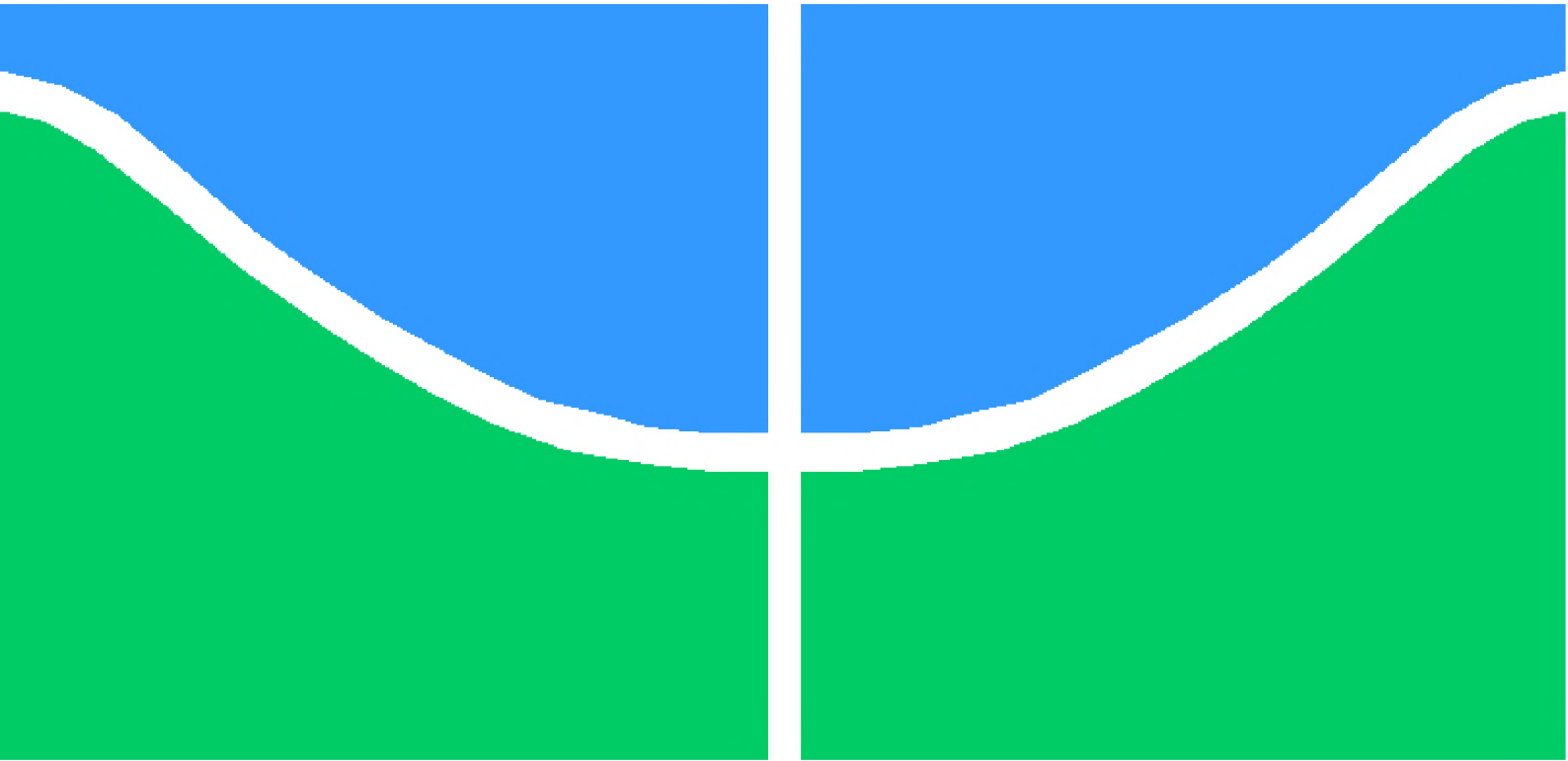




**Universidade de Brasília - UnB**  
**Faculdade UnB Gama - FGA**  
**Engenharia Aeroespacial**

# **Desenvolvimento e construção de um simulador de voo utilizando realidade virtual para uma aeronave do tipo planador**

**Autor: Cássio Ferreira da Cunha Filho**  
**Orientador: Prof. PhD Mateus Rodrigues Miranda**

**Brasília, DF**  
**2025**



Cássio Ferreira da Cunha Filho

# **Desenvolvimento e construção de um simulador de voo utilizando realidade virtual para uma aeronave do tipo planador**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Aeroespacial da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Aeroespacial.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof. PhD Mateus Rodrigues Miranda

Brasília, DF

2025

---

Cássio Ferreira da Cunha Filho

Desenvolvimento e construção de um simulador de voo utilizando realidade virtual para uma aeronave do tipo planador/ Cássio Ferreira da Cunha Filho. – Brasília, DF, 2025-134 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. PhD Mateus Rodrigues Miranda

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA , 2025.

1. Ergonomia. 2. Simulação de voo. I. Prof. PhD Mateus Rodrigues Miranda. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Desenvolvimento e construção de um simulador de voo utilizando realidade virtual para uma aeronave do tipo planador

CDU 02:141:005.6

---

Cássio Ferreira da Cunha Filho

# **Desenvolvimento e construção de um simulador de voo utilizando realidade virtual para uma aeronave do tipo planador**

Monografia submetida ao curso de graduação  
em Engenharia Aeroespacial da Universidade  
de Brasília, como requisito parcial para obten-  
ção do Título de Bacharel em Engenharia Aero-  
espacial.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 19 de fevereiro de 2025:

---

**Prof. PhD Mateus Rodrigues Miranda**  
Orientador

---

**Profa. Dra. Polliana Candida Oliveira  
Martins**  
Convidado 1

---

**Prof. PhD Manuel Nascimento Dias  
Barcelos Junior**  
Convidado 2

Brasília, DF  
2025

*Dedico este trabalho a todos aqueles que buscam transformar ideias em realidade, que enxergam além do óbvio e que acreditam no poder da persistência.*

# Agradecimentos

A realização deste trabalho só foi possível graças ao apoio e contribuição de diversas pessoas e instituições. Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador Prof. PhD Mateus Rodrigues Miranda pela orientação, paciência e dedicação ao longo deste projeto. Agradeço também à equipe Dragonfly, em especial ao colega João Marcos Guimarães Rodrigues, que me ajudou na construção do produto final. À Universidade de Brasília (UnB), em especial à Faculdade do Gama, pela infraestrutura e pelo ambiente acadêmico que proporcionaram as condições necessárias para a realização deste trabalho. Por fim, à minha família, em especial meu pai e minha mãe pelo apoio incondicional, incentivo e compreensão durante toda a jornada acadêmica.

*“Sua vida, portanto, oscila como um pêndulo,  
para aqui e para acolá, entre a dor e o tédio,  
os quais em realidade são seus componentes básicos.  
[...], após o homem ter posto todo sofrimento  
e tormento no inferno, nada restou para o céu  
senão o tédio.”*

- Arthur Schopenhauer

# Resumo

O presente trabalho descreve o processo de idealização, prototipagem, testes, execução e construção de um *cockpit* para simulação de voo de uma aeronave planadora, empregando parâmetros ergonômicos. A motivação para este estudo surge da crescente demanda do mercado por soluções econômicas que permitam validar aeronaves, testar sistemas e capacitar pilotos de forma eficiente. O objetivo principal deste texto consiste na avaliação das condições de usabilidade e conforto do cockpit, validadas por meio de testes de bancada. Para tanto, foram utilizadas metodologias como *mockups* rápidos, análise RULA (*Rapid Upper Limb Assessment*) e *package*, além da consideração de um público-alvo abrangente e inclusivo, baseado em diretrizes de percentis e antropometria. Os testes realizados permitiram uma abordagem subjetiva da experiência de cada ocupante, por meio da avaliação individual pós-utilização, bem como uma análise objetiva centrada nas características e necessidades específicas dos pilotos. Essas análises foram fundamentadas nas morfologias variadas dos pilotos, o que propiciou o refinamento dos parâmetros ergonômicos e a otimização das condições de simulação. Como resultado, foi possível desenvolver um simulador de voo físico que incorpora tais características, visando à validação dos parâmetros ergonômicos e à melhoria da experiência do usuário. Este trabalho contribui, portanto, para o avanço no campo da simulação de voo, oferecendo uma solução acessível e adaptável às necessidades do setor aeronáutico.

**Palavras-chave:** Ergonomia; Mock-up; Planador; Cockpit Aeronáutico; Aviação Experimental.

# Abstract

This work describes the process of conceptualization, prototyping, testing, and implementation of a cockpit for flight simulation of a glider aircraft, employing ergonomic parameters. The motivation for this study arises from the growing market demand for cost-effective solutions to validate aircraft, test systems, and efficiently train pilots. The main objective of this work is to evaluate the usability and comfort conditions of the cockpit, validated through bench tests. To achieve this, methodologies such as rapid *mockups*, RULA (*Rapid Upper Limb Assessment*) analysis, and *package* were used, along with the consideration of a broad and inclusive target audience based on percentile guidelines and anthropometry. The conducted tests allowed for a subjective approach to each occupant's experience through individual post-usage evaluation, as well as an objective analysis focused on the specific characteristics and needs of the pilots. These analyses were based on the varied morphologies of pilots, enabling the refinement of ergonomic parameters and the optimization of simulation conditions. As a result, a physical flight simulator was developed, incorporating these features to validate ergonomic parameters and enhance the user experience. This work, therefore, contributes to the advancement of flight simulation, offering an accessible and adaptable solution to the needs of the aeronautical sector.

**Keywords:** Ergonomics; Mock-up; Glider; Aeronautical Cockpit; Experimental Aviation.

# Lista de ilustrações

|                                                                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Logo da equipe Dragonfly. . . . .                                                                                                                    | 21 |
| Figura 2 – Principais medidas antropométricas. . . . .                                                                                                          | 23 |
| Figura 3 – Diferenças proporcionais entre diferentes grupos étnicos. . . . .                                                                                    | 25 |
| Figura 4 – Curva de Gauss para estatura. . . . .                                                                                                                | 26 |
| Figura 5 – Antropometria masculina em diferentes percentis. . . . .                                                                                             | 27 |
| Figura 6 – Antropometria feminina em diferentes percentis. . . . .                                                                                              | 28 |
| Figura 7 – Nomenclatura, ângulos e marcação do Eye Point. . . . .                                                                                               | 29 |
| Figura 8 – Zonas de alcance. . . . .                                                                                                                            | 30 |
| Figura 9 – Ângulos de análise para o braço superior. . . . .                                                                                                    | 31 |
| Figura 10 – Ângulos de análise para o braço inferior. . . . .                                                                                                   | 32 |
| Figura 11 – Ângulos de análise para o punho. . . . .                                                                                                            | 32 |
| Figura 12 – Ângulos de análise para a cabeça. . . . .                                                                                                           | 33 |
| Figura 13 – Ângulos de análise para o tronco. . . . .                                                                                                           | 34 |
| Figura 14 – Diagrama representativo das pontuações RULA. . . . .                                                                                                | 34 |
| Figura 15 – Simulador simples para uso caseiro. . . . .                                                                                                         | 36 |
| Figura 16 – Simulador caseiro de alto custo. . . . .                                                                                                            | 37 |
| Figura 17 – Simulador profissional para treinamento. . . . .                                                                                                    | 38 |
| Figura 18 – Simuladores <i>Full Motion</i> . . . . .                                                                                                            | 38 |
| Figura 19 – Superfícies de controle de uma aeronave convencional. . . . .                                                                                       | 40 |
| Figura 20 – Movimentos de voo (STUDENT PILOT MANUAL, 2023). . . . .                                                                                             | 41 |
| Figura 21 – Sistema de freio aerodinâmico do planador: (a) foto do freio aerodinâmico e<br>(b) desenho esquemático mostrando seu funcionamento. (GREINER, 2018) | 42 |
| Figura 22 – Atuação do freio aerodinâmico de um planador. . . . .                                                                                               | 42 |
| Figura 23 – Exemplo de <i>mock up</i> rápido. . . . .                                                                                                           | 43 |
| Figura 24 – RV aplicada à simulação de voo do Saab 39 Gripen. . . . .                                                                                           | 44 |
| Figura 25 – AC-21 e dimensões importadas no software. . . . .                                                                                                   | 46 |
| Figura 26 – CAD do Motoplanador AC-21. . . . .                                                                                                                  | 46 |
| Figura 27 – Atualização de seção transversal (CUNHA FILHO, 2022) adaptado. . . . .                                                                              | 47 |
| Figura 28 – Vista frontal e lateral do <i>cockpit</i> . . . . .                                                                                                 | 48 |
| Figura 29 – Vista isométrica do <i>cockpit</i> . . . . .                                                                                                        | 49 |
| Figura 30 – Principais medidas para o projeto do assento. . . . .                                                                                               | 49 |
| Figura 31 – Medidas do trilho do assento. . . . .                                                                                                               | 50 |
| Figura 32 – Detalhamento do mecanismo de trava e do trilho. . . . .                                                                                             | 50 |
| Figura 33 – Ajuste máximo e mínimo do assento fonte: autor. . . . .                                                                                             | 51 |
| Figura 34 – Vista frontal e lateral do assento com trava no máximo. . . . .                                                                                     | 51 |
| Figura 35 – Vista superior e lateral do assento com trava no mínimo. . . . .                                                                                    | 52 |

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 36 – Vista lateral e isométrica do manche. . . . .                                            | 52 |
| Figura 37 – Pedais do planador GROB G103. . . . .                                                    | 53 |
| Figura 38 – Vista lateral, frontal e isométrica do conjunto do pedal. . . . .                        | 53 |
| Figura 39 – Cremalheira do Pedal. . . . .                                                            | 54 |
| Figura 40 – Velocímetro, indicador de subida e altímetro, respectivamente. . . . .                   | 54 |
| Figura 41 – CAD do painel preliminar. . . . .                                                        | 55 |
| Figura 42 – Representação em zonas de alcance da ferramenta <i>reach envelope</i> . . . . .          | 57 |
| Figura 43 – Configuração do <i>cockpit</i> após o posicionamento do banco. . . . .                   | 57 |
| Figura 44 – Tabela de possibilidades para o manequim. . . . .                                        | 58 |
| Figura 45 – Percentis sentados com banco ajustado. . . . .                                           | 58 |
| Figura 46 – Envelopes para as 3 zonas de alcance. . . . .                                            | 59 |
| Figura 47 – Configuração final dos comandos no <i>cockpit</i> . . . . .                              | 59 |
| Figura 48 – Linha angulada da visão dos pilotos. . . . .                                             | 60 |
| Figura 49 – [Linhas de visão coincidindo para ambos os percentis. . . . .                            | 60 |
| Figura 50 – Zona 3 de alcance sobreposta e linha de visão em relação ao painel. . . . .              | 61 |
| Figura 51 – Representação da visão pela ferramenta <i>Vision Window</i> . . . . .                    | 61 |
| Figura 52 – Configuração final dos comandos e painel no <i>cockpit</i> . . . . .                     | 62 |
| Figura 53 – Resultados na análise RULA para o $P_{100}$ masculino. . . . .                           | 62 |
| Figura 54 – Resultados na análise RULA para o $P_{2,5}$ feminino. . . . .                            | 63 |
| Figura 55 – Separação e catalogação dos materiais para o <i>mockup</i> . . . . .                     | 64 |
| Figura 56 – CAD do <i>mockup</i> simplificado. . . . .                                               | 64 |
| Figura 57 – Assento de <i>mockup</i> após corte e soldagem. . . . .                                  | 65 |
| Figura 58 – Base de tubo de PVC usada no <i>mockup</i> . . . . .                                     | 65 |
| Figura 59 – <i>Mockup</i> rápido devidamente montado. . . . .                                        | 66 |
| Figura 60 – Autor realizando o teste do <i>mockup</i> . . . . .                                      | 68 |
| Figura 61 – Exemplo de estrutura V-slot. . . . .                                                     | 70 |
| Figura 62 – Impressora 3D presente no laboratório da FCTE. . . . .                                   | 71 |
| Figura 63 – Interface Joystick <i>BU0836X</i> . . . . .                                              | 72 |
| Figura 64 – Módulo Leonardo e componentes eletrônicos. . . . .                                       | 73 |
| Figura 65 – Modelo preliminar do simulador, fonte: autor. . . . .                                    | 74 |
| Figura 66 – Estrutura do simulador finalizada. . . . .                                               | 76 |
| Figura 67 – Estrutura atual sobreposta com a antiga. . . . .                                         | 77 |
| Figura 68 – Modelagem do módulo de controles montado. . . . .                                        | 78 |
| Figura 69 – Comandos dos freios aerodinâmicos. . . . .                                               | 78 |
| Figura 70 – Prototipagem da integração eletrônica. . . . .                                           | 80 |
| Figura 71 – Caixa da eletrônica. . . . .                                                             | 80 |
| Figura 72 – Esquema de conexão da eletrônica. . . . .                                                | 81 |
| Figura 73 – <i>Meta Quest 2</i> a direita e <i>Cardboard</i> Genérico de celular a esquerda. . . . . | 82 |
| Figura 74 – Registro do simulador montado. . . . .                                                   | 82 |

|                                                                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 75 – Posicionamento do módulo eletrônico no módulo estrutural. . . . .                             | 83  |
| Figura 76 – Seleção do controlador Arduino no software de simulação. . . . .                              | 83  |
| Figura 77 – Planador ASK 21 selecionado no XPlane 11. . . . .                                             | 84  |
| Figura 78 – Visão em primeira pessoa do planador escolhido. . . . .                                       | 85  |
| Figura 79 – Visão na tela do celular após a conexão RV. . . . .                                           | 85  |
| Figura 80 – Registro da integração final da RV. . . . .                                                   | 86  |
| Figura 81 – Registro de demonstração final da bancada de simulação. . . . .                               | 86  |
| Figura 83 – Vista frontal e superior do <i>mockup</i> do simulador, fonte: autor. . . . .                 | 101 |
| Figura 84 – Planta de três vistas do banco de metalom, fonte: autor. . . . .                              | 102 |
| Figura 85 – Planta de três vistas do conjunto do manche, fonte: autor. . . . .                            | 103 |
| Figura 86 – Planta de três vistas do conjunto do pedal, fonte: autor. . . . .                             | 104 |
| Figura 87 – Planta da vista isométrica da operação do freio aerodinâmico. . . . .                         | 105 |
| Figura 88 – Planta de três vistas do conjunto do controle de freio aerodinâmico, fonte:<br>autor. . . . . | 106 |
| Figura 89 – Planta de três vistas do banco, fonte: autor. . . . .                                         | 107 |
| Figura 90 – Planta de Três vistas do manche do simulador. . . . .                                         | 109 |
| Figura 91 – Planta de Três vistas da alavanca do freio aerodinâmico. . . . .                              | 110 |
| Figura 92 – Vistas do apoio da alavanca de freio. . . . .                                                 | 111 |
| Figura 93 – Encaixe do potenciômetro e engrenagem. . . . .                                                | 112 |
| Figura 94 – Montagem do sistema de controles. . . . .                                                     | 113 |
| Figura 95 – Montagem final do simulador. . . . .                                                          | 115 |
| Figura 96 – Esquema de cores para os canos de PVC. . . . .                                                | 117 |
| Figura 97 – Montagem frontal da estrutura do simulador. . . . .                                           | 118 |
| Figura 98 – Processo de marcação e furação da placa de madeira. . . . .                                   | 119 |
| Figura 99 – Placa de madeira fixa na estrutura. . . . .                                                   | 119 |
| Figura 100–Montagem preliminar da estrutura de fixação do banco automotivo. . . . .                       | 120 |
| Figura 101–Posicionamento da estrutura para marcação com o banco. . . . .                                 | 120 |
| Figura 102–Fixação preliminar do banco na estrutura. . . . .                                              | 121 |
| Figura 103–Linha de corte para os tubos azuis da fixação do banco. . . . .                                | 122 |
| Figura 104–Conexões em "T" para junção dos cortes nos tubos azuis. . . . .                                | 122 |
| Figura 105–Fixação final do banco na estrutura. . . . .                                                   | 123 |
| Figura 106–Etapa final de montagem da estrutura de fixação do banco. . . . .                              | 123 |
| Figura 107–Encaixe final da estrutura do simulador. . . . .                                               | 124 |
| Figura 108–Estrutura do simulador finalizada. . . . .                                                     | 124 |
| Figura 109–Peças de impressão do conjunto do freio aerodinâmico. . . . .                                  | 126 |
| Figura 110–Encaixe do potenciômetro na engrenagem. . . . .                                                | 127 |
| Figura 111–Encaixe do potenciômetro no apoio da alavanca. . . . .                                         | 127 |
| Figura 112–Posicionamento da alavanca no suporte. . . . .                                                 | 128 |
| Figura 113–Sinalização dos locais de fixação da correia. . . . .                                          | 128 |

|                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 114– Sistema de controle do freio aerodinâmico montado. . . . . | 129 |
| Figura 115– Esquema de conexão para a eletrônica. . . . .              | 131 |
| Figura 116– Blueprint AC-21. . . . .                                   | 134 |

# Lista de tabelas

|                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1 – Ações de Segurança de acordo com o Nível de Risco. . . . .                      | 35  |
| Tabela 2 – Tabela de materiais necessários para a construção do <i>mockup</i> . . . . .    | 64  |
| Tabela 3 – Médias das notas masculinas para o conforto. . . . .                            | 68  |
| Tabela 4 – Médias das notas femininas para o conforto. . . . .                             | 68  |
| Tabela 5 – Médias das notas masculinas para o alcance. . . . .                             | 69  |
| Tabela 6 – Médias das notas femininas para o alcance. . . . .                              | 69  |
| Tabela 7 – Médias das avaliações de entrada e saída para masculino e feminino. . . . .     | 70  |
| Tabela 8 – Tabela de materiais e custos. . . . .                                           | 75  |
| Tabela 9 – Tabela de materiais e custos para a montagem estrutural. . . . .                | 88  |
| Tabela 10 – Tabela de materiais e custos para a montagem dos controles. . . . .            | 88  |
| Tabela 11 – Tabela de equipamentos de interface necessários e custos. . . . .              | 89  |
| Tabela 12 – Tabela de equipamentos necessários e custos. . . . .                           | 89  |
| Tabela 13 – Requisitos mínimos e recomendados para o X-Plane 11 . . . . .                  | 90  |
| Tabela 14 – Tabela de materiais necessários para a montagem estrutural . . . . .           | 116 |
| Tabela 15 – Tabela de materiais necessários para a montagem estrutural . . . . .           | 117 |
| Tabela 16 – Tabela de materiais necessários para a montagem do controle de freios. . . . . | 125 |

# Lista de abreviaturas e siglas

|        |                                                               |
|--------|---------------------------------------------------------------|
| CNPq   | Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico |
| FAPDF  | Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal              |
| UnB    | Universidade de Brasília                                      |
| ABERGO | Associação Brasileira de Ergonomia                            |
| IATA   | <i>International Air Transport Association</i>                |
| ANAC   | Agência Nacional de Aviação Civil                             |
| FAB    | Força Aérea Brasileira                                        |
| FGA    | Faculdade do Gama                                             |
| FCTE   | Faculdade de Ciências e Tecnologias em Engenharia             |
| AIE    | Associação Internacional de Ergonomia                         |
| CEP    | Comitê de Ética em Pesquisa                                   |
| Conep  | Comissão Nacional de Ética em Pesquisa                        |
| PIBIC  | Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica      |
| PIBEX  | Programa Institucional de Bolsas de Extensão                  |
| RULA   | <i>Rapid Upper Limb Assessment</i>                            |
| FFC    | <i>Full Flight Simulator</i>                                  |
| FMC    | <i>Full Motion Simulator</i>                                  |
| NR     | Norma Regulamentadora                                         |
| RV     | Realidade Virtual                                             |
| CAD    | <i>Computer Aided Design</i>                                  |
| DEP    | <i>Design Eye Point</i>                                       |
| FDM    | <i>Fused Deposition Modeling</i>                              |
| PCB    | <i>Printed Circuit Board</i>                                  |

|       |                                |
|-------|--------------------------------|
| A     | Área                           |
| m     | Metro                          |
| mm    | Milímetro                      |
| CG    | Centro de Gravidade            |
| CM    | Centro de Massa                |
| pol.  | Polegada                       |
| TCC   | Trabalho de Conclusão de Curso |
| masc. | Masculino                      |
| fem.  | Feminino                       |

# Sumário

|             |                                                 |           |
|-------------|-------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>    | <b>INTRODUÇÃO</b>                               | <b>19</b> |
| <b>1.1</b>  | <b>Contextualização</b>                         | <b>19</b> |
| <b>1.2</b>  | <b>Justificativa</b>                            | <b>19</b> |
| <b>1.3</b>  | <b>Objetivos</b>                                | <b>20</b> |
| 1.3.1       | Objetivo Geral                                  | 20        |
| 1.3.2       | Objetivos Específicos                           | 20        |
| <b>1.4</b>  | <b>Motivação</b>                                | <b>20</b> |
| <b>1.5</b>  | <b>Organização</b>                              | <b>21</b> |
| <b>2</b>    | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>                    | <b>23</b> |
| <b>2.1</b>  | <b>Ergonomia</b>                                | <b>23</b> |
| <b>2.2</b>  | <b>Antropometria</b>                            | <b>24</b> |
| <b>2.3</b>  | <b>Percentis</b>                                | <b>26</b> |
| 2.3.1       | O percentil feminino                            | 27        |
| <b>2.4</b>  | <b>Package</b>                                  | <b>28</b> |
| <b>2.5</b>  | <b>Rapid Upper Limb Assessment</b>              | <b>30</b> |
| 2.5.1       | Análise dos Membros Superiores pelo Método RULA | 31        |
| 2.5.2       | Análise dos Membros Inferiores pelo Método RULA | 33        |
| <b>2.6</b>  | <b>Simulação de voo</b>                         | <b>35</b> |
| 2.6.1       | Simulação de voo simples                        | 36        |
| 2.6.2       | Simulação de voo profissional                   | 37        |
| 2.6.3       | Simulação de voo Full Motion                    | 38        |
| <b>2.7</b>  | <b>Softwares de Simulação</b>                   | <b>39</b> |
| <b>2.8</b>  | <b>Desempenho de Aeronaves</b>                  | <b>40</b> |
| 2.8.1       | Controle de voo                                 | 40        |
| <b>2.9</b>  | <b>Mockup Rápido</b>                            | <b>42</b> |
| <b>2.10</b> | <b>Realidade Virtual</b>                        | <b>43</b> |
| <b>3</b>    | <b>METODOLOGIA</b>                              | <b>45</b> |
| <b>3.1</b>  | <b>Evoluções de projeto</b>                     | <b>45</b> |
| <b>3.2</b>  | <b>Projeto Preliminar</b>                       | <b>48</b> |
| 3.2.1       | Configuração da fuselagem                       | 48        |
| 3.2.2       | Configuração do assento                         | 49        |
| 3.2.3       | Comandos de voo                                 | 52        |
| 3.2.4       | Posicionamento da instrumentação de voo         | 54        |

|            |                                                           |           |
|------------|-----------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4</b>   | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>                            | <b>56</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Resultados da etapa de análise virtual</b>             | <b>56</b> |
| 4.1.1      | Posicionamento no <i>cockpit</i>                          | 56        |
| 4.1.1.1    | Posicionamento dos comandos                               | 56        |
| 4.1.1.2    | Posicionamento dos instrumentos                           | 59        |
| 4.1.2      | Níveis de conforto da análise virtual                     | 62        |
| <b>4.2</b> | <b>Resultados da etapa de <i>mockup</i> rápido físico</b> | <b>63</b> |
| 4.2.1      | Construção do <i>mockup</i>                               | 63        |
| 4.2.2      | Questionário Subjetivo                                    | 66        |
| 4.2.3      | Níveis de conforto da análise de <i>mockup</i> físico     | 68        |
| 4.2.4      | Níveis de alcance da análise de <i>mockup</i> físico      | 69        |
| 4.2.5      | Dificuldade de entrada e saída do <i>mockup</i>           | 69        |
| <b>4.3</b> | <b>Resultados da etapa de simulador</b>                   | <b>70</b> |
| 4.3.1      | Preparativos construtivos de estrutura                    | 70        |
| 4.3.2      | Preparativos construtivos dos controles                   | 71        |
| 4.3.3      | Preparativos construtivos de eletrônica                   | 71        |
| 4.3.4      | Preparativos construtivos da interface                    | 73        |
| 4.3.5      | Simulador preliminar                                      | 74        |
| 4.3.6      | Estimativa de custos inicial                              | 74        |
| 4.3.7      | Construção do simulador                                   | 75        |
| 4.3.7.1    | Construção do módulo estrutural                           | 75        |
| 4.3.7.2    | Construção do módulo de controles                         | 77        |
| 4.3.7.3    | Construção do módulo de eletrônica e código               | 78        |
| 4.3.7.4    | Construção do módulo de interface                         | 81        |
| 4.3.7.5    | Montagem dos módulos                                      | 82        |
| 4.3.8      | Configuração do software de simulação                     | 83        |
| 4.3.8.1    | Definição do Arduino como <i>joystick</i>                 | 83        |
| 4.3.8.2    | Seleção da aeronave no software                           | 84        |
| 4.3.8.3    | Configuração da RV                                        | 85        |
| 4.3.9      | Teste final da integração                                 | 85        |
| 4.3.10     | Resultados do simulador físico                            | 86        |
| 4.3.10.1   | Limitações do simulador de voo projetado                  | 87        |
| 4.3.10.2   | Potenciais melhorias com investimento adicional           | 87        |
| 4.3.11     | Materiais e custos                                        | 88        |
| 4.3.11.1   | Custo final do simulador                                  | 88        |
| 4.3.11.2   | Requisitos mínimos para o simulador                       | 89        |
| <b>5</b>   | <b>CONCLUSÃO</b>                                          | <b>91</b> |

|       |                                                                                   |            |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------|
|       | <b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .                                                      | <b>93</b>  |
|       | <b>APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO SUBJETIVO DE AVALIAÇÃO DO MOCKUP</b> . . . . .       | <b>96</b>  |
| A.0.1 | Questionário Pós-Pilotagem . . . . .                                              | 96         |
|       | <b>APÊNDICE B – DESENHOS TÉCNICOS DA ETAPA DE <i>MOCKUP</i></b>                   | <b>100</b> |
|       | <b>APÊNDICE C – DESENHOS TÉCNICOS DO SIMULADOR FINAL</b>                          | <b>108</b> |
|       | <b>APÊNDICE D – MONTAGEM FINAL DO SIMULADOR</b> . . . . .                         | <b>114</b> |
|       | <b>APÊNDICE E – MANUAL DE MONTAGEM ESTRUTURAL</b> . . .                           | <b>116</b> |
|       | <b>APÊNDICE F – MANUAL DE MONTAGEM DO COMANDO DO FREIO AERODINÂMICO</b> . . . . . | <b>125</b> |
|       | <b>APÊNDICE G – VISTA ESQUEMÁTICA DA CONEXÃO ELETRÔNICA</b> . . . . .             | <b>130</b> |
|       | <b>APÊNDICE H – CÓDIGO ARDUÍNO</b> . . . . .                                      | <b>132</b> |
|       | <b>ANEXO A – VISTAS DO AC-21</b> . . . . .                                        | <b>134</b> |

# 1 Introdução

## 1.1 Contextualização

O controle e a realização do voo foram desafios que engajaram cientistas, engenheiros, inventores e entusiastas ao longo de dois séculos. As primeiras demonstrações de voo com um balão de ar quente pelo jesuíta brasileiro Bartolomeu de Gusmão em 1709 indicaram a possibilidade de transformar o sonho de voar em realidade. Contudo, segundo Barros (2006), o voo controlado foi definitivamente comprovado em 19 de outubro de 1901, quando o dirigível de Alberto Santos Dumont contornou a Torre Eiffel em Paris. A invenção do avião em 1906, entretanto, causou um impacto global significativo, tornando-se o principal meio de transporte transcontinental e alterando profundamente as relações internacionais e todos os aspectos da vida moderna .

