

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA

FABIO ZI RUN YAN

**Uso de Excitação Multidirecional como Estratégia para Redução de Casos de "No Fault Found"
(NFF) em Sistemas Aeronáuticos**

São João da Boa Vista
2025

FABIO ZI RUN YAN

**Uso de Excitação Multidirecional como Estratégia para Redução de Casos de "No Fault Found"
(NFF) em Sistemas Aeronáuticos**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de
Curso de Graduação em ENGENHARIA AERO-
NÁUTICA do Campus de São João da Boa Vista,
Universidade Estadual Paulista, como parte dos re-
quisitos para obtenção do diploma de Graduação
em ENGENHARIA AERONÁUTICA .

Orientador: Profº Dr. Éder Luiz Oliveira

Coorientador: Engº Guilherme de Carvalho Si-
queira

São João da Boa Vista

2025

Y21u	Yan, Fabio Zi Run Uso de excitação multidirecional como estratégia para redução de casos de "no fault found" (nff) em sistemas aeronáuticos / Fabio Zi Run Yan. -- São João da Boa Vista, 2026 73 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Aeronáutica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista Orientador: Éder Luiz Oliveira Coorientador: Guilherme de Carvalho Siqueira 1. aviões manutenção e reparos. 2. gestão da segurança. 3. sistemas de comando e controle. 4. vibração. I. Título.
------	---

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AERONÁUTICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**USO DE EXCITAÇÃO MULTIDIRECIONAL COMO ESTRATÉGIA PARA
REDUÇÃO DE CASOS DE NO FAULT FOUND (NFF) EM SISTEMAS
AERONÁUTICOS**

Aluno: Fabio Zi Run Yan
Orientador: Prof. Dr. Éder Luiz Oliveira

Banca Examinadora:

- Éder Luiz Oliveira (Orientador)
- Denilson Paulo Souza dos Santos (Examinador)
- Wilian Miranda Dos Santos (Examinador)

Os formulários de avaliação e a ata da defesa, na qual consta a aprovação do trabalho, devidamente assinados pela banca encontram-se no prontuário eletrônico do aluno.

São João da Boa Vista, 09 de dezembro de 2025

DADOS CURRICULARES

FABIO ZI RUN YAN

NASCIMENTO 08/07/2000 - Ubatuba/SP

FILIAÇÃO Yan Shi Ming
Chen Chunli

2025 / ATUAL Estágio em Engenharia Mecânica
GSE VIVA AER

2020 / ATUAL Engenharia Aeronáutica
UNESP

Dedico este trabalho aos meus pais e à minha família, pelo amor, apoio e exemplo que sempre me inspiraram a seguir com determinação e entusiasmo, e à minha namorada, pela paciência, compreensão e incentivo constantes ao longo de toda a trajetória acadêmica. A todos, minha profunda gratidão e admiração.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Dr. Éder Luiz e ao Engenheiro Guilherme Siqueira pela orientação dedicada e constante ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Sou profundamente grato pelo compartilhamento generoso de conhecimentos, pelo apoio nas etapas mais desafiadoras.

“O importante é não parar de questionar. A curiosidade tem sua própria razão de existir.”
(Albert Einstein)

RESUMO

As aeronaves modernas estão cada vez mais equipadas com sistemas eletrônicos embarcados de controle e comando, sensores e computadores de bordo, constituindo sistemas mais modernos e automatizados, que exigem menor esforço do piloto e aumentam a eficiência operacional. Entretanto, essas unidades eletrônicas estão sujeitas a falhas intermitentes ao longo do percurso devido a condições de voo, como vibrações, variações de temperatura e de tensão. Muitas dessas falhas não se manifestam quando são submetidas a testes de bancada convencionais em solo, em que geralmente se utilizam excitações unidirecionais, não acusando defeitos no componente, resultando no problema clássico de *No Fault Found* (NFF). Este problema acarreta sérios impactos para a manutenção aeronáutica, elevando custos, ampliando o tempo de inatividade das aeronaves e potencializando os riscos à gestão de segurança. Dessa forma, foi desenvolvida uma bancada de teste proposta e modelada em ambiente CAD, capaz de realizar ensaios com excitação multidirecional, que se integra à plataforma Spherea ATEC 7, com o objetivo de aumentar a representatividade dos testes em relação às condições reais de operação e, conseqüentemente, contribuir para a redução dos casos de NFF. A bancada proposta foi concebida em conformidade com as normas internacionais aplicáveis aos ensaios ambientais e de vibração em sistemas aeronáuticos, assegurando coerência técnica, reprodutibilidade dos ensaios e alinhamento com as práticas adotadas pela indústria aeronáutica.

PALAVRAS-CHAVE: sistemas de comando e controle; gestão de segurança; vibração; aviões manutenção e reparos.

ABSTRACT

Modern aircraft are increasingly equipped with onboard electronic control and command systems, sensors, and computers, constituting more modern and automated systems that require less pilot effort and increase operational efficiency. However, these electronic units are subject to intermittent failures throughout the flight due to flight conditions such as vibrations, temperature, and voltage variations. Many of these failures do not manifest themselves when subjected to conventional ground bench tests, where unidirectional excitations are generally used, failing to detect component defects, resulting in the classic No Fault Found (NFF) problem. This problem has serious impacts on aircraft maintenance, increasing costs, extending aircraft downtime, and increasing risks to safety management. Therefore, a proposed test bench, modeled in a CAD environment, capable of performing tests with multidirectional excitation, was developed and integrated into the Spherea ATEC 7 platform to increase the representativeness of the tests in relation to real operating conditions and, consequently, contribute to the reduction of NFF cases. The proposed test bench was designed in accordance with international standards applicable to environmental and vibration testing in aeronautical systems, ensuring technical consistency, reproducibility of tests, and alignment with practices adopted by the aeronautical industry.

KEYWORDS: command and control systems; safety management; vibration; aircraft maintenance and repairs.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Excitador Eletromecânico	22
Figura 2 –	Excitador Eletromagnético	22
Figura 3 –	Excitador Eletro-Hidráulico	23
Figura 4 –	Excitador de Massa Excêntrica	23
Figura 5 –	Martelo de Impacto	24
Figura 6 –	Impacto por Pêndulo Grande	24
Figura 7 –	Excitação por Martelo Instrumental	25
Figura 8 –	Excitação Senoidal	26
Figura 9 –	Excitação Multiaxial	27
Figura 10 –	ATEC SÉRIE 7	33
Figura 11 –	Comparação OEM e IN-HOUSE MAINTENANCE	33
Figura 12 –	Bancada de Teste Protótipo	36
Figura 13 –	Bancada de Teste Proposta	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Comparação entre os tipos de excitação.....	29
------------	---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

NFF	No Fault Found
NTF	No Trouble Found
NPF	No Problem Found
3D	3 Dimensões
FRF	Função de Resposta em Frequência
RTCA	Radio Technical Commission for Aeronautics
EUROCAE	European Organization for Civil Aviation Equipment
DOD	Department of Defense
FAA	Federal Aviation Administration
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
EASA	European Union Aviation Safety Agency
CAD	Computer-Aided Design
MIL-STD-810H	Military Standard 810H
AC	Advisory Circular
EQF	Environmental Qualification Form
OEM	Original Equipment Manufacturer
TAT	Turn Around Time
LRU	Line Replaceable Unit
ELAC	Elevator Aileron Computer
FDA	Flight Data Acquisition
CFDs	Centralized Fault Display System

LISTA DE SÍMBOLOS

ζ	Fator de amortecimento
ω	Frequência natural

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Motivação	15
1.2	Objetivos	17
1.2.1	Objetivo Geral	17
1.2.2	Objetivos Específicos	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Introdução ao NFF	18
2.2	Causas e Consequências do Fenômeno NFF	18
2.3	Casos de No Fault Found na Indústria Aeronáutica	19
2.3.1	Cabos Elétricos	19
2.3.2	Estruturas de Estabilizadores	19
2.3.3	Computador de Comando de Voo da Família Airbus	19
2.4	Ensaio Unidirecionais	20
2.5	Ensaio Multidirecionais	20
2.6	Aplicação na Indústria Aeronáutica	21
2.7	Introdução à análise modal	21
2.8	Fundamentos da excitação estrutural	21
2.8.1	Excitação por Impacto	25
2.8.2	Excitação Senoidal	26
2.8.3	Excitação Aleatória Multiaxial	27
2.8.4	Pseudo Excitação	28
2.8.5	Comparativo das Técnicas	28
2.8.6	Implicação para o diagnóstico de NFF	29
3	METODOLOGIA	30
3.1	Conformidade Normativa	30
3.1.1	RTCA DO-160G - <i>Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment</i>	30
3.1.2	EUROCAE ED-14G	31
3.1.3	MIL-STD-810H - <i>Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests</i>	31
3.1.4	AC 21-16G - <i>Advisory Circular da FAA sobre Environmental Qualification of Airborne Equipment</i>	32
3.2	SPHEREA	32
3.3	Bancada de Testes	34
3.3.1	Bancada de Teste Protótipo	35

3.3.2	Bancada de Teste Proposta	38
4	RESULTADOS	41
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	43
	REFERÊNCIAS	45
	APÊNDICE A – DESENHOS 2D	47

1 INTRODUÇÃO

Segundo o [Khan et al. \(2014\)](#), a manutenção de sistemas aeronáuticos enfrenta cada vez mais desafios, devido ao desenvolvimento e à evolução dos sistemas integrados nas aeronaves mais modernas, à complexidade dos novos sistemas embarcados e à sua integração com os subsistemas mecânicos, eletrônicos e de software. Neste ponto de vista, destaca-se um fenômeno bastante conhecido como *No Fault Found* (NFF), *No Trouble Found* (NTF), *No Problem Found* (NPF); todos esses nomes são equivalentes, mas o mais utilizado é o primeiro. Este fenômeno ocorre quando um problema é detectado pelos computadores a bordo durante a operação de uma aeronave, mas, nos testes em solo, nada pode ser reproduzido ou confirmado. Este é um tipo de problema que acarreta maior custo de investimento na indústria aeronáutica, visto que os equipamentos de teste e o tempo de inatividade das aeronaves para solucioná-lo geram elevado custo e, na maioria das vezes, o problema não é resolvido.

De acordo com [Ungar \(2015\)](#), múltiplos estudos têm mostrado que a frequência de ocorrência de NFF's pode chegar a mais de 60% dos componentes trocados em certos sistemas, como aviônicos. Os casos recorrentes deste tipo afetam significativamente a confiabilidade operacional, pois aumentam o tempo de solo de manutenção e, consequentemente, elevam os custos para os operadores dessas aeronaves.

Conforme [Habtour et al. \(2014\)](#), a excitação em casos recorrentes deste tipo afeta bastante a confiabilidade operacional, uma vez que aumenta o tempo de solo de manutenção e, como consequência, eleva o custo. O multidirecional emerge como uma maneira inovadora e ainda pouco explorada no ramo aeronáutico. Este método baseia-se no uso de estímulos vibracionais ou funcionais em várias direções simultaneamente, com o foco em simular uma condição de voo mais realista possível e, assim, facilitar a detecção de falhas intermitentes. A proposta deste trabalho é examinar o uso dessa técnica como uma opção para mitigar casos de NFF, ampliando o horizonte de métodos de diagnóstico em manutenção.

1.1 MOTIVAÇÃO

O fenômeno conhecido como *No Fault Found* (NFF) constitui um dos principais impasses enfrentados na manutenção aeronáutica moderna. Esses fatos ocorrem quando um componente é retirado de operação por suspeita de falha, porém, nenhum problema é encontrado durante os testes de bancada em solo. O resultado disso está além do desperdício operacional; afeta também, propriamente, a credibilidade do sistema, aumenta os custos de manutenção e compromete a segurança e a disponibilidade das aeronaves.

Uma motivação prática para este estudo vem de relatos recorrentes de falhas intermitentes no sistema SEC (*Spoiler Elevator Computer*) da aeronave Airbus A320. Esse sistema é um dos computadores primários do sistema de controle de voo, sendo responsável pelo comando e monitoramento dos spoilers e pela assistência ao controle dos profundores, atuando de forma integrada aos computadores

ELAC (*Elevator Aileron Computer*).

O SEC desempenha funções cruciais no controle dos movimentos longitudinais (parcialmente em velocidades elevadas) e laterais da aeronave, uma vez que atua diretamente na deflexão dos spoilers, influenciando tanto a estabilidade longitudinal, por meio da interação com os profundores, quanto o controle lateral e direcional, especialmente em regimes de rolagem assistida e durante a atuação diferencial dos spoilers. Além disso, o sistema é responsável pelo controle dos spoilers em voo, pela extensão automática dos spoilers em solo, pela função de *speed brake* e pela contribuição para o amortecimento de oscilações, assegurando a estabilidade e a segurança operacional.

Ademais, o SEC é equipado com rotinas internas de detecção e isolamento de falhas, que utilizam o sistema FDA (*Flight Data Acquisition*) para registrar todos os parâmetros de operação e eventuais anomalias. Esses dados são posteriormente acessados por meio dos sistemas de manutenção, como o CFDs (*Centralized Fault Display System*), auxiliando as equipes técnicas na identificação de falhas. Entretanto, devido à natureza intermitente de determinadas falhas, influenciadas por fatores como vibração, variações térmicas e condições dinâmicas de voo, o SEC pode indicar falhas durante a operação que não se reproduzem em testes em solo, o que resulta em um caso típico de NFF.

Segundo [Khan et al. \(2014\)](#), estudos revelam que os casos de NFF podem representar até 50% dos retornos de dispositivos eletrônicos no setor de aviação. Em outras palavras, em muitos casos, as manutenções são acionadas sem a real necessidade de troca de peças, resultando em despesas desnecessárias e retrabalho. Ademais, [Ungar \(2015\)](#) destaca que a dificuldade de reproduzir falhas intermitentes é uma das maiores barreiras ao diagnóstico eficiente.

Essa dificuldade está relacionada, na maioria das vezes, às deficiências dos métodos de diagnóstico atualmente utilizados. Os ensaios convencionais de bancada, usualmente realizados sob condições controladas e previsíveis, nem sempre são aptos a reproduzir o meio operacional real, caracterizado por diversas variáveis atuarem simultaneamente. Muitos problemas surgem apenas sob condições únicas de estresse térmico, irradiações, vibração em mais de um eixo ou flutuações de carga elétrica - aspectos que raramente são replicados em testes unidimensionais.

Nesse cenário, o conceito de excitação multidirecional ganha destaque. Trata-se de um método que aplica estímulos vibracionais ou funcionais em diversas direções simultaneamente, sempre em busca de replicar o cenário de operação com a maior fidelidade possível ao qual os sistemas estão sujeitos. Segundo [Habtour et al. \(2014\)](#), destacam que ensaios multiaxiais têm maior capacidade de revelar falhas ocultas ou intermitentes, pois podem gerar respostas dinâmicas mais complexas nos componentes testados, resultando em um diagnóstico mais real do voo.

Ainda que esteja pouco difundida na aviação civil, a excitação multidirecional vem sendo utilizada com sucesso em setores como o aeroespacial e o automotivo, nos quais a confiabilidade dos sistemas é crítica. O potencial dessa técnica para reduzir a quantidade de NFF na aviação é relevante, tanto pela sua contribuição para a detecção precoce de falhas quanto pela capacidade de reduzir os custos operacionais e a quantidade de aeronaves ociosas. Além da importância técnica, este estudo é motivado pela busca por soluções mais eficazes para a indústria aeronáutica.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho busca propor um meio alternativo técnico para reduzir a incidência de ocorrências classificadas como *No Fault Found* (NFF) na manutenção aeronáutica. A proposta baseia-se no uso da excitação multidirecional como ferramenta de ensaio, capaz de reproduzir melhor as condições reais de voo operacional, com o objetivo de aprimorar o diagnóstico de falhas intermitentes.

1.2.1 Objetivo Geral

A meta deste trabalho é examinar o potencial da excitação multidirecional como técnica para reduzir a incidência de NFF em sistemas aeronáuticos. O estudo se apoia em análises por meio de revisão bibliográfica, estudo de normas que regem os ensaios e modelagem computacional 3D, com o propósito de verificar se a aplicação de estímulos em diversas direções, como calor, vibração e cargas elétricas, provocaria, nos ensaios de manutenção, a identificação de falhas que não se manifestariam em testes convencionais, possibilitando uma eficácia maior nos futuros diagnósticos.

1.2.2 Objetivos Específicos

Em função de alcançar o objetivo proposto, este trabalho busca, primeiramente, realizar um estudo bibliográfico aprofundando-se no tema *No Fault Found* (NFF), caracterizando suas principais causas, problemas operacionais e as limitações dos meios de detecção atualmente utilizados. Logo, pretende-se estudar as técnicas de excitação aplicadas a ensaios estruturais e a sistemas de diagnóstico, com ênfase na distinção entre abordagens unidirecionais e multidirecionais. Além disso, será desenvolvida uma modelagem computacional que replicará os componentes aeronáuticos, a fim de simular excitações em diferentes direções.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO AO NFF

Segundo [Söderholm \(2007\)](#), o fenômeno NFF é um grande obstáculo periódico na manutenção de sistemas complexos, com grande impacto na aviação em geral, na qual a confiabilidade e a segurança são obrigatórias. Esse fenômeno acontece quando um defeito é avisado pelo sistema ou componente, porém após a análise detalhada e realização de testes de bancada, não apresenta a falha. O NFF causa uma série de problemas operacionais, como tempo de inatividade, custos elevados e incerteza operacional. Em aeronaves, isso é muito crítico, pois um diagnóstico errôneo pode levar à substituição de peça desnecessária, com consequente aumento de custos e redução da disponibilidade.

O NFF é geralmente causado por falhas transientes ou intermitentes; tais condições, por serem únicas, são difíceis de reproduzir em testes convencionais. Isso se deve à complexidade dos sistemas presentes nos aviões, como componentes eletrônicos e sensores, além da interação dinâmica entre diversas partes da aeronave. O gargalo está em identificar a raiz da causa, especialmente quando não ocorre em testes que simulam as condições reais. Por isso, o NFF tem se tornado um foco de estudos, principalmente para buscar novas maneiras de diagnóstico.

