do teste é observar as variações em força quando a amostra em LMF está sob carregamento dinâmico. Martino e Harri (2019a) nomeiam o EED como ‘shaker’, Figura 1, e complementa que a caracterização do instrumento pode ser feito por métodos comparativos entre um modelo simulado por algoritmo e um experimental.

Figura 1 – ‘Shaker’ em corte (a), e a comparação das respostas em frequência do ‘shaker’ real e virtual (b)



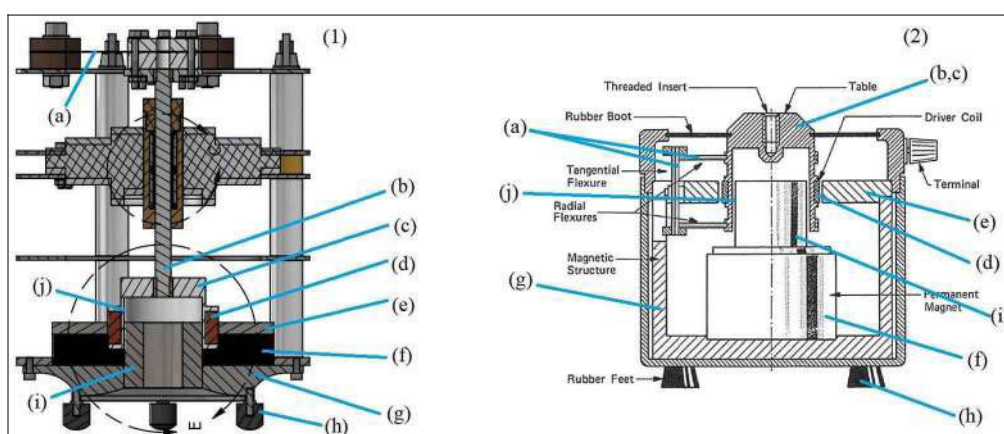
Fonte: Martino e Harri (2019a)

Martino e Harri (2019a) aplicam o modelo virtual de um *shaker* na equiparação das curvas de respostas em frequência com os dados experimentais do modelo físico. As curvas dos picos em amplitude e frequência entre os EEDs apontam padrões de comportamento similares. Os EEDs são qualificados como atuadores elétricos lineares que apresentam movimentos ondulatórios de haste dinâmica, devido a bobina induzida mergulhada em campo magnético de ímã permanente, igual ao utilizado por Martino e Harri (2019a). Os modelos experimentais dos EEDs são idealizados e

determinados a operar de acordo com suas variáveis técnicas específicas, como por exemplo, as cargas de excitação menores que 0,5 quilo newton (kN), e que respondem ao sinal de excitação nas faixas de frequência entre 0 Hz a 10 quilo Hertz (kHz) como exemplifica o manual do Mini Shaker Brüel & Kjær 4810, Brüel & Kjær (2022b). O mecanismo de atuação dos EEDs relacionam a estrutura dinâmica do C_m da bobina induzida e do C_m constante produzido pelo vão de ar (GAP) do ímã permanente às respostas de pico em força por faixas de frequência, ou seja, a força transferida do sistema magnético dinâmico e estático à mesa superior de testes, como na Figura 2 (1- (b, c e d)).

Ambos possuem armadura principal, porém a Figura 2 apresenta o projeto do EED-01 proposto pelo trabalho (1) em comparação com o Mini Shaker 4810 da Brüel & Kjær (2022b) (2). Todos os dois apresentam Base Magnética Polar Sul (BMPS) (a). A magnetização da BMPS ocorre por contato do ímã permanente a ela. Na Placa Polar Norte (PPN) (e), que se situa na parte superior do Ímã Permanente Anelar de Ferrite (IPAF) (f), a polarização magnética é invertida. A bobina magnética (BM) (c) com enrolamento por fio de cobre (d), acoplada a um eixo (b), trabalha dentro do *GAP* (j). O fenômeno vibratório é produzido pela variação dos momentos polares de atração e repulsão entre a BM (c) e o alinhamento do campo magnético no GAP (j) produzido pela BMPS (a) e PPN (e). Martino e Harri (2019b) entende que a bipolarização da BM (c) se inverte em instantes de tempo definidos pela frequência do sinal sinusoidal, e a amplitude de Pico a Pico (V_{RMS}) do amplificador é a resposta do sinal no domínio do tempo.

Figura 2 – Projeto em corte do EED proposto (1), Mini Shaker Brüel & Kjær 4810 (2)



Fonte: Elaboração Própria (1), BRÜEL & KJÆR (2022b) (2) adaptado

Os EEDs podem apresentar absorvedores de vibração em sua base, visualizado na Figura 2 (h). Os locais de fixação deles são intercambiáveis com dispositivos de imobilização. Essa

característica indica a possibilidade dos ensaios serem realizados sobre estruturas estáticas. De acordo com Schultz (2021) que estuda o posicionamento dos EED nos ensaios de cargas dinâmicas conclui que a estabilidade reflete na veracidade das respostas do experimento no que concerne a sua fixação.

3.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DOS EED

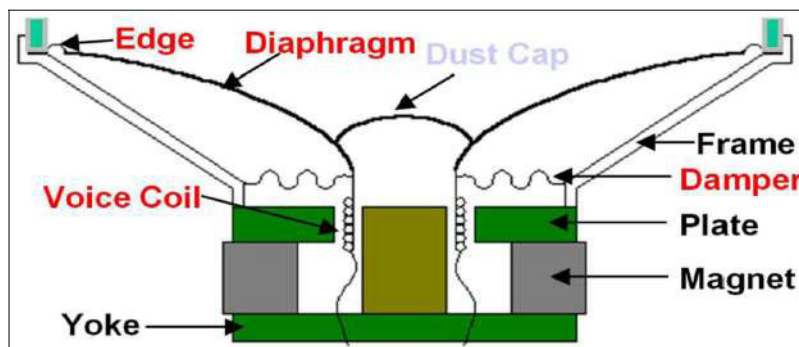
O funcionamento do conjunto magnético dinâmico e estático dos EEDs possuem tecnologia similar ao sistema de um alto-falante, Segundo Štefe et. al. (2018), os EEDs apresentam uma bobina magnética induzida por corrente elétrica, e promove o deslocamento estável do atuador por pulso sinusoidal. A bobina magnética nos EEDs se comportam como um ímã dinâmico e manifesta momentos dipolares alternados devido a característica do sinal empregado.

A bobina magnética dos EEDs podem ser constituídas por espiras com multicamadas ou mono camada, este último utilizado amplamente em circuitos magnéticos de alto-falantes convencionais os quais apresentam uma única camada de enrolamento. A orientação pode se configurar como direta ou indireta. A primeira é tipificada quando o movimento ondulatório do atuador está diretamente acoplada à amostra. A segunda proposta é quando o deslocamento do atuador transfere vibração à amostra devido a fixação da armadura do equipamento à superfície dela. Park et. al. (2020) apresenta experimentos com micro alto-falantes e cita dois fenômenos que são inerentes aos EEDs: o primeiro diz que a bobina magnética produz aceleração e deslocamento pela interação entre suas forças eletromagnéticas e força magnetizante do ímã permanente, o segundo aponta a produção dessas forças como efeito do entrelaçamento entre os campos magnéticos do circuito magnético estático e dinâmico.

Entretanto, o deslocamento da haste se comporta nos dois sentidos vetoriais paralelos à força produzida pelo sistema dinâmico. Varahram et. al. (2019) conclui através de experimentos que as forças produzidas por excitadores eletrodinâmicos devem possuir o mínimo de energia necessária para estimular os modos de vibração da frequência aplicada. Conforme Lee et. al. (2020), a Figura 3 descreve o sistema magnético padrão dos alto-falantes convencionais, e permite visualizar o modelo eletromecânico Thiele – Small de expansão da pressão sonora (SPL) pelo acoplamento da bobina com o diafragma, Em conformidade com Wu et. al. (2021) e Koerner e Secord (2019) o fenômeno de excitação da BM nos EEDs seguem o mesmo princípio de funcionamento das bobinas dos alto-falantes, onde a corrente (I_{RMS}) que percorre no enrolamento tem relação com a impedância (Z) devido a tensão (V_{RMS}) do sinal sinusoidal de saída do amplificador, O sistema de expansão sonora

por diafragma apresentado por Lee et. al. (2020) é aplicado nos EEDs através de um modelo de molas fitas dispostas em paralelo.

Figura 3 – Sistema magnético padrão de alto-falante convencional



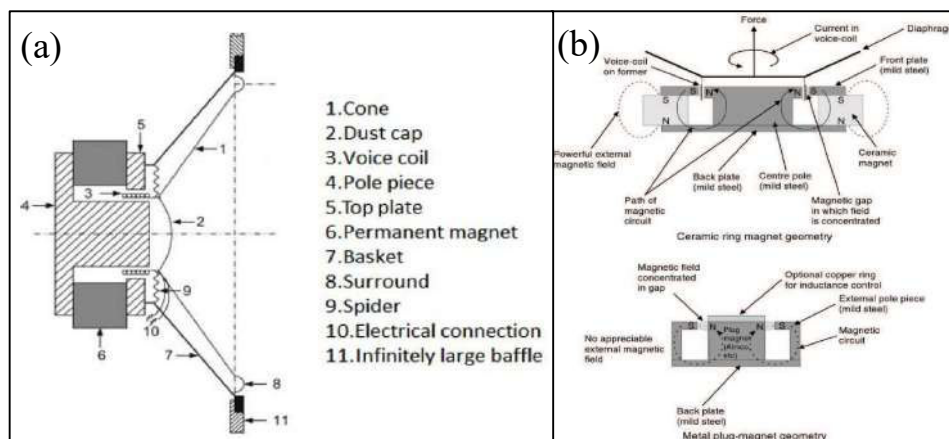
Fonte: Lee et. al. (2020)

Em consonância com o trabalho e experimentos de De Oliveira et. al. (2021), o campo magnético proporcionado pelo IPAF é encontrado em quase todos os sistemas de ressonância acústicos, e o magneto recebe o nome de Anel de Rowland devido ao método de magnetização por indução de corrente elétrica contínua (I_{DC}). O fenômeno é análogo ao da BM, entretanto como não há indução magnética por corrente elétrica alternada (I_{AC}), o campo magnético nos IPAF devem apresentar experimentalmente dipolos magnéticos estáticos e constantes nas superfícies polares, e varia de acordo com o quadrado da distância a partir do polo aferido. Esse campo magnético é produzido pela relação entre a constante de permeabilidade magnética no vácuo (μ_0) e a coercividade magnética (H). A variação intensidade da força magnética (F_m) referente ao campo magnético do IPAF possui relação intrínseca com a alteração da coercividade magnética, Liu et. al. (2018) aborda os diversos materiais que compõe os ímãs permanentes, processos de sinterização e aglomeração por compressão em altas temperaturas, e explica que a coercividade H do campo magnético é medido experimentalmente devido à permeabilidade magnética relativa ao material (μ_r).

Izzo et. al. (2019) introduz o circuito magnético de um alto-falante no experimento avaliativo do efeito 'DOPPLER' que envia e recebe o sinal de pressão sonora por variação de posição entre dispositivos, como ilustrado na Figura 4. O mesmo sistema é aplicado nos EEDs com os ímãs permanentes anelares de ferrite, e possui as mesmas configurações construtivas. Ele aplica a BMPS por magnetização de contato pelo polo sul, como na Figura 4(a). Os vetores de campo magnético do IPAF são modificados pela sobreposição da PPN Figura 4 (b) na superfície superior do IPAF, e as linhas de campo magnético se alinham com os do pino central (T_{yoke}) Figura 4 (b). O

autor explica que o comportamento das linhas de campo varrem toda a circunferência do GAP de 0 a 2π .

Figura 4 - Corte do Circuito Magnético (a) e (b)



Fonte: (a) Izzo et. al. (2019); (b) <<https://www.semanticscholar.org>>, acessado em: 16/06/2022

A intensidade da força magnética produzida na bobina magnética dos EEDs dependem da intensidade da I_{AC} e de V_{AC} que o sistema amplificador de sinal entrega ao circuito indutivo durante a excitação frequencial, De acordo com as medições de vibrações experimentais de Yunus et. al. (2020) a força magnética produzida pela BM dos EEDs age paralelamente ao deslocamento da haste, e apresenta relação com a massa e aceleração do subconjunto dinâmico similar ao conjunto vibratório dos alto-falantes.

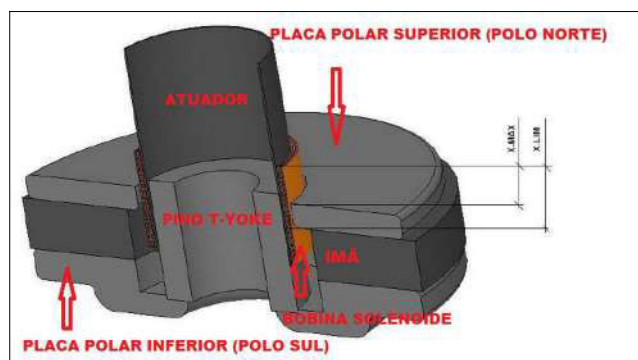
A bobina magnética induzida dos EEDs se movimentam dentro do *GAP* que é o espaço circunferencial de imersão magnética, Bai et. al. (2017). Quando há atração, a bobina magnética desloca a massa do subconjunto dinâmico na direção do T_{yoke} , devido à interação da Força Magnética Negativa (F_m) da bobina magnética e à Força Magnética Positiva (F_{m+}) do T_{yoke} . A repulsão é o fenômeno contrário do deslocamento, quando a F_{m+} da bobina magnética possui o mesmo sinal que a F_{m+} do T_{yoke} . A troca de sinais dos vetores força da bobina magnética é determinada pela relação entre a frequência do sinal sinusoidal e o período da onda, enquanto que os vetores do campo magnético no GAP devem permanecer constantes. Li et. al. (2020) atesta que a força magnética no sistema varia não só pelo sinal empregado na bobina magnética, como também indica alteração na magnitude de força quando há estreitamento entre os dipolos magnéticos orientados do ímã permanente anelar de ferrite.

Falaize e Hélie (2020) explica que a força magnética que a bobina magnética produz quando alimentada por tensão e corrente está sujeita à força de Lorentz. As forças magnéticas entre

os campos magnéticos da bobina magnética e do ímã permanente anelar de ferrite contribuem no movimento do conjunto dinâmico do EED-01. No modelo de Falaize e Hélie (2020), a intensidade do campo magnético entre os dipolos da bobina magnética estão sujeitos a contribuições do campo magnético do ímã permanente anelar de ferrite de alta intensidade de tal forma que seus dipolos magnéticos constantes elevam a força da bobina magnética proporcional ao seu campo magnético quando imersa dentro do GAP. A intensidade do campo magnético entre os dipolos magnéticos placa polar norte e o T_{yoke} é inversamente proporcional ao ponto médio do GAP. Experimentalmente é perceptível que a atuação do campo magnético decresce quando linearmente as linhas de campo se aproximam do ponto médio do GAP.

Klippel (2020) desenvolve um discurso sobre as excitações de bobinas magnéticas e explica que a altura do indutor (L_{BM}) maior que a placa polar norte (L_{PPN}) apresenta maior amplitude de deslocamento na relação entre o campo magnético e o sinal de corrente alternada, e respondem melhor a excitação linear com baixa distorção. Entretanto, essa configuração da BM reduz linearmente o fator de força do ponto estacionário até o fim de curso positivo ou negativo. Então, Klippel (2020) propõe a correção do fator de força aplicando três modificações: a largura do GAP deve se aproximar da altura do magneto, a relação do Volume da bobina magnética (V_{BM}) pelo Volume do GAP (V_{GAP}) deve ser menor que 1 e o ponto de repouso deve apresentar convergência central nas alturas entre a bobina magnética e a placa polar norte como mostra a Figura 5. A altura máxima (X_{MAX}) é o deslocamento de trabalho da bobina magnética quando, no ciclo de operação, os limites superior e inferior representam o ponto com velocidade zero. Esses afastamentos a partir do ponto de repouso devem conter respostas iguais em amplitude. O cálculo da X_{MAX} é apresentada na Figura 5 como sendo a metade da diferença entre as alturas L_{BM} e a L_{PPN} .

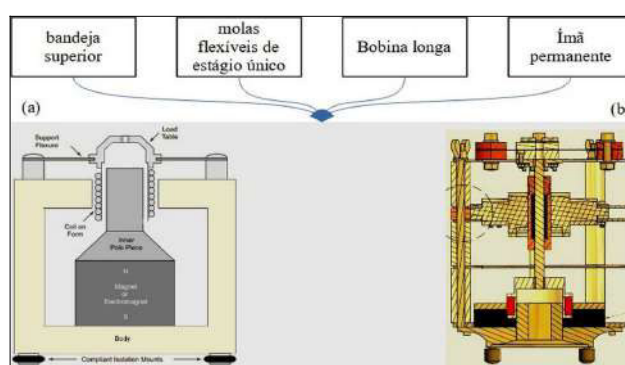
Figura 5 - Deslocamento máximo da BM dentro do GAP



Fonte: <<http://altofalanteufes2007.blogspot.com/2007/12/clculos.html>>, acessado em: 03/08/2022.
adaptado.

O experimento de Machado et. al. (2019) aplica a modelagem pelo método de elementos finitos para confrontar as respostas em FRF entre EED virtual e um real como ilustrado na Figura 6(a). O ensaio com o *shaker* real consiste em aplicar uma carga dinâmica em seis pontos de uma viga espaçados linearmente igualmente através do acoplamento do conjunto dinâmico do EED a eles, bem como os seis acelerômetros divididos em cada posições respectivas aos testes. Os parâmetros de entrada de sinais e variáveis relacionadas ao equipamento e à viga foram carregados no *software* durante o ensaio com o *shaker* virtual. O autor prevê o comportamento de um equipamento real pela análise dos espectros de respostas em FRF no modelo virtual, e apresenta curvas de respostas aproximadas demonstrando assim eficiência do algoritmo aplicado.

Figura 6 – Ilustração EEDs: ensaio de Machado et. al. (2019) (a) e projeto EED-01 (b)



Fonte: Machado et. al. (2019) adaptado

3.3 VALIDAÇÃO E ANÁLISE EXPERIMENTAL DOS EED PELAS RESPOSTAS EM FREQUÊNCIA COM BASE NO TEMPO DISCRETO

Radac e Lala (2020) conceitua o fenômeno vibratório durante a captura de sinais no tempo discreto quando apresenta a amostra temporal desse espaço em um sistema oscilatório amortecido e controlado por algoritmo, e aplica sistema de controle com retroalimentação em malha fechada. O tempo discreto está inserido dentro do espaço de estado com tempo contínuo observável, pode ser capturado durante a captura do sinal de vibração dos EEDs. Por outro lado, o sinal em amplitude de resposta dos EEDs confirmam a discretização no tempo quando se deseja analisar padrões de comportamento durante a análise experimental em períodos determinados. A investigação dos sinais

no tempo discreto durante o experimento com EEDs podem revelar as perturbações oscilatórias envolvidas e pode demonstrar falhas ou hibridação de sinais em sistemas não lineares. O experimento demonstrado por Yang et. al. (2021) permite observar as essas alterações ondulatórias em atuadores inerciais quando capturadas por sensores.

A falha é atribuída a captura de ruídos, que podem causar corrompimento no estado do sistema ou perturbação indesejável durante a medição do sinal experimental no tempo discreto, fazendo-se necessária a aplicação de filtros, quando de fato for necessário. A estabilidade em sistemas lineares é factível do ponto de vista teórico ou por modelagem. O fato preponderante no estudo de sistemas não lineares é que a solução analítica para tal é impossível de ser atingida. Segundo as análises em sistemas não lineares no tempo discreto de Koelewijn e Toth (2021), os EEDs como sistema dinâmico ondulatório experimental e apresentando fenômenos não lineares, a estabilidade e performance desse sistema está associada às modelagens computacionais que corrigem os efeitos inconvenientes das perturbações no tempo discreto, como o controle dinâmico de disco rotatório desbalanceado.

Chi et. al. (2019) aborda a perspectiva avaliativa do controle de processos nos fenômenos dinâmicos, se a observação do sinal do EED apresentar não linearidade no sistema, a perturbação indesejada pode ser corrigida ao aplicar controladores Proporcionais Integrativos e Derivativos (PID) que implementem a linearização dinâmica de forma inteligente por autoaprendizado. Pang et. al. (2020) aborda as anomalias transitórias não lineares no comportamento vibratório em turbinas eólicas e propõe a filtragem do sinal pelo método Discrete Wavelet Time (DWT) como agente indicador de falhas no mecanismo. Anastasio et al. (2019) apresenta um estudo das distorções que ocorrem em experimentos de excitação em vigas bi engastadas, e conclui que algumas não linearidades apresentadas se referem às assimetrias entre as respostas de saída da excitação e a capturada. As respostas não lineares experimentais dos EEDs no tempo discreto apresentam respostas condizentes com sinal de excitação o qual é submetido. Esses sinais carregam perturbações dentro do espectro das funções respostas em frequência de acordo com o sistema massa, mola, amortecedor e atrito, e as amplitudes podem diagnosticar falhas estruturais ou de condição construtiva.

No estado de excitação inicial não retroalimentado dos EEDs, o sistema apresenta amortecimento de sinal até sua entrada em regime permanente. Esse tipo de resposta no tempo discreto é devido a malha aberta controlada por excitação direta pelo sistema de envio de sinal com frequência invariável. Similarmente aos diafragmas dos alto-falantes, os EEDs através do sistema massa-mola-amortecedor amortecem o conjunto dinâmico de acordo com a rigidez do sistema de

molas flexíveis. Esse tipo de comportamento é levado em consideração como fator decisivo à amplitude de deslocamento e aceleração resultante. O amortecimento viscoelástico é modificado quando se varia a espessura dos flexores. Essa ação produz características sensíveis no ponto de máximo em amplitude, e no tempo discreto esse comportamento é visível quando os deslocamentos em amplitude desses pontos determinam o estado de excitação do conjunto dinâmico na frequência específica. Tang et. al. (2020) demonstra por experimento a redução do estado de excitação de uma mesa separadora de carvão, e diz que existe uma correlação entre a sensibilidade dos absorvedores de borracha com a frequência de ressonância no ponto de máximo em amplitude.

As respostas em frequência dos EEDs se qualificam no processo experimental como a ferramenta multiprocesso que extrai parâmetros modais e suas funções características relacionados ao fenômeno ondulatório. Brandt (2019) discute os experimentos com *shakers* na análise modal, e discursa sobre a sua aplicação nos ensaios de estruturas dinamicamente excitadas com o objetivo de verificar a existência de harmônicos. O estudo das respostas em amplitude de sinais em aceleração não se restringe apenas aos EEDs, pois a metodologia também é aplicada em outros tipos de experimentos. Conforme Al-Obaidi (2020), as frequências de ressonância indesejáveis produzidas por cavitação em bombas podem ser investigadas pela aplicação da FFT, e explicam o comportamento implosivo das bolhas em fluidos newtonianos quando os picos em amplitudes de aceleração são capturados pelo sensor. Jáuregui et. al. (2018) fundamenta que é possível visualizar no gráfico da FFT as alterações de funcionamento por picos de aceleração em determinadas frequências do sinal em centros de usinagem devido ao desgaste da ferramenta de corte.

Os EEDs assim como os alto-falantes apresentam comportamentos fenomenológicos não lineares de ressonância inversamente proporcionais às suas dimensões geométricas, e capacidade de magnetização do ímã permanente anelar de ferrite. Entretanto, a queda de força observada nos EEDs ocorre próxima à frequência de ressonância quando excitado por sinal sinusoidal sem controle, Zhang et. al. (2020).

Pietrosanti et. al. (2020) aplica o recurso de Função de Resposta em Frequência (FRF) para observar o fenômeno de perda de energia vibratória no sistema Harmônico Amortecedor de Massa Inerte (TDMI) o qual utiliza o padrão massa-mola-amortecedor em EEDs, e conclui que o sistema é eficiente em atenuar as respostas em amplitude de deslocamento e aceleração.

Mayes et. al. (2020) apresenta a importância da calibração das respostas dos EEDs antes dos experimentos, e explica que um equipamento confiável sustenta a veracidade das respostas quando essas são submetidas a comparação. Segundo Zhang et. al. (2022), as funções respostas em frequência dos EEDs possibilitam visualizar na similaridade entre curvas o comportamento das

frequências de ressonância junto com os “*driving point*” das distorções harmônicas atreladas as respostas estruturais da base ou corpo do equipamento. Li et. al. (2018) aborda a análise de vibrações simultâneas de dois EEDs, e o experimento é realizado pela observação dos picos irregulares de ambas distorções apresentadas nas respostas em FRF por banda fechada.

Spaggiari e Cocconcelli (2018) em seu artigo “*Effect of Temperature on the Dynamic Response of Adhesively Mounted Accelerometers*” aplica programação em LV, e obtêm as funções de respostas em frequência durante o estudo do efeito da temperatura na interface colada entre o acelerômetro e a superfície do atuador de um EED.

Saadatzi et. al. (2018) conclui por experimentos que a frequência de ressonância ou natural de um sistema oscilatório não linear ainda apresenta a possibilidade de se produzir energia quando aplicado a pressão sonora em vigas piezoelétricas, e explica que para obter o máximo de eficiência energética nessas estruturas, o deslocamento das barras devem apresentar valores de tensão em amplitude máxima e proporcionais ao movimento da mesa dos EEDs em operação.

A caracterização das respostas em frequência do EED na perspectiva de sistemas não lineares deve seguir procedimentos experimentais cautelosos. No processo de validação do ensaio do EED, a resposta em frequência é a assinatura característica do próprio fenômeno oscilatório, e os picos de máximo e ressonâncias internas, como os harmônicos, excitação sinusoidal e regime permanente são avaliados intrinsecamente dentro dos parâmetros de resposta em FRF. Peter (2018) aborda a dificuldade em trabalhar com parâmetros não lineares, pois os sinais advindos da excitação forçada exhibe fenômenos vibratórios nos quais estão presentes em frequências harmônicas.

Dal Borgo et. al. (2019) verifica os efeitos dinâmicos não lineares das respostas em frequência após o ponto de máximo durante a caracterização de um EED o qual denomina como atuador inercial, e explica que a queda abrupta a partir desse ponto reflete a condição de rigidez do material flexor, ou comumente chamado de molas. Esse efeito não linear é referenciado como ‘fenômeno de salto’, e os valores das amplitudes tendem a cair proporcionalmente frente ao aumento da frequência.

Os testes com EEDs em estruturas mecânicas evidenciam alterações no comportamento dinâmico do equipamento e do corpo de prova. De acordo com Pacini et. al. (2022), a produção da distorção em estruturas não lineares está relacionada a reverberação que a armadura do EED responde às harmônicas não fundamentais. Dependendo da intensidade em amplitude da frequência harmônica, o ensaio em regime permanente pode ocasionar danos significativos na estrutura do EED devido à transferência de energia por ressonância. Pacini et. al. (2022) conclui ainda que as

harmônicas em altas frequências nos EEDs induz a distorção, e sob influência da frequência fundamental o “*driving point*” ou ponto de condução responde às frequências harmônicas ativas.

Pasch et. al. (2022) aplica um modelo computacional avaliativo dos pontos de condução em uma caixa de câmbio, e conclui que os pontos de condução estão relacionados aos grupos modais de vibração divididas em diversas partes da estrutura. Logo, em situações experimentais não lineares, o controle das frequências harmônicas é impossível. A conclusão apresentada por Novak et. al. (2018) descreve o controle das distorções originadas pelas frequências harmônicas de acordo com processos distintos: o primeiro relata a aplicação de absorvedores de energia que suprimi boa parte da amplitude de força dos harmônicos inconvenientes ao sistema, o segundo demonstra o cancelamento das harmônicas em altas frequências, este último.

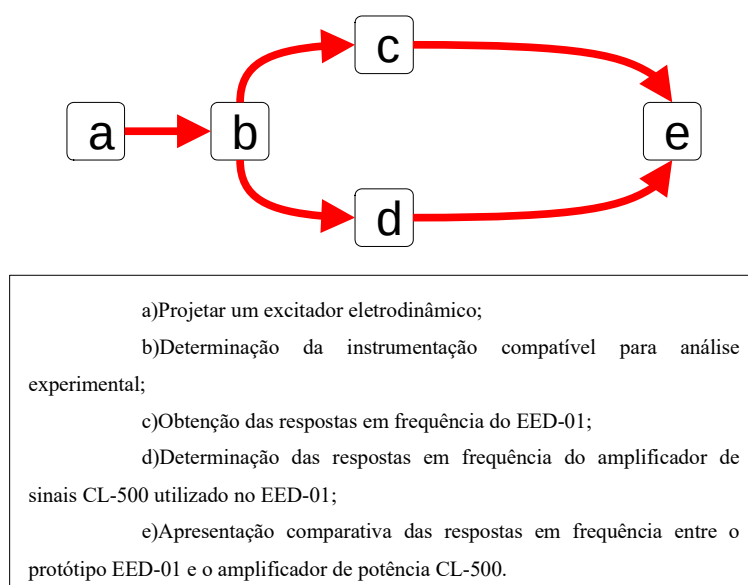
Assim, a execução do projeto EED-01 envolveu as pesquisas relacionadas às perspectivas experimentais e funcionais. A aplicação dessas informações e as discussões pré-projeto evoluíram a capacidade de dinamizar as escolhas de processos de fabricação e materiais, bem como a aplicação dos procedimentos de testes e critérios avaliativos das respostas de funcionamento do protótipo.

4. MÉTODOS E MATERIAIS

A exposição dos métodos apresentados na presente pesquisa será elencada a partir dos procedimentos realizados para obtenção dos objetivos específicos acima descritos. Os critérios metodológicos e materiais utilizados se apoiam na veracidade das citações expostas na revisão bibliográfica.

O fluxograma ilustrado na Figura 7 detalha os passos de avanço ou recuo dos objetivos a serem concluídos durante o a confecção do trabalho experimental. Assim, com base na estrutura da pesquisa sobre EED-01 e assuntos correlacionados, o atual capítulo traz as substâncias necessárias à replicação do experimento caso haja pretensão de outrem.

Figura 7 – Fluxograma das metas a serem atingidas de acordo com os objetivos específicos



Fonte: Elaboração própria

4.1 PROJETO DO EXCITADOR ELETRODINÂMICO EED-01

A plataforma *Inventor Professional*®, de acordo com Munford e Normand (2015) é um programa multifunção que utiliza ícones interativos para Desenho Assistido por Computador (CAD). A linguagem computacional é utilizada para desenhar e modelar virtualmente as partes físicas de equipamentos os quais se quer produzir. O programa foi utilizado para gerar as partes,

subconjuntos e conjuntos do EED-01. O aplicativo possui versatilidade operacional no manejo dos ícones de comando e parâmetros de construção.

O procedimento incia-se com a escolha do sistema de vistas e de medida padrão. A classificação adotada no desenho do EED-01 foi o isométrico e o milímetro foi a unidade aplicada. De acordo com as orientações de Manfê et. al. (1986) quando aborda a escolha da unidade e do sistema métrico, o projeto se adequou às especificações dentro dos parâmetros do sistema internacional de unidades.

As definições metrológicas da estrutura do equipamento foram associadas às dimensões do ímã permanente anelar de ferrite. As conexões, junções e amarrações das partes da estrutura do protótipo foram projetadas com sistemas de fixação por encaixe e aparafusamento.

Logo, de acordo com a quantidade de partes da armação do EED-01, a união por parafusos justapostos foi aplicada preferencialmente à solda convencional. Então, devido ao EED-01 conter uma parcela significativa de peças em sua estrutura, a técnica assumida foi a do esboço por conjunto de mecanismos. Esse método abarcado por projetistas é ágil e dinamiza a montagem virtual.

Inicialmente as partes foram projetadas em 2D. Então, pelo modo interativo dos ícones de comando, as peças foram desenhadas, a começar por entidades geométricas bases como círculos, linhas, polígonos, arcos, arredondamentos, etc.

Logo, em consonância com as formas básicas, a vista em 3D foi aplicada com recursos de extrusão, revolução, varredura e conicidade. Além desses processos, na confecção dos esboços, utilizou-se os modos de movimento entre planos, os quais possibilitaram a centralização entre eixos. As texturas de linha e de superfícies foram empregadas com o intuito de distinguir os materiais utilizados na confecção do EED-01.

A organização dos conjuntos de mecanismos até a montagem total do EED-01 foi conduzida pelo método da gravação por nomeação e numeração. Dessa forma, adotou-se o sentido do fluxo de gravação decrescente. Na fase de esboço, as sequências alfanuméricas EED ccc-bbb-aaa foram gravadas com extensão *‘.ipt’*.

Então, a primeira sequência de letras exprime o nome do equipamento. Logo em seguida foi posto a ordem numérica do conjunto de mecanismo indicado pela letra *‘c’*. Após o hífen foi inserido o número do subconjunto apontada pela letra *‘b’*.

A última numeração assinalada pela letra *‘a’* corresponde à peça individual. O conjunto foi desenvolvido pela junção de subconjuntos, que por sua vez é a adjeção de partes. Na Tabela 1, visualiza-se a catalogação das partes, subconjuntos e conjunto.

Tabela 1 - Catalografia dos Desenhos do EED-01

TABELA CATALOGRÁFICA DOS DESENHOS DO EED						
CONJUNTO	CÓDIGO	SUBCONJUNTO	CÓDIGO	PARTE	CÓDIGO	ARQUIVAMENTO
EED	000	MONTAGEM	000	-	000	EED 000-000-000
EED	001	SISTEMA MAGNÉTICO ESTÁTICO	001	BASE MAGNÉTICA POLAR SUL (BMPS)	001	EED 001-001-001
EED	001	SISTEMA MAGNÉTICO ESTÁTICO	001	PLACA POLAR NORTE (PPN)	002	EED 001-001-002
EED	001	SISTEMA MAGNÉTICO ESTÁTICO	001	ÍMA PERMANENTE ANEL DE FERRITE (IPAF)	003	EED 001-001-003
EED	001	SISTEMA MAGNÉTICO ESTÁTICO	001	PINO T-YOKE	004	EED 001-001-004
EED	001	SISTEMA ESTRUTURAL	002	ANEL DA ESTRUTURA (AE)	001	EED 001-002-001
EED	001	SISTEMA ESTRUTURAL	002	TIRANTES DE AMARRAÇÃO	002	EED 001-002-002
EED	001	SISTEMA ESTRUTURAL	002	VIGAS DE APOIO (VA)	003	EED 001-002-003A
EED	001	SISTEMA ESTRUTURAL	002	VIGAS DE APOIO (VA)	003	EED 001-002-003B
EED	001	SISTEMA ESTRUTURAL	002	ESPAÇADORES (ES)	004	EED 001-002-004
EED	001	SISTEMA ESTRUTURAL	002	ARRUELAS DE FIXAÇÃO	005	EED 001-002-005
EED	001	SISTEMA ESTRUTURAL	002	PARAFUSOS ALLEN	006	EED 001-002-006
EED	001	SISTEMA ESTRUTURAL	002	PARAFUSOS BORBOLETA	007	EED 001-002-007
EED	001	SISTEMA ESTRUTURAL	002	ANEL BMPS	008	EED 001-002-008
EED	001	SISTEMA ESTRUTURAL	002	ABSORVEDOR DE VIBRAÇÃO	009	EED 001-002-009
EED	001	SISTEMA MAGNÉTICO DINÂMICO	003	BOBINA MAGNÉTICA (BM)	001	EED 001-003-001
EED	001	SISTEMA MAGNÉTICO DINÂMICO	003	FIO AWG NO. 21	002	EED 001-003-002
EED	001	SISTEMA MAGNÉTICO DINÂMICO	003	HASTE DA BOBINA (HB)	003	EED 001-003-003
EED	001	SISTEMA MAGNÉTICO DINÂMICO	003	BUCHA ROSCADA DA BM	004	EED 001-003-004
EED	001	SISTEMA ESTABILIZADOR	004	ROLAMENTO LINEAR (LM12UU)	001	EED 001-004-001
EED	001	SISTEMA ESTABILIZADOR	004	ROLAMENTO LINEAR (LM12UU)	001	EED 001-004-001A
EED	001	SISTEMA ESTABILIZADOR	004	ROLAMENTO LINEAR (LM12UU)	001	EED 001-004-001B
EED	001	SISTEMA ESTABILIZADOR	004	ROLAMENTO LINEAR (LM12UU)	001	EED 001-004-001C
EED	001	SISTEMA ESTABILIZADOR	004	ROLAMENTO LINEAR (LM12UU)	001	EED 001-004-001D
EED	001	SISTEMA ESTABILIZADOR	004	ANEL CENTRALIZADOR (AC)	002	EED 001-004-002
EED	001	SISTEMA ESTABILIZADOR	004	ALOJAMENTO DOS ROLAMENTOS (AR)	003	EED 001-004-003
EED	001	SISTEMA ESTABILIZADOR	004	TAMPA DO ALOJAMENTO DOS ROLAMENTOS	004	EED 001-004-004
EED	001	SISTEMA ESTABILIZADOR	004	PARAFUSO FIXADOR DA TAMPA	005	EED 001-004-005
EED	001	SISTEMA DE VIBRAÇÃO	005	ANEL ESTABILIZADOR DAS MOLAS	001	EED 001-005-001
EED	001	SISTEMA DE VIBRAÇÃO	005	BUCHA ROSCADA DA AEM	002	EED 001-005-002
EED	001	SISTEMA DE VIBRAÇÃO	005	MOLAS	003	EED 001-005-003
EED	001	SISTEMA DE VIBRAÇÃO	005	PARAFUSO FIXADOR DAS MOLAS	004	EED 001-005-004
EED	001	SISTEMA DE VIBRAÇÃO	005	ENGASTE DE MOLAS BASE – LADO AE	005	EED 001-005-005
EED	001	SISTEMA DE VIBRAÇÃO	005	ENGASTE DE MOLAS SUPERIOR – LADO AE	006	EED 001-005-006
EED	001	SISTEMA DE VIBRAÇÃO	005	ENGASTE DE MOLAS BASE – LADO AEM	007	EED 001-005-007
EED	001	SISTEMA DE VIBRAÇÃO	005	ENGASTE DE MOLAS SUPERIOR – LADO AEM	008	EED 001-005-008

Fonte: Elaboração própria

Na última seção do projeto, o esboço foi transportado para o ambiente de folha de desenho virtual, por uma função do *software* que gera automaticamente a extensão de gravação ‘.dwg’. A nomeação do arquivo seguiu os parâmetros citados acima.

No espaço de construção das vistas ortográficas, as peças foram postas, a partir do primeiro plano de desenho gerado. Essa ação resultou no posicionamento das vistas rebatidas, auxiliares e de corte, necessárias à observância de elementos internos, os quais são imperceptíveis no plano inicial.

As cotas do projeto foram separadas pelas categorias associativas, relativistas e gerais. Nas cotas associativas empregaram-se as medidas às peças individualmente. Nas cotas relativistas adotaram-se as medidas de posição entre subconjuntos.

No desenho do EED-01 montado pela resolução isométrica introduziram-se as cotas gerais de tamanho. O sistema de cotas seguiu os requisitos da norma técnica NBR 10126. Logo, concluiu-se a fase de projeto virtual do EED-01 com as especificações necessárias para sua construção física.

No que concerne aos materiais utilizados na confecção do EED-01, as suas diversas propriedades magnéticas e antimagnéticas foram explorados por suas funcionalidades dinâmicas e estáticas. Elas dependem da natureza, da composição química presente em sua estrutura molecular e atômica, bem como as características do modo de fabricação de cada peça.

Os fenômenos dos dipolos magnéticos das ligas metálicas no EED-01 são atribuídos a sua rápida resposta a mudança de polaridade, e ao seu comportamento não linear, como explica Ducharne et. al (2021). Essas propriedades reforçam a utilização dos materiais ferromagnéticos em máquinas elétricas, eletrônica de potência, sensores e sistemas de prevenção a interferências magnéticas, o qual qualifica o EED-01 dentro dessa aplicação.

Os metais presentes na estrutura dos EED-01 impactam no funcionamento dos mecanismos do protótipo. O artigo de Kaur et. al. (2019) apresenta a estrutura molecular nanoestruturada bivalente $\text{CoZnFe}_2\text{O}_4$ que produz alta sensibilidade magnética após a adição de Zn^{+2} como agente potencializador do $\text{Co}_2\text{Fe}_2\text{O}_4$, e essa técnica tem sido aplicada na indústria de beneficiamento de aços elétricos. Essa forma de dopagem é largamente aplicada em ligas metálicas quando se deseja aumentar a coercividade no ciclo de histerese em materiais ferromagnéticos.

De acordo com Ouyang et. al. (2019), o ferromagnetismo presente nos componentes do conjunto magnético estático do EED-01 demonstram magnetização não orientada dos spins quânticos devido a não interação entre dipolos magnéticos quando submetidos a campo magnético nulo.

De acordo com Qiu et. al (2018), a orientação dos spins por indução de corrente elétrica ou presença de campo magnético estático ou contínuo excita os dipolos magnéticos pela propagação de

campo, e organiza a direção e sentidos dos spins a nível eletrônico. A base magnética polar sul e a placa polar norte nos EED-01 são compostos por liga ferromagnética, e predomina o modelo de magnetização por acoplamento de câmbio.

Em consonância com o estudo de Avvisati et al. (2018), as irregularidades ou descontinuidades nos grãos da liga submetidas a campo magnética, a magnetização pode apresentar supressão de momentos magnéticos pontuais ou spins defeituosos, o que torna a camada metálica eletronicamente não homogênea.

Os materiais paramagnéticos foram implementados na construção da armadura do EED-01 por apresentarem fenômenos antimagnéticos ou paramagnéticos. O objetivo precípua foi evitar a magnetização por contato entre as peças pelo campo magnético produzido pelos sistemas dipolares dinâmicos e estáticos.

Cahaya (2020) alega que o mecanismo de não magnetização se apresenta quando, na presença de campo magnético, esses materiais não são suscetíveis a excitação por dipolos magnéticos. Complementado por Gao et. al (2021), a produção de campo magnético nessas ligas é extremamente baixa, e respondem minimamente a curva de magnetização. Essa mínima magnetização pode se manifestar quando há alteração no deslocamento orbital dos elétrons por um campo magnético externo.

Chipman e Berry (2020) informa que essa alteração eletrônica nos orbitais apresentam comportamento magnético fraco devido a geometria molecular dos dímeros cristalizados da liga antimagnética. O mecanismo de magnetização fraca decorre pela comunicação entre os cristais dimerizados onde não há dissipação de campo magnético expressivo, e é produzido pelo acoplamento de dois orbitais sobrepostos, e não emparelhados.

Os componentes de sustentação do EED-01 em aço inoxidáveis 304 certificados pela “*American Iron and Steel Institute*” (AISI) são utilizados na estrutura de sustentação do EED-01 com o intuito de amenizar as perturbações do campo magnético produzido pelas interações entre a base magnética polar sul, placa polar norte, ímã permanente anelar de ferrite e bobina magnética.

Os aços inoxidáveis austeníticos AISI 304 na perspectiva da análise magnética da estrutura morfo cristalina é observado baixa densidade de fluxo magnético nos ciclos de histerese magnética. No âmbito do estudo morfológico dessas ligas, o ferro alfa ($\text{Fe-}\alpha$) se mostra estável no sistema austenítico não magnético.