Desde sua concepção, as aeronaves sofreram inúmeras transformações e incorporaram uma ampla gama de tecnologias. Essas inovações introduziram novos aspectos que antes não existiam e que agora exigem a atenção e o foco do piloto para garantir o controle adequado e o voo eficiente. Dessa forma, surge a necessidade de uma avaliação metódica centrada no piloto, a fim de assegurar que ele tenha um espaço claramente definido na aeronave.

A análise ergonômica de aeronaves examina fatores como a acessibilidade dos comandos, a visibilidade, a força necessária, os ângulos de posicionamento e os níveis de conforto, visando determinar a posição ideal do piloto dentro da cabine de comando.

"No contexto dos planadores, que são aeronaves desprovidas de motor, a criação de um *package* bem ajustado proporciona ao piloto uma sensação ampliada de segurança e conforto, permitindo que ele se concentre nas manobras necessárias para aproveitar as correntes de ar e sustentação, diante da ausência de propulsão mecânica"(CUNHA FILHO, 2023).

## 1.2 Justificativa

Para que o piloto esteja apto a pilotar a aeronave e enfrentar condições adversas durante o voo, é fundamental um treinamento adequado. É de interesse de diversos setores do meio aeronáutico que o aprendizado dos fundamentos e técnicas seja realizado da maneira mais segura e eficiente possível.

Os interessados no desenvolvimento de simuladores de voo abrangem desde pequenas escolas de aviação, que buscam soluções mais econômicas e seguras para treinar pilotos, até grandes empresas fabricantes de aeronaves e companhias aéreas, que necessitam de simuladores avançados para treinar pilotos para novas aeronaves e simular condições adversas específicas.

O uso de simuladores proporciona a esses diferentes agentes um método eficaz de treinamento que contribui para a segurança e o aprimoramento das habilidades dos pilotos.

Por esse motivo, muitos estudos sobre a temática de simulação de voo são conduzidos anualmente em diferentes contextos, aeronaves e aplicações.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo Geral

Tem-se como objetivo geral deste trabalho o desenvolvimento, prototipagem e validação ergonômica de uma bancada de simulação de voo física de baixo custo para um planador. Este projeto envolve a integração de hardware e software para criar um ambiente de simulação realista, que replica as condições de voo e permite a análise de usabilidade de aeronaves não motorizadas.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Avaliar o conforto, a usabilidade, o campo de visão e o alcance do piloto no protótipo virtual e bancada física;
- Selecionar, por meio de pesquisa de mercado, os materiais, equipamentos e sensores com a melhor relação custo-benefício para a construção de um simulador físico;
- Integrar eletronicamente os comandos ao simulador de voo para a construção de um simulador físico;
- Geração dos desenhos técnicos construtivos para o simulador físico de bancada e manuais de construção;

## 1.4 Motivação

O desenvolvimento de aeronaves experimentais é um campo de grande relevância e inovação dentro da engenharia aeroespacial. A motivação para o presente trabalho decorre da relação entre as demandas atuais do setor aeronáutico e a capacidade de transformação proporcionada pela pesquisa acadêmica e pelo envolvimento em projetos práticos. Em particular, este trabalho é inspirado e alimentado pela iniciativa da equipe Dragonfly, um grupo de aviação experimental da UnB.



Figura 1 – Logo da equipe Dragonfly.

Em 2019, a Dragonfly recebeu oficialmente o reconhecimento da UnB como um projeto de extensão. Sob a coordenação do Professor (PhD) Mateus Miranda, com o apoio de outros docentes adjuntos, o projeto avançou para o desenvolvimento da primeira aeronave.

A equipe Dragonfly, inicialmente com sua abordagem voltada para o desenvolvimento de um planador auto-lançável elétrico e agora também com foco na construção de simuladores de voo, representa um modelo de inovação tecnológica aplicada à aviação. O crescente interesse pelo uso de diferentes tecnologias na aviação motiva a busca por soluções que combinam eficiência e inovação. A abordagem da equipe Dragonfly, que integra a concepção teórica e prática, garante o aprendizado e a capacitação de novos profissionais na área.

Outro elemento motivador deste trabalho é a disciplina de ergonomia do produto, oferecida na Universidade de Brasília, que é fundamental no contexto aeronáutico para garantir a segurança, o conforto e a eficiência dos operadores. A ergonomia aplicada à aviação contribui para o desenvolvimento de sistemas que consideram as limitações e necessidades humanas, promovendo a usabilidade e o desempenho ideal dos pilotos e usuários de aeronaves e simuladores.

## 1.5 Organização

O trabalho é dividido nos seguintes capítulos:

- 1 **Introdução do trabalho:** Neste capítulo, foi apresentada a contextualização do tema, as justificativas que fundamentam a pesquisa, os objetivos do projeto, a motivação do estudo, e a organização estrutural do trabalho;
- 2 **Revisão Bibliográfica:** Este capítulo se dedicará à apresentação das fontes e metodologias teóricas que sustentam o desenvolvimento do trabalho. Serão discutidas as definições dos públicos-alvo da análise, as ferramentas de posicionamento e análise, além das definições da configuração preliminar e final do simulador de voo;

- 3 Metodologia: Neste capítulo, serão detalhadas as abordagens definidas na revisão bibliográfica. Serão apresentadas as análises dos projetos antecessores que influenciaram o desenvolvimento do projeto atual, destacando as evoluções e alterações realizadas;
- 4 Resultados e Discussões: Este capítulo abordará a análise dos resultados obtidos a partir das metodologias aplicadas, organizados nas etapas de análise virtual, física e construtiva do simulador de voo;
- 5 Conclusão: Neste capítulo, será apresentada a conclusão do trabalho, sintetizando os principais resultados obtidos e as contribuições do projeto para a área de estudo. Também serão apontadas as limitações do trabalho, bem como sugestões para futuras pesquisas e possíveis aprimoramentos do simulador de voo desenvolvido.

## 2 Revisão Bibliográfica

### 2.1 Ergonomia

Apesar de a Ergonomia como ciência ter se iniciado no século XIX, segundo Miranda (2017) seu conceito básico — a adaptação das coisas ao homem — já era utilizado desde as civilizações antigas .

Composta pelas palavras "Ergon"(trabalho) e "Nomos"(lei ou regra), foca na adaptação do trabalho ao homem. A ergonomia é: "[...]o conjunto de conhecimentos científicos relativos ao homem e necessários para a concepção de ferramentas, máquinas e dispositivos que possam ser utilizados com o máximo de conforto, segurança e eficácia"(WISNER, 1987).

Na figura 2 estão representadas as principais medidas antropométricas utilizadas na análise ergonômica de adaptação do trabalho ao homem.

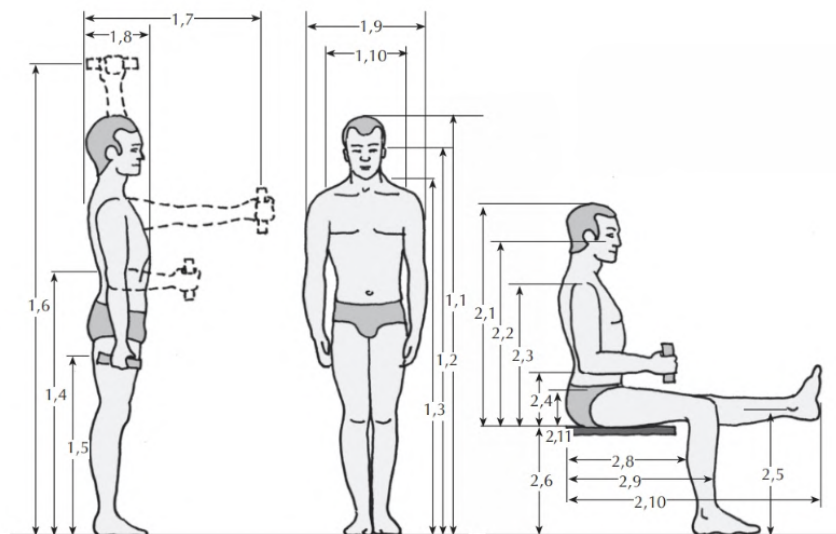


Figura 2 – Principais medidas antropométricas (IIDA, 2016).

"A ergonomia leva em consideração os fatores físicos, ambientais, cognitivos, organizacionais e sociotécnicos"(AIE, 2020, *apud* ABERGO, 2024). Dessa forma, podemos interpretar a ergonomia como a integração das áreas de conhecimento de psicologia, fisiologia, anatomia, sociologia e engenharia, voltadas para a adaptação humana ao trabalho.

Apesar de sua complexidade evidente, segundo Miranda (2014), podemos simplificar a análise ergonômica como a avaliação dos problemas relacionados aos custos humanos no trabalho ou à usabilidade de mecanismos e maquinários, incluindo fadiga, estresse, lesões, mutilações e até mesmo mortes.

Conforme mencionado por Read (2018), os princípios da Ergonomia estão fundamentados nos seguintes valores essenciais:

- Valorizar os seres humanos como recursos essenciais e valiosos;
- Utilizar a tecnologia como uma ferramenta para apoiar os indivíduos;
- Fomentar a melhoria da qualidade de vida das pessoas;
- Respeitar as diferenças e particularidades individuais;
- Assumir responsabilidade perante todas as partes interessadas.

Dessa forma, uma análise ergonômica eficaz deve incorporar a avaliação dos impactos do ambiente de trabalho sobre os indivíduos, respeitando e levando em conta as variações entre as pessoas, e priorizando, acima de tudo, a saúde e o bem-estar dos trabalhadores.

## 2.2 Antropometria

A antropometria, que se dedica ao estudo das formas e tamanhos do corpo humano, é derivada das palavras latinas "Anthropos"(homem) e "Metrikos"(medida). Mais especificamente, segundo Roebuck (1995), é a ciência que mede e a arte que aplica esses conhecimentos para definir a geometria física, as propriedades e as capacidades físicas do corpo humano.

Conforme explicado por Iida (2016), existem três modos principais para a realização de medidas antropométricas:

- Antropometria estática: Envolve a medição dos segmentos do corpo enquanto ele está parado, entre pontos anatômicos facilmente identificáveis.
- Antropometria dinâmica: Foca nos alcances dos movimentos do corpo, medindo pontos anatômicos enquanto a pessoa realiza algum movimento. Esses dados incluem as medidas da antropometria estática e são úteis para criar projetos mais precisos.
- Antropometria funcional: É usada para avaliar movimentos combinados do corpo durante a execução de tarefas específicas, como pegar um objeto em uma mesa. Nessa situação, por exemplo, a extensão do braço é acompanhada pela inclinação do tronco para frente.

As três análises antropométricas contribuem para o desenvolvimento de um produto de interação humano-máquina eficiente. Segundo Miranda (2014), "A qualidade ergonômica de um produto passa, necessariamente, pela sua adequação antropométrica". Portanto, a análise da antropometria do indivíduo deve ser realizada nos três modos descritos, visando a uma melhor qualidade ergonômica e adequação do produto final.

Outro ponto fundamental na análise antropométrica voltada para a concepção de um produto de engenharia são as considerações acerca das diferenças de estatura e medidas corporais entre indivíduos de diferentes etnias. A Figura 3 ilustra essa relação, mostrando diferenças em diversas medidas corporais de homens adultos médios pertencentes a diferentes etnias, incluindo um homem negro norte-americano, um homem branco norte-americano e um homem japonês em sua exemplificação.

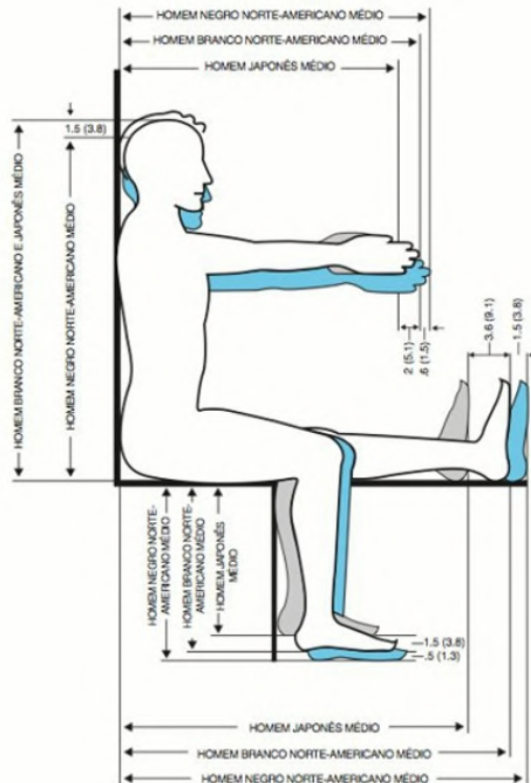


Figura 3 – Diferenças proporcionais entre diferentes grupos étnicos. (DREYFUSS, 2005).

No Brasil, apesar de as Forças Armadas terem uma nova proposta para criar uma tabela antropométrica atualizada da população brasileira, a ausência de dados antropométricos abrangentes no Brasil continua sendo uma questão não resolvida (MIRANDA, 2014). Apesar disso, existem métodos confiáveis para mensurar a antropometria dos indivíduos brasileiros. O principal deles é pela comparação entre as tabelas antropométricas estrangeiras. Segundo (IIDA, 2016), ao comparar o levantamento preliminar feito no Brasil com o levantamento realizado na Europa, nota-se que os brasileiros apresentam diferenças de no máximo 3% em relação aos europeus mediterrâneos (portugueses, espanhóis, franceses, italianos e gregos). Dessa forma, considerando a tolerância de 5%, é possível utilizar as tabelas antropométricas francesas, por exemplo, como base para a análise da antropometria dos brasileiros.

## 2.3 Percentis

Da mesma forma que a análise antropométrica do público-alvo é essencial para a obtenção de um projeto ergonômico bem-sucedido, a avaliação dos percentis é igualmente decisiva para atingir esse objetivo.

Segundo apontado por Braatz (2021, v. 1, p. 391) "A compreensão dos percentis remete aos conceitos de distribuição de probabilidade[...]". "Em estatística descritiva, o *k*-ésimo percentil  $P_k$  é o valor  $x$  que corresponde à frequência cumulativa de  $\frac{Nk}{100}$ , onde  $N$  é o tamanho amostral"(MIRANDA, 2017).

A figura 4 ilustra essa descrição e demonstra como os percentis se distribuem de acordo com a curva normal de Gauss. Nela, para qualquer percentil escolhido, a soma das parcelas até esse percentil representa a porcentagem igual ao número do percentil. Por exemplo, para o 80º,  $P_{80}$ , é correto afirmar que 80% da população possui estatura menor ou igual a ele.

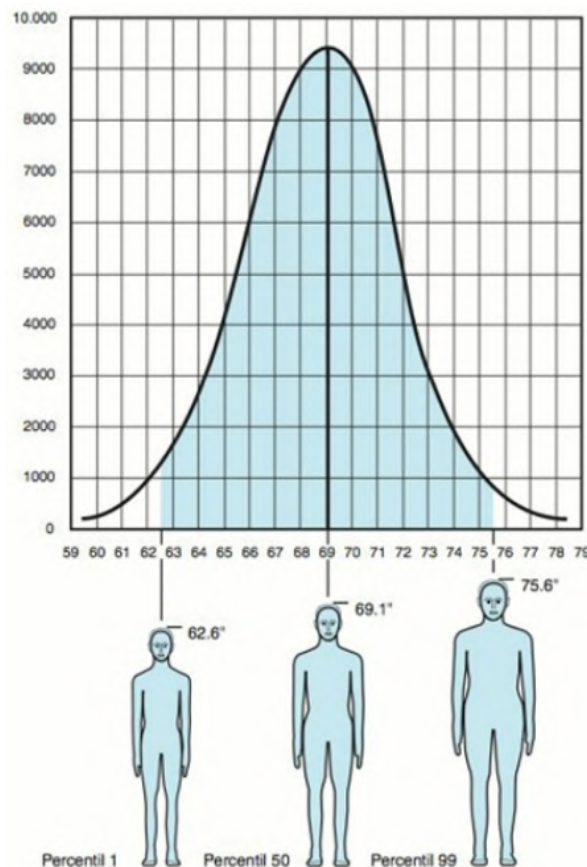


Figura 4 – Curva de Gauss para estatura (DREYFUSS, 2005).

Na busca por um projeto ergonômico que atenda a uma ampla parcela da população, é essencial considerar diversos percentis dos indivíduos. De acordo com a Norma Regulamentadora nº 17 (1978), para adequar as condições de trabalho, o projetista deve considerar as características antropométricas de 90% dos trabalhadores. Dessa forma, o produto final não ficará restrito a um percentil específico.

Com exceção de soluções altamente especializadas, como os *cockpits* de carros de Fórmula 1, que são desenvolvidos exclusivamente para um único piloto, as soluções de engenharia comerciais devem abranger uma variedade de públicos com diferentes estaturas. Esse enfoque garante que o projeto seja mais inclusivo e adaptável a diferentes usuários.

Portanto, a avaliação dos percentis é crucial não apenas pelos fatores sociais descritos por Read (2018) e discutidos na seção 2.1, mas também do ponto de vista econômico, uma vez que, conforme mencionado por Braatz (2021), atender exclusivamente aos extremos da população pode tornar um projeto inviável. Dessa forma, a incorporação de ajustes no produto final, como os ajustes presentes em bancos de carros, assegura uma cobertura abrangente de praticamente todo o espectro de variação dos percentis.

### 2.3.1 O percentil feminino

Um tópico muito importante se tratando da análise de percentis é a inclusão do percentil feminino. Segundo Dreyfuss (2005), existem três categorias de diversidade e variação humana: intra-individuais, que se referem às mudanças nos tamanhos ao longo da vida adulta devido a fatores como envelhecimento e alimentação; variabilidade secular, que abrange variações entre gerações, geralmente lentas e de menor impacto; e, por fim, a mais significativa, interindividuais, que envolve grandes diferenças decorrentes do sexo e da origem étnica dos indivíduos.

A consideração dos percentis femininos é essencial, pois, em média, as mulheres apresentam configurações fisiológicas e anatômicas significativamente diferentes das dos homens. Portanto, elas devem ser analisadas de forma individual na avaliação ergonômica.

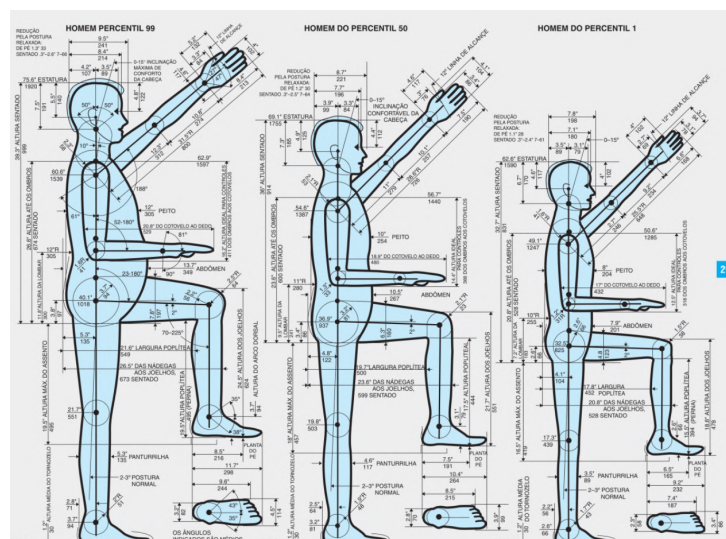


Figura 5 – Antropometria masculina em diferentes percentis (DREYFUSS, 2005).

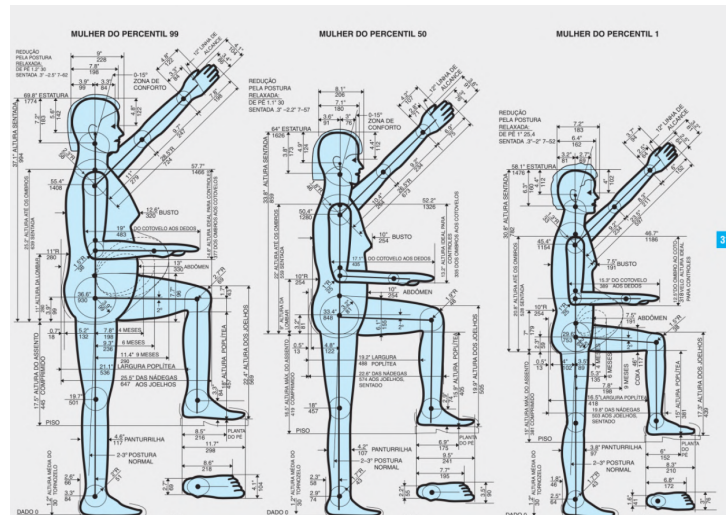


Figura 6 – Antropometria feminina em diferentes percentis (DREYFUSS, 2005).

As Figuras 5 e 6, ilustram as principais diferenças entre homens e mulheres adultos para diferentes números de percentis. Observa-se que a altura de uma mulher  $P_1$  é de 58,1 pol., cerca de 1,47 m, enquanto um homem no mesmo percentil apresenta uma altura de 62,6 pol., cerca de 1,60 m. Quando extrapolamos essa comparação para o  $P_{100}$  masc., a altura chega a 75,6 pol., ou 1,92 m. Esses parâmetros evidenciam que, ao considerar apenas os percentis masc., as usuárias do sexo fem. de menor estatura poderiam enfrentar dificuldades significativas, possivelmente até sendo impedidas de utilizar adequadamente certos equipamentos, máquinas ou veículos.

Segundo Balago (2023), atualmente, apenas 5% dos pilotos no mundo são mulheres, no Brasil, esse número é ainda menor, caindo para 3%. Nesse contexto, como exposto pela ANAC (2024), diversas iniciativas de inclusão, como a campanha "25 by 2025" da IATA, que estabelece metas para alcançar 25% de representação feminina, até o ano de 2025, já estão em andamento. Portanto, a inclusão dos percentis femininos no desenvolvimento de simuladores de voo não apenas assegura a usabilidade desses produtos por parte das mulheres, mas também se configura como uma ação essencial de inclusão e incentivo, promovendo a participação feminina na carreira de piloto.

## 2.4 Package

Após a definição antropométrica e ergonômica, um aspecto crucial é o posicionamento dos corpos no ambiente de trabalho, seja em um veículo, uma máquina ou uma cadeira de escritório. Esse posicionamento, conhecido como *package*, pode ser descrito como "a fase do projeto em que ocorre a disposição do corpo humano dentro de um veículo" (FREITAS, 2021).

A partir do *package* de uma aeronave, são determinadas tanto a disposição dos pilotos quanto a localização dos comandos, ajustando-os conforme a área de alcance de cada indivíduo.

De acordo com a SAE (2003), para aeronaves, a norma mais adequada para o posiciona-

mento do piloto é a *ARP4101 Flight Deck Layout and Facilities*. Esta norma não apenas define o posicionamento do piloto em relação ao ponto de visão, ou *Eye Point*, mas também realiza uma análise detalhada do posicionamento dos comandos da aeronave, que são classificados em três zonas:

- **ZONA I:** Controles alcançados com cinto atado e travado, e os membros não muito esticados;
- **ZONA II:** Controles alcançados com cinto atado e travado, e os membros totalmente estendidos;
- **ZONA III:** Demais controles.

Além dos alcances do piloto, a etapa de *package* é onde são ajustados os elementos visuais do *cockpit* da aeronave. As definições de visualização dos instrumentos e seu posicionamento ideal seguem a dinâmica do ponto de visão do piloto, conhecido como Eye Point ou DEP. Este ponto é definido como:

"Um ponto fixo em relação à fuselagem do avião no qual o olho do piloto deve ser posicionado quando estiver sentado na posição de pilotagem. Este ponto deve ser a principal referência para a localização dos demais itens do cockpit." (MIRANDA, 2017)

O posicionamento dos comandos deve seguir o DEP, de acordo com as especificações da norma *MIL-STD-1333B* do Departamento de Defesa Norte Americano (1976), origem de muitas das informações presentes na já citada *ARP4101* que fornece detalhes adicionais sobre o posicionamento de certos componentes em relação ao *Eye Point* e apresenta uma explicação mais detalhada acerca das zonas de alcance.

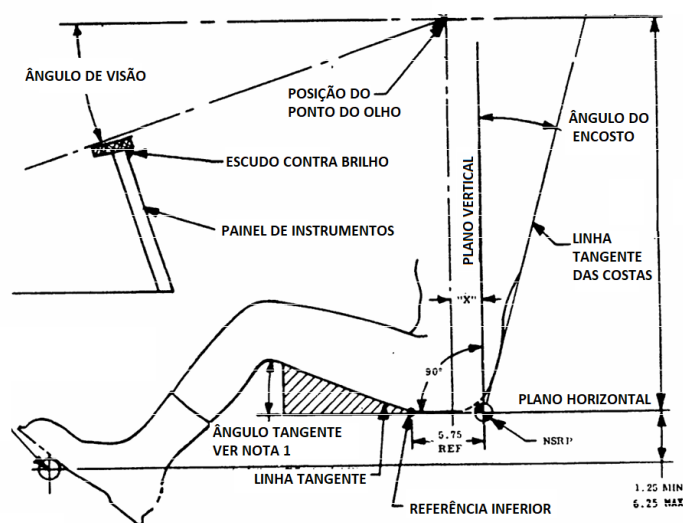


Figura 7 – Nomenclatura, ângulos e marcação do Eye Point. (DEPARTMENT OF DEFENSE, 1976), adaptado.

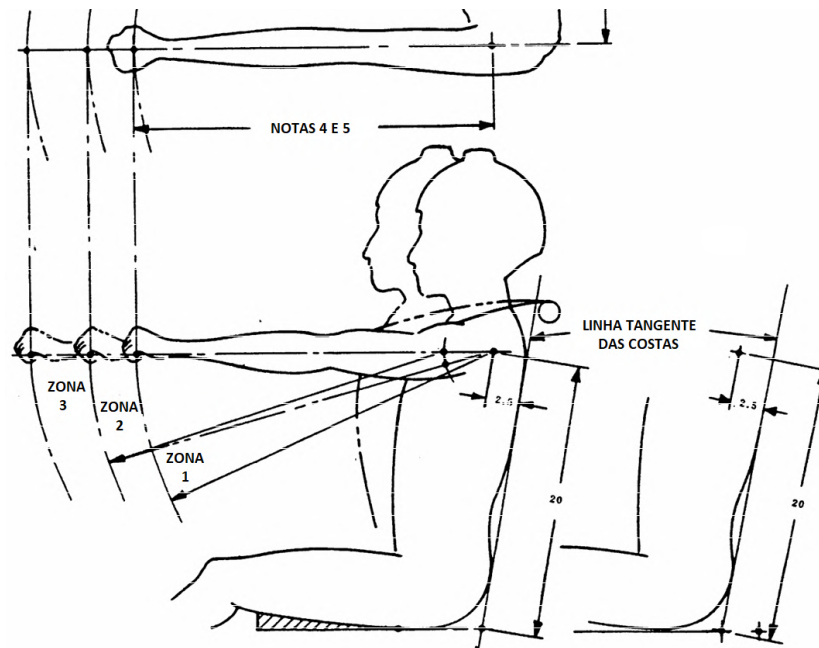


Figura 8 – Zonas de alcance (DEPARTMENT OF DEFENSE, 1976), adaptado.

Em planadores, "a criação de um package bem ajustado proporciona ao piloto uma sensação ampliada de segurança e conforto, permitindo que ele se concentre nas manobras necessárias para aproveitar as correntes de ar e sustentação"(CUNHA FILHO, 2023).

## 2.5 Rapid Upper Limb Assessment

Também referenciada pelo nome *RULA Analysis* o sistema foi desenvolvido no Instituto de Ergonomia Ocupacional da Universidade de Nottingham. Ele foi criado inicialmente para investigar a exposição de trabalhadores individuais a riscos associados a distúrbios musculoesqueléticos relacionados ao trabalho nos membros superiores. Foi elaborado por meio da avaliação das posturas adotadas, das forças necessárias e das ações musculares de operadores que trabalham em uma variedade de tarefas de manufatura, onde podem estar presentes fatores de risco associados a distúrbios dos membros superiores.

Segundo o autor do método de análise:

"Essa ferramenta não requer equipamentos especiais e oferece uma avaliação rápida das posturas do pescoço, tronco e membros superiores, além de avaliar a função muscular e as cargas externas experimentadas pelo corpo. Um sistema de codificação é utilizado para gerar uma lista de ações que indica o nível de intervenção necessário para reduzir os riscos de lesões devido à carga física sobre o operador."(MCATAMNEU, 1993), tradução do autor do TCC.

De acordo com a documentação do CATIA v5 (2009) - software RULA utilizado para essa análise - o estudo se concentra especialmente em compreender como as pessoas intera-

gem com objetos no ambiente de trabalho, além de avaliar os impactos de ações como levantar, abaixar, empurrar, puxar e carregar durante a execução de tarefas .