2.2 CAUSAS E CONSEQUÊNCIAS DO FENÔMENO NFF

Segundo [Söderholm \(2007\)](#), o fenômeno NFF está atrelado a diversos fatores, sendo que o principal problema reside na dificuldade de reproduzir exatamente as condições de operação que geram as falhas. As falhas intermitentes costumam ocorrer em condições específicas e podem ser provocadas por variações de tensão, vibração, irradiação e temperatura. Essas falhas raramente ocorrem nos testes de bancada, resultando em um sistema. em uma avaliação errônea do estado real do componente ou do sistema.

Ademais, a evolução da complexidade dos sistemas eletrônicos e de controle nas aeronaves também contribui para o aumento da incidência de NFF. A interação entre os sistemas pode gerar falhas que raramente são identificadas pelos testes convencionais. Esses sistemas complexos requerem uma análise multidimensional para identificar o início da falha e avaliar seu impacto no sistema.

As consequências do NFF são variadas e afetam principalmente a área de manutenção de aeronaves. O custo de trocar os componentes ainda em perfeito funcionamento resulta em uma perda significativa de recursos financeiros, como também no aumento da inatividade das aeronaves, provocando uma redução na eficiência e aumento dos custos operacionais. Por fim, a segurança é afetada uma vez que falhas não foram identificadas e podem comprometer a segurança de voo e dos passageiros, ou seja, comprometer a operação toda.

2.3 CASOS DE NO FAULT FOUND NA INDÚSTRIA AERONÁUTICA

2.3.1 Cabos Elétricos

Conforme dados de [Lyu et al. \(2022\)](#), vibrações decorrentes da operação de voo podem provocar perda intermitente de contato em cabos de baixa corrente, resultando em falhas temporárias durante o voo, que raramente são reproduzidas em testes estáticos de manutenção.

No contexto aeronáutico, os chicotes elétricos percorrem longas distâncias por dentro das asas e da fuselagem, especialmente em aeronaves de grande porte, sujeitando-se a ambientes adversos, vibrações contínuas, variações de temperatura e desgaste natural. Em testes de bancadas, as perdas momentâneas de contato ou pequenas descontinuidades podem não ser detectadas; porém, durante os voos, podem gerar transtornos e comprometer a confiabilidade do sistema de navegação e controle. Dessa forma, a necessidade de métodos de ensaios capazes de reproduzir as excitações reais de operação é de extrema importância para que sejam reveladas.

2.3.2 Estruturas de Estabilizadores

O estudo apresentado em [Sakaris, Sakellariou e Fassois \(2017\)](#) revela que ensaios com excitação randômica multiaxial e métodos de modelagem funcional baseados em séries temporais em bancada, em um estabilizador de escala reduzida, permitiram detectar danos estruturais. A técnica utilizada, baseada em *Generalized Functional Model Based Method*, empregando excitação aleatória e análise estatística dos sinais vibracionais, permite detectar fissuras iniciais e localizar danos mesmo com número reduzido de sensores e em uma faixa de frequência limitada.

Em contrapartida, os ensaios que utilizam excitação unidirecional tendem a não detectar os modos acoplados que evidenciam esses danos, gerando falsos diagnósticos, caracterizando o NFF. A relevância prática mostra que os estabilizadores são componentes críticos, pois são os comandos primários das aeronaves. Portanto, o uso de excitação multidirecional e de métodos baseados em excitação aleatória oferece uma ferramenta mais robusta para análises e para manutenção preditiva.

2.3.3 Computador de Comando de Voo da Família Airbus

Os computadores de comando de voo que controlam as aeronaves da família Airbus, responsáveis pelo controle dos *spoilers* e dos profundores, apresentam relatos recorrentes de falhas intermitentes e são removidos por indicação de falhas, mas funcionam normalmente em testes de bancada, caracterizando o fenômeno de NFF. Situações como essa necessitam do uso de sinais de excitação multidirecionais como técnica para melhorar a detecção de falhas intermitentes ou de difícil reprodução em componentes aeronáuticos.

2.4 ENSAIOS UNIDIRECIONAIS

Os ensaios unidirecionais são o tipo mais comum de teste realizado em componentes e sistemas aeronáuticos. Esta maneira aplica vibrações ou estímulos em apenas uma direção, tentando simular, de forma simplificada, as condições de voo. Apesar de esses testes identificarem falhas em sistemas simples ou lineares, apresentam limitações quando se trata de falhas intermitentes ou transitórias, especialmente em sistemas que interagem entre si, como os encontrados em aeronaves modernas.

Segundo [Habtour *et al.* \(2010\)](#), testes unidimensionais não funcionam bem quando aplicados a sistemas em que há interação entre si. Esses testes não consideram a possibilidade de múltiplas incógnitas agirem simultaneamente em direções e intensidades diferentes, o que pode ser crucial para simular condições mais fiéis às reais. O resultado é, geralmente, falhas intermitentes que só se manifestam nessas condições, o que leva ao NFF.

Um exemplo desse tipo, de acordo com [Aykan e Celik \(2009\)](#), foi um estudo comparativo feito entre fadiga induzida por vibração unidirecional e multidirecional em estruturas aeronáuticas (um suporte de dispensador de flare em helicópteros), em que chega à conclusão que testes simultâneos em múltiplos eixos resultam em uma resposta mais precisa, próxima ao real aos efeitos de fadiga e também a suposição de equivalência cumulativa entre os testes não é mais válida para estruturas aeronáuticas complexas.

2.5 ENSAIOS MULTIDIRECIONAIS

O surgimento dos ensaios multidirecionais representa um avanço significativo na análise e detecção de falhas intermitentes em sistemas aeronáuticos. Distintamente dos ensaios unidimensionais, que aplicam estímulos em apenas uma única direção, os ensaios multidirecionais exercem forças e vibrações em múltiplas direções ao mesmo tempo, representadas pelos eixos cartesianos ortogonais x, y e z, replicando com mais precisão as condições de voos reais.

Segundo [Habtour *et al.* \(2010\)](#), a excitação multiaxial, especialmente quando aplicada por sistemas eletrodinâmicos, proporciona um ambiente de ensaios mais realista, pois falhas latentes e intermitentes têm mais chances de se manifestar. O trabalho demonstrou que equipamentos ensaiados sob condições de vibração simultânea nos eixos cartesianos apresentaram taxas de falha maiores e os padrões de desgaste se parecem muito mais com os observados na peça real.

Esse método de ensaios permite que diferentes variáveis e fatores sejam considerados simultaneamente, como vibração, temperatura, pressão e outros estímulos, resultando em ensaios mais eficazes e sensíveis. Ao reproduzir a complexidade operacional de voo, em que múltiplas forças atuam simultaneamente, o ensaio multidirecional é mais adequado para diagnosticar falhas reais do que a abordagem unidirecional.

2.6 APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA AERONÁUTICA

O uso dos ensaios multidirecionais na aviação, em geral, tem potencial para revolucionar os processos de diagnóstico e de manutenção aeronáutica, ao possibilitar o aumento da taxa de sucesso na detecção de falhas intermitentes. Como há diversas variáveis que atuam nos sistemas aeronáuticos, nas quais múltiplos fatores interagem simultaneamente, o ensaio dessas condições durante os testes pode resultar em falhas precoces, o que aumenta a segurança operacional das aeronaves.

Este método de teste reduz consideravelmente os custos operacionais de manutenção, pois os componentes defeituosos são trocados apenas quando detectados, evitando substituições desnecessárias e mantendo a disponibilidade das aeronaves. Além disso, proporciona eficiência em termos de tempo e custo, contribuindo para que a aviação comercial e militar se beneficie de manutenção preditiva e mais eficaz. A evolução dos métodos de diagnóstico contribui positivamente para a manutenção aeronáutica, técnicas como a excitação multidirecional auxiliam os ensaios a responder ao fenômeno NFF.

2.7 INTRODUÇÃO À ANÁLISE MODAL

A análise modal é um método amplamente utilizado na engenharia para estudar o comportamento dinâmico de estruturas mecânicas. Por meio dela, é possível obter dados como as frequências naturais (ω), os modos de vibração e os fatores de amortecimento (ζ), fornecendo informações importantes sobre o comportamento de uma estrutura em resposta a excitações externas. Em estruturas altamente críticas, como no setor aeronáutico, esses dados tornam-se indispensáveis, uma vez que danos estruturais ou a componentes eletrônicos podem comprometer a segurança de toda a operação.

No que diz respeito a falhas intermitentes, como as que caracterizam o fenômeno conhecido como NFF, a análise modal pode fornecer dados poderosos para compreender como determinadas condições dinâmicas podem levar a falhas que não podem ser identificadas por meios convencionais de manutenção. A capacidade de identificar modos específicos de vibração detectáveis apenas em condições específicas de operação está relacionada ao sucesso em detectar comportamentos anômalos que, de outra forma, poderiam passar despercebidos em inspeções convencionais.

2.8 FUNDAMENTOS DA EXCITAÇÃO ESTRUTURAL

A análise modal experimental tem como ponto de partida a excitação estrutural. Refere-se à aplicação controlada de energia mecânica a uma estrutura, com o objetivo de induzir a resposta dinâmica da estrutura. A maneira como essa energia é inserida afeta diretamente os modos a serem acionados e, conseqüentemente, os dados que poderão ser obtidos. De acordo com [Døssing e Firm \(1988a\)](#), os excitadores podem ser classificados em dois tipos: excitadores acoplados e não acoplados.

Excitadores Acoplados:

- Excitadores Eletromecânicos

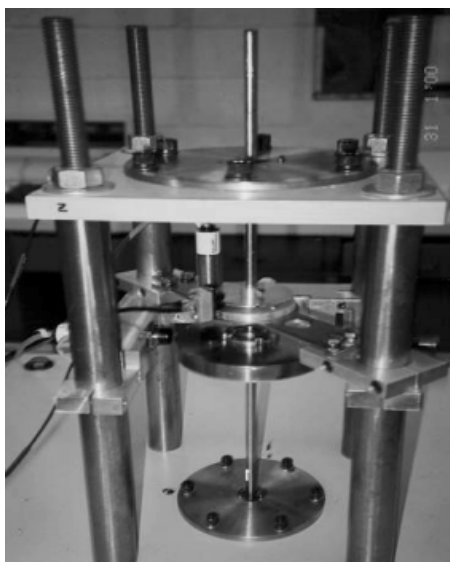
Figura 1 – Excitador Eletromecânico



fonte: (Brüel & Kjær, 2025)

- Excitadores Eletromagnéticos

Figura 2 – Excitador Eletromagnético



fonte: (BESSA *et al.*, 2002)

- Excitadores Eletro-Hidráulicos

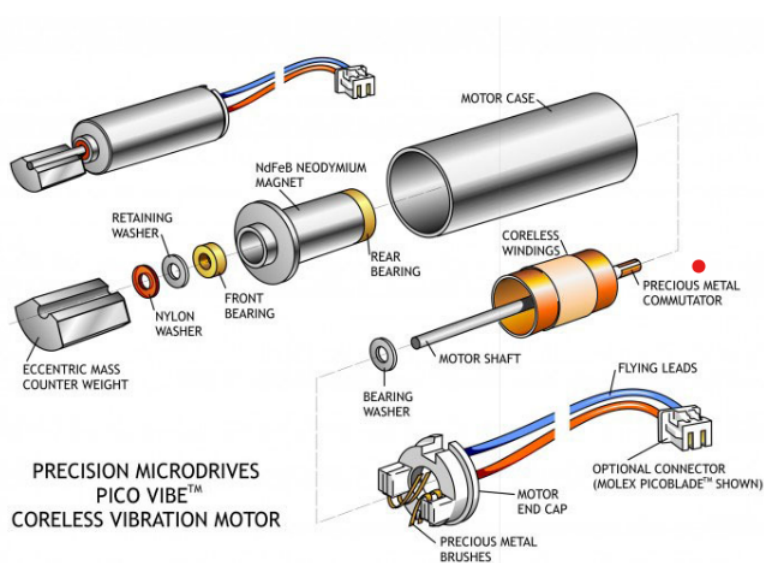
Figura 3 – Excitador Eletro-Hidráulico



fonte: (Sun Hydraulics, 2024)

- Massas Excêntricas Rotativas

Figura 4 – Excitador de Massa Excêntrica



fonte: (Precision Microdrives, n.d.)

Excitadores Não Acoplados:

- Martelos Instrumental

Figura 5 – Martelo de Impacto



fonte: (Brüel & Kjær, 2024)

- Impacto por Pêndulo Grande

Figura 6 – Impacto por Pêndulo Grande



fonte: (Faremec, 2024)

- Cabos Suspensos para Produzir "Snap Back"

As técnicas de excitação mais relevantes podem ser categorizadas em impacto, senoidal, aleatória multiaxial e pseudoaleatória.

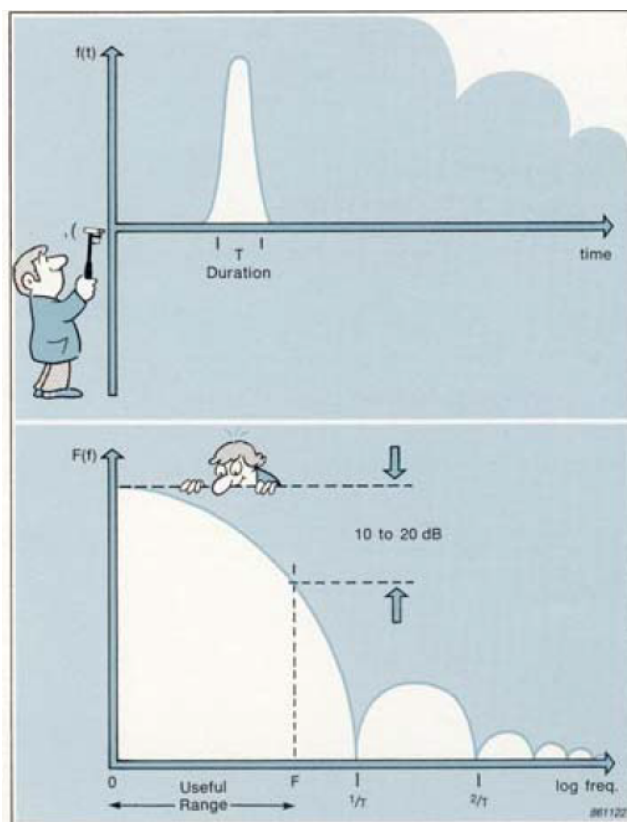
2.8.1 Excitação por Impacto

Uma das maneiras mais tradicionais e acessíveis de conduzir testes modais é por meio da excitação por impacto. Um pulso curto é aplicado em um ponto específico da estrutura com um martelo instrumental. Esse pulso possui uma ampla gama de frequências, o que lhe permite ativar simultaneamente diversos modos de vibração.

Segundo [Døssing e Firm \(1988a\)](#), enquanto a célula de carga no martelo registra o impacto, os acelerômetros monitoram a resposta estrutural em vários pontos. Com essas medições, é possível obter a função de resposta em frequência (FRF), que serve de base para a análise modal. A seguir, temos algumas aplicações para este tipo de excitação:

- Ensaios em campo com a estrutura montada.
- Análise preliminar de componentes aeronáuticos (como tampas, painéis e caixas eletrônicas).
- Ambientes com pouco espaço ou recursos limitados.

Figura 7 – Excitação por Martelo Instrumental



fonte: [\(DØSSING; FIRM, 1988b\)](#)

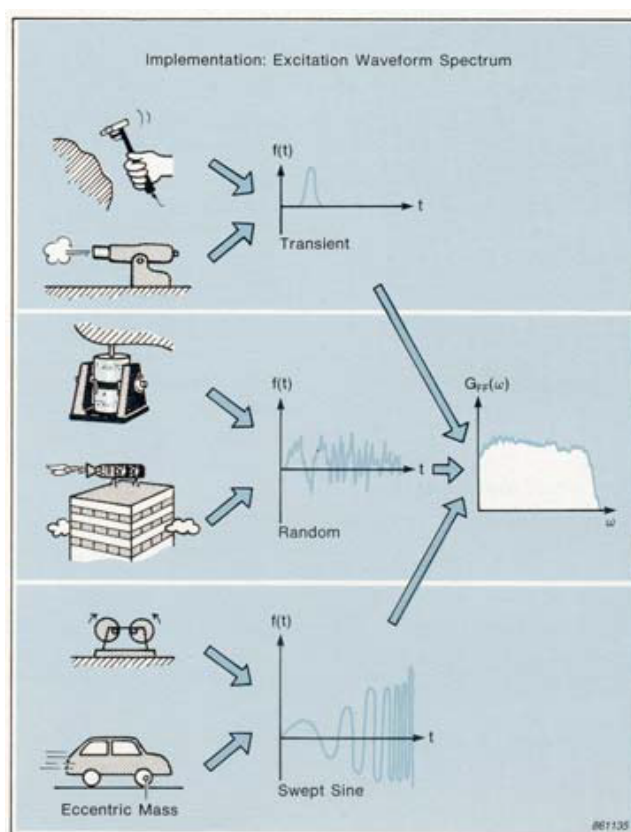
2.8.2 Excitação Senoidal

A excitação senoidal consiste na aplicação contínua de sinais senoidais por meio de dispositivos chamados excitadores (*shakers*). Esse método permite a análise do comportamento dinâmico da estrutura em regime permanente, por meio de varredura de frequência controlada. É especialmente eficaz quando se pretende isolar e analisar um modo específico com alta precisão.

Segundo [Døssing e Firm \(1988a\)](#), a excitação senoidal proporciona uma excelente relação sinal/ruído, tornando-se ideal para análises mais detalhadas. No entanto, sua desvantagem está na necessidade de varrer a faixa de frequência ponto a ponto, o que prolonga o tempo de teste. A seguir, temos algumas aplicações para este tipo de excitação:

- Caracterização detalhada de estruturas com modos bem definidos.
- Ensaios laboratoriais com controle rigoroso do ambiente.
- Estudo de componentes críticos como suportes estruturais ou placas eletrônicas.