Gopkalo et. al. (2019) aborda a transição de fase para martensita em aços inoxidáveis, e explica que o fenômeno deve influenciar na susceptibilidade magnética quando o mesmo excede o limite de fadiga sob cargas dinâmicas diretas. O aço AISI 304 é considerado austenítico quando os

teores de cromo estão entre 16% a 30%, o de níquel entre 6% a 35% e o de carbono abaixo de 0,30%.

A curva de saturação magnética (Ms) proposta por Bertero et. al. (2018) complementa que a relação do teor de cromo (%Cr) é inversamente proporcional à resposta da curva Ms, pois o %Cr ligado ao ferro reduz a susceptibilidade à magnetização do AISI 304.

O EED-01 é composto por cilindros ocos em alumínio 6160 como vigas de apoio em sua estrutura de sustentação, e engaste estático de molas em latão. A liga demonstra paramagnetismo por sua sensibilidade magnética reduzida. A viga em alumínio é sustentada por tirantes roscados em AISI 304 e mantêm contato pela base magnética polar sul.

A viga admite magnetização reduzida segundo Wei et. al. (2018), pois o alumínio reduz o efeito negativo de dispersão do campo magnético pelo contato de componentes ferromagnéticos.

Yuan et. al. (2020) aborda fenômenos paramagnéticos em metais como o latão e alumínio, e cita que os dois podem apresentar sensibilidade magnética, mesmo que pequena, quando submetidos a atrito dinâmico entre suas superfícies.

O polyoxymethylene (POM) é aplicado no subconjunto dinâmico do EED-01 devido as suas propriedades mecânicas e paramagnéticas. O POM é empregado nos engastes de mola no topo da haste do atuador para evitar uma possível transmissão de corrente de Foucault à armadura do EED-01, e na confecção da bobina magnética a qual é submetida ao campo magnético eletricamente induzido.

Segundo Czarnecka-Komorowska e Sterzynski (2018) e Tashiro et. al (2018) a usinabilidade, as propriedades mecânicas, térmicas e resistência ao atrito e abrasivos são características do POM.

Andrzejewski et. al. (2020) atesta que o módulo de Young é proporcional a quantidade de fibras que o POM detém em sua estrutural cristalizada. Islam et. al. (2020) levanta dados relacionados aos estudos em andamento do POM, e conclui que o material tem demonstrado resultados satisfatórios no módulo de resistência quando compostos nanoestruturados são adicionados a ele.

No EED-01 foi aplicado o ímã permanente anelar de ferrite a base de samário (Sm) e Co. De acordo com Kim et. al. (2020), a liga desses ímãs detém estrutura anisotrópica orientada, ciclo de histerese definido por suas características químicas a nível eletrônico e alta temperatura de Curie na produção de campo magnético.

Sun et. al. (2018) levanta o questionamento da grande procura mundial por neodímio – ferro – boro (NdFeB), e conclui que apesar do encarecimento do produto no mercado internacional,

os magnetos de ferrite dopados com Sm e Co tem potencial para substituí-los se a resposta da coercividade magnética frente a um campo magnético for ampliada.

Li et. al. (2020) apresenta que há relação entre a estabilidade do campo magnético dos ímãs de ferrites com a metodologia de produção, e demonstra o desempenho e a ampliação dos domínios magnéticos quando tratados termicamente por recozimento.

A explicação de sua aplicação advém de ligas metálicas em ímãs permanentes com coercividade histerética mais estável, pois requer a redução do tamanho do grão da estrutura do magneto.

Li et. al. (2018) cita esse fenômeno quando verifica a interferência direta que a degradação térmica influencia na resposta em coercividade, e pela redução do coeficiente de temperatura coerciva (β).

Assim, o processo fenomenológico dos dipolos magnéticos do ímã permanente anelar de ferrite é analisado e caracterizado quando a própria estrutura é submetida a temperaturas elevadas, e no resfriamento conseqüentemente se observa a queda linear da temperatura coerciva variando de acordo com o aumento da coercividade promovido pela ativação de campo magnético.

Li et. al. (2018) conclui que o material quando projetado por agregação de compósito deve estabilizar altos índices de temperatura coerciva próximo às condições da temperatura de Curie. Essa ideia sustenta a aplicabilidade em sistemas eletrodinâmicos de baixo efeito Joule como o EED-01. Os materiais escolhidos na construção do EED-01 elencados acima foram selecionados de acordo com as sensibilidades e não sensibilidades ao campo magnético.

Um ponto abordado na dissertação de Mozetic (2008) sobre processos de fabricação e escolha de materiais para manufatura de alto-falante foi a necessidade de se obter ligas com o mínimo de inclusões não magnéticas na estrutura.

No projeto do EED-01, devido à quantidade significativa de diferentes materiais, explicita-se na Tabela 2 a relação deles contendo:

- a) Número da peça,
- b) Parte pertencente ao EED-01,
- c) Subconjunto.

Essas descrições de conteúdo indicam as peças onde se encontram instalados, conjunto geral, nome do material e sua classificação de acordo com os órgãos competentes os quais credenciam internacionalmente suas atribuições mecânicas, químicas e físicas.

Essa metodologia aplicada oferece interatividade na consulta sobre as características que cada peça possui frente a sua funcionalidade no projeto citado no ANEXO I.

Tabela 2 - Materiais empregados na construção do EED-01

TABELA DE MATERIAIS E PEÇAS						
NO.	PARTE	SUBCONJUNTO	CONJUNTO	PEÇAS	MATERIAL	CLASSIFICAÇÃO DO MATERIAL
EED 001-001-001	BASE MAGNÉTICA POLAR SUL (BMPs)	SISTEMA MAGNÉTICO ESTATICO	EED	1	AÇO LIGA	SAE 1008
EED 001-001-002	PLACA POLAR NORTE (PPN)	SISTEMA MAGNÉTICO ESTATICO	EED	1	AÇO LIGA	SAE 1008
EED 001-001-003	ÍMA PERMANENTE ANEL DE FERRITE (IPAF)	SISTEMA MAGNÉTICO ESTATICO	EED	1	FERRITE SINTERIZADO	H-100
EED 001-001-004	PINO T-YOKE	SISTEMA MAGNÉTICO ESTATICO	EED	1	AÇO LIGA	SAE 1008
EED 001-002-001	ANEL DA ESTRUTURA (AE)	SISTEMA ESTRUTURAL	EED	4	AÇO INOXIDÁVEL	AISI 304
EED 001-002-002	TIRANTES DE AMARRAÇÃO	SISTEMA ESTRUTURAL	EED	4	AÇO INOXIDÁVEL	AISI 304
EED 001-002-003A	VIGAS DE APOIO (VA)	SISTEMA ESTRUTURAL	EED	4	ALUMÍNIO	ASTM 6061
EED 001-002-003B	VIGAS DE APOIO (VA)	SISTEMA ESTRUTURAL	EED	8	ALUMÍNIO	ASTM 6061
EED 001-002-004	ESPAÇADORES (ES)	SISTEMA ESTRUTURAL	EED	4	LATÃO	LATÃO DE USINAGEM (C-360)
EED 001-002-005	ARRUELAS DE FIXAÇÃO	SISTEMA ESTRUTURAL	EED	36	AÇO INOXIDÁVEL	AISI 304
EED 001-002-006	PARAFUSOS ALLEN	SISTEMA ESTRUTURAL	EED	16	AÇO INOXIDÁVEL	AISI 304
EED 001-002-007	PARAFUSOS BORBOLETA	SISTEMA ESTRUTURAL	EED	4	AÇO INOXIDÁVEL	AISI 304
EED 001-002-008	ANEL BMPs	SISTEMA ESTRUTURAL	EED	1	AÇO CARBONO	SAE 1020
EED 001-002-009	ABSORVEDOR DE VIBRAÇÃO	SISTEMA ESTRUTURAL	EED	4	AÇO CARBONO + BORRACHA NITRILICA	SAE 1045 + NBR 70 SHORE A
EED 001-003-001	BOBINA MAGNÉTICA (BM)	SISTEMA MAGNÉTICO DINÂMICO	EED	1	POLIACETAL	POLIÓXIDO DE METILENO (POM)
EED 001-003-002	FIO AWG NO. 21	SISTEMA MAGNÉTICO DINÂMICO	EED	-	COBRE	COBRE ELETROLÍTICO (C-110)
EED 001-003-003	HASTE DA BOBINA (HB)	SISTEMA MAGNÉTICO DINÂMICO	EED	1	AÇO INOXIDÁVEL	AISI 304
EED 001-003-004	BUCHA ROSCADA DA BM	SISTEMA MAGNÉTICO DINÂMICO	EED	2	LATÃO	LATÃO DE USINAGEM (C-360)
EED 001-004-001	ROLAMENTO LINEAR (LM12UU)	SISTEMA ESTABILIZADOR	EED	2	AÇO LIGA	PEÇA COMPOSTA
EED 001-004-001A	ROLAMENTO LINEAR (LM12UU)	SISTEMA ESTABILIZADOR	EED	2	AÇO LIGA	SAE 5160
EED 001-004-001B	ROLAMENTO LINEAR (LM12UU)	SISTEMA ESTABILIZADOR	EED	2	POLIACETAL	POLIÓXIDO DE METILENO (POM)
EED 001-004-001C	ROLAMENTO LINEAR (LM12UU)	SISTEMA ESTABILIZADOR	EED	384	AÇO LIGA	SAE 5160
EED 001-004-001D	ROLAMENTO LINEAR (LM12UU)	SISTEMA ESTABILIZADOR	EED	4	BORRACHA NITRILICA	NBR 70 SHORE A
EED 001-004-002	ANEL CENTRALIZADOR (AC)	SISTEMA ESTABILIZADOR	EED	1	ALUMÍNIO	ASTM 6061
EED 001-004-003	ALOJAMENTO DOS ROLAMENTOS (AR)	SISTEMA ESTABILIZADOR	EED	1	LATÃO	LATÃO DE USINAGEM (C-360)
EED 001-004-004	TAMPA DO ALOJAMENTO DOS ROLAMENTOS	SISTEMA ESTABILIZADOR	EED	1	LATÃO	LATÃO DE USINAGEM (C-360)
EED 001-004-005	PARAFUSO FIXADOR DA TAMPA	SISTEMA ESTABILIZADOR	EED	1	AÇO INOXIDÁVEL	AISI 304
EED 001-005-001	ANEL ESTABILIZADOR DAS MOLAS	SISTEMA DE VIBRAÇÃO	EED	1	ALUMÍNIO	ASTM 6061
EED 001-005-002	BUCHA ROSCADA DA AEM	SISTEMA DE VIBRAÇÃO	EED	1	LATÃO	LATÃO DE USINAGEM (C-360)
EED 001-005-003	MOLAS	SISTEMA DE VIBRAÇÃO	EED	4	AÇO INOXIDÁVEL	AISI 304
EED 001-005-004	PARAFUSO FIXADOR DAS MOLAS	SISTEMA DE VIBRAÇÃO	EED	16	AÇO INOXIDÁVEL	AISI 304
EED 001-005-005	ENGASTE DE MOLAS BASE LADO AE	SISTEMA DE VIBRAÇÃO	EED	4	BRONZE	TM 23
EED 001-005-006	ENGASTE DE MOLAS SUPERIOR LADO AE	SISTEMA DE VIBRAÇÃO	EED	4	BRONZE	TM 23
EED 001-005-007	ENGASTE DE MOLAS BASE LADO AEM	SISTEMA DE VIBRAÇÃO	EED	1	POLIACETAL	POLIÓXIDO DE METILENO (POM)
EED 001-005-008	ENGASTE DE MOLAS SUPERIOR LADO AEM	SISTEMA DE VIBRAÇÃO	EED	1	POLIACETAL	POLIÓXIDO DE METILENO (POM)

Fonte: Elaboração própria

O processo de fabricação envolveu procedimentos da mecânica dura, em consonância com a não dura, ou seja, os conceitos relacionais entre o produto e o conhecimento científico.

A usinagem das peças do EED-01 sustentou-se pela verificação constante do projeto desenhado virtualmente pelo *INVENTOR*.

Ferraresi (1970) aborda a usinagem de materiais como uma atividade de constante verificação dos parâmetros de usinagem.

O material base foi medido e marcado com margem de 5% a mais que suas medidas finais, em acordo com as dimensões de projeto.

Albertazzi e Souza (2008) explica que a metrologia dimensional possui variações entre valores mínimos e máximos os quais devem ser seguidos. Então, segue abaixo as etapas de produção das peças:

a) Tomou-se o diâmetro externo da base magnética polar sul como a base para o gabarito dos quatro anéis da estrutura. Então, a medida do diâmetro externo da base magnética polar sul foi transferida para a chapa de aço inoxidável AISI 304, de 3,125 mm de espessura, e com a ajuda de uma punção, o centro foi marcado. Com um compasso riscador, os quatro anéis foram marcados, bem como os pontos dos quatro furos de fixação dos tirantes pelo método de bisettriz. Em seguida, os anéis foram cortados com disco de corte na circunferência traçada. Soldaram-se os quatro anéis juntos, e em seguida as furações foram realizadas.

b) Os quatro anéis soldados foram fixados na placa do torno mecânico, e abriu-se o diâmetro interno até a medida de 60 mm, igual ao diâmetro do pino principal da base magnética polar sul. Os anéis foram encaixados na base magnética polar sul, e essa última foi reposicionada na placa da máquina. O diâmetro externo foi reduzido até a medida onde a solda desapareceu. Aplicou-se o recartilhamento e chanframento no diâmetro externo dos anéis da estrutura, com o a finalidade de retirar gumes cortantes. Consequentemente, os discos foram desacoplados, polidos e numerados de 1 a 4, ao lado do furo de fixação de referência por puncionamento.

c) Os tirantes de amarração roscado M10x1.5 foram cortados na altura de 242 mm, a partir de um varão de 1000 mm em aço inoxidável AISI 304.

d) Reduziu-se a espessura da placa polar norte usada de 10 mm para 9 mm, bem como o seu diâmetro externo de 190 mm para 170 mm. O diâmetro interno foi alargado de 40 mm para 85 mm.

e) A bobina magnética foi produzida a partir de uma peça cilíndrica de 90x60 mm. As suas cavidades foram usinadas no torno mecânico com parâmetros definidos em projeto (APÊNDICE I).

Um furo central na peça foi preparado, e uma bucha com rosca interna M10x1.5 foi introduzida por interferência.

Quando terminada, o fio de cobre esmaltado AWG 21 foi enrolado no alojamento da bobina magnética até o diâmetro externo de 85 mm. Após o bobinamento, o multímetro Agilent modelo U1241b foi utilizado no modo ohmímetro, e a resistividade de $6.2 \, \Omega$ foi indicada com resolução de $\pm 0,1 \, \Omega$.

A bobina foi mergulhada em verniz. O cálculo da impedância da bobina magnética foi efetuado de acordo com a análise dinâmica do circuito elétrico. Então, na Tabela 3 a ficha técnica da BM é apresentada com os valores correspondentes às variáveis necessárias ao seu dimensionamento.

Tabela 3 - Ficha Técnica Elétrica da Bobina Magnética Multicamada

FICHA TÉCNICA ELÉTRICA DA BOBINA MAGNÉTICA MULTICAMADA	
DESCRIÇÃO	VALORES
ESPESSURA DA BOBINA (mm)	10,000
DIMENSÕES DA BOBINA (mm): ϕ EXTERNOx ϕ INTERNOxALTURA	85,000X64,000X25,000
COMPRIMENTO DO FIO (mm)	94698
MASSA DO FIO (kg)	0,334
NÚMERO DE CAMADAS	13
NÚMERO DE ESPIRAS	408
RESISTÊNCIA (Ω)	6,200
RESOLUÇÃO (Ω)	$\pm 0,1$
INDUTÂNCIA (μ H)	12500,00
NO. FIO AWG	21
VERNIZ	Laca Acrílica Incolor

Fonte: Elaboração própria

f) As vigas de apoio e os espaçadores foram usinados no torno mecânico de acordo com as especificações de projeto (APÊNDICE I). As técnicas de verificação do paralelismo e perpendicularidade foram exaustivamente aplicadas.

g) Efetuou-se a operação de torneamento na produção do alojamento de rolamentos e tampa, de acordo com as especificações de projeto (APÊNDICE I).

h) Os parafusos, porcas borboletas, arruelas e rolamentos foram aplicados como peças de amarração. As porcas autotravantes aplicadas foram escolhidas de acordo com sua atribuição de fixação em mecanismos sob intensa vibração. As arruelas de pressão seguiram o mesmo padrão de escolha que as porcas autotravantes. Os rolamentos lineares LM12UU promove mobilidade da haste dinâmica apenas em único sentido.

i) O anel centralizador (AC) foi usinado, como mostra a Figura 7, a partir de uma peça bruta em alumínio padronizado pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM) 6061, e o

alojamento dos rolamentos foi inserido no diâmetro central do AC por interferência. Nesse procedimento, a prensa hidráulica foi empregada na instalação.

Figura 7 – Usinagem do anel centralizador



Fonte: Elaboração própria

j) A haste da bobina magnética usinada a partir de um tarugo de 12.7 mm foi rebaixada até 12 mm. As roscas M10x1.5 foram abertas nas duas extremidades do eixo.

k) Na produção do anel estabilizador de molas (AEM), uma peça circular de alumínio ASTM 6061 foi usinada de acordo com as especificações de projeto (APÊNDICE I). Um furo de 15 mm foi aplicado no centro da parte, e uma bucha com rosca M10x1.5 foi posta por interferência. No topo do AEM, o sistema de presilha das molas com oito furos coincidentes com mais oito furos de 5 mm do anel da estrutura (AE) foram abertos.

l) As dimensões das molas do sistema de vibração foram confeccionadas a partir de gabarito, e nas furações empregou-se a centralização do anel da estrutura pelo anel estabilizador de molas. O corte das molas na chapa de 0,600 mm foram produzidas por guilhotina manual.

Na montagem do EED-01 foi estabelecido critérios de encaixe pelas marcações dos AE com a BMPS. Assim, segue abaixo o procedimento realizado para o alinhamento das partes do equipamento:

1. Limpou-se as superfícies e os alojamentos da base magnética polar sul;
2. Encaixou-se a bobina magnética no pino do T_{yoke} ;
3. Acoplou-se o ímã permanente anelar de ferrite na superfície da base magnética polar sul centralizado com a bobina magnética;
4. Instalou-se a placa polar norte na superfície do ímã permanente anelar de ferrite;
5. Roscou-se os quatro tirantes de amarração do anel da base magnética polar sul;

6. Introduziu-se o conjunto 1 de quatro vigas de apoio de 75 mm de altura nos tirantes;
7. Aplicou-se o anel estabilizador de número 4;
8. Acoplou-se o conjunto 2, de quatro vigas de apoio de 60 mm de altura, nos tirantes;
9. Aplicou-se o anel estabilizador de número 3;
10. Encaixou-se e aparafusou-se o anel centralizador, junto com o alojamento dos rolamentos entre os anéis estabilizador 2 e 3;
11. Aplicou-se o espaçador;
12. Fechou-se o anel centralizador com o encaixe do anel estabilizador 2;
13. Acoplou-se o conjunto 3, de quatro vigas de apoio de 60 mm de altura, nos tirantes;
14. Aplicou-se o anel estabilizador de número 4 no topo;
15. Introduziu-se a haste dentro do alojamento dos rolamentos lineares e aparafusou-se na bobina magnética;
16. Aparafusou-se o anel estabilizador de molas;
17. Encaixou-se as molas no anel estabilizador junto com o encaixe no engaste do anel estabilizador de número 4;
18. Enroscou-se, na ponta dos tirantes, o conjunto de 4 parafusos borboletas, e aplicou-se aperto até a estrutura permanecer rígida.

Assim, conclui-se a montagem física do equipamento.

4.2 DETERMINAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO COMPATÍVEL PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL

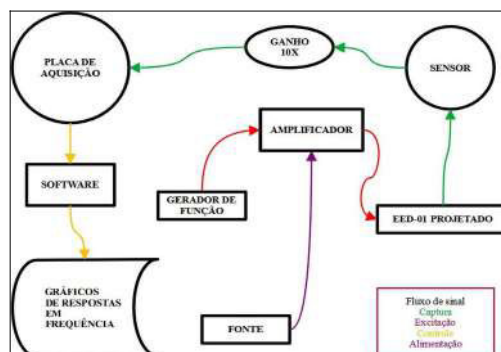
A caracterização do EED-01 pelo método experimental requereu a análise gráfica das respostas em frequência do protótipo.

A criação de fluxograma contendo o processo experimental viabiliza estrategicamente as diretrizes de instrumentação a serem seguidas durante a fase de ensaio.

Wang et. al. (2018) utiliza um fluxograma como modelo estratégico de captura das não linearidades de sinais em estruturas pelo método de medição das respostas em frequência.

O fluxograma experimental é apresentado na Figura 8 e expõe os processos desde a excitação do EED-01 à captura de sinais pelo acelerômetro através do fluxo de sinais por setas explicativas.

Figura 8 – Fluxograma da estrutura de testes



Fonte: Elaboração própria

Experimentalmente, o estudo fenomenológico do EED-01 foram separados em duas categorias: físico e a analítica. Seguindo a lógica de Torrent et. al. (2020), a primeira etapa configurou a montagem dos equipamentos e aquisição de dados, e na segunda fase os dados foram processados e transformados em resultados.

Por outro lado, a validação dos resultados do EED-01 se basearam na verossimilhança entre os procedimentos experimentais e os encontrados na literatura científica.

Assim, o método empírico foi elaborado subsequentemente ao experimento, e conduzido diretamente de forma pragmática, como explica Kheirati e Galroo (2020) quando monta o estudo de captura de dados de vibração através de fluxograma com etapas determinadas.

O método de captura de sinais do EED-01 envolveu procedimentos técnicos de montagem dos periféricos computacionais, instalação dos sensores, conhecimento dos algoritmos de softwares específicos ao processamento de dados e a codificação dos resultados por análise qualitativa, esta última proposta por Elliott (2018) a qual cita a importância da pesquisa qualitativa que suporte as decisões tomadas durante a implementação do processo experimental.

O acelerômetro foi instalado na mesa superior do EED-01 para capturar os fenômenos físicos ondulatórios, e traduzi-los em deslocamentos na forma de tensão elétrica.

Pereira et al. (2021) aplica o acelerômetro Brüel & Kjær tipo 4370, em seu experimento descrito no artigo “*An Accurate and Flexible Pneumatic Generator for NNS Stimulation Tests*” para captar vibrações durante o estímulo do gerador pneumático que auxilia a sucção em pacientes recém-nascidos, e o caracteriza como um transdutor eletromecânico piezoelétrico que produz sinais de aceleração proporcionais aos movimentos oscilatórios.

A captura da aceleração no EED-01 seguiu similar processo utilizado por Pereira et al. (2021), porém o experimento apresenta diferenciações quanto ao posicionamento do sensor, bem como a matriz produtora de ondas. Contudo, para se obter a resposta verdadeira e condizente com o fenômeno a ser analisado, o aparato de captura de sinais necessitou a complementaridade entre periféricos de aquisição e programas computacionais.

O acelerômetro empregado foi o de mono eixo com acoplamento de topo apresentado na Figura 9. Construído pela Brüel & Kjær, o tipo 4507 (2022a), foi conectado ao anel estabilizador de molas por colagem. As conexões elétricas foram acopladas ao condicionador de sinal.

Figura 9 – Acelerômetro tipo 4507



Fonte: Brüel & Kjær (2022a)

O conector 10-32 UNF lateral normatizado pelo fabricante foi aplicado na entrada do acelerômetro PZT. A janela de frequência foi um dos fatores preponderantes na escolha do instrumento. As características do instrumento estão descritos na Tabela 4 onde cita os valores de referência de calibração e as faixas de trabalho.

Tabela 4 - Calibração do acelerômetro Delta Tron[®]

FICHA DE CALIBRAÇÃO DO ACELERÔMETRO DELTA TRON [®] TIPO 4507 Brüel & Kjær - NÚMERO SERIAL: 2204042		
DESCRIÇÃO	MODO DE TRABALHO	VALORES DE REFERÊNCIA
SENSIBILIDADE DE REFERÊNCIA	159.2 Hz	10,00 mV/ms ⁻²
	1000 s ⁻¹	
	20 ms ⁻² RMS	98.1 mV/g
	CORRENTE DE ALIMENTAÇÃO: 4mA TEMPERATURA DE CALIBRAÇÃO: 24°C	
FAIXA DE FREQUÊNCIA DE TRABALHO	AMPLITUDE: ±10%	0,3 Hz a 6 kHz
	FASE: ±5%	2 Hz a 5 kHz
FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA ARMADA	-	18 kHz
SENSIBILIDADE TRANSVERSAL	MÁXIMO EM 30 Hz e 100 ms ⁻²	< 5% DA SENSIBILIDADE DE REFERÊNCIA
FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA TRANSVERSAL	-	> 18 Hz
(*) FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA	-	18,1
(*) FATOR DE QUALIDADE @ f _{res}	-	298
(*) INCLINAÇÃO DE AMPLITUDE	-	-2,3 % / DECADA
(*) FREQUÊNCIA DE CORTE	PASSA ALTA	0.15 Hz
(*) FREQUÊNCIA DE CORTE	PASSA BAIXA	76 kHz
FAIXA DE MEDIÇÃO	PICO	± 700 ms ⁻² (±71 g)
(*) VALORES CALCULADOS PARA FICHA TÉCNICA DE TRANSDUTORES ELETRÔNICOS DE ACORDO COM IEEE P1451		

Fonte: Brüel & Kjær (2022a, s/p)

A aplicação dos periféricos auxiliares exemplifica o procedimento de montagem do sistema entre os sensores capturadores à placa de aquisição de dados, bem como o controle de vibração da bobina magnética. A metodologia aplicada foi separada em duas partes.

A ‘a’ demonstra os periféricos do sistema aquisitivo de sinal do movimento oscilatório do EED-01.

A ‘b’ expõe os periféricos relacionados a excitação da BM e movimento vibracional do protótipo.

A ‘c’ aborda a aplicação dos amplificadores de sinal e alimentação V_{DC} .

a) A placa, ou *hardware*, não processa diretamente o sinal proveniente da energia de vibração capturada pelo sensor pois apresenta limite mínimo de captura em V. Para corrigir esse problema, introduziu-se no fluxograma de aquisição do EED-01 o condicionador de sinal, a exemplo de Nur’Aidha et. al. (2018) que monta um sistema de leitura sísmica e amplia o sinal capturado quando aplica o condicionador de sinais à interface de aquisição de dados. O condicionador de sinal do tipo PCB-480E09 (2022) foi empregado para produzir ganho de sinal, conforme Figura 10, advindo do sensor de aceleração posicionado no anel estabilizador de molas. O cabo do sensor foi conectado na entrada *sensor*, na porta *out* foi plugado o cabo de saída e a outra ponta foi ligada na placa NI USB-6216.

Figura 10 - Condicionador de Sinal PCB-480E09



Fonte: PCB (2022, s/p)

b) No controle da excitação do conjunto dinâmico foram implementados os periféricos de excitação da onda sinusoidal da bobina magnética. Na saída da placa NI USB-6216 um cabo foi conectado à entrada do amplificador de potência, e uma fonte de alimentação foi utilizada para energizar o amplificador. Na saída de sinal do amplificador, dois cabos foram plugados e soldados aos fios da bobina magnética.

c) Na amplificação do sinal de tensão sinusoidal foi utilizado o amplificador CL-500 apresentado na Figura 11. O manual do fabricante apresenta a faixa de resposta em frequência entre

20 Hz a 20 kHz na saída estéreo com impedância mínima de $4,0 \, \Omega$. Entretanto, a curva de comportamento foi medida experimentalmente com sinal de excitação em 10 Vpp entre e frequência 1 Hz a 25 kHz advindo do gerador de ondas. O equipamento foi alimentado por uma fonte de tensão ajustável em $12,05 \, V_{DC} \pm 1,0\%$ durante os ensaios, e possuem tensão máxima de alimentação em $13,50 \, V_{DC}$ descrita no manual do fabricante. Os equipamentos foram aterrados para excluir ruídos indesejados da rede elétrica.

Figura 11 - Amplificador de Potência CL-500



Fonte: Stetson (2022)

A comunicação entre os equipamentos viabiliza a interpretação do sinal da placa de aquisição de dados à tela de controle. A placa USB 6216 da National Instruments (NI) é ilustrada na Figura 12 e foi introduzida no experimento do EED-01 como o *hardware* administrador de sinais.

As portas analógicas de entrada e saída de sinais foram parametrizadas no processamento de amostras em tempo real do fenômeno ondulatório.

A parametrização do experimento com o EED-01 foi conduzido de forma similar ao trabalho de Gigie et. al. (2018), quando parametriza a taxa de amostragem em 1 kHz no VI da placa NI USB 6216 para avaliar os efeitos de frequências moduladas e harmônicos em radares.

Figura 12 - Placa NI USB 6216



Fonte: National Instruments (NI), (2022)

O *hardware* foi ajustado com 60 kHz de taxa de amostragem e 30000 mil pontos, totalizado-se em 0,5 segundos de janelamento na captura dos sinais vibratórios do EED-01.

De acordo com Chirikov et. al. (2020) na análise das frequências de ressonância em vigas metálicas devido a excitação acústica, o teorema da amostragem de Nyquist foi aplicado de forma que a necessidade avaliativa das respostas em frequência do EED-01 estivesse estabelecida entre 1 Hz a 25 kHz.

O sistema de aquisição de dados foi aplicado pela interação *plug&play* entre a placa NI USB-6216 (National Instruments, 2022) e o computador.

A placa NI USB-6216 foi escolhida devido ao seu hardware robusto. Segue abaixo, na Tabela 5, as informações principais do dispositivo.

Tabela 5 - Ficha Técnica Placa NI USB – 6216

PLACA NI USB – 6216	
ENTRADAS ANALÓGICAS	SAÍDAS ANALÓGICAS
8 canais diferenciais e 16 terminais simples	2 canais
Resolução de 16 bits	Resolução de 16 bits
Taxa de amostragem máxima de 400 KS/s	Máxima taxa de atualização de 250 KS/s por canal
4.095 amostras de dados	Precisão de tempo de 50 ppm na taxa de amostragem
Sistema de transferência de dados por USB – I/O	Resolução de tempo de 50 ns.
Precisão de tempo de 50 ppm na taxa de amostragem	-
Resolução de tempo de 50 ns.	-

Fonte: National Instruments (2022, s/p)

A captura do acelerômetro foi calibrado pelo método de verificação da entrada e saída de sinal. A validação foi atestada pela FFT quando demonstrou na tela do computador que a frequência de entrada do gerador de funções foi capturada pelo acelerômetro como a frequência fundamental de maior energia. O mesmo procedimento foi realizado com o amplificador CL-500, e a tensão de entrada e frequência de entrada foram confirmadas pelas respostas da FFT do programa.

As informações de calibração do acelerômetro contida na ficha técnica do instrumento foram aplicadas no software como parâmetros de entrada do instrumento virtual (VI) antes na captura de dados, pois Pandey et. al. (2021) confirma que o recurso do VI conduz de forma pragmática o processamento de informações capturadas durante o experimento da captura de áudio frequências. Smith et. al. (2019) propõe que a calibração do sensor seja acompanhada anteriormente ao experimento com o intuito de verificar os limites de captura em relação às suas respostas lineares.

O *LabVIEW* (LV) foi empregado no experimento do EED-01 para manejar o fluxo de sinais do sensor simultaneamente com o envio de sinal de excitação da bobina magnética. Em consonância com o trabalho de Osaci e Cuntan (2020), o gerenciamento das medições possibilita o

registro de dados em arquivos pré definidos de acordo com sua extensão. O método de rotinas e sub-rotinas contendo parâmetros de entrada e saída de controle foi estabelecida no *LabVIEW*, como aplicou Villanueva-López et. al. (2021) em seu experimento de medição por espectroscopia a *laser* (MIR).

A técnica de Villanueva-López et. al. (2021) viabiliza o desenvolvimento e customização dos instrumentos virtuais específicos e arquitetura de blocos necessários para a obtenção de dados experimentais.

No software foi aplicado a construção do diagrama de blocos por ícones interativos com algoritmo de captação e inserção de parâmetros de janela de tempo, frequência de amostragem e números de amostras como método de análise de saída de dados.

O assistente do LabVIEW utilizado foi o instrumento virtual DAQmx para interpretar os sinais analógicos do acelerômetro. O instrumento virtual de gravação de dados foi usado no programa para recolher os dados numéricos de cada frequência posta no gerador de funções. Esse procedimento foi aplicado nos experimentos com o EED-01.

Os dados recolhidos foram processados pelo MATLAB na forma de arquivo ‘txt’, e os gráficos foram gerados dentro da faixa de frequência de excitação do amplificador.

Os gráficos produzidos pelo programa foram o do tempo discreto, FRF e FFT. As amplitudes associadas às frequências de 1 Hz e 25 kHz.

De acordo com Mostaghimi (2021) que aplica o método comparativo de dados quando analisa as vibrações produzidas por máquinas ferramenta durante a operação de corte, a técnica pode ser aplicada na comparação dos resultados como critério na avaliação entre o comportamento vibratório do EED-01 e as respostas em frequência do amplificador CL-500.

4.3 OBTENÇÃO DAS RESPOSTAS EM FREQUÊNCIA DO EED-01

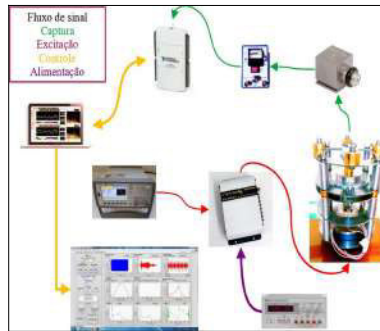
Para a obtenção das respostas em frequência do EED-01, o fluxograma do experimento demonstrado na Figura 13 ilustra a lógica do processo de captura e processamento de sinais.

A frequência é a variável controlada manualmente pelo gerador de funções e a placa NI USB-6216 é acionada manualmente pelo programa *LabVIEW*.

Os limites de frequência no experimento seguiram a seguinte ordem: 1 Hz a 100 Hz com incremento de 1 Hz; 105 Hz a 1.000 Hz com incremento de 5 Hz; 1.010 Hz a 10.000 Hz com incremento de 10 Hz; 10.100 Hz a 25.000 Hz com incremento de 100 Hz. Esse critério de captura

foram realizados em todos os experimentos com o EED-01 totalizando 1.330 pontos para cada ensaio.

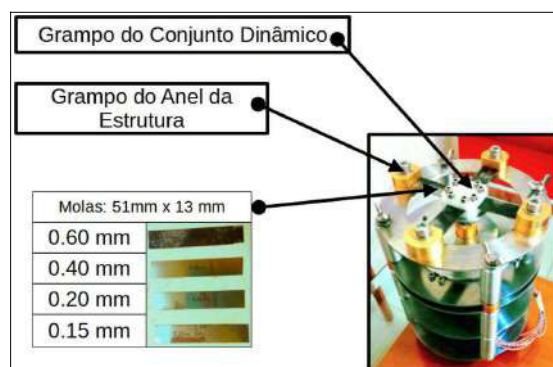
Figura 13 – Fluxograma dos experimentos com o EED-01



Fonte: Elaboração própria

A Figura 14, descreve as medidas e a forma de fixação das molas utilizadas no EED-01. A ilustração apresenta nos quatro tipos de molas planas o comprimento e largura em mm como dimensões constantes. A espessura é a dimensão que varia entre elas. O critério utilizado para a escolha dessas molas foi a hipótese de se obter alterações na aceleração, deslocamento e velocidade de picos nas respostas em frequência. As presilhas de fixação foram projetadas para travar as molas no anel estabilizador do equipamento e no conjunto dinâmico. Antes do início de cada experimento, as molas são fixadas entre as duas presilhas. O comprimento útil da mola plana foi estabelecido em 51 mm. A geometria das molas planas se assemelham a configuração de vigas bi engastadas. Os experimentos de captura das respostas em frequência foram aplicados a cada uma. Os 1.330 pontos pelo critério de captura foram manualmente tratados, e as quatro molas totalizaram 5.320 pontos.

Figura 14 – Molas do Excitador Eletrodinâmico EED-01

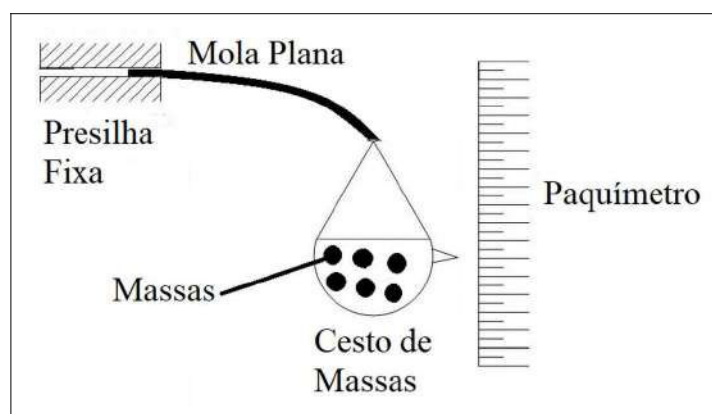


Fonte: Elaboração Própria

A determinação do deslocamento do conjunto dinâmico implicou a investigação da constante elástica por método experimental tal como ilustrado na Figura 15.

As quatro molas de espessuras 0,15 mm, 0,20 mm, 0,40 mm e 0,60 mm foram submetidas a deflexões por carregamento com massas padronizadas. Um total de 30 massas foram produzidas e aferidas em balança de precisão com resolução de $\pm 0,00002$ Kg.

Figura 15 – Ensaio investigativo da constante de rigidez elástica das molas do EED-01



Fonte: www.uol.com.br/fisica, acessado: 30/05/2022, adaptado

Nas molas 0,60 mm e 0,40 mm 0,20 mm e 0,15 as 30 massas foram aplicadas em suas extremidades e a deflexão em mm foi associada a cada adição de massa correspondendo a 31 pontos contando com o cesto vazio. As massas foram transformadas em força peso empregando a segunda Lei de Newton no MATLAB. A linearização da curva experimental das constantes elásticas associadas às molas 0,15 mm, 0,20 mm, 0,40 mm, 0,60 mm foi induzida pela equação resultante da linearização. A inclinação das retas foram calculadas por algoritmo no MATLAB e o critério dos mínimos quadrados foi o método aplicado. As constantes de rigidez elásticas (k_t) foram carregadas como dados de entrada no *LabVIEW* para obtenção do deslocamento de pico ($Y(t)$), de acordo com a equação 1.4.

A equação do deslocamento foi introduzido nas linhas de programação do *LabVIEW*. As constantes elásticas de cada mola foram aplicadas na equação 1.3 do movimento de acordo com a variação força de pico associada as amplitudes de deslocamento máximo (Y_p) do conjunto dinâmico em relação à posição de equilíbrio. A massa (m) constante do conjunto dinâmico foi levada em consideração no cálculo da força. O ângulo de fase ϕ atribuído ao sistema ondulatório utilizou a fase da resposta em frequência do sistema elétrico descrito no capítulo 4.4.

$$F_d = F_k \quad (1.1)$$

$$m_{experimental} * g_{experimental} = k_{experimental} * Y_p \quad (1.2)$$

$$Y_p = \frac{m_{experimental} * g_{experimental}}{k_{experimental}} \quad (1.3)$$

$$Y(t) = Y_p * \text{sen}((2 * \pi * f) * t + \phi) \quad (1.4)$$

O método gráfico de obtenção das respostas em frequência consistiu em construir as curvas de respostas. A localização dos fenômenos como os ‘driving points’ ou pontos de condução, isolamento das faixas lineares estáveis de deslocamento e indicação dos pontos de ressonância foram aplicados por isolamento de faixa entre a frequência de início e término. A aceleração, força, deslocamento e distorções harmônicas foram analisadas na base da FRF. O método de confronto de curvas pode apresentar equidade, dissimilaridades e anomalias intrínsecas aos fenômenos ondulatórios entre sinais capturados.

A bancada experimental de ensaios localizada no Laboratório de Sistemas e Estruturas Ativas (LASEA) é apresentada na Figura 16. Na bancada experimental os detalhes dos equipamentos periféricos, dispositivos e sensores conectados de acordo com o fluxograma de geração de sinal e captura do fenômeno ondulatório do EED-01. Segue abaixo os procedimentos realizados nos experimentos com as molas 0,15 mm, 0,20 mm, 0,40 mm e 0,60 mm de espessura.

- a) O sinal sinusoidal é gerado pelo gerador de funções;
- b) O sinal é recebido pelo amplificador de potência;
- c) O sinal de saída do amplificador segue para a bobina magnética do EED-01;
- d) A bobina magnética é magnetizada alternadamente, e reverte os dipolos magnéticos de acordo com os sentidos da corrente provocada pela frequência do sinal;
- e) Nesse instante, a troca de polaridade na bobina magnética induz a atração e repulsão imersa no campo do GAP entre o T_{yoke} da base magnética polar sul e placa polar norte;
- f) A variação do campo magnético da bobina magnética imersa no GAP recebe a contribuição das linhas de campo magnético produzidas pelo ímã permanente anelar de ferrite e as somas vetoriais da força magnética dos dois produz o movimento dinâmico ondulatório do conjunto dinâmico;
- g) O deslocamento do conjunto dinâmico excita o sensor piezoelétrico do acelerômetro produzindo tensão elétrica;

- h) O sinal de tensão elétrica do acelerômetro é enviada para o condicionador de sinais, e seu valor em Volts recebe um ganho de dez vezes;
- i) O sinal com ganho entra na placa de aquisição e os dados numéricos são processados e armazenados pelo *software*.
- j) A plotagem das respostas em frequência de aceleração, deslocamento e força foram geradas pelo MATLAB e são apresentadas nos resultados do trabalho.

Figura 16 - Bancada de teste vibracional do EED-01



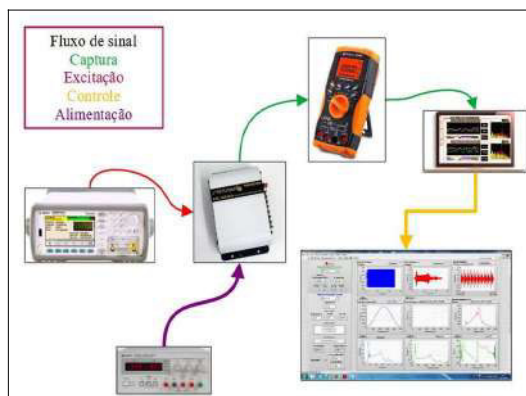
Fonte: Elaboração própria

4.4 DETERMINAÇÃO DAS RESPOSTAS EM FREQUÊNCIA DO AMPLIFICADOR DE SINAIS CL-500 UTILIZADO NO EED-01

O fluxograma do ensaio experimental do amplificador CL-500 é ilustrado na Figura 17. O experimento objetivou o levantamento da curva em V_{RMS} de resposta pela variação da frequência do sinal no amplificador.

O método consistiu em excitar o amplificador com um sinal sinusoidal de 10 Vpp e aplicar as seguintes variações de frequência: 1 Hz a 100 Hz com incremento de 1 Hz; 105 Hz a 1.000 Hz com incremento de 5 Hz; 1.010 Hz a 10.000 Hz com incremento de 10 Hz; 10.100 Hz a 25.000 Hz com incremento de 100 Hz.