Segundo MCPhee (1987) *apud* MCAtamneu(1993), o método utiliza diagramas de posturas corporais e tabelas de pontuação para avaliar a exposição a fatores de risco. Os fatores de risco sob investigação estão descritos abaixo:

- Número de movimentos;
- Trabalho muscular estático;
- Força;
- Posturas de trabalho determinadas pelos equipamentos e mobiliário;
- Tempo trabalhado sem pausa.

Para realizar a pontuação, de acordo com o exposto por Freitas (2021), o método divide o corpo em duas seções, denominadas A e B. A primeira seção (A) avalia os seguintes membros: braço superior, antebraço, pulso e torção do pulso. Já a segunda seção (B) avalia: pescoço, tronco e pernas. A pontuação é realizada membro a membro nesta ordem, pois uma afeta a outra.

### 2.5.1 Análise dos Membros Superiores pelo Método RULA

Segundo MCAtamneu (1993), as pontuações são atribuídas da seguinte maneira:

Para os intervalos de movimento para o braço superior, as pontuações são as seguintes:

- 1 para extensão de 20° a 20° de flexão;
- 2 para extensão superior a 20° ou flexão de 20° a 45°;
- 3 para flexão de 45° a 90°;
- 4 para flexão de 90° ou mais.

A Figura 9 representa os deslocamentos para o braço superior retratados nas pontuações acima:

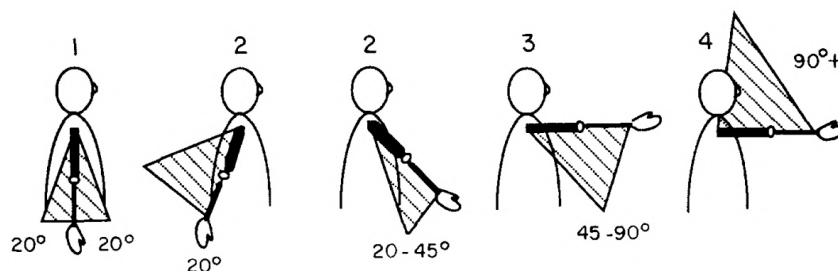


Figura 9 – Ângulos de análise para o braço superior (MCATAMNEU, 1993).

Se o ombro estiver elevado, a pontuação da postura é aumentada em 1. Se o braço superior estiver abduzido, a pontuação é aumentada em 1. Se o operador estiver inclinado ou o peso do braço estiver apoiado, a pontuação da postura é diminuída em 1.

Para a análise do braço inferior, as pontuações são:

- 1 para flexão de  $60^\circ$  a  $100^\circ$ ;
- 2 para flexão menor que  $60^\circ$  ou maior que  $100^\circ$ .

A figura 10 exemplifica os ângulos de deslocamento analisados para o antebraço:

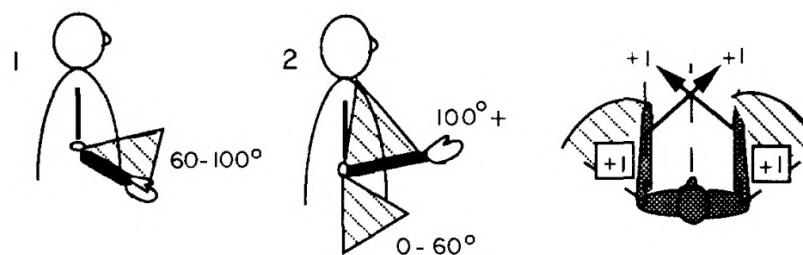


Figura 10 – Ângulos de análise para o braço inferior (MCATAMNEU, 1993), adaptado.

Se o braço inferior estiver trabalhando através da linha média do corpo ou para o lado, a pontuação da postura é aumentada em 1.

Para o punho, representado na Figura 11, a pontuação é definida da seguinte maneira:

- 1 se estiver em uma posição neutra;
- 2 para  $0-15^\circ$  em flexão ou extensão;
- 3 para  $15^\circ$  ou mais em flexão ou extensão.

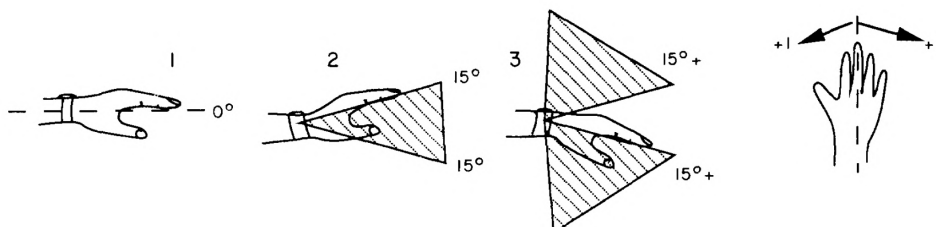


Figura 11 – Ângulos de análise para o punho (MCATAMNEU, 1993).

Se o punho estiver em desvio radial ou ulnar, a pontuação da postura é aumentada em 1.

A pronação e supinação do punho (torção do punho) são definidas em torno da postura neutra. Com base em MCAtamneu (1993), as pontuações são:

- 1 se o punho estiver na faixa média de torção;
- 2 se o punho estiver no final da faixa de torção.

### 2.5.2 Análise dos Membros Inferiores pelo Método RULA

Ainda de acordo com o artigo de MCAtamneu (1993):

Para intervalos de pontuação da postura para o pescoço, ilustrados na Figura 12, as pontuações e intervalos são:

- 1 para flexão de  $0^\circ$  a  $10^\circ$ ;
- 2 para flexão de  $10^\circ$  a  $20^\circ$ ;
- 3 para flexão de  $20^\circ$  ou mais;
- 4 se em extensão.

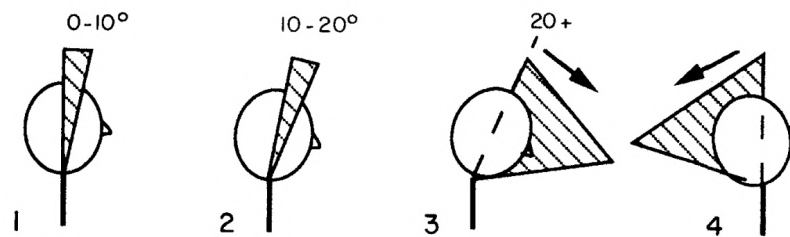


Figura 12 – Angulos de análise para a cabeça (MCATAMNEU, 1993).

Se o pescoço estiver torcido, essas pontuações de postura são aumentadas em 1. Se o pescoço estiver em inclinação lateral, a pontuação é aumentada em 1 ponto.

Os intervalos para o tronco estão listados abaixo e podem ser observados na Figura 13:

- 1 quando sentado e bem apoiado, com um ângulo quadril-tronco de  $90^\circ$  ou mais;
- 2 para flexão de  $0^\circ$  a  $20^\circ$ ;
- 3 para flexão de  $20^\circ$  a  $50^\circ$ ;
- 4 para flexão de  $60^\circ$  ou mais.

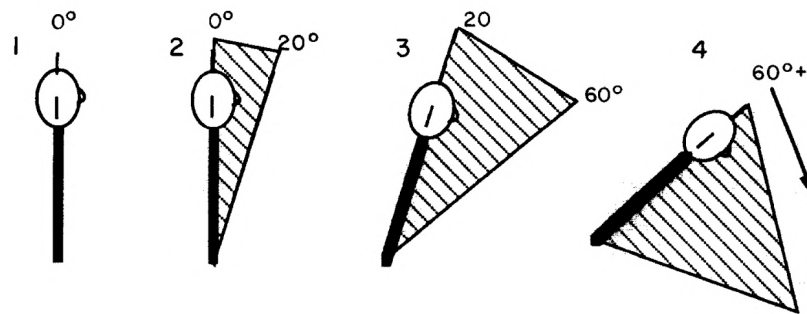


Figura 13 – Angulos de análise para o tronco (MCATAMNEU, 1993).

Se o tronco estiver torcido, a pontuação é aumentada em 1. Se o tronco estiver em inclinação lateral, a pontuação é aumentada em 1.

As pontuações de postura para as pernas são definidas como:

- 1 se as pernas e os pés estiverem bem apoiados ao estar sentado, com peso distribuído uniformemente;
- 1 se em pé com o peso do corpo distribuído uniformemente sobre ambos os pés, com espaço para mudanças de posição;
- 2 se as pernas e os pés não estiverem apoiados ou se o peso estiver distribuído de forma desigual.

Por fim, podemos resumir o fluxo de pontuações para o método RULA pelo diagrama presente na figura 14:

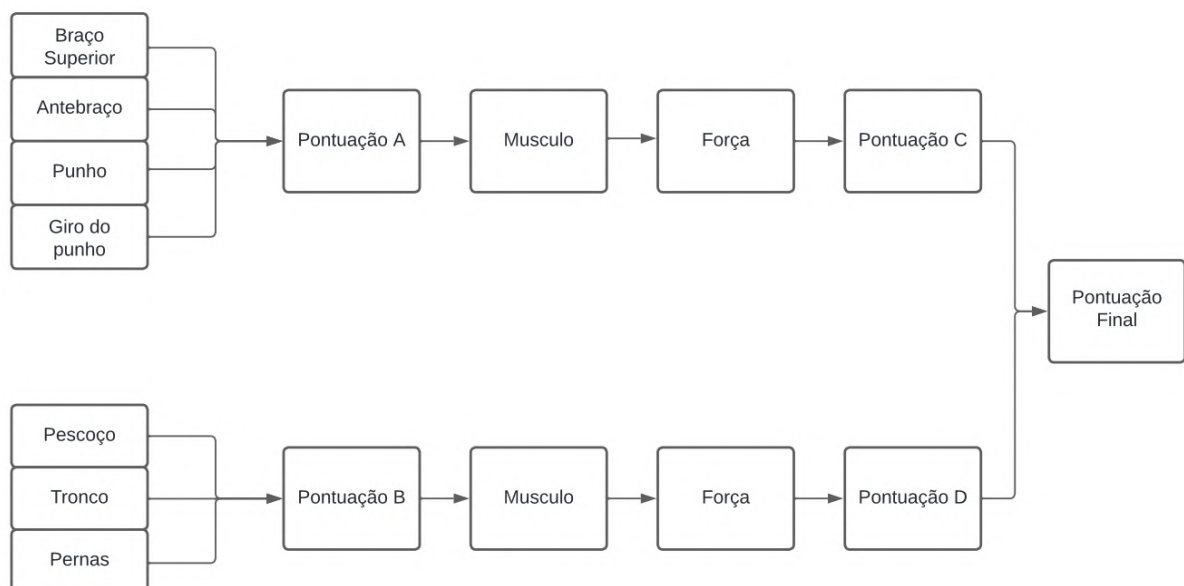


Figura 14 – Diagrama representativo das pontuações RULA (MCATAMNEU, 1993), adaptado.

Ao final da análise, a pontuação final, obtida pelo somatório das pontuações dos membros superiores e inferiores, é avaliada para determinar os níveis de conforto e segurança dos trabalhadores. Com base nessa avaliação, são adotadas ações conforme a necessidade. A Tabela 1 ilustra a urgência das ações a serem tomadas, conforme o grau de risco associado a cada nota final.

Tabela 1 – Ações de Segurança de acordo com o Nível de Risco. Fonte: Plus 2021, adaptado

| Nível | Grau        | Ação a ser tomada                |
|-------|-------------|----------------------------------|
| 1 a 2 | Sem Risco   | Nenhuma ação necessária          |
| 3 a 4 | Baixo Risco | Pouca ação necessária            |
| 5 a 6 | Médio Risco | Investigar ações a serem tomadas |
| > 6   | Alto Risco  | Necessidade de ações imediatas   |

Para uma análise padrão do RULA, não são necessários equipamentos especiais. No entanto, várias soluções comerciais, como o software CATIA V5, oferecem, em sua lista de ferramentas, ambientes que facilitam a análise de maneira simples e objetiva.

## 2.6 Simulação de voo

Após a invenção do avião por Santos Dumont, com o passar dos anos e o avanço das aeronaves, diversos acidentes relacionados à aviação ocorreram devido a falhas ou, em muitos casos, à falta de habilidade dos pilotos. Assim, surgiu a necessidade de oferecer aos pilotos iniciantes uma compreensão clara dos controles e das condições de voo, sem colocar em risco a segurança material ou a vida das pessoas.

Segundo Rolfe, (1986), como o próprio nome sugere, a função de um simulador de voo é replicar virtualmente, em solo, o comportamento de uma aeronave em voo, com o objetivo de manter e aprimorar as habilidades de pilotagem tanto de civis quanto de militares .

Os simuladores são ferramentas valiosas para estudar o comportamento das aeronaves. Ainda conforme Rolfe (1986), simuladores de voo representam uma fusão de arte, ciência e tecnologia. Quando empregados em ambientes de pesquisa, eles proporcionam diversas opções de design, evitando assim custos elevados e atrasos associados à construção e teste de múltiplos protótipos.

Segundo Horn (2005) *apud* Oliveira (2022), com o avanço na construção de simuladores de voo, que se destacam pelo alto desempenho e baixo custo computacional, é possível analisar detalhadamente as respostas dinâmicas das aeronaves antes da construção física do projeto. Essa capacidade permite realizar ajustes e melhorias de forma prematura. Tais análises preliminares também auxiliam na avaliação de aspectos relacionados à ergonomia, usabilidade e outros fatores críticos, garantindo seu aprimoramento desde o início do desenvolvimento do projeto.

De acordo com Rolfe (1986), simuladores de voo são utilizados em diversas áreas:

- Treinamento: São amplamente empregados para o treinamento de pilotos e até mesmo de tripulações inteiras;
- Entretenimento: Com os avanços na computação, houve a popularização dos simuladores de voo, que passaram a ser amplamente utilizados como uma forma de recreação e entretenimento por usuários comuns;
- Engenharia: São usados em várias fases do desenvolvimento de aeronaves, incluindo concepção, projeto, ensaio e produção.

De acordo com Freitas (2021), os simuladores podem, ainda, ser classificados em três categorias: simuladores simples, profissionais e *Full Flight / Full Motion Simulator*. Atualmente, simuladores simples voltados para o entretenimento também podem ser utilizados para treinamento básico, devido ao elevado nível de sofisticação alcançado pela tecnologia de simulação. Esse progresso permite uma ampla variedade de ambientes de simulação e soluções disponíveis para o desenvolvimento de inúmeros tipos de simuladores.

### 2.6.1 Simulação de voo simples

Geralmente destinados ao entretenimento, esses simuladores simples costumam ser equipados com *joysticks* genéricos, assim como os representados na figura 15, frequentemente posicionados e fixados de maneira que não reflete a configuração de um avião real. Amplamente acessíveis ao público, esses simuladores são, em sua maioria, comercializados como jogos. Embora possam oferecer uma experiência relativamente fiel à realidade, não são recomendados para treinamento, dada sua natureza mais recreativa do que técnica. No entanto, com os recentes avanços tecnológicos e a disseminação de computadores mais potentes entre os usuários comuns, a qualidade da simulação simples tem se aproximado da de simuladores profissionais.



Figura 15 – Simulador simples para uso caseiro. (JMARCOS VIEIRA, 2020).

Embora não seja o foco principal dos simuladores destinados ao entretenimento, existem soluções altamente sofisticadas nessa categoria. Com o avanço das tecnologias, usuários domésticos têm acesso a soluções bastante precisas para simulação de voo. Alguns entusiastas da simulação podem investir dezenas de milhares de dólares em soluções comerciais ou personalizadas para simulação de voo doméstica, alcançando um nível de realismo surpreendente mesmo sendo considerada uma classe de simuladores "amadora".



Figura 16 – Simulador caseiro de alto custo. ([MAC BARE COCKPITS, 2025](#)).

### 2.6.2 Simulação de voo profissional

Esses simuladores são equipados com dispositivos avançados que replicam com precisão as posições e funcionalidades de uma aeronave real. Eles são utilizados para o treinamento de pilotos, permitindo a prática de procedimentos normais e de emergência de forma sequencial e realista. A figura 17 representa um exemplo de simulador profissional.



Figura 17 – Simulador profissional para treinamento (FAB, 2020).

"Em geral, esses simuladores são utilizados por escolas de aviação brasileiras para o treinamento de novos pilotos e, para serem empregados com essa finalidade, devem ser homologados pela ANAC"(FREITAS, 2021).

### 2.6.3 Simulação de voo Full Motion

"Também conhecidos como simuladores *Full Flight*, esses dispositivos replicam fielmente o ambiente de uma aeronave real, incluindo sua movimentação em voo"(FREITAS, 2021). Dois exemplos de simuladores do tipo *Full Motion* estão representados na Figura 18. A subfigura 18a ilustra o simulador do cargueiro C-390 Millennium, localizado em São José dos Campos, enquanto a subfigura 18b mostra o simulador do avião comercial E2, situado em Singapura.



(a) (GLOBO, 2023)



(b) (FAB, 2024)

Figura 18 – Simulador *Full Motion*.

Apesar de representarem soluções onerosas para as empresas que financiam esses projetos, os simuladores *Full Motion* justificam o investimento, especialmente quando comparados ao custo de operação de uma aeronave real. Essa categoria de simuladores torna-se ainda mais indispensável ao considerar a realização de testes em situações específicas, como pannes, falhas de instrumentos e outras emergências, que seriam inviáveis ou, na maioria dos casos, inseguras de serem executadas em um avião real.

## 2.7 Softwares de Simulação

Assim como as peças de *hardware* responsáveis pela configuração do simulador, o *software* de simulação de voo também pode ser categorizado em três tipos principais:

- **Software de simulação para entretenimento:** Essa categoria abrange programas que demandam baixo poder computacional para serem executados, embora existam exceções. O objetivo principal desse *software* é a diversão do usuário, e geralmente têm um custo mais acessível ao público. Eles são comercializados principalmente como jogos e investem mais em cenários e gráficos do que nas propriedades e comportamentos da aeronave. No entanto, com o avanço da tecnologia, algumas simulações podem ser bastante realistas. Exemplos incluem o X-Plane e o Microsoft Flight Simulator.
- **Software de simulação profissional:** Esta categoria é voltada para a instrução e treinamento de voo e é minimamente acessível ao público. Esses simuladores priorizam mais a simulação da aeronave e as características do voo do que os gráficos propriamente ditos. São destinados a escolas de formação de pilotos e utilizados em simuladores profissionais. Um excelente exemplo desse tipo de *software* é o *Condor, The Complete Soaring Simulator 2* utilizado no aeroclube de Formosa para treinamento de voo com planadores.
- **Software de simulação industrial:** Essa categoria é desenvolvida como solução específica para a simulação de voo de uma determinada aeronave. Ao contrário das demais categorias, esse simulador busca emular o comportamento de apenas uma aeronave e é projetado para interagir com um *hardware* específico, como um simulador *Full Motion* ou de mesma categoria. Devido à sua especialização, esses programas oferecem um grau de confiabilidade e replicação da realidade muito próximo do comportamento real da aeronave. Eles podem simular pannes, falhas e situações específicas para treinamento de pilotos em modelos de aeronaves. Geralmente, são fornecidos pelas próprias fabricantes de aeronaves como forma de capacitar pilotos para novos modelos comercializados.

## 2.8 Desempenho de Aeronaves

### 2.8.1 Controle de voo

O controle de voo de uma aeronave é realizado pelas superfícies de controle. A Figura 19 ilustra as superfícies responsáveis pelo controle de voo em uma aeronave convencional.

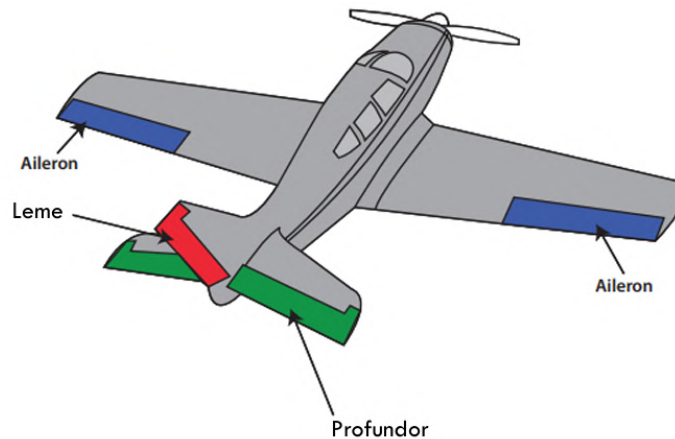


Figura 19 – Superfícies de controle de uma aeronave convencional (MARTINS, 2024).

As superfícies de controle de uma aeronave, de acordo com Martins (2024), são partes móveis localizadas tipicamente nos bordos de fuga das asas e da empenagem, se dividem em superfícies primárias, como ailerons, profundores e lemes, e em superfícies secundárias, incluindo flaps, slats, slots, spoilers e compensadores. O sistema de controle de voo é composto por mecanismos que movimentam essas superfícies de controle do avião.

Ainda segundo Martins (2024), os movimentos de uma aeronave em voo são:

- **Pitch (Arfagem):** O profundor (elevator), localizado na cauda ou empenagem da aeronave, é responsável por elevar ou abaixar o nariz do avião, permitindo o movimento de subida e descida;
- **Roll (Rolagem):** Os ailerons, situados nos bordos de fuga das asas, operam em lados opostos: um aumenta a sustentação em uma asa enquanto reduz na outra, permitindo que a aeronave se vire;
- **Yaw (Guinada):** O leme, localizado na cauda do avião, direciona o nariz para a esquerda ou para a direita, funcionando de maneira semelhante a um leme de barco. Seu principal objetivo é contrabalançar o arrasto causado pelos ailerons e manter o voo coordenado.

Uma representação desses movimentos pode ser visualizada na figura 20.

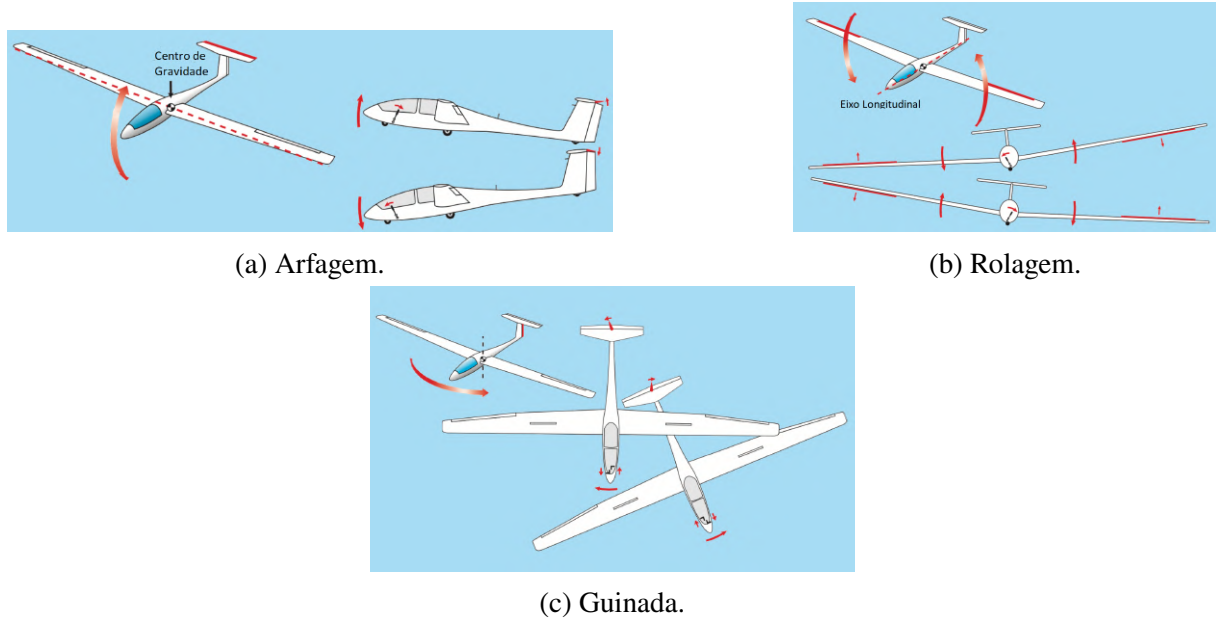


Figura 20 – Movimentos de voo (STUDENT PILOT MANUAL, 2023).

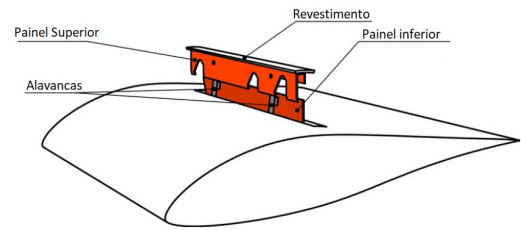
O sistema de controle de voo de uma aeronave é composto por uma variedade de mecanismos, incluindo manche, pedais, alavancas, cabos, quadrantes, polias, esticadores, roldanas, tubos de torque e hastes. O manche, também conhecido como stick ou wheel, é responsável pelos movimentos de arfagem (*pitch motion*), que permitem o controle do nariz da aeronave para cima ou para baixo. Além disso, o manche também é utilizado para os movimentos de rotação ou rolamento (*roll*), que ajudam a inclinar a aeronave. Os pedais, por sua vez, controlam os movimentos de guinada (*yawing motion*), direcionando o nariz da aeronave para a esquerda ou para a direita e contribuindo para a manutenção do voo coordenado.

Em planadores, essa dinâmica é um pouco diferente devido às características específicas do voo sem motor. Os planadores utilizam um sistema mais simplificado e ajustado às suas necessidades. O controle de um planador é realizado principalmente por meio de manche (*stick*) e pedais.

Planadores frequentemente incluem superfícies de controle secundárias, para ajustar a sustentação e a resistência ao vento. Essas superfícies ajudam a gerenciar a velocidade e a manobrabilidade do planador durante o voo, proporcionando um controle mais refinado e adaptado às condições de voo sem motor. A principal diferença significativa em relação às aeronaves convencionais é a presença de um freio aerodinâmico, que é acionado por uma alavanca localizada na lateral esquerda do piloto. Este mecanismo é crucial para o controle e a segurança do planador, permitindo ajustes precisos na resistência ao ar e na taxa de descida. Uma representação dessa superfície de controle pode ser observada na Figura 21, enquanto o sistema de controle responsável por sua ativação está ilustrado na Figura 22.



(a) Foto do freio aerodinâmico.



(b) Desenho esquemático do funcionamento do freio aerodinâmico.

Figura 21 – Sistema de freio aerodinâmico do planador: (a) foto do freio aerodinâmico e (b) desenho esquemático mostrando seu funcionamento. (GREINER, 2018)

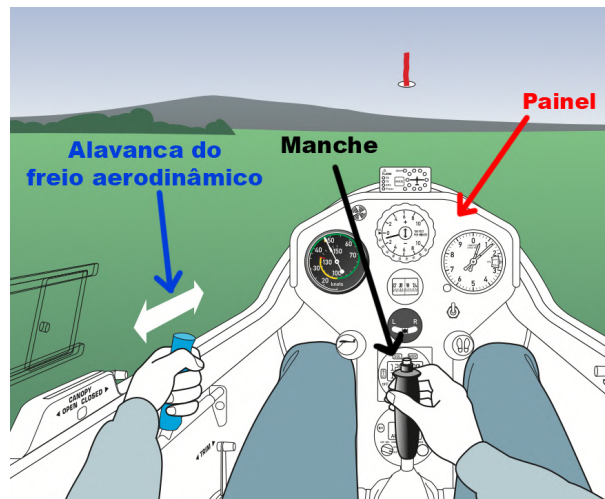


Figura 22 – Atuação do freio aerodinâmico de um planador. (STUDENT PILOT MANUAL, 2023), adaptado.

## 2.9 Mockup Rápido

A fundamentação do estudo apresentado se baseará na aplicação de testes utilizando modelos *mock-up* por meio das metodologias de Desenho Assistido por Computador (CAD), bem como pelo desenvolvimento de um *mock-up* rápido, também conhecido como ‘*Quick and dirty*’ *mock-up*.

Um *mock-up* rápido é "[...] utilizado, como o nome sugere, para fornecer informações rápidas em um nível aceitável de precisão para as necessidades [...]", sendo que esse tipo de instrumento “[...] é gerado a partir de materiais disponíveis (madeira, espuma, aço) e, embora possa não se parecer em nada com o design final, os aspectos críticos serão corretos [...]" (PORTER, 2000), tradução nossa.

A figura 23 ilustra um *mock-up* rápido, evidenciando algumas das principais características desse tipo de instrumento analítico: a utilização de materiais simplificados, que são empregados exclusivamente para representar as características específicas em análise.



Figura 23 – Exemplo de *mock up* rápido. (PORTER, 2000).

A utilização de mock-ups físicos, segundo Miranda (2014), permite a realização de estudos detalhados do ambiente interno do veículo. Como exemplos, incluem-se o conforto térmico e vibracional, a escolha de cores e texturas no acabamento, a avaliação cognitiva das informações transmitidas pelo painel e, especialmente, o conforto proporcionado pelos assentos.

Na construção de um *mock-up* rápido para um simulador de voo, os aspectos aerodinâmicos são desconsiderados, uma vez que o objetivo dessa etapa é a análise da interação do piloto com o planador, abrangendo aspectos como entrada e saída, alcance dos comandos e controles, e níveis de conforto. Portanto, apenas as superfícies e objetos essenciais para essas avaliações serão representados. "A utilização de *mock-ups* rápidos permite captar percepções individuais dos ocupantes do simulador, gerando dados que não seriam possíveis de obter exclusivamente por meio de software CAD ou análises preliminares, visto que se tratam de avaliações independentes e profundamente subjetivas por parte de cada indivíduo"(CUNHA FILHO, 2023).

## 2.10 Realidade Virtual

Como definido por Miranda (2014), a realidade virtual é uma tecnologia de interface avançada que possibilita ao usuário interagir, visualizar e manipular objetos em diferentes ambientes. O objetivo dessa interface sofisticada é recriar ao máximo a sensação de realidade, fazendo com que o usuário a perceba como autêntica. Para alcançar esse efeito, são utilizados equipamentos que estimulam não apenas a visão mas também outros sentidos do usuário.



Figura 24 – RV aplicada à simulação de voo do Saab 39 Gripen. (PODER AEREO, 2021).

A realidade virtual possibilita ao usuário uma imersão profunda em um ambiente criado digitalmente, permitindo que ele sinta-se presente nesse espaço virtual como se fosse real. Essa tecnologia avançada, que simula não apenas a visão, mas também outros sentidos, recria de forma precisa detalhes complexos de operações reais, tornando-se uma ferramenta valiosa para treinamento sem a necessidade de exposição ao ambiente real.