Figura 8 – Excitação Senoidal



fonte: [\(DØSSING; FIRM, 1988b\)](#)

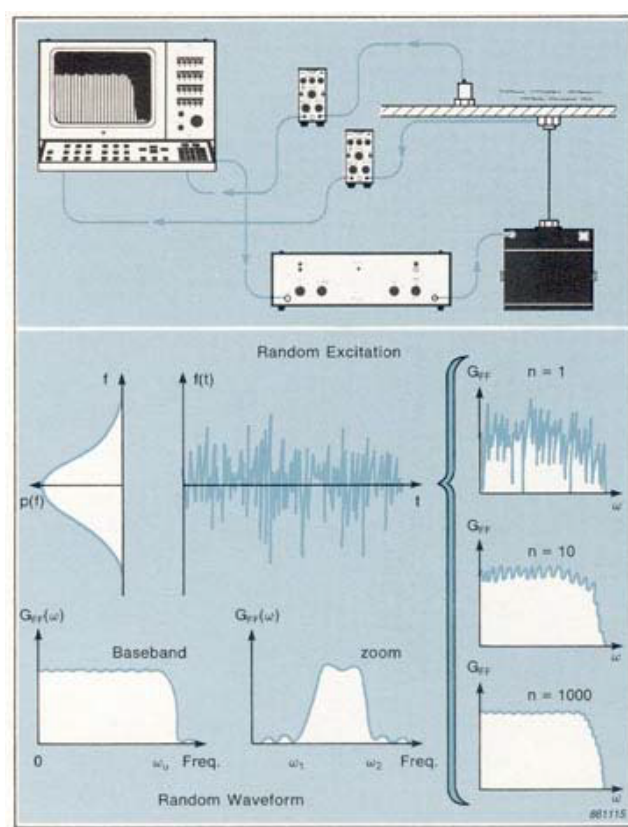
2.8.3 Excitação Aleatória Multiaxial

Nesta metodologia, sinais de ruído branco ou rosa são enviados simultaneamente a vários pontos e direções, por meio de *shakers* sincronizados. Isso possibilita a reprodução precisa das condições operacionais reais de voo, nas quais os componentes estão expostos a vibrações complexas em múltiplos eixos.

De acordo com [Habtour et al. \(2014\)](#), esse tipo de excitação é ideal para revelar modos acoplados e falhas que só se manifestam em cenários dinâmicos realistas. A excitação multidirecional é fundamental para uma avaliação sólida da integridade estrutural em aeronáutica, como nas fuselagens e nos sistemas de controle. Abaixo, temos algumas aplicações para este tipo de excitação:

- Ensaios com protótipos de aeronaves e drones.
- Validação de componentes sob cargas realistas.
- Detecção de falhas intermitentes em sistemas embarcados.

Figura 9 – Excitação Multiaxial



fonte: [\(DØSSING; FIRM, 1988b\)](#)

2.8.4 Pseudo Excitação

De acordo com Wu e Li (2015), o pseudoexcitamento consiste em uma forma de onda pseudoaleatória, gerada por algoritmos que produzem sinais aleatórios, mas que podem ser reproduzidos de forma consistente. Esse tipo de ensaio é bastante utilizado em testes de vibração e em ensaios estruturais, permitindo reproduzir uma vasta faixa de frequências e simulando de forma realista as condições de operação de sistemas aeronáuticos. Esse método apresenta algumas vantagens e desvantagens para ser utilizado.

- Vantagens:
 - Aumenta a eficiência dos testes, pois permite a excitação simultânea de várias frequências.
 - Reproduzível, garantindo consistência entre os ensaios.
 - Favorece a detecção de falhas intermitentes, que podem passar despercebidas em testes senoidais ou unidirecionais.
 - Permite simular, de forma aproximada, condições reais de voo, oferecendo controle elevado sobre o espectro aplicado.
- Desvantagens
 - Necessidade de equipamentos de última geração.
 - Análise dos resultados mais complexos devido às múltiplas frequências.
 - Custo elevado e demora na configuração inicial do ensaio.

Conforme Lin, Zhang e Zhao (2011), as características apresentadas são adequadas para conduzir estudos em bancadas de testes do fenômeno NFF, contribuindo para reduzir a incidência de falhas não detectadas pelos métodos tradicionais.

2.8.5 Comparativo das Técnicas

A tabela I relaciona alguns critérios de análise para cada tipo de formato de onda, permitindo a escolha daquele que atenda aos seus requisitos de ensaios de bancada. Com base nos critérios da tabela I, podemos escolher o melhor formato de onda que se adequa melhor ao ensaio de bancada para o diagnóstico do NFF.

A natureza imprevisível e tipicamente não linear dessas falhas nos equipamentos exige um método de excitação capaz de revelar anomalias sutis no comportamento dinâmico do sistema e, ao mesmo tempo, rápido. A avaliação dos dados apresentados demonstra que sinais como o senoidal e o de impacto apresentam limitações significativas, enquanto o sinal pseudoaleatório atende melhor aos requisitos da solução do NFF. O sinal senoidal não é viável devido à sua lentidão na captura de eventos intermitentes, e o sinal de impacto por sua falta de detecção de não linearidades.

Logo, analisando as possibilidades de forma de onda, o pseudossinal é o mais adequado para os testes devido à sua rapidez e à detecção de não linearidade, além de evitar vazamento de energia em sua análise espectral, o que permite uma caracterização mais confiável e precisa dos dados e das falhas.

Tabela 1 – Comparação entre os tipos de excitação

Formas de onda Critério	Impacto	Aleatória Multiaxial	Senoidal	Pseudo Aleatória	Aleatória
Análise de velocidade	Mais rápido	Lento	Muito lento	Rápido	Lento
Erro por vazamento	Não	Sim	Sim	Não	Sim
Aproximação linear	Não	Alguns	Não	Não	Sim
Razão S/N do fator de crista	Ruim	Razoavelmente ruim	Bom	Razoável	Razoável
Controle do espectro	Limitado	Limitado	Alto	Alto	Alto
Análise de zoom γ^2	Não	Não	Sim	Sim	Sim
Detecção de não linearidade γ^2	Não	Sim	Não	Não	Sim
Detecção de vazamentos	Não	Sim	Não	Não	Sim

fonte: (DØSSING; FIRM, 1988b)

2.8.6 Implicação para o diagnóstico de NFF

Em sistemas aeronáuticos, falhas intermitentes são particularmente arriscadas. Elas desafiam as abordagens convencionais de manutenção preditiva, uma vez que nem sempre deixam rastros visíveis ou reproduzíveis. Quando um componente apresenta falha durante a operação, mas é aprovado nos testes de bancada, configura-se um exemplo clássico de *No Fault Found*.

A análise modal, particularmente com excitação pseudoaleatória, apresenta-se como uma opção promissora para identificar essas falhas ocultas. Por permitir a ativação simultânea de múltiplos modos, essa abordagem aumenta significativamente a sensibilidade do diagnóstico. Além disso, ao simular as condições reais de voo, ela reduz a probabilidade de subdiagnóstico.

3 METODOLOGIA

3.1 CONFORMIDADE NORMATIVA

A realização de vibração e de ensaios ambientais em equipamentos de avião é rigorosamente controlada e crítica para a segurança operacional. A complexidade e a criticidade dos sistemas embarcados demandam que os testes reproduzam as condições operacionais reais o mais próximo possível. Dessa forma, normas internacionais amplamente reconhecidas foram criadas para fornecer métodos padronizados que garantam a consistência, a confiabilidade e a validade dos ensaios, reduzindo os riscos à segurança das aeronaves, dos tripulantes e dos passageiros. O setor aeronáutico é extremamente regulado e registrado, e qualquer falha não detectada em processos de ensaios resultaria em consequências catastróficas.

A adoção de normas estabelecidas por entidades como a **RTCA** (*Radio Technical Commission for Aeronautics*), a **MIL-STD-810H** (*Military Standard 810H*) a **EUROCAE** (*European Organization for Civil Aviation Equipment*), o **DOD** (*Department of Defense*) e a **FAA** (*Federal Aviation Administration*) assegura que os ensaios conduzidos em laboratórios sejam fiéis às condições reais. Essas normas não apenas demonstram metodologias de testes, mas também estabelecem critérios objetivos de aceitação e rejeição, parâmetros de configuração de equipamentos de teste e instruções detalhadas sobre as condições ambientais a serem simuladas. O alinhamento conceitual com essas normas permite que os resultados obtidos tenham validade internacional, facilitando a certificação em diferentes mercados e reforçando a confiabilidade de fabricantes, operadores e autoridades regulatórias.

Ademais, em um avanço e crescimento da complexidade dos sistemas embarcados e da globalização do setor aeronáutico, a padronização de normas facilita a comparação de resultados entre diferentes laboratórios e países, reduzindo os custos de certificação, evitando retrabalho e aumentando a confiabilidade dos ensaios. A importância da padronização garante que os ensaios sigam critérios rígidos e representativos, evitando o mascaramento de falhas intermitentes, resultando na liberação de equipamentos que apresentam problemas não detectados em condições reais de operação.

Este trabalho não aplicará todas as normas na íntegra, mas se alinhará conceitualmente aos princípios e às recomendações de cada uma, de modo a garantir relevância técnica, consistência metodológica e legitimidade científica, mantendo os procedimentos de ensaios dentro do padrão internacionalmente aceito.

3.1.1 RTCA DO-160G - *Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment*

Esta norma é a principal referência global para ensaios ambientais de equipamentos embarcados em aeronaves. A norma já está na sua 7ª versão, desde seu lançamento em 1970, incorporando as práticas mais recentes da indústria aeronáutica.

A norma abrange diversos aspectos das condições ambientais, incluindo temperatura, umidade,

altitude, choque, vibração, poeira e compatibilidade magnética. Abordando em relação à vibração, a DO-160G estabelece perfis padronizados para cada região da aeronave, como a cabine, as asas, a fuselagem e os compartimentos dos motores. Dentre os ensaios mais impactantes estão incluídos vibração senoidal, que excita o equipamento com frequências senoidais para identificar ressonâncias, vibração randômica, que simula vibrações com excitações aleatórias e, por último, choque operacional, que reproduz impactos bruscos típicos de manobras ou pousos.; vibração randômica, que simula vibrações com excitações aleatórias;

Cada perfil baseia-se em medições reais de voo, garantindo que os ensaios em bancadas sejam representativos das condições operacionais. Segundo Söderholm (2007), essa característica é essencial para projetos que investigam falhas intermitentes, pois garante maior confiabilidade e reduz a ocorrência de NFF. O uso da DO-160G permite que todos os ensaios sejam realizados conforme os padrões, ainda que nem todos os testes previstos sejam executados integralmente.

3.1.2 EUROCAE ED-14G

Esta norma é equivalente à DO-160G, desenvolvida para assegurar a conformidade das regulamentações entre os Estados Unidos e a Europa. O conteúdo técnico é idêntico, permitindo que uma norma seja aprovada pela outra.

A ED-14G também trata de ensaios ambientais, incluindo vibração, choque, temperatura, altitude, umidade e compatibilidade magnética. A compatibilidade entre as normas reduz a duplicidade de testes, economiza tempo e custos de certificação e fortalece a padronização global do setor aeronáutico.

3.1.3 MIL-STD-810H - *Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests*

Esta norma foi desenvolvida pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos e é reconhecida por sua abrangência e rigor técnico. Inicialmente voltada para a aviação militar, sua aplicação se expandiu para a aviação civil devido à robustez dos procedimentos descritos.

Segundo UNITED STATES. Department of Defense (2019), a norma em destaque é a do **Método 527.2**, que trata de vibração multidirecional. Diferentemente dos testes unidirecionais, que utilizam apenas um excitador de um grau de liberdade, este método aplica uma excitação simultânea a três graus de liberdade, replicando, com maior realismo, as vibrações observadas em situações reais de voo. De acordo com (SÖDERHOLM, 2007), a abordagem multidirecional permite identificar falhas que poderiam passar despercebidas em ensaios convencionais, sendo especialmente relevante para reduzir a incidência de NFF.

Além disso, a norma **MIL-STD-810H** contempla cenários extremos, como turbulência severa, pousos bruscos e transporte em terrenos acidentados, proporcionando uma base técnica robusta para a avaliação da resistência e da confiabilidade de sistemas aeronáuticos cada vez mais sofisticados. Além disso, ela complementa os ensaios civis de outras normas, como a **DO-160G** e a **ED-14G**, agregando

ainda mais segurança às operações de aeronaves. a avaliação da resistência e da confiabilidade de sistemas aeronáuticos

3.1.4 AC 21-16G - *Advisory Circular da FAA sobre Environmental Qualification of Airborne Equipment*

A AC 21-16G, publicada pela *Federal Aviation Administration (FAA)*, é uma circular orientativa que fornece instruções para a aplicação da DO-160G e ED-14G em processos de certificação aeronáutica. Ao contrário das normas, que determinam os procedimentos passo a passo dos ensaios, a circular orientativa trata de como interpretar e registrar os ensaios, garantindo a qualidade e a validade técnica e regulatória.

Um detalhe crucial deste documento é o *Environmental Qualification Form (EQF)*, que padroniza a documentação das condições de testes, dos resultados e das evidências de conformidade. Conforme Söderholm (2007), alinhar a metodologia do projeto a esta circular garante que, mesmo sem realizar todos os ensaios e testes, o trabalho permanece em conformidade com as normas reconhecidas internacionalmente, aumentando a robustez e a legitimidade científica.

3.2 SPHEREA

O desenvolvimento de bancadas de teste capazes de detectar NFF é de extrema importância para o avanço da indústria aeronáutica. Não apenas o uso de tipos e métodos de vibração garante que os ensaios em solo sejam bem-sucedidos. Dessa forma, o ATEC Series 7, conforme mostrado na Figura 10, desenvolvido pela empresa SPHEREA, representa uma bancada de teste que atende às normas ambientais e de vibração aplicáveis a equipamentos aeronáuticos SPHEREA (2025). Este modelo é um banco de testes modular e reconfigurável, utilizado por companhias aéreas, fabricantes e centros de manutenção para a qualificação de sistemas eletrônicos embarcados. Sua principal função é reproduzir condições controladas de ambientes e operações complexas, garantindo que os equipamentos testados atendam aos requisitos de confiabilidade e segurança estabelecidos pelo setor aeronáutico.

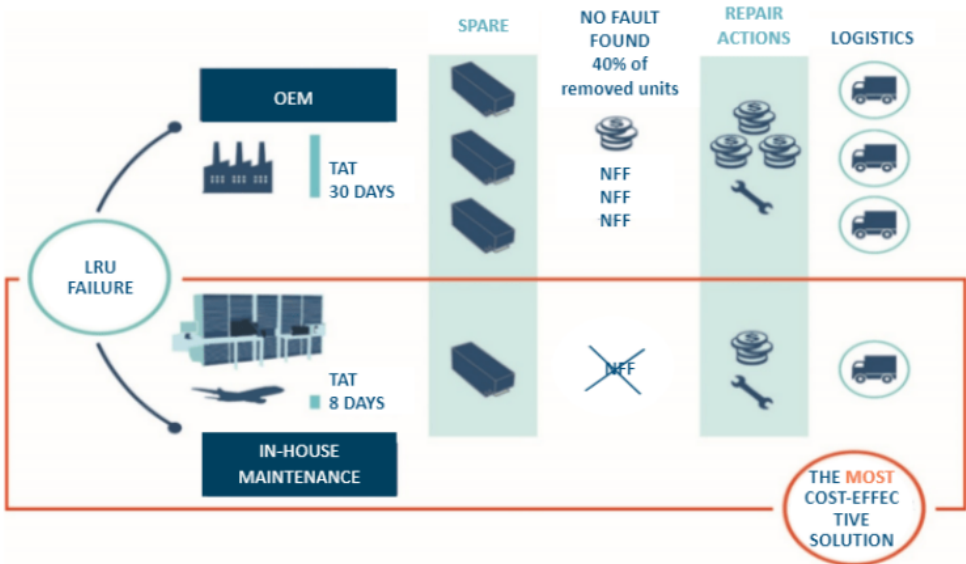
Figura 10 – ATEC SÉRIE 7



fonte: (SPHEREA, 2025)

O uso de um equipamento de testes, como a ATEC SERIES 7, permite reduzir o TAT da aeronave de forma eficiente para quase 1/3 do tempo original. Esta ferramenta é capaz de detectar a fonte dos problemas e resolvê-los, gerando uma eficiência muito maior quando os dispositivos a serem testados são enviados para OEM, dos quais 40% dos casos são casos de NFF. Outrossim, também são reduzidos a mão de obra e os custos de logística, como mostrado na Figura 11.

Figura 11 – Comparação OEM e IN-HOUSE MAINTENANCE



fonte: (SPHEREA, 2025)

O diferencial deste equipamento é a possibilidade de cumprir as normas internacionais de ensaio. A plataforma permite a execução de testes de acordo com a EUROCAE ED-14G e a RTCA DO-160G, ambas estabelecendo condições ambientais como vibração, choque mecânico, umidade, altitude e

temperatura. A utilização dessas normas garante que as conclusões obtidas sejam aceitas internacionalmente, uma vez que refletem parâmetros reconhecidos por autoridades regulatórias como a FAA, a EASA e a ANAC. Assim, o dispositivo não apenas reproduz cenários de operação reais, mas também fortalece a confiabilidade e a validade regulatória dos ensaios.

Além disso, é compatível com a norma MIL-STD-810H, com foco no método 527.2 sobre vibração multidirecional, que permite simular excitações simultâneas em múltiplos eixos, incluindo os eixos cartesianos x , y e z . Essa ferramenta amplia o leque de possibilidades de testes, aproximando os ensaios laboratoriais das condições operacionais das aeronaves. Por fim, o ATEC Series 7 também atende ao AC 21-16G, publicado pela FAA, que orienta os fabricantes e operadores a cumprir corretamente as normas DO-160G nos processos de certificação. Ao atender a essas diretrizes, a plataforma não só garante ensaios tecnicamente adequados, mas também é aceita juridicamente pelas autoridades de aviação civil. Contudo, este dispositivo atua como uma ponte entre exigências regulatórias, requisitos normativos e práticas laboratoriais, consolidando-se como uma solução tecnológica que assegura segurança, confiabilidade e reconhecimento internacional dos resultados obtidos.