Figura 17 – Fluxograma do processo analítico de sinal do amplificador CL-500



Fonte: Elaboração própria

Nessa faixa de frequência, os 1.330 pontos associados as respostas em V_{RMS} de saída do amplificador foram aferidos.

O mesmo procedimento foi realizado para obter as respostas em corrente I_{RMS} do circuito indutivo (C_{RL}) nas seguintes faixas de frequência: 1 Hz a 100 Hz com incremento de 1 Hz; 105 Hz a 1.000 Hz com incremento de 5 Hz; 1.010 Hz a 10.000 Hz com incremento de 10 Hz; 10.100 Hz a 25.000 Hz com incremento de 100 Hz.

A Figura 18 ilustra a bancada experimental utilizada na análise da curva resposta em frequência versus tensão de saída do amplificador CL-500.

Figura 18 – Bancada de captura V_{RMS} experimental amplificador CL-500



Fonte: Elaboração própria

A I_{RMS} é nomeada no presente trabalho como corrente do circuito indutivo (I_{RL}).

A captura da corrente I_{RL} experimental foi realizada com o a bobina magnética imersa no GAP durante o funcionamento do equipamento conforme Figura 19.

O circuito foi aberto e as pontas de prova do multímetro promoveram a passagem da corrente I_{RL} para a bobina magnética.

Figura 19 – Bancada de captura I_{RMS} experimental amplificador CL-500



Fonte: Elaboração própria

O circuito indutivo descrito na Figura 20, ilustra o formato aplicado no projeto do EED-01. A partir das respostas capturadas de V_{RMS} e I_{RMS} do circuito indutivo foi aplicado o cálculo de impedâncias (Z) associadas às respostas em frequência proposta pelo experimento. As impedâncias calculadas se referem ao comportamento não linear do amplificador de acordo com as frequências excitadas.

$$Z = \frac{V_{RMS}}{I_{RMS}} \quad (1.5)$$

As reatâncias indutivas (X_L) foram obtidas pela diferença da desigualdade triangular entre a resistência (R) experimental do enrolamento de cobre da bobina magnética e impedância.

$$X_L = \sqrt{Z^2 - R^2} \quad (1.6)$$

A indutância experimental (L) da bobina magnética emerge com sua relação direta com X_L e inversamente proporcional a frequência do sistema.

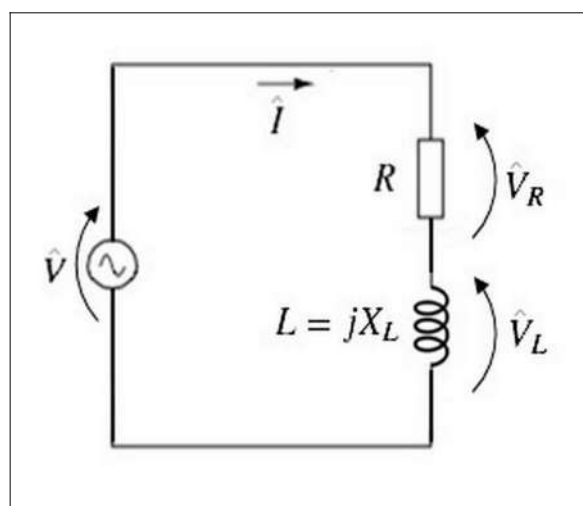
$$L = \frac{X_L}{2 * \pi * f} \quad (1.7)$$

A fase em grau ($^{\circ}$) do circuito indutivo foi calculada pelos dados experimentais relacionados a variação da tensão resistiva (V_R) e tensão indutiva (V_L). A fase da onda gerada pelo circuito indutivo reflete no movimento ondulatório, e consequentemente no deslocamento $Y(t)$.

$$\phi_o = \arctg\left(\frac{V_L}{V_R}\right) \quad (1.8)$$

Martino e Harri (2019b) aplica o circuito indutivo ilustrado na Figura 18. O EED-01 utiliza um modelo similar. O circuito indutivo do EED-01 estabelece as relações das tensões da X_L e R variando de acordo com I_{RL} . As respostas em frequência foram plotadas de acordo com as características elétricas experimentais do circuito indutivo. A indução é calculada a partir do comportamento não linear do sistema amplificador de sinais. Os cálculos foram executados no software MATLAB, e seguiu os limites e incrementos de captura em frequências citadas acima. Toda metodologia de captura de sinais foi pautada na obtenção das respostas no domínio da frequência como base de variáveis independentes. A identificação das amplitudes, nos experimentos, complementam-se de acordo com suas relações físicas.

Figura 20 – Circuito indutivo da BM aplicado no projeto do EED-01



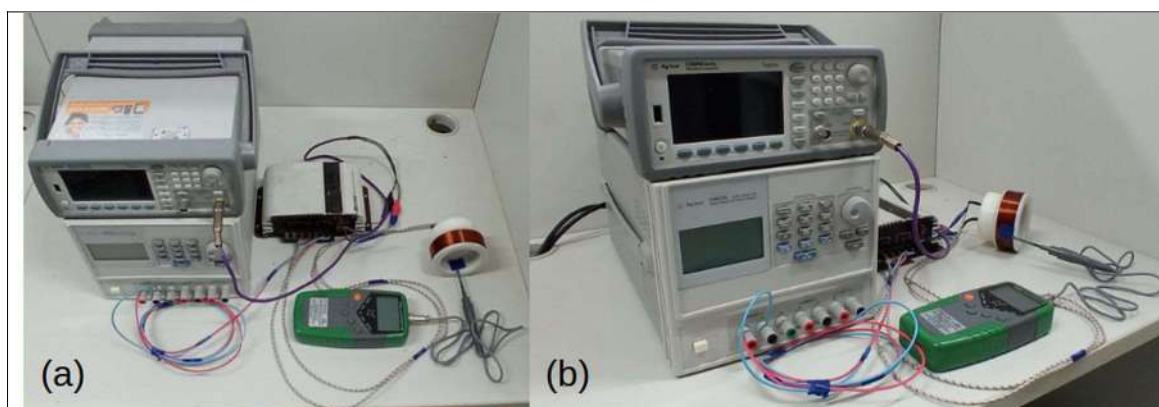
Fonte: <<http://eletronica-analogica2015.blogspot.com/2017/02/circuito-rl-serie-ca.html>>, acessado em: 14/06/2022

O campo magnético da bobina magnética foi investigado com o sistema elétrico do amplificador CL-500 em operação de acordo com a Figura 21. O método constituiu em avaliar numericamente o campo magnético da bobina magnética posicionando a ponta de prova de um

gaussímetro na parede do comprimento circunferencial interno (a) e externo (b). O ponto médio da altura da bobina magnética foi o local determinado para realizar as medições. A aferição foi realizada utilizando o modo ‘*HOLD*’ do equipamento que capta o maior pico do campo magnético. A força magnética da bobina (F_b) produzida pela I_{RL} do circuito indutivo foi calculada de acordo com a equação da bobina solenoide apresentada em 7.

$$F_b = B_{bobina} * I_{RL} * L_{comprimentodabobina} \quad (1.9)$$

Figura 21 – Bancada de captura do campo magnético experimental: (a) e (b) da BM; (c) e (d) do IPAF



Fonte: Elaboração própria

O experimento seguiu o critério da variação da frequência de excitação.

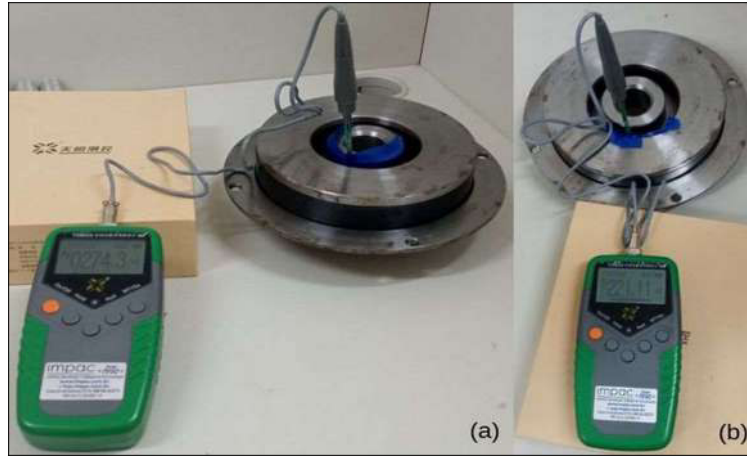
O método consistiu em excitar o amplificador com um sinal sinusoidal de 10 Vpp constante e aplicar as seguintes variações de frequência: 1 Hz a 100 Hz com incremento de 1 Hz; 105 Hz a 1.000 Hz com incremento de 5 Hz; 1.010 Hz a 10.000 Hz com incremento de 10 Hz; 10.100 Hz a 25.000 Hz com incremento de 100 Hz.

Na faixa de frequência entre 1 Hz a 25 kHz, os 1.330 pontos associados as respostas em Tesla (T) foram medidos na bobina magnética.

O gaussímetro foi aplicado no experimento de medição do campo magnético no GAP da base magnética polar sul.

A aferição foi realizada com a ponta de prova do instrumento encostada no T_{yoke} no ponto médio do GAP tal como na parede da placa polar norte como ilustra a Figura 22 (a) e 22 (b). A função ‘*HOLD*’ foi empregada na obtenção dos picos máximos do campo magnético em Tesla. O experimento capturou 12 pontos no comprimento circular do T_{yoke} e placa polar norte.

Figura 22 – Bancada de captura do campo magnético experimental do GAP: (a) Tyoke; (b) PPN



Fonte: Elaboração própria

4.5 APRESENTAÇÃO COMPARATIVA DAS RESPOSTAS EM FREQUÊNCIA ENTRE: O PROTÓTIPO EED-01 E AMPLIFICADOR DE POTÊNCIA CL-500, E FORÇAS ATUANTES

O método do confronto das respostas em tensão elétrica corresponde a apresentação dos gráficos contendo as curvas correspondentes aos quatro experimentos com as molas 0,15 mm, 0,20 mm, 0,40 mm, 0,60 mm e as tensões elétricas em V_{RMS} de pico do amplificador CL-500.

A comparação da DHT foi outra metodologia empregada na avaliação das respostas em frequência entre o EED-01 e o amplificador CL-500. As amplitudes em porcentagem (%) estão relacionadas ao comportamento das respostas frequências de excitação e as frequências harmônicas intrínsecas aos sistemas elétricos do CL-500 e mecânicos do EED-01.

A função THD no *LabVIEW* foi aplicada e os dados associados a cada frequência de excitação. O método da percentagem da DHT calcula as distorções harmônicas dos sistemas de acordo com a equação:

$$DHT \% = 100 * \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^n V}}{V_1} \quad (1.10)$$

$$f_{excitação} = f_{fundamental} \rightarrow (V_{CL-500}) \propto (V_{EED-01}) \quad (1.11)$$

A equação retorna o valor das distorções que há no sinal de excitação em frequência. Os valores com menos distorções se aproximam de 0%, e consequentemente, os valores que se aproximam de 100% possuem mais distorções.

A comparação entre as forças resultantes do EED-01 foi o método de análise da contribuição do campo magnético no GAP sobre o sistema de forças do conjunto dinâmico. O critério aplicado é demonstrado pela equação abaixo:

$$F_d = F_b + F_k + F_i \quad (1.12)$$

A força dinâmica (F_d) se qualifica como a variável de força em pico de amplitude de acordo com a aceleração capturada pelo sensor. Considerando a mínima influência que o rolamento LM12UU possui no movimento da haste do conjunto dinâmico, a força de atrito não foi considerada na produção das respostas comparativas. Logo, a força dinâmica traz consigo a resposta em força resultante de todo o sistema.

A força elástica (F_k) é o carregamento que a mola sofre ao se deformar durante o movimento oscilatório e varia de acordo com a espessura da mola aplicada no sistema. A força magnética da bobina (F_b) é a parcela em força produzida pelas ações de atração e repulsão do emaranhamento entre suas linhas de campo, que varia de acordo com a I_{RMS} do circuito indutivo. A força da bobina possui comportamento variável de mesma intensidade devido a excitação da bobina magnética apresentar valores iguais em todas as faixas de frequência.

A força do ímã (F_i) é a fração colaborativa do campo magnético constante e imerso no GAP que entra em transferência com as linhas de campo da bobina magnética de acordo com a demanda de excitação por cada frequência ajustada. Assim, as respostas da F_i para cada espessura de mola foi impressa no gráfico comparativo entre as respostas da F_d , F_b e F_k .

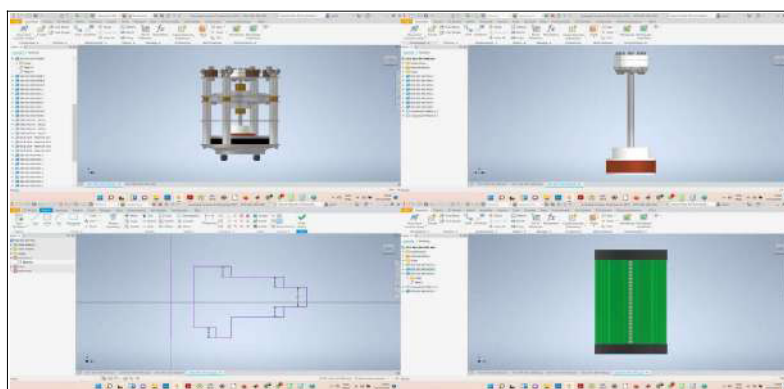
Assim, a metodologia foi aplicada de acordo com as sequências de construção, teste, aquisição de dados e interpretação dos resultados, como acima descritas. As fases de construção requereram verificação estrutural retroativa durante o processo de teste, pois como todo protótipo os erros são avaliados e corrigidos de acordo com o as respostas de funcionamento.

5. RESULTADOS

5.1 PROJETO DO EXCITADOR ELETRODINÂMICO EED-01

O protótipo do EED-01 foi concebido a partir da avaliação construtiva de dois projetos desenhados pelo *INVENTOR*®. O resultado da armação virtual auxiliou a visualização em 3D dos dois protótipos e suas características construtivas. De acordo com Munford e Normand (2015), os ícones interativos visualizados como exemplo na Figura 23 foram exaustivamente utilizados durante a confecção e montagem virtual das partes e subconjuntos do equipamento.

Figura 23 - Arquitetura do software CAD

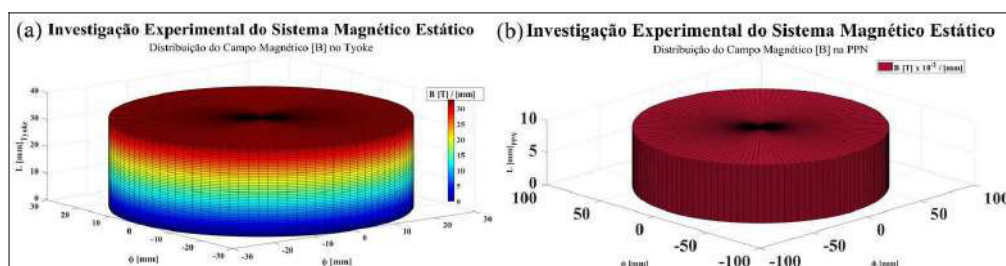


Fonte: Elaboração própria

Os dois modelos apresentam aços elétricos com sensibilidades magnéticas consideráveis nas estruturas da base magnética polar sul e placa polar norte. Ducharne et. al (2021) situa o EED-01 no escopo de máquinas elétricas submetidas a campo magnético, o que encabeça as teorias de Kaur et. al. (2019) no que tange às sensibilidades dos aços elétricos quando potencializados por dopamento de cátions de zinco. Na usinagem da base magnética polar sul e placa polar norte não houve comprometimento da estrutura por elevação de temperatura devido ao resfriamento contínuo com fluido de corte. De acordo com Ouyang et. al. (2019) e Qiu et. al (2018) a colagem do ímã permanente anelar de ferrite à base magnética polar sul e placa polar norte com adesivo líquido não apresentou problemas na orientação dos spins quânticos por magnetização de contato, e produziu um bolsão vetorizado do campo magnético no GAP. O ímã permanente anelar de ferrite do EED-01, apesar de ser constituído de ferrite embebido com Sm e Co e apresentar anisotropia orientada, de acordo com Kim et. al. (2020) e Li et. al. (2018), a temperatura de trabalho do instrumento não

desmagnetizou o magneto por elevação da temperatura de Curie, nem mesmo pelo efeito Joule dissipado pela bobina magnética. O Gráfico 1 ilustra distribuição do campo magnético do ímã permanente anelar de ferrite ao longo do pino T_{yoke} após a vetorização dos dipolos magnéticos à base magnética polar sul e placa polar norte.

Gráfico 1 – Distribuição do campo magnético no comprimento circunferencial: (a) T_{yoke} ; (b) PPN



Fonte: Elaboração própria

A Figura 24 demonstra a primeira versão renderizada do EED-01 com conjunto dinâmico complexo. A análise construtiva qualificou a centralização das molas presas ao conjunto dinâmico como imprópria. A sustentação e suspensão da haste do conjunto dinâmico pelo travamento das molas provocaria movimentos indesejáveis. Isso resultaria uma oscilação vibratória com graus de liberdade nos três eixos de forma caótica e estranha.

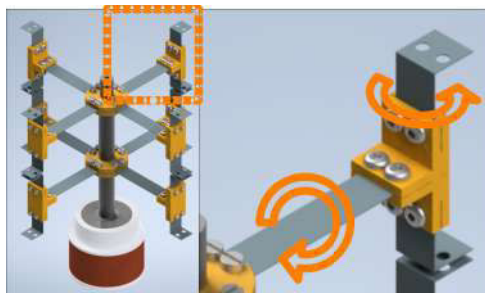
Figura 24 - Primeira proposta do EED-01



Fonte: Elaboração própria

O primeiro protótipo deveria propiciar o movimento variável retilíneo guiado pelo eixo vertical. A possível oscilação desordenada do conjunto dinâmico citada acima e visto na Figura 25 seria gerada pelas torções das molas. Logo, a estrutura geométrica da mola de baixa espessura criaria momentos vetoriais em suas seções significativamente incoerentes em relação ao modelo com um grau de liberdade.

Figura 25 – Possibilidade de torção das molas na primeira versão do EED-01

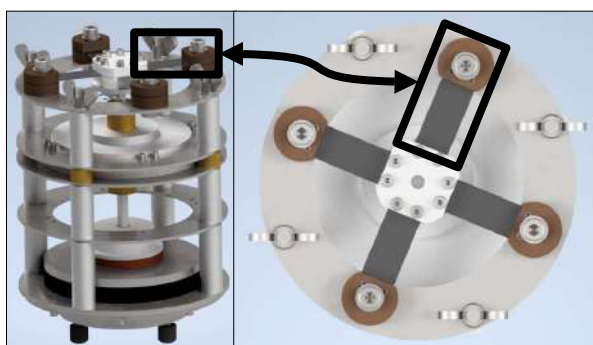


Fonte: Elaboração própria

Assim, devido à possibilidade de torção nas molas, o problema foi solucionado quando se substituiu o modelo de molas pelo da Figura 26. Um eixo vazado foi introduzido no projeto como alojamento de rolamentos lineares tipo LM12UU.

O eixo vazado em latão é fixado por interferência a uma plataforma que centraliza a haste do conjunto dinâmico ao centro do T_{yoke} . Seguindo as orientações de Manfê et. al. (1986), os rolamentos foram implementados como guias estabilizadores, e equilibraram o movimento vibratório da haste. O sistema de encaixe entre haste e rolamento adotado foi o h7 com +0,00 e -0,02 mm.

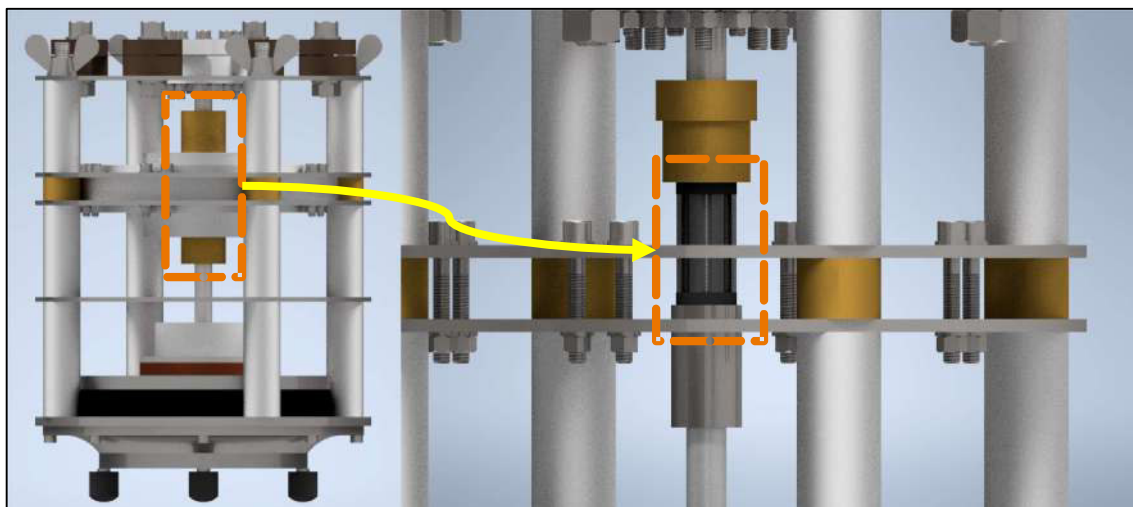
Figura 26 – Disposição das molas no projeto definitivo do EED-01



Fonte: Elaboração própria

A instalação dos rolamentos no alojamento seguiu o sistema interferencial, e resultou na fixação centralizada ao eixo da haste do conjunto dinâmico. A modificação do projeto viabilizou a implementação do sistema oscilatório com um grau de liberdade. As folgas excessivas do conjunto dinâmico foram eliminadas, e o arrasto na parede da bobina magnética pelo T_{yoke} foi evitada. Assim, a Figura 27 esclarece a alteração do projeto.

Figura 27 - Vista em 3D suprimida do AC com rolamento LM12UU instalado no AR



Fonte: Elaboração própria

De acordo com Cahaya (2020), Gao et. al (2021) e Chipman e Berry (2020) que abordam a baixa sensibilidade magnética dos materiais não ferrosos, na versão definitiva do EED-01, as quatro presilhas das molas em latão evitaram a magnetização do conjunto dinâmico pelas molas em aço.

Segundo Gopkalo et. al. (2019), os anéis da estrutura e os tirantes da armação em aço inox permaneceram inertes a magnetização porque as estruturas não sofrem transição de fase por limite de fadiga. Seguindo a mesma linha de Bertero et. al. (2018), os elementos fixadores em aço inox 304 não afetaram a curva de saturação magnética devido ao alto teor de cromo na liga.

As vigas ocas de alumínio formaram uma barreira à magnetização dos componentes da armadura como explica Wei et. al. (2018) e Yuan et. al. (2020). Tal como o ‘shaker’ simulado por Martino e Harri (2019a), o primeiro anel da estrutura proporcionou a instalação das molas em único nível, e resultou no alinhamento com os engastes da haste, visualizado na Figura 27.

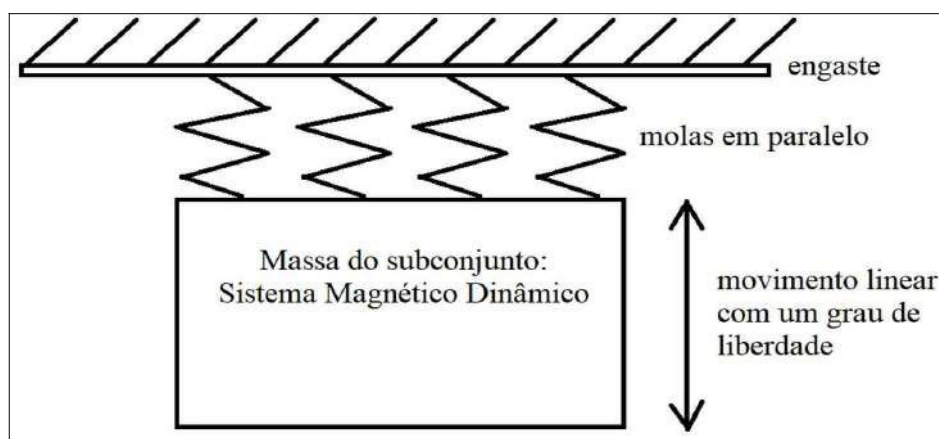
O engaste das molas da haste em poliacetal de acordo com as propriedades mecânicas e resistência ao atrito citado por Czarnecka-Komorowska e Sterzynski (2018) e Tashiro et. al (2018) contribuíram para a fixação por aperto das molas ao conjunto dinâmico.

O modelo de movimento com um grau de liberdade resultante da modificação é apresentado na Figura 28. O modelo paralelo de arranjo das molas foi o critério aplicado nos cálculos das forças elásticas, e permitiu avaliar as deflexões das molas sob carregamento. O sistema ondulatório do conjunto dinâmico devido ao travamento da haste pelas molas, mesmo dispostas perpendicularmente entre si assume o modelo de viga bi engastada.

Saadatzi et. al. (2018) comenta a eficiência energética máxima na produção de energia quando vigas piezoelétricas sob excitação forçada por ‘shakers’ atingem seu pico o máximo.

De acordo com esse prognóstico e baseado na avaliação de Farshbaf Zinati (2020) sobre o decaimento da instabilidade dinâmica em vigas bi engastadas devido ao amortecimento no ponto médio, o conjunto dinâmico do EED-01 foi instalado no ponto central em relação a armadura do equipamento.

Figura 28 - Modelo DCL de molas em paralelo assumido na versão virtual definitiva do EED-01



Fonte: Elaboração própria

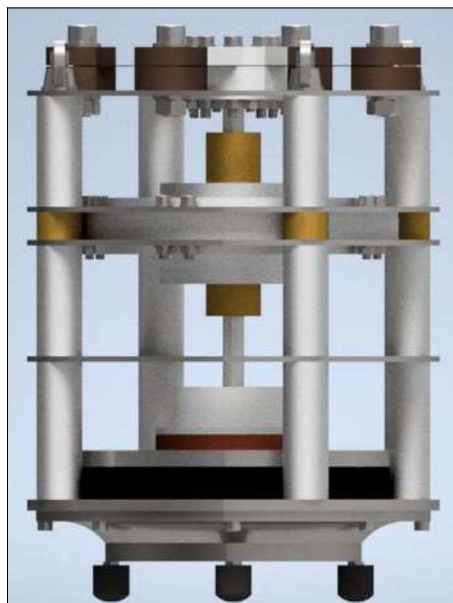
A massa do conjunto dinâmico aferida em balança de precisão apresentou 0,91834 kg com resolução de 0,00002 kg. Na avaliação da força peso, a aceleração da gravidade assumida foi de $9,80101 \text{ m/s}^2$ de acordo com Newell (2013).

Após a aplicação da segunda Lei de Newton a força peso do conjunto magnético dinâmico resultou em 9,00066 N. Na plataforma computacional de aquisição de sinais, a referência da massa aferida foi carregada pelo algoritmo em cada instante de captura da aceleração e demonstrada em N no gráfico de força de pico.

A Figura 29 apresenta a montagem virtual definitiva e renderizada do instrumento. A estrutura circular das peças foram obtidas por usinagem em torno convencional. Na fase de projeto, o material base foi calculado de acordo com Ferraresi (1970), o qual aborda a usinagem de peças como atividade complexa e variáveis significativas nos procedimentos.

O processo de corte dos mecanismos e aparatos seguiu os parâmetros metrológicos apresentados por Albertazzi e Souza (2008) no que tange às verificações das dimensões entre projeto e peça real.

Figura 29 - Renderização da versão definitiva em 3D do EED-01



Fonte: Elaboração própria

A decisão de construir estruturas independentes e fixação por encaixe resultou em montagens mais simples e dinâmicas entre as partes, como ilustra a Figura 30. A técnica de acoplamentos sobrepostos facilitou a centralização das peças.

As questões técnicas de fabricação abordadas na metodologia elucidaram a forma circular como a mais dinâmica, e sua adoção proporcionou estabilidade dimensional na armadura do EED-01.

No que concerne ainda ao sistema de fixação, as arruelas de pressão foram aplicadas para impossibilitar o desparafusamento da porca borboleta durante os experimentos. O sistema de fixação dos grampos de molas presente no EED-01 utiliza porcas autotravantes. Essas diretrizes foram cautelosamente inseridas dentro do projeto do excitador eletrodinâmico visando segurança e confiabilidade, pois uma possível desconexão do conjunto dinâmico poderia acarretar acidente.

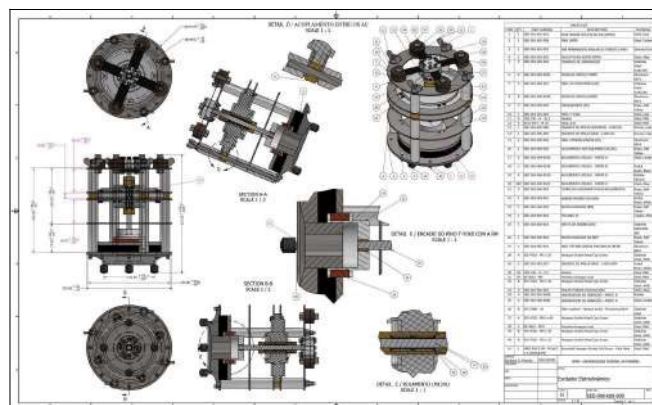
Figura 30 – Montagem do EED-01



Fonte: Elaboração própria

O desenho virtual construtivo em 2D e 3D completo do EED-01 é apresentado na Figura 31, e suas diversas partes e subconjuntos se encontram inseridos no APÊNDICE I. O esquema aponta as dimensões reais do protótipo, a lista de partes instaladas, materiais, as seções e detalhes.

Figura 31 - Esquema virtual construtivo do EED - 01



Fonte: Elaboração própria

De acordo com Tang et. al. (2020), os absorvedores de vibração postos na base inferior da base magnética polar sul auxiliaram na estabilidade das respostas em frequência devido a dissipação de frequências de ressonância associadas a reverberação na armação. Conforme a conclusão de Pacini et. al. (2022) relacionada a produção de distorções estruturais devido a harmônicas não fundamentais, o projeto dos absorvedores de vibração produziu amortecimento sensível nas frequências baixas. A elevação da altura do EED-01 foi uma contribuição importante dos absorvedores, e resultou no movimento da bobina magnética dentro *GAP* sem o amortecimento indesejado pelo arrasto do ar. Essa dificuldade de escoamento fluido dinâmico do ar ocorre quando há o bloqueio do furo do T_{yoke} .

A produção da bobina magnética seguiu os parâmetros de Klippel (2020), pois o fator de F_d foi corrigido pela relação menor que 1 entre os volumes da bobina magnética e do *GAP*.

A proporcionalidade que o módulo de Young tem em relação à quantidade de fibras do *polyoxymethylene* elencados por Andrzejewski et. al. (2020) contribuiu para uma usinagem satisfatória da bobina magnética do ponto de vista dimensional e de acabamento. Assim, os diâmetros externos e internos da bobina magnética resultaram em folgas de $-0,050$ mm e $+0,050$ mm necessárias para evitar o atrito nas paredes do ímã permanente anelar de ferrite, placa polar norte e do T_{yoke} . O enrolamento da bobina magnética no torno mecânico produziu melhor

acomodação entre os fios AWG 21, e a tensão contrária no fio resultou na sobreposição de 13 camadas e 478 espiras. O verniz foi aplicado por mergulhamento e proporcionou mais segurança na fixação por adesivagem dos fios entre camadas. A posição linear vertical relativa da bobina magnética em relação a placa polar norte fixou em $\pm 8,000$ mm de deslocamento para cima e para baixo.

Assim, o EED-01 definitivo e real é apresentado na Figura 32, contendo todas as suas partes e subconjuntos instalados.

Figura 32 - EED-01 definitivo e real após sua montagem



Fonte: Elaboração própria

5.2 DETERMINAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO COMPATÍVEL PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL

De acordo com Torrent et. al. (2020), o fluxo da instrumentação do experimento foi aplicado em duas partes.

A geração em malha aberta dos sinais de excitação em frequência na bobina magnética do EED-01 e a captura dos sinais analógicos com armazenamento dos dados pelo *software LabVIEW*.

A extensão do arquivo aplicado foi o *.xlsx, e posteriormente as respostas em amplitudes de aceleração, força, deslocamento, V_{RMS} , I_{RMS} e do campo magnético da bobina magnética foram transferidas uma a uma para a extensão texto *.txt.

Os parâmetros de entrada elencadas e descritas na metodologia foram aplicadas nos algoritmos de programação do *LabVIEW*.

O resultado da captura foi a geração de 1.330 respostas por variação de sinal em frequência, ou seja, 1.330 arquivos gerados.

O tipo de sinal utilizado nos testes experimentais de aceleração por mola aplicada foi o senoidal. A excitação produzida a partir do gerador de funções com parâmetro de entrada em 10 Vpp para o EED-01 promoveu a perturbação necessária para a captura dos eventos ondulatórios.

Apesar do ganho de sinal na saída do amplificador apresentar maior valor de tensão dentro da perspectiva comportamental não linear, a amplitude máxima de excitação limite do gerador de funções foi aplicada no experimento do protótipo. As frequências aplicadas por excitação direta durante os experimentos em malha aberta entre 1 Hz e 25 kHz produziram amplitudes conclusivas.

Conforme Pietrosanti et. al. (2020), o sistema de captura e análise gráfica em FRF produziu respostas em baixas e médias frequências. A mesma faixa de frequência aplicada pelo gerador de função nos experimentos ondulatórios foi utilizada na captura de respostas em V_{RMS} do amplificador CL-500, o qual apresentou atividade entre 15 Hz a 25 kHz.

Entretanto, a corrente I_{RL} capturada entre as faixas de 15 Hz a 20 kHz apresentaram ruído, e entre 20 kHz e 25 kHz a resposta em corrente I_{RL} é baixa e não excita o campo magnético da bobina magnética suficientemente para interagir com o campo magnético do ímã permanente anelar de ferrite.

O equipamento amplificador utilizado para o ensaio do protótipo EED-01 tem uma impedância mínima de saída de $4\ \Omega$ o que proporcionou adequação com a impedância do circuito indutivo da bobina magnética.

Os resultados de captura são demonstradas na forma gráfica é apresentada no capítulo 5.4. As capturas do circuito indutivo do EED-01 apresentou estabilidade elétrica e característica não linear no que concerne a impedância, tensão V_{RMS} e corrente I_{RMS} do circuito, bem como baixa dissipação de calor no enrolamento da bobina.

Durante o experimento do EED-01, as frequências entre 1 Hz a 25kHz foram capturadas pelo acelerômetro Brüel & Kjær 4507 com ganho de dez vezes o valor da tensão produzida por ele como explica McConnell e Varoto (1995) em seu livro “*Vibration Testing: Theory and Practice*”.

O fator amplificado pelo condicionador de sinais apresentado na Figura 15 induziu a leitura da tensão pela placa de aquisição de dados dentro das especificações indicadas da mínima tensão de entrada.

Conforme Nur'Aidha et. al. (2018), o fator multiplicativo de 10X do ganho de sinal apontado na Tabela 6 foi retirado pela programação antes de ser gravado no instrumento virtual de armazenamento de dados.

Tabela 6 - Ficha Técnica Condicionador de Sinal PCB-480E09

CONDICIONADOR DE SINAL PCB TIPO 480E09		
DESCRIÇÃO	MODO DE RESPOSTA	VALORES DE REFERÊNCIA (SI)
CANAIS	1	1
TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO	BATERIA (3X9V)	27 VDC
FAIXA DE FREQUÊNCIA	GANHO DE 1 E 10	0,15 Hz a 100.000 Hz
	GANHO DE 100	0,15 Hz A 50.000 Hz
TAXA DE GANHO ($\pm 2\%$)	-	1:1
	-	1:10
	-	1:100
TEMPERATURA DE TRABALHO	-	0°C A 50°C
TENSÃO DE EXCITAÇÃO PARA O SENSOR	-	25 a 29 VDC
CORRENTE DE EXCITAÇÃO CONSTANTE	-	2,0 A 3,2 mA
TENSÃO MÁXIMA OFF SET	-	< 30 mV
RUIDO DE ESPECTRO	1 Hz PARA GANHO 1	-132dB
	10 Hz PARA GANHO 1	-143dB
	100 Hz PARA GANHO 1	-146dB
	1 kHz PARA GANHO 1	-148dB
	10 kHz PARA GANHO 1	-150dB
RUIDO ELÉTRICO DE BANDA LARGA	1 to 10.000 Hz PARA GANHO x1	-110dB/RMS
RUIDO DE ESPECTRO	1 Hz PARA GANHO 10	-113
	10 Hz PARA GANHO 10	-114dB
	100 Hz PARA GANHO 10	-119dB
	1 kHz PARA GANHO 10	-125dB
	10 kHz PARA GANHO 10	-130dB
RUIDO ELÉTRICO DE BANDA LARGA	1 to 10.000 Hz PARA GANHO x10	-86dB/RMS
RUIDO DE ESPECTRO	1 Hz PARA GANHO 100	-94dB
	10 Hz PARA GANHO 100	-94dB
	100 Hz PARA GANHO 100	-98dB
	1 kHz PARA GANHO 100	-105dB
	10 kHz PARA GANHO 100	-114dB
RUIDO ELÉTRICO DE BANDA LARGA	1 to 10.000 Hz PARA GANHO x100	-65dB/RMS

Fonte: PCB (2022, s/p)

O aterramento da placa resultou em leituras sem ruídos indesejáveis da rede elétrica, como o de 50 Hz ou 60 Hz. Segundo Mayes et. al. (2020), a verificação prévia da resposta de captura do acelerômetro do EED-01 atestou a coerência no comportamento do sensor sob teste. Em consonância com Spaggiari e Cocconcelli (2018), o posicionamento e colagem do sensor no topo do conjunto dinâmico consolidou segurança na aquisição de dados e não permitiu que o mesmo se desprendesse durante os experimentos.

As componentes de entrada como o de 30.000 amostras com taxa de aquisição de 60 kHz produziram uma janela de 0,5 segundos de captura.

Diante da teoria citada, a relação de $>2,0$ da frequência de amostragem para a frequência de excitação foi atendida, e consequentemente resultou na captura das respostas de 1 Hz a 25 kHz incluindo as harmônicas associadas.

Assim, com os pontos das frequências de excitação pelas amplitudes associadas ao movimento vibratório e DHT em %, derivaram-se os gráficos das curvas de respostas capturadas pelo acelerômetro, placa de aquisição, multímetro e gaussímetro.

Assim, o sistema de captura e análise de sinal demonstraram em FRF as características de funcionamento do protótipo EED-01 por equivalência de comportamento relativo às respostas do circuito indutivo.

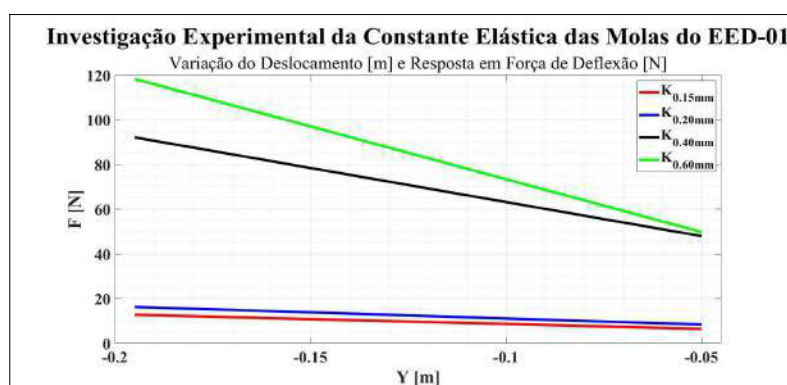
5.3 OBTENÇÃO DAS RESPOSTAS EM FREQUÊNCIA DO EED-01

O Gráfico 2 apresenta a investigação da deflexão das molas 0,15 mm, 0,20 mm, 0,40 mm e 0,60 mm de profundidade.

As quatro molas possuem o mesmo comprimento útil e largura, 51 mm e 13 mm respectivamente.

As curvas apresentam a influência que as constantes de rigidez elástica (k) atuam em cada mola, e são descritas no índice. As molas 0,40 mm e 0,60 mm demonstram diferenças entre suas curvas, e as inclinações apresentam constantes de rigidez elástica 1,55x entre elas. As molas com 0,15 mm e 0,20 mm apresentaram valores das constantes de rigidez elástica próximos e diferem em 1,25x entre elas. O experimento confirma que o valor da constante de rigidez elástica aplicado no experimento do EED-01 é inversamente proporcional à deflexão das molas e proporcional a força de carregamento.

Gráfico 2 – Ensaio experimental: investigação da constante de rigidez elástica das molas

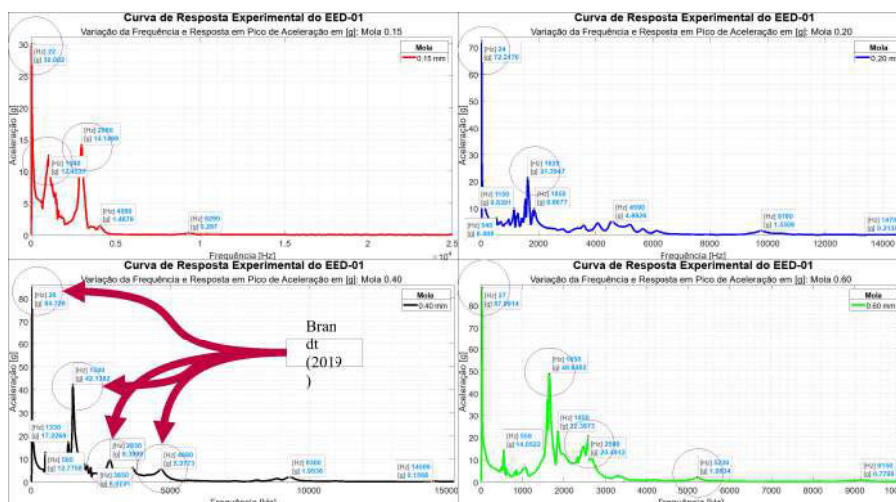


Fonte: Elaboração própria

Os gráficos FRF do EED-01 são apresentados nesse capítulo. O Gráfico 3 evidencia os picos de aceleração associado a cada mola instalada no equipamento. Observa-se que há relação

entre a espessura da mola e as respostas em aceleração. Os quatro experimentos manifestam padrões de queda em amplitude enquanto a frequência aumenta de valor.

Gráfico 3 – Resposta individual em aceleração do EED-01



Fonte: Elaboração própria

O Gráfico 4 contém as quatro curvas juntas. Os dois experimentos de Martino e Harri (2019a) apresentam o mesmo padrão em aceleração verificado no EED-01, onde nas frequências mais baixas são observadas as maiores amplitudes em aceleração.