A interação físico-virtual proporcionada pela realidade virtual (RV) permite a simulação detalhada e a avaliação das condições de uso antes da construção física do protótipo. Esse processo possibilita a identificação e a correção de falhas ergonômicas, além da otimização do design e do conforto do planador com uma precisão e um detalhamento que seriam inatingíveis apenas com métodos tradicionais.

Outro fator a ser considerado é a acessibilidade da tecnologia, impulsionada pela rápida evolução da computação gráfica e dos componentes eletrônicos. Essa evolução tem fomentado o desenvolvimento de sistemas de realidade virtual, resultando em tecnologias de interação homem-computador que são cada vez mais acessíveis e amplamente disseminadas entre o público geral.

## 3 Metodologia

O conteúdo desenvolvido neste trabalho baseia-se nas realizações anteriores da equipe Dragonfly, especialmente na análise ergonômica realizada pelo ex-membro Freitas (2021) em seu TCC intitulado: Ergonomia aplicada a projeto de bancada de simulação de aeronave tipo planador.

Este trabalho também se fundamenta em desenvolvimentos anteriores do autor, realizados em diversas ocasiões, com destaque para:

- O trabalho apresentado na ABERGO em 2022, de autoria de Cunha Filho (2022) intitulado Melhoria no Desenvolvimento do Cockpit de uma Aeronave Tipo Planador Utilizando Parâmetros Ergonômicos que sugere uma continuação e melhoria direta do trabalho de Eduardo;
- O trabalho de PIBIC de 2023, Desenvolvimento, Validação e Construção de um Mock-up Simplificado para Simulador de Voo, de autoria de Cunha Filho (2023), que representa um avanço além da simples análise ergonômica feita anteriormente;
- O trabalho de PIBIC de 2024, Desenvolvimento e Validação de um Simulador de Voo para Aeronave Experimental, de autoria de Cunha Filho (2024), que representa o último passo da análise para construção do simulador.

Houve mudanças significativas na estrutura e configuração geral da aeronave em relação aos modelos desenvolvidos no passado, de modo que o trabalho apresentado propõe uma abordagem nova e constitui uma continuação direta do desenvolvimento do autor nas oportunidades citadas acima. A principal inovação em relação aos trabalhos anteriores é a proposta de construção de um simulador real, acessível e de baixo custo, integrado com elementos de realidade virtual.

### 3.1 Evoluções de projeto

Em seu trabalho, Freitas (2021) utilizou como base o planador AEROS AC-21 "um motoplanador (ou planador auto-lançável) de origem ucraniana desenvolvido entre os anos de 2000 a 2005, sendo uma evolução do seu antecessor AL-12 (hoje chamado Alatus)"(FREITAS, 2021), cujas dimensões e CAD podem ser visualizadas nas figuras 25 e 26.

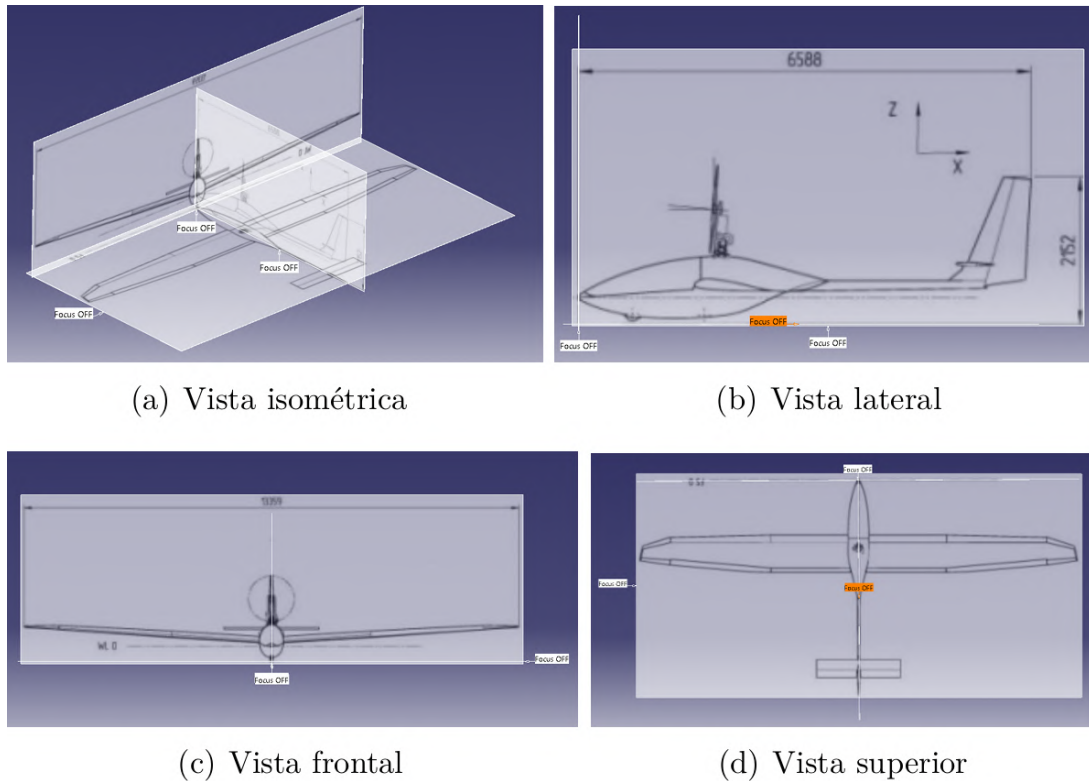


Figura 25 – AC-21 e dimensões importadas no software (FREITAS, 2021).

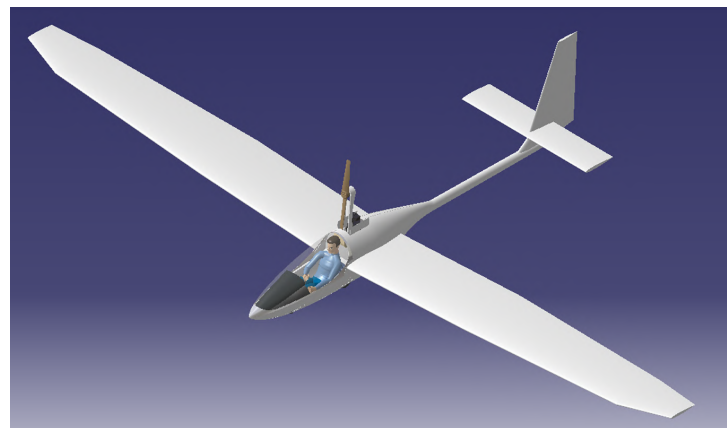
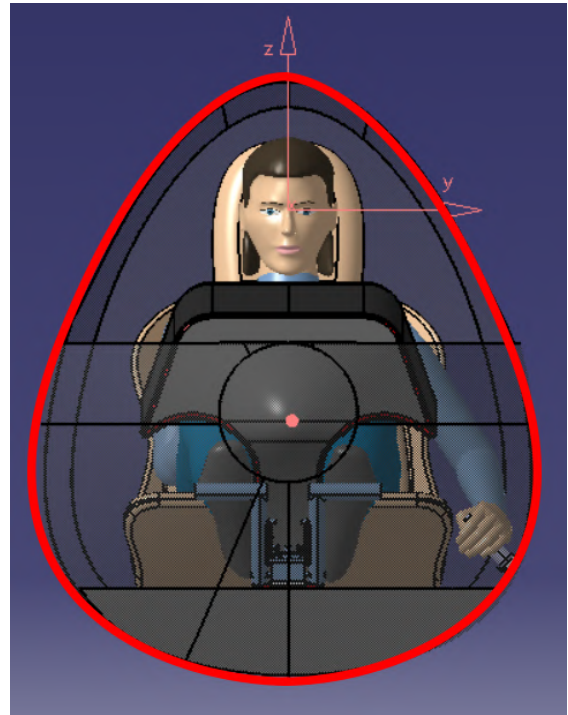


Figura 26 – CAD do Motoplanador AC-21. (FREITAS, 2021).

Como base para o desenvolvimento deste trabalho, foram mantidas as proporções da aeronave escolhidas anteriormente por Freitas (2021), porém, com uma alteração significativa em seu formato. Essa mudança, que impactou diretamente as características da aeronave, consiste na modificação do formato da seção transversal, anteriormente configurada a partir de uma elipse e que agora passou a obedecer o formato de ovoide. Essa alteração representa o pontapé inicial dos trabalhos para a primeira publicação de Cunha Filho (2022) e está ilustrada na figura 27.



(a) Seção antiga em formato de elipse.



(b) Seção nova em formato de ovoide.

Figura 27 – Atualização de seção transversal (CUNHA FILHO, 2022) adaptado.

A partir dessa alteração, soluções específicas para a acomodação dos pilotos, instrumentos e comandos da aeronave são necessárias para uma avaliação ergonômica do planador. Novas soluções de interação piloto-planador foram sugeridas, considerando não apenas sua usabilidade, mas também a viabilidade de execução no caso de construção real da aeronave, além da facilidade de adaptação para testes de bancada e, finalmente, a construção de um simulador de voo que preservasse as características do planador.

As soluções propostas para a execução prática do modelo preliminar podem ser divididas nos seguintes núcleos de análise:

- Fuselagem;
- Assento;
- Comandos de voo;
- Instrumentação de voo.

Ambos os modelos foram inicialmente desenvolvidos no software CATIA v5. O posicionamento dos manequins, a análise de conforto utilizando a ferramenta RULA, integrada ao software, e a avaliação de alcance foram realizadas após a análise preliminar, com o intuito de validar e otimizar as informações relativas aos núcleos de interação. Essas etapas resultaram na primeira publicação do autor Cunha Filho (2022).

Na sequência, o modelo foi aprimorado e submetido a uma análise física mais detalhada por meio da construção de um *mockup* simplificado. Este *mockup* permitiu a validação ergonômica e funcional em um ambiente controlado, sendo uma etapa importante para identificar ajustes necessários e otimizar o desenvolvimento antes de avançar para a construção final do simulador. Os resultados obtidos com o *mockup* serviram como base para a segunda publicação de Cunha Filho (2023), na qual foram discutidos os ajustes e melhorias ergonômicas e funcionais aplicadas ao modelo.

Com os dados validados na fase de *mockup*, a construção do simulador de voo foi então projetada e analisada, integrando as análises, parâmetros e definições previamente estabelecidas. O simulador foi projetado para replicar de forma precisa as condições reais de operação, incorporando os dados ergonômicos validados e as melhorias obtidas nas etapas anteriores. Esta fase resultou, por fim, na terceira publicação de Cunha Filho (2024), que descreve o desenvolvimento do simulador final.

## 3.2 Projeto Preliminar

### 3.2.1 Configuração da fuselagem

O ponto de partida para o desenho da fuselagem foi a inclusão da vista lateral do AC-21, definida por Freitas (2021) e que está presente no Anexo A, ajustando a seção transversal para um formato oval ao longo de toda a estrutura, conforme Cunha Filho (2022). Para a análise ergonômica, a modelagem focou exclusivamente na porção essencial para essa avaliação, ou seja, apenas o cockpit da aeronave, ignorando o restante de sua construção. O resultado final dessa idealização com as medidas em *mm* pode ser visualizado nas Figuras 28 e 29.

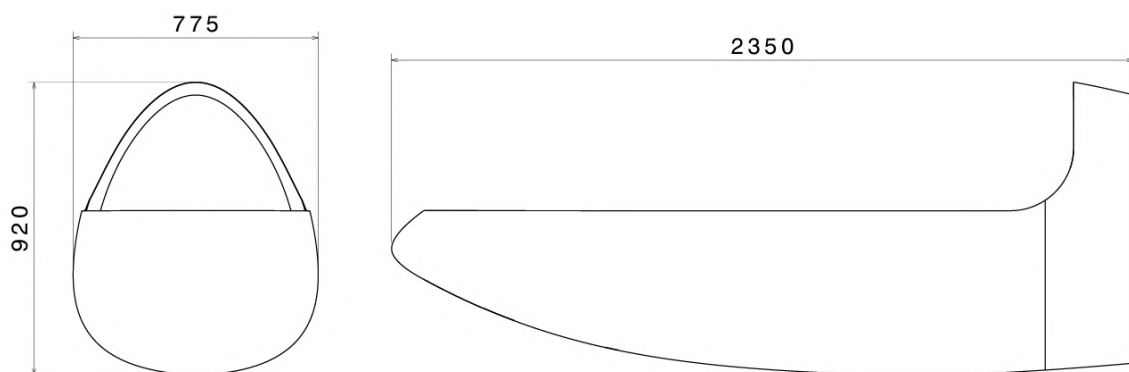


Figura 28 – Vista frontal e lateral do *cockpit* fonte: autor.

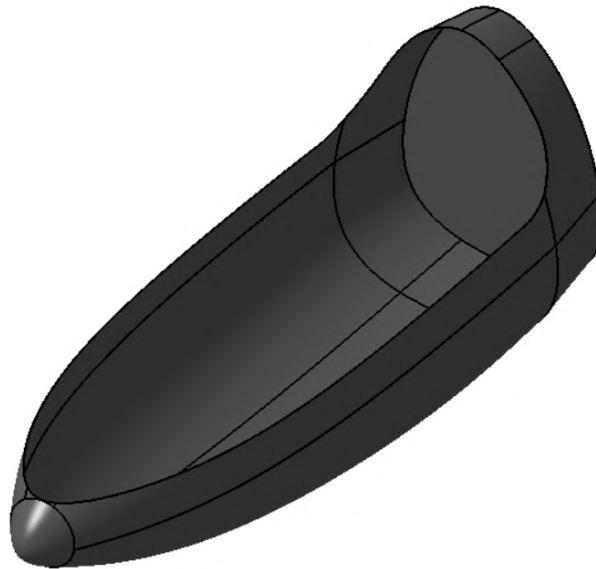


Figura 29 – Vista isométrica do *cockpit*. fonte: autor.

Com a fuselagem definida, o posicionamento da estrutura interna foi baseado em modelos de planadores existentes, sendo adaptado às características específicas da estrutura oval.

### 3.2.2 Configuração do assento

Um dos principais diferenciais do projeto é o assento, cujo formato permite que o piloto opere a aeronave em uma posição semi-deitada, semelhante à encontrada em carros de Fórmula 1. As medidas iniciais consideradas para a concepção do assento foram: 360 mm para o apoio de pernas, um ângulo de  $40^\circ$  entre o encosto e a linha vertical, e um ângulo de  $35^\circ$  entre o apoio de pernas e a linha horizontal, ambas essas representações e medidas podem ser visualizadas na Figura 30.

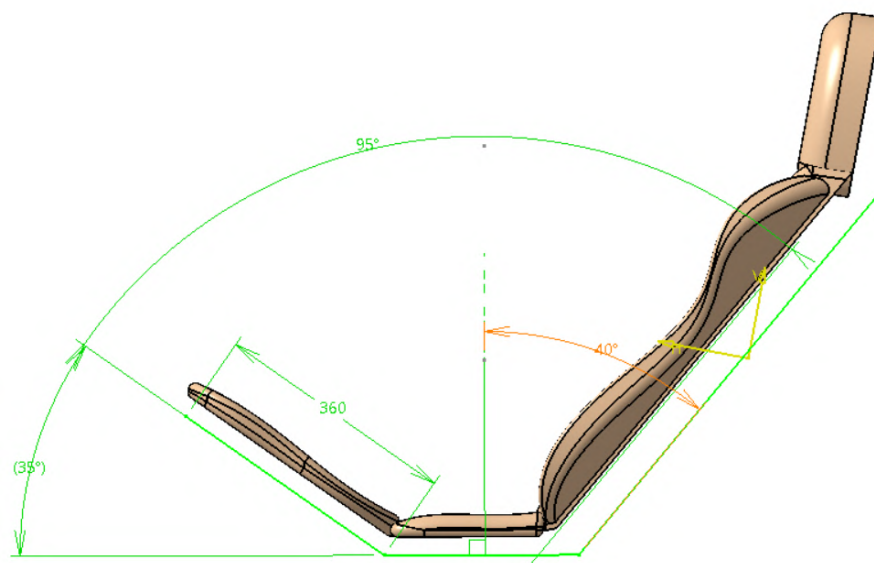


Figura 30 – Principais medidas para o projeto do assento fonte: autor.

Ao contrário da maioria dos planadores comerciais, a configuração do assento do planador oval adota um modelo ajustável e dividido em partes, semelhante aos assentos de carros convencionais. Esse assento se move sobre um trilho, permitindo ajustes longitudinais. Tal característica é crucial para atender à proposta detalhada na subseção 2.3.1, pois possibilita o ajuste para percentis femininos menores, garantindo a usabilidade do produto final para esse público.

O trilho, demonstrado na Figura 31, tem 290 mm de comprimento e permite o travamento a cada 22,5 mm, realizado por um pino passante. Com um total de 10 furos igualmente espaçados, o trilho possibilita a movimentação em um intervalo de cerca de 200 mm. Este ajuste deve ser feito antes do voo, com base no alcance do piloto aos comandos da aeronave, que serão discutidos mais adiante.

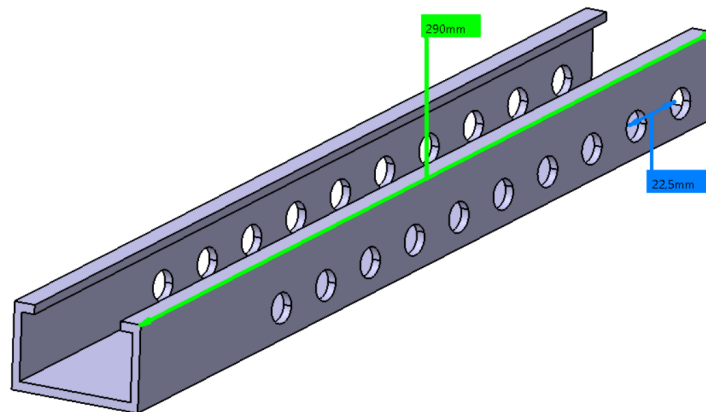


Figura 31 – Medidas do trilho do assento. fonte: autor.

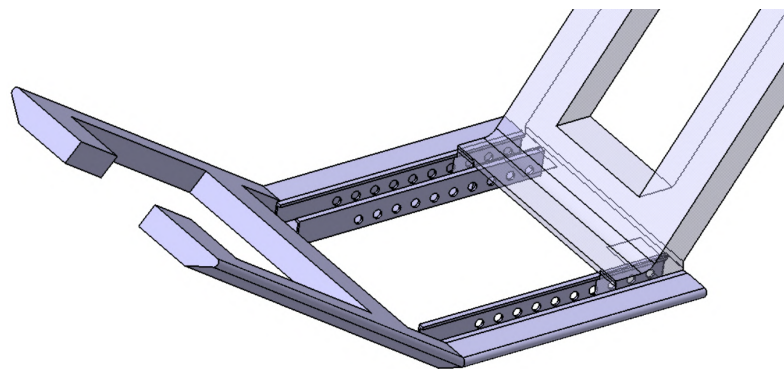


Figura 32 – Detalhamento do mecanismo de trava e do trilho fonte: autor.

A Figura 32 ilustra o mecanismo de ajuste do assento. Já a Figura 33a demonstra sua última posição de travamento, enquanto a Figura 33b exibe a primeira posição de travamento. Também é possível observar, a partir dessas imagens, que quando o assento é utilizado muito próximo das primeiras marcações de ajuste, é necessária a remoção do apoio horizontal do assento para garantir que a conexão entre o apoio de pernas e o encosto seja direta.

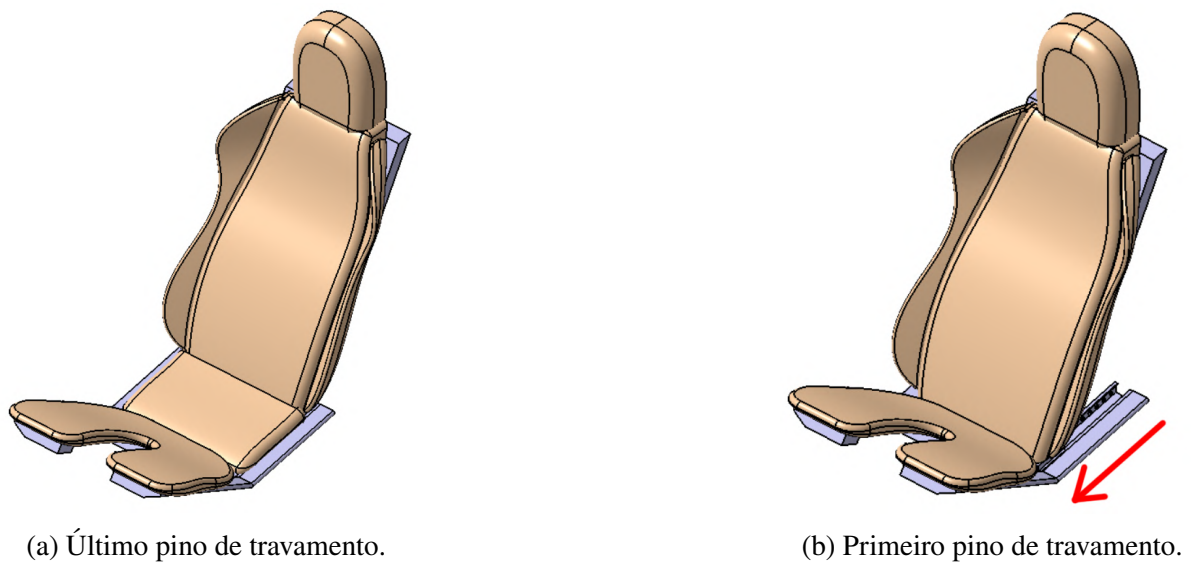


Figura 33 – Ajuste máximo e mínimo do assento fonte: autor.

Na Figura 34, estão apresentadas as vistas frontal e lateral com o assento travado na última posição. Já a Figura 35 mostra a vista superior e a lateral com o assento travado na primeira posição.

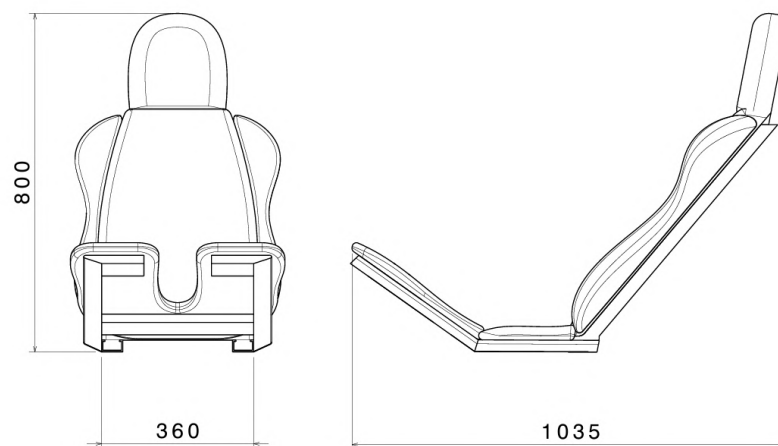


Figura 34 – Vista frontal e lateral do assento com trava no máximo fonte: autor.

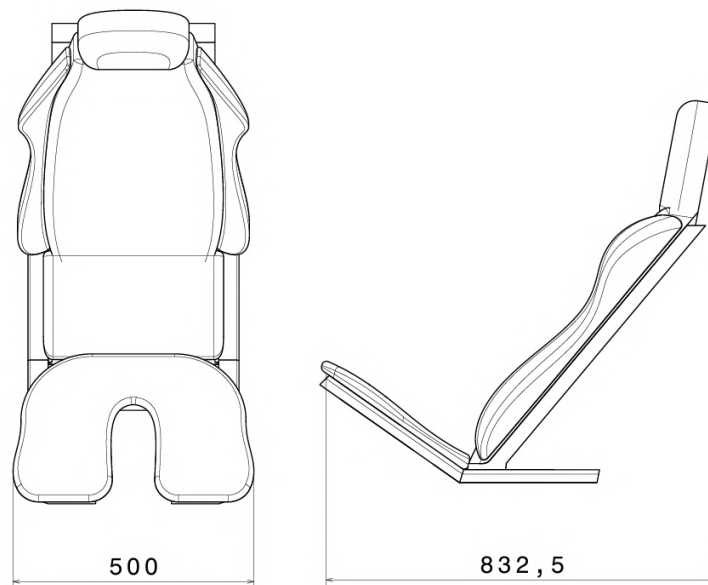


Figura 35 – Vista superior e lateral do assento com trava no mínimo fonte: autor.

### 3.2.3 Comandos de voo

Conforme discutido na sub-seção 2.8.1, para o simulador de voo de um planador são necessários apenas três sistemas de controle: o manche *stick*, os pedais e a alavanca do freio aerodinâmico.

Nos planadores, o manche, definido na Figura 36, é localizado entre as pernas do piloto e tem um formato não reto de forma intencional, uma vez que o ponto de apoio está alguns centímetros à frente da cintura do piloto. "Essa configuração permite ao piloto manobrar a aeronave sem a necessidade de estender muito o braço, evitando assim a colisão do manche com outros instrumentos do cockpit, como o painel"(FREITAS, 2021).

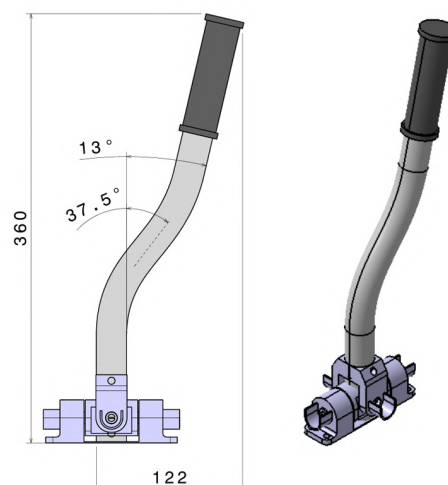


Figura 36 – Vista lateral e isométrica do manche fonte: autor.

Os pedais, controlados pelos pés, estão posicionados sobre o assoalho da aeronave. Em planadores, ao contrário das aeronaves convencionais, os pedais não são utilizados para o taxiamento em pista, permitindo uma estrutura mais simplificada. Eles funcionam através de cabos de aço e polias. A Figura 37 ilustra a simplicidade desse sistema de comando em planadores.



Figura 37 – Pedais do planador GROB G103 (FREITAS, 2021)

Para a representação em CAD dessas estruturas, foi importado um modelo previamente desenvolvido pela equipe Dragonfly e representado na Figura 38, no qual foram feitas alterações pontuais, como o posicionamento de molas para garantir o retorno à posição inicial após a aplicação de carga. O mais importante foi sua adaptação a uma cremalheira, o que adiciona mais um método de ajuste para o piloto, além do ajuste de assento já explicado anteriormente.

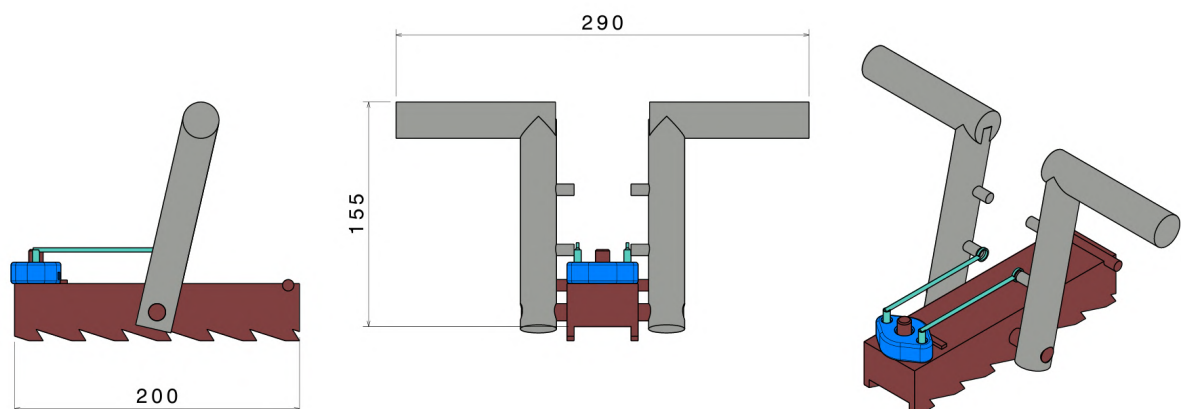


Figura 38 – Vista lateral, frontal e isométrica do conjunto do pedal fonte: autor

Os pedais são ajustáveis por meio de travas que deslizam sobre a cremalheira, conforme

representado na Figura 39. "As travas na cremalheira estão espaçadas a cada 30 mm, permitindo, juntamente com o ajuste do banco, o uso por uma ampla gama de pessoas com diferentes percentis"(CUNHA FILHO, 2022).

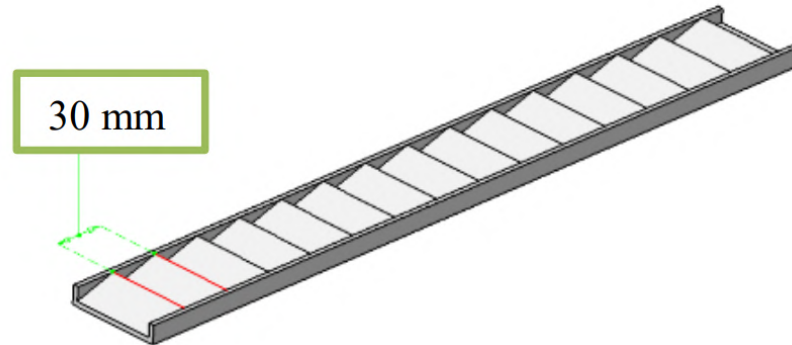


Figura 39 – Cremalheira do Pedal (CUNHA FILHO, 2022)

### 3.2.4 Posicionamento da instrumentação de voo

"Além desses instrumentos de controle, o piloto também possui o auxílio de outros três instrumentos de leitura: velocímetro, o indicador de subida e o altímetro"(CUNHA FILHO, 2022). Respectivamente representados na Figura 40.



Figura 40 – Velocímetro, indicador de subida e altímetro, respectivamente (CUNHA FILHO, 2022)

Para acomodar esses instrumentos e outros personalizados, dependendo do tipo de planador, a aeronave exige uma superfície específica denominada painel. No desenho em CAD da estrutura do painel, foram tomados como referência os planadores Schempp-Hirth Janus e Arcus M, que são similares, mas possuem algumas particularidades. Com base nessas referências, foi desenvolvida uma solução personalizada que atende às necessidades de instrumentação e se ajusta à fuselagem. A Figura 41 representa a vista isométrica dessa configuração preliminar do painel.