3.3 BANCADA DE TESTES

O desenvolvimento de bancadas de ensaio em solo representa um passo essencial na investigação de falhas complexas em sistemas aeronáuticos, como o fenômeno *No Fault Found* (NFF). Esse tipo de dispositivo permite a simulação de condições operacionais em um ambiente controlado, fornecendo dados confiáveis sobre o desempenho de equipamentos críticos, como computadores, sem comprometer a segurança das aeronaves e da tripulação. Para o estudo, foram desenvolvidas 2 versões de bancadas: um protótipo e uma proposta em CAD, ambas projetadas no software **Fusion 360 da Autodesk**. A escolha de modelos virtuais possibilita a exploração de conceitos de rigidez estrutural, modularidade e integração com diferentes computadores de teste antes de qualquer construção física e posicionamento do excitador dinâmico, permitindo ajustes precisos e seguros e reduzindo os custos iniciais.

O projeto das bancadas abrangeu diversos critérios técnicos essenciais, tais como rigidez estrutural adequada para suportar excitações vibracionais, modularidade para receber diferentes variações de computadores de teste, dimensões compactas para facilitar o manuseio e o transporte, além de ser desmontável. Também atende às normas internacionais de ensaios ambientais e de vibração, incluindo RCTA DO-160G, EUROCAE ED-14G, MIL-STD-810H e AC 21-16G, reconhecidas por autoridades regulatórias como FAA, EASA e ANAC, garantindo que os ensaios futuros tenham validade técnica e regulatória, a fim de aumentar a confiabilidade na interpretação de respostas estruturais e de sinais de falhas intermitentes. Além disso, a bancada de testes possuirá integração com a bancada de testes da SPHEREA modelo ATEC 7, possibilitando uma excitação multidirecional controlada, aquisição de dados de alta resolução, análise avançada de falhas e consolidação da relevância metodológica do projeto.

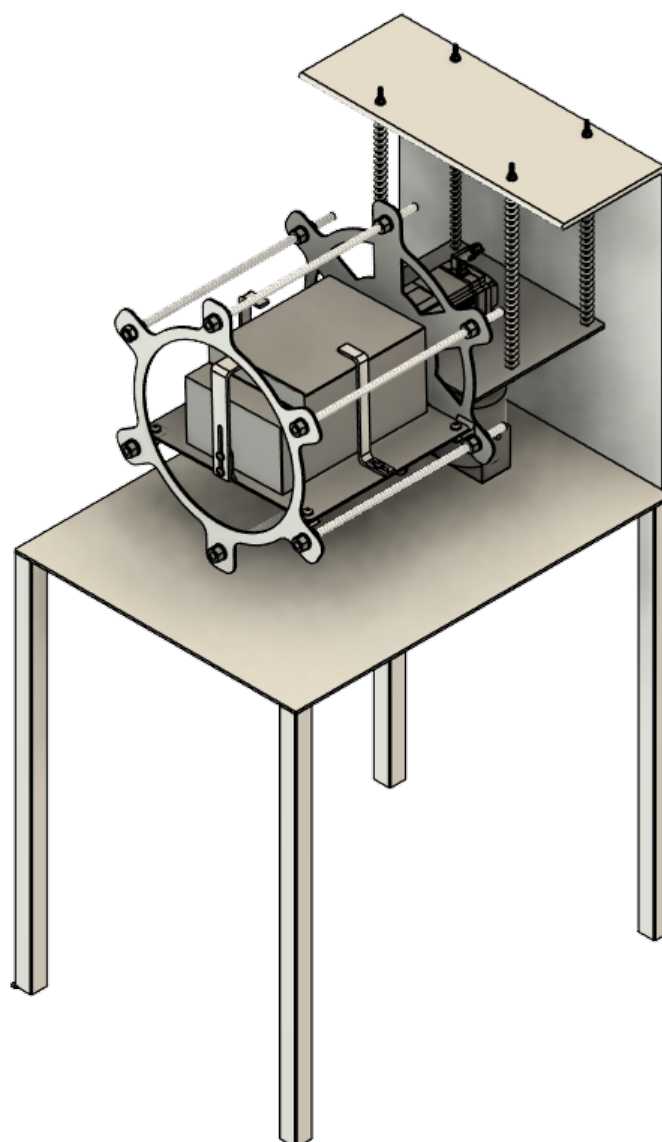
As normas internacionais referenciadas fornecem métodos fundamentais para simular condições ambientais e de vibração realistas. A DO-160G detalha os perfis de vibração obtidos por meio de

medições em voo, variando as posições do equipamento na aeronave, enquanto a norma ED-14G garante equivalência entre os EUA e a Europa, permitindo o reconhecimento internacional dos testes de bancada. A MIL-STD-810H, no método 527.2, detalha os procedimentos de excitação multidirecional para a detecção de falhas intermitentes não evidenciadas em testes unidirecionais. Por outro lado, a AC-21-16G orienta quanto à aplicação interpretativa das normas DO-160 e ED-14, garantindo que os ensaios atendam às exigências de certificação. Dessa forma, o desenvolvimento e o projeto em CAD das bancadas buscaram conciliar conceitos estruturais e funcionais com os requisitos normativos, assegurando a relevância acadêmica e a aplicabilidade industrial.

3.3.1 Bancada de Teste Protótipo

A projeção da bancada de ensaios em solo conceitual constitui a primeira etapa metodológica fundamental para estudar o fenômeno *No Fault Found* (NFF) em sistemas aeronáuticos, caracterizado por falhas intermitentes não detectadas em ensaios convencionais em solo. Esta etapa inicial possibilita a exploração e a validação conceitual dos principais aspectos do projeto antes de qualquer manufatura física, permitindo a análise da rigidez estrutural, da modularidade, do posicionamento do excitador, dos meios de fixação dos componentes da bancada e da integração com diferentes tipos de computadores em teste. O uso do software de desenho 3D permitiu simulações e visualizações geométricas precisas, a avaliação de interferências entre componentes e o planejamento de futuras melhorias estruturais, reduzindo os custos associados à construção física do projeto. A bancada protótipo é representada na figura Figura 12, que apresenta todo o conjunto funcional para realizar ensaios em solo.

Figura 12 – Bancada de Teste Protótipo



fonte: Elaborada pelo próprio autor

A escolha do material para o protótipo foi o alumínio 5052-H34, uma liga com boa relação resistência/peso, excelente conformabilidade e resistência à corrosão. Essas características são essenciais para o protótipo, pois garantem que a bancada de testes suporte esforços moderados de vibração sem comprometer sua integridade física e, ao mesmo tempo, mantenha baixo peso. Segundo [Shin e Hur \(2021\)](#), o alumínio 5052-H34 é um material amplamente utilizado na indústria aeronáutica, tanto na parte estrutural quanto na não estrutural, o que confere legitimidade ao protótipo desenvolvido para o estudo.

O protótipo foi projetado com molas helicoidais atuando como elementos elásticos entre a base da mesa e a plataforma que fixa o motor de passo, permitindo o deslocamento vertical da estrutura e a absorção de pequenas vibrações. A inclusão de molas permite avaliar qualitativamente o comportamento estrutural da bancada sob excitações iniciais, mesmo sem realizar análises dinâmicas formais. De acordo com [Missio e Souto \(2021\)](#), a escolha conceitual do projeto é de extrema importância,

pois garante a identificação de potenciais problemas relacionados à falta de controle direcional e à dispersão energética, itens críticos em simulações em condições de vibração multidirecional em ensaios normativos.

O posicionamento preliminar do motor de passo, logo abaixo da fixação do motor, foi definido para permitir o controle preliminar do movimento do computador em teste, fornecendo uma ideia inicial para futuras melhorias com sistemas de excitação mais sofisticados. Apesar de não realizar nenhuma simulação computacional, o posicionamento foi essencial para avaliar a coerência geométrica e a distância entre o atuador e o dispositivo, facilitando ajustes futuros de alinhamento e de dimensionamento da versão proposta.

Outro ponto relevante para o projeto foi a modularidade, que permitiu ajustes para acomodar outros tipos de computadores de teste. Este fator cumpre os requisitos de adaptabilidade previstos na **AC 21-16G**, que orienta a aplicação prática de normas de ensaios em contextos regulatórios e experimentais, mesmo quando a bancada for construída computacionalmente. A modularidade do projeto consiste em três suportes fixadores, regulados por parafusos, porcas e arruelas, e também inclui espaço adequado para sensores de medição.

As normas internacionais utilizadas para o ensaio ambiental e de vibração, como RCTA DO-160G e MIL-STD-810H, serviram apenas como base conceitual. A DO-160G fornece diretrizes para perfis de vibração coletados em voo, simulando diferentes regiões da aeronave, enquanto o método 527.2 da MIL-STD-810H descreve procedimentos de excitação multidirecional essenciais para identificar falhas intermitentes. Segundo [Missio e Souto \(2021\)](#), o protótipo não atende integralmente a estas normas, mas o alinhamento conceitual legitima a relevância metodológica da proposta e estabelece parâmetros iniciais de rigidez e de posicionamento dos componentes.

A análise preliminar do protótipo permitiu identificar limitações estruturais que afetariam os testes de bancada, como a oscilação imprevisível das molas helicoidais, apesar de estarem guiadas por barras roscas, e também o desalinhamento do excitador em relação ao computador de testes. Logo, esses pontos foram fundamentais para que fossem substituídos, em uma versão futura, por guias lineares de precisão e de reposicionamento do excitador, garantindo maior controle na vertical, distribuição uniforme da vibração e compatibilidade com os requisitos normativos.

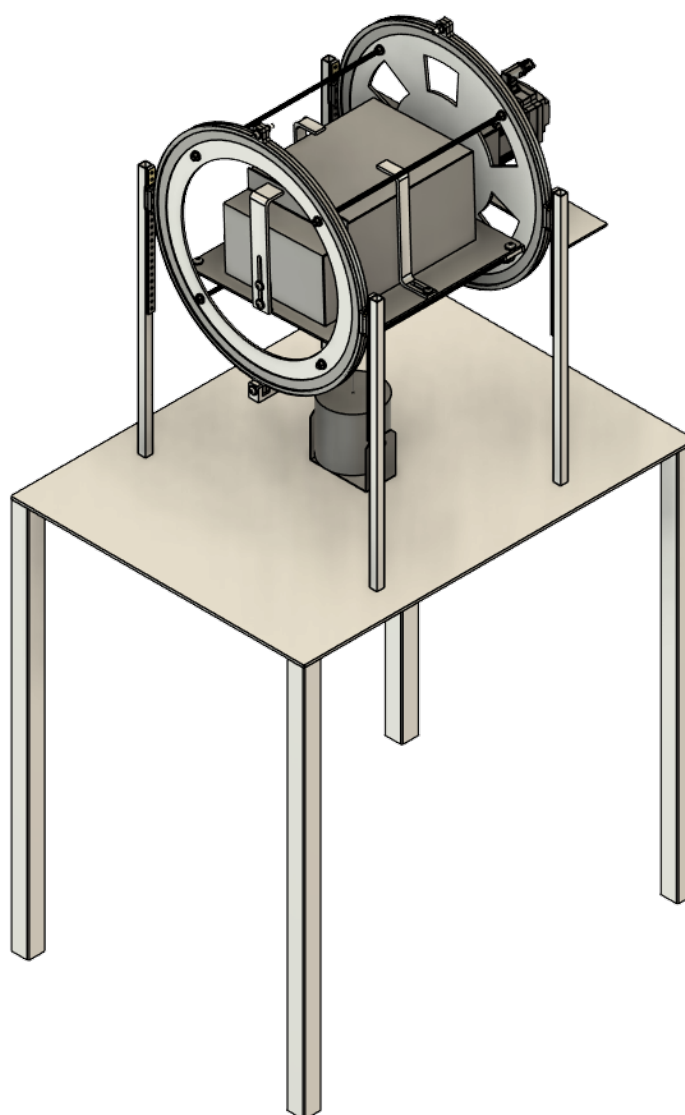
A consideração de dimensões compactas e de portabilidade foi outro aspecto levado em conta no projeto. A bancada foi desenvolvida para ser facilmente desmontável e transportável, permitindo aplicações futuras em diversos laboratórios e adaptação a diversos modelos de computador. Baseadas em [Shin e Hur \(2021\)](#), essas são as práticas modernas de ensaios aeronáuticos, que valorizam a precisão dos testes e a praticidade operacional.

Além disso, a modelagem conceitual conciliou a integração futura com o ATEC SERIES 7.2 da Spharea, uma plataforma de excitação controlada multidirecional que permite a aquisição de dados em alta resolução e a análise avançada de falhas. Esta integração é essencial para validar metodologias de NFF e assegurar que os dados coletados sejam confiáveis, replicáveis e compatíveis com as normas internacionais de ensaio.

3.3.2 Bancada de Teste Proposta

Nesta nova versão, a bancada de testes passou por uma evolução conceitual e estrutural em relação ao protótipo inicial, consolidando princípios de engenharia e critérios normativos internacionais aplicáveis aos ensaios de vibração em sistemas aeronáuticos. Esta versão também foi desenvolvida exclusivamente em modelagem CAD no Autodesk Fusion 360, incorporando melhorias significativas em relação ao modelo inicial, conforme a [Figura 13](#). O principal objetivo foi aumentar a precisão da excitação e garantir sua distribuição uniforme, de modo que o sistema fosse compatível com excitação multidirecional controlada e com ensaios normativos, além de servir como distribuição uniforme, conferindo confiabilidade para futuras implementações físicas.

Figura 13 – Bancada de Teste Proposta



fonte: Elaborada pelo próprio autor

A principal modificação foi na parte estrutural, substituindo as molas helicoidais por guias lineares de alta precisão, garantindo o controle do movimento retilíneo e a eliminação de oscilações indesejadas.

De acordo com [Missio e Souto \(2021\)](#), esta configuração garante que o computador testado seja submetido a forças direcionais específicas, cumprindo as normas de uniformidade estabelecidas pelas RTCA DO-160G e MIL-STD-810H. A substituição do sistema por trilhos lineares garante a repetibilidade do teste e, além disso, assegura que as forças aplicadas pelo excitador sejam transmitidas de forma direta e previsível, o que é crítico para a avaliação de falhas intermitentes.

O excitador foi realocado para o centro do sistema da bancada, alinhando-se ao centro de massa do computador. Essa modificação reduz os momentos de torção e a distribuição assimétrica de forças, otimizando a aplicação das vibrações e proporcionando maior fidelidade nos ensaios. Essa configuração central do excitador atende às normas DO-160G e ED-14G, que enfatizam a importância de aplicar excitações de forma uniforme e alinhada à massa do dispositivo de teste, facilitando a medição de respostas estruturais e de sinais de falha, o que garante maior confiabilidade nos dados coletados.

O alumínio 5052-H34 se manteve devido às combinações de suas propriedades físicas, como rigidez, leveza e resistência à corrosão. A geometria foi alterada para refinar a relação massa-rigidez, a fim de minimizar as concentrações de tensão e assegurar a estabilidade estrutural durante os ensaios. Conexões, suportes e interfaces foram desenvolvidos de forma modular, permitindo ajustes para diferentes tipos de módulos e integração futura com sensores.

A modularidade da bancada foi o princípio de sua concepção. O projeto foi estruturado para permitir a substituição rápida de suportes, ajustes de altura e posicionamento de diferentes módulos, atendendo à necessidade de ensaiar múltiplos equipamentos com características distintas. Este conceito de modularidade é reforçado pela AC 21-16G, que orienta a aplicação prática das normas de ensaio em contextos de certificação e de avaliação técnica. Outrossim, também favorece futuros experimentos, incluindo alterações nos perfis de vibração ou na direção de excitação, sem a necessidade de reconstrução completa da bancada.

A bancada proposta considera os princípios de rigidez e controle direcional, essenciais para a reprodução de ensaios normativos e confiáveis. Enquanto o protótipo fornecia apenas uma referência conceitual de comportamento elástico, a versão aprimorada garante que os deslocamentos e as forças sejam aplicados de maneira controlada e previsível. Segundo [Shin e Hur \(2021\)](#) e [Park e Park \(2019\)](#), essa característica é de extrema importância para os ensaios de NFF, nos quais falhas podem ocorrer de forma intermitente e exigem alta precisão nos testes para serem detectadas.

A integração com o ATEC Series 7 permite que a bancada seja utilizada em ensaios multidirecionais de alta precisão, fornecendo excitação controlada em várias direções e coleta de dados em tempo real. Essa compatibilidade é essencial para validar metodologias de detecção de falhas intermitentes, pois garante simulações de condições de vibração realistas e monitora melhor a resposta do computador em diferentes perfis normativos, incluindo DO-160G e MIL-STD- 810H.

O refinamento do modelo CAD também contemplou aspectos de segurança e ergonomia, como a facilidade de montagem e desmontagem, a acessibilidade para a instalação de vários modelos de computadores e sensores e a estabilidade da base. Essas características foram incluídas no projeto conceitual para reduzir riscos futuros e facilitar ajustes.

Dessa forma, a bancada proposta, embora ainda não construída fisicamente, oferece uma base sólida para estudos futuros e para validação experimental. A combinação de guias lineares, excitador

central, modularidade e compatibilidade com as normas internacionais e com a ATEC Series 7 garante que o modelo atenda aos padrões de ensaio aeronáutico modernos, alinhando-se à alta confiabilidade e à validade regulatória. Essa versão representa, portanto, a consolidação da modelagem conceitual em uma ferramenta metodológica robusta, alinhada às práticas de engenharia aeronáutica, aos ensaios normativos e aos requisitos acadêmicos.

4 RESULTADOS

Os resultados obtidos a partir da modelagem CAD das bancadas de teste desenvolvidas para este estudo, com foco em comparações conceituais entre o protótipo e a versão proposta, permitem avaliar as diferenças nas construções, dimensões e no funcionamento. Como ambas as bancadas não foram construídas fisicamente nem submetidas a simulações de vibração, a análise baseia-se em aspectos estruturais, geométricos e funcionais, considerando a rigidez estrutural, a modularidade, a intercambialidade dos computadores de teste e o posicionamento do excitador. Outro ponto importante foi o alinhamento da bancada às normas aeronáuticas internacionais RCTA DO-160G, EUROCAE, MIL-STD-810H e AC 21-16G, reconhecidas pelas principais agências regulamentadoras, como FAA, EASA e ANAC, garantindo que os testes tenham relevância conceitual e aplicabilidade para futuros ensaios em solo. As principais comparações as duas estruturas são:

- Comparação Conceitual - Protótipo x Proposta

O protótipo conceitual foi desenvolvido utilizando molas helicoidais, proporcionando deslocamentos verticais generalizados com auxílio de eixos roscas e de absorção qualitativa de vibrações, com rigidez adequada para exploração inicial. O excitador está posicionado na parte traseira, excitando fora do eixo do computador de testes, o que gera elevada dissipação de energia mecânica em outros componentes da estrutura. Este modelo permitiu avaliar a modularidade, a distribuição da energia mecânica e a facilidade construtiva da bancada de testes.