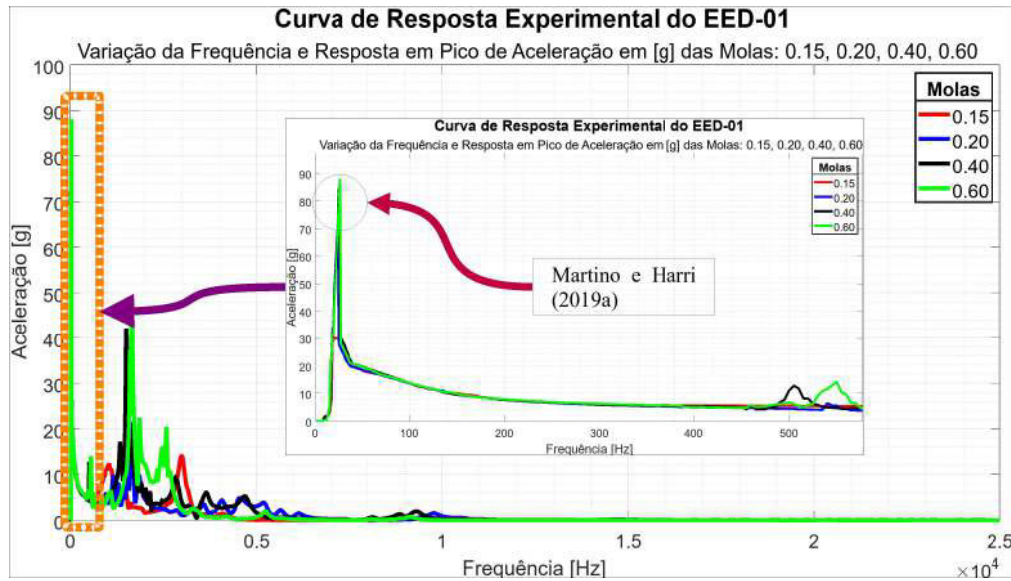
A ampliação dentro do Gráfico 4 revela o comportamento constante decrescente que ocorre nos quatro experimentos após o pico em aceleração. Observa-se o decaimento amortecido sem apresentar ressonâncias entre 40 Hz a 600 Hz.

Nessa faixa de frequência as amplitudes do conjunto dinâmico se apresentam próximas e estáveis quando se analisa a respostas em g de cada mola.

As curvas de respostas em aceleração das molas mantiveram seus limites de estabilidade entre: 40 Hz a 600 Hz para mola 0,15 mm, 40 Hz até 550 Hz para mola 0,20 mm, 40 Hz até 510 Hz para mola 0,40 mm e 40 Hz até 450 Hz para mola 0,60 mm.

As maiores amplitudes em aceleração se encontram na zona de frequência próxima do início da resposta do amplificador de sinal CL-500. Os pontos de máximo de acordo com o Gráfico 4 aponta essa zona de frequência entre 20 Hz e 40 Hz, o que comprova o limite inferior de excitação do amplificador de acordo com o manual do fabricante. Logo, não apenas essa verificação do ponto de máximo em baixas frequências é significativa, como também a observação da primeira harmônica de maior energia que o sistema indutivo responde de acordo com o CL-500.

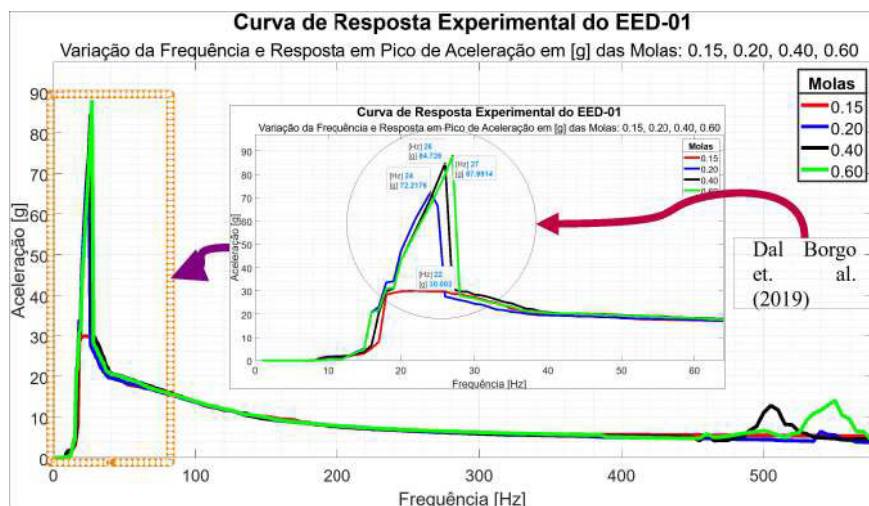
Gráfico 4 – Resposta em aceleração dos quatro sinais associados às molas do EED-01



Fonte: Elaboração própria

O Gráfico 5 apresenta a ampliação da faixa de resposta em frequência que contém os pontos de máximo em amplitude. Esses picos em acelerações vinculadas às molas 0,15 mm, 0,20 mm, 0,40 mm e 0,60 mm apresentam relações proporcionais com as constantes de rigidez elástica das molas de acordo com a Equação 1.2, e valores em ‘g’ de: 30,00; 72,22; 84,73; 87,99 respectivamente. Segundo o estudo de Dal Borgo et. al. (2019), nas maiores acelerações do EED-01 a variação da rigidez elástica do material das molas apresenta o fenômeno de queda abrupta da amplitude em aceleração apresentada no Gráfico 5.

Gráfico 5 - Resposta em aceleração dos quatro picos máximos do EED-01



Fonte: Elaboração própria

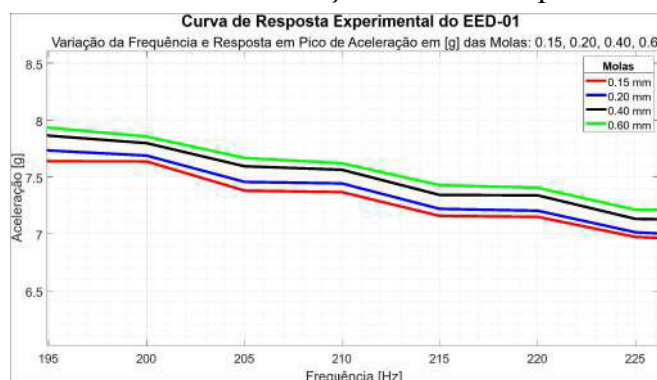
O Gráfico 6 ilustra o padrão de decaimento em amplitude do comportamento vibratório do conjunto dinâmico do EED-01.

Na faixa de frequência entre 195 Hz a 230 Hz observa-se que as respostas das molas 0,60 mm e 0,40 mm estão próximas entre si, bem como as 0,20 mm e 0,15 mm. Esse padrão pode ser observado na investigação das constantes de rigidez elástica das molas apontado no Gráfico 2.

Os valores em aceleração entre as curvas apresentam diferenças apertadas e esse fenômeno esclarece a estabilidade do equipamento em baixas frequências, mesmo com espessuras de molas diferentes.

Na faixa de frequência que o Gráfico 6 apresenta, por exemplo, ressonâncias não foram capturadas. Essa observação é significativa quando as linhas de respostas apresenta decaimento constante, e não apresenta picos ou distorções bruscas. Esse padrão é encontrado abaixo de 1 kHz. De acordo com as respostas de pressão sonora (SPL) em alto-falantes, as respostas do EED-01 na faixa de frequência entre 20 Hz a 1 kHz demonstram pressão sonora maiores que acima de 1 kHz.

Gráfico 6 – Decaimento suave da aceleração durante o experimento com o EED-01



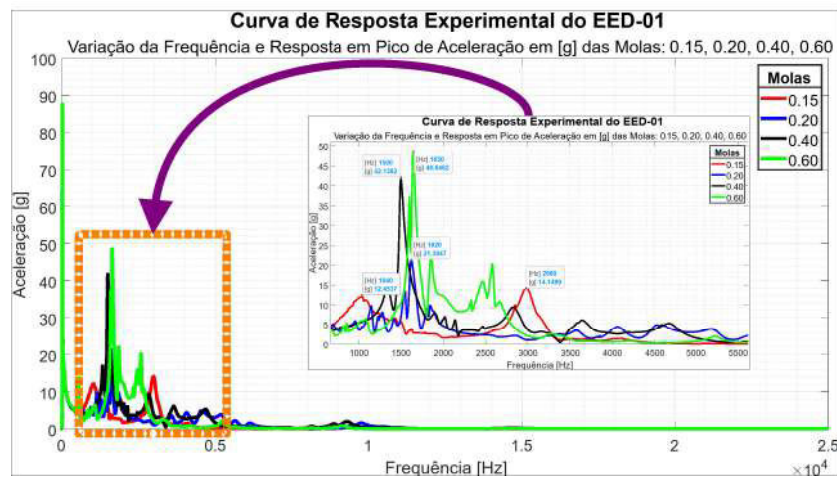
Fonte: Elaboração própria

No Gráfico 7 as curvas de respostas em frequência associada às molas apresentaram dissimilaridades ou pontos de máxima aceleração não equivalentes.

De acordo com Brandt (2019), o EED-01 produziu frequências harmônicas associadas a fundamental. Esse fenômeno pode ser observado pelas respostas em aceleração após 900 Hz até 10 kHz.

Não de outra forma, as variações dos picos harmônicos refletem de igual à proporcionalidade da constante de rigidez elástica de cada mola. Nessa faixa de frequência, o acelerômetro capturou atividades de ressonância observáveis e esvaziamento de sinal de captura após 10 kHz.

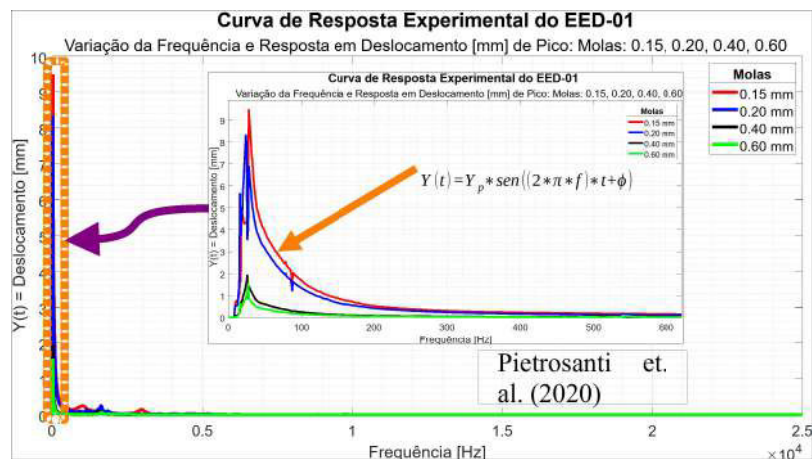
Gráfico 7 – Resposta em aceleração de pico máximo em frequências acima de 900 Hz



Fonte: Elaboração própria

O Gráfico 8 apresenta o comportamento dos picos de máximo deslocamento do conjunto dinâmico. A resposta gráfica foi produzida pelas Equações 3 e 4. O deslocamento demonstra o impacto que o k das molas afeta o movimento do EED-01. As curvas de deflexão das molas indica a relação inversa entre deslocamento e constante elástica. A ilustração aponta a resposta capturada durante os experimentos com o EED-01, e são concordantes com o sistema não linear do amplificador CL-500. A curva detém parcelas de aceleração, frequência angular e período de onda. Os picos de deslocamentos mais significativos foram observados entre 24 Hz a 28 Hz. Segundo Pietrosanti et. al. (2020), a perda de energia vibratória em deslocamento do conjunto dinâmico do EED-01 ocorreu devido a atenuação do sistema massa-mola-amortecedor.

Gráfico 8 - Resposta em deslocamento do conjunto dinâmico do EED-01

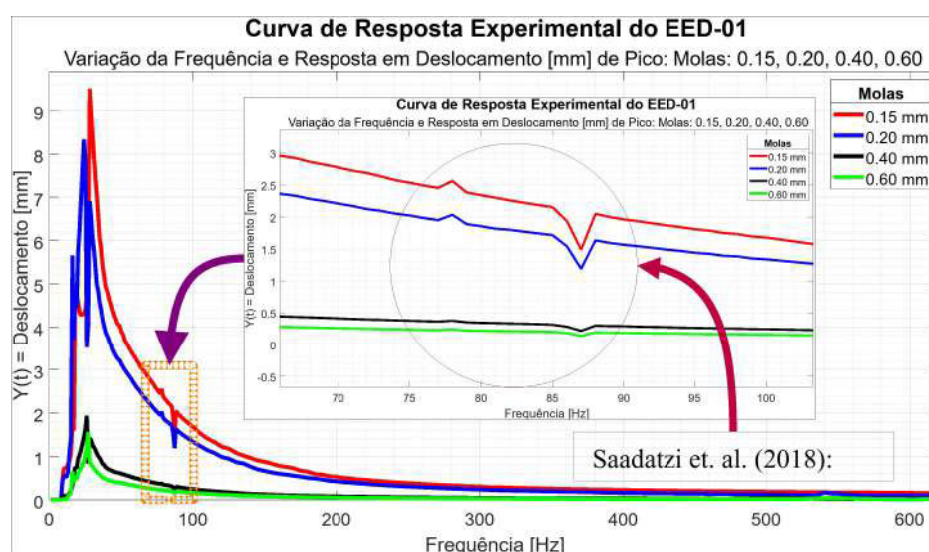


Fonte: Elaboração própria

No Gráfico 9, a ilustração ampliada apresenta respectivamente as proximidades entre as curvas das molas 0,15 mm com a 0,20 mm e 0,40 mm com a 0,60 mm. Esse fenômeno padrão analisado pela FRF nos Gráficos 1 e 6 confirmam, segundo Zhang et. al. (2022), as relações significativas que a constante elástica atua em consonância com a aceleração.

De acordo com Saadatzi et. al. (2018), o deslocamento máximo do conjunto dinâmico apresenta proporcionalidade à tensão capturada pelo acelerômetro, e é observada nas quatro curvas nas mesmas frequências.

Gráfico 9 - Pontos de condução no deslocamento do conjunto dinâmico do EED-01



Fonte: Elaboração própria

O Gráfico 10 apresenta o comportamento do deslocamento do EED-01 após a faixa estável do movimento ondulatório.

A ilustração aponta atividades de microdeslocamentos em médias frequências. O evento estabelece as deflexões das molas durante a captura das frequências harmônicas associadas ao funcionamento do EED-01.

Em conformidade com o experimento de Peter et. al. (2018), as medições dos sinais do EED-01 podem apresentar discrepâncias devido à interferência de ressonância da estrutura.

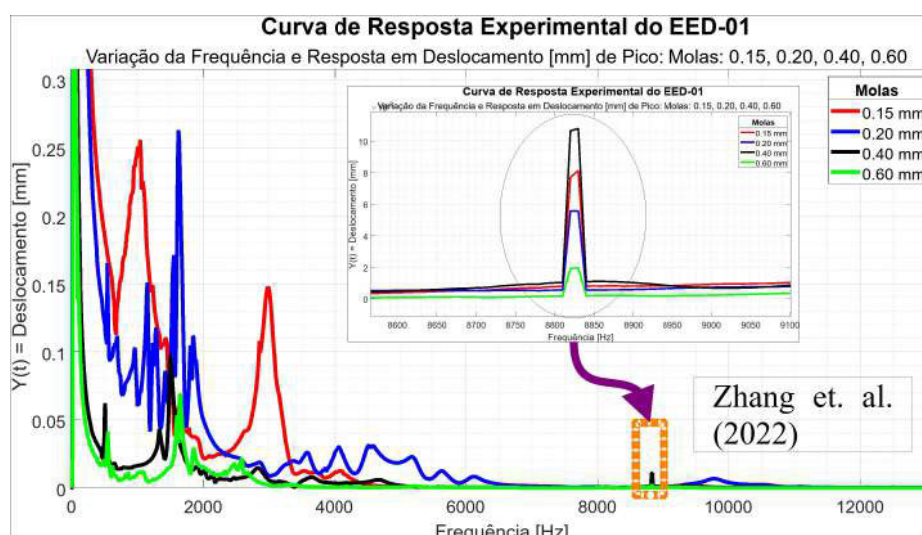
Zhang et. al. (2022) nomeia o fenômeno da ressonância harmônica de '*driving points*', e no Gráfico 10 é observado em algumas faixas de frequência, como, por exemplo, entre 8,80 kHz e 8,85 kHz a ressonância é apontada igualmente nas amplitudes das quatro molas.

A característica do '*driving points*' pode demonstrar o fenômeno de ressonância estrutural ou a manifestação da ressonância à resposta do amplificador, bem como os resultados expostos no Gráfico 9.

O mesmo padrão fenomenológico do '*driving points*' é abordado por Pacini et. al. (2022), que segundo ele, o EED-01 nesses pontos pode apresentar distorções resultantes das frequências harmônicas ativas. Essas distorções são apresentadas em todos os gráficos relacionados a aceleração, deslocamento, força.

Pacini et. al. (2022) também indica que as distorções são aparições de harmônicas no espectro de resposta de acordo com a característica dinâmica do equipamento.

Gráfico 10 – Harmônicos no deslocamento do conjunto dinâmico



Fonte: Elaboração própria

O Gráfico 11 ilustra o comportamento da força no mesmo padrão que a aceleração. As respostas apresentaram valores menores em força que em g.

Segundo Yunus et. al. (2020), a força produzida pela bobina magnética do EED-01 age perpendicularmente ao deslocamento, e apresenta relação entre a massa experimental do conjunto dinâmico com a aceleração do sistema.

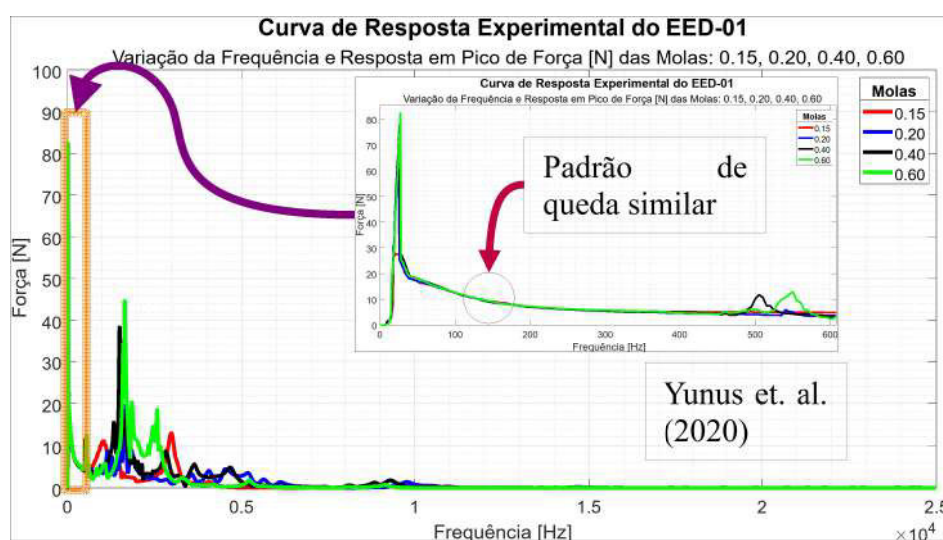
O fenômeno é explicado pela equação da segunda lei de Newton que aponta a relação que a massa menor que um ($m < 1$) reduz a força para uma determinada aceleração. Esse fenômeno é confirmado pela massa do conjunto dinâmico aferida apresentar-se entre 0 e 1 kg.

A ampliação mostra a resposta em força de cada mola em constante amortecimento após seu pico.

As curvas de respostas em força das molas mantiveram seus limites de estabilidade entre: 40 Hz a 600 Hz para mola 0,15 mm, 40 Hz até 550 Hz para mola 0,20 mm, até 40 Hz até 510 Hz para mola 0,40 mm e 40 Hz até 450 Hz para mola 0,60 mm.

As amplitudes de força nas frequências acima de 900 Hz apontam o comportamento das frequências harmônicas associadas a fundamental, é onde se encontram os picos com valores múltiplos da fundamental, e suas energias apresentam decrescimento em relação a energia de excitação.

Gráfico 11 - Resposta de força do EED-01



Fonte: Elaboração própria

O Gráfico 12 apresenta os pontos de máxima força do EED-01 em baixas frequências. Tal como a aceleração, a atuação das molas apontam estabilidade em amplitude de força a partir de 40 Hz.

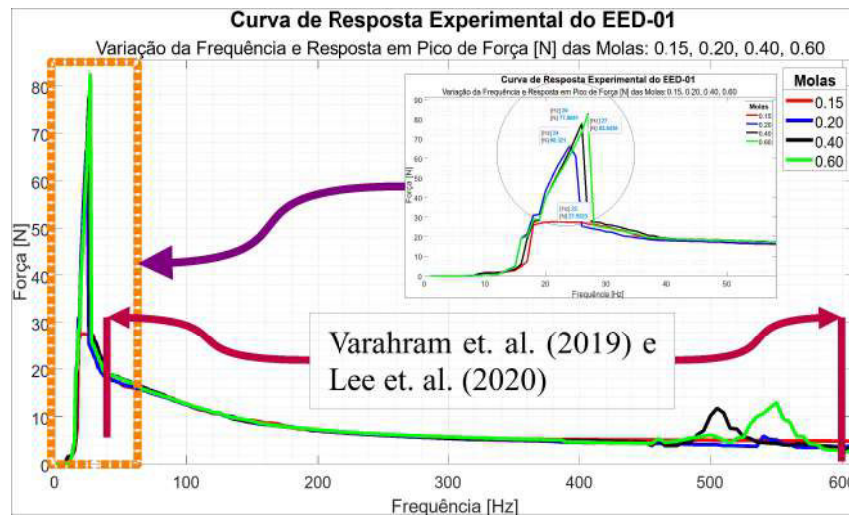
Segundo a teoria da energia mínima de Varahram et. al. (2019), o trabalho desenvolvido pelo conjunto dinâmico amortece proporcionalmente à amplitude de força, e excita os modos de vibração de acordo com a frequência aplicada ou excitada.

Conforme o modelo Thiele-Small abordado por Lee et. al. (2020), o princípio da força de expansão sonora produzido pelo diafragma do alto-falante pode ser associado aos picos de força do conjunto dinâmico do EED-01.

Ainda de acordo com Lee et. al. (2020), as molas do EED-01 apresentam a mesma finalidade em relação ao diafragma dos alto-falantes quando seu carregamento auxilia na dissipação da força produzida pelo conjunto dinâmico, e por isso os valores de picos de força decaem proporcionalmente à constante elástica da mola. Os pontos de máximo pico em amplitude de força

vinculadas às molas 0,15 mm, 0,20 mm, 0,40 mm e 0,60 mm apresentam relações proporcionais com as acelerações e massa do conjunto dinâmico e seus valores em Newtons são: 27,55; 66,32; 77,81; 82,64 respectivamente. Essas respostas em força caracterizam o EED-01 unicamente e exclusivamente com a massa do conjunto dinâmico, ou seja, sem carga adicional.

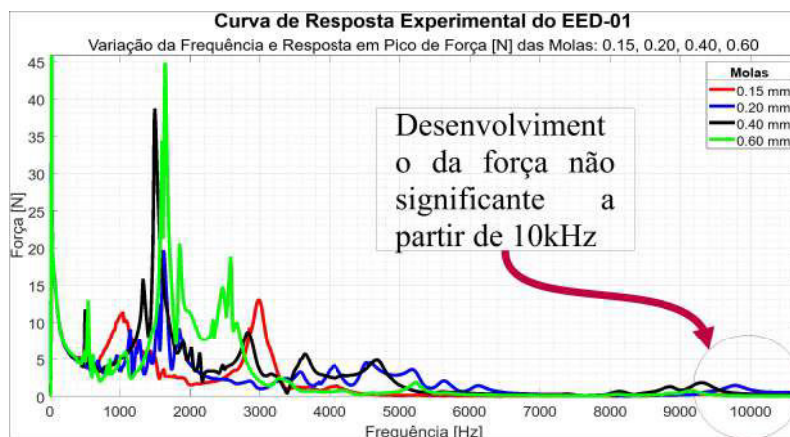
Gráfico 12 - Resposta em pico de força do EED-01



Fonte: Elaboração própria

O Gráfico 13 ilustra as respostas em picos de força nas médias frequências. As curvas apresentam comportamentos de picos harmônicos após 900 Hz. A partir de 10 kHz observa-se a extinção da força. A pressão sonora do conjunto dinâmico do EED-01 nos picos harmônicos em amplitude de força acima de 1.000 Hz são audíveis, mesmo sem possuir dispositivo de diafragma.

Gráfico 13 - Resposta em pico de força do EED-01 acima de 1 kHz



Fonte: Elaboração própria

5.4 DETERMINAÇÃO DAS RESPOSTAS EM FREQUÊNCIA DO AMPLIFICADOR DE SINAIS CL-500 UTILIZADO NO EED-01

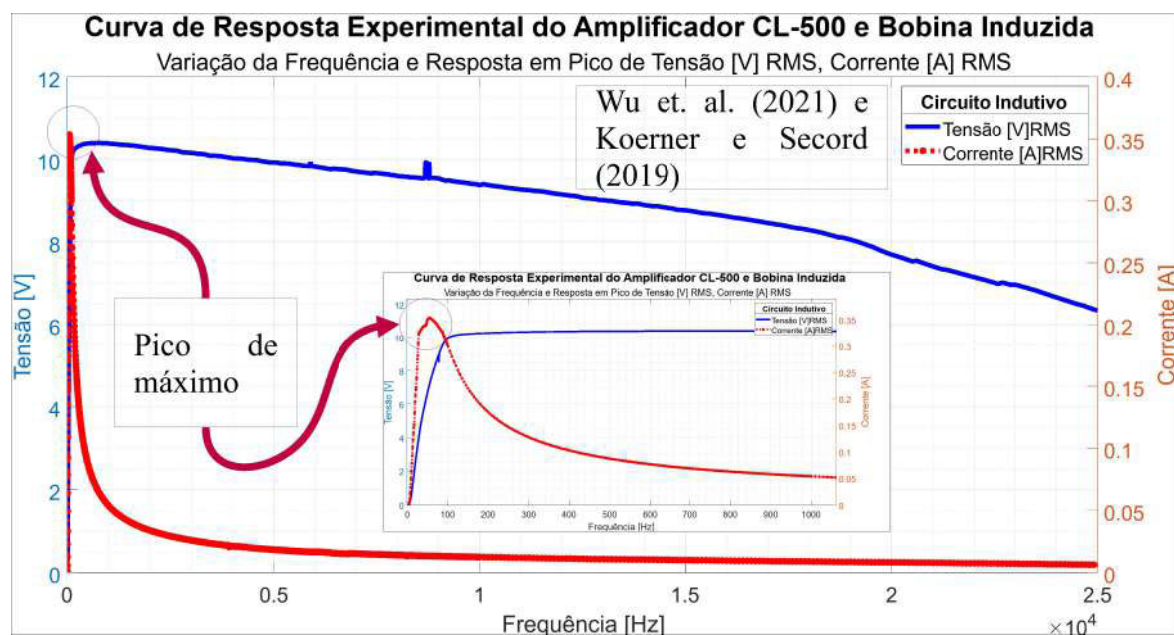
O Gráfico 14 apresenta as respostas em frequências associadas às amplitudes V_{RMS} e I_{RMS} . Os dois sinais demonstram comportamentos não lineares e os picos de máximo são observados.

Entretanto o comportamento da curva de tensão de pico V_{RMS} amortece suavemente em detrimento da curva I_{RMS} como corrente de pico.

Segundo Wu et. al. (2021) e Koerner e Secord (2019), a bobina magnética do EED-01 é excitada pela corrente do circuito indutivo I_{RL} e possui relação inversa com a impedância Z do circuito indutivo.

O experimento seguiu o critério da variação da frequência de excitação como base de estudo nos experimentos do projeto do EED-01.

Gráfico 14 – Curva de reposta em frequência do amplificador CL-500



Fonte: Elaboração própria

A não linearidade do sinal é notável na observação da curva de impedância, reatância indutiva e resistividade da bobina magnética.

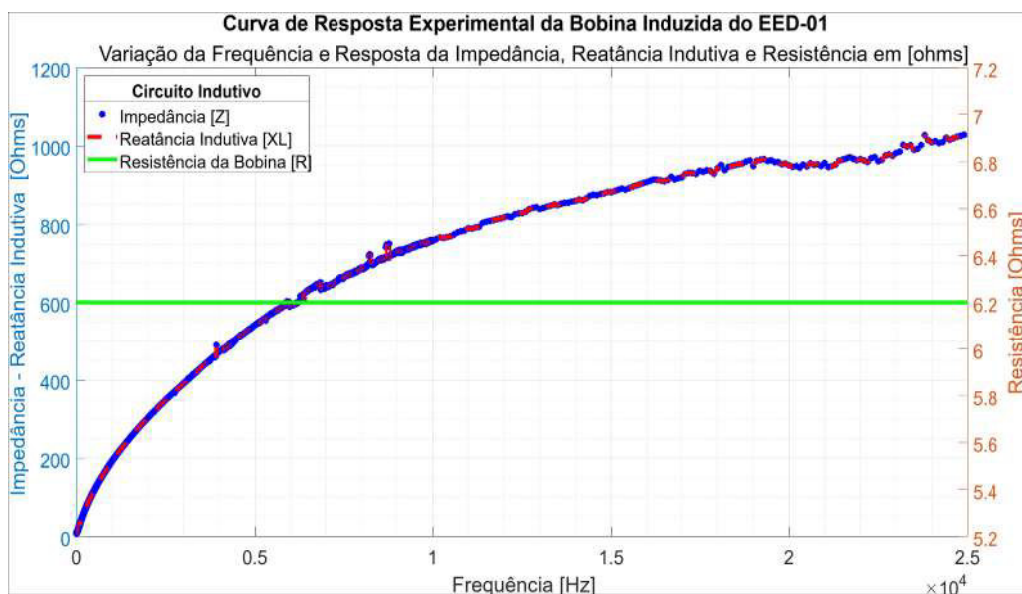
Considerando-se o comportamento dessas três variáveis no Gráfico 15 e que o modelo em série foi aplicado no circuito indutivo, a curva do comportamento da impedância acompanha proporcionalmente a da reatância indutiva, com a resistividade experimental constante.

Logo, enquanto a corrente I_{RL} apresentada no Gráfico 14 cresce até o seu ponto de máximo e decresce a partir dele, a impedância e reatância indutiva demonstram crescimento com tendência logarítmica no Gráfico 15.

Os dados de captura do experimento apresentado expõe as respostas de acordo com a frequência de excitação produzida pelo gerador de funções e entregue ao CL-500.

A impedância do sistema experimentalmente varia no domínio da frequência. A FRF projetada no Gráfico 15 indica a influência direta que a impedância age como resposta à excitação do sistema.

Gráfico 15 - Resposta em frequência da Z , X_L e R do C_{RL}



Fonte: Elaboração própria

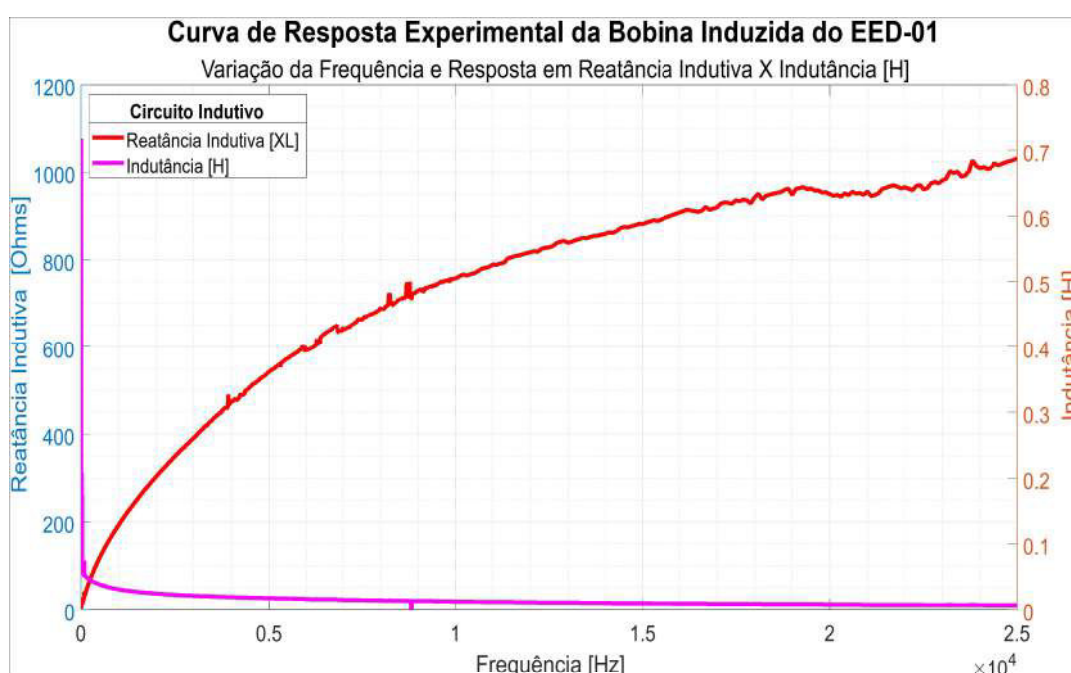
O Gráfico 16 apresenta o comportamento não linear da reatância indutiva e indução dentro da faixa de frequência utilizada no experimento com o EED-01.

De acordo com a Equação 1.7, pode-se observar no Gráfico 16 a relação inversa que a indutância exibe quando há a variação da frequência aplicada.

A curva decrescente da indutância afeta diretamente o fluxo magnético nas linhas do campo magnético na bobina magnética, e conseqüentemente altera a força magnética produzida pela corrente indutiva I_{RL} .

De acordo com King e Agerkvist (2018), a bobina magnética do conjunto dinâmico do EED-01 apresenta fenômenos não lineares e perdas de indutância no circuito indutivo.

Gráfico 16 - Resposta em frequência da reatância indutiva e indutância



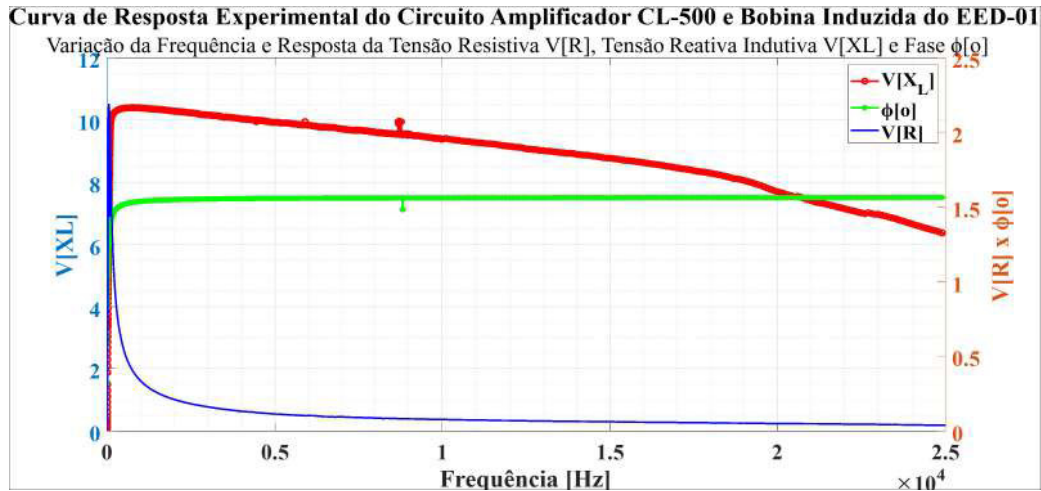
Fonte: Elaboração própria

De acordo com a variação de tensão no circuito exclusivamente indutivo, a resposta a $V[X_L]$ demonstra similaridade com resposta em frequência do amplificador CL-500, de acordo com o Gráfico 17.

A tensão resistiva apresenta comportamento da corrente I_{RL} devido a sua resistividade R experimental constante.

A fase se mantém nos mesmos patamares de crescimento igual ao CL-500, e apresenta respostas em graus ponto a ponto de acordo com as frequências de excitação.

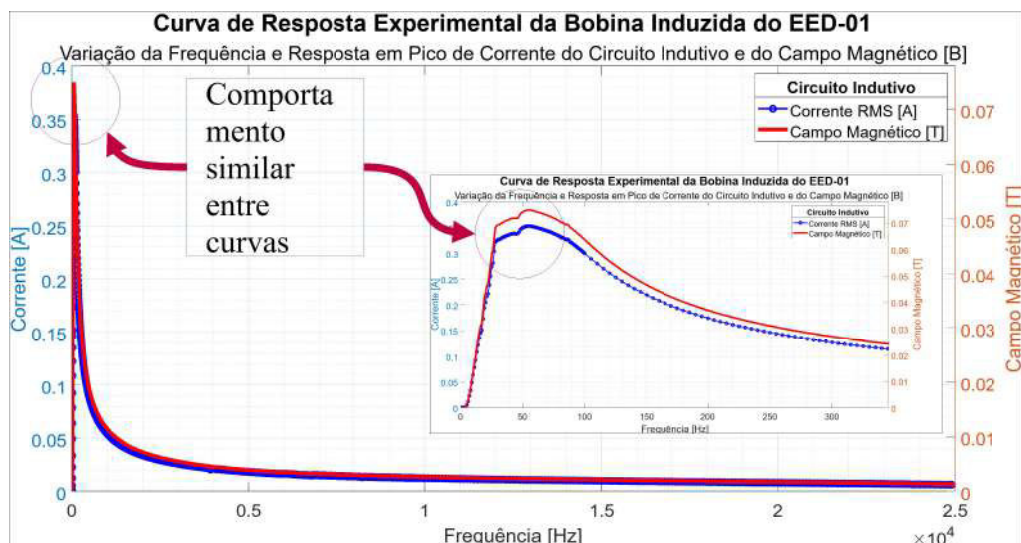
Nessa faixa de frequência entre 1 Hz a 25 kHz resultaram em 1.330 pontos associados as respostas em V_R , V_{XL} e Fase.

Gráfico 17 - Resposta em frequência da V_R , V_{XL} e Fase

Fonte: Elaboração própria

O Gráfico 18 apresenta a proporcionalidade que a corrente I_{RL} possui frente ao comportamento experimental do campo magnético da bobina magnética.

O circuito indutivo não linear do amplificador mais o da bobina magnético do EED-01 proporciona crescimento até seu ponto de máximo, e amortece o sinal de acordo com o aumento da frequência de excitação após esse ponto, o qual pode ser indicado como ponto de máximo consumo energético. De acordo com essa amplitude máxima de corrente, a bobina magnética produz sua maior força sob excitação do sistema elétrico.

Gráfico 18 - Resposta em frequência do campo magnético e corrente I_{RL} na bobina

Fonte: Elaboração própria

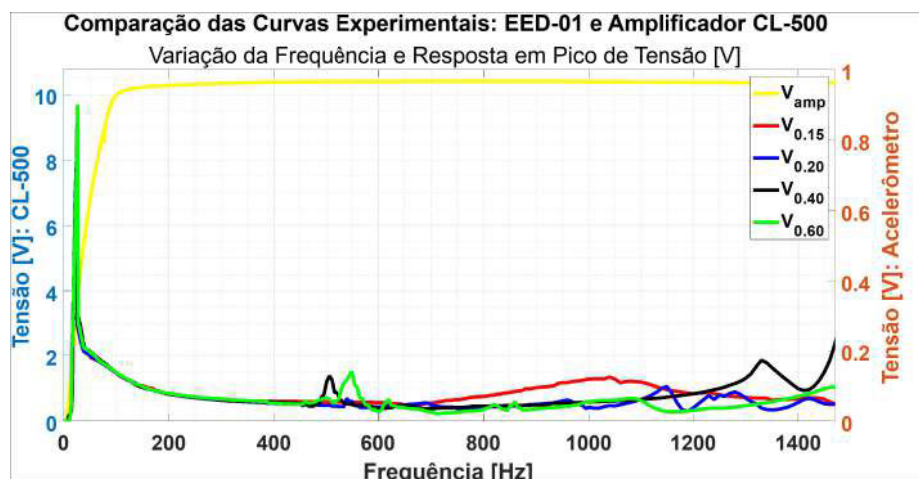
5.5 APRESENTAÇÃO COMPARATIVA DAS RESPOSTAS EM FREQUÊNCIA ENTRE O PROTÓTIPO EED-01 E O AMPLIFICADOR DE POTÊNCIA CL-500

Conforme o estudo de Novak et. al. (2018), o EED-01 apresentou comportamentos não lineares imperfeitos quando se compara as contribuições dos sinais do amplificador CL-500 com a resposta do acelerômetro em tensão elétrica de pico V_{RMS} e tensão elétrica de captura respectivamente, mesmo que o alto nível do sinal de excitação no CL-500 via gerador de função tenha garantido a elegibilidade nas respostas dos dois.

A não linearidade ilustrado no Gráfico 19 garante que a faixa de resposta em frequência do acelerômetro condiz com a tensão de excitação V_{RMS} de saída do CL-500.

Segundo Pasch et. al. (2022) sobre pontos de condução, as respostas do EED-01 em tensão elétrica capturada pelo acelerômetro apresenta grupos modais de vibração. Entretanto, o Gráfico 21 não mostra qual parte da estrutura indica ressonância. Assim, pode-se afirmar que todos os dois sistemas não lineares amortecem de acordo com o aumento da frequência.

Gráfico 19 – Respostas entre o EED-01 e o Amplificador CL-500: (1 Hz – 1,5 kHz)



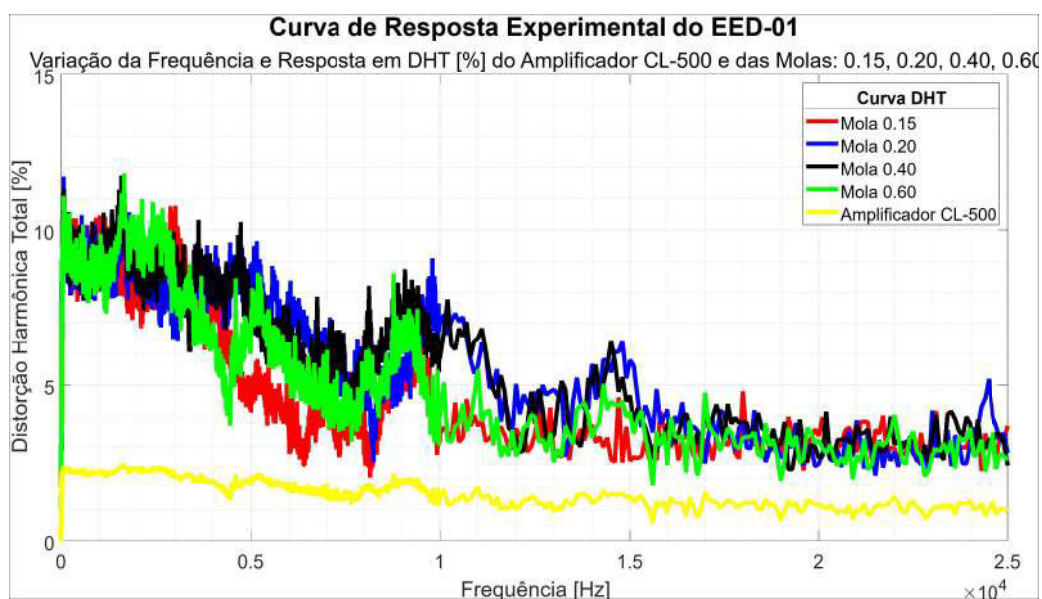
Fonte: Elaboração própria

Contrapondo Novak et. al. (2018) e segundo Anastasio et al. (2019), as respostas do EED-01 apresentaram níveis de distorções mais elevados que o amplificador CL-500. Ou seja, os resultados do Gráfico 20 são regidos pela Equação 1.10, e indica os valores de entrada de sinal na bobina magnética os quais demonstraram menos distorções que os valores de sinal de saída produzidos pelo acelerômetro.