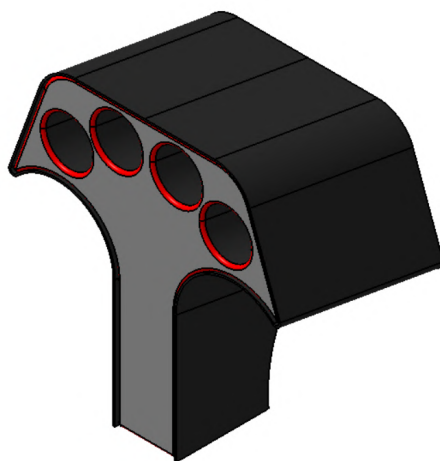


Figura 41 – CAD do painel preliminar. (CUNHA FILHO, 2022)

## 4 Resultados e discussões

Os resultados obtidos a partir das análises descritas no Capítulo 3, sustentados pela bibliografia minuciosamente abordada no Capítulo 2, tanto para o projeto preliminar desenvolvido em CAD quanto para o projeto de validação realizado com *mockup* e simulador, estão detalhadamente apresentados neste capítulo, divididos entre três principais núcleos: resultados da etapa de análise virtual, resultados da etapa de *mockup* físico e resultados da etapa de simulador.

### 4.1 Resultados da etapa de análise virtual

#### 4.1.1 Posicionamento no *cockpit*

Para o posicionamento dos sistemas da aeronave no *cockpit*, foram utilizados como referência os materiais já mencionados no Capítulo 2, especialmente os discutidos na Seção 2.4, que aborda a bibliografia de base para o *package* da aeronave.

As definições de *package* relacionadas às normas de alcance foram utilizadas para a determinação do posicionamento dos comandos da aeronave. As informações sobre a visão do piloto, por sua vez, foram empregadas no posicionamento dos instrumentos de voo.

##### 4.1.1.1 Posicionamento dos comandos

Com a fixação do banco, os comandos do planador foram inicialmente posicionados conforme as normas que tratam do zoneamento do *cockpit* em diferentes níveis de alcance. Para isso, utilizou-se a ferramenta *Reach Envelope* do software CATIA v5, que facilita a obtenção dos dados de alcance. A ferramenta também possibilita a obtenção de dados para diferentes zonas, sendo elas: *Physiological maximal*, *Ideal*, e *Extended with upper body*, correspondendo respectivamente às zonas 1, 2 e 3 abordadas na Seção 2.4.

A Figura 42 ilustra um manequim genérico após a aplicação da ferramenta, com os alcances do braço direito definidos e separados por zonas: verde para a zona 1, vermelho para a zona 2 e azul para a zona 3:

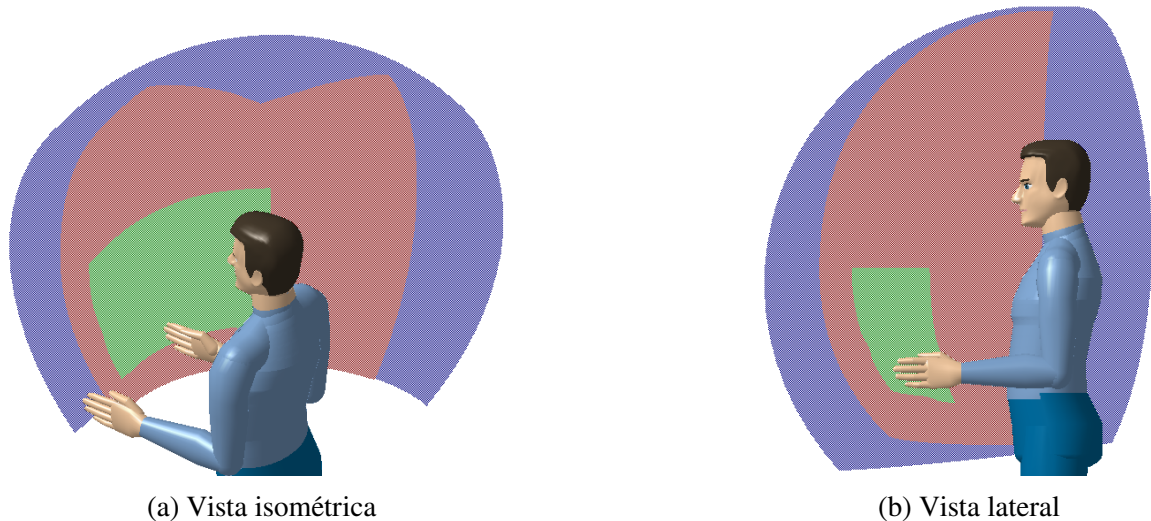


Figura 42 – Representação em zonas de alcance da ferramenta *reach envelope* fonte: autor.

Na aplicação da ferramenta no simulador, o banco foi fixado de modo a ficar próximo à parede traseira do cockpit, seguindo as proporções da aeronave de referência. Para garantir a fixação dos comandos, foi projetada uma estrutura de base que acompanha o formato da cabine do piloto e se posiciona à frente do banco. A Figura 43 representa essa inclusão preliminar.

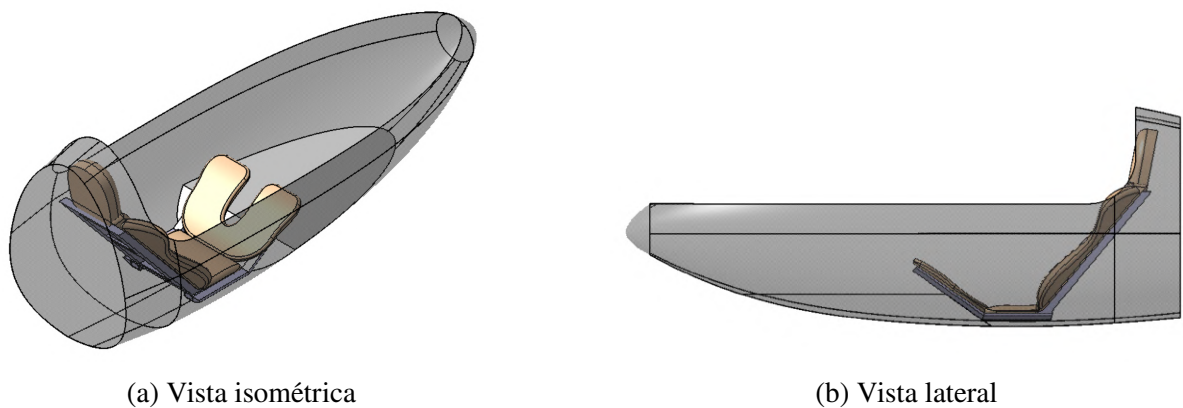


Figura 43 – Configuração do *cockpit* após o posicionamento do banco. fonte: autor.

Por fim, o manequim foi posicionado preliminarmente no banco, seguindo seu formato e garantindo uma acomodação o mais próxima possível da experiência real. Devido à ausência de uma base de dados da antropometria brasileira, optou-se pela utilização de manequins de origem francesa, já que, conforme discutido na Seção 2.2, esse grupo apresenta similaridades significativas com a população brasileira, com erros desprezíveis na análise ergonômica. A Figura 44 representa as diferentes etnias disponíveis na base de dados padrão do software.

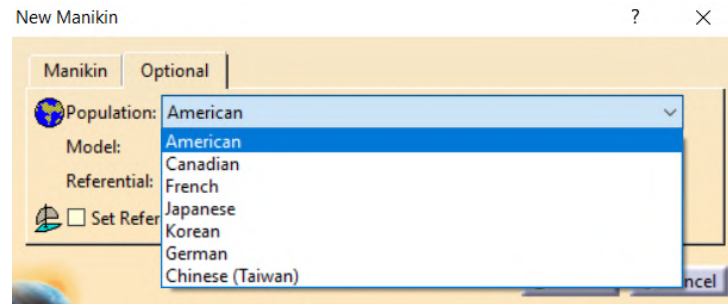
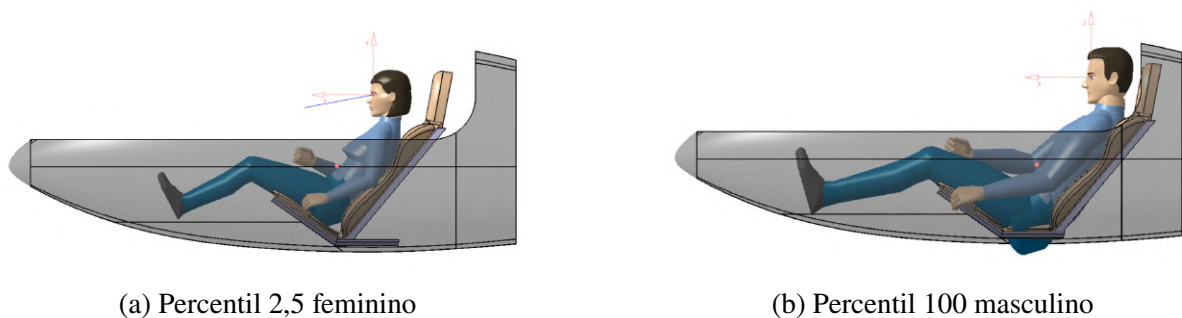


Figura 44 – Tabela de possibilidades para o manequim, fonte: autor.

Conforme discutido na Subseção 2.3.1, este trabalho aborda a inclusão dos percentis femininos na análise de usabilidade do simulador de voo. Com esse intuito, foram inseridos dois manequins: um feminino de percentil 2,5 e um masculino de percentil 100, proporcionando, assim, uma abrangência quase completa para o público-alvo da análise. A Figura 45 representa ambos esses percentis, posicionados no banco, com os devidos ajustes:



(a) Percentil 2,5 feminino

(b) Percentil 100 masculino

Figura 45 – Percentis sentados com banco ajustado. fonte: autor.

Por fim, a partir das posições estabelecidas no *cockpit*, utilizou-se a ferramenta de envelope de alcance para determinar as zonas de alcance de ambos os indivíduos, permitindo, assim, o posicionamento adequado do manche e da alavanca dos freios aerodinâmicos. Os pedais, por sua vez, foram ajustados conforme o alcance dos pés: o  $P_{100}$  masc. foi considerado como o extremo superior, exigindo uma posição dos pedais mais ao final da cremalheira, enquanto o  $P_{2,5}$  fem. representou o extremo inferior, demandando uma posição mais próxima ao início da cremalheira. A média desses extremos foi adotada como o ponto central da cremalheira. Tanto os envelopes de alcance dos percentis quanto o posicionamento dos comandos mencionados podem ser visualizados nas Figuras 46 e 47 respectivamente.

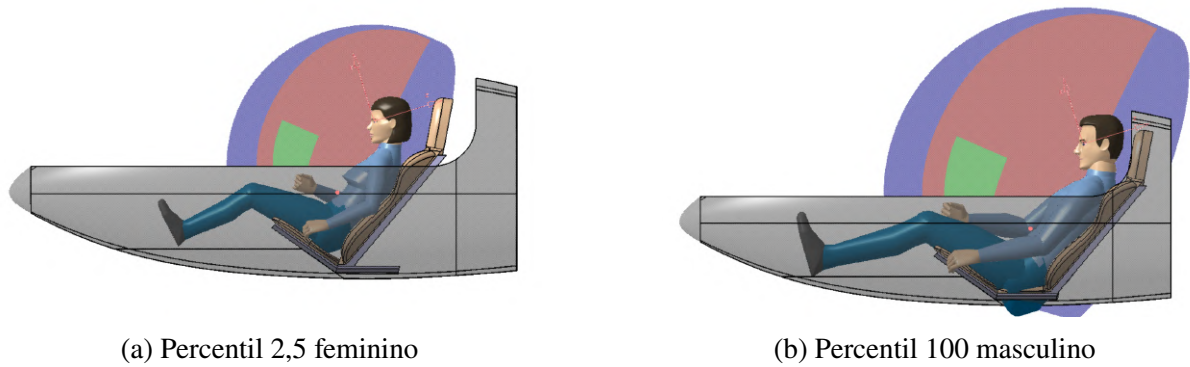


Figura 46 – Envelopes para as 3 zonas de alcance. fonte: autor.

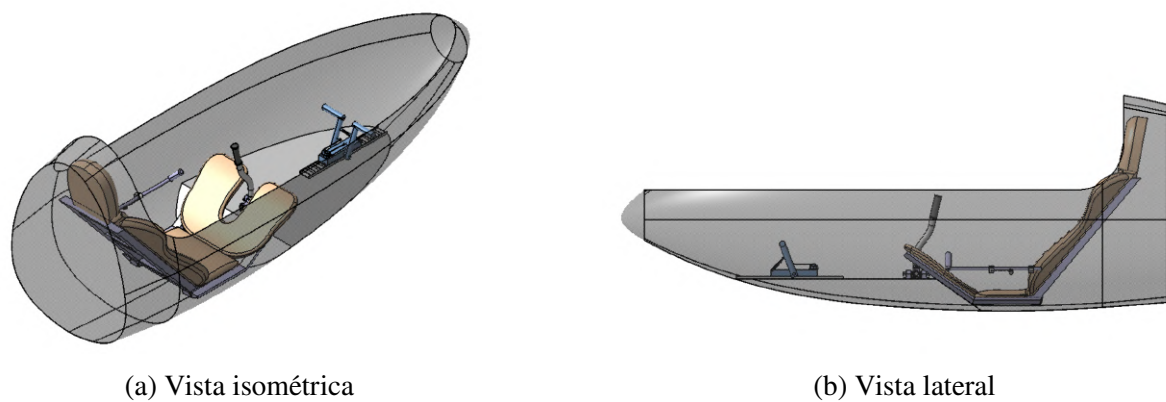


Figura 47 – Configuração final dos comandos no cockpit. fonte: autor.

#### 4.1.1.2 Posicionamento dos instrumentos

Os instrumentos, por sua vez, embora influenciados pelo envelope de alcance, devem também ser cuidadosamente planejados em relação à linha de visão do piloto. Para essa análise, os manequins de etnia francesa, nos intervalos de percentis  $P_{2,5}$  feminino e  $P_{100}$  masculino, foram novamente importados, agora incluindo a representação do *Design Eye Point* ou DEP, conforme apresentado na Seção 2.4, que serve como base para o posicionamento dos instrumentos de voo.

Com o DEP marcado, foi estabelecida uma angulação de  $10^\circ$  em relação à horizontal, conforme sugerido pela norma *MIL-STD-1333B* do Departamento de Defesa Norte Americano (1976), que servirá como base para a análise da posição dos instrumentos de voo. A Figura 48 ilustra essa marcação tanto para o  $P_{2,5}$  feminino quanto para o  $P_{100}$  masculino.

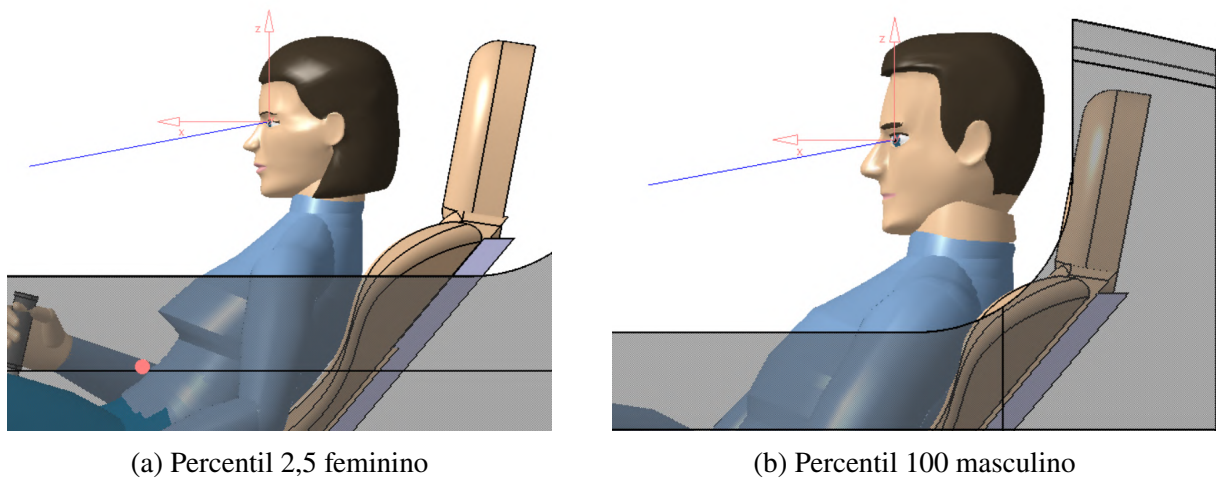


Figura 48 – Linha angulada da visão dos pilotos. fonte: autor.

Podemos observar na Figura 49 que há uma coincidência entre as linhas de visão anguladas para ambos os percentis. Isso ocorre devido ao projeto do assento, que, ao avançar para frente, também eleva o ocupante pela redução da distância entre o apoio de perna e o encosto. Dessa forma, a análise centrada na visão pode ser realizada para ambos os casos a partir de uma única referência.

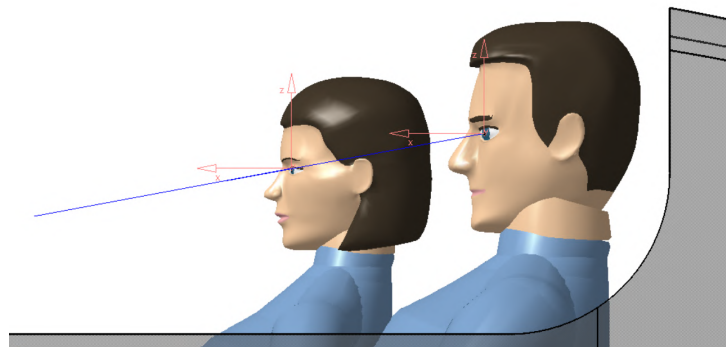


Figura 49 – Linhas de visão coincidindo para ambos os percentis. fonte: autor.

Essa linha define a altura máxima do painel, que foi projetado para ter uma angulação superior idêntica, de forma a não obstruir a visão dos pilotos. Com a altura estabelecida, resta determinar o posicionamento longitudinal no *cockpit*. Para isso, garantindo uma boa amplitude de movimento para o manche e a interação adequada dos pilotos com os instrumentos em todos os percentis avaliados, o painel foi posicionado na zona 3 para ambos os percentis. Isso é necessário para evitar possíveis conflitos com o manche durante movimentos totais na direção do painel, caso este estivesse mais próximo.

A Figura 50 ilustra simultaneamente os resultados dessas etapas de análise: em amarelo, temos a zona 3 de alcance para o  $P_{100}$  masc., em verde, a zona 3 de alcance para o  $P_{2,5}$  fem. e

em azul, a linha de visão de  $10^\circ$ . Pode-se observar, ainda, que a linha azul coincide com o topo do painel, conforme projetado, e que o painel está posicionado dentro da zona 3 de alcance para ambos os casos críticos de pilotos.

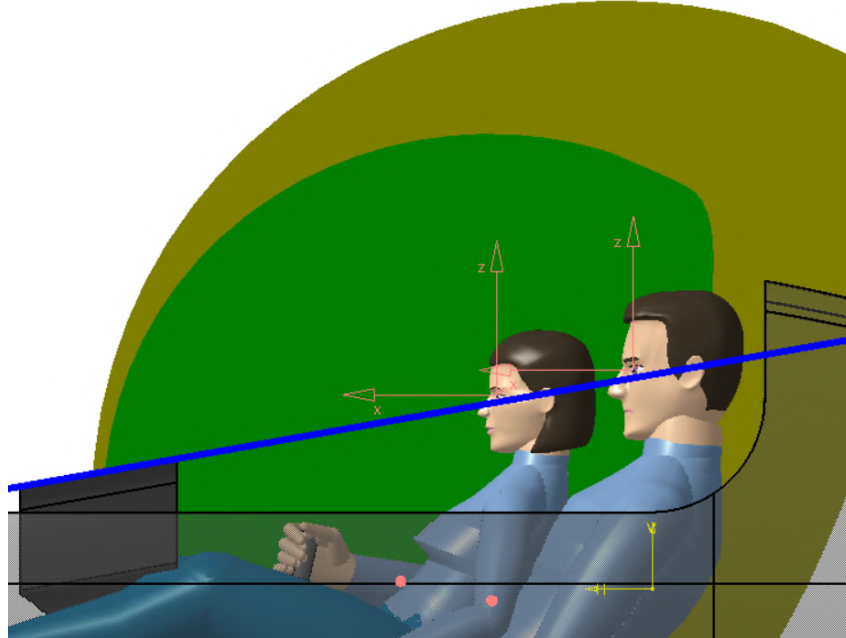
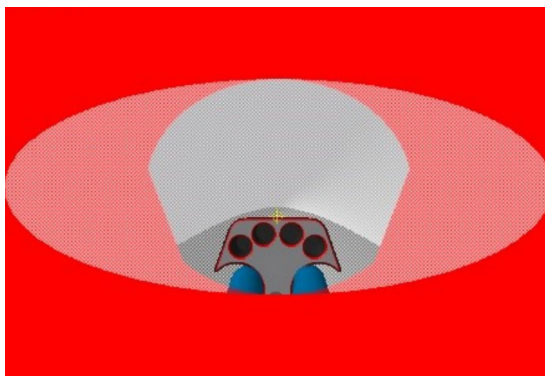


Figura 50 – Zona 3 de alcance sobreposta e linha de visão em relação ao painel. fonte: autor.

O CATIA v5 permite ainda, uma análise mais detalhada do ângulo de visão para o projeto e posicionamento de diferentes instrumentos. A Figura 51 ilustra o uso da ferramenta *Vision Window*, que possibilita simular a visão do piloto na posição pré-programada e verificar se o ângulo de visão está adequado e dentro da faixa de visão focada à frente. Na Figura 51a está a representação do envelope de visão para o extremo inferior da análise ( $P_{2,5}$  fem.), já na Figura 51b representa o envelope de visão para o extremo superior da análise ( $P_{100}$  masc.). A área em vermelho em ambas as imagens representa a visão periférica, correspondente aos ângulos de visão mais abertos.



(a)  $P_{2,5}$  fem.



(b)  $P_{100}$  masc.

Figura 51 – Representação da visão pela ferramenta *Vision Window* (CUNHA FILHO, 2022)

Pode-se observar que ambos os pilotos têm uma visão privilegiada do painel, que está posicionado com uma angulação ótima em relação à linha de visão dos pilotos.

Com a conclusão dessas etapas, podemos visualizar na Figura 52 o painel de instrumentos e os comandos da aeronave, todos devidamente posicionados no *cockpit*.

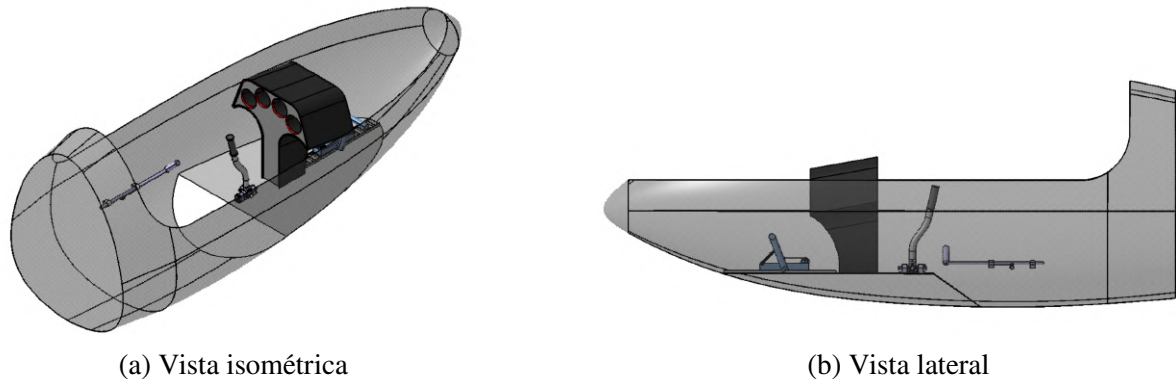
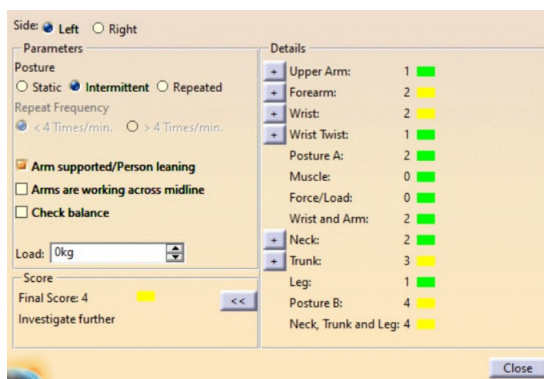


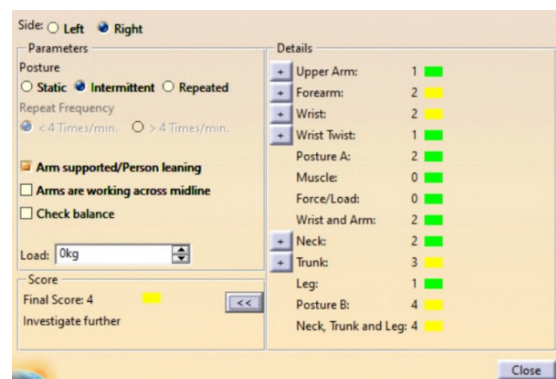
Figura 52 – Configuração final dos comandos e painel no *cockpit*. fonte: autor.

#### 4.1.2 Níveis de conforto da análise virtual

As noções de conforto do simulador foram principalmente definidas na etapa preliminar em CAD, através da metodologia RULA, descrita na Seção 2.5. Para tanto, foi utilizada a solução presente no próprio software de modelagem, com o posicionamento correto dos manequins correspondentes para interação com os comandos previamente posicionados. As Figuras 53 e 54 representam os resultados da análise RULA para o  $P_{100}$  masc. e para o  $P_{2,5}$  fem. respectivamente.



(a) Lado esquerdo do corpo



(b) Lado direito do corpo

Figura 53 – Resultados na análise RULA para o  $P_{100}$  masculino. fonte: autor.

(a) Lado esquerdo do corpo

(b) Lado direito do corpo

Figura 54 – Resultados na análise RULA para o  $P_{2,5}$  feminino. fonte: autor.

Conforme observado, a pontuação final obtida pelo método RULA, que avalia o grau de risco, indicou um somatório de 4 em todos os casos. De acordo com a metodologia, essa pontuação representa um baixo nível de risco para o operador, sugerindo que pouca ou nenhuma ação corretiva é necessária.

## 4.2 Resultados da etapa de *mockup* rápido físico

Embora as ferramentas do software sejam excelentes para verificar as condições do *cockpit* de simulação de voo, uma abordagem mais tangível representa uma solução eficaz para validar o que foi desenvolvido inicialmente no ambiente virtual. Para a construção da bancada de validação, utilizou-se a metodologia de *quick and dirty mockup*, já descrita e analisada na Seção 2.9, visando manter o baixo custo, que é a ideia principal dessa abordagem.

### 4.2.1 Construção do *mockup*

Para a construção, foi realizando um levantamento dos materiais necessários para sua confecção, focando em opções econômicas e de fácil montagem. A ideia inicial era utilizar sucatas e materiais menos nobres. Foram considerados metais como possíveis candidatos estruturais, destacando o metalon, que, além de ser feito de aço carbono com características ideais de rigidez para assentos e trilhos, também era acessível, pois foram utilizados retalhos e sobras de outros projetos da UnB. Para a base do *mockup* rápido, inicialmente planejava-se usar metais, mas devido à indisponibilidade desses materiais, optou-se por canos de PVC e junções do tipo “joelho” e “T”, que foram fixados com adesivo plástico e parafusados ao assento final.

A Figura 55 ilustra a separação dos materiais, já a Tabela 2 representa a catalogação dos componentes que foram utilizados na construção do *mockup*.



Figura 55 – Separação e catalogação dos materiais para o *mockup*. (CUNHA FILHO, 2023)

Tabela 2 – Tabela de materiais necessários para a construção do *mockup*

| Quantidade  | Item                                   |
|-------------|----------------------------------------|
| 10m         | Tubo de esgoto 40mm                    |
| 0,5m        | Tubo quadrado de aço Metalon 50x50mm   |
| 2,5m        | Tubo quadrado de aço Metalon 20x20mm   |
| 0,5m        | Tubo retangular de aço Metalon 20x40mm |
| 14 unidades | Conexão tipo "T" de 40mm               |
| 6 unidades  | Conexão tipo "Joelho" de 40mm          |
| 1 unidade   | Adesivo PVC                            |
| 1 unidade   | Placa de madeira 800x400x6mm           |
| 4 unidades  | Abraçadeira de aço para cano 40mm      |
| 8 unidades  | Parafuso M4 com porcas                 |

A partir dos materiais catalogados, iniciou-se a adaptação da estrutura no CAD para permitir sua representação. Seguindo a metodologia de *mockup* rápido, buscou-se representar apenas os sistemas fundamentais para a análise ergonômica, simplificando a estrutura para facilitar o processo como um todo. A Figura 56 ilustra essa simplificação.



Figura 56 – CAD do *mockup* simplificado. (CUNHA FILHO, 2023)

Essa estrutura final guarda similaridades com as definições iniciais da etapa virtual, ela preserva as informações de angulação do banco para o encosto e o apoio de perna, além de manter a posição do piso de fixação do manche e dos pedais, garantindo um ambiente adequado para a validação ergonômica.

Além das informações de angulação e posicionamento do banco, pode-se observar que também se buscou replicar de maneira simples o trilho do banco, garantindo a possibilidade de validar o ajuste para diferentes percentis. Com o CAD realizado, seguindo as dimensões que podem ser consultadas no Apêndice B, e os materiais separados, iniciou-se a fase de construção do *mockup*.

"A solda, corte e demais modificações dos materiais para a obtenção do produto final foram feitas utilizando-se dos laboratórios de soldagem e usinagem da UnB no Campus Gama"(CUNHA FILHO, 2023).

O subconjunto do assento pode ser observado na Figura 57, a Figura 58 por sua vez demonstra a base de canos de PVC utilizada no projeto.



Figura 57 – Assento de *mockup* após corte e soldagem. fonte: autor



Figura 58 – Base de tubo de PVC usada no *mockup* (CUNHA FILHO, 2023)

Os subconjuntos foram unidos, e uma camada de primer cinza foi aplicada na base, enquanto a estrutura de metalon recebeu pintura metálica preta. O encosto, o assento e o apoio

de perna foram revestidos com papelão e acolchoados com espuma de estofado. A estrutura do painel foi improvisada com papelão, seguindo as dimensões previamente estabelecidas. Para a representação dos comandos, optou-se por produtos fabricados com impressão 3D FDM, devido à facilidade de criar geometrias complexas de forma precisa e acessível. O resultado final da montagem, incluindo o posicionamento de todos os comandos conforme o planejado, pode ser visualizado na Figura 59.