Na versão proposta, foram substituídas as molas guias com eixos roscas por guias lineares, proporcionando um movimento vertical mais controlado e retilíneo, alinhando-se às diretrizes de ensaio unidirecional e multidirecional das normas internacionais DO-160G e MIL-STD-810H. E também foi deslocado de posição o excitador, posicionado centralizado e logo abaixo do computador de testes, o que melhora a distribuição de forças e minimiza a torção e a flexão geradas na versão protótipo. O material utilizado se manteve (alumínio 5052-H34), visto que apresenta benefícios, como leveza, rigidez estrutural e viabilidade econômica.

- Dimensões, Modularidade e Posicionamento do Computador

Ambas as bancadas foram projetadas para acomodar computadores de teste de variados tamanhos, garantindo flexibilidade para testes futuros. Na versão prototipada, exploraram-se conceitos dimensionais e disposição espacial, inserindo ajustes móveis e fixando-os com parafusos, porcas e arruelas, enquanto, na versão proposta, aprimoraram-se o alinhamento, a modularidade e a estabilidade estrutural.

A modularidade da versão final permite integração futura com sistemas de aquisição de dados e, principalmente, com o ATEC SERIES 7.2 da fabricante Spherea, possibilitando excitação controlada e coleta de dados em alta resolução, ou seja, compatível com os ensaios normativos. A adaptação a diferentes computadores de teste e o alinhamento do excitador a eles garantem confiabilidade e aplicabilidade industrial, mesmo sem a construção física.

- Considerações Normativas e Limitações

O projeto da bancada considerou os requisitos normativos internacionais para que os ensaios futuros sejam validados tecnicamente e reconhecidos pelas autoridades regulatórias, como a ANAC, EASA e FAA. O principal método para ensaios excitados multidirecionalmente está na norma MIL-STD-810H, no método 527.2, essencial para estudos de falhas intermitentes, como NFF.

Apesar de não realizar nenhuma simulação dinâmica, a análise do modelo 3D permitiu obter informações importantes sobre a rigidez estrutural, o alinhamento do excitador, a modularidade dos componentes e a adequação normativa. Com base nesses princípios, consolida-se a versão computacional para futuras implementações físicas e ensaios controlados, o que garante sua utilização em ensaios de vibração multidirecional, na medição de resposta e na integração com os sistemas de monitoramento.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo teve como propósito investigar o potencial da excitação multidirecional como estratégia para reduzir a ocorrência do fenômeno *No Fault Found* (NFF) em sistemas aeronáuticos. Ao longo do desenvolvimento, buscou-se analisar como ocorrem as falhas intermitentes e como se manifestam, pois, em ensaios tradicionais, em que são abordadas as excitações unidirecionais, esse fenômeno não é facilmente detectado. A análise de casos recorrentes evidenciou que a adoção de métodos multidirecionais representa um avanço significativo em relação às práticas conduzidas de forma convencional, sobretudo pela capacidade de reproduzir condições reais de operação com maior fidelidade.

Por meio da revisão bibliográfica, ficou evidente que o NFF permanece um dos principais sistemas críticos. As normas internacionais, como RTCA DO-160G, EUROCAE ED-14G, desafios para a manutenção aeronáutica e impactos diretos nos custos operacionais, no tempo de solo das aeronaves e na confiabilidade de 4G e MIL-STD-810H, reforçam que as aeronaves são submetidas a vibrações simultâneas em múltiplos eixos, resultantes de todo o conjunto mecânico, de turbulências e de variações de regime de voo. A falta de simulações mais próximas das condições reais impede a detecção de fenômenos de NFF, o que culmina em diagnósticos inconsistentes. Nesse sentido, ensaios unidirecionais apresentam limitações inerentes, enquanto abordagens multidirecionais permitem testar componentes em múltiplos eixos, ampliando a sensibilidade ao comportamento real dos dispositivos.

No desenvolvimento de ambas as bancadas, modeladas digitalmente em CAD, o intuito foi estabelecer uma base estrutural condizente com as práticas modernas de ensaio. No estágio inicial, buscou-se a exploração da geometria, da disposição dos componentes e das características preliminares de rigidez, enquanto a versão proposta incorporou melhorias substanciais em relação ao anterior, substituindo guias lineares por guias lineares, reposicionando o excitador e proporcionando modularidade adequada aos computadores de teste.

A análise do CAD, realizada para comparação estrutural, não teve como objetivo principal a previsão de respostas dinâmicas complexas, e sim o estabelecimento de uma base sólida para sustentar futuros ensaios. Os resultados demonstram que a versão proposta é estruturalmente mais coerente do que a versão protótipo para essa aplicação, apresentando melhorias significativas na rigidez direcional, na distribuição de esforços e na precisão de movimento. Essas condições são extremamente importantes para a replicação dos ensaios e para a validação pelas agências certificadoras. Essa consistência estrutural é o ponto de partida para a aplicação futura de excitação multidirecional e para o aprimoramento do processo de detecção de falhas intermitentes.

Como proposta para trabalhos futuros, recomenda-se o desenvolvimento físico e a construção da bancada de ensaios multidirecionais apresentada ao longo deste estudo, uma vez que, no escopo deste trabalho, não foi possível sua manufatura devido a restrições de tempo e de recursos financeiros. A bancada física permitiria a validação experimental das soluções estruturais propostas, bem como a avaliação do comportamento dinâmico do conjunto. Além disso, sugere-se a instalação de uma fixação rígida da estrutura ao solo, a fim de minimizar movimentos indesejados da bancada e garantir que toda

a excitação proveniente do excitador seja concentrada no computador de testes, aumentando a precisão e a repetibilidade dos ensaios.

Adicionalmente, recomenda-se ampliar o escopo experimental por meio da adição de simulações numéricas complementares, como análises estruturais e vibracionais. Considerando que a bancada proposta abordou prioritariamente a excitação vibracional, torna-se interessante a incorporação de uma cúpula térmica, o que possibilita a aplicação simultânea de variações de temperatura e de vibração. Essa abordagem permitiria a inclusão de um novo parâmetro no conceito de excitação multidirecional, aproximando ainda mais os ensaios das condições reais de operação aeronáutica.

Dessa forma, este trabalho contribui para o avanço da engenharia aeronáutica ao apresentar uma abordagem metodológica robusta, que abrange uma revisão aprofundada, análise normativa e desenvolvimento de uma bancada de testes para ensaios multidirecionais. Apesar de não ser manufaturada fisicamente, o estudo constrói uma base clara e fundamentada para melhorias futuras, adicionando simulações dinâmicas, a fabricação do protótipo, a integração com o excitador real e a aplicação direta em componentes das aeronaves sujeitos ao NFF. Com isso, esta pesquisa evidencia a importância do uso de métodos diferentes dos atuais, como a adoção de técnicas de excitação multidirecional na aviação e, como consequência, uma redução potencial de custos de manutenção, transporte aéreo mais barato, aumento da confiabilidade operacional e níveis mais elevados de segurança de voo.

REFERÊNCIAS

- AYKAN, M.; CELIK, M. Vibration fatigue analysis and multi-axial effect in testing of aerospace structures. **Mechanical systems and signal processing**, Elsevier, v. 23, n. 3, p. 897–907, 2009. Acessado em 27 de agosto de 2025.
- BESSA, M. F. *et al.* Projeto de um excitador eletromagnético para análise modal em rotores. In: **Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica (CONEM 2002)**. João Pessoa, PB, Brasil: ABCM, 2002. Acessado em 7 de setembro de 2025. Disponível em: <https://www.abcm.org.br/app/webroot/anais/conem/2002/trabalhos/tema14/CPB0523.PDF>.
- Brüel & Kjær. **Martelo Impacto Tipo 8210 — grandes estruturas**. 2024. <https://www.bksv.com/pt/transducers/vibration/impact-hammers/8210>. Acessado em 07 de setembro de 2025.
- Brüel & Kjær. **Excitadores de medição – Instrumentos de teste de vibração**. 2025. <https://www.bksv.com/pt/instruments/vibration-testing-equipment/measurement-excitters>. Acessado em 7 de setembro de 2025.
- DØSSING, O.; FIRM, B. . K. **Structural Testing: Mechanical mobility measurements**. [S.l.]: Brüel & Kjær, 1988. Acessado em 27 de agosto de 2025.
- DØSSING, O.; FIRM, B. . K. **Structural Testing: Mechanical mobility measurements**. [S.l.]: Brüel & Kjær, 1988. Acessado em 27 de agosto de 2025.
- Faremec. **Ensaio de impacto por pêndulo**. 2024. <https://www.faremac.com.br/produto/Ensaio+de+impacto+por+pendulo/67>. Acessado em 07 de setembro de 2025.
- HABTOUR, E. *et al.* Review of response and damage of linear and nonlinear systems under multiaxial vibration. **Shock and Vibration**, Wiley Online Library, v. 2014, n. 1, p. 294271, 2014. Acessado em 22 de agosto de 2025.
- HABTOUR, E. *et al.* Improved reliability testing with multiaxial electrodynamics vibration. In: **IEEE. 2010 Proceedings-Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)**. [S.l.], 2010. p. 1–6. Acessado em 27 de agosto de 2025.
- KHAN, S. *et al.* No fault found events in maintenance engineering part 1: Current trends, implications and organizational practices. **Reliability Engineering & System Safety**, Elsevier, v. 123, p. 183–195, 2014. Acessado em 22 de agosto de 2025.
- LIN, J.; ZHANG, Y.; ZHAO, Y. Pseudo excitation method and some recent developments. **Procedia Engineering**, Elsevier, v. 14, p. 2453–2458, 2011. Acessado em 01 de setembro de 2025.
- LYU, K. *et al.* Mechanism analysis and dynamic model construction of intermittent fault of weak-current aviation cable under vibration stress. **Advances in Mechanical Engineering**, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 14, n. 3, p. 16878140221074820, 2022. Acessado em 01 de setembro de 2025.
- MISSIO, L. H. S.; SOUTO, C. d. Evaluation of the frequency range of operation of a vibration test fixture using the finite element method. **SAE Technical Paper**, n. 2020-36-0032, 2021. Acessado em 9 de setembro de 2025.
- PARK, I.; PARK, J. Effective vibration test planning method for equipment with high slenderness ratio. **Journal of Mechanical Science and Technology**, Springer, v. 33, n. 12, p. 5779–5786, 2019. Acessado em 12 de setembro de 2025.

Precision Microdrives. **Eccentric Rotating Mass Vibration Motors – ERMs**. n.d. <<https://www.precisionmicrodrives.com/eccentric-rotating-mass-vibration-motors-erms>>. Acessado em 7 de setembro de 2025.

SAKARIS, C. S.; SAKELLARIOU, J. S.; FASSOIS, S. D. Random-vibration-based damage detection and precise localization on a lab-scale aircraft stabilizer structure via the generalized functional model based method. **Structural Health Monitoring**, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 16, n. 5, p. 594–610, 2017. Acessado em 01 de setembro de 2025.

SHIN, G.-H.; HUR, J.-W. A study on the random vibration analysis of large scale antenna. **Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers**, The Korean Society of Manufacturing Process Engineers, v. 20, n. 6, p. 44–50, 2021. Acessado em 11 de setembro de 2025.

SÖDERHOLM, P. A system view of the no fault found (nff) phenomenon. **Reliability Engineering & System Safety**, Elsevier, v. 92, n. 1, p. 1–14, 2007. Acessado em 22 de agosto de 2025.

SPHEREA. **ATEC Series 7**. 2025. Acessado em 29 de setembro de 2025. Disponível em: <<https://www.spherea.com/atec-series-7-2/>>.

Sun Hydraulics. **FREP — modelo de válvula hidráulica**. 2024. <<https://www.sunhydraulics.com/model/FREP>>. Acessado em 7 de setembro de 2025.

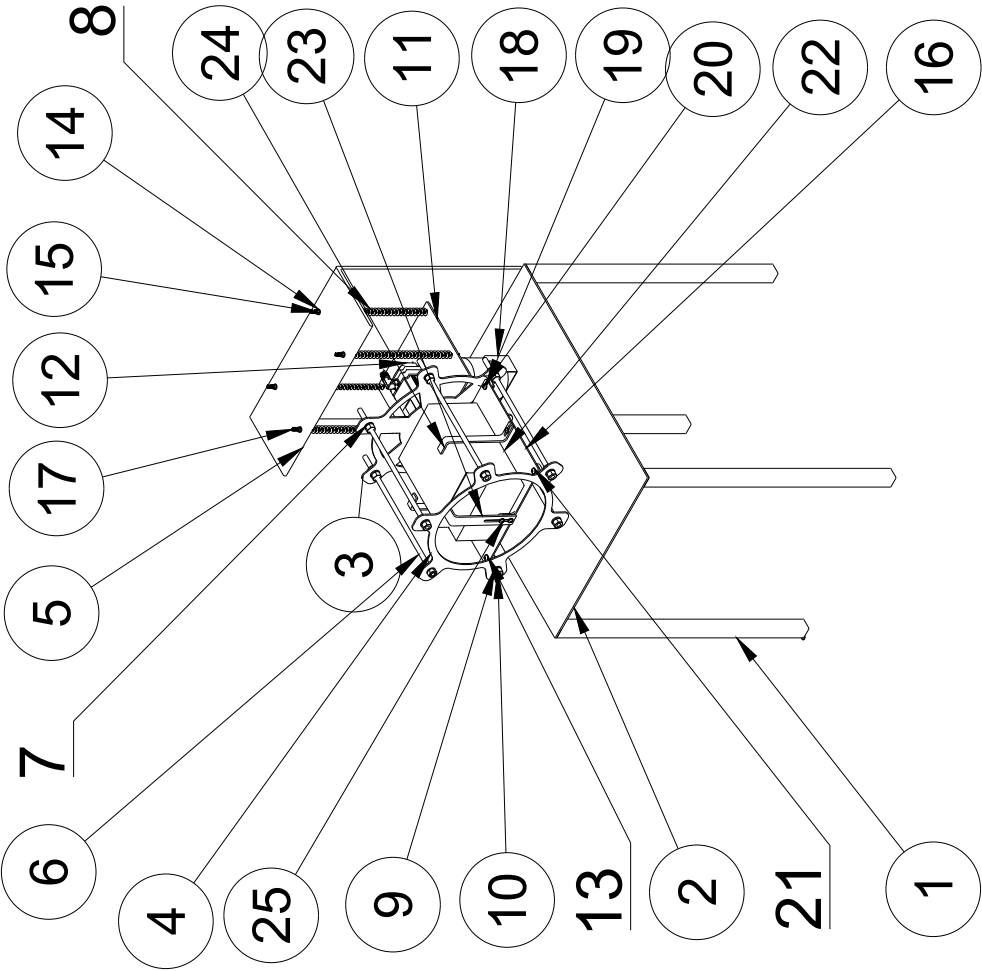
UNGAR, L. Y. Causes and costs of no fault found events. **Proc. of IPC APEX**, 2015. Acessado em 22 de agosto de 2025.

UNITED STATES. Department of Defense. Mil-std-810h: Environmental engineering considerations and laboratory tests. **Military Standard**, Washington, D.C., v. 810, n. H, 2019. Acessado em 14 de setembro de 2025.

WU, Q.; LI, D. Analysis on pseudo excitation of random vibration for structure of time flight counter. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, Springer, v. 28, n. 2, p. 325–330, 2015. Acessado em 01 de setembro de 2025.

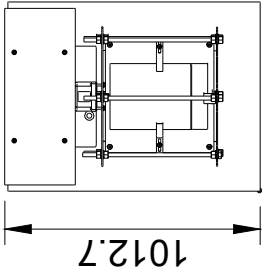
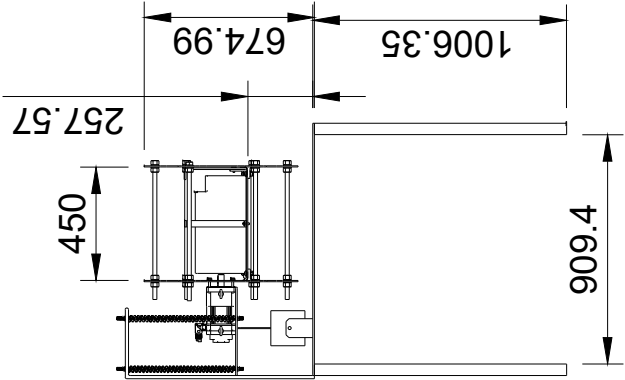
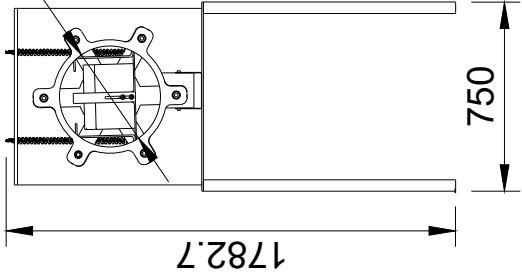
APÊNDICE A – DESENHOS 2D

Neste apêndice são apresentados os desenhos técnicos em duas dimensões (2D) das bancadas protótipo e proposta utilizadas no desenvolvimento deste trabalho. Os desenhos incluem vistas ortogonais, cortes e detalhes construtivos necessários à correta interpretação do projeto, contemplando dimensões, posicionamento dos componentes, elementos de fixação e especificações geométricas relevantes. Os desenhos foram elaborados em ambiente CAD, de acordo com as normas técnicas vigentes para desenho mecânico, de modo a garantir a padronização, a rastreabilidade do projeto e a possibilidade de reprodução fiel da bancada para fins experimentais ou de futuros aprimoramentos.