Os fenômenos de distorções não deveriam ocorrer em sistemas não lineares, principalmente nas disposições de vigas bi engastadas com um grau de liberdade no movimento linear.

Entretanto, os aspectos de fixação, imperfeição das presilhas e outras características construtivas podem afetar as respostas em aceleração, força, deslocamento.

Gráfico 20 – Confronto das DHT (%): (1 Hz – 25 kHz)



Fonte: Elaboração própria

O Gráfico 21 indica similaridades de distorções entre as respostas do EED-01 e o CL-500. Apesar da resposta do CL-500 apontar menores distorções que o EED-01, pode-se observar padrões de sinais que a frequência fundamental do CL-500 influencia no comportamento das curvas de respostas do EED-01.

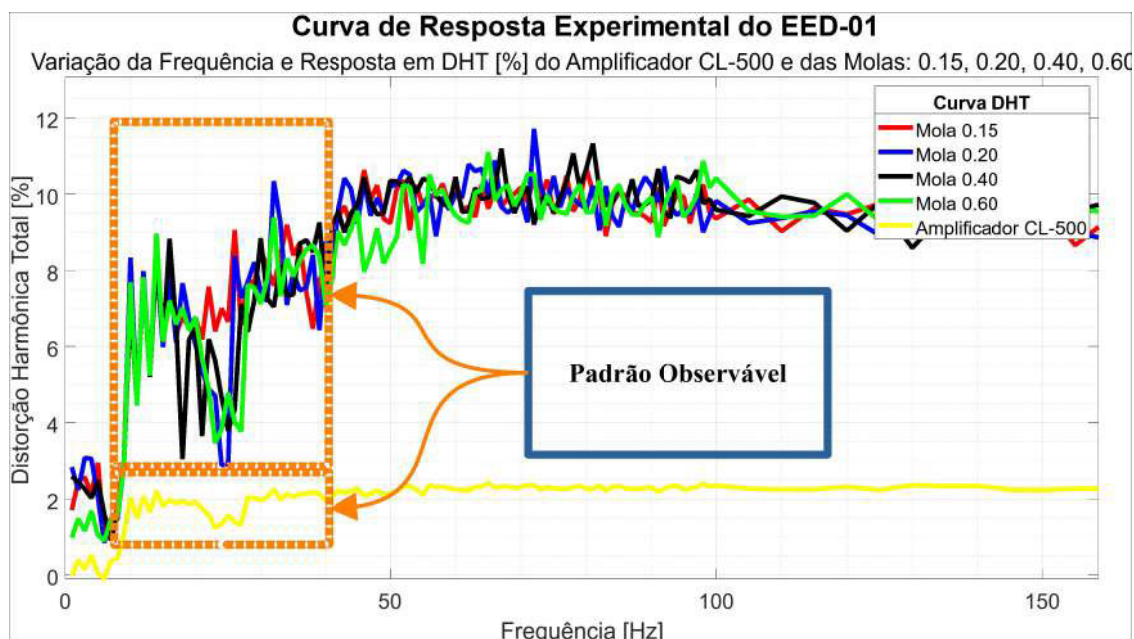
A caracterização por confronto de sinais foi atingida quando se compara esses padrões entre as tensões de saída do amplificador CL-500 e do acelerômetro. A explicação para tal fenômeno está descrito na Equação 1.11 e indica que: para uma dada frequência excitada, a frequência fundamental capturada apresenta resposta em tensão V_{RMS} do amplificador CL-500 proporcional a tensão de saída do acelerômetro acoplado ao EED-01.

A proporcionalidade é característica encontrada nos picos de cada sinal, onde os mesmos indicam não só as maiores energias de excitação na frequência capturada, bem como demonstram as distorções harmônicas de cada experimento.

As distorções harmônicas se encontram mais evidentes na captura da aceleração em torno dos experimentos com as 4 molas.

Entretanto, o amplificador CL-500 acusa distorções apenas em seu sistema elétrico o qual comanda os sinais de excitação do circuito indutivo.

Gráfico 21 – Confronto das DHT (%): (1 Hz – 160 Hz)



Fonte: Elaboração própria

De acordo com Equação 1.12 o estudo experimental relacionado às forças produzidas pelo sistema do EED-01 foi aplicado.

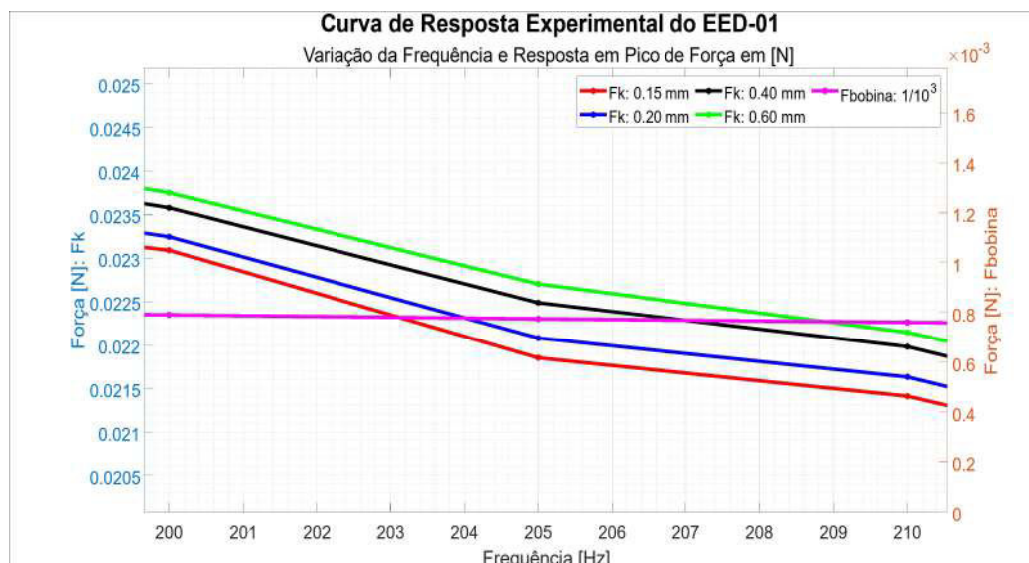
Essa análise na produção das forças apresenta a contribuição de todas as forças envolvidas no movimento ondulatório do equipamento.

No Gráfico 22 são demonstrados os comportamentos da força elástica das molas 0,15 mm, 0,20 mm, 0,40 mm, 0,60 mm de acordo com o carregamento proporcional à deflexão, e a força magnética da bobina produzida pela corrente I_{RL} , campo magnético e indução da bobina magnética.

Na janela ilustrada pelo Gráfico 22, a faixa de frequência entre 195 Hz e 215 Hz do sinal sinusoidal demonstra valores em amplitudes de pico de força elástica e força magnética da bobina extremamente baixos.

Isso demonstra que a contribuição da força de carregamento das molas e de produção de força magnética da bobina não influencia significativamente na força dinâmica a qual rege todo o movimento ondulatório do sistema vibracional do EED-01.

Gráfico 22 - Confronto das respostas da força magnética da bobina e elástica



Fonte: Elaboração própria

O Gráfico 23 apresenta os resultados comparativos entre as forças dinâmicas e força do ímã permanente. Do ponto de vista experimental apenas os dados das forças F_d , F_k e F_b foram capturados. Entretanto, a partir do cálculo da F_i pela Equação 1.12 foi possível determinar a sua contribuição em força transferida à bobina magnética.

Conforme Bai et. al. (2017), o GAP na base magnética polar sul do EED-01 apresenta as linhas de campo magnéticos orientados pelo fluxo magnético entre os dipolos do ímã permanente anelar de ferrite.

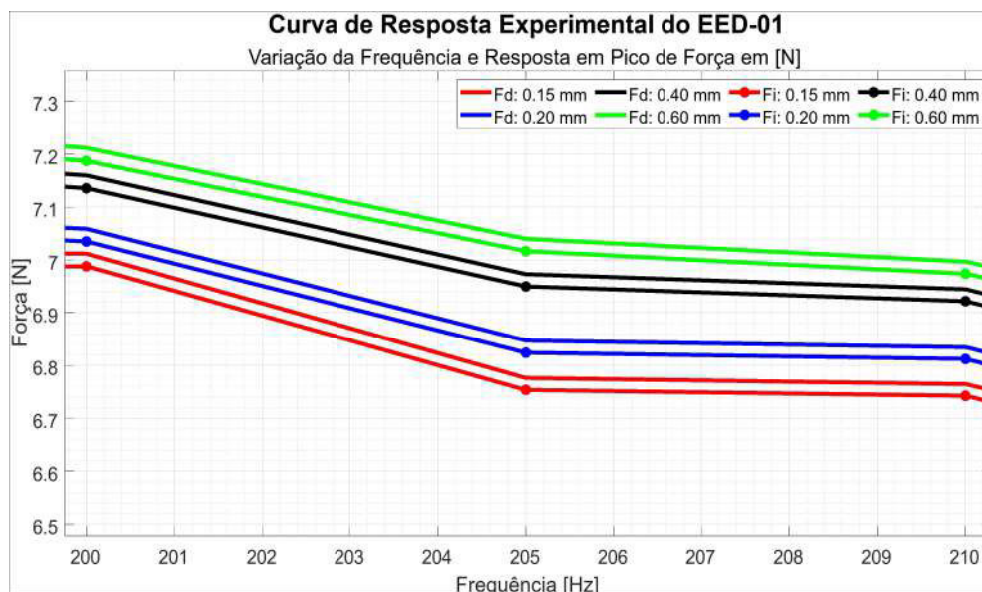
Por outro lado, de acordo com Falaize e Hélie (2020), o campo magnético produzido pela corrente do circuito indutivo da bobina magnética interage com o campo magnético do GAP.

Consoante ao exposto por Li et. al. (2020), a força magnética da bobina varia de acordo com o sinal da corrente do circuito indutivo, bem como está sujeita ao comprimento do GAP. Esse entrelaçamento entre as linhas de campo produzem forças que agem no movimento do conjunto dinâmico do EED-01.

A contribuição em força produzida pela orientação das linhas de campo do ímã permanente anelar de ferrite no GAP assume por demonstração experimental a parcela mais significativa da força dinâmica.

Esse estudo apresentado nos Gráficos 22 e 23 endossa o argumento que no sistema de vibração forçada do EED-01, a força magnética do ímã permanente é a parcela mais significativa na interação com a força magnética da bobina induzida junto com a força elástica das molas.

Gráfico 23 - Confronto das respostas da força dinâmica e força do ímã



Fonte: Elaboração própria

De acordo com os resultados acima apresentados e demonstrados nos gráficos de respostas em frequência do protótipo EED-01, e considerando as observações experimentais, o equipamento desenvolve respostas amortecidas estáveis em aceleração, força, deslocamento e velocidade entre as faixas de: 40 Hz a 600 Hz para mola 0,15 mm, 40 Hz até 550 Hz para mola 0,20 mm, 40 Hz até 510 Hz para mola 0,40 mm e 40 Hz até 450 Hz para mola 0,60 mm.

As constantes de rigidez elástica das molas produziram respostas em deslocamentos observáveis em baixas frequências. No que diz respeito às capturas do sistema mecânico ondulatório o dispositivo apresentou estabilidade em baixas frequências, e as amplitudes após essas frequências exibem comportamentos harmônicos e distorções não lineares.

No que se refere ao circuito indutivo, o amplificador demonstrou estabilidade nos sinais de resposta em tensão V_{RMS} e corrente I_{RMS} mesmo com nível de excitação sinusoidal máxima pelo gerador de funções. As impedâncias, reatâncias e resistividade apresentaram resultados não lineares condizentes com o circuito indutivo.

As respostas entre indução e reatância indutiva demonstraram comportamento inversamente proporcional o que confirma os fenômenos dos circuitos de corrente alternada.

O campo magnético experimental da bobina magnética apontou comportamento similar a corrente I_{RL} . A tensão elétrica de saída do acelerômetro em contrapondo a tensão V_{RMS} do CL-500 indicaram concordância no que concerne a energia disponibilizada pelo sistema de vibração forçada do EED-01.

A equiparação entre as distorções das amplitudes em tensões capturadas pelo acelerômetro por mola em relação as distorções do CL-500 revelou que o padrão de excitação das frequências fundamentais do EED-01 são iguais ao do amplificador.

Por fim, o estudo da F_i contribuiu no entendimento do mecanismo de emaranhamento entre os campos magnéticos do ímã permanente anelar de ferrite e bobina magnética.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados do trabalho atendeu o objetivo geral proposto pelo estudo de forma direta e conclusiva. Os tópicos dos objetivos específicos foram sequenciados na metodologia e resultados. O conhecimento pesquisado e elencado na revisão bibliográfica foram aplicados no desenvolvimento do protótipo, na metodologia e sustentou as bases interpretativas dos resultados nos modelos de resposta em frequência entre as faixas de 1 Hz a 25 kHz.

As peças dos subconjuntos utilizados na montagem do protótipo EED-01 foram fabricadas por usinagem convencional. Esse processo de fabricação elevou o nível de detalhamento e qualidade de cada peça. A montagem final pode entregar um produto de precisão significativa onde as folgas foram exaustivamente retiradas. As fixações por aparafusamento não sofreram folgas durante os experimentos devido às arruelas de pressão devidamente escolhidas.

Na obtenção das respostas em amplitude do EED-01 foi aplicado variação de frequência em conjunto com sinal sinusoidal em amplitude de 10 Vpp máxima pelo gerador de funções. A captura de sinais foi exaustiva e o processamento de sinal apresentou tratamento nas seguintes frequências: 1 Hz a 100 Hz com incremento de 1 Hz; 105 Hz a 1.000 Hz com incremento de 5 Hz; 1.010 Hz a 10.000 Hz com incremento de 10 Hz; 10.100 Hz a 25.000 Hz com incremento de 100 Hz totalizando 1330 pontos associados a cada experimento.

Nos estudos futuros recomenda-se utilizar o EED-01 agregado ao amplificador CL-500 na faixa de frequência estável de acordo com as seguintes especificações: 40 Hz a 600 Hz para mola 0,15 mm, 40 Hz até 550 Hz para mola 0,20 mm, 40 Hz até 510 Hz para mola 0,40 mm e 40 Hz até 450 Hz para mola 0,60 mm. O outro ponto importante seria aplicar métodos de controle em malha fechada com retroalimentação ou lógica FUZZY com o intuito de comandar o movimento ondulatório do EED-01 remotamente.

O estudo contribui na pesquisa científica em vibrações mecânicas, desenvolvimento e aplicabilidade nos processos de caracterização de equipamentos de ensaios dinâmicos. A possibilidade da utilização do EED-01 em experimentos com ligas de memória de forma é factível do ponto de vista operacional e construtivo. Nessa perspectiva funcional, entende-se que em trabalhos futuros as LMFs podem ser aplicadas diretamente no sistema de molas planas do EED-01, bem como indiretamente atrelada ao conjunto dinâmico. Entendendo que, a área de vibrações mecânicas se desenvolve dentro de conceitos dogmáticos nas engenharias, o processo de construção do conhecimento se estabelece solidamente quando se o prova pelo contraditório ou similaridade.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABDOUNUR, Oscar João; DE CAMPOS, Glauco Aparecido. **Tradução do Texto “Réflexions et Eclaircissements sur les Nouvelles Vibrations des Cordes Exposées dans les Mémoires de L’Académie de 1747 & 1748”, de Daniel Bernoulli.** Revista Brasileira de História da Matemática, v. 21, n. 42, p. 229-274, 2021.
2. AL-OBAIDI, Ahmed Ramadhan. **Detection of cavitation phenomenon within a centrifugal pump based on vibration analysis technique in both time and frequency domains.** Experimental Techniques, v. 44, n. 3, p. 329-347, 2020.
3. ALBERTAZZI, A.; SOUSA, A. R. **Fundamentos de metrologia científica e industrial.** 1^a Ed. Barueri: Editora Barueri, 2008. 475p.
4. ANASTASIO, Dario et al. **Experimental identification of distributed nonlinearities in the modal domain.** Journal of Sound and Vibration, v. 458, p. 426-444, 2019.
5. ANDRZEJEWSKI, Jacek et al. **The Influence of the Hybridization Process on the Mechanical and Thermal Properties of Polyoxymethylene (POM) Composites with the Use of a Novel Sustainable Reinforcing System Based on Biocarbon and Basalt Fiber (BC/BF).** Materials, v. 13, n. 16, p. 3496, 2020.
6. AVVISATI, Giulia et al. **Ferromagnetic and antiferromagnetic coupling of spin molecular interfaces with high thermal stability.** Nano letters, v. 18, n. 4, p. 2268-2273, 2018.
7. BAI, Yang et al. **Stability improvement for coil position locking of joule balance.** Metrologia, v. 54, n. 4, p. 461, 2017.
8. BERTERO, Enrico et al. **Electrodeposition of amorphous Fe-Cr-Ni stainless steel alloy with high corrosion resistance, low cytotoxicity and soft magnetic properties.** Surface and Coatings Technology, v. 349, p. 745-751, 2018.
9. BRANDT, Anders. **A signal processing framework for operational modal analysis in time and frequency domain.** Mechanical Systems and Signal Processing, v. 115, p. 380-393, 2019.
10. BRÜEL & KJÆR, Sound & Vibration Measurement. **Piezoelectric CCLD Accelerometer Type 4507-b-004**, Ano: 2022. Disponível em:
<https://www.bksv.com/en/transducers/vibration/accelerometers/cclld-iepe/4507-b-004>. Acesso em: 30/01/2022a.

11. BRÜEL & KJÆR, Sound & Vibration Measurement. **Mini-Shaker Type 4810**, Ano: 2022. Disponível em: <<https://www.bksv.com/en/instruments/vibration-testing-equipment/measurement-exciters/mini-shaker-type-4810>>. Acesso em: 30/01/2022b.
12. CAHAYA, Adam Badra. **Paramagnetic and diamagnetic susceptibility of infinite quantum well**. Journal of Materials Science, Geophysics, Instrumentation and Theoretical Physics, v. 3, p. 61-67, 2020.
13. CHI, Ronghu et al. **Discrete-time extended state observer-based model-free adaptive control via local dynamic linearization**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 67, n. 10, p. 8691-8701, 2019.
14. CHIPMAN, Jill A.; BERRY, John F. **Paramagnetic metal-metal bonded heterometallic complexes**. Chemical Reviews, v. 120, n. 5, p. 2409-2447, 2020.
15. CZARNECKA-KOMOROWSKA, Dorota; STERZYNSKI, Tomasz. **Effect of polyhedral oligomeric silsesquioxane on the melting, structure, and mechanical behavior of polyoxymethylene**. Polymers, v. 10, n. 2, p. 203, 2018.
16. CHIRIKOV, Victor Alexeevich; DIMITROV, Diyan Minkov; BOYADJIEV, Yordan Simeonov. **Determination of the dynamic Young's modulus and Poisson's ratio based on higher frequencies of beam transverse vibration**. Procedia Manufacturing, v. 46, p. 87-94, 2020.
17. DAL BORGIO, Mattia; TEHRANI, Maryam Ghandchi; ELLIOTT, Stephen John. **Identification and analysis of nonlinear dynamics of inertial actuators**. Mechanical Systems and Signal Processing, v. 115, p. 338-360, 2019.
18. DE OLIVEIRA, Amanda Rossi et al. **Investigation of the build orientation effect on magnetic properties and Barkhausen Noise of additively manufactured maraging steel 300**. Additive Manufacturing, v. 38, p. 101827, 2021.
19. DUCHARNE, Benjamin; ZHANG, B.; SEBALD, G. **Fractional derivative resolution of the anomalous magnetic field diffusion through a ferromagnetic steel rod: Application to eddy current testing**. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, v. 103, p. 105953, 2021.
20. ELISHAKOFF, Isaac. **JP Den Hartog about SP Timoshenko: Fifty Years Later**. Mathematics and Mechanics of Solids, v. 24, n. 5, p. 1340-1348, 2019.
21. ELLIOTT, Victoria. **Thinking about the coding process in qualitative data analysis**. The Qualitative Report, v. 23, n. 11, p. 2850-2861, 2018.

22. FALAIZE, Antoine; HÉLIE, Thomas. **Passive modelling of the electrodynamic loudspeaker: from the Thiele–Small model to nonlinear port-Hamiltonian systems**. *Acta Acustica*, v. 4, n. 1, p. 1, 2020.
23. FARSHBAF ZINATI, Rana; REZAEE, Mousa; LOTFAN, Saeed. **Nonlinear vibration and stability analysis of viscoelastic rayleigh beams axially moving on a flexible intermediate support**. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, v. 44, n. 4, p. 865-879, 2020.
24. FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Edgard Blucher, 1970. 751p.
25. GAO, QiuHua et al. **Magnetic levitation using diamagnetism: Mechanism, applications and prospects**. *Science China Technological Sciences*, v. 64, n. 1, p. 44-58, 2021.
26. GARDNER, J. **Cura Vibracional Através dos Chakras: Com Luz, Som, Cor, Cristais e Aromaterapia**. São Paulo: Pensamento, 2012. 272p.
27. GIGIE, Andrew et al. **Novel approach for vibration detection using indented radar**. *Progress In Electromagnetics Research C*, v. 87, p. 147-162, 2018.
28. GOPKALO, Oleksii et al. **Damage evaluation for AISI 304 steel under cyclic loading based on coercive force measurements**. *International Journal of Fatigue*, v. 139, p. 105752, 2020.
29. ISLAM, Khayrul; SAHA, Sourav; MASUD, A. K. M. **Molecular dynamics simulation of the mechanical properties of CNT-polyoxymethylene composite with a reactive forcefield**. *Molecular Simulation*, v. 46, n. 5, p. 380-387, 2020.
30. ISOLA, Stefano. **On the relationships between ancient exact science and musical acoustics**. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, v. 32, n. 4, p. 817-839, 2021.
31. IZZO, Alessio et al. **Loudspeaker analysis: A radar based approach**. *IEEE Sensors Journal*, v. 20, n. 3, p. 1223-1237, 2019.
32. JACOB, Kiran et al. **Active Vibration Damping and Control using SMA Foil-based Devices**. In: *ACTUATOR; International Conference and Exhibition on New Actuator Systems and Applications 2021*. VDE, 2021. p. 1-4.
33. JÁUREGUI, Juan C. et al. **Frequency and time-frequency analysis of cutting force and vibration signals for tool condition monitoring**. *IEEE access*, v. 6, p. 6400-6410, 2018.
34. KAUR, Harpreet et al. **Structural, thermal and magnetic investigations of cobalt ferrite doped with Zn²⁺ and Cd²⁺ synthesized by auto combustion method**. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 474, p. 505-511, 2019.

35. KHEIRATI, Afarin; GOLROO, Amir. **Low-cost infrared-based pavement roughness data acquisition for low volume roads**. Automation in construction, v. 119, p. 103363, 2020.
36. KIM, Sung-Il et al. **Magnetization Analysis for Outer Rotor Brushless DC Motors Using Polar Anisotropic Ferrite Ring Magnets**. Journal of Electrical Engineering & Technology, v. 15, n. 3, p. 1189-1194, 2020.
37. KING, Alexander; AGERKVIST, Finn. **Fractional derivative loudspeaker models for nonlinear suspensions and voice coils**. Journal of the Audio Engineering Society, v. 66, n. 7/8, p. 525-536, 2018.
38. KLIPPEL, Wolfgang. **Loudspeaker and headphone design approaches enabled by adaptive nonlinear control**. Journal of the Audio Engineering Society, v. 68, n. 6, p. 454-464, 2020.
39. KOELEWIJN, Patrick JW; TÓTH, Roland. **Incremental Stability and Performance Analysis of Discrete-Time Nonlinear Systems using the LPV Framework**. IFAC-PapersOnLine, v. 54, n. 8, p. 75-82, 2021.
40. KOERNER, Lucas J.; SECORD, Thomas W. **An embedded electrical impedance analyzer based on the AD5933 for the determination of voice coil motor mechanical properties**. Sensors and Actuators A: Physical, v. 295, p. 99-112, 2019.
41. LEE, Sungtae et al. **Improved sound quality by using the exciter speaker in OLED panel**. Journal of the Society for Information Display, v. 28, n. 3, p. 297-307, 2020.
42. LI, Fangfang; LI, Xiaojun; WANG, Juke. **Effects of Interaction between Dual Shaking Tables and Specimen and Force Feedback Compensation Control**, Shock and Vibration, vol. 2018. Article ID 6795763, 12 p, 2018.
43. LI, Ping; XU, Nuo; GAO, Chunhui. **Design and experimental study of broadband hybrid energy harvester with frequency-up conversion and nonlinear magnetic force**. Microsystem Technologies, v. 26, n. 5, p. 1707-1716, 2020.
44. LI, Rui et al. **Temperature stability of coercivity in mischmetal-Fe-Co-B melt-spun ribbons**. Materials Research Express, v. 5, n. 5, p. 056101, 2018.
45. LI, Wangchang et al. **Magnetic properties and related mechanisms of iron-based soft magnetic composites with high thermal stability in situ composite-ferrite coating**. Journal of Alloys and Compounds, v. 829, p. 154533, 2020.
46. LIU, Lanbing et al. **Design and additive manufacturing of multipermeability magnetic cores**. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 54, n. 4, p. 3541-3547, 2018.

47. MACHADO, Marcela Rodrigues; APPERT, A.; KHALIJ, Leila. **Spectral formulated modelling of an electrodynamic shaker**. Mechanics Research Communications, v. 97, p. 70-78, 2019.
48. MANFÉ, G.; POZZA, R.; SCARATO, G. **Desenho Técnico Mecânico**, vs.1,2,3. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.
49. MARINCA, Vasile; HERISANU, Nicolae; MARINCA, Bogdan. **Oscillations of a Pendulum Wrapping on Two Cylinders**. In: **Optimal Auxiliary Functions Method for Nonlinear Dynamical Systems**. Springer, Cham, 2021. p. 41-61.
50. MARTINO, Jonathan; HARRI, Kristof. **Virtual shaker modeling and simulation, parameters estimation of a high damped electrodynamic shaker**. International Journal of Mechanical Sciences, v. 151, p. 375-384, 2019.[a].
51. MARTINO, Jonathan; HARRI, Kristof. **Two-port modeling and simulation of an electrodynamic shaker for virtual shaker testing applications**. Journal of Sound and Vibration, v. 460, p. 114835, 2019 [b].
52. MAYES, Randy et al. **Optimization of shaker locations for multiple shaker environmental testing**. Experimental Techniques, v. 44, n. 3, p. 283-297, 2020.
53. MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES; **Estratégia Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação 2016 2022**. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC), BRASIL, 2016. Disponível em: <http://www.finep.gov.br/images/a-finep/Politica/16_03_2018_Estrategia_Nacional_de_Ciencia_Tecnologia_e_Inovacao_2016_2022.pdf>. Acesso em: 07/01/2022.
54. MOSTAGHIMI, Hamid et al. **Reconstruction of cutting forces through fusion of accelerometer and spindle current signals**. Journal of Manufacturing Processes, v. 68, p. 990-1003, 2021.
55. MOZETIC, H. J. **Design de produto: seleção de materiais e processos com aplicação de campo magnético em núcleos de alto-falantes**. Dissertação. (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais). UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.
56. MUNFORD, P.; NORMAND, P. **Mastering Autodesk Inventor 2016 and Autodesk Inventor LT 2016: Autodesk Official Press**. Indianápolis: John Wiley & Sons, 2015. 1080p.
57. NERI, Paolo. **Excitation device for high frequency vibration analysis: design and test results**. Journal of Vibration and Control, v. 24, n. 19, p. 4620-4629, 2018.

58. NEWELL, D. B. et al. **The possible contribution of gravity measurements to the difference between the NIST and NRC watt balance results.** *Metrologia*, v. 50, n. 4, p. 337, 2013.
59. NOVAK, Antonin; SIMON, Laurent; LOTTON, Pierrick. **A simple predistortion technique for suppression of nonlinear effects in periodic signals generated by nonlinear transducers.** *Journal of Sound and Vibration*, v. 420, p. 104-113, 2018.
60. NUR'AIDHA, Amalia C.; SANTOSO, Didik R.; MARYANTO, Sukir. **Development of Seismic Data Acquisition Based on MEMS Accelerometer MMA7361L.** *International Journal of Applied Engineering Research*, v. 13, n. 10, p. 7926-7931, 2018.
61. OSACI, Mihaela; CUNȚAN, Corina Daniela. **Graphical programming environment for performing physical experiments.** *Int. J. Mod. Educ. Comput. Sci.(IJMECS)*, v. 12, n. 1, p. 11-17, 2020.
62. OUYANG, Gaoyuan et al. **Review of Fe-6.5 wt% Si high silicon steel—A promising soft magnetic material for sub-kHz application.** *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 481, p. 234-250, 2019.
63. PACINI, Benjamin R.; KUETHER, Robert J.; ROETTGEN, Daniel R. **Shaker-structure interaction modeling and analysis for nonlinear force appropriation testing.** *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 162, p. 108000, 2022.
64. PANDEY, Banarsi; JHA, Binit Kumar; MAHTO, Sachindra. **Online Tool Wear Monitoring Using Low-Cost Data Acquisition System and LabVIEW™ Program.** In: *Modeling, Simulation and Optimization*. Springer, Singapore, 2021. p. 87-99.
65. PANG, Yu et al. **Design and implementation of automatic fault diagnosis system for wind turbine.** *Computers & Electrical Engineering*, v. 87, p. 106754, 2020.
66. PARK, Ki-Hong; JIANG, Zhi-Xiong; HWANG, Sang-Moon. **Design and Analysis of a Novel Microspeaker with Enhanced Low-Frequency SPL and Size Reduction.** *Applied Sciences*, v. 10, n. 24, p. 8902, 2020.
67. PASCH, Gerwin et al. **Enhanced method for optimum driving point identification for modal testing.** *Journal of Vibration and Control*, p. 10775463211064699, 2022.
68. PEREIRA, J.; BANHA, C.; CUNHA, M.; BARREIROS, J. **An Accurate and Flexible Pneumatic Generator for NNS Stimulation Tests.** In: *IEEE URUCON 2021*. Montevideo: IEEE, 2021. p. 205-208.
69. PETER, Simon et al. **Synthesis of nonlinear frequency responses with experimentally extracted nonlinear modes.** *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 101, p. 498-515, 2018.

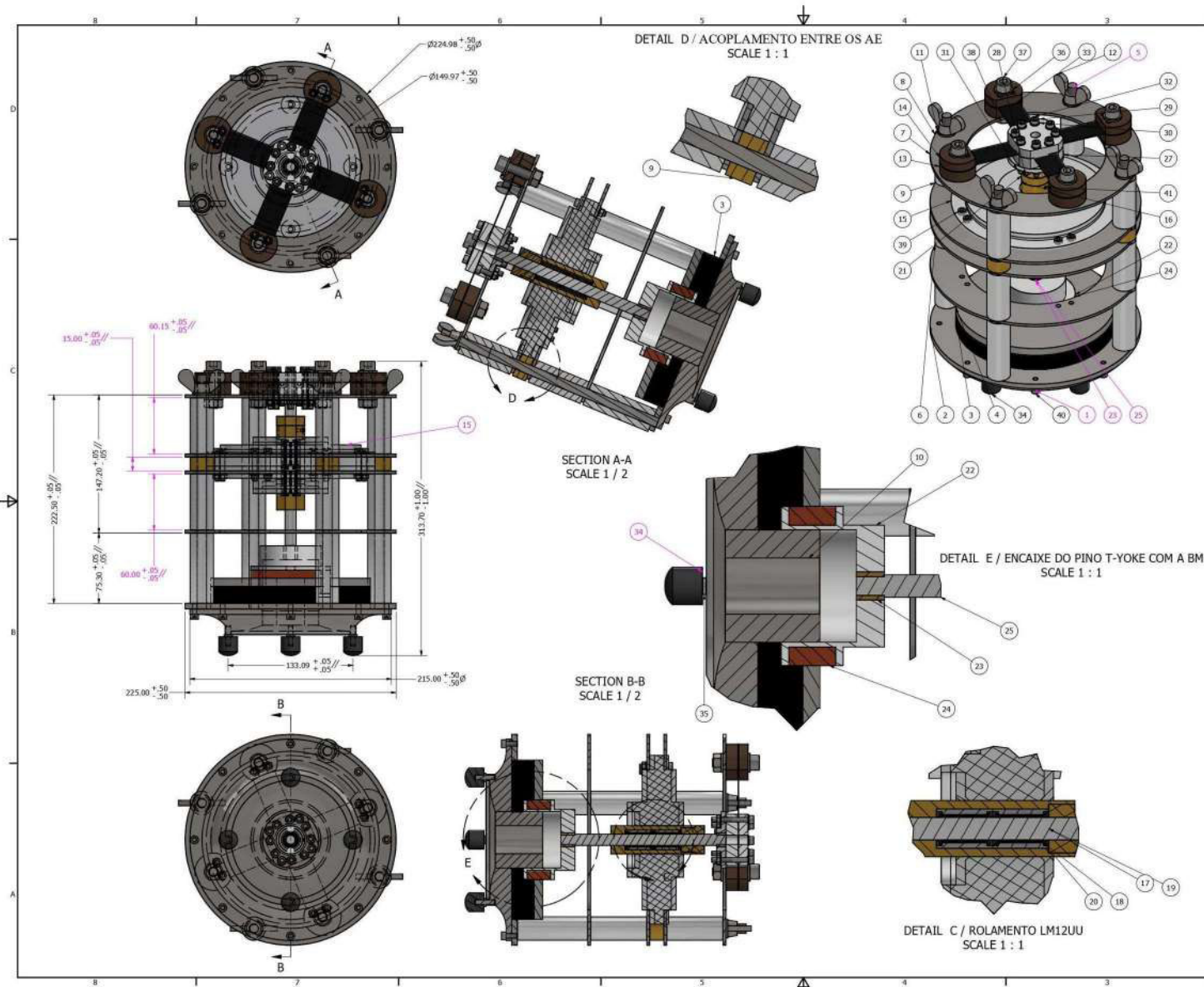
70. PICCIRILLO, Vinícius. **Improving the dynamic integrity of a non-ideal oscillator via linear vibration absorber**. The European Physical Journal Special Topics, v. 230, n. 18, p. 3493-3499, 2021.
71. PIERCE, Allan D. **Analytical Interpretation of the Early Literature on the Theory of Vibrations**. Journal of Theoretical and Computational Acoustics, v. 29, n. 01, p. 2130001, 2021.
72. PIETROSANTI, Daniele; DE ANGELIS, Maurizio; GIARALIS, Agathoklis. **Experimental study and numerical modeling of nonlinear dynamic response of SDOF system equipped with tuned mass damper inerter (TMDI) tested on shaking table under harmonic excitation**. International Journal of Mechanical Sciences, v. 184, p. 105762, 2020.
73. QIU, Xuepeng et al. **Characterization and manipulation of spin orbit torque in magnetic heterostructures**. Advanced Materials, v. 30, n. 17, p. 1705699, 2018.
74. RADAC, Mircea-Bogdan; LALA, Timotei. **Robust control of unknown observable nonlinear systems solved as a zero-sum game**. IEEE Access, v. 8, p. 214153-214165, 2020.
75. RUSSELL, Jesse; COHN, Ronald; Zhang Heng. Book on Demand Ltd. 176 p. 2012.
76. SAADATZI, Mohammadsadegh et al. **AEVE 3D: Acousto electrodynamic three-dimensional vibration exciter for engineering testing**. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, v. 23, n. 4, p. 1897-1906, 2018.
77. SCACCABAROZZI, Diego et. al. Characterization of the pseudoelastic damping capacity of shape memory alloy wire. In: **2017 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)**. IEEE, 2017. p. 1-5.
78. SCHULTZ, Ryan. **Vibration Test Design with Integrated Shaker Electro-Mechanical Models**. In: **Dynamic Substructures**, Volume 4. Springer, Cham, 2021. p. 63-72.
79. SMITH, Daniel R. et. al. **Magnetohydrodynamic drag force measurements in expansion tunnels using an accelerometer-based force balance**. Experiments in Fluids, v. 60, n. 12, p. 1-15, 2019.
80. SPAGGIARI, A.; COCCONCELLI, M. **Effect of Temperature on the Dynamic Response of Adhesively Mounted Accelerometers**. Experimental Techniques. v. 42. p.299–309, feb. 2018.
81. ŠTEFE, M.; SVETE, A.; KUTIN, J. **Development of a dynamic pressure generator based on a loudspeaker with improved frequency characteristics**. Measurement, v. 122, p. 212-219, 2018.
82. STÉN, Johan C.-E. **Leonhard Euler: Mathematical Genius in the Enlightenment by Ronald S. Calinger**. The Mathematical Intelligencer, v. 40, n. 2, p. 93-97, 2018.

83. SUN, Ruixue et al. **New magnetic rails with double-layer Halbach structure by employing NdFeB and ferrite magnets for HTS maglev.** Journal of Magnetism and Magnetic Materials, v. 445, p. 44-48, 2018.
84. TANG, Jian et al. **Viscoelasticity of rubber springs affects vibration characteristics of a flip-flow screen with the high G value.** IEEE Access, v. 8, p. 26950-26965, 2020.
85. TASHIRO, Kohji; YAMAMOTO, Hiroko; SUGIMOTO, Kuniyoshi. **Study of phase transition and ultimate mechanical properties of orthorhombic polyoxymethylene based on the refined crystal structure.** Polymer, v. 153, p. 474-484, 2018.
86. TORRENT, Marcel; MARTINEZ, Eusebi; PERAT, José I. **Application work using software tools and didactic equipment of electrical machines in electrical engineering studies.** Computer Applications in Engineering Education, v. 28, n. 2, p. 435-443, 2020.
87. VARAHRAM, Sina et al. **Experimental study on the effect of excitation type on the output-only modal analysis results.** Transactions of FAMENA, v. 43, n. 3, p. 37-52, 2019.
88. VIBRATION RESEARCH. **A Method for Shaker Validation**, 2022. Disponível em: <<https://vibrationresearch.com/resources/a-method-for-shaker-validation/>>. Acesso em: 07/01/2022.
89. VILLANUEVA-LÓPEZ, V. et al. **A LabVIEW based virtual instrument system for mid infrared laser spectroscopy measurements.** Journal of Instrumentation, v. 16, n. 05, p. T05005, 2021.
90. WANG, Longfei; WU, Ying; LIU, Zishun. **Theoretical analysis on the adaptive vibration attenuation of a fixed-fixed beam realized by a piezo-shape memory alloy ferrule.** Journal of Intelligent Material Systems and Structures, v. 30, n. 14, p. 2079-2090, 2019.
91. WANG, Xing et al. **Model updating strategy for structures with localised nonlinearities using frequency response measurements.** Mechanical Systems and Signal Processing, v. 100, p. 940-961, 2018.
92. WEI, Yonghui et al. **Magnetic-field tribological behaviors of aluminum-alloy and steel.** AIP Advances, v. 8, n. 11, p. 115014, 2018.
93. WU, Keming et al. **Broadband and extremely low frequency sound isolation by a programmable shunted electromechanical diaphragm with force dipole effect.** International Journal of Mechanical Sciences, v. 200, p. 106447, 2021.
94. YANG, Ximing et al. **Fault estimation and fault tolerant control for discrete-time nonlinear systems with perturbation by a mixed design scheme.** Journal of the Franklin Institute, v. 358, n. 3, p. 1860-1887, 2021.

95. YUAN, Shuo et al. **Research Status Of Dry Friction Behavior Of Metallic Materials: A Brief Review**. Surface Review and Letters, v. 27, n. 12, p. 2030003, 2020.
96. YUNUS, Mohd Amri Md; KHAIRI, Mohd Taufiq Mohd; IBRAHIM, Sallehuddin. **Narrow band vibration measurement system with electrodynamic transducer seismograph and modeling verification**. IEEE Sensors Journal, v. 20, n. 9, p. 4768-4777, 2020.
97. ZHANG, Genbei; ZANG, Chaoping; FRISWELL, Michael I. **Measurement of multivalued response curves of a strongly nonlinear system by exploiting exciter dynamics**. Mechanical Systems and Signal Processing, v. 140, p. 106474, 2020.
98. ZHANG, Guiwei et al. **Influence of flexible structure vibration on the excitation forces delivered by multiple electrodynamic shakers**. Mechanical Systems and Signal Processing, v. 169, p. 108753, 2022.