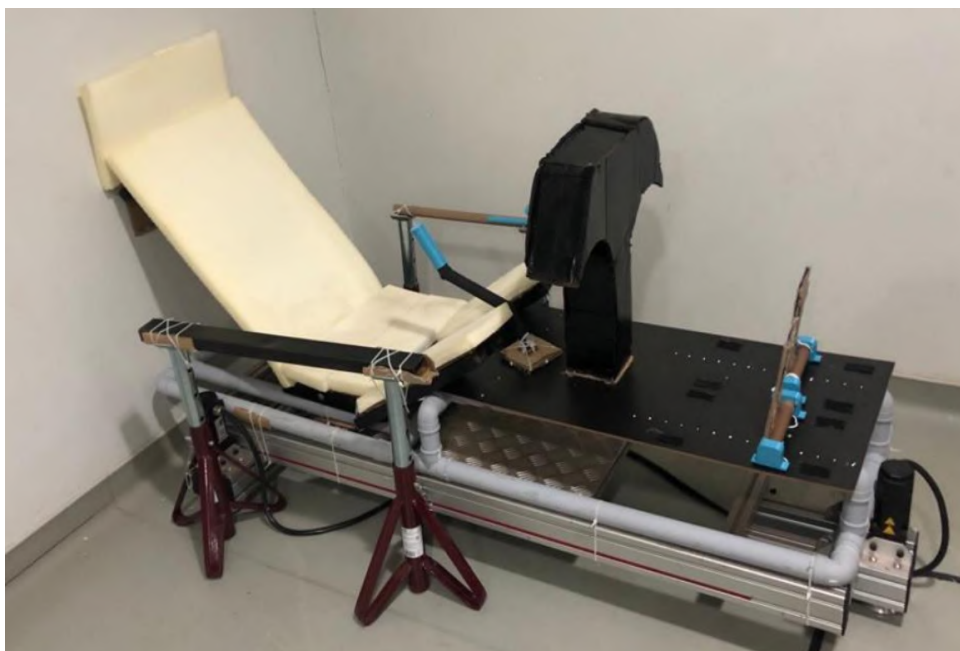


Figura 59 – *Mockup* rápido devidamente montado (CUNHA FILHO, 2023)

Também foram posicionados dois apoios nas laterais do simulador, a fim de representar as bordas do *cockpit*, por onde o piloto encontraria apoio para entrar e sair do simulador.

#### 4.2.2 Questionário Subjetivo

Para validar a formatação do *cockpit*, representado pelo *mockup* rápido, optou-se pela aplicação de um questionário subjetivo. Um dos principais fatores para essa escolha é a dispensa da necessidade de submeter o trabalho a uma análise posterior para verificar a possibilidade de sua publicação.

Em geral, pesquisas que envolvem dados humanos, especialmente aqueles considerados sensíveis, exigem um tratamento mais cuidadoso e devem passar por avaliações específicas. No entanto, em casos particulares, como pesquisas de opinião pública com participantes não identificados, não há obrigatoriedade de submissão ao sistema CEP/Conep.

De acordo com a Resolução CNS nº 510, (2016), em seu Artigo 1º, parágrafo único, estabelece que: "Não serão registradas nem avaliadas pelo sistema CEP/Conep:

I - pesquisas de opinião pública com participantes não identificados."

O Artigo 2º, inciso XIV, define o que caracteriza uma pesquisa de opinião pública:

"XIV - pesquisa de opinião pública: consulta verbal ou escrita de caráter pontual, realizada por meio de metodologia específica, na qual o participante é convidado a expressar sua preferência, avaliação ou o sentido que atribui a temas, atuação de pessoas e organizações, ou a produtos e serviços, sem possibilidade de identificação do participante."(CNS, 2016)

Dessa forma, a utilização de questionários subjetivos em pesquisas de opinião pública, como no caso da avaliação de conforto e usabilidade do *mockup* rápido, que representa um produto, é viável e não requer aprovação prévia do sistema CEP/Conep, desde que os participantes permaneçam não identificados e a pesquisa se enquadre nas diretrizes estabelecidas.

A partir disso, a fase do questionário subjetivo teve início com a seleção dos voluntários, com o critério de escolher indivíduos de diferentes percentis, tanto masculinos quanto femininos, e preferencialmente com conhecimentos em pilotagem. O questionário pode ser consultado na íntegra no Apêndice A.

Após uma instrução inicial realizada com cada voluntário, o *mockup* foi ajustado de acordo com suas necessidades individuais, incluindo alterações na pinagem do assento e na posição dos pedais em relação à cremalheira. Dessa forma, as percepções dos voluntários em relação ao *mockup* também contribuíram para a avaliação da proposta de ajuste do assento para o planador.

No questionário pós-pilotagem, foram obtidas as percepções subjetivas dos voluntários. Nesta etapa, os componentes do *mockup* foram avaliados em uma escala de 0 a 5, onde 0 significa "Muito ruim", 1 "Ruim", 2 "Aceitável", 3 "Bom", 4 "Muito bom" e 5 "Excelente". A avaliação incluiu o alcance do manche, os pedais, os comandos do freio aerodinâmico e a altura dos componentes do assento. Além disso, a dificuldade de entrada e saída do simulador também foi avaliada seguindo a mesma escala, com notas de 0 a 5, sendo 0 "Muito difícil" e 5 "Muito fácil".

Por fim, foi solicitado aos voluntários que avaliassem dimensões específicas do assento, indicando, com base em sua percepção, a necessidade de ajustes em determinadas distâncias e a direção das mudanças (se deveriam ser maiores ou menores).

A Figura 60 apresenta um registro dos testes realizados pelo próprio autor.



Figura 60 – Autor realizando o teste do *mockup*. Fonte: autor

#### 4.2.3 Níveis de conforto da análise de *mockup* físico

Ao contrário da pontuação RULA, na pontuação de conforto subjetivo quanto maior a nota, melhor o conforto.

A fim de elucidar mais acerca das pontuações, podemos agrupar todas as notas de um determinado subsistema e retirar sua média. As tabelas 3 e 4 representam as médias das notas subjetivas de conforto masculino e feminino respectivamente.

Tabela 3 – Médias das notas masculinas para o conforto. Fonte: autor.

| Subsistema | Conforto médio |
|------------|----------------|
| Painel     | 4,61           |
| Assento    | 4,30           |
| Manche     | 4,46           |
| Pedais     | 4,46           |
| Alavanca   | 4,69           |

Tabela 4 – Médias das notas femininas para o conforto. Fonte: autor.

| Subsistema | Conforto médio |
|------------|----------------|
| Painel     | 5              |
| Assento    | 4              |
| Manche     | 5              |
| Pedais     | 5              |
| Alavanca   | 5              |

As médias das notas de conforto, representam um resultado satisfatório, validando o trabalho realizado anteriormente através do modelo 3D do simulador via software de CAD.

Já a obtenção dos resultados relacionados à usabilidade do simulador não poderia ser realizada apenas com sua modelagem virtual em CAD. Assim, a construção do *mockup* revelou-se essencial para alcançar esse objetivo.

Assim como na análise de conforto, a obtenção dos resultados de usabilidade baseia-se na análise realizada por meio do questionário subjetivo do *mockup* (Apêndice A). Com a avaliação do posicionamento de todos os controles em relação ao piloto, além da dificuldade de entrada e saída do simulador, um fator que não pode ser objetivamente calculado e que requer uma análise individual das características de cada voluntário.

#### 4.2.4 Níveis de alcance da análise de *mockup* físico

As médias para as notas masculinas e femininas de alcance estão calculadas nas Tabelas 5 e 6 respectivamente.

Tabela 5 – Médias das notas masculinas para o alcance. Fonte: autor.

| Subsistema | Alcance médio |
|------------|---------------|
| Painel     | 4,30          |
| Assento    | 4,23          |
| Manche     | 4,61          |
| Pedais     | 4,30          |
| Alavanca   | 4,15          |

Tabela 6 – Médias das notas femininas para o alcance. Fonte: autor.

| Subsistema | Alcance médio |
|------------|---------------|
| Painel     | 5             |
| Assento    | 4,33          |
| Manche     | 4,33          |
| Pedais     | 3,66          |
| Alavanca   | 5             |

Em relação ao público masculino, os alcances apresentaram boa constância, com médias todas satisfatórias, porém, entre o público feminino há uma variação maior de alcances, suspeita-se que esse resultado se dê pela pequena quantidade de voluntárias, fato que concentrou o influencia de notas mais baixas na média.

#### 4.2.5 Dificuldade de entrada e saída do *mockup*

Na análise das variáveis de entrada e saída, optou-se por adotar uma escala de dificuldade, variando de 1 a 5, na qual 1 representa um grau de dificuldade muito elevado e 5 indica uma dificuldade extremamente baixa. As médias desses valores podem ser visualizados na Tabela 7.

Tabela 7 – Médias das avaliações de entrada e saída para masculino e feminino. Fonte: autor.

| Média Masc. Entrada | Média Masc. Saída | Média Fem. Entrada | Média Fem. Saída |
|---------------------|-------------------|--------------------|------------------|
| 3.00                | 2.75              | 4.66               | 2.33             |

Analisando individualmente os resultados das médias, ambos os voluntários apresentaram dificuldade na saída da bancada de testes. No entanto, o grupo feminino demonstrou maior facilidade na entrada em comparação ao grupo masculino.

### 4.3 Resultados da etapa de simulador

Como preparação para a etapa de construção do simulador físico, assim como na etapa de *mockup* rápido, foram selecionados, por meio de uma pesquisa preliminar, os materiais mais adequados, considerando seu baixo custo e facilidade de implementação. Para facilitar essa análise, o projeto foi subdividido em quatro núcleos principais: estrutura, controles, eletrônica e interface.

#### 4.3.1 Preparativos construtivos de estrutura

Para a estrutura, o alumínio estrutural *V-slot* foi identificado como o material com melhor custo-benefício, destacando-se pela facilidade de manuseio em comparação com outras opções. Esse material permite a construção de estruturas em diversas configurações, sem a necessidade de cortes complexos ou soldagem, uma vez que sua fixação é feita por meio de parafusos e porcas-martelo, que se ajustam aos *slots* presentes no perfil. A Figura 61 representa um exemplo de aplicação do alumínio estrutural para o projeto de simuladores.

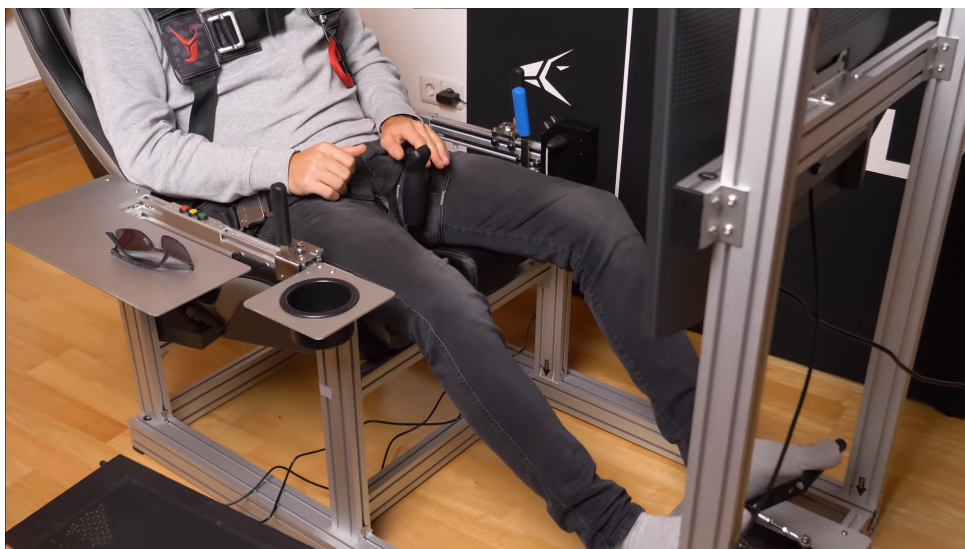


Figura 61 – Exemplo de estrutura V-slot (STEFAN LANGER, 2021)

O V-slot não representa um custo muito elevado para o projeto, realizando as otimizações corretas, esse pode representar uma das melhores escolhas para o projeto.

#### 4.3.2 Preparativos construtivos dos controles

Para a confecção dos controles de voo, foi escolhida a manufatura aditiva *FDM*, assim como no *mockup* rápido, devido à familiaridade do autor com esse método de fabricação. Ademais, o acesso à técnica é facilitado, seja por meio de impressoras pessoais, seja pela utilização do Laboratório de Estruturas e Materiais Aeroespaciais (LEMA) da *FCTE*. Outro fator determinante na escolha desse método é a flexibilidade para projetar soluções em diversas configurações e formatos, em contraste com o V-slot, que oferece opções menos customizáveis.

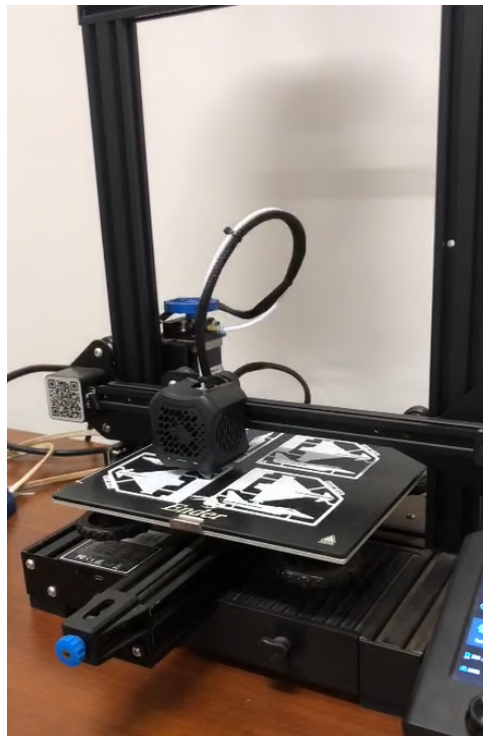


Figura 62 – Impressora 3D presente no laboratório da FCTE, fonte: autor.

#### 4.3.3 Preparativos construtivos de eletrônica

Inicialmente, o planejamento eletrônico contemplava o uso da interface dedicada para controle de *joysticks*, a *BU0836X*, ilustrada na Figura 63, amplamente recomendada para esse tipo de aplicação. No entanto, devido ao elevado custo associado a eventuais taxas de importação, essa opção se tornou inviável em termos de preço final. Diante disso, iniciou-se uma pesquisa para definir alternativas eletrônicas mais viáveis para o simulador.

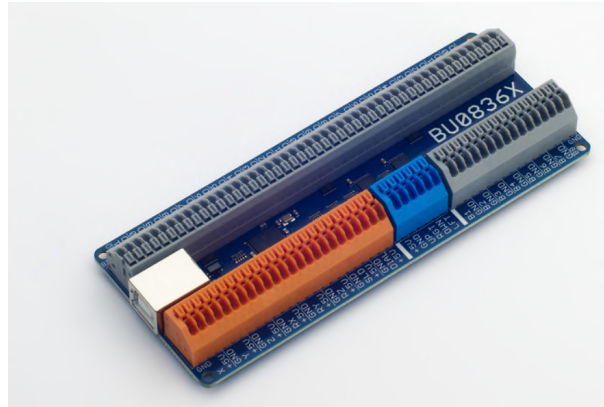


Figura 63 – Interface Joystick *BU0836X* (LEO BODNAR ELECTRONICS, 2024)

A pesquisa considerou a facilidade de uso do componente, a abundância de materiais didáticos e de suporte disponíveis, além do custo final da solução. Como resultado, o Arduino foi selecionado como a melhor opção, especialmente as variantes que utilizam o *chip ATmega32U4*, ilustrado na Figura 64. Esse *chip* permite que o dispositivo seja reconhecido como um periférico de computador, simplificando a integração e reduzindo os custos. Para interagir com o Arduino e implementar o sistema de controle do simulador, foram selecionados os seguintes componentes eletrônicos:

- **Sensores de Efeito Hall:**

- Os sensores de efeito Hall detectam a presença de campos magnéticos, gerando uma tensão proporcional à intensidade do campo. Essa tensão é convertida em um sinal analógico, que pode ser lido pelo Arduino.
- No simulador, esses sensores, juntamente com ímãs, podem ser utilizados para capturar movimentos lineares ou angulares, como a deflexão de manches ou pedais. Sua alta precisão e resposta rápida os tornam ideais para aplicações que exigem controle preciso.

- **Potenciômetros:**

- Potenciômetros são resistores variáveis que permitem ajustar a tensão de saída com base na posição de um cursor. Quando conectados a um pino analógico do Arduino, fornecem um valor proporcional à sua rotação ou deslocamento.
- No projeto, os potenciômetros são utilizados para simular alavancas ou controles de ajuste que não exigem movimentação fina ou a alta precisão requerida pelos eixos do manche e do pedal. Eles são empregados em funções como a regulação de flaps ou a seleção de níveis de potência para determinados sistemas da aeronave, onde a precisão absoluta não é crítica, mas a confiabilidade e a simplicidade de operação são essenciais.

- **Botões:**

- Botões são interruptores simples que abrem ou fecham um circuito elétrico. Quando pressionados, enviam um sinal digital (*HIGH* ou *LOW*) ao Arduino, indicando uma ação específica.
- No simulador, os botões são empregados para acionar diversas funções, conforme a necessidade da aplicação. Sua utilização mais evidente é a emulação de botões físicos presentes no cockpit do planador, tais como interruptores. Além disso, podem ser configurados para simular outros controles da aeronave, como a liberação de freios ou alternância entre modos de operação.

A Figura 64 ilustra a placa Arduino selecionada, juntamente com os componentes eletrônicos utilizados: botão, potenciômetro e sensor de efeito Hall, dispostos respectivamente da esquerda para a direita.

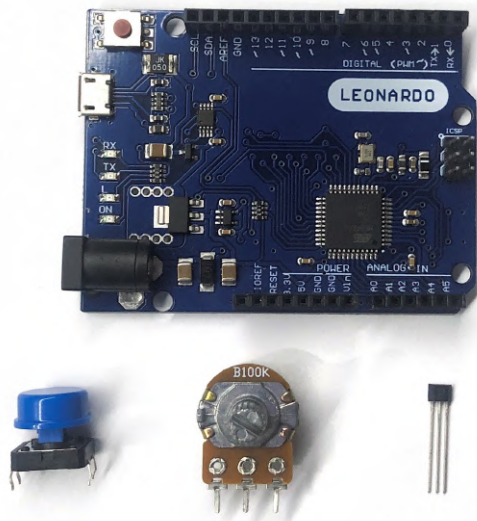


Figura 64 – Módulo Leonardo e componentes eletrônicos. fonte: autor.

#### 4.3.4 Preparativos construtivos da interface

Inicialmente, para a interface do piloto, planejou-se a utilização de uma tela dedicada à visualização do ambiente de simulação, com integração de realidade virtual (RV). A proposta incluía o uso do Óculos Meta Quest 2, de propriedade do autor, que foi testado com sucesso e integrado aos softwares de simulação. Contudo, devido ao custo elevado desse equipamento, estudou-se uma solução alternativa mais viável financeiramente.

Diante disso, considerou-se uma abordagem mais acessível, na qual os *Google Cardboards* e outras soluções de RV baseadas em aparelhos celulares se mostraram como opções de

baixo custo. Esses dispositivos permitem a experiência de realidade virtual utilizando um simples *smartphone*, amplamente disponível e acessível. Essa solução viabiliza, inclusive, o uso do próprio celular do piloto no simulador, mantendo a imersão sem incorrer nos custos elevados associados aos óculos de *RV* tradicionais.

4.3.5 Simulador preliminar

Para a definição preliminar do simulador, adotou-se como base os materiais disponíveis, priorizando o reaproveitamento de componentes já utilizados. O objetivo principal foi selecionar as melhores opções de custo-benefício, com foco em facilidade de construção e redução de custos. A seleção dos materiais pode ser ajustada no produto final, dependendo de fatores como demanda, custos e disponibilidade.

A Figura 65 ilustra o modelo CAD simplificado da estrutura preliminar do simulador, com a identificação dos materiais planejados para utilização.

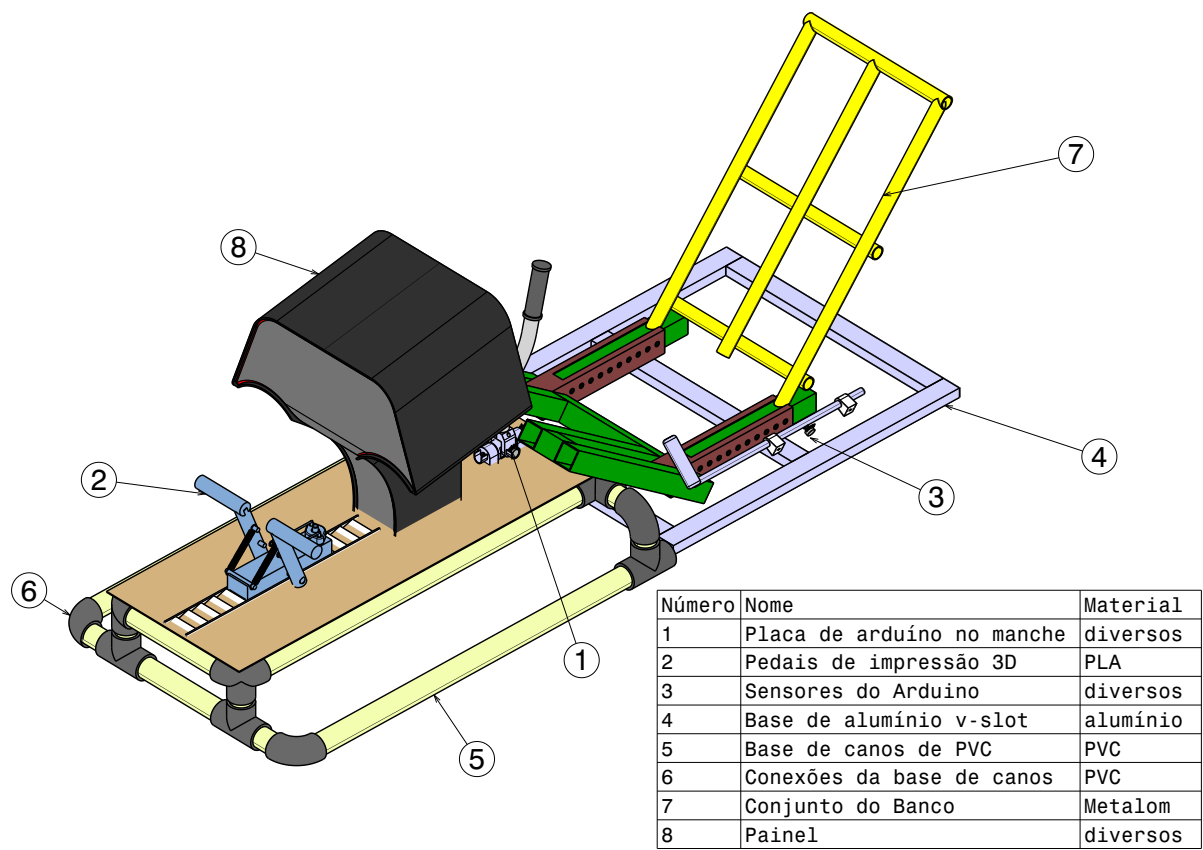


Figura 65 – Modelo preliminar do simulador, fonte: autor.

4.3.6 Estimativa de custos inicial

A tabela 8 ilustra, com base na pesquisa inicial e dos equipamentos definidos, a estimativa de custos do projeto final.

Tabela 8 – Tabela de materiais e custos. Fonte: autor

| Número             | Material                   | Quantidade | Preço Unitário | Preço Total      |
|--------------------|----------------------------|------------|----------------|------------------|
| 1                  | Arduíno Micro              | 2 unidades | R\$10,00       | R\$20,00         |
| 2                  | Filamento PLA/Impressão 3D | 1 Kg       | R\$100,00      | R\$100,00        |
| 3                  | Sensores Arduíno           | diversos   | ...            | R\$20,00         |
| 4                  | Alumínio estrutural V-slot | 4m         | R\$37,00       | R\$148,00        |
| 5                  | Tubo PVC                   | 3m         | R\$30,00       | R\$90,00         |
| 6                  | Encaixes do cano           | diversos   | ...            | R\$40,00         |
| 7                  | Conjunto do banco          | 1          | ...            | R\$100,00        |
| <b>Valor Total</b> |                            |            |                | <b>R\$518,00</b> |

#### 4.3.7 Construção do simulador

Após uma análise preliminar e tomando como base a construção do *mockup* simplificado, o desenvolvimento do simulador seguiu as diretrizes estabelecidas no levantamento preliminar realizado durante a etapa de preparativos. O processo foi organizado em módulos individuais, cada um com foco em aspectos específicos do projeto:

- **Estrutura:** Representação da montagem física do simulador, incluindo dimensões, materiais e mantendo a análise ergonômica;
- **Controles:** Desenvolvimento e integração dos dispositivos de entrada, como manches e pedais;
- **Eletrônica e código:** Implementação dos circuitos e sensores necessários para o funcionamento dos controles em conjunto com o software de simulação;
- **Interface:** Seleção e adaptação da interface e dos meios de interação do piloto com o ambiente de simulação.

Cada núcleo foi analisado de forma individual, considerando suas particularidades e requisitos técnicos, para garantir uma integração eficiente na etapa final de construção da bancada de simulação.

A separação da análise em módulos permite otimizar o desenvolvimento, assegurando que todos os componentes funcionem de maneira individual e coesa, atendendo aos objetivos do projeto. Além disso, cada núcleo possui respectivos manuais de montagem, integração e dicas de funcionamento, que facilitam não apenas a implementação e o uso do simulador, mas também a replicação do trabalho por outros membros da equipe Dragonfly no futuro ou por empresas que desejem aplicar as soluções propostas.

##### 4.3.7.1 Construção do módulo estrutural

Inicialmente, a construção da estrutura do simulador previa o uso de alumínio *V-Slot* para a base de sustentação do assento. Contudo, os resultados satisfatórios alcançados com a

estrutura de tubos de PVC na fase de *mockup*, aliados ao seu baixo custo e à facilidade de montagem, levaram à adoção do PVC como solução definitiva para o simulador de voo. Além disso, optou-se por utilizar um banco automotivo fornecido pela própria universidade, o que reduziu custos e eliminou a necessidade de reforçar a estrutura antiga para maior rigidez. Essa decisão foi motivada pelo fato de que a estrutura do banco inicial foi projetada exclusivamente para o *mockup*, sendo uma solução temporária e de uso limitado. Adaptar o banco do *mockup* para o simulador final demandaria soldas, ajustes complexos e um investimento significativo de tempo e esforço para alcançar uma solução adequada.

O alumínio estrutural *V-Slot* foi reservado para os controles, que demandam maior robustez e adaptabilidade em comparação à estrutura principal. A aplicação específica desse material será detalhada posteriormente, na seção dedicada aos controles.

A montagem da estrutura seguiu um processo detalhado, que incluiu a fixação e instalação dos tubos. A escolha dos materiais e métodos de fixação foi cuidadosamente planejada para assegurar a facilidade de replicação do projeto. O manual de montagem, no Apêndice E, descreve passo a passo cada etapa, desde o posicionamento dos tubos até a fixação final dos componentes, incluindo dicas e recomendações para evitar erros e garantir a montagem correta. O resultado final da montagem pode ser visualizado na Figura 66:

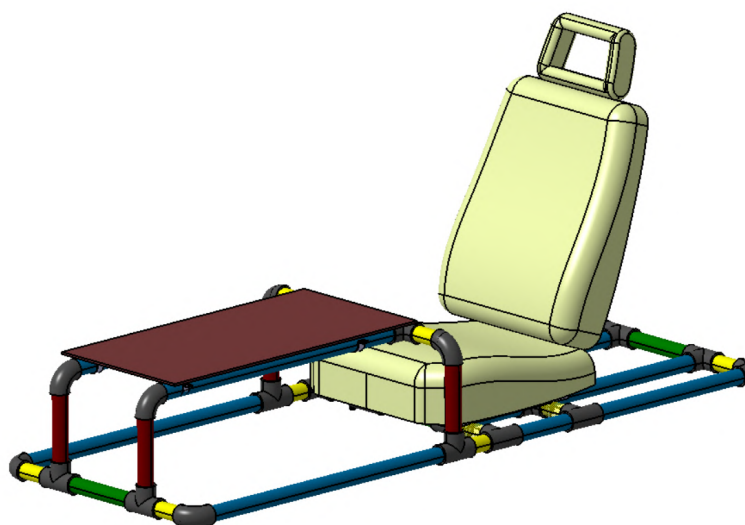


Figura 66 – Estrutura do simulador finalizada. fonte: autor.

Para preservar as características ergonômicas da bancada — aspecto central e razão de existência deste simulador —, é essencial ajustar o posicionamento do banco. A adoção de uma solução pronta, como um assento automotivo, simplifica significativamente esses ajustes, que podem ser realizados tanto no trilho do banco (que corresponde ao trilho do *mockup*, conforme definido na Seção 3.2.2 e ilustrado na Figura 31), quanto por meio do mecanismo de inclinação do banco. No entanto, este último, uma vez definido, deve permanecer fixo, de modo a manter a inclinação previamente estabelecida na análise ergonômica. Tais ângulos e medidas específicos, já apresentados, podem ser consultados na Figura 30.

A Figura 67 ilustra uma sobreposição entre a estrutura definida na fase de *mockup* e a configuração final do simulador.

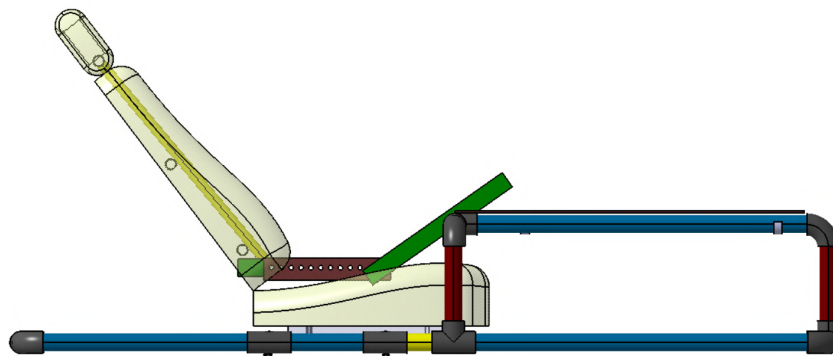


Figura 67 – Estrutura atual sobreposta com a antiga. fonte: autor.