Dept.	Technical reference	Created by	Approved by
	mm	Fabio Zi Run Yan 21/11/2025	
		Document type	Document status
			Approved
		DWG No.	
		01	
		Rev.	Date of issue
			Sheet
			1/4

Ø400



Dept.	Technical reference	Created by	Approved by
	mm	Fabio Zi Run Yan 21/11/2025	
		Document type	Document status
			Approved
		DWG No.	
		01	
		Rev.	Date of issue
			Sheet
			2/4

16	1	FIXAÇÃO COMPUTADOR DE TESTES	ALUMÍNIO 5052 H32
15	12	ANSI B18 2.4 1M - M8 AÇO GRAU 2H LISO	AÇO GRAU 2H, LISO
14	17	ANSI B18 22M -8 N AÇO 100 LISO HV	AÇO 100 HV, LISO
13	4	ANSI B18 3.4M - M8 X 1.25 X 45 AÇO GRAU 2 LISO	AÇO GRAU 2, LISO
12	1	MOTOR DE PASSO	GERAL
11	1	SUPORTE MOTOR PROTÓTIPO	ALUMÍNIO 5052 H32
10	23	HHN ANSI B18 2.4 6M - M16 X2 AÇO GRAU 2H LISO	AÇO GRAU 2H, LISO
9	23	PQ ANSI B18 22M - 16 N AÇO 100 HV LISO	AÇO 100 HV, LISO
8	1	DIN EN 14399-4 M16 AÇO 6 LISO	AÇO 6, LISO
7	1	NF E25-514-Z16 AÇO HV LISO	AÇO 100 HV LISO
6	6	BARRA ROSCADA M16	AÇO
5	1	SUPORTE DO MOTOR	ALUMÍNIO 5052 H32
4	1	ANEL GIRATÓRIO	ALUMÍNIO 5052 H32
3	1	ANEL GIRATÓRIO COM FIXAÇÃO	ALUMÍNIO 5052 H32
2	1	TAMPO DA MESA	ALUMÍNIO 5052 H32
1	4	PÉ DE APOIO	ALUMÍNIO 5052 H32
ITEM	QTD	NÚMERO DA PEÇA	MATERIAL

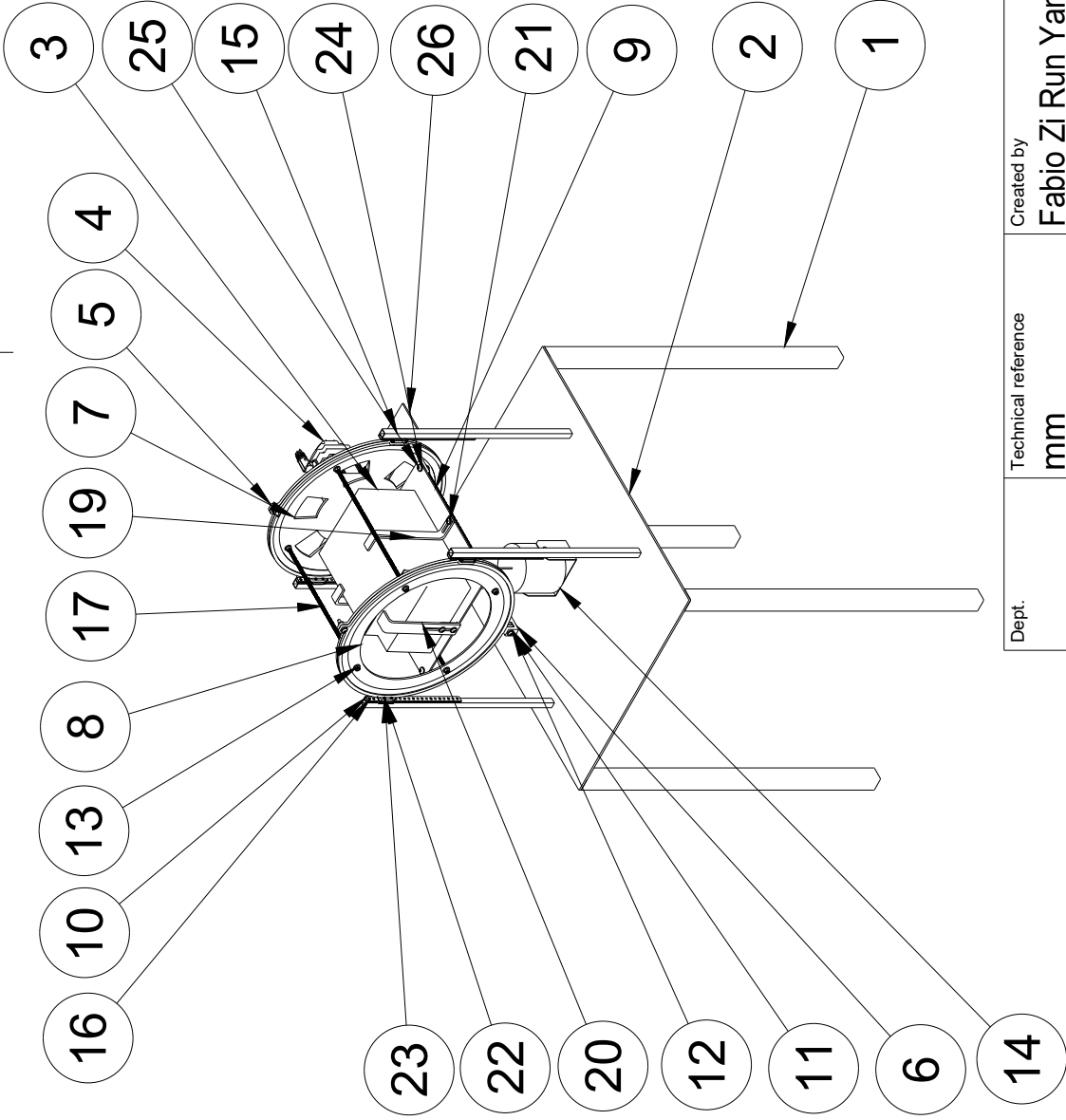
LISTA DE PEÇAS

Dept.	Technical reference	Created by	Approved by
	mm	Fabio Zi Run Yan 21/11/2025	
		Document type	Document status
			Approved
		Title	DWG No.
		Bancada de Teste Protótipo	01
		Rev.	Date of issue
			3/4

25	4	ANSI B18 3.4 M - M8 X 1.25 X 20 AÇO GRAU 2 LISO	AÇO GRAU 2, LISO
24	2	ANSI B18 3.4M -M8X1.25X20 AÇO GRAU 2 LISO	ALUMÍNIO 5052 H32
23	1	FIXADOR LATERAL DO COMPUTADOR	ALUMÍNIO 5052 H32
22	1	COMPUTADOR DE TESTES	GERAL
21	4	ANSI B18 3.4M - M10 X 1.5 X 35 AÇO GRAU 2 LISO	AÇO GRAU 2H
20	4	ANSI B18. 3.4M - M10 X 1.5 X 35 AÇO GRAU 2 LISO	AÇO GRAU 2, LISO
19	8	PW ANSI B18 22M - 10 N AÇO 100 HV LISO	AÇO 100 HV, LISO
18	1	SHAKER ELETROME CÂNICO	AÇO
17	4	BARRA ROSCADA	AÇO
ITEM	QTD	NÚMERO DA PEÇA	MATERIAL

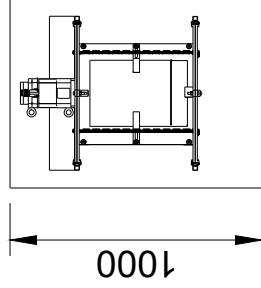
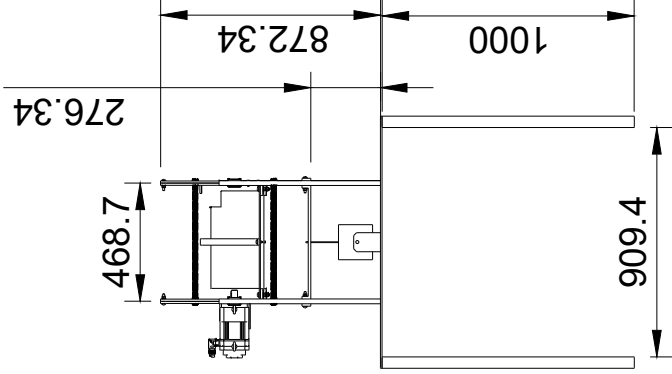
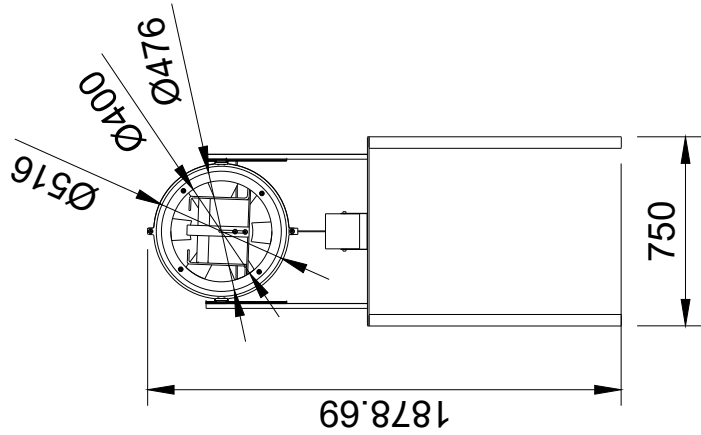
LISTA DE PEÇAS

Dept.	Technical reference	Created by	Approved by
	mm	Fabio Zi Run Yan 21/12/2025	
		Document type	Document status
			Approved
		Title	DWG No.
		Bancada de Teste Protótipo	01
		Rev.	Date of issue
			Sheet
			4/4



Dept.	Technical reference	Created by	Approved by
	mm	Fabio Zi Run Yan 20/11/2025	
		Document type	Document status
			Approved
		DWG No.	
		02	
		Rev.	Date of issue
			20/11/2025
		Sheet	
		1/4	

Title
Bancada de Teste Proposta



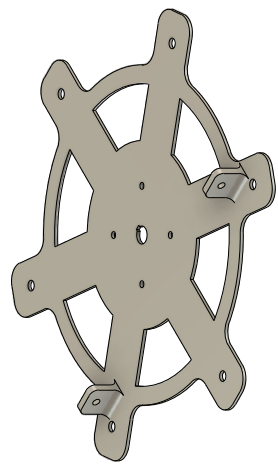
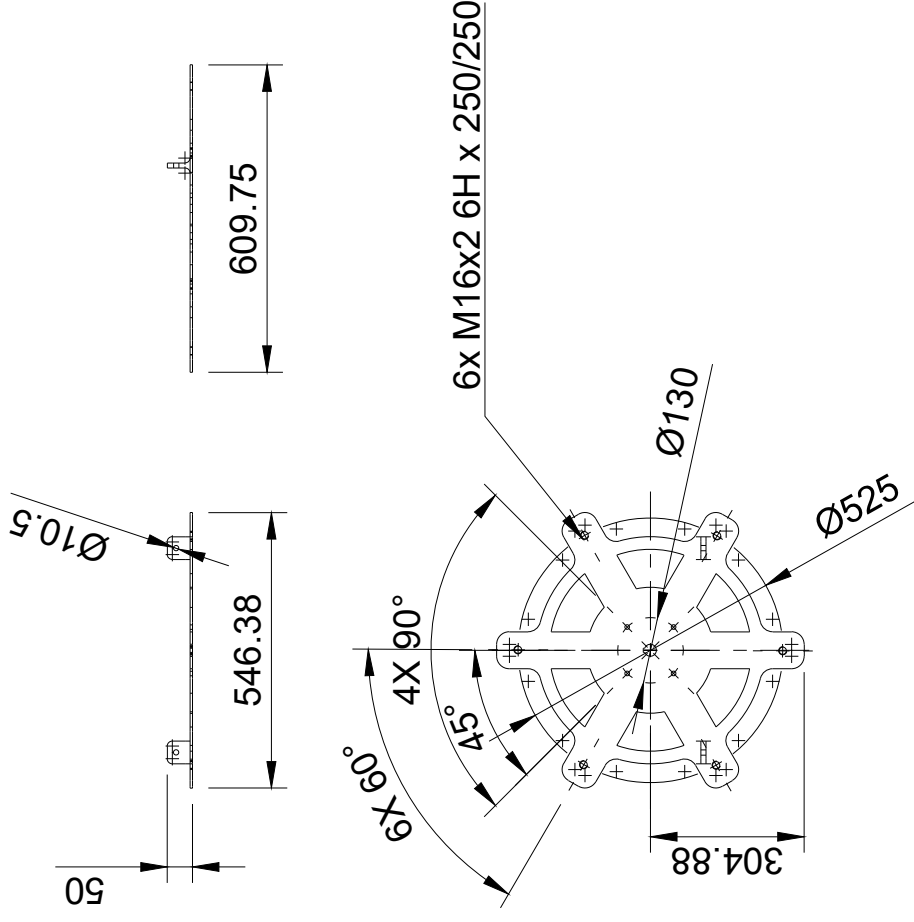
Dept.	Technical reference	Created by	Approved by	
	mm	Fabio Zi Run Yan 20/11/2025	Document status	
			Approved	
		Document type	DWG No.	
		Title	02	
		Bancada de Teste Proposta		
		Rev.	Date of issue	Sheet
			20/11/2025	2/4

15	4	TUBO DE FIXAÇÃO	ALUMÍNIO 5052 H34
14	1	SHAKER ELETROMECÂNICO	GERAL
13	26	ANSI B18.2.4.1M - M8 AÇO GRAU 2H LISO	AÇO GRAU 2H, LISO
12	2	ANSI B18 2.4.1 M - M8X1,25X60 AÇO GRAU 2 LISO	AÇO GRAU 2
11	36	PW ANSI B18.22M - 8N AÇO 100HV LISO	AÇO 1020
10	4	GUIA LINEAR	GERAL
9	1	FIXAÇÃO DO COMPUTADOR DE TESTES	ALUMÍNIO 5052 H34
8	1	ROLETE SECUNDÁRIO	ALUMÍNIO 5052 H34
7	1	ROLETE PRIMÁRIO	ALUMÍNIO 5052 H34
6	1	CONECTOR ENTRE ANÉIS	ALUMÍNIO 5052 H34
5	4	ROLETE EXTERNO	ALUMÍNIO 5052 H34
4	1	MOTOR DE PASSO	GERAL
3	1	COMPUTADOR DE TESTES	GERAL
2	1	TAMPO DA MESA	ALUMÍNIO 5052 H34
1	4	PÉ DE APOIO	ALUMÍNIO 5052 H34
ITEM	QTD	NÚMERO DA PEÇA	MATERIAL
PART LIST			

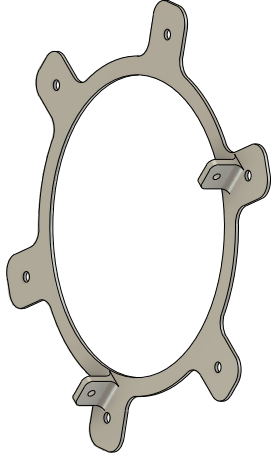
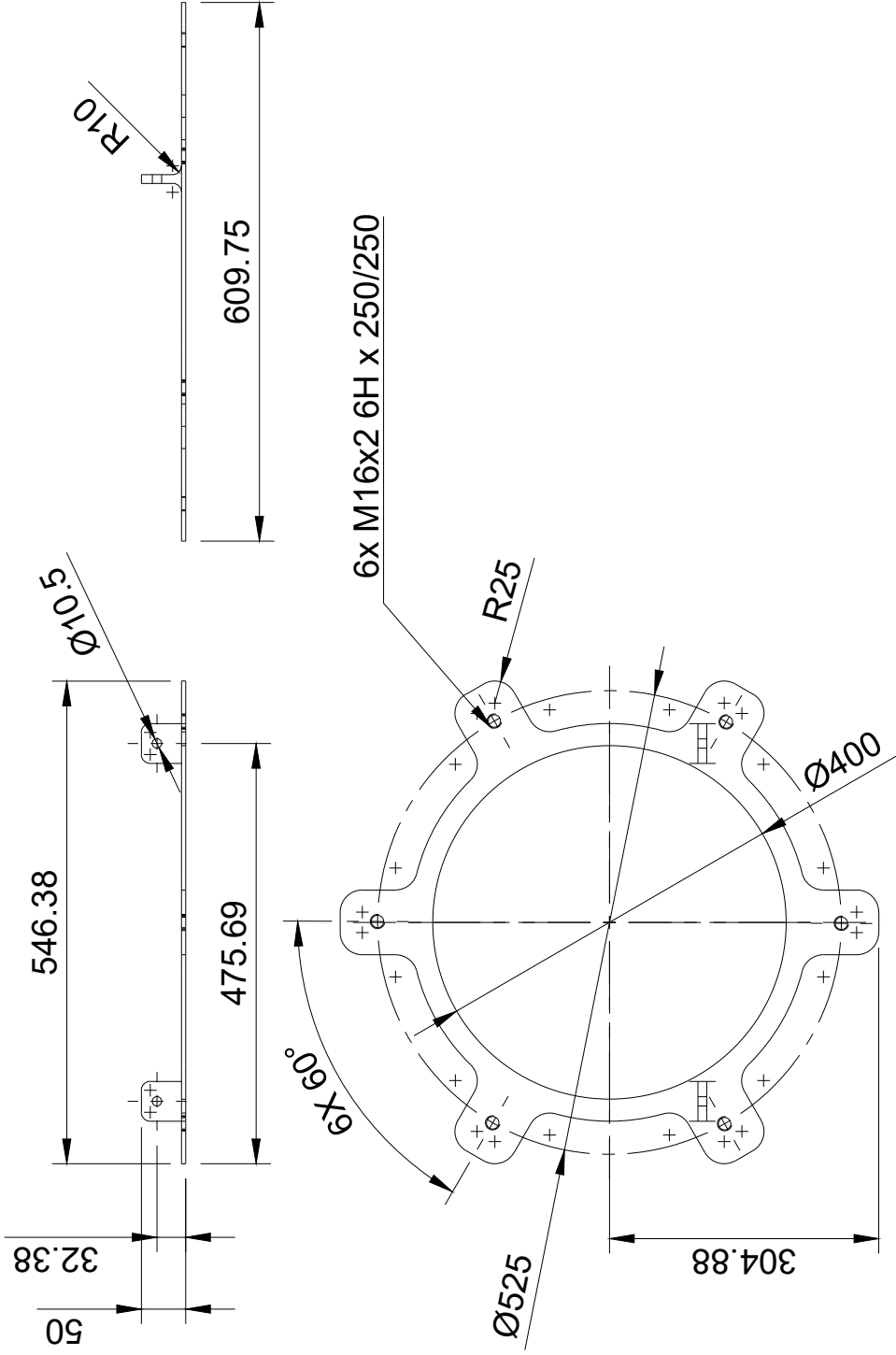
Dept.	Technical reference	Created by	Approved by
	mm	Fabio Zi Run Yan 20/11/2025	
		Document type	Document status
			Approved
		Title	DWG No.
		Bancada de Teste Proposta	02
		Rev.	Date of issue
			20/11/2025
		Sheet	
		3/4	