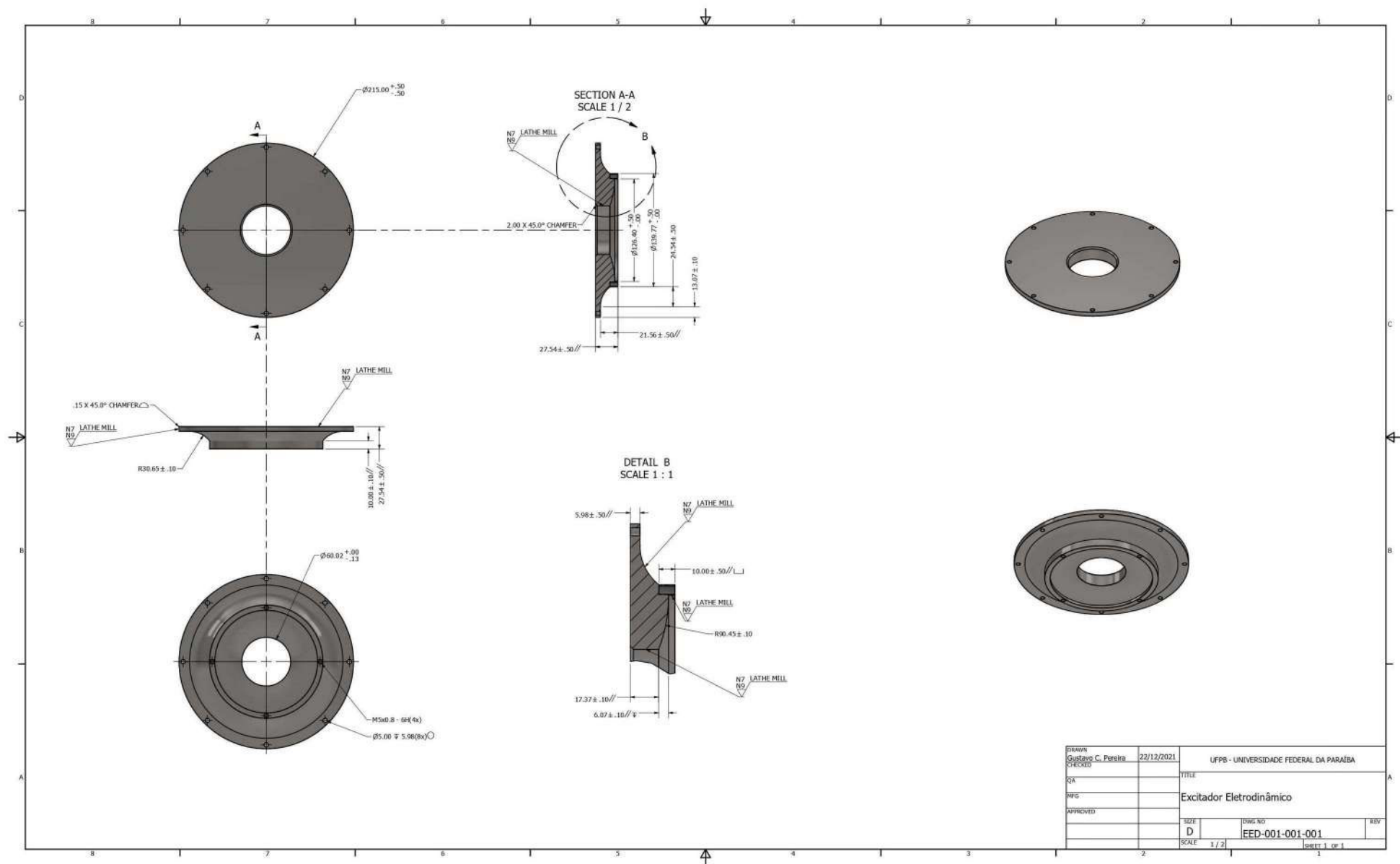
APÊNDICE I

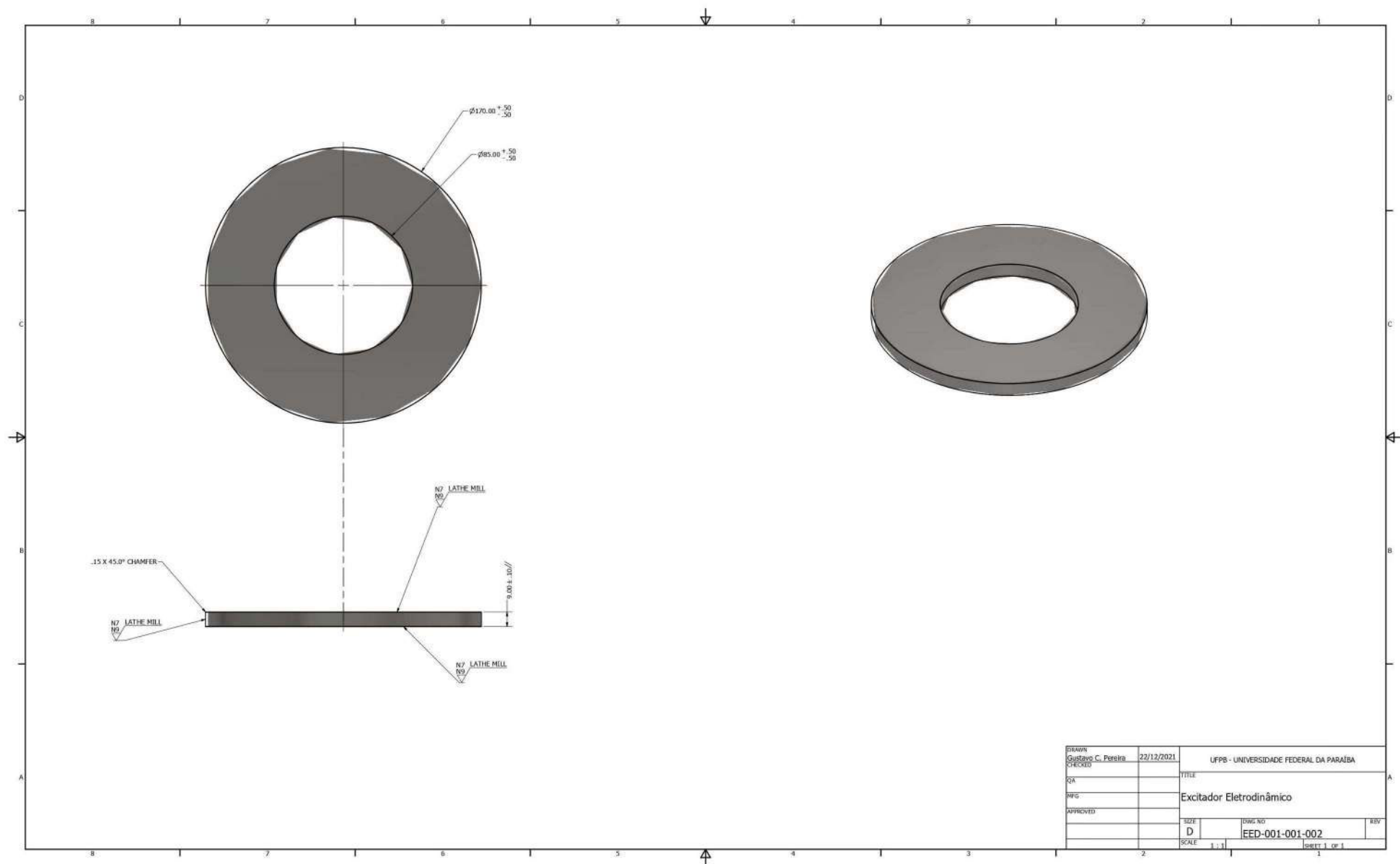
DESENHOS VIRTUAIS DO EED-01 (PROJETO)



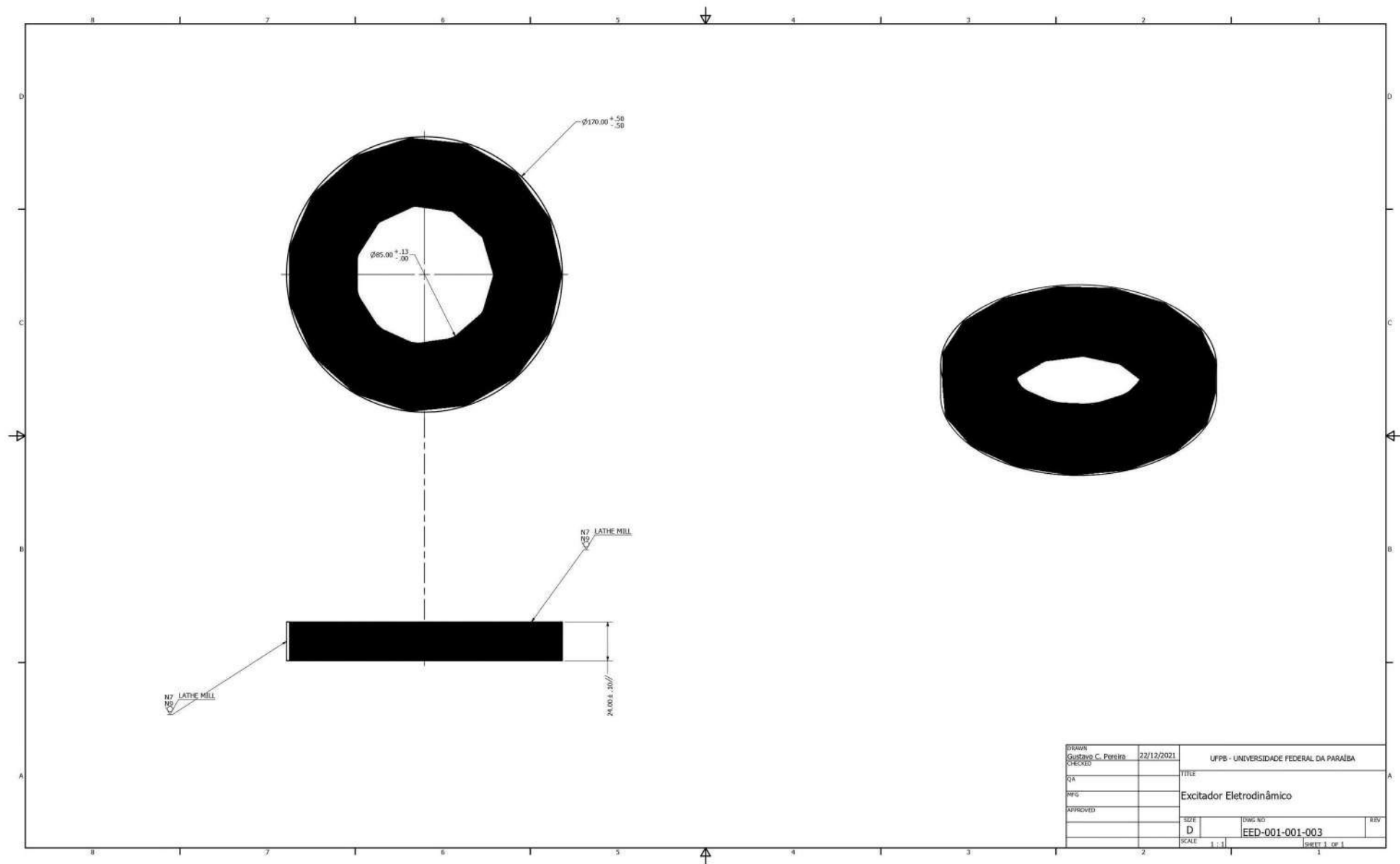
PARTS LIST				
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION	MATERIAL
1	1	EED-001-001-001	BASE MAGNÉTICA POLAR SUL (BMPS)	Steel, Cast
2	1	EED-001-002-008	ANEL BMPS	Steel, Carbon
3	1	EED-001-001-003	BMÁ PERMANENTE ANELAR DE FERRITE (IPAF)	Sintered Iron
4	1	EED-001-001-002	PLACA POLAR NORTE (PPN)	Steel, Alloy
5	4	EED-001-002-002	TIRANTES DE AMARRAÇÃO	Stainless Steel, Austenitic
6	4	EED-001-002-003A	VIGAS DE APOIO (75MM)	Aluminum 6061
7	4	EED-001-002-001	ANEL DA ESTRUTURA (AE)	Stainless Steel, Austenitic
8	8	EED-001-002-003B	VIGAS DE APOIO (60MM)	Aluminum 6061
9	4	EED-001-002-004	ESPAGADORES (ES)	Brass, Soft Yellow
10	1	EED-001-001-004	PINO T-YOKE	Steel, Cast
11	4	CNS 150 - A - 10,5	Washer	Steel, Mild
12	4	KS B 1014 - M 10	Wing nuts	Steel, Mild
13	1	EED-001-005-005	ENGASTE DE MOLAS SUPERIOR - LADO AE	Bronze, Cast
14	1	EED-001-005-005	ENGASTE DE MOLAS BASE - LADO AE	Bronze, Cast
15	2	EED-001-004-002	ANEL CENTRALIZADOR (AC)	Aluminum 6061
16	1	EED-001-004-003	ALOJAMENTO DOS ROLAMENTOS (AR)	Brass, Soft Yellow
17	2	EED-001-004-001A	ROLAMENTO LM12UU - PARTE A	Steel, Carbon
18	2	EED-001-004-001B	ROLAMENTO LM12UU - PARTE B	Acetal Resin, Black
19	4	EED-001-004-001D	ROLAMENTO LM12UU - PARTE D	Rubber, Silicone
20	384	EED-001-004-001C	ROLAMENTO LM12UU - PARTE C	Steel, Alloy
21	3	EED-001-004-004	TAMPA DO ALOJAMENTO DOS ROLAMENTOS	Brass, Soft Yellow
22	1	EED-001-003-001	BOBINA MAGNÉTICA (BM)	Acetal Resin, White
23	1	EED-001-003-004	BUCHA ROSCADA (BM)	Brass, Soft Yellow
24	1	EED-001-003-002	FIO AWG 21	Copper, Alloy
25	1	EED-001-003-003	HASTE DA BOBINA (HB)	Stainless Steel AISI 304
26	1	EED-001-005-002	BUCHA ROSCADA DA AEM	Brass, Soft Yellow
27	1	EED-001-005-001	ANEL ESTABILIZADOR DAS MOLAS (AEM)	Aluminum 6061
28	4	ISO 4762 - M5 x 20	Hexagon Socket Head Cap Screw	Stainless Steel, 440C
29	2	EED-001-005-007	ENGASTE DE MOLAS BASE - LADO AEM	Acetal Resin, White
30	36	CNS 150 - A - 5,3	Washer	Steel, Mild
31	20	BS 3692 - M5	Precision hexagon nuts	Steel, Mild
32	8	ISO 4762 - M5 x 40	Hexagon Socket Head Cap Screw	Stainless Steel, 440C
33	4	EED-001-005-003	MOLAS PLANAS (70X25X0.600)	Steel, Alloy
34	4	EED-001-002-009B	ABSORVEDOR DE VIBRAÇÃO - PARTE B	Rubber
35	4	EED-001-002-009A	ABSORVEDOR DE VIBRAÇÃO - PARTE A	Steel, Carbon
36	8	ISO 7089 - 10	Plain washers - normal series - Product grade A	Stainless Steel
37	4	ISO 4762 - M10 x 40	Hexagon Socket Head Cap Screw	Stainless Steel, 440C
38	4	BS 3692 - M10	Precision hexagon nuts	Steel, Mild
39	8	ISO 4762 - M5 x 30	Hexagon Socket Head Cap Screw	Stainless Steel, 440C
40	8	ISO 4762 - M5 x 12	Hexagon Socket Head Cap Screw	Stainless Steel, 440C
41	1	ANSI B18.3.6M - M3x0,5 x 5, B8SSOPM	Broached Hexagon Socket Set Screw - Oval Point	Steel, Mild

DRAWN Gustavo C. Pereira CHECKED 05/12/2021	UFPB - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA TITLE Excitador Eletrodinâmico SIZE D SCALE 1 / 2	DWG NO EED-000-000-000 SHEET 1 OF 1
--	--	---

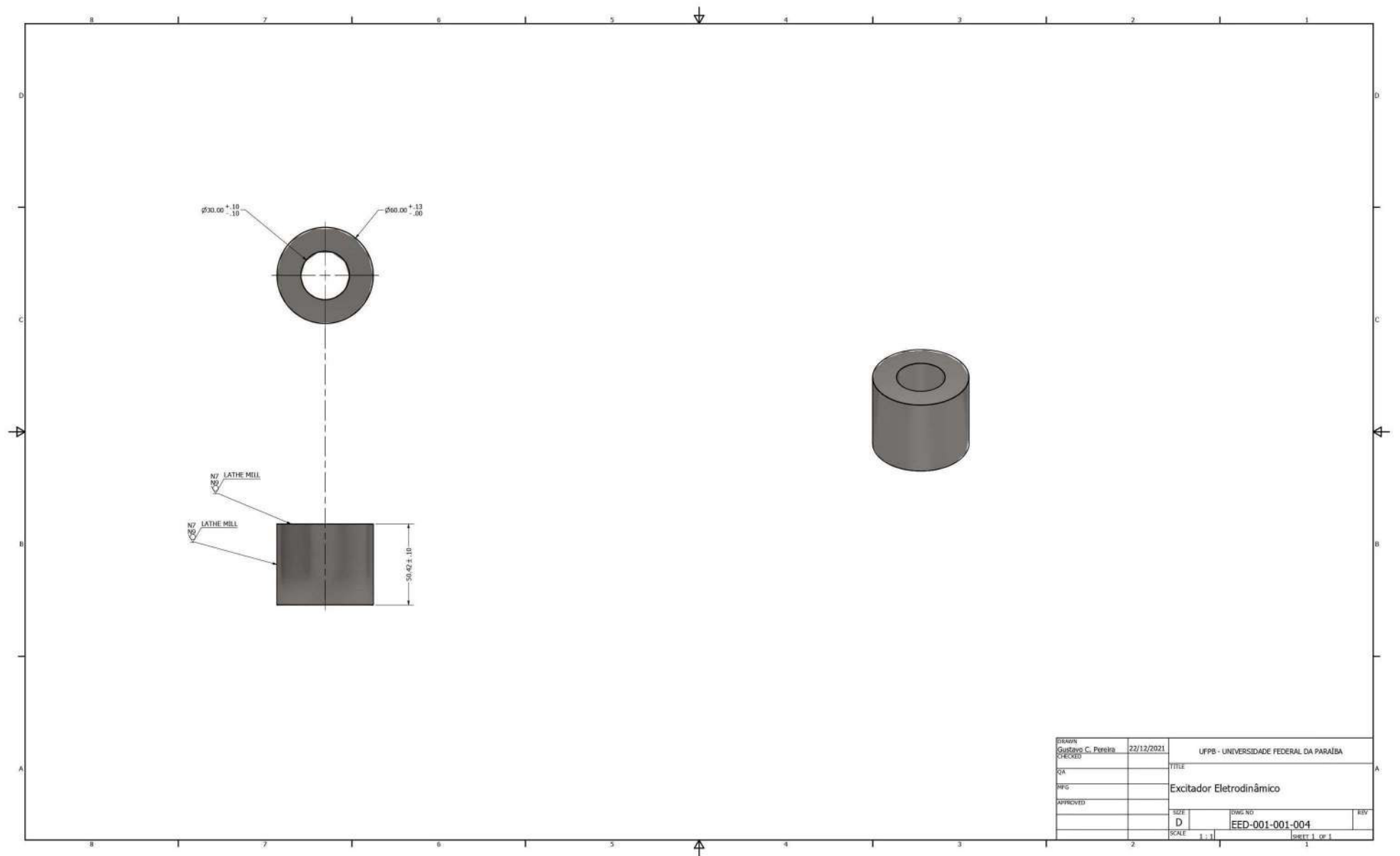


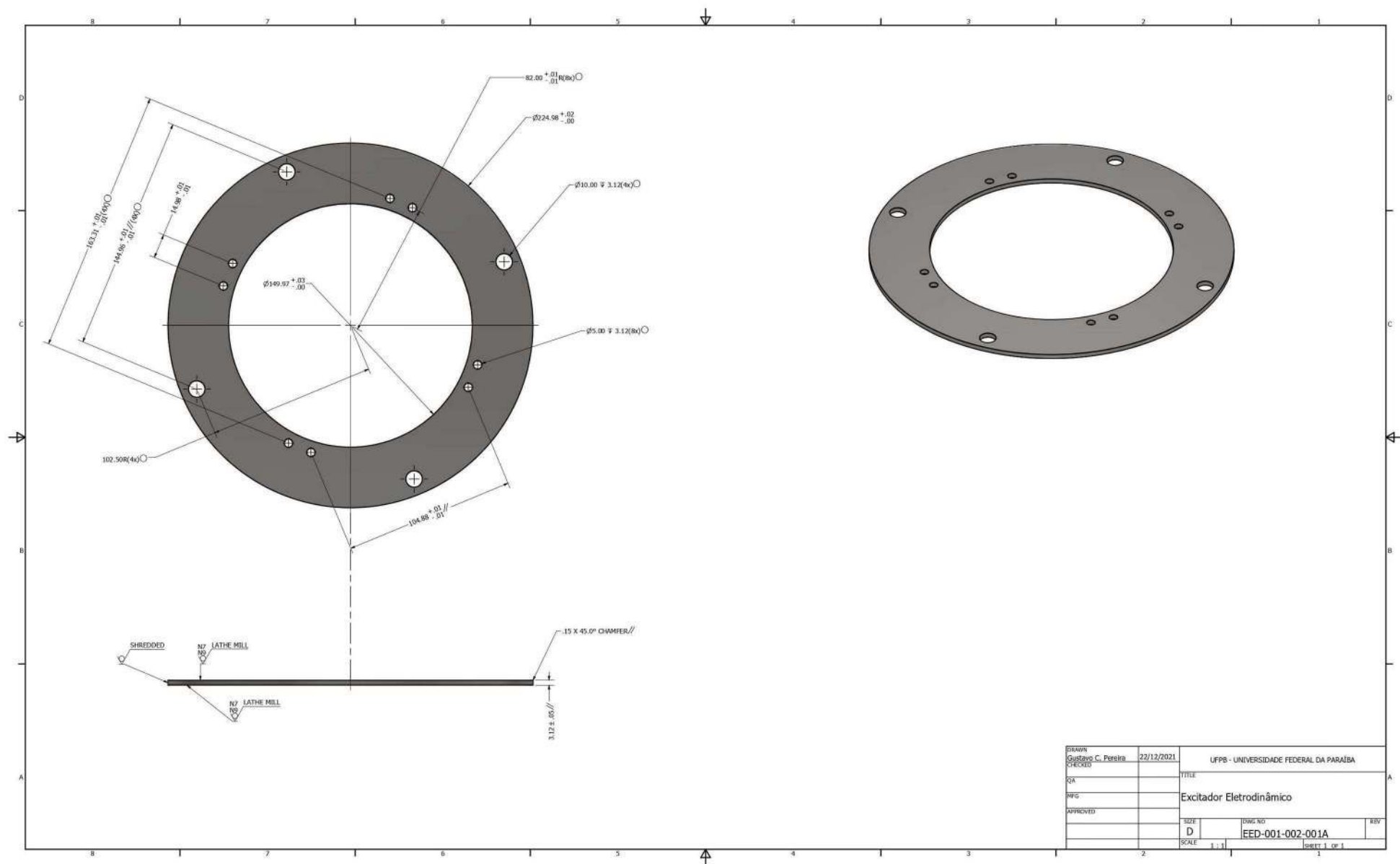


DRAWN	Gustavo C. Pereira	22/12/2021	UFPA - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA	
CHECKED				
QA			TITLE	
RFG			Excitador Eletrodinâmico	
APPROVED				
			SIZE	DWG NO
			D	EED-001-001-002
			SCALE	1:1
				SHEET 1 OF 1

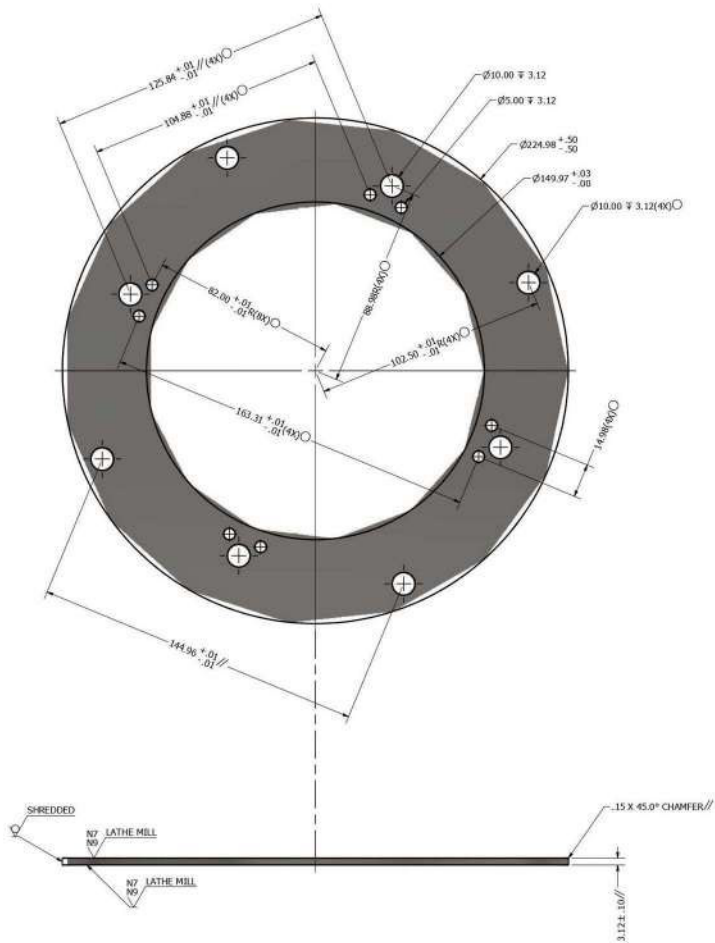


DRAWN	Gustavo C. Pereira	22/12/2021	UFPB - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CHECKED			
QA			TITLE
RFIS			Excitador Eletrodinâmico
APPROVED			
			SIZE
			D
			SCALE
			1 : 1
			ISMET 1 OF 1

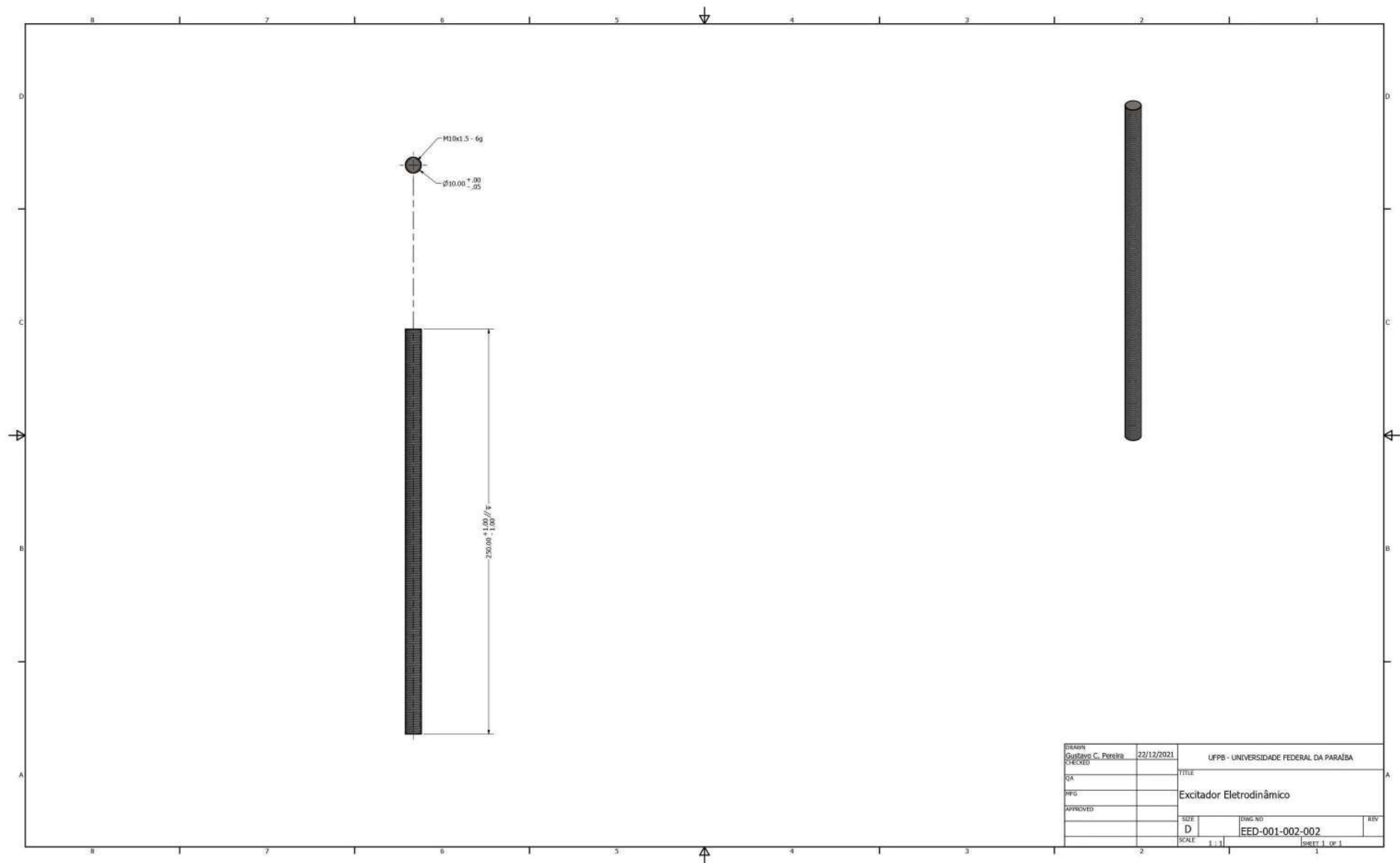


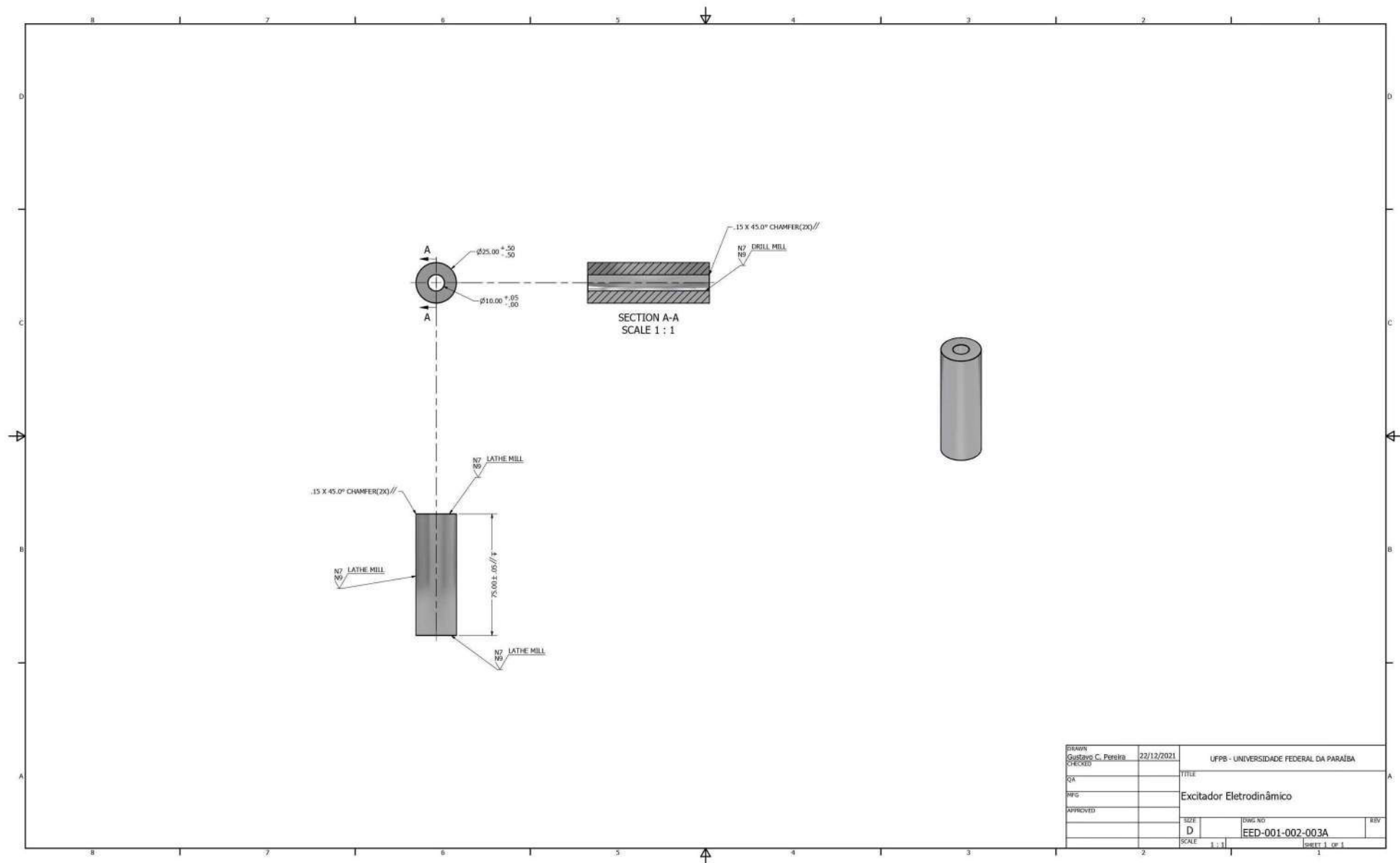


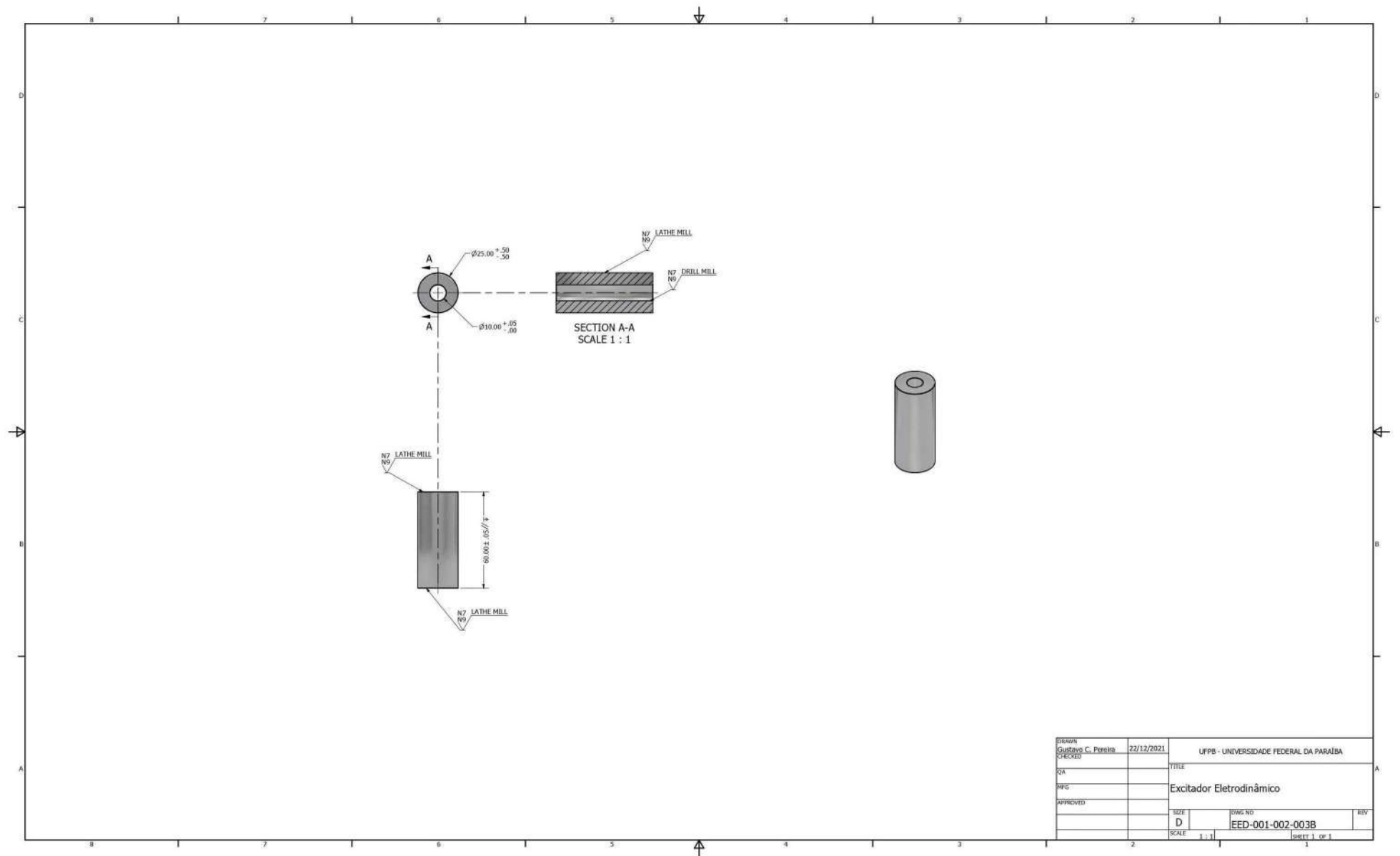
DRAWN	Gustavo C. Pereira	22/12/2021	UFPA - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CHECKED			
QA			TITLE
RFG			Excitador Eletrodinâmico
APPROVED			
SIZE	D	DWG NO	EED-001-002-001A
SCALE	1:1		SHEET 1 OF 1



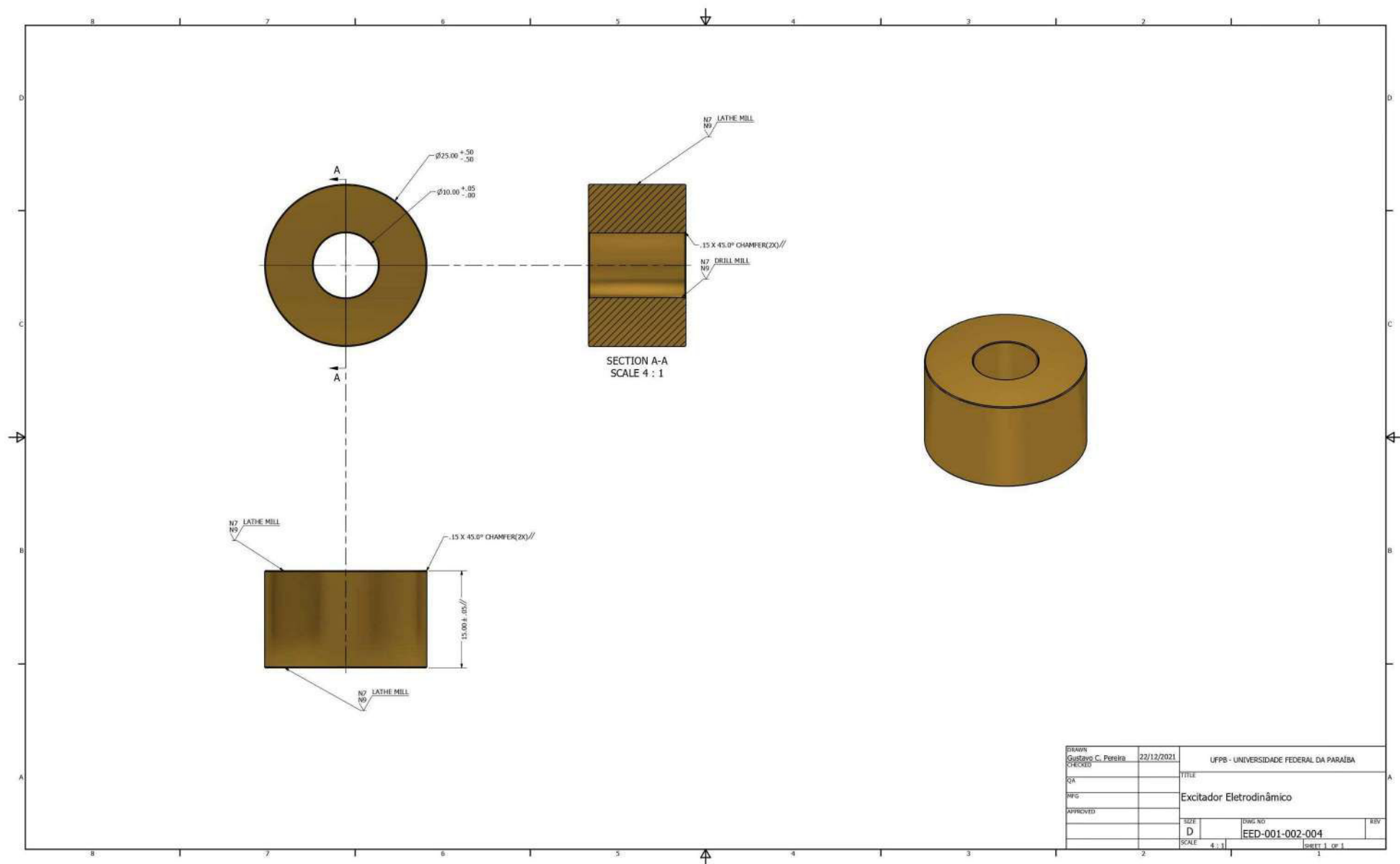
DRAWN	Gustavo C. Pereira	22/12/2021	UFPA - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CHECKED			
QA			TITLE
RFG			Excitador Eletrodinâmico
APPROVED			
SIZE	D	DWG NO	EED-001-002-001B
SCALE	1:1	SHEET 1	OF 1