Observa-se que, nesse caso, a elevação da nova estrutura exige um ajuste correspondente na altura do assento. Para isso, foi necessário criar um apoio que elevasse o piloto à posição adequada no simulador. O apoio, com as dimensões corretas, foi confeccionado utilizando um conjunto de espuma e madeira.

#### 4.3.7.2 Construção do módulo de controles

A solução de modelagem e concepção dos controles do simulador foi idealizada e baseada nos trabalhos do membro da equipe Dragonfly João Marcos Guimarães Rodrigues, realizado em seu trabalho do PIBEX da UnB no ano de 2024. As soluções adotadas pelo membro foram adaptadas conforme as dimensões e necessidades do simulador, mantendo a estruturação inicialmente planejada.

Para a modelagem dos controles do simulador, optou-se pela utilização de peças impressas em 3D, que permitem a criação de componentes complexos e personalizados baseados nos comandos originais do planador, possibilitando a reprodução fiel baseada nos modelos 3D originais do CAD da aeronave, garantindo precisão e fidelidade ao design real.

A estrutura dos controles foi desenvolvida com alumínio *V-Slot*, material escolhido por sua robustez e capacidade de permitir ajustes precisos na montagem. O uso dos perfís de alumínio facilitou a integração de sensores, botões e outros componentes eletrônicos, tornando o sistema modular e de fácil manutenção.

A montagem do módulo de controles, assim como no módulo estrutural, é detalhada e comentada no manual de montagem específico para esse módulo, presente no Apêndice C Figura 95. O projeto CAD dos sistemas, devidamente modelados, pode ser visualizado na Figura 68. Nela, é possível observar a utilização de perfís de alumínio *V-Slot*, representados em cinza, para a estruturação geral do módulo, bem como as peças impressas em 3D, destacadas em azul, que compõem o manche e os pedais.

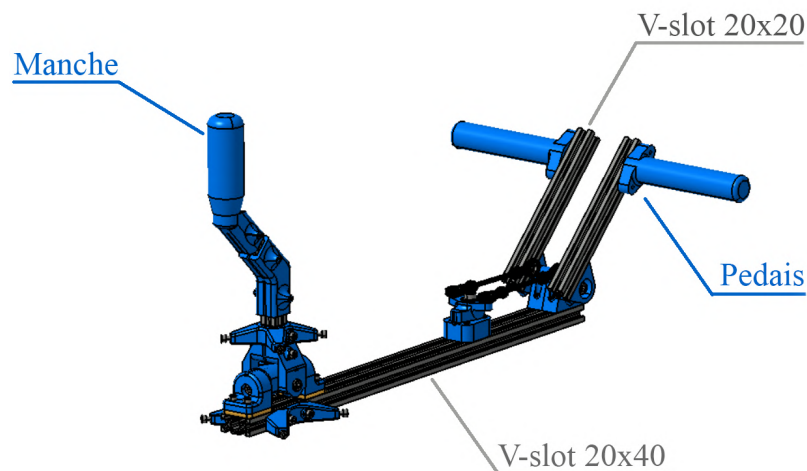


Figura 68 – Modelagem do módulo de controles montado. fonte: autor.

Abaixo, na Figura 69, também é possível observar a montagem da estrutura de comandos, dessa vez, responsável pela operação dos freios aerodinâmicos. O esquema de cores foi adaptado para proporcionar um contraste visual entre a peça impressas em 3D fixa, representadas em verde, e as móveis, destacadas em azul, facilitando a identificação e o entendimento do funcionamento do sistema.

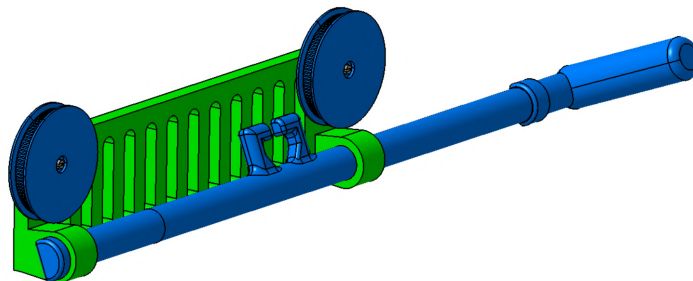


Figura 69 – Comandos dos freios aerodinâmicos. fonte: autor.

No módulo de controle dos pedais e do manche (Figura 68), o funcionamento é baseado na movimentação de sensores de efeito Hall, que estão posicionados ao longo da estrutura e interagem com ímãs.

Já no controle dos freios aerodinâmicos (Figura 69), optou-se por um sistema composto por correia e polia, que converte movimento longitudinal em rotação. Esse movimento rotacional é capturado por um potenciômetro, que define a entrada correspondente à posição da alavanca de freio no simulador.

#### 4.3.7.3 Construção do módulo de eletrônica e código

A integração eletrônica do simulador de voo foi realizada por meio de um sistema baseado em Arduino, que atua como interface entre os controles físicos do cockpit e o software

de simulação. O código desenvolvido utiliza a biblioteca *Arduino Joystick Library*, que permite emular um *joystick* virtual no computador, facilitando a comunicação com o simulador.

O código foi estruturado para ler entradas analógicas e digitais, processá-las e enviar os dados ao computador como comandos de *joystick*. Os principais elementos do sistema são:

#### **Sensores de efeito hall para os eixos do *joystick*:**

- Três eixos analógicos (X, Y e Z) são utilizados para capturar movimentos de controles físicos dos manches e pedais. Esses eixos são mapeados para os pinos analógicos A0, A1 e A2 do Arduino, onde sensores Hall que interagem com ímãs da estrutura são posicionados.
- Os valores lidos são normalizados em uma escala de 0 a 1024, correspondendo à resolução de 10 bits do conversor analógico-digital (ADC) do Arduino.
- Em seguida a normalização é convertida em entrada para o *joystick* afetando sua posição individualmente para cada eixo.

#### **Botões físicos programáveis:**

- Três botões físicos são conectados aos pinos digitais 2, 3 e 4. Esses botões são utilizados para acionar funções específicas no simulador, como soltar o reboque do guincho ou avião, soltar os freios de solo, ou ainda centralizar a visão no modo RV, estes podem ser alterados livremente no software de simulação conforme a necessidade.
- O estado de cada botão é lido e enviado ao computador como um comando para o *joystick*, utilizando os botões 2 e 3 do mesmo.

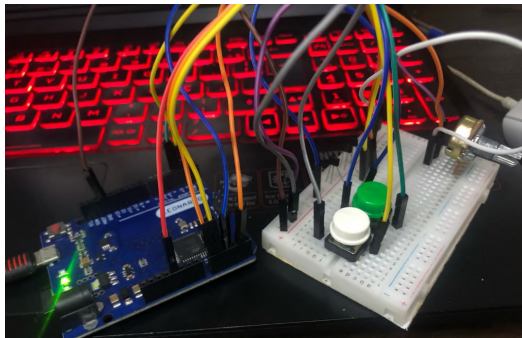
#### **Potenciômetro para alavanca de freio aerodinâmico:**

- Um potenciômetro conectado ao pino analógico 4 é utilizado para simular uma alavanca com posições distintas. O valor lido é mapeado, normalizado e convertido, assim como no sensor de efeito hall, por fim ele é definido como entrada para o sentido de rotação do eixo X.
- Quando a alavanca muda de posição, o código emula a movimentação da alavanca para indicar avanço ou retrocesso na seleção de etapas dos freios aerodinâmicos.

#### **Comunicação com o computador:**

- O Arduino envia os dados dos eixos e botões ao computador por meio da biblioteca *Joystick*, que simula um dispositivo HID (*Human Interface Device*). Isso permite que o simulador reconheça o Arduino como um controlador padrão, sem a necessidade de configurações e programas externos adicionais.

A Figura 70 ilustra a etapa de prototipagem desse sistema, destacando as conexões realizadas (Figura 71a) e os testes de integração com o software de simulação de voo (Figura 71b). Durante os testes, as entradas dos controles foram registradas e convertidas em comandos para a aeronave simulada, validando a funcionalidade e a precisão do sistema.



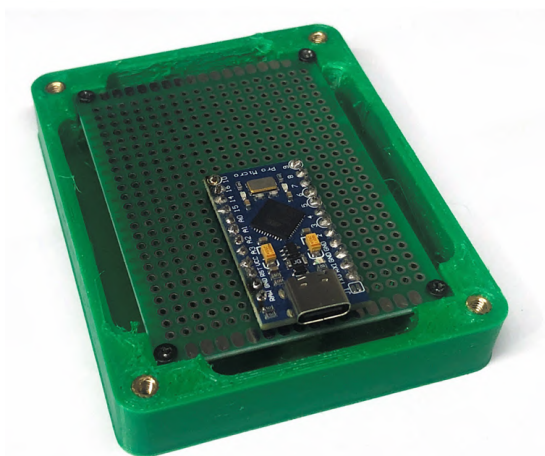
(a) Conexões eletrônicas

(b) Teste das entradas no *software*

Figura 70 – Prototipagem da integração eletrônica. fonte: autor.

Posteriormente, a placa Arduino para a realização dos protótipos foi substituída por uma placa Arduino "Micro", que utiliza a mesma controladora (*ATmega32U4*), mas oferece uma solução mais compacta. Essa mudança reduziu significativamente o espaço necessário para a instalação do controlador, permitindo a modelagem de uma estrutura dedicada para acomodar o dispositivo. Para isso, foi utilizada uma placa *PCB* perfurada, que facilitou a soldagem final dos componentes, além de uma caixa impressa em 3D, projetada para proporcionar um acabamento mais refinado e esteticamente agradável.

A adoção do Arduino "Micro" também mitigou problemas comuns de perda de conexão dos fios, que eram frequentes na configuração anterior com as ligações no Arduino "Leonardo", além de garantir uma maior durabilidade geral ao sistema. A Figura 71 ilustra essa solução.



(a) PCB e Arduino Micro



(b) Montagem final

Figura 71 – Caixa da eletrônica. fonte: autor.

O esquema de conexão dos componentes no Arduino pode ser visualizado na Figura 115, observa-se que os sensores de efeito hall estão representados como potenciômetros para uma simplificação, uma vez que o sinal recebido é analógico para ambos. Já a vista esquemática e o código final para a integração eletrônica, acompanhado de comentários e explicações detalhadas sobre seu funcionamento, estão disponíveis no Apêndice G e no Apêndice H respectivamente.

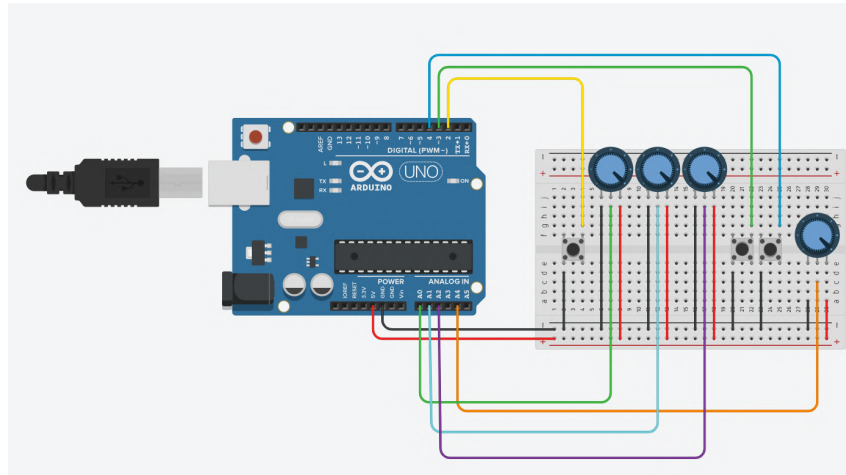


Figura 72 – Esquema de conexão da eletrônica. fonte: autor.

#### 4.3.7.4 Construção do módulo de interface

Inicialmente, o plano de utilizar um celular em conjunto com um módulo de realidade virtual para *smartphones* (Figura 73) como interface de realidade virtual foi concluído com sucesso, demonstrando viabilidade técnica e custo acessível. No entanto, observou-se que, dependendo do aparelho utilizado, a resolução dos textos no painel de instrumentos e outras leituras críticas pode ficar comprometida, dificultando a interpretação de informações essenciais durante o voo. Apesar disso, a solução com celular e *Cardboard* mostrou-se funcional para voos recreativos, proporcionando uma experiência imersiva e acessível para usuários casuais

Para voos que demandam maior realismo e precisão, como treinamentos ou simulações avançadas, a solução final recomendada permanece sendo o uso de um periférico de realidade virtual dedicado, como o *Meta Quest 2* (Figura 73) ou dispositivos similares. Esses equipamentos oferecem resolução superior, rastreamento mais preciso e uma experiência visual mais imersiva, garantindo que todas as informações do painel e do ambiente de voo sejam claramente legíveis e interativas. Dessa forma, enquanto a solução com celular e *Cardboard* é adequada para fins recreativos, o *Meta Quest 2* ou outro dispositivo dedicado de RV é indispensável para simulações que buscam o máximo de realismo e fidelidade.



Figura 73 – *Meta Quest 2* a direita e *Cardboard Genérico de celular* a esquerda. fonte: autor.

#### 4.3.7.5 Montagem dos módulos

Por fim, o simulador montado, com a definição e marcação dos respectivos núcleos, presente no Apêndice D.

A Figura 74 ilustra o simulador montado.



Figura 74 – Registro do simulador montado. fonte: autor.

Já a Figura 75 ilustra o posicionamento do módulo eletrônico no módulo estrutural conforme detalhado no Apêndice D.



Figura 75 – Posicionamento do módulo eletrônico no módulo estrutural. fonte: autor.

### 4.3.8 Configuração do software de simulação

#### 4.3.8.1 Definição do Arduino como *joystick*

Após a conexão com o Arduino, o dispositivo é automaticamente reconhecido pelo **X-Plane 11**, *software* de simulação escolhido. Esse deve ser selecionado conforme a Figura 76.

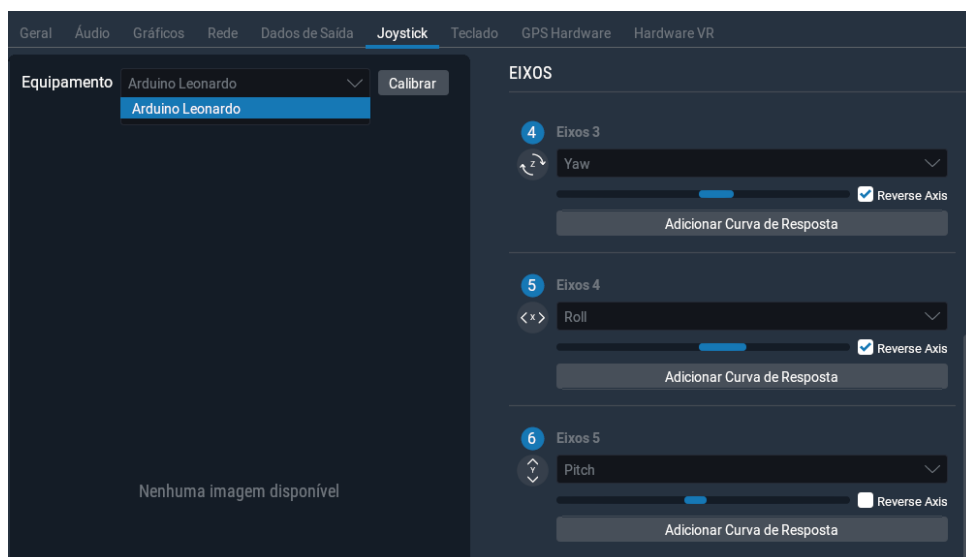


Figura 76 – Seleção do controlador Arduino no software de simulação. fonte: autor.

Os eixos devem ser atribuídos conforme a seguinte sugestão, pré-definida na disposição dos sensores na estrutura e no código, esses podem ser alterados livremente conforme a necessidade:

- $X = Roll$ ;

- $Y = Pitch$ ;
- $Z = Yaw$ ;
- $RotX = Speedbrakes$ .

Recomenda-se a movimentação do manche e pedais nessa etapa para a correta identificação dos eixos, além disso deve-se configurar o botão no topo do manche para a centralização da câmera no ambiente de RV.

A Figura 76 ilustra essa configuração aplicada aos três eixos principais como exemplo.

#### 4.3.8.2 Seleção da aeronave no software

Inicialmente, o plano para a configuração do software de simulação previa a importação do modelo do planador desenvolvido para o X-Plane 11, que dispõe de um módulo dedicado à inclusão de aeronaves personalizadas. No entanto, devido à complexidade do processo e às restrições de tempo, não foi possível concluir essa implementação dentro do escopo do projeto.

Diante dessa limitação, optou-se pela utilização de um planador com características similares ao modelo originalmente planejado. Assim, o **Schleicher ASK 21** foi escolhido por apresentar os principais atributos de *cockpit* para o projeto. Além disso, esse modelo já está incluído na versão padrão do X-Plane 11, eliminando a necessidade de pacotes adicionais pagos. A Figura 77 ilustra a seleção do planador no software de simulação.



Figura 77 – Planador ASK 21 selecionado no XPlane 11. fonte: autor.

Observa-se ainda na Figura 78 a visão em primeira pessoa do simulador para a aeronave escolhida:



Figura 78 – Visão em primeira pessoa do planador escolhido. fonte: autor.

#### 4.3.8.3 Configuração da RV

Outro fator determinante para a escolha do X-Plane 11 foi sua integração nativa com realidade virtual, que amplia significativamente a imersão na simulação. Essa funcionalidade pode ser implementada de duas maneiras: utilizando um dispositivo móvel, transformando-o em um visor de RV, ou por meio de uma solução de realidade virtual dedicado, como o *Meta Quest 2*, proporcionando uma experiência mais fluida.

A Figura 79 demonstra a visão da tela do celular após a configuração da RV no dispositivo móvel para o *software* de simulação.



Figura 79 – Visão na tela do celular após a conexão RV. fonte: autor.

#### 4.3.9 Teste final da integração

Após a montagem de todos os módulos, sua configuração e a validação individual de cada componente, recomenda-se a realização de um voo de teste no simulador como etapa final de verificação. Esse procedimento assegura a correta integração dos sistemas e permite ajustes finos para otimizar a experiência de simulação.

A Figura 80 apresenta um registro de um dos testes conduzidos após a montagem final do projeto, evidenciando a funcionalidade.



Figura 80 – Registro da integração final da RV. fonte: autor.

#### 4.3.10 Resultados do simulador físico

Por fim, como resultado dos testes e da montagem final, pode-se considerar que o simulador alcançou seus objetivos com um desempenho satisfatório. Foi possível replicar as condições de voo de maneira eficaz. Duas abordagens foram testadas: a primeira utilizando um *smartphone*, que, embora limitada a um uso recreativo, cumpriu seu papel de forma aceitável; e a segunda, com um óculos de RV dedicado, que se mostrou a melhor alternativa, proporcionando uma experiência fluida, imersiva e fidedigna às condições reais de voo. A Figura 81 ilustra uma demonstração do funcionamento do produto final.



Figura 81 – Registro de demonstração final da bancada de simulação. fonte: autor.

Os tempos de resposta dos sensores foram avaliados como satisfatórios, com os atrasos no envio dos comandos sendo praticamente imperceptíveis, o que contribuiu para a sensação de realismo e imersão. Além disso, a integração entre *hardware* e *software* se mostrou eficaz,

garantindo estabilidade durante as operações. No entanto, é importante destacar que, embora o simulador tenha atingido seus objetivos principais, há espaço para melhorias, como a incorporação de tecnologias mais avançadas ou a expansão de funcionalidades, que poderiam ser exploradas com investimentos adicionais.

#### 4.3.10.1 Limitações do simulador de voo projetado

Podemos elencar como principal limitação do simulador de voo projetado a falta de feedback tátil ao piloto dos movimentos e forças da aeronave, como força G, resistência do ar nos comandos (manche, pedais e alavanca de freio aerodinâmico), e a sensação física do toque do trem de pouso no solo, entre outros. Além disso, por se tratar de um simulador estático, o piloto também não experiencia os movimentos da aeronave no ar de acordo com as manobras realizadas, como rolagem, guinada ou arfagem. Outro fator importante a se considerar é que a utilização de sensores de baixo custo pode ocasionar em uma precisão reduzida, afetando a resposta dos controles e a sensação de pilotagem.

#### 4.3.10.2 Potenciais melhorias com investimento adicional

A proposta inicial do projeto foi desenvolver um simulador de voo estático de baixo custo, utilizando materiais acessíveis, como tubos de PVC, e componentes eletrônicos de custo reduzido. No entanto, no caso de maiores investimentos, o projeto poderia ser significativamente aprimorado, focando em melhorias que elevariam o realismo da experiência de pilotagem. Com base nas limitações do projeto, as principais melhorias a serem realizadas são:

- Implementar um sistema de *feedback* tátil, integrando atuadores e motores para simular forças como a resistência do ar nos comandos, a sensação de força G e o toque do trem de pouso no solo.
- Inclusão de uma plataforma de movimento, mesmo que simplificada, visando a reprodução dos movimentos básicos da aeronave, como rolagem, arfagem e guinada, aumentando a sensação de realismo.
- Atualização da interface visual, com a adoção de monitores de alta resolução ou óculos de RV mais avançados, ampliando o campo de visão e a qualidade gráfica.
- Aprimoramento da estrutura física, substituindo o PVC por materiais mais robustos, como alumínio ou aço, garantindo maior durabilidade.
- Investimentos em *hardware* de maior precisão, como sensores e controladores de alta qualidade, assim como controladoras dedicadas para a aplicação em simuladores de voo, melhorando a resposta dos comandos.
- Integração e utilização de *softwares* de simulação mais complexos com a reprodução de cenários mais realistas.

### 4.3.11 Materiais e custos

#### 4.3.11.1 Custo final do simulador

Por fim, com base nas análises e nos manuais de montagem, podemos descrever os materiais necessários para a montagem final do simulador. A Tabela 9 apresenta os materiais e custos para a estrutura do simulador. Observa-se que o custo total é calculado tanto com quanto sem o banco automotivo, uma vez que este foi fornecido pela universidade. O valor considerado na soma final será sem o banco.

Tabela 9 – Tabela de materiais e custos para a montagem estrutural. Fonte: autor

| Quantidade                               | Item                              | Custo     |
|------------------------------------------|-----------------------------------|-----------|
| 10m                                      | Tubo de esgoto 40mm               | R\$44,85  |
| 16 unidades                              | Conexão tipo "T" de 40mm          | R\$40,00  |
| 8 unidades                               | Conexão tipo "Joelho" de 40mm     | R\$12,00  |
| 1 unidade                                | Adesivo PVC                       | R\$12,90  |
| 1 unidade                                | Placa de madeira 800x400x6mm      | R\$26,75  |
| 1 unidade                                | Banco automotivo usado            | R\$150,00 |
| 4 unidades                               | Abraçadeira de aço para cano 40mm | R\$7,60   |
| 4 unidades                               | Parafuso M4 com porcas            | R\$4,00   |
| 4 unidades                               | Parafuso M8 de 50mm com porcas    | R\$4,00   |
| Total considerando o banco automotivo    |                                   | R\$302,10 |
| Total desconsiderando o banco automotivo |                                   | R\$152,10 |

Já para o módulo de controles do simulador os materiais e custos estão descritos na Tabela 10:

Tabela 10 – Tabela de materiais e custos para a montagem dos controles. Fonte: autor

| Quantidade  | Item                             | Custo     |
|-------------|----------------------------------|-----------|
| 1Kg         | Filamento PETG para impressão 3D | R\$120,00 |
| 2 unidades  | Potenciômetro                    | R\$2,00   |
| 3 unidades  | Sensor de efeito hall            | R\$2,00   |
| 3 unidades  | Botão/interruptor                | R\$2,00   |
| 1 m         | Correia GT2                      | R\$5,10   |
| 0.3 m       | Alumínio v-slot 20x20mm          | R\$15,99  |
| 0,8 m       | Alumínio v-slot 20x40mm          | R\$65,00  |
| 40 unidades | Parafuso M4                      | R\$15,00  |
| 40 unidades | Porcas-martelo M4                | R\$12,00  |
| Total       |                                  | R\$239,09 |

Além dos materiais necessários para a montagem estrutural e dos controles do simulador, também são necessários equipamentos de realidade virtual para o correto funcionamento da interface planejada, além, claro, do software de simulação. A Tabela 11 apresenta esses equipamentos.

Tabela 11 – Tabela de equipamentos de interface necessários e custos. Fonte: autor

| Quantidade | Item                                               | Custo     |
|------------|----------------------------------------------------|-----------|
| 1 unidade  | Óculos de RV para <i>smartphone</i>                | R\$55,00  |
| 1 unidade  | Cabo de dados compatível com o <i>smartphone</i>   | R\$10,00  |
| -          | <i>Software</i> de simulação ( <b>X-Plane 11</b> ) | R\$60,00  |
| Total      |                                                    | R\$125,00 |

Também se observa, com fundamento nas definições da Tabela 11, a necessidade de um *smartphone*, que, contudo, não foi incluído na análise final de custos, dada sua ampla disponibilidade. Presume-se que o piloto utilizaria seu próprio dispositivo para a visualização das imagens, sendo necessário apenas a tela para exibição e para a função de osciloscópio para emular o movimento da cabeça no ambiente virtual, recurso presente na maioria esmagadora dos dispositivos mais recentes.

A cotação dos preços finais foi realizada com base nas notas de compra dos materiais. Para itens de custo reduzido e geralmente adquiridos em quantidades significativamente maiores do que as utilizadas, como botões, parafusos e sensores, os valores foram arredondados para cima. Esse ajuste visa considerar possíveis perdas e a necessidade de materiais sobressalentes para a montagem. Por fim, a Tabela 11 apresenta os custos para cada núcleo.

Tabela 12 – Tabela de equipamentos necessários e custos. Fonte: autor

| Núcleo                          | Custo     |
|---------------------------------|-----------|
| Montagem Estrutural             | R\$152,10 |
| Montagem dos Controles          | R\$239,09 |
| Equipamentos de Interface de RV | R\$125,00 |
| Custo total final               | R\$516,19 |

Comparando o custo final do simulador com a estimativa inicial realizada na Tabela 8, conforme as definições da Seção 4.3, observa-se uma redução em relação ao valor estimado. Essa redução deve-se principalmente ao fornecimento do assento pela universidade e à decisão de utilizar alumínio V-Slot apenas nos controles, e não na estrutura, eliminando assim os custos estimados na análise inicial.

#### 4.3.11.2 Requisitos mínimos para o simulador

Além dos materiais já discutidos, faz-se necessário atender a certos requisitos essenciais para o adequado funcionamento do sistema de simulação, incluindo a utilização de um computador compatível com a execução do ambiente de simulação. Para garantir uma experiência fluida e realista, é importante que o hardware satisfaça, as especificações mínimas. A Tabela 13 apresenta os requisitos mínimos e recomendados para sua utilização.

Observa-se, a partir dos requisitos mínimos, que o computador não demanda um alto poder computacional, razão pela qual o software **X-Plane 11** foi escolhido. No entanto, sua uti-

Tabela 13 – Requisitos mínimos e recomendados para o X-Plane 11. Fonte: autor

| Componente          | Mínimo                                                | Recomendado                |
|---------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------|
| Sistema Operacional | Win 7, 8.1, 10 (64 bits)                              | Win 7, 8.1, 10 (64 bits)   |
| Processador         | Intel i3/i5/i7 (2 ou mais núcleos) ou AMD equivalente | Intel i5 6600K ou superior |
| Memória RAM         | 8 GB                                                  | 16 GB                      |
| Placa de vídeo      | NVIDIA/AMD com 512 MB                                 | NVIDIA/AMD com 4 GB        |
| Armazenamento       | 20 GB                                                 | 65 GB                      |

lização é necessária para a execução do simulador, especialmente no modo de realidade virtual. Da mesma forma, no caso do uso de um headset de RV dedicado, como o *Meta Quest*, torna-se necessária a aquisição desse dispositivo que geralmente apresenta custo elevado e foi utilizado somente nas demonstrações.

## 5 Conclusão

O desenvolvimento da bancada de simulação para o planador consolidou-se como uma solução viável, acessível e inovadora, atendendo plenamente às necessidades técnicas, ergonômicas e de usabilidade. O projeto alcançou seus objetivos principais, destacando-se pela integração eficiente de módulos estruturais, eletrônicos e de interface, que foram meticulosamente planejados, testados e validados. A abordagem modular adotada permitiu a construção de um simulador funcional, adaptável e de fácil replicação, características essenciais para a longevidade do projeto.

No aspecto ergonômico, as soluções implementadas foram bem recebidas por todos os públicos-alvo considerados. As análises preliminares e detalhadas forneceram dados robustos para a construção e desenvolvimento do produto final do TCC, desde a definição da configuração estrutural até a seleção e adaptação dos materiais utilizados na solução definitiva.

No âmbito estrutural, a escolha pelo PVC como material principal para a base do simulador mostrou-se acertada, oferecendo custo reduzido, facilidade de montagem e flexibilidade para ajustes. O alumínio *V-Slot*, por sua vez, foi empregado nos controles, garantindo robustez e precisão necessárias para a interação do piloto. A manufatura aditiva, por meio da impressão 3D FDM, desempenhou um papel crucial na customização de peças complexas, como o manche e os pedais, permitindo a reprodução fiel dos controles da aeronave real e a otimização do processo de fabricação.

No aspecto eletrônico, a utilização do Arduíno proporcionou uma solução de baixo custo e alta eficiência, com integração simplificada ao *software* de simulação. Sensores de efeito Hall, potenciômetros e botões foram estrategicamente posicionados para garantir respostas precisas e imersivas aos comandos do piloto.

A interface de realidade virtual, inicialmente implementada com celulares e *Google Cardboard*, demonstrou viabilidade para aplicações recreativas, embora com limitações na resolução de textos e detalhes do painel. Para simulações mais realistas, a adoção de dispositivos dedicados, como o *Meta Quest 2*, mostrou-se essencial, garantindo imersão completa e fidelidade às condições reais de voo. Essa dualidade de soluções permite que o simulador atenda tanto a usuários casuais quanto a aplicações profissionais.

Por fim, o projeto foi documentado em manuais detalhados de montagem e integração, reforçando a característica de replicabilidade do projeto, assegurando que ele possa ser reproduzido, aprimorado e adaptado conforme as necessidades futuras, por membros da Dragonfly e da comunidade acadêmica interessados em dar continuidade ao projeto, abrindo espaço para novos testes e trabalhos envolvendo a análise realizada.