25	1	SUPORTE DO MOTOR	ALUMÍNIO 5052 H34
24	4	ANSI B18.3.4M - M10 X1.5X30	AÇO GRAU 2 LISO
23	4	PW ANSI B18 22M - 10N AÇO 100 HV LISO	AÇO 100 HV, LISO
22	16	ANSI B18.3.4M - M3X0.5X16	AÇO GRAU 2 LISO
21	16	PW ANSI B18.3.4M - M3-0,5X16	AÇO GRAU 2, LISO
20	4	ANSI B18.3.4M - M8-1.25X20	AÇO GRAU 2, LISO
19	1	FIXADOR FRONTAL DO COMPUTADOR	ALUMÍNIO 5052 H34
18	2	FIXADOR LATERAL DO COMPUTADOR	ALUMÍNIO 5052 H34
17	4	BARRA ROSCADA	AÇO
16	36	ANSI B18.3.1M M3X0,5X6 AÇO GRAU 2 LISO	AÇO GRAU 2 LISO
ITEM	QTD	NÚMERO DA PEÇA	MATERIAL
PART LIST			

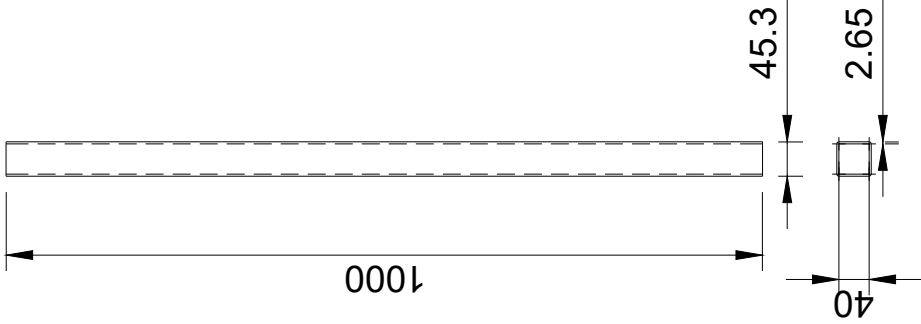
Dept.	Technical reference	Created by	Approved by
	mm	Fabio Zi Run Yan 20/11/2025	
		Document type	Document status
			Approved
		Title	DWG No.
		Bancada de Teste Proposta	02
		Rev.	Date of issue
			20/11/2025
		Sheet	
		4/4	



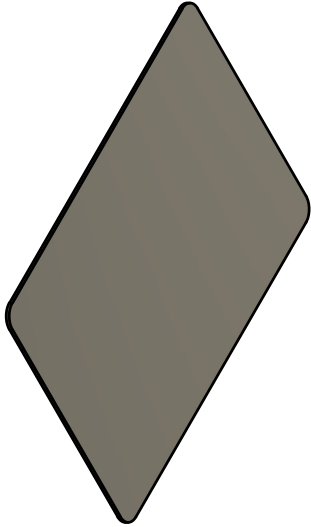
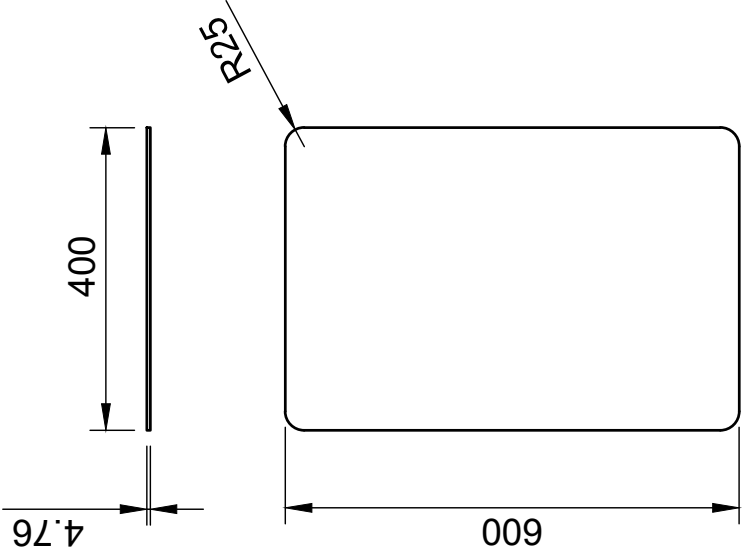
Dept.	Technical reference	Created by Fabio Zi Run Yan 05/12/2025	Approved by
		Document type	Document status
		Title Anel Giratório com fixação	DWG No.
		Rev.	Date of issue
		Sheet	1/1



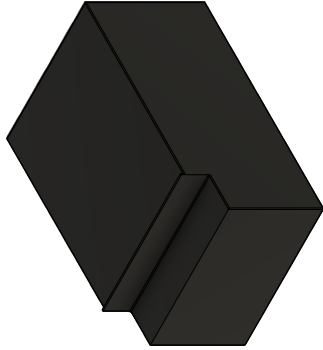
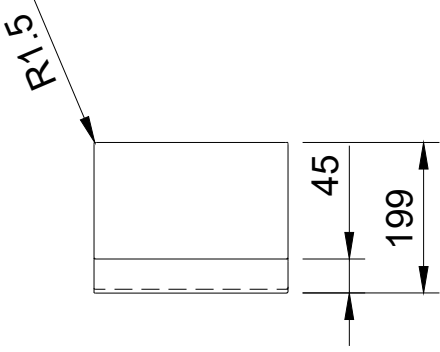
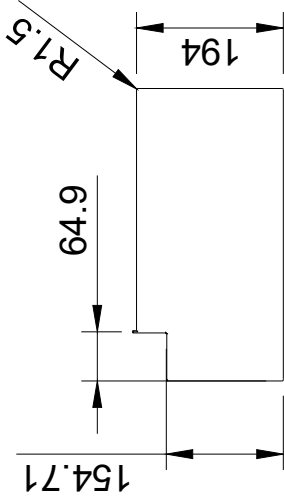
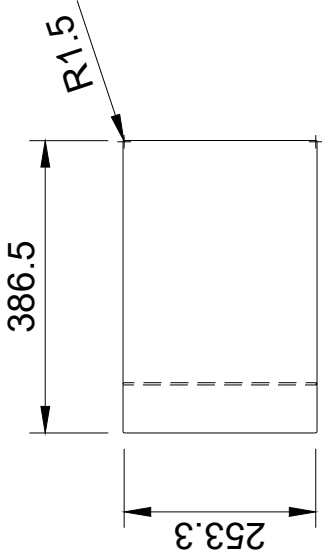
Dept.	Technical reference	Created by	Approved by
	mm	Fabio Zi Run Yan 22/11/2025	
		Document type	Document status
			Approved
		DWG No.	
		Title	
		ANEL GIRATÓRIO	
		Rev.	Date of issue
			Sheet
			1/1



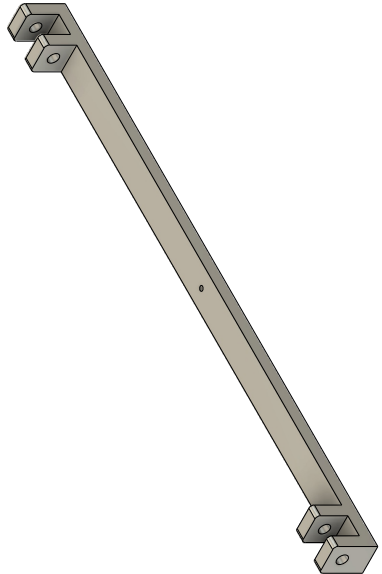
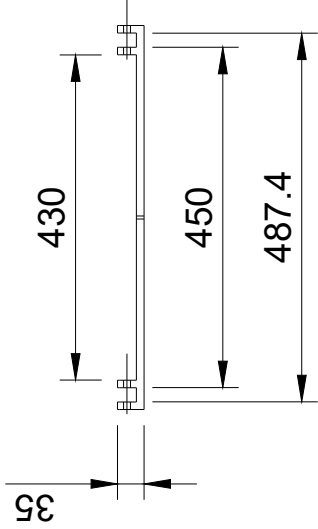
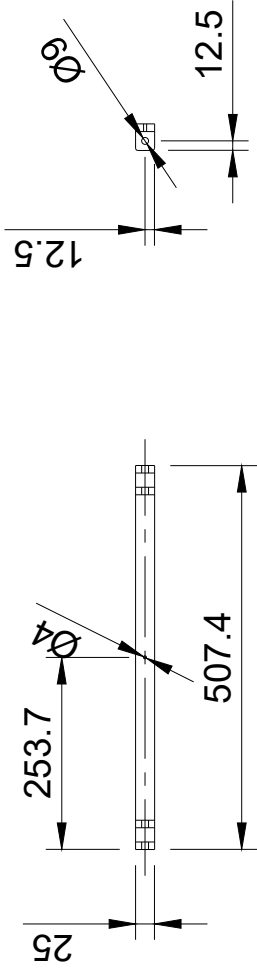
Dept.	Technical reference	Created by	Approved by
	mm	Fabio Zi Run Yan 22/11/2025	
		Document type	Document status
			Approved
		DWG No.	
		Title	
		APOIO DA BANCADA	
		Rev.	Date of issue
			Sheet
			1/1



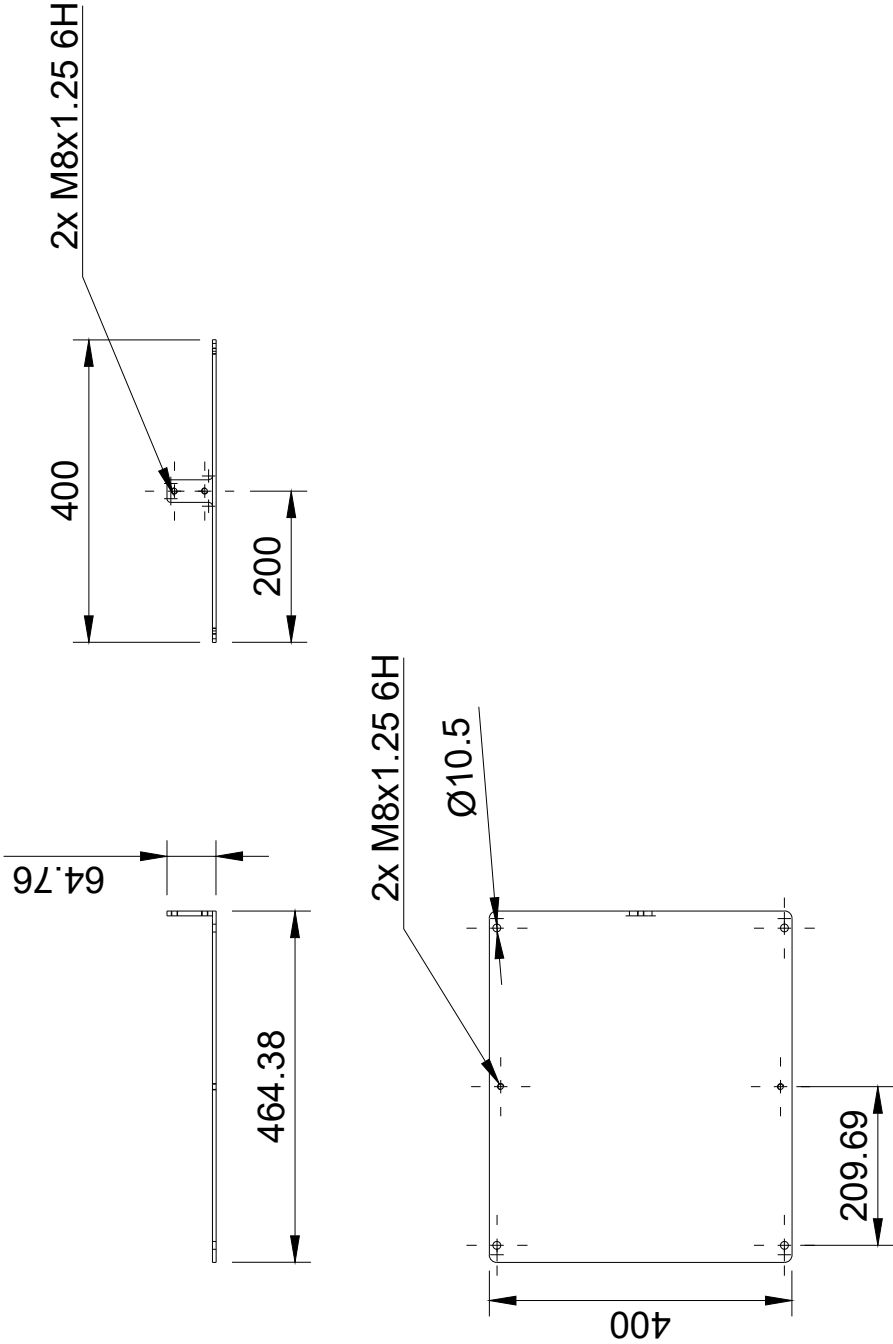
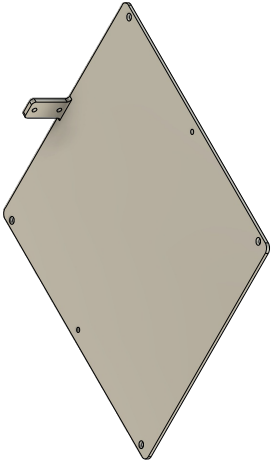
Dept.	Technical reference	Created by	Approved by
	mm	Fabio Zi Run Yan 21/11/2025	
		Document type	Document status
		BASE SUPORTE MOTOR	Approved
		DWG No.	
		Rev.	Date of issue
			Sheet
			1/1



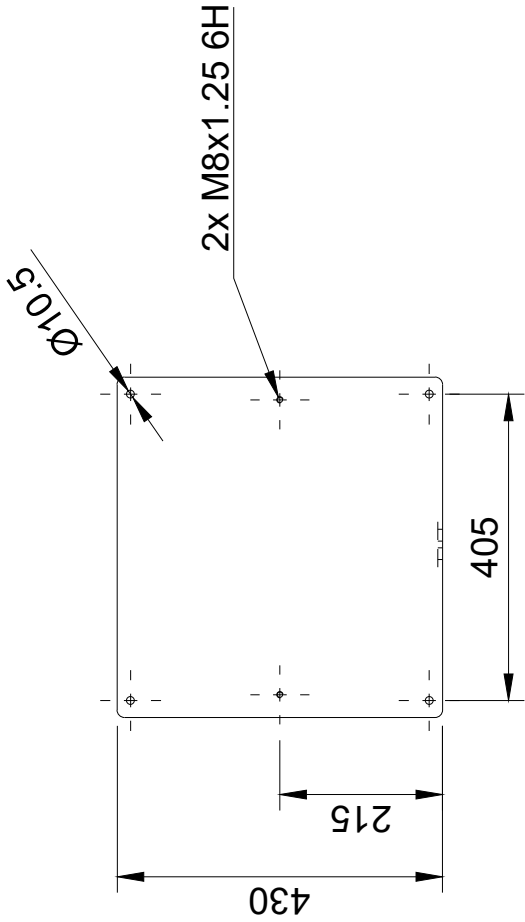
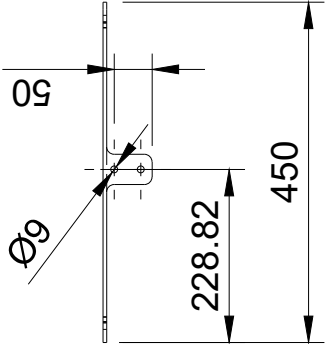
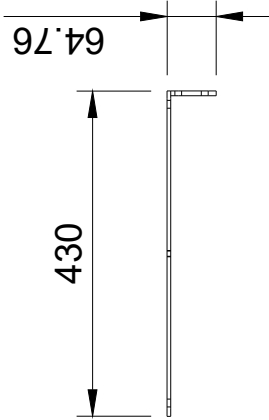
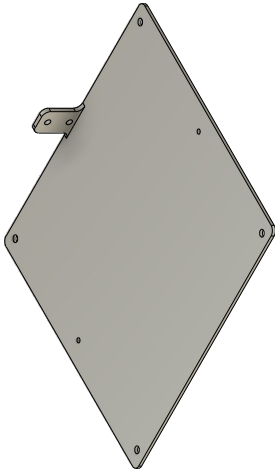
Dept.	Technical reference	Created by	Approved by
	mm	Fabio Zi Run Yan 22/11/2025	
		Document type	Document status
		COMPUTADOR DE TESTES	Approved
		DWG No.	
		Rev.	Date of issue
		Sheet	
		1/1	



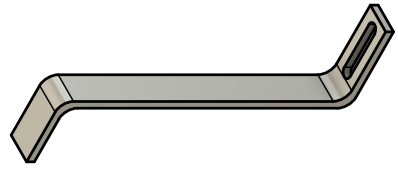
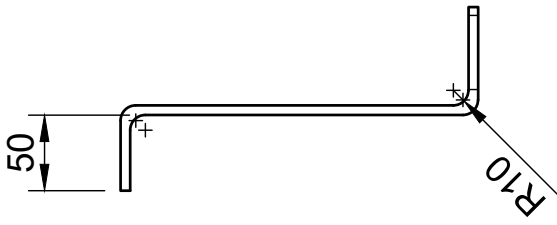
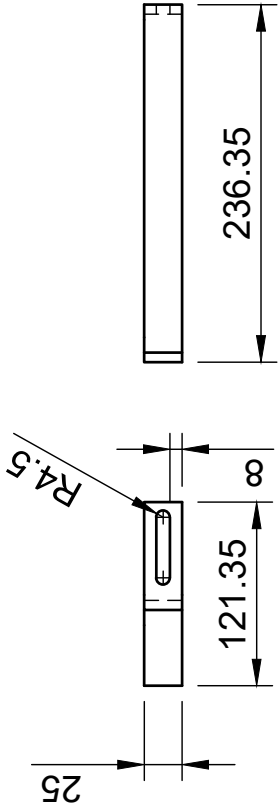
Dept.	Technical reference	Created by	Approved by
	mm	Fabio Zi Run Yan 21/11/2025	
		Document type	Document status
			Approved
		DWG No.	
		Title	
		Conector entre anéis	
		Rev.	Date of issue
			Sheet
			1/1