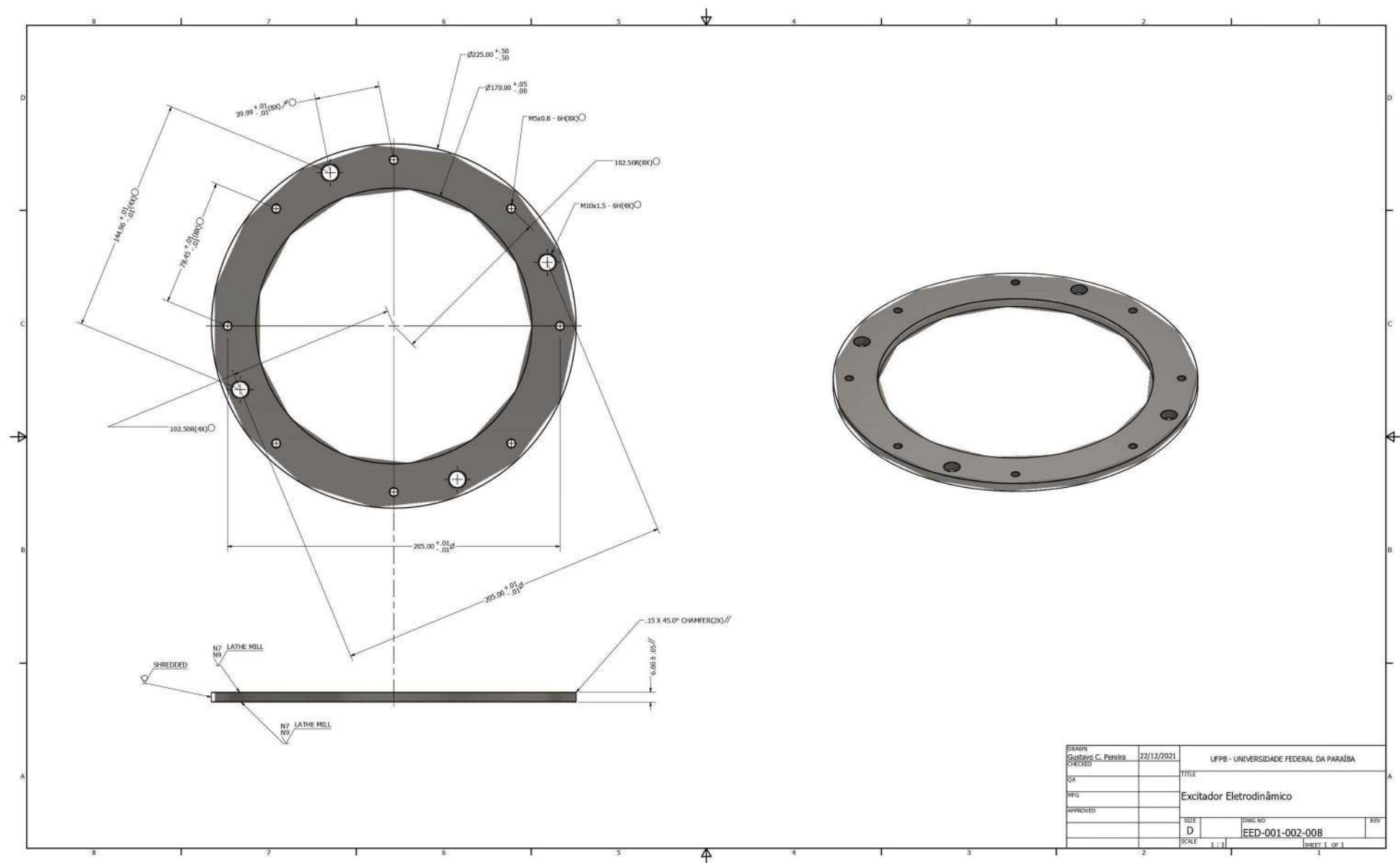


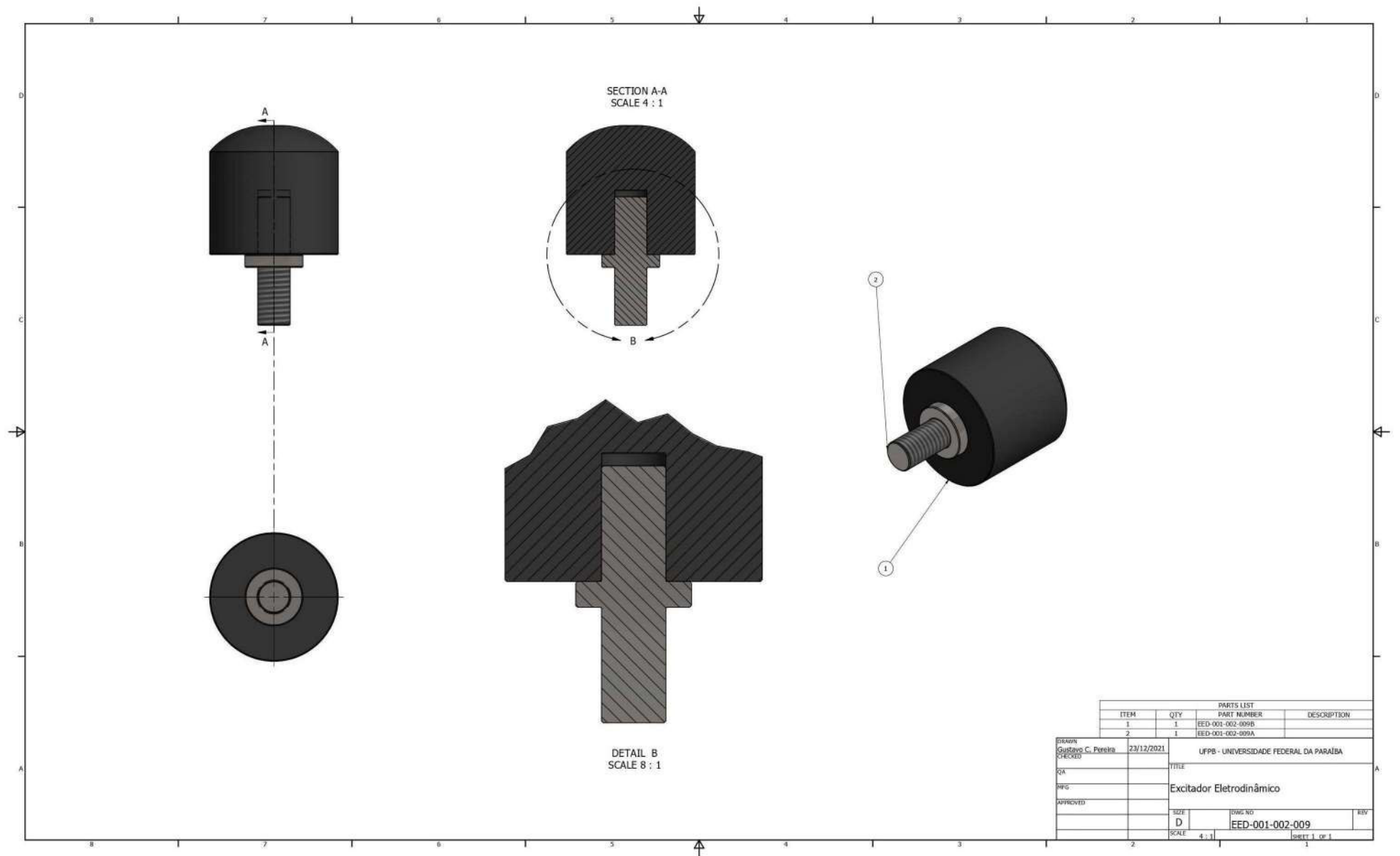


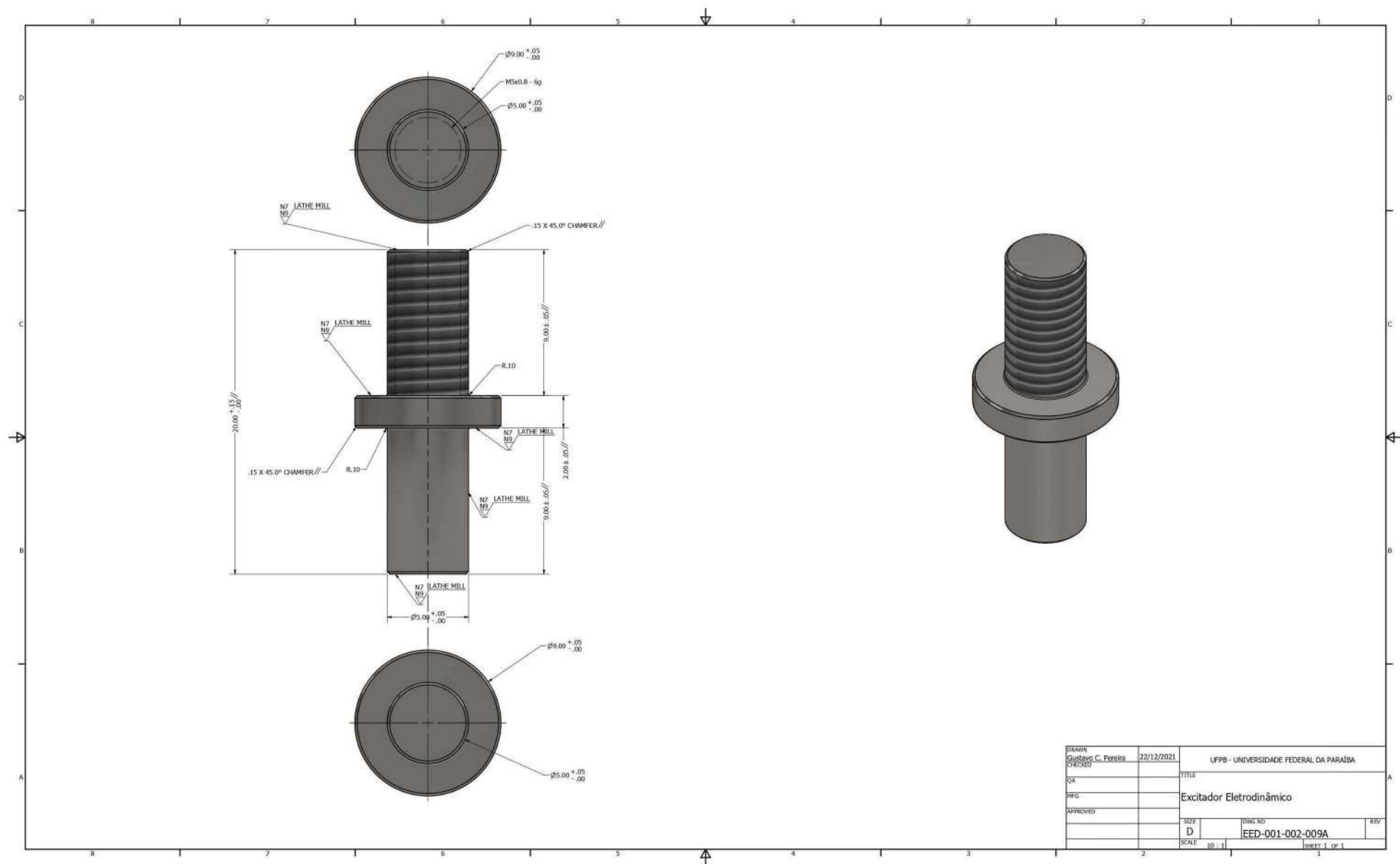


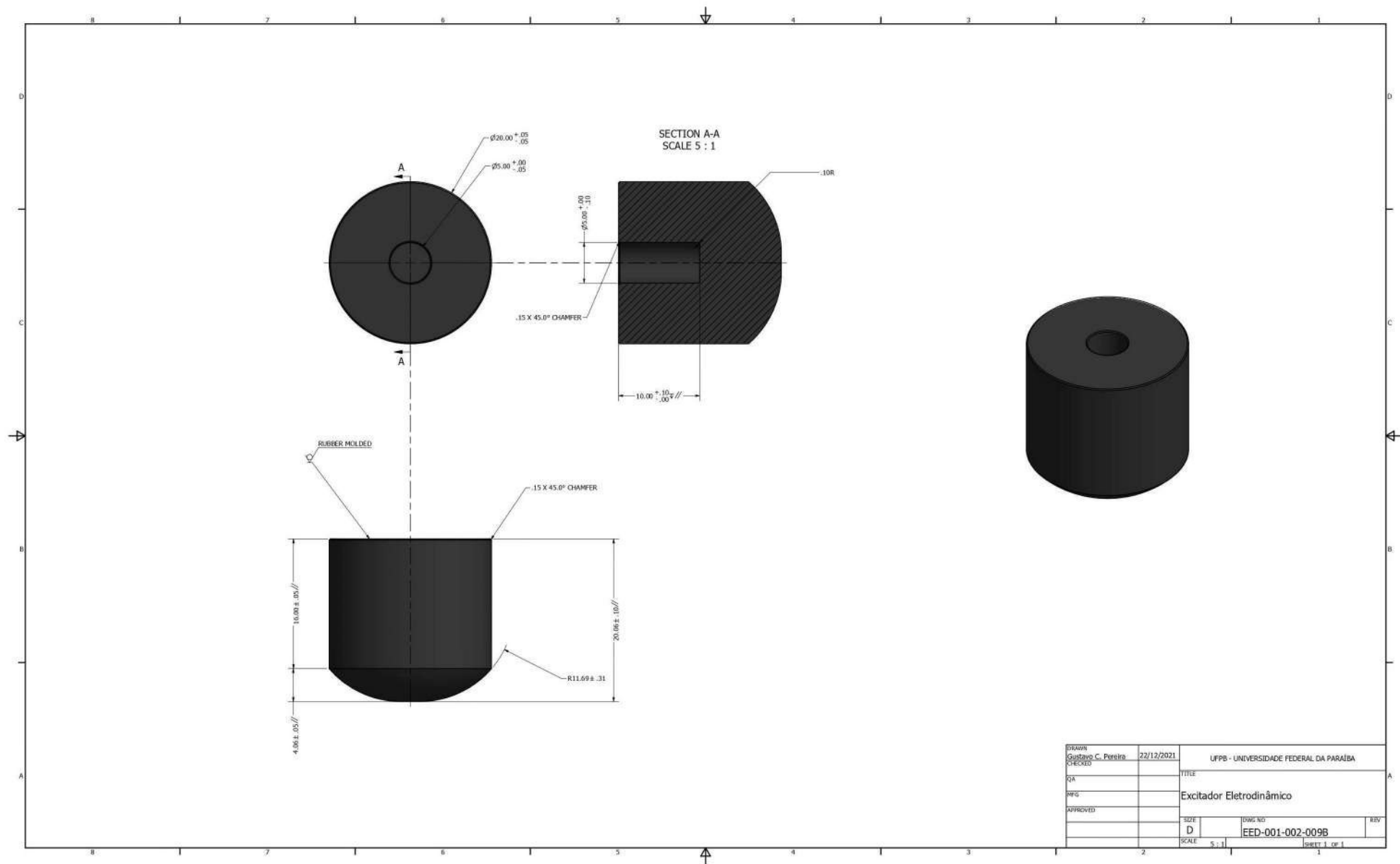
DRAWN	Gustavo C. Pereira	22/12/2021	UFPB - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CHECKED			
QA			TITLE
RFG			Excitador Eletrodinâmico
APPROVED			
			SIZE
			D
			DWG NO
			EED-001-002-003B
			SCALE
			1 : 1
			SHEET 1 OF 1



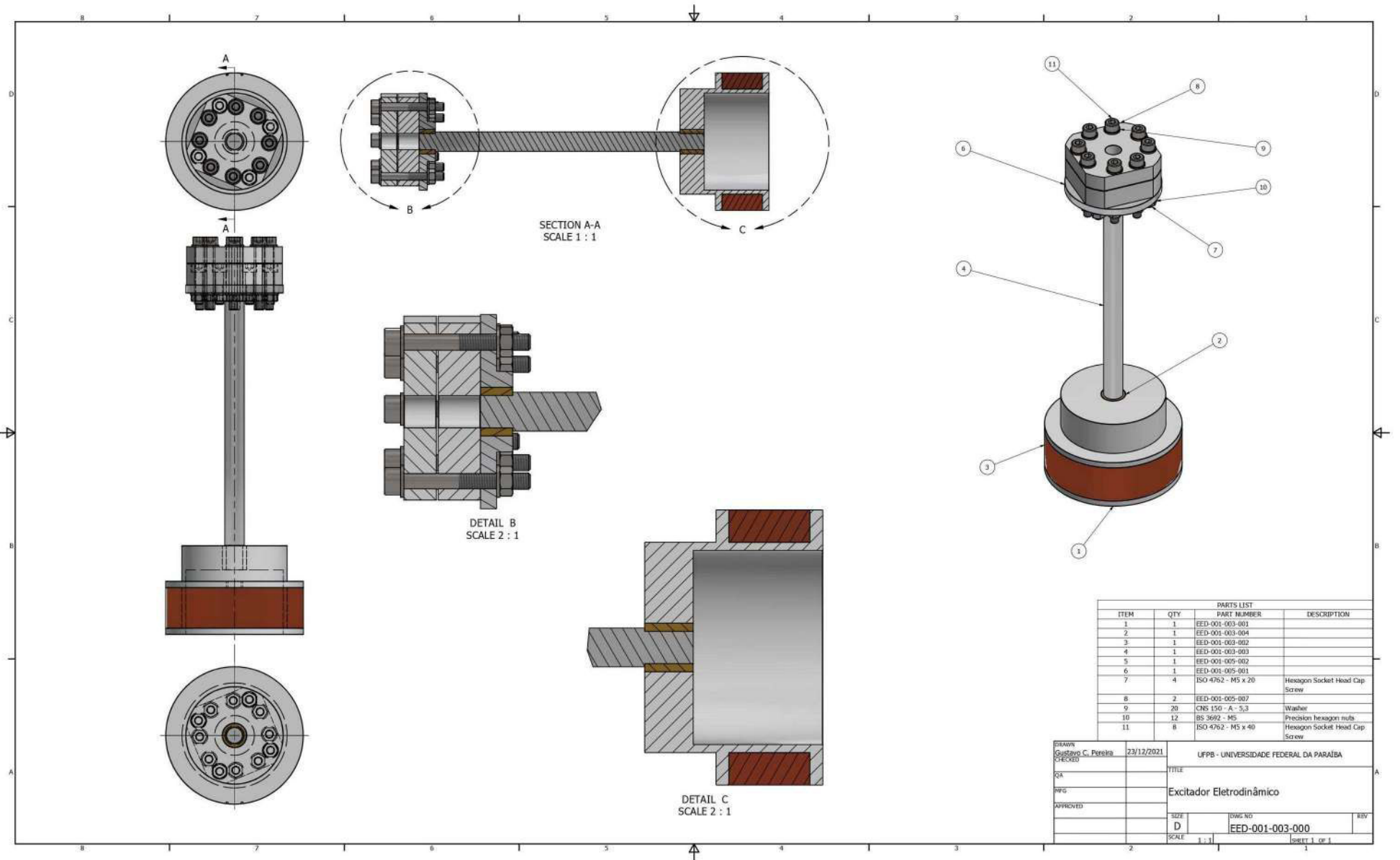


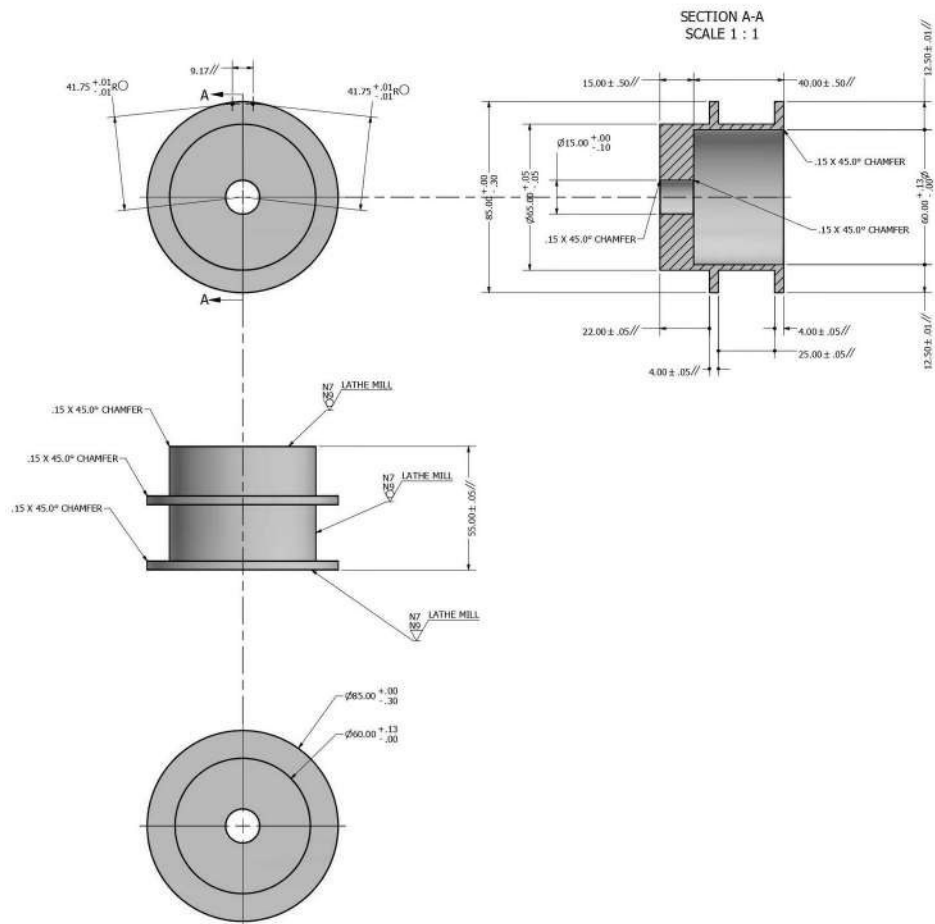




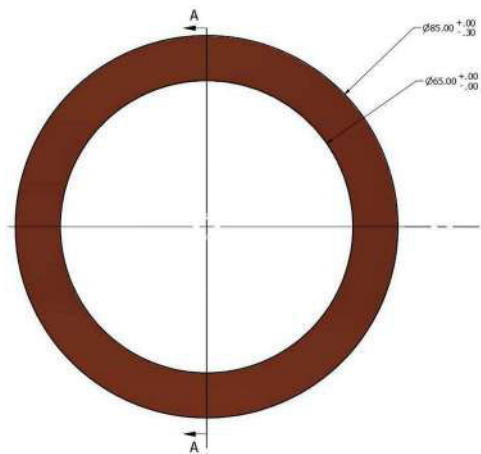


DESIGN	Gustavo C. Pereira	22/12/2021	UFPB - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CHECKED			
QA			TITLE
RFG			Excitador Eletrodinâmico
APPROVED			
			SIZE
			D
			SCALE
			5 : 1
			REV
			EED-001-002-009B
			1 OF 1

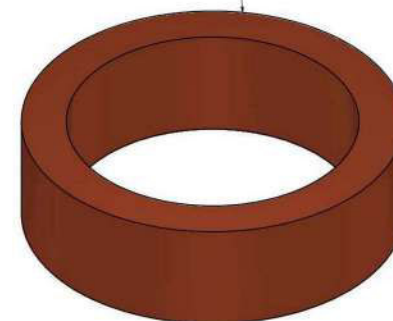




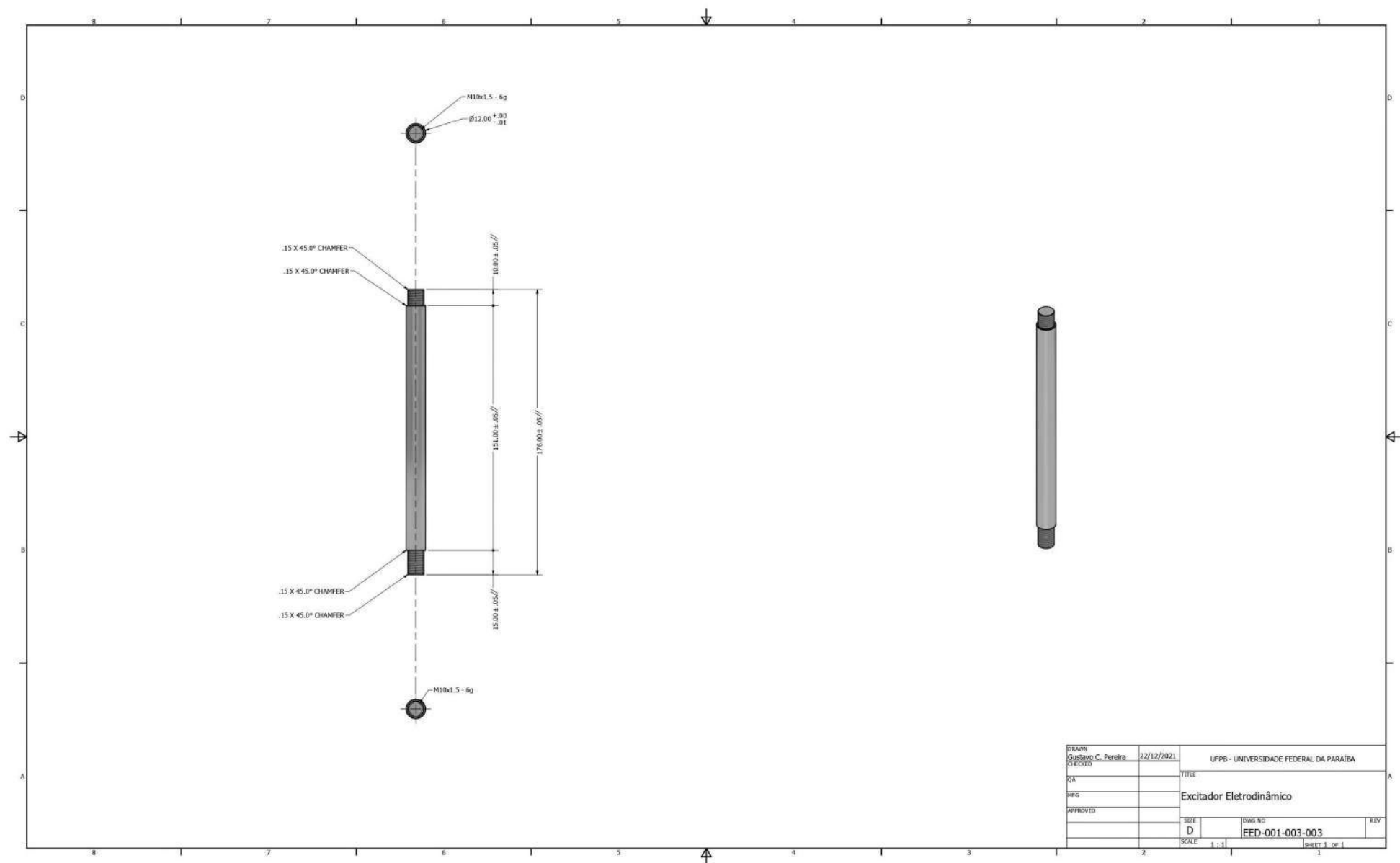
DESIGNED	Gustavo C. Pereira	22/12/2021	UFPA - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA
CHECKED			
QA			TITLE
RFG			Excitador Eletrodinâmico
APPROVED			
SIZE	D	DWG NO	EED-001-003-001
SCALE	1 : 1	SHEET	1 OF 1

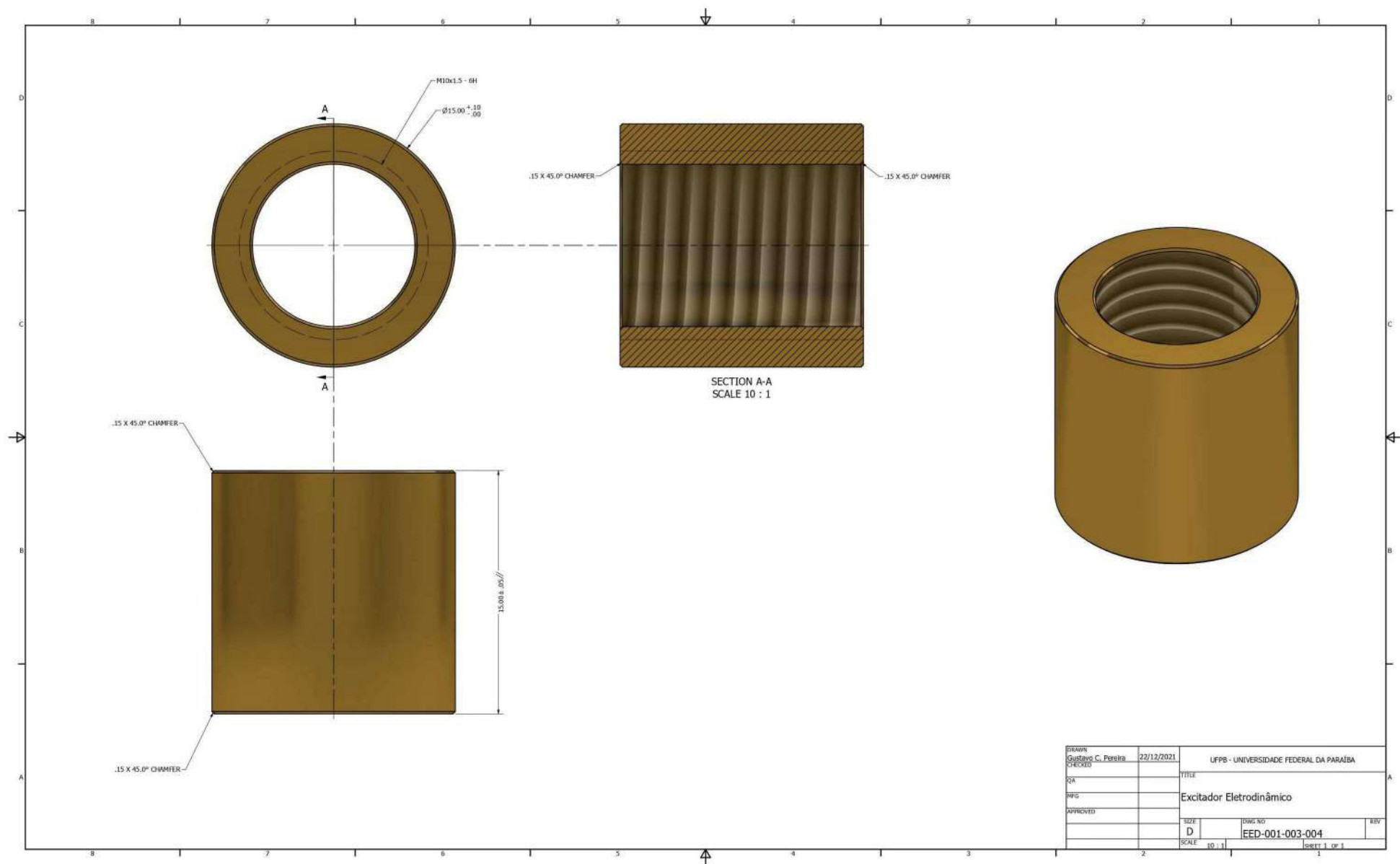


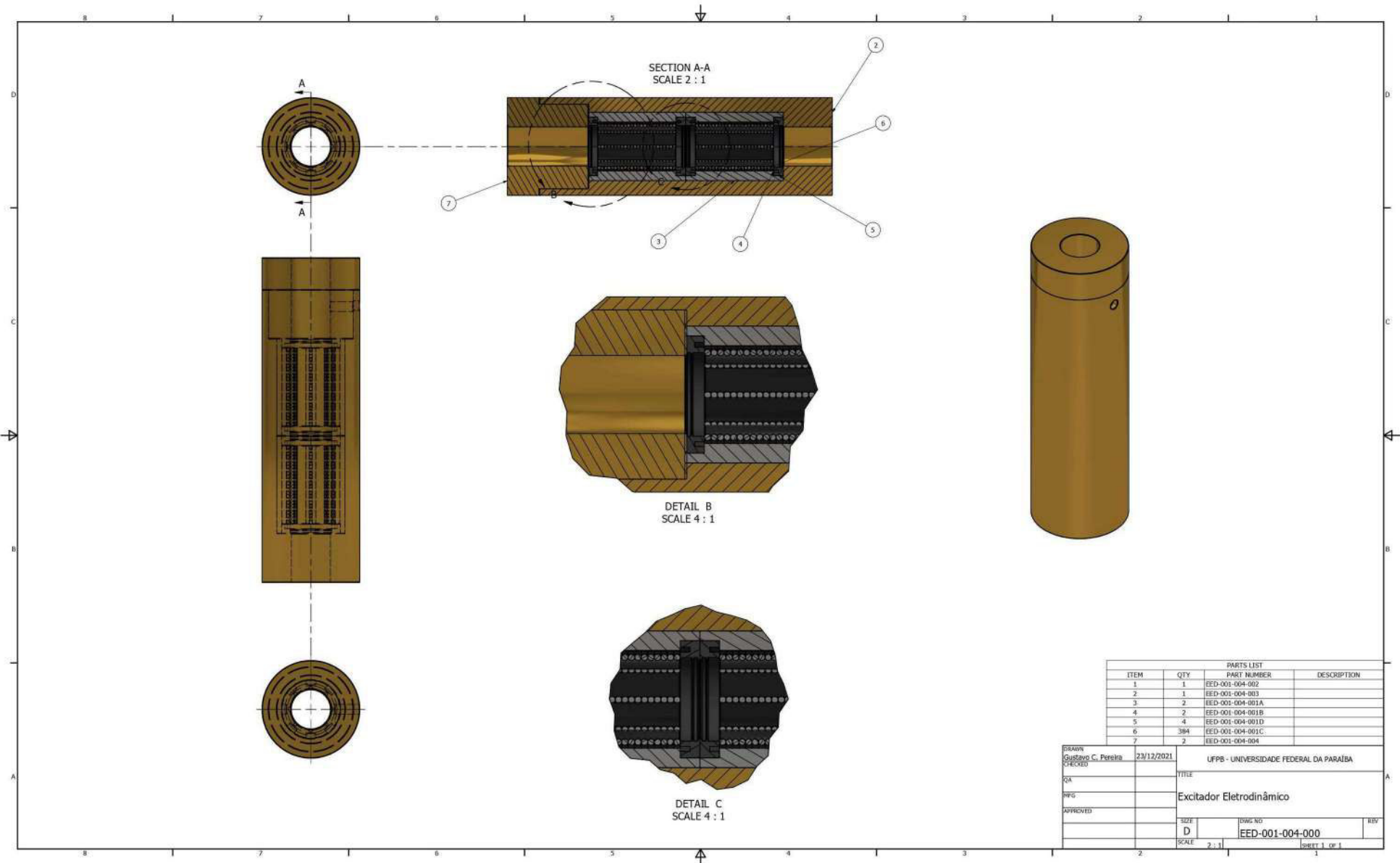
A Bobina Magnética é composta por enrolamentos de multicamadas.
O fio de cobre AWG no. 21 é utilizado e segue abaixo as especificações:
1 - comprimento: 94.698 m
2 - massa: 333.682 g
3 - número de camadas: 13
4 - número de espiras: 408.0
5 - espessura: 6.000 elms



ELABORADO	Gustavo C. Pereira	22/12/2021	UFPA - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CHECADO			
QA			TÍTULO
PROJ			Excitador Eletrodinâmico
APROVADO			
			SIZE
			D
			SCALE
			2 : 1
			REV
			EED-001-003-002
			1

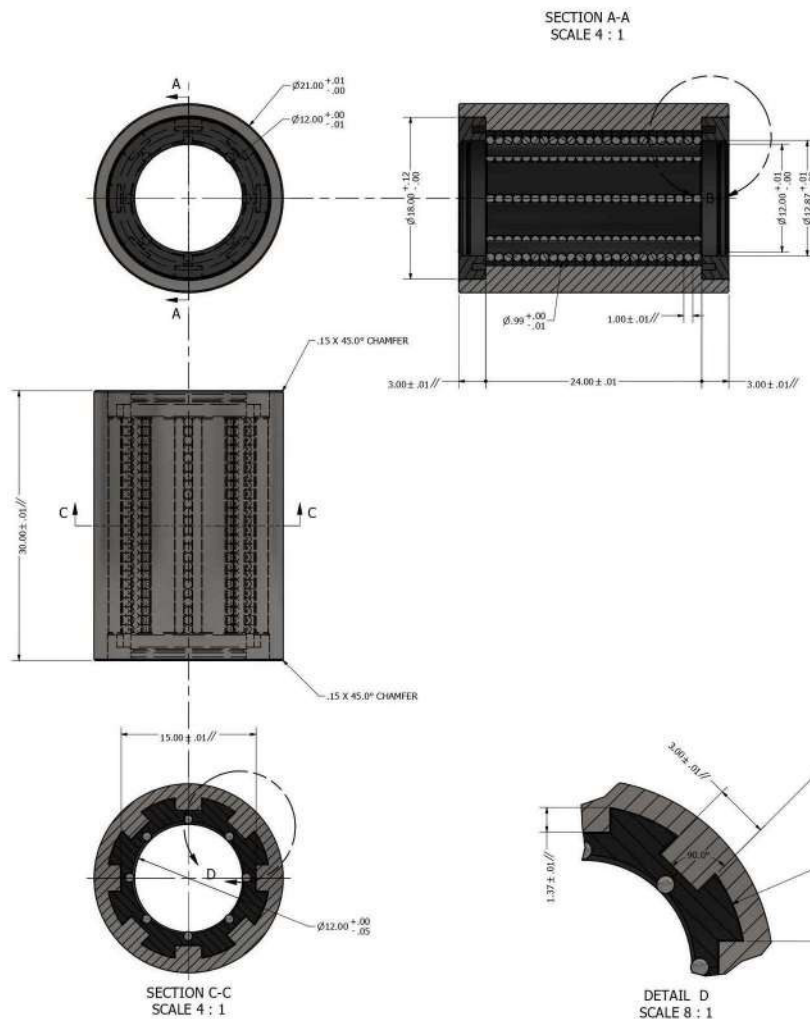






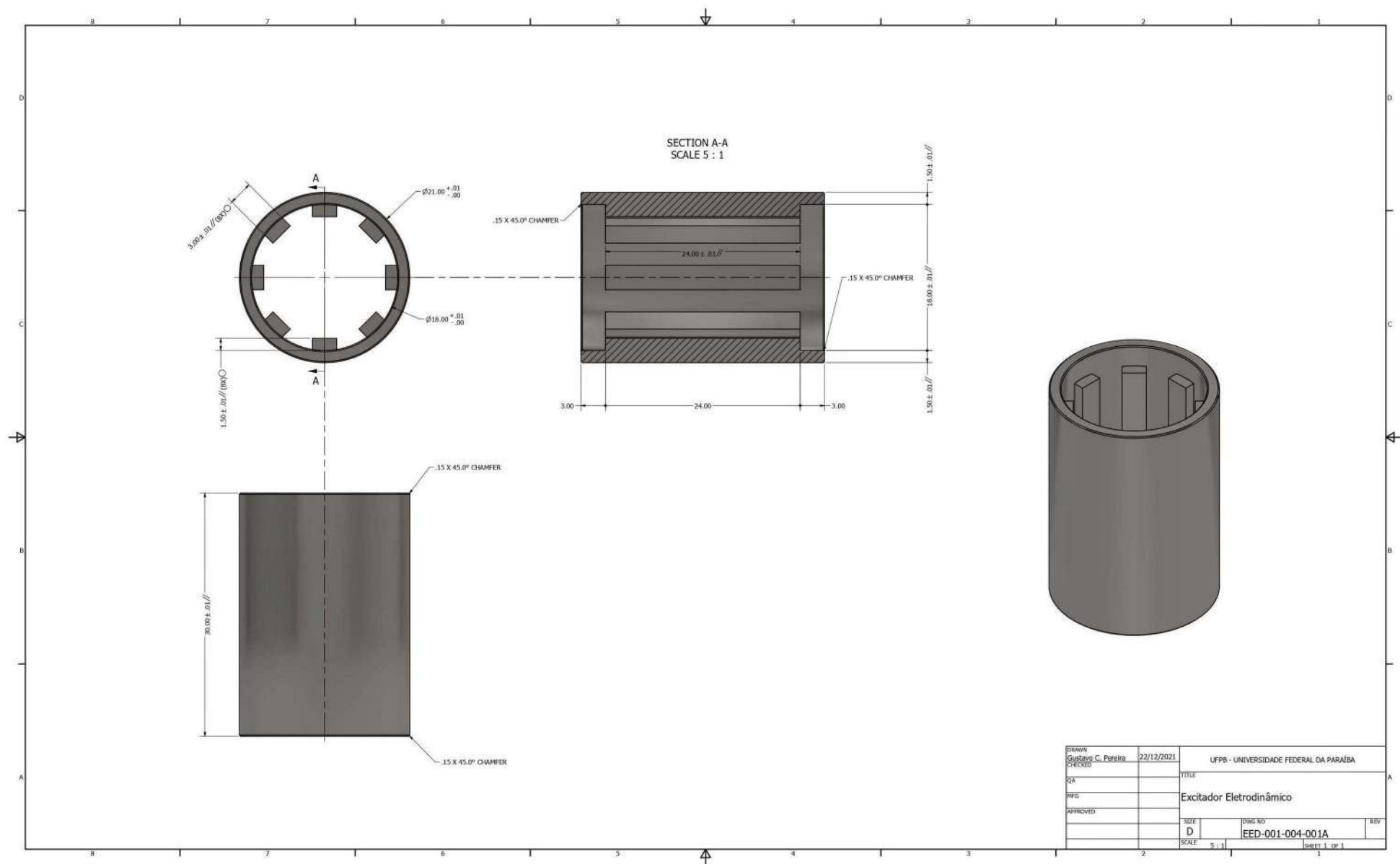
PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	EED-001-004-002	
2	1	EED-001-004-003	
3	2	EED-001-004-001A	
4	2	EED-001-004-001B	
5	4	EED-001-004-001D	
6	384	EED-001-004-001C	
7	2	EED-001-004-004	

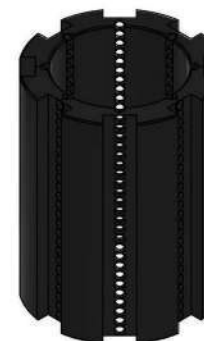
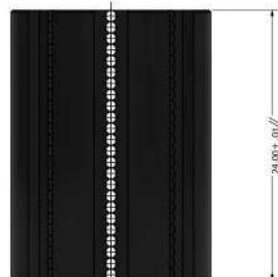
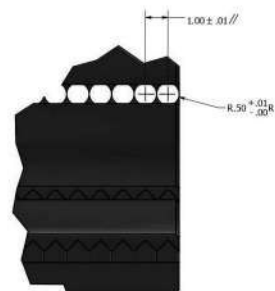
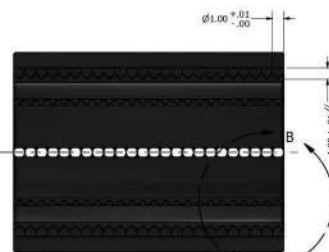
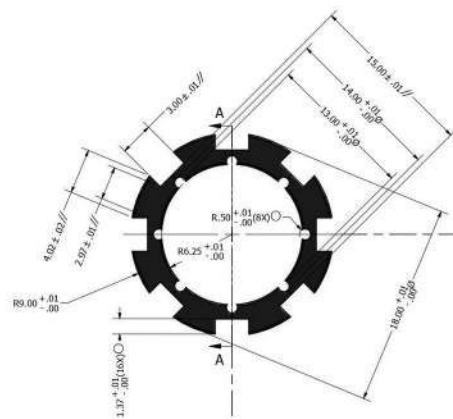
DRAWN Gustavo C. Pereira	23/12/2021	UFPA - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA	
CHECKED		TITLE	
QA		Excitador Eletrodinâmico	
RFIS			
APPROVED			
		SIZE D	DWG NO EED-001-004-000
		SCALE 2 : 1	SHEET 1 OF 1



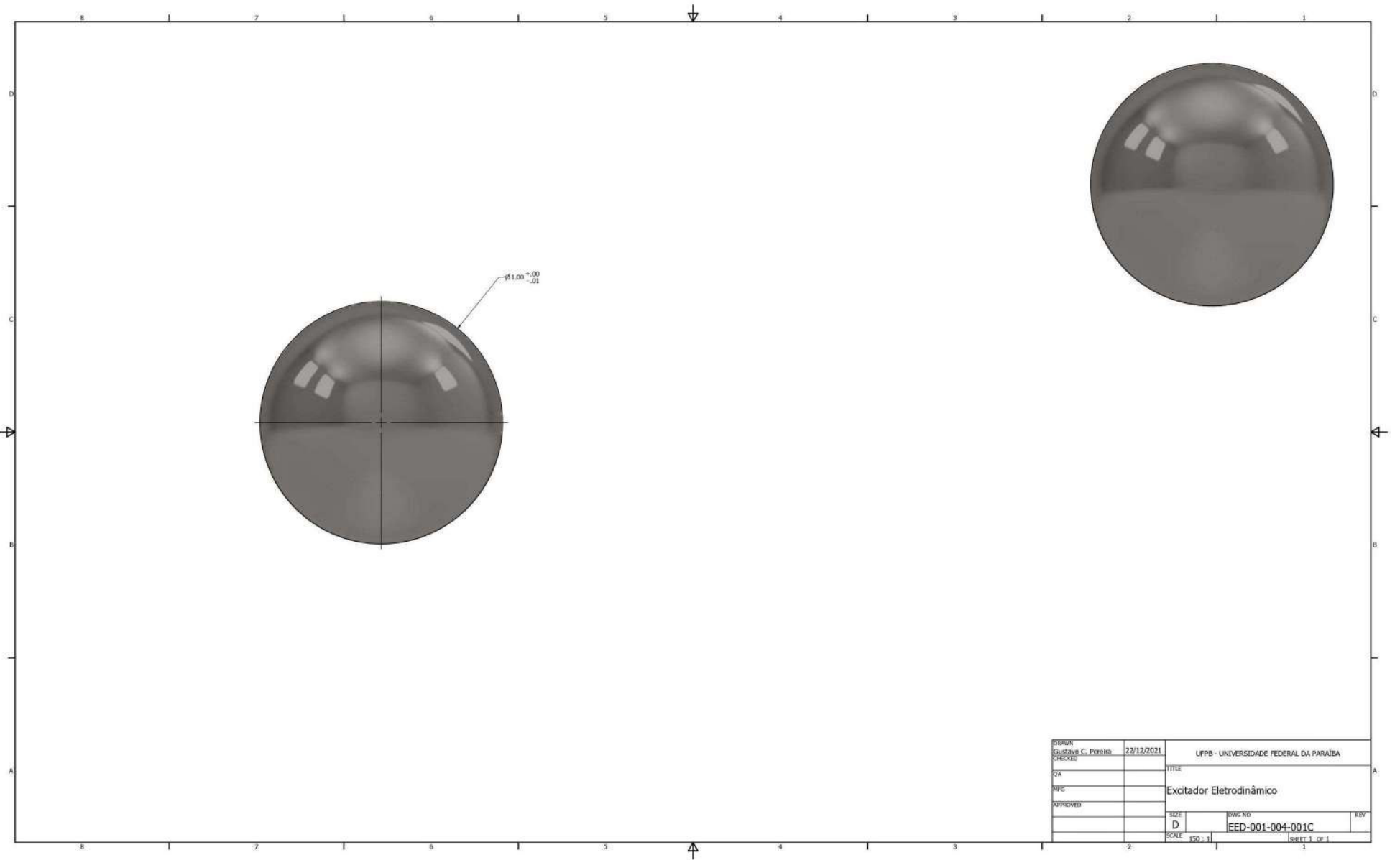
PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	EED-001-004-001A	CORPO EXTERNO
2	1	EED-001-004-001B	CORPO INTERNO
3	2	EED-001-004-001D	GAXETA LINEAR RASPADORA
4	192	EED-001-004-001C	ESFERAS

DRAWN Gustavo C. Pereira	22/12/2021	UFPA - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA	
CHECKED		TITLE	
QA		Excitador Eletrodinâmico	
RFIS		SIZE D	
APPROVED		DWG NO EED-001-004-001	
		SCALE 4 : 1	

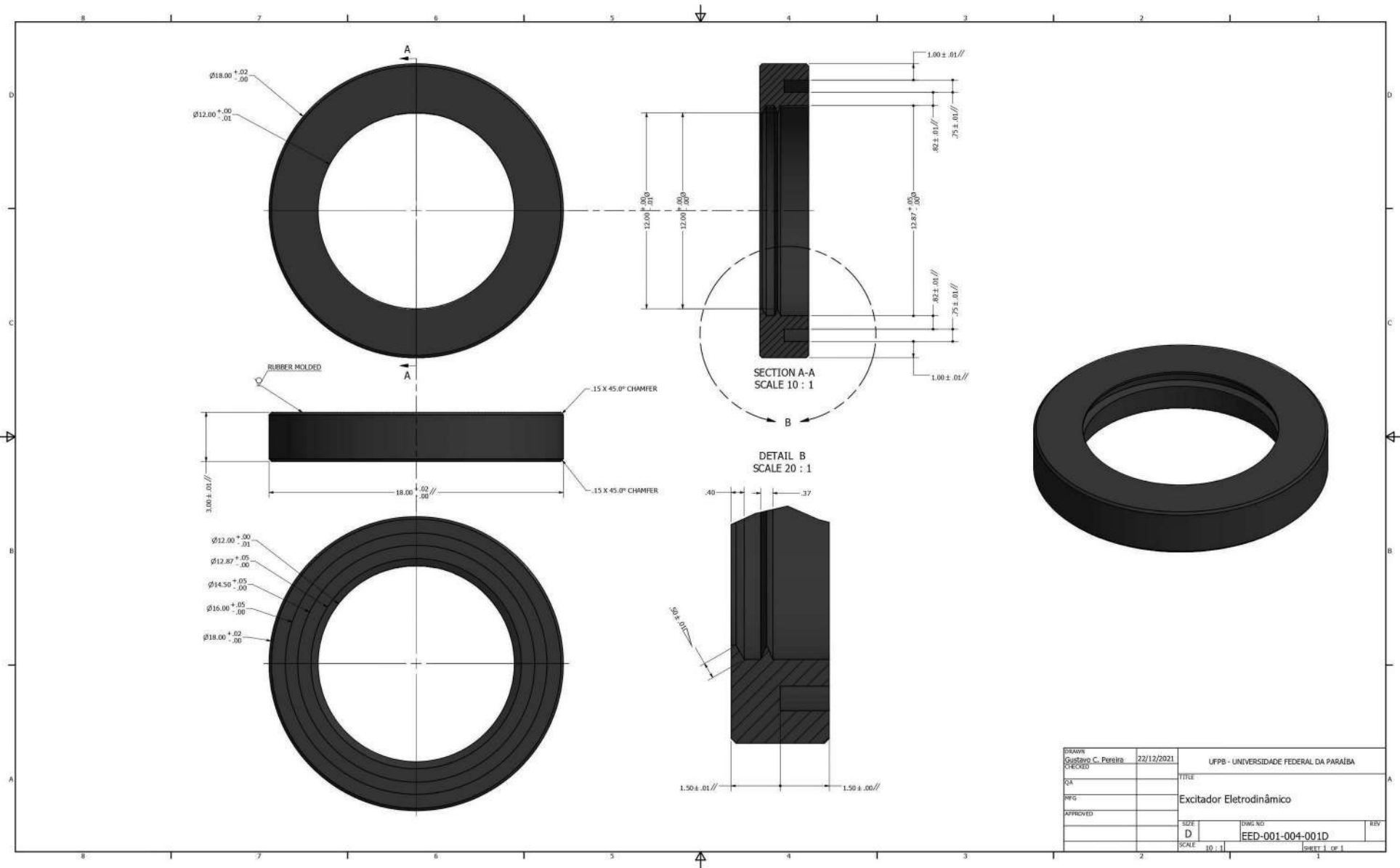




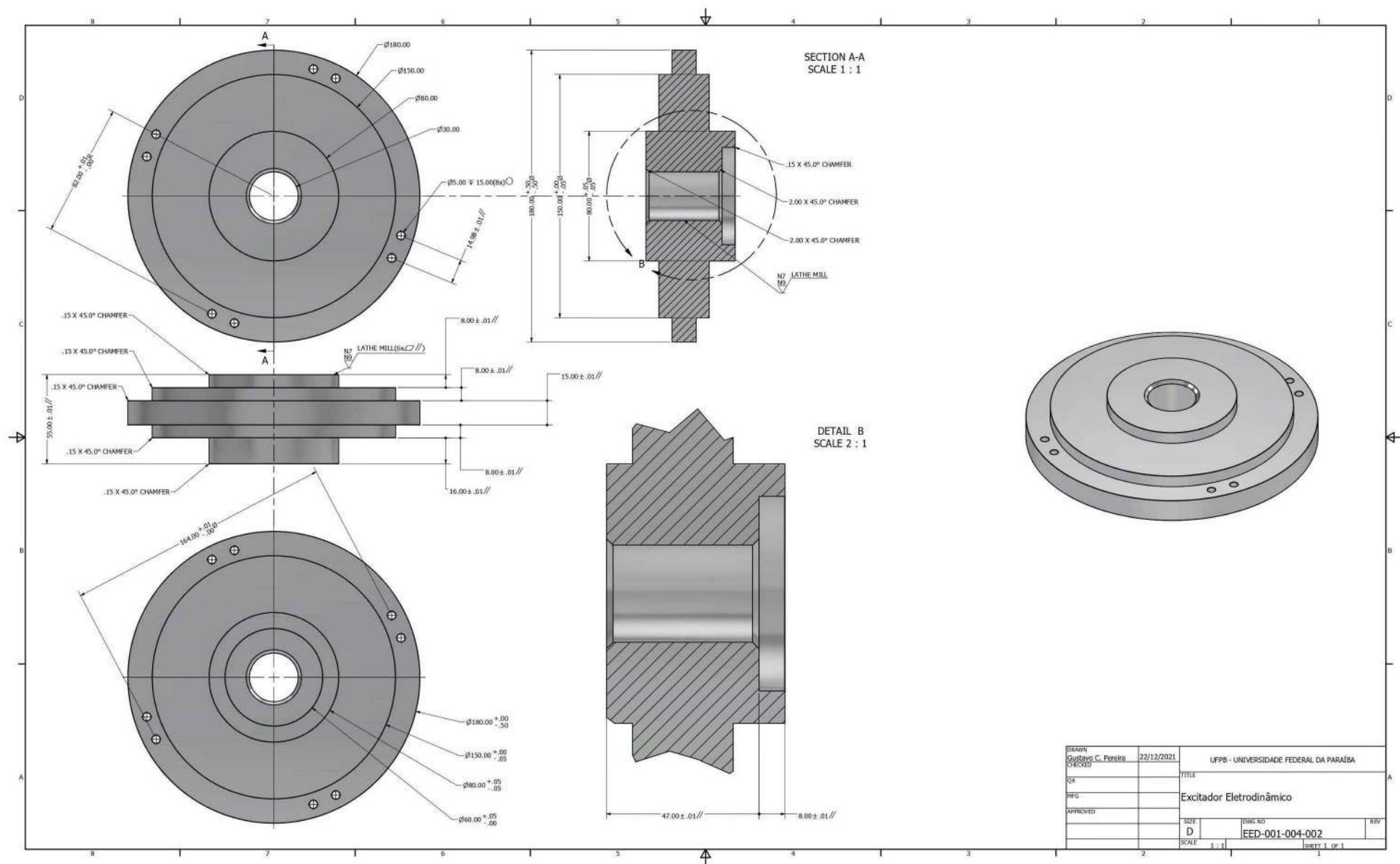
DESIGN	Gustavo C. Pereira	22/12/2021	UFPB - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CHECKED			
QA			TITLE
RFIS			Excitador Eletrodinâmico
APPROVED			
			SIZE
			D
			SCALE
			5 : 1
			REV
			EED-001-004-001B
			SHEET 1 OF 1

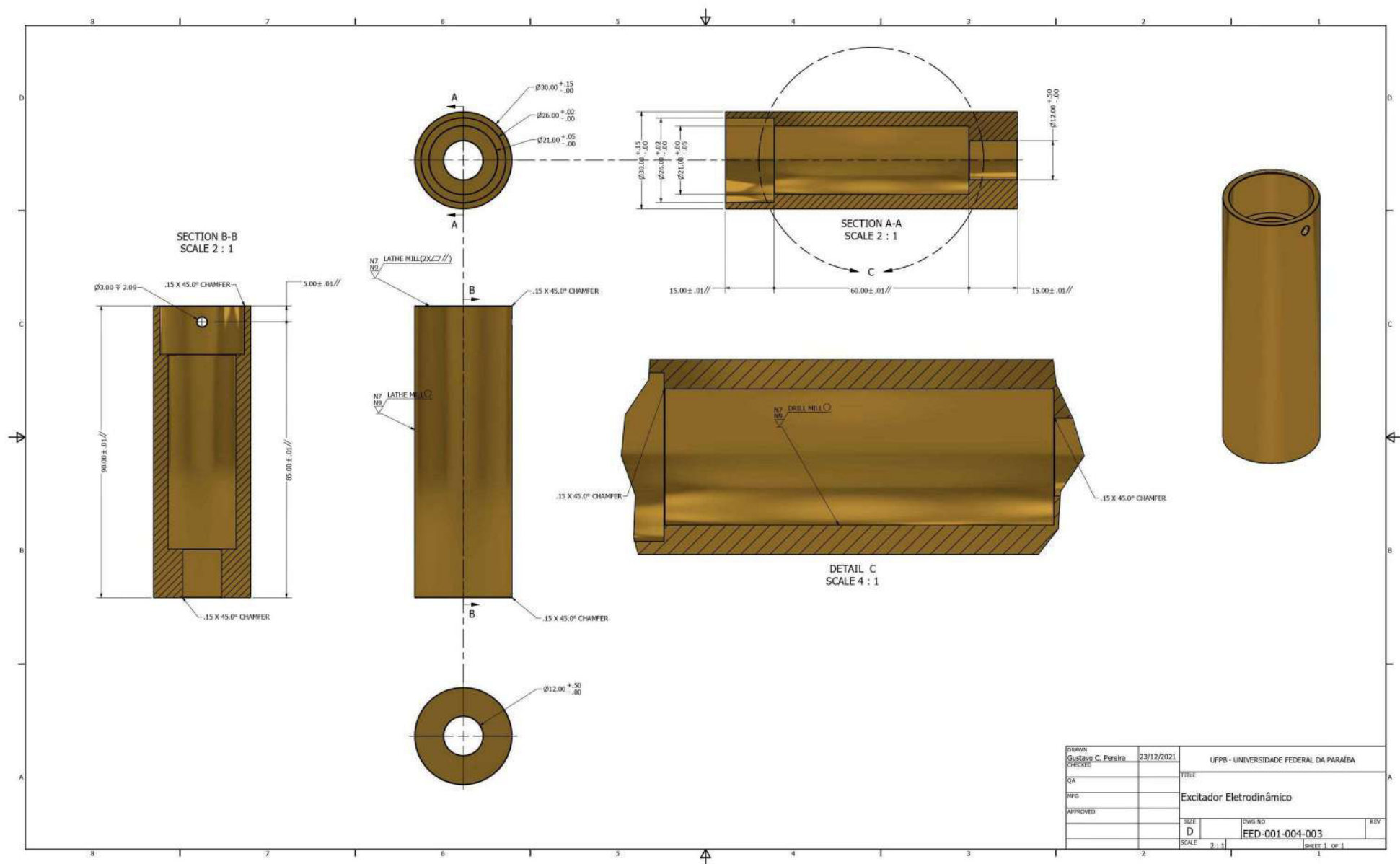


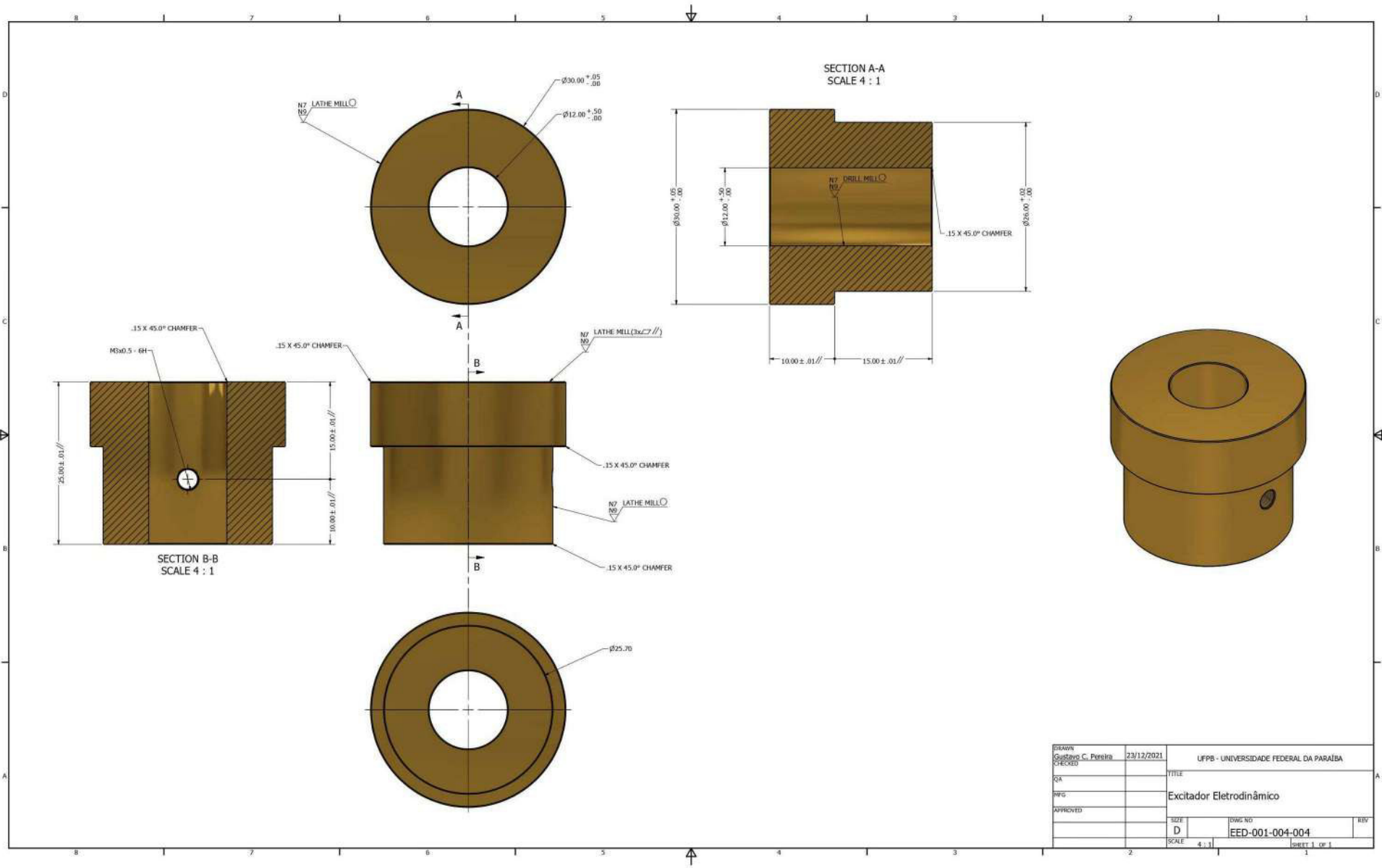
DRAWN	Gustavo C. Pereira	22/12/2021	UFPA - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA	
CHECKED				
QA			TITLE	
RFG			Excitador Eletrodinâmico	
APPROVED				
			SIZE	DWG NO
			D	EED-001-004-001C
			SCALE	150 : 1
				SHEET 1 OF 1



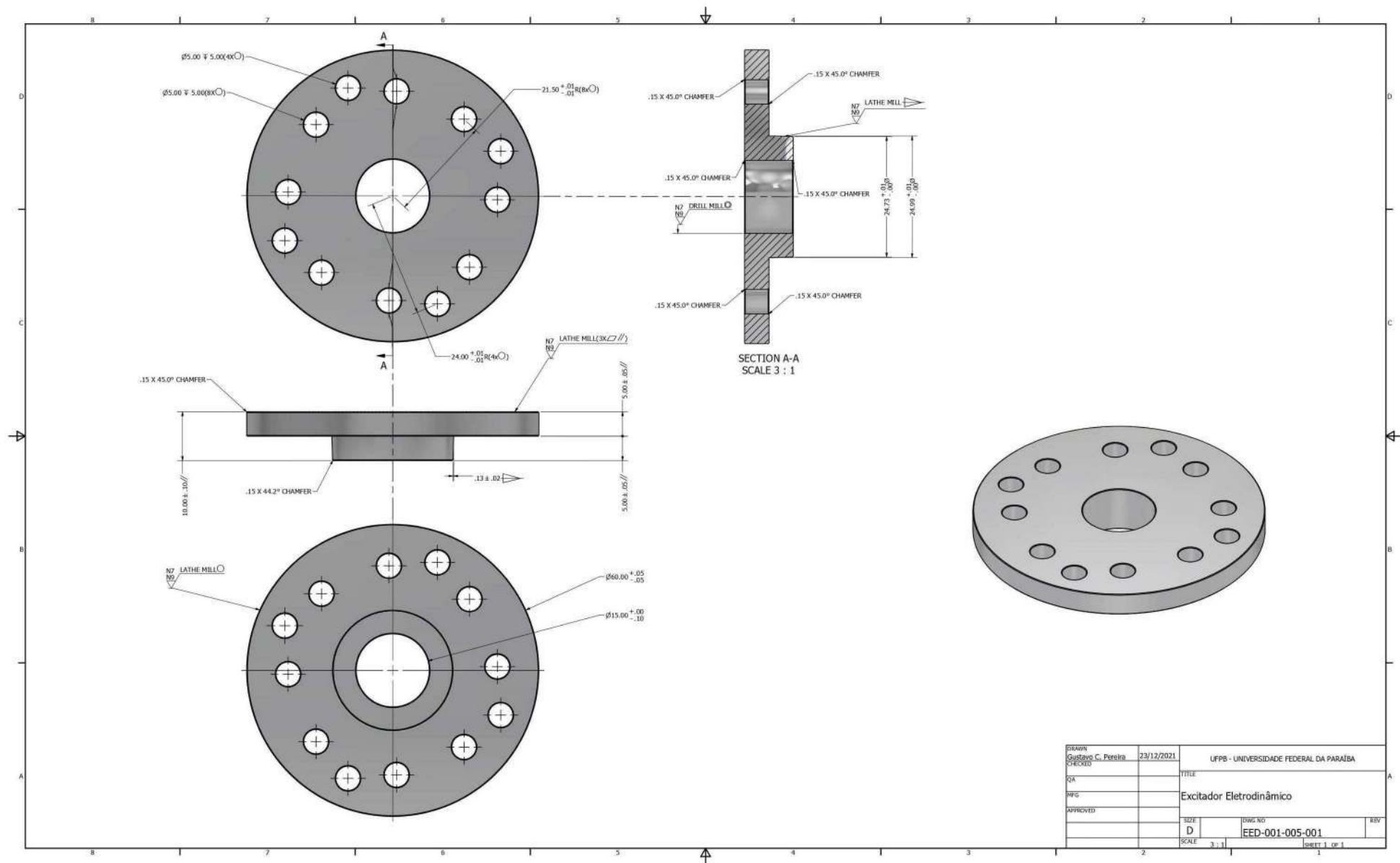
DRAWN	Gustavo C. Pereira	22/12/2021	UFPA - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA
CHECKED			
QA			TITLE
RFIS			Excitador Eletrodinâmico
APPROVED			
			SIZE
			D
			SCALE
			10 : 1
			REV
			EED-001-004-001D
			SHEET 1 OF 1



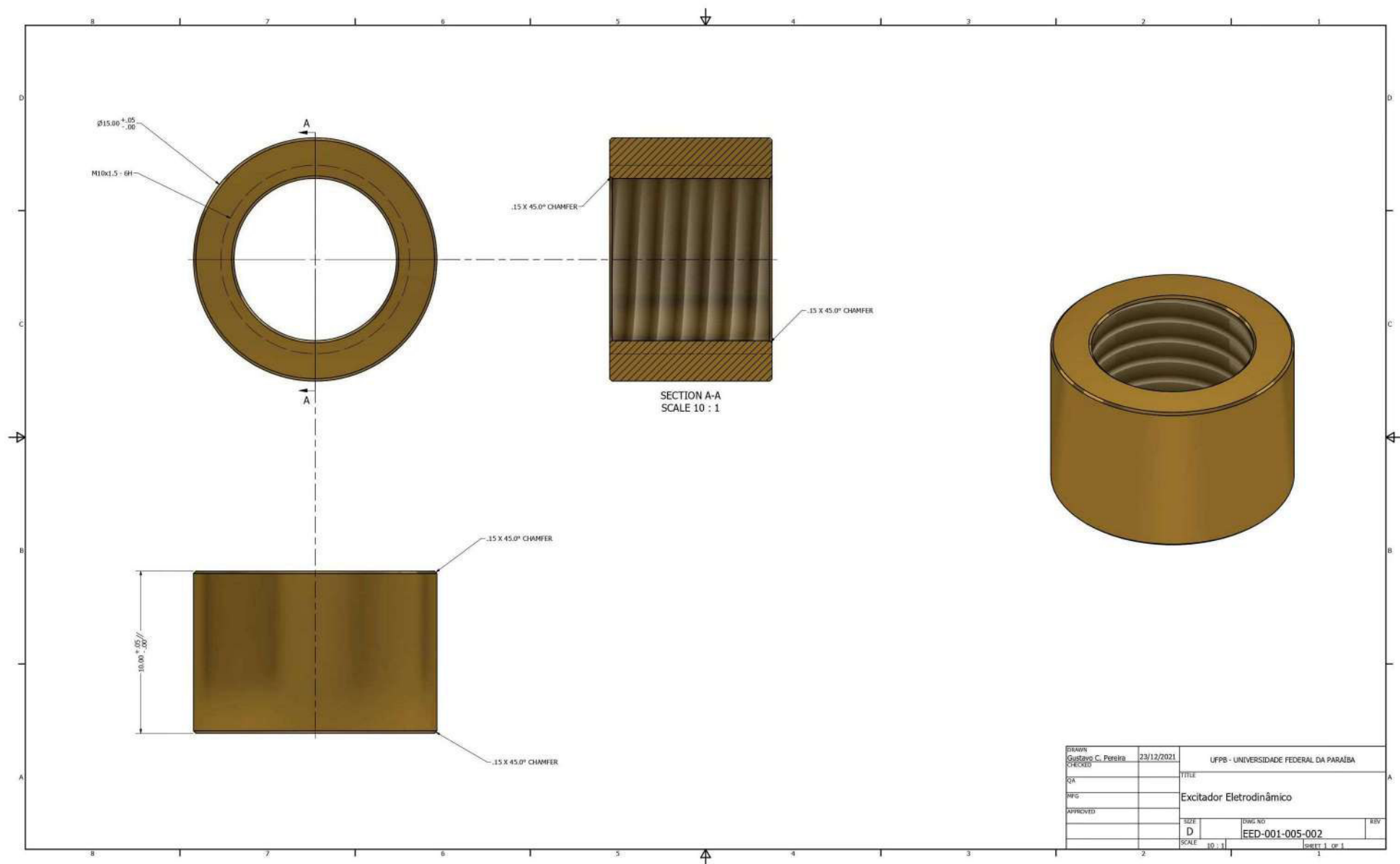


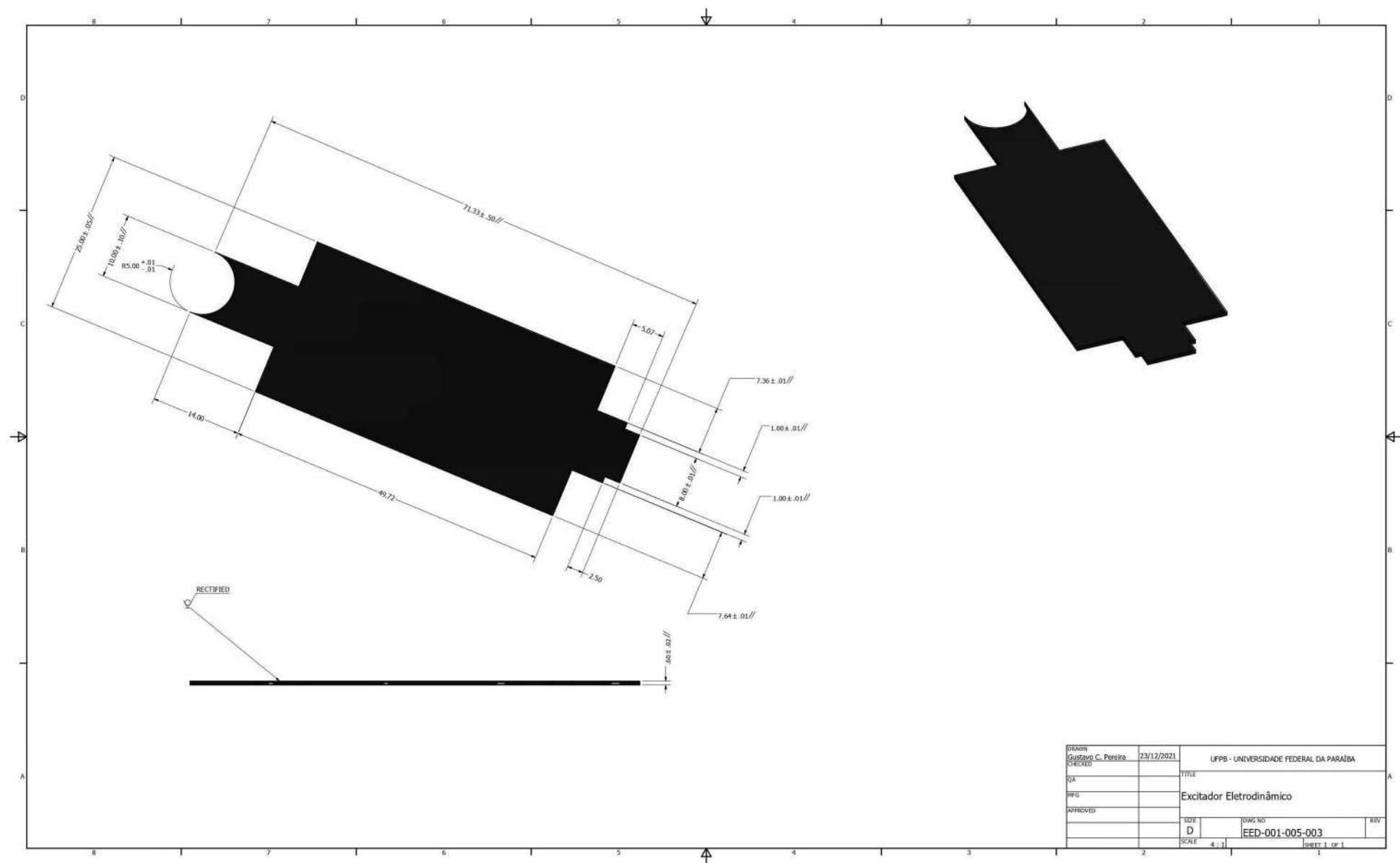


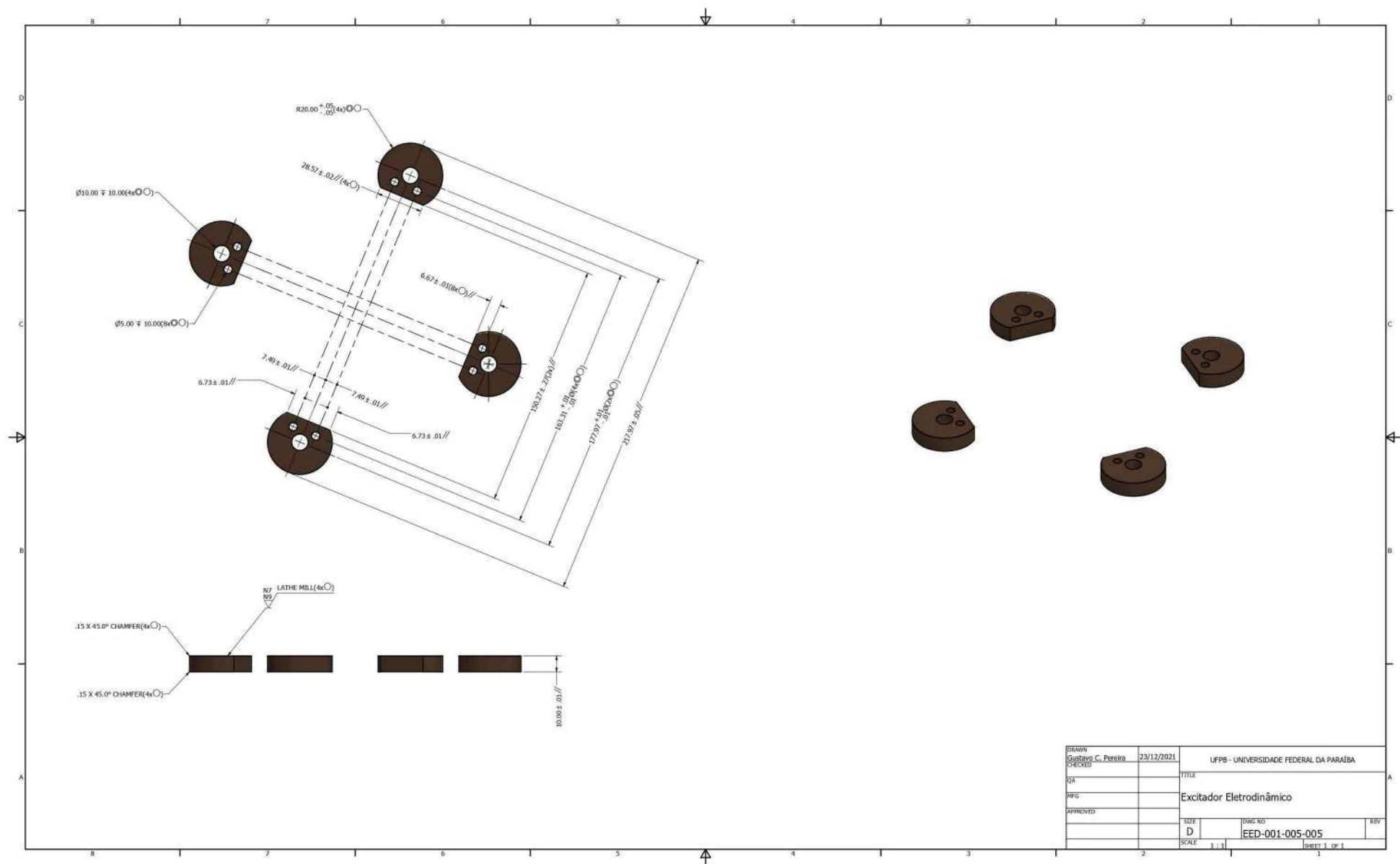
DRAWN	Gustavo C. Pereira	23/12/2021	UFPA - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA
CHECKED			
QA			TITLE
RFG			Excitador Eletrodinâmico
APPROVED			
			SIZE
			D
			DWG NO
			EED-001-004-004
			SCALE
			4 : 1
			SHEET 1 OF 1

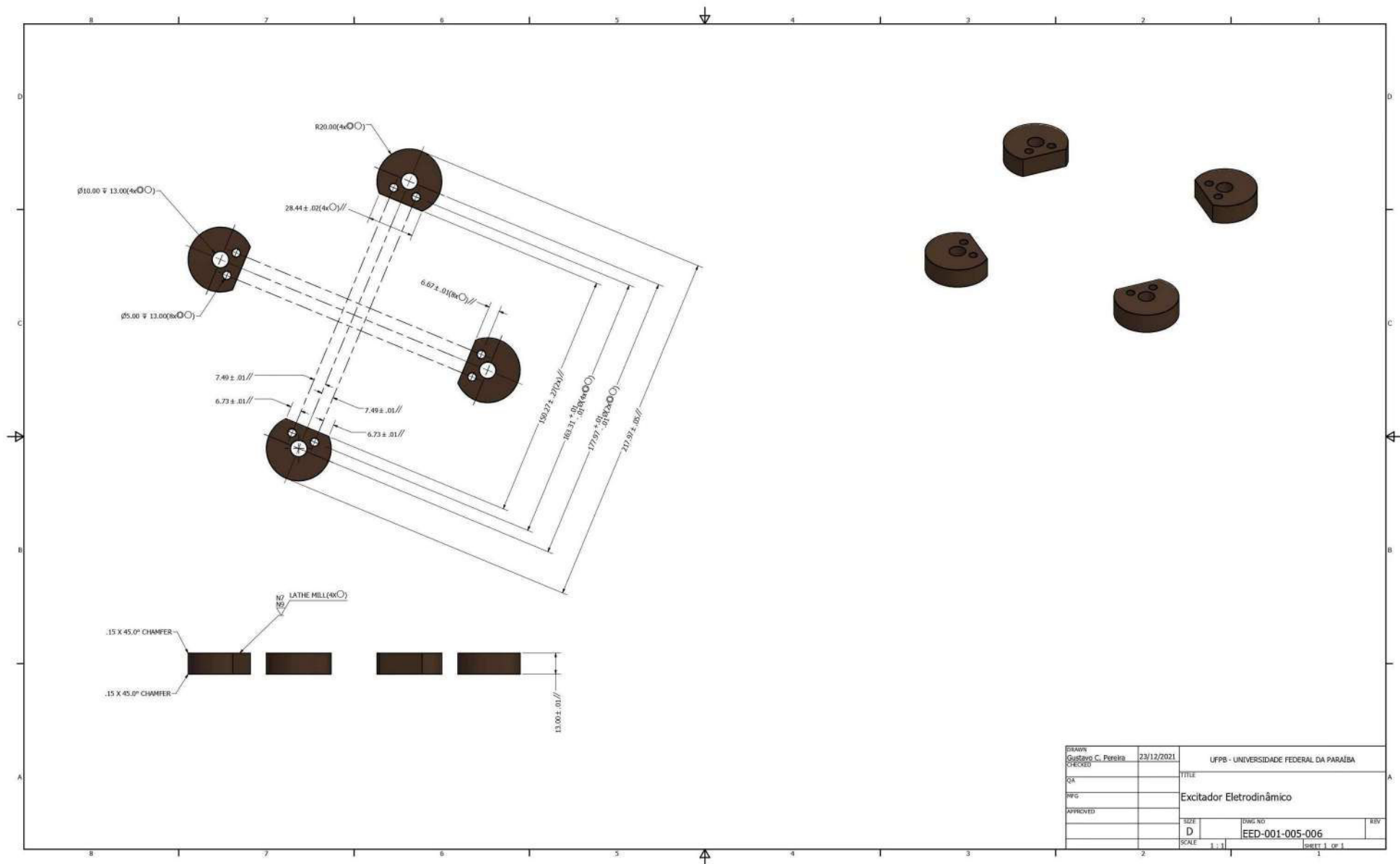


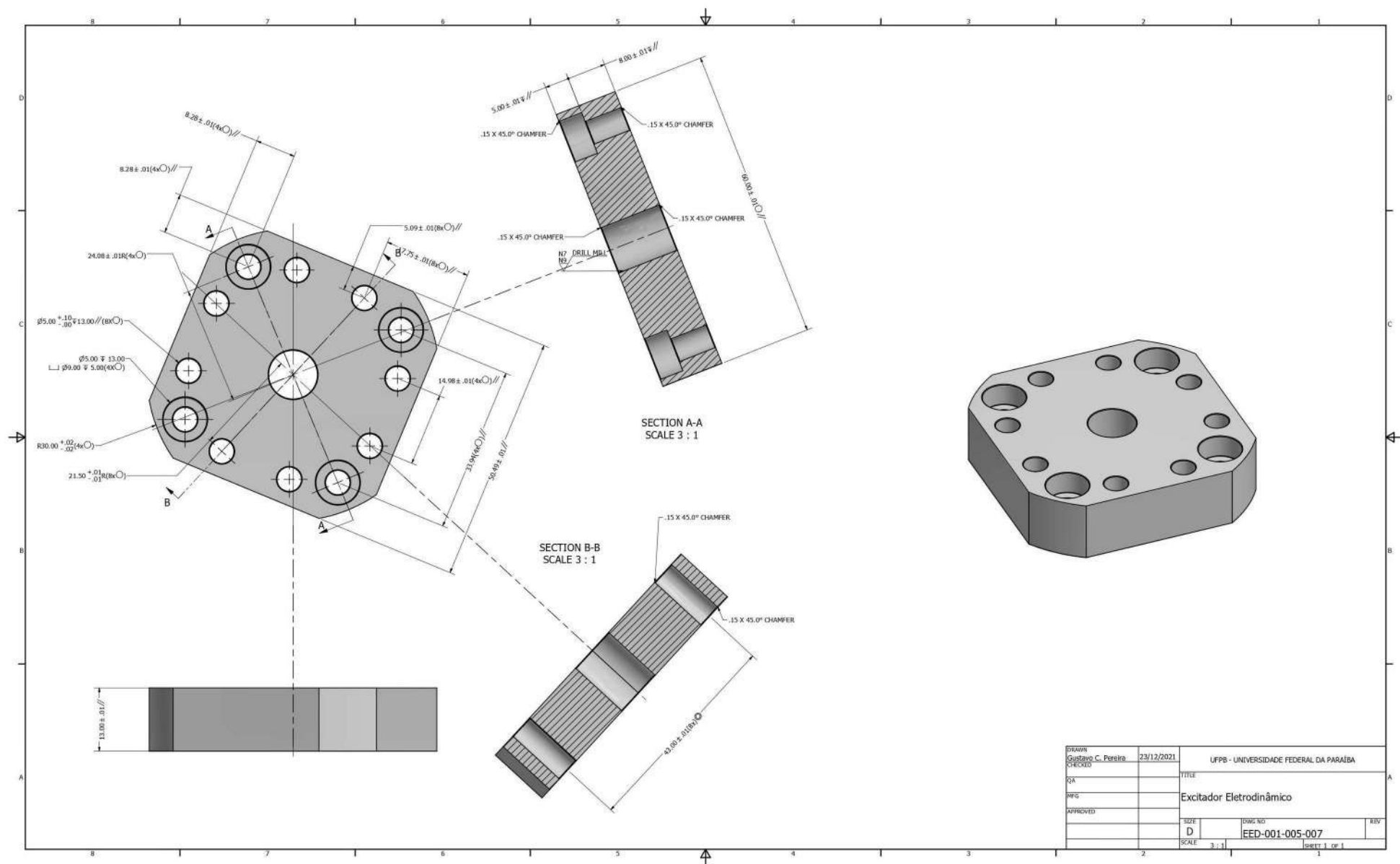
DRAWN	Gustavo C. Pereira	23/12/2021	UFPA - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CHECKED			
QA			TITLE
RFG			Excitador Eletrodinâmico
APPROVED			
SIZE	D	DWG NO	EED-001-005-001
SCALE	3 : 1	REV	1 OF 1

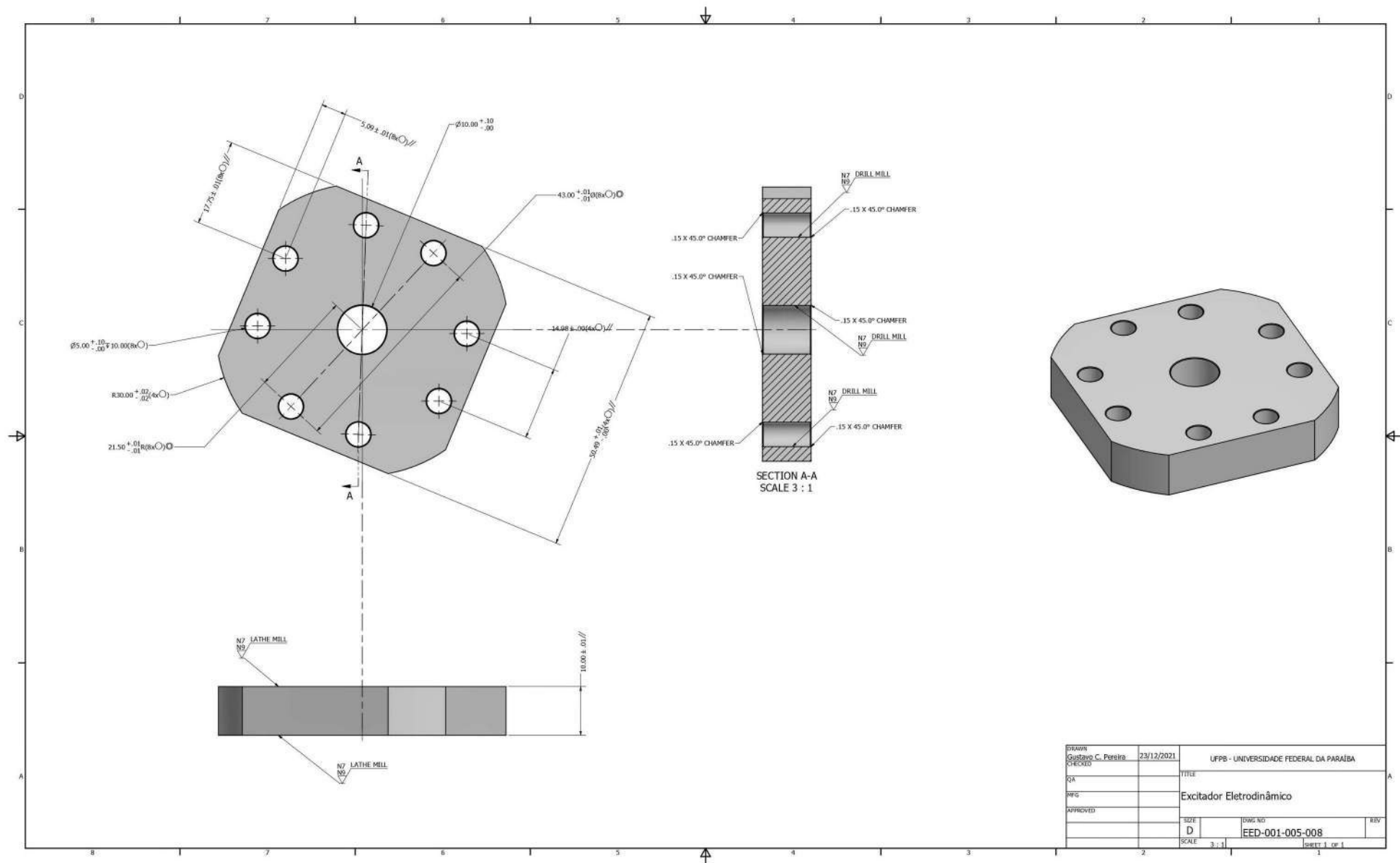












STABN	Gustavo C. Pereira	23/12/2021	UFPA - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA
CHECKED			
QA			TITLE
RFIS			Excitador Eletrodinâmico
APPROVED			
SIZE	D	DWG NO	EED-001-005-008
SCALE	3 : 1	SHEET	1 OF 1