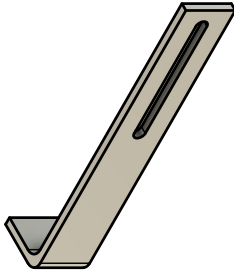
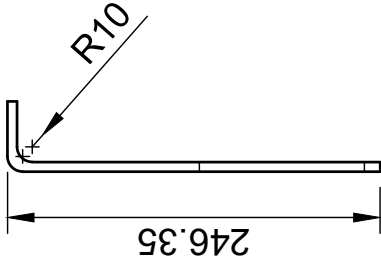
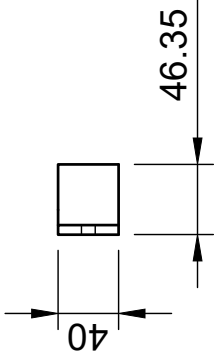
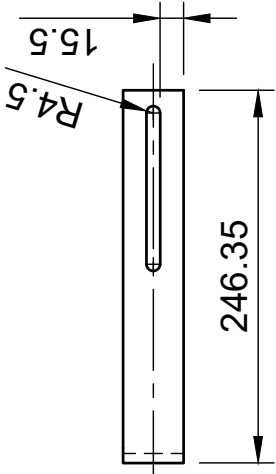
Dept.	Technical reference	Created by	Approved by
	mm	Fabio Zi Run Yan 21/11/2025	
		Document type	Document status
			Approved
		Title	DWG No.
		Fixação Computador de Teste	
			Rev.
			Date of issue
			Sheet
			1/1



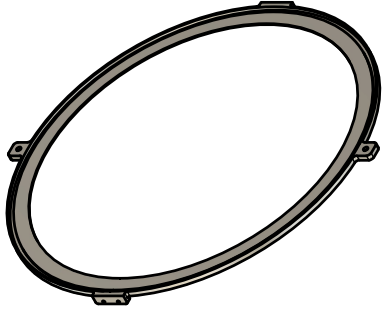
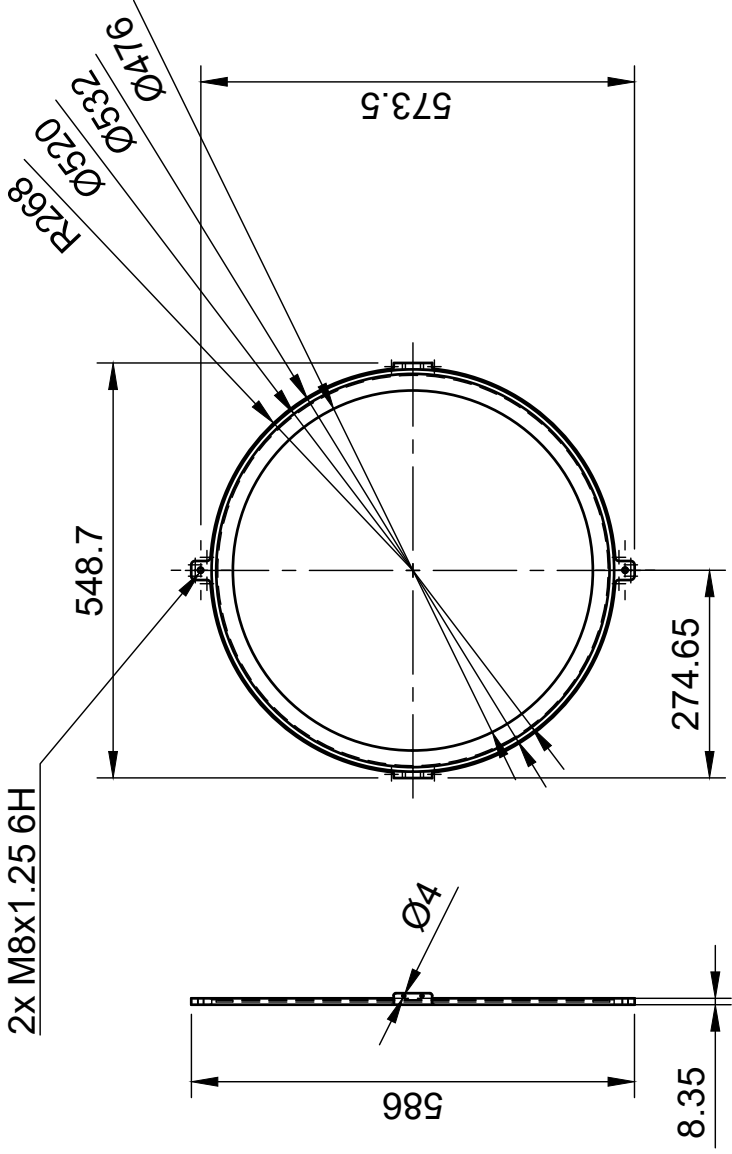
Dept.	Technical reference	Created by	Approved by	
	mm	Fabio Zi Run Yan 21/11/2025		
		Document type	Document status	
			Approved	
		Title	DWG No.	
		Fixação Computador de Teste Protótipo		
		Rev.	Date of issue	Sheet
				1/1



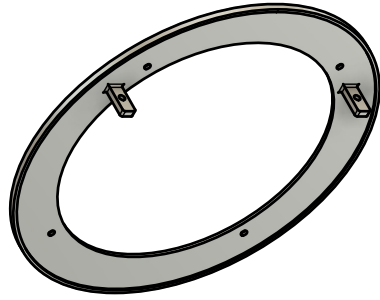
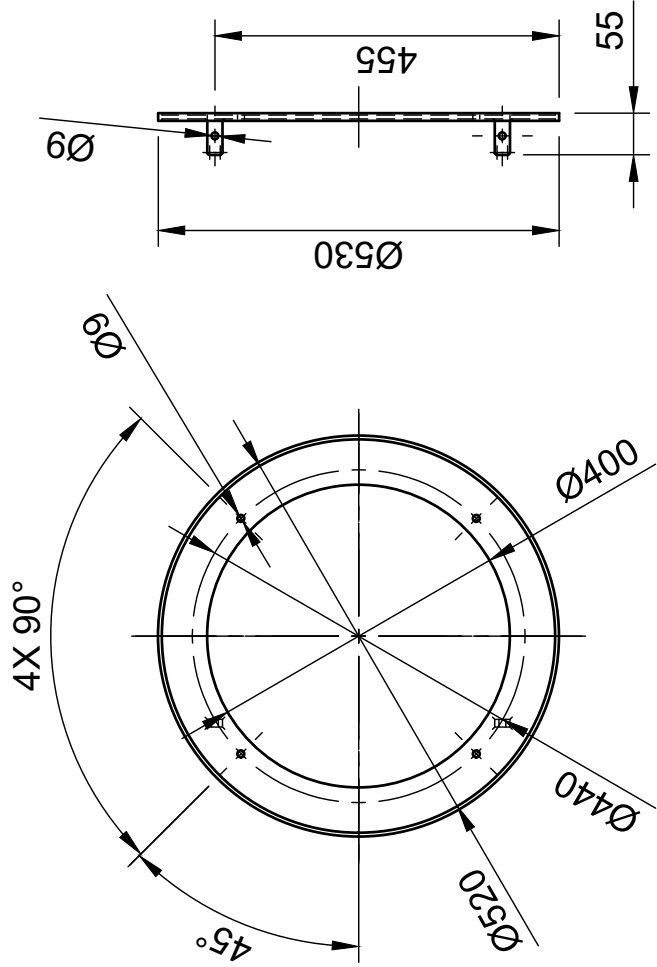
Dept.	Technical reference	Created by	Approved by
	mm	Fabio Zi Run Yan 21/11/2025	
		Document type	Document status
		Title	Approved
		DWG No.	
		Fixador Computador	
		Rev.	Date of issue
		Sheet	
		1/1	



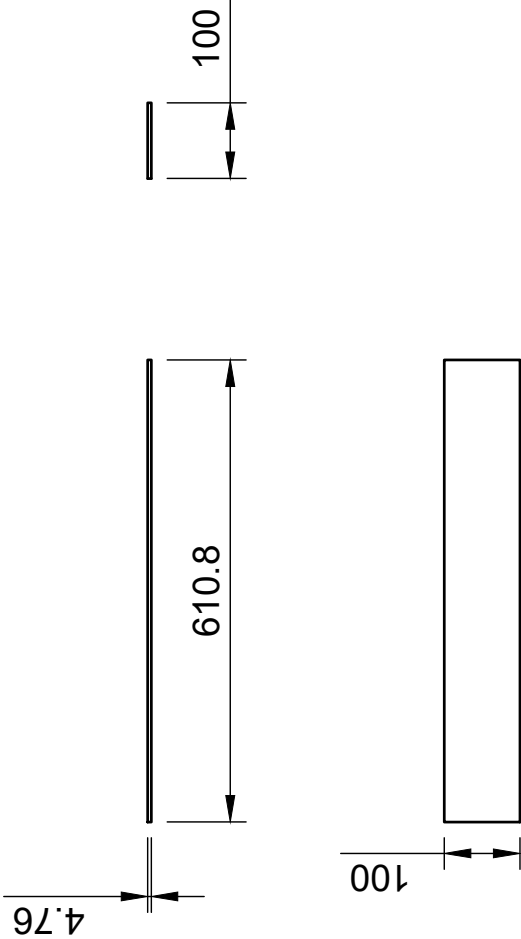
Dept.	Technical reference	Created by	Approved by	
	mm	Fabio Zi Run Yan 05/12/2025		
		Document type	Document status	
			Approved	
		Title	DWG No.	
		Fixador Computador Frontal		
		Rev.	Date of issue	Sheet
				1/1



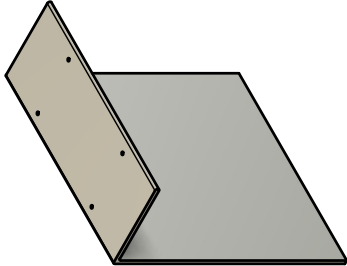
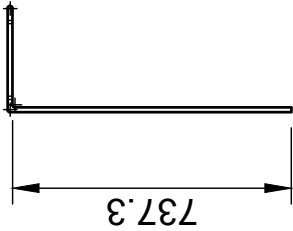
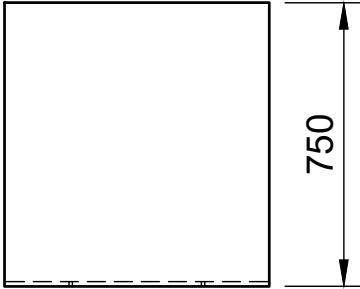
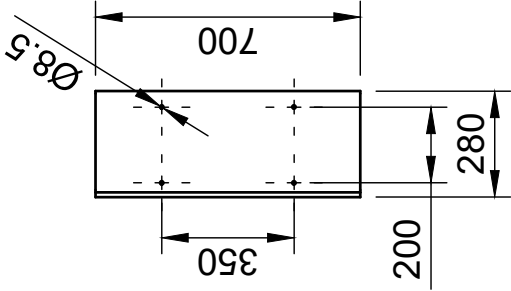
Dept.	Technical reference	Created by	Approved by
	mm	Fabio Zi Run Yan 21/11/2025	
		Document type	Document status
		Rolete Externo	Approved
		DWG No.	
		Rev.	Date of issue
		Sheet	
		1/1	



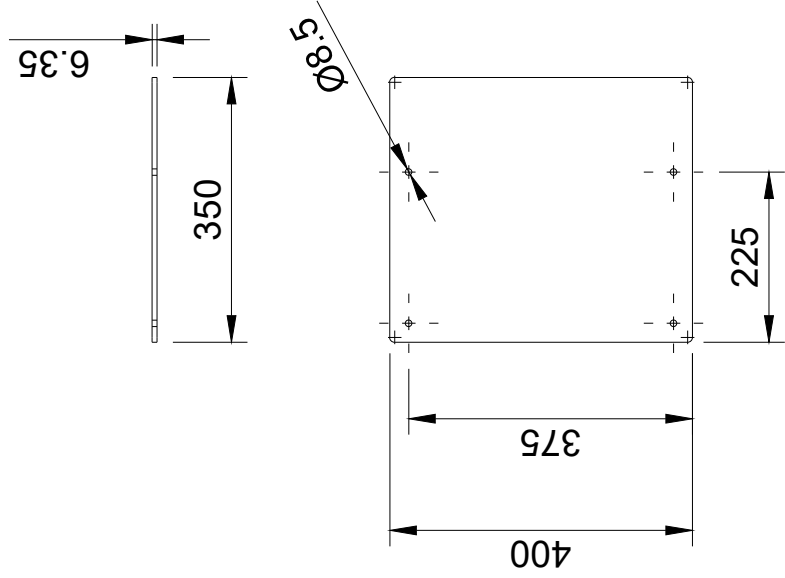
Dept.	Technical reference	Created by	Approved by
	mm	Fabio Zi Run Yan 21/11/2025	
		Document type	Document status
			Approved
		DWG No.	
		Title	
		Rolete Secundário	
		Rev.	Date of issue
			Sheet
			1/1



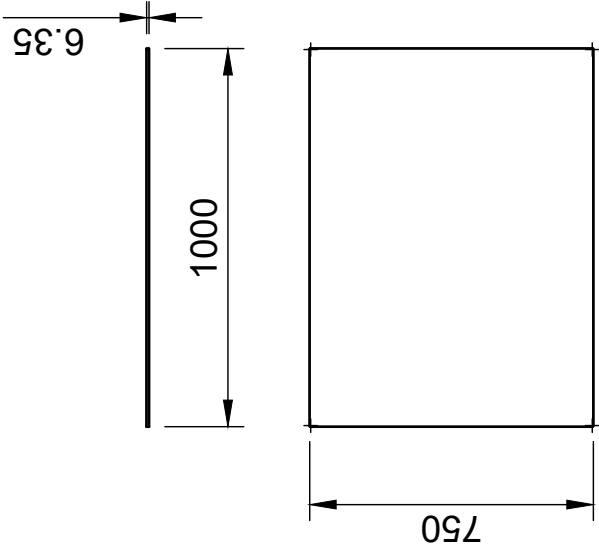
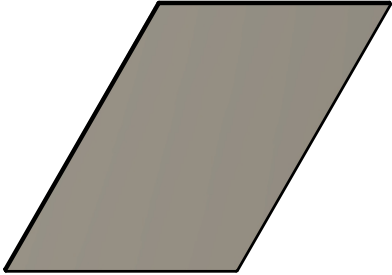
Dept.	Technical reference	Created by	Approved by	
	mm	Fabio Zi Run Yan 21/11/2025		
		Document type	Document status	
			Approved	
		Title	DWG No.	
		Suporte do Motor		
		Rev.	Date of issue	Sheet
				1/1



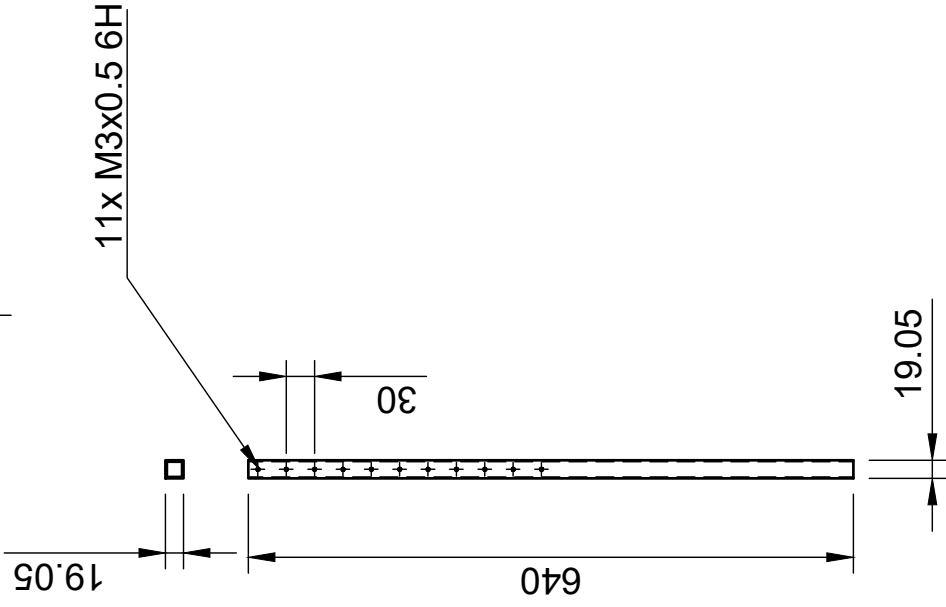
Dept.	Technical reference mm	Created by Fabio Zi Run Yan 21/11/2025	Approved by	
		Document type	Document status Approved	
		Title Suporte Motor	DWG No.	
		Rev.	Date of issue	Sheet 1/1



Dept.	Technical reference	Created by	Approved by	
	mm	Fabio Zi Run Yan 22/12/2025		
		Document type	Document status	
			Approved	
		Title	DWG No.	
		SUPORTE DO MOTOR PROTÓTIPO		
		Rev.	Date of issue	Sheet
				1/1



Dept.	Technical reference	Created by	Approved by
	mm	Fabio Zi Run Yan 21/11/2025	
		Document type	Document status
			Approved
		DWG No.	
		Title	
		Tampa da Mesa	
		Rev.	Date of issue
			Sheet
			1/1



Dept.	Technical reference	Created by	Approved by	
	mm	Fabio Zi Run Yan 21/11/2025		
		Document type	Document status	
			Approved	
		DWG No.		
		Title		
		Tubo Fixação		
		Rev.	Date of issue	Sheet
				1/1