Vale ressaltar, ainda, que, embora o simulador tenha atendido plenamente aos objetivos propostos, algumas limitações foram identificadas, principalmente relacionadas ao baixo custo do projeto. Essas limitações, no entanto, não comprometem o sucesso do projeto, que foi concebido como uma solução acessível.

Como sugestão para a continuidade do projeto e para futuros desenvolvimentos da equipe, já considerando as melhorias relacionadas às limitações do projeto atual, recomenda-se os seguintes passos:

- Testes com humanos: Realizar testes de usabilidade com pilotos e usuários de diferentes perfis para validar a ergonomia e a eficácia dos controles;
- Testes de mudança de parâmetros de voo: Explorar a adaptação do simulador para diferentes configurações de voo, ampliando sua aplicabilidade;
- Testes com outras aeronaves: Expandir o escopo do simulador para incluir modelos de outras aeronaves, motorizadas ou não, aumentando sua versatilidade;
- Implementação de *feedback* tátil e plataforma de movimento: Adicionar sistemas que simulem forças e movimentos, elevando o realismo da experiência;
- Atualização do sistema visual: Investir em dispositivos de realidade virtual de alta resolução e amplo campo de visão;
- Aprimoramento da estrutura física: Substituir materiais como o PVC por opções mais robustas, como alumínio ou aço, para maior durabilidade;

Esses passos não apenas consolidarão o projeto atual, mas também abrirão caminho para novas iniciativas da equipe, da disciplina de ergonomia e do curso de Engenharia Aeroespacial da Universidade de Brasília. O simulador desenvolvido representa um ponto de partida promissor, importante para várias camadas da aviação, do mercado aeroespacial e da comunidade acadêmica da Universidade de Brasília.

# Referências

- ABERGO. O que é ergonomia. <https://www.abergo.org.br/o-que-é-ergonomia>, 2024. Citado na página 23.
- ANAC. Programa asas para todos é foco em evento dedicado à representação feminina no setor aéreo. *Portal Gov.br*. Acesso em 10/07/2024 <<https://www.gov.br/anac/pt-br/noticias/2024/programa-asas-para-todos-e-foco-em-evento-dedicado-a-representacao-feminina-no-setor-aereo>>, 2024. Citado na página 28.
- BALAGO, R. Governo lançará programa para ampliar número de mulheres que pilotam aviões. *Revista Exame*. Acesso em 16/08/2024 <<https://exame.com/brasil/governo-lancara-programa-para-ampliar-numero-de-mulheres-que-pilotam-avioes/>>, 2023. Citado na página 28.
- BARROS, H. L. de. Santos dumont e a invenção do avião. *Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas*, 2006. Citado na página 19.
- BRAATZ, D. *ENGENHARIA DO TRABALHO Saúde, Segurança, Ergonomia e Projeto*. [S.l.]: Ex-Libris Comunicação Integrada, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.
- CATIA DOCUMENTATION. Human activity analysis in a nutshell. *Documentação do CATIA*, Acesso 09/07/2024 <[http://catiadoc.free.fr/online/CATIAfr\\_C2/haaugCATIAfrs.htm](http://catiadoc.free.fr/online/CATIAfr_C2/haaugCATIAfrs.htm)>, 2009. Citado na página 30.
- CNS. Resolução número 510, de 7 de abril de 2016. *Diário Oficial da União*, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 66 e 67.
- CUNHA FILHO, C. F. da. Melhoria no desenvolvimento do cockpit de uma aeronave tipo planador utilizando parâmetros ergonômicos. *ABERGO 2022*, 2022. Citado 8 vezes nas páginas 9, 45, 46, 47, 48, 54, 55 e 61.
- CUNHA FILHO, C. F. da. Desenvolvimento, validação e construção de um mock-up simplificado para simulador de voo. *29 CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNB E 20 DO DF*, 2023. Citado 8 vezes nas páginas 19, 30, 43, 45, 48, 64, 65 e 66.
- CUNHA FILHO, C. F. da. Desenvolvimento e validação de um simulador de voo para aeronave experimental. *30 CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNB E 21 DO DF*, 2024. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 48.
- DEPARTMENT OF DEFENSE. *MILITARY STANDARD AIRCREW STATION GEOMETRY FOR MILITARY AIRCRAFT*. [S.l.], 1976. Citado 3 vezes nas páginas 29, 30 e 59.
- DREYFUSS, H. *As Medidas do Homem e da Mulher*. [S.l.]: Bookman, 2005. Citado 4 vezes nas páginas 25, 26, 27 e 28.
- FAB. Força aérea brasileira acesso 05/06/2024. In: *FAB inaugura novo sistema de simulador de voo para instrução dos Cadetes Aviadores*. [S.l.: s.n.], 2020. Citado na página 38.

FAB. Embraer e cae inauguram em singapura o primeiro simulador de voo completo do e2 na região Ásia-pacífico. *Força Aérea Brasileira* Acesso 05/06/2024 <<https://forcaaerea.com.br/embraer-e-cae-inauguram-em-singapura-o-primeiro-simulador-de-voo-completo-do-e2-na-regiao-asia-pacifico/>>, 2024. Citado na página 38.

FREITAS, E. A.-A. de. Ergonomia aplicada a projeto de bancada de simulação de aeronave tipo planador. *Universidade de Brasília- UnB*, 2021. Citado 10 vezes nas páginas 28, 31, 36, 38, 45, 46, 48, 52, 53 e 134.

GLOBO. Embraer inaugura simulador de voo para avião cargueiro c-390; veja foto. *Acesso* 05/06/2024 <<https://g1.globo.com/sp/vale-do-paraiba-regiao/noticia/2023/06/15/embraer-inaugura-simulador-de-voo-para-aviao-cargueiro-c-390-veja-foto.ghml>>, 2023. Citado na página 38.

GREINER, M. Dilemma resolved: Airbrakes tamed. *Institute of Aerodynamics and Gas Dynamics University of Stuttgart, Stuttgart, Germany*, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 42.

HORN, F. J. Development of a low-cost, multi-disciplinary rotorcraft simulation facility. *Journal of Aerospace Computing, Information and Communication*, 2005. Citado na página 35.

IIDA, I. *Ergonomia: projeto e produção*. 3. ed. [S.l.]: Edgard Blücher Ltda, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 23, 24 e 25.

JMARCOS VIEIRA. Manche e manetes logitech g945 saitek pro flight // unboxing, review e teste (em português). *Acesso* 05/06/2024 <<https://www.youtube.com/watch?v=xSMWa0cGqbw>>, 2020. Citado na página 36.

LEO BODNAR ELECTRONICS. Bu0836x 12-bit joystick interface. *Acesso* 09/09/2024 <[https://www.leobodnar.com/shop/index.php?main\\_page=product\\_info&products\\_id=180](https://www.leobodnar.com/shop/index.php?main_page=product_info&products_id=180)>, 2024. Citado na página 72.

MAC BARE COCKPITS. Mac-desktop seat - cockpit - macbare. <https://www.macbarecockpits.com.br/mac-desktop-seat-basico>, 2025. Citado na página 37.

MARTINS, P. C. O. *Mecânica do voo, Familiarização Aeronáutica e controle de voo, notas de aula*. [S.l.], 2024. Citado na página 40.

MCATAMNEU, L. Rula: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. *Applied Ergonomics*, 1993. Citado 5 vezes nas páginas 30, 31, 32, 33 e 34.

MCPHEE, B. J. Work-related musculoskeletal disorders of the neck and upper extremities in workers engaged in light, highly repetitive work. *Osterholz, U, Karma, us, W, Huliman, B and Ritz, B (eds) Proc Int Syrup Workrelated Musculoskeletal Disorder*, 1987. Citado na página 31.

MIRANDA, M. R. *DESENVOLVIMENTO DE BANCADA PARA SIMULAÇÃO VEICULAR INTEGRANDO REALIDADE VIRTUAL E MEDIÇÃO DE DADOS FISIOLÓGICOS*. Tese (Doutorado) — Faculdade de tecnologia, departamento de engenharia mecânica, 2014. Citado 4 vezes nas páginas 23, 24, 25 e 43.

MIRANDA, M. R. *Ergonomia, notas de aula*. [S.l.], 2017. Citado 3 vezes nas páginas 23, 26 e 29.

NR17 - Norma Regulamentadora nº 17. [S.l.], 1978. Citado na página 26.

OLIVEIRA, R. M. de. Desenvolvimento de um simulador de voo em 6 graus de liberdade para aeronaves rígidas :. *Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia*, 2022. Citado na página 35.

PLUS, E. A step-by-step guide: Rapid upper limb assessment (rula). *Ergonomics Plus Inc*, 2021, Acesso em 15/07/2024 <<https://ergo-plus.com/wp-content/uploads/RULA-A-Step-by-Step-Guide1.pdf>>, 2021. Citado na página 35.

PODER AEREO. Saab e varjo trazem realidade virtual para simuladores de voo do caça saab gripen e/f. *Poder Aereo*, Acesso em 15/08/2024 <<https://www.aereo.jor.br/2021/06/08/saab-e-varjo-trazem-realidade-virtual-para-simuladores-de-voo-do-caca-saab-gripen-e-f/>>, 2021. Citado na página 44.

PORTER, M. *An introduction to Modern Vehicle Design*. [S.l.]: Julian Happian-Smith, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 43.

READ, G. J. M. A sociotechnical design toolkit for bridging the gap between systems-based analyses and system design. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing Service Industries (HFEMSI)*, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 27.

ROEBUCK, J. A. Anthropometric methods: Designing to fit the human body. *Human Factors and Ergonomics Society*, 1995. Citado na página 24.

ROLFE, J. M. *Flight Simulator*. 1. ed. [S.l.]: Cambrige, Press Syndicate of the University of Cambrige, 1986. Citado na página 35.

SAE, A. *Flight Deck Layout and Facilities*. [S.l.], 2003. Citado na página 28.

STEFAN LANGER. Testing 1895\$ glider sim pro | just soaring. Acesso 09/09/2024 <https://www.youtube.com/watch?v=cLjZnJkyWyst=654s>, 2021. Citado na página 70.

STUDENT PILOT MANUAL. Gliding the basics - lesson 9 - the airbrakes. acesso 15/08/2024 <<https://www.gliding.world/index.php/gliding-the-basics/4-10-airbrakes>>. *Student Pilot Manual*, 2023. Citado 3 vezes nas páginas 9, 41 e 42.

WISNER, A. *Por dentro do Trabalho. Ergonomia: método e técnica*. 1. ed. [S.l.]: FTD, 1987. Citado na página 23.

# APÊNDICE A – Questionário Subjetivo de Avaliação do Mockup

## Objetivos

Este questionário tem por objetivo avaliar as condições de usabilidade de um cockpit de uma aeronave do tipo planador no que se refere à ergonomia, através de avaliações subjetivas dos entrevistados, acerca de desconfortos, facilidade ou dificuldade de utilização de algum sistema ou comando da aeronave.

### A.0.1 Questionário Pós-Pilotagem

Duração da Simulação : \_\_\_\_\_

Houve ajuste das posições do assento para as suas medidas? : \_\_\_\_\_

De 0 a 5 classifique o alcance dos seguintes componentes, sendo:

0- Muito ruim

1- Ruim

2- Aceitável

3- Bom

4- Muito bom

5- Excelente

| Alcance | Nota 0 | Nota 1 | Nota 2 | Nota 3 | Nota 4 | Nota 5 |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Assento |        |        |        |        |        |        |
| Manche  |        |        |        |        |        |        |
| Pedais  |        |        |        |        |        |        |
| Flape   |        |        |        |        |        |        |

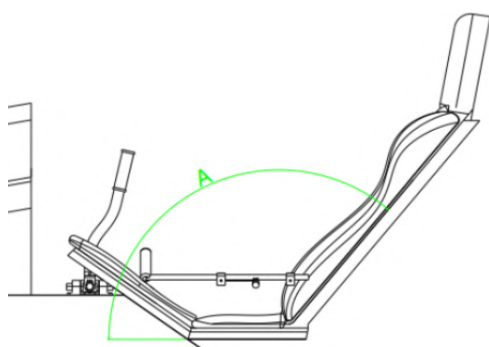
Ainda na mesma escala de 0 a 5 classifique a altura dos seguintes componentes, sendo:

| Altura  | Nota 0 | Nota 1 | Nota 2 | Nota 3 | Nota 4 | Nota 5 |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Assento |        |        |        |        |        |        |
| Manche  |        |        |        |        |        |        |
| Pedais  |        |        |        |        |        |        |
| Flape   |        |        |        |        |        |        |

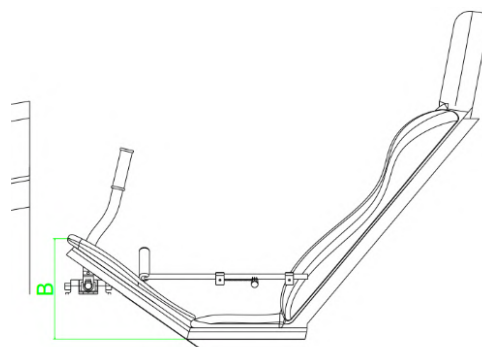
De 1 a 5, classifique o nível de dificuldade de **ENTRAR** no simulador, sendo 1 **muito fácil** e 5 **muito difícil** : \_\_\_\_\_

De 1 a 5, classifique o nível de dificuldade de **SAIR** no simulador, sendo 1 **muito fácil** e 5 **muito difícil** : \_\_\_\_\_

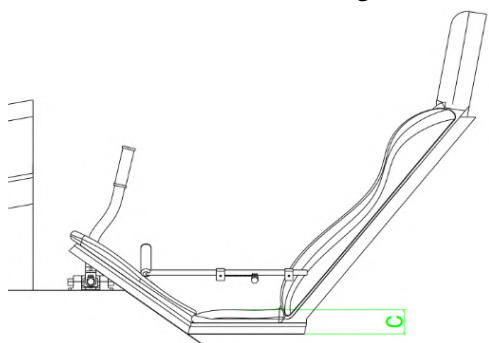
Em relação às medidas do banco, observando como base as medidas abaixo, com as figuras de cada local no assento, as medidas devem ser **MAIORES**, **ME-NORES**, ou deve ser **IGUAL** às medidas atuais?:



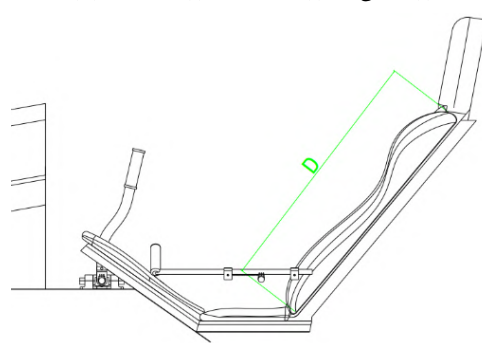
(a) Maior( ); Menor( ); Igual( )



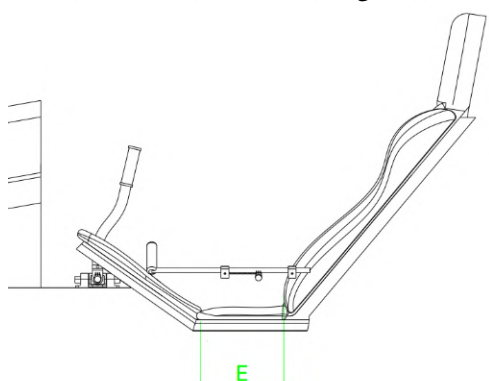
(b) Maior( ); Menor( ); Igual( )



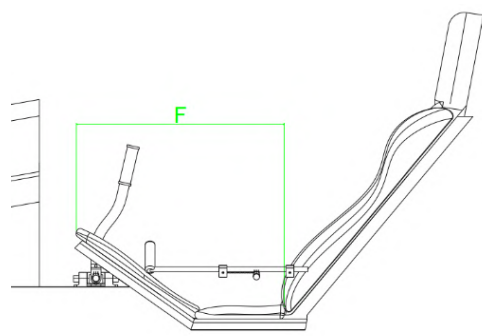
(c) Maior( ); Menor( ); Igual( )



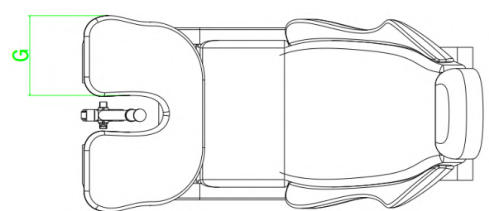
(d) Maior( ); Menor( ); Igual( )



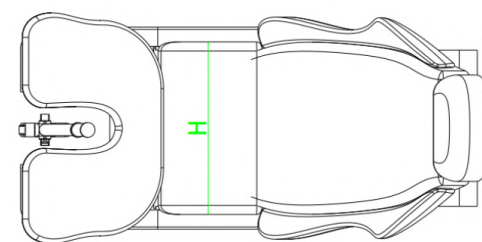
(e) Maior( ); Menor( ); Igual( )



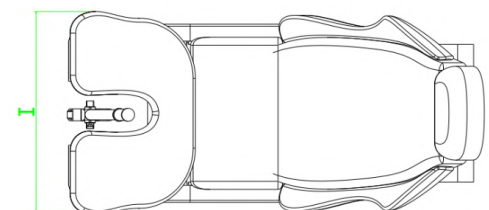
(f) Maior( ); Menor( ); Igual( )



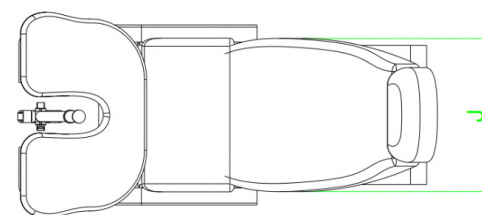
(g) Maior( ); Menor( ); Igual( )



(h) Maior( ); Menor( ); Igual( )



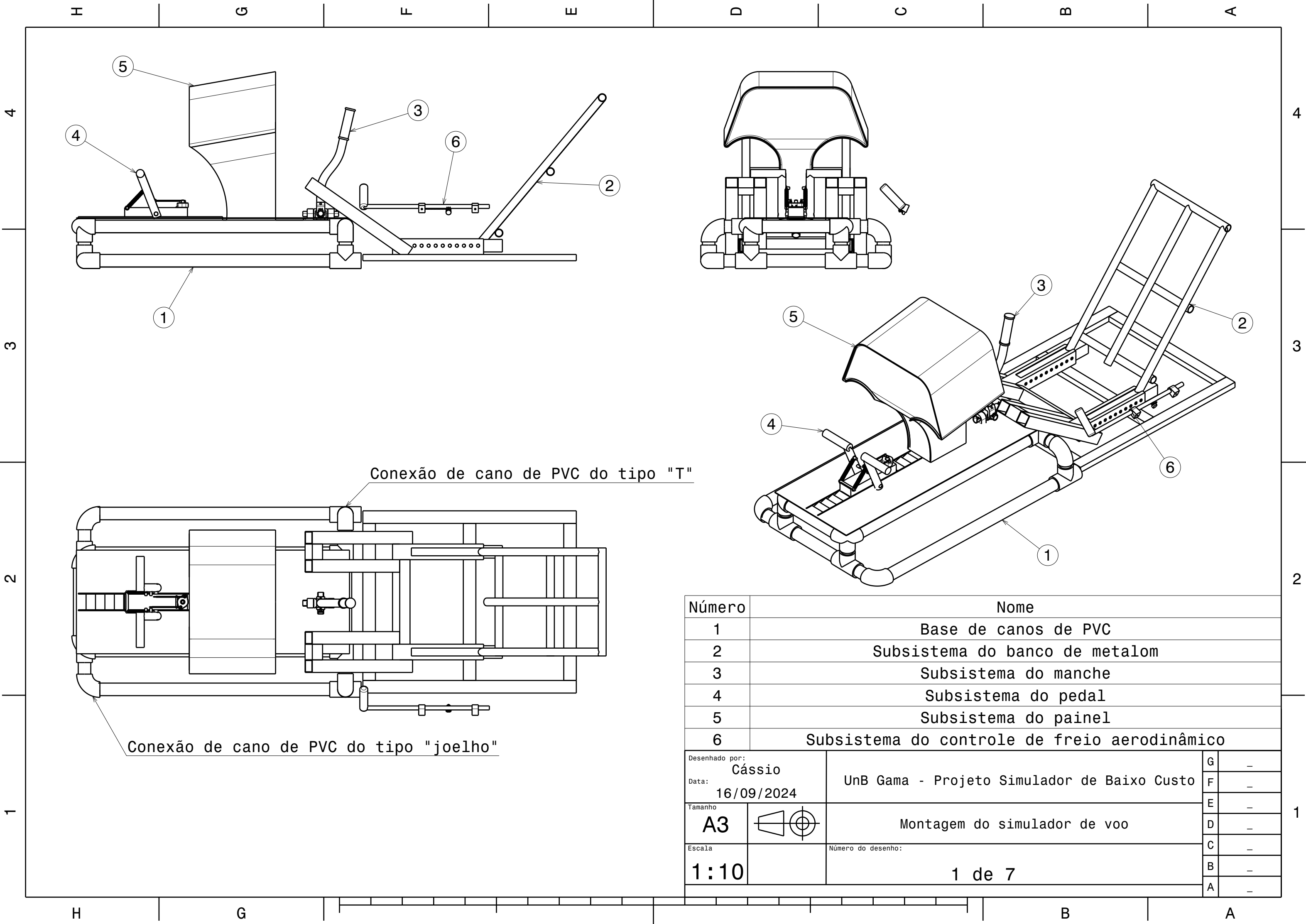
(i) Maior( ); Menor( ); Igual( )

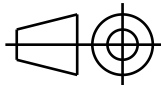


(j) Maior( ); Menor( ); Igual( )



## APÊNDICE B – Desenhos técnicos da etapa de *mockup*



| Número                   |  | Nome                                                                                  |  |   |   |
|--------------------------|--|---------------------------------------------------------------------------------------|--|---|---|
| 1                        |  | Base de canos de PVC                                                                  |  |   |   |
| 2                        |  | Subsistema do banco de metalom                                                        |  |   |   |
| 3                        |  | Subsistema do manche                                                                  |  |   |   |
| 4                        |  | Subsistema do pedal                                                                   |  |   |   |
| 5                        |  | Subsistema do painel                                                                  |  |   |   |
| 6                        |  | Subsistema do controle de freio aerodinâmico                                          |  |   |   |
| Desenhado por:<br>Cássio |  | UnB Gama - Projeto Simulador de Baixo Custo                                           |  | G | — |
| Data:<br>16/09/2024      |  |                                                                                       |  | F | — |
| Tamanho<br>A3            |  |  |  | E | — |
|                          |  |                                                                                       |  | D | — |
| Escala<br>1:10           |  | Número do desenho:<br><br>1 de 7                                                      |  | C | — |
|                          |  |                                                                                       |  | B | — |
|                          |  |                                                                                       |  | A | — |

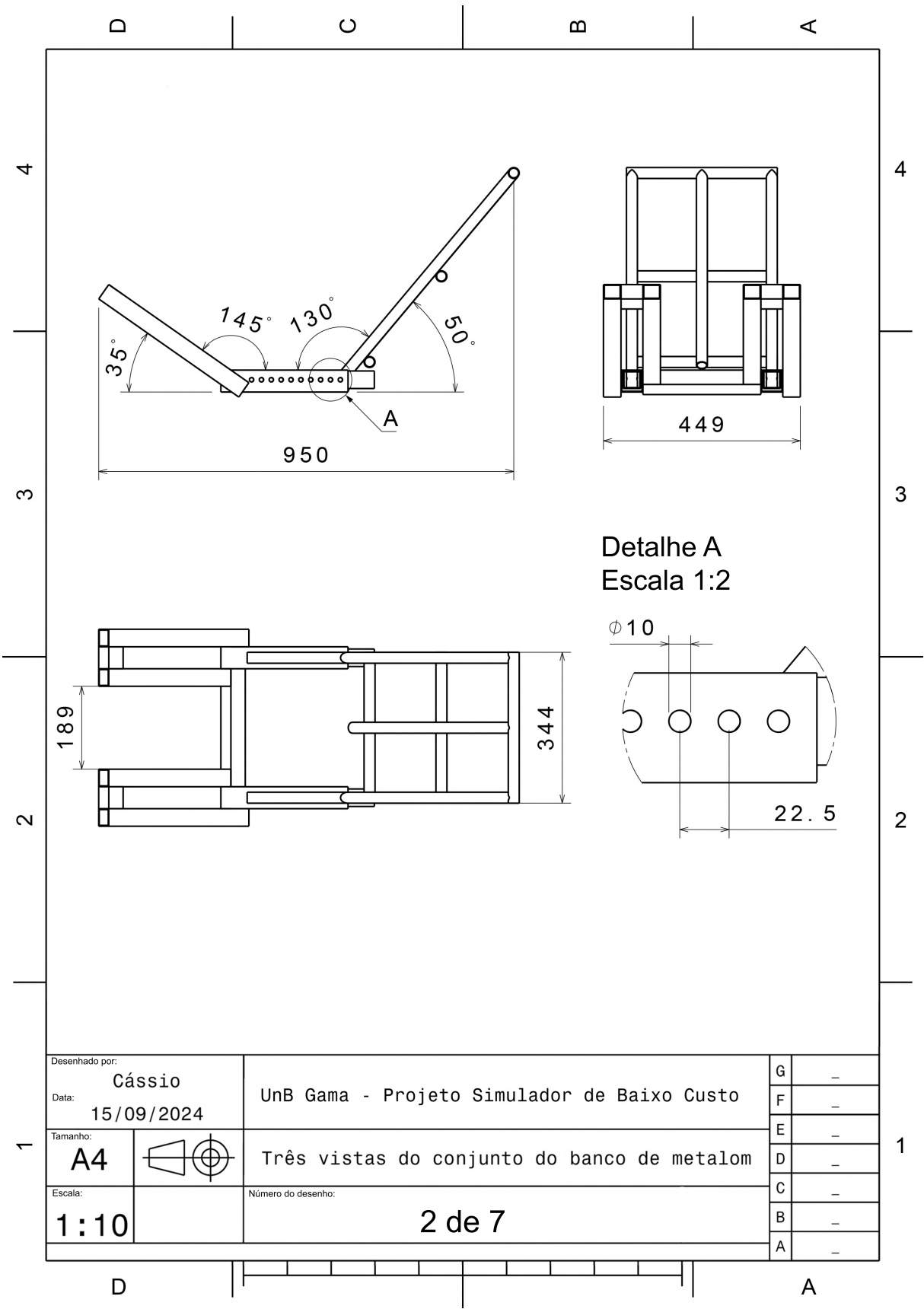


Figura 84 – Planta de três vistas do banco de metalom, fonte: autor.

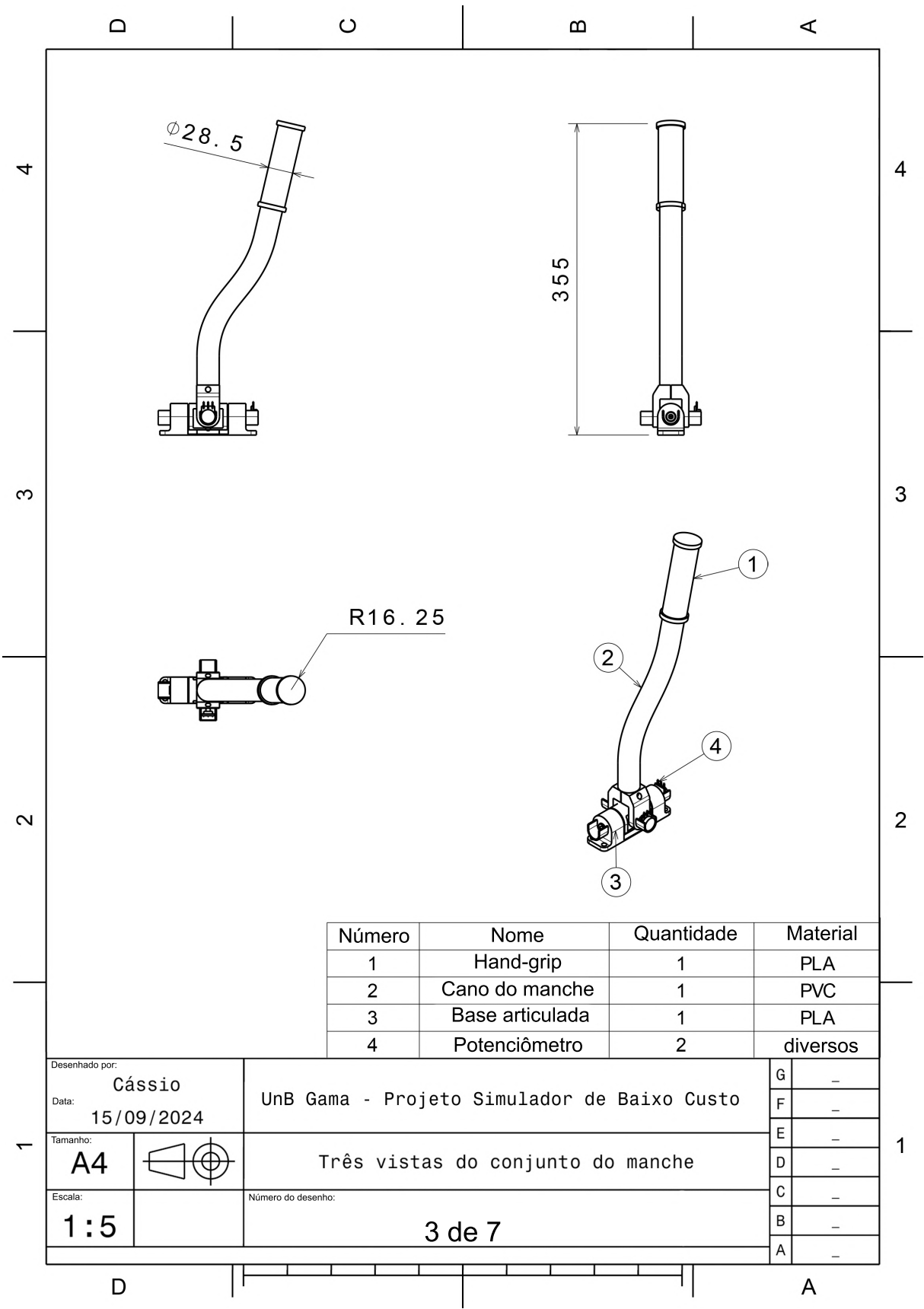


Figura 85 – Planta de três vistas do conjunto do manche, fonte: autor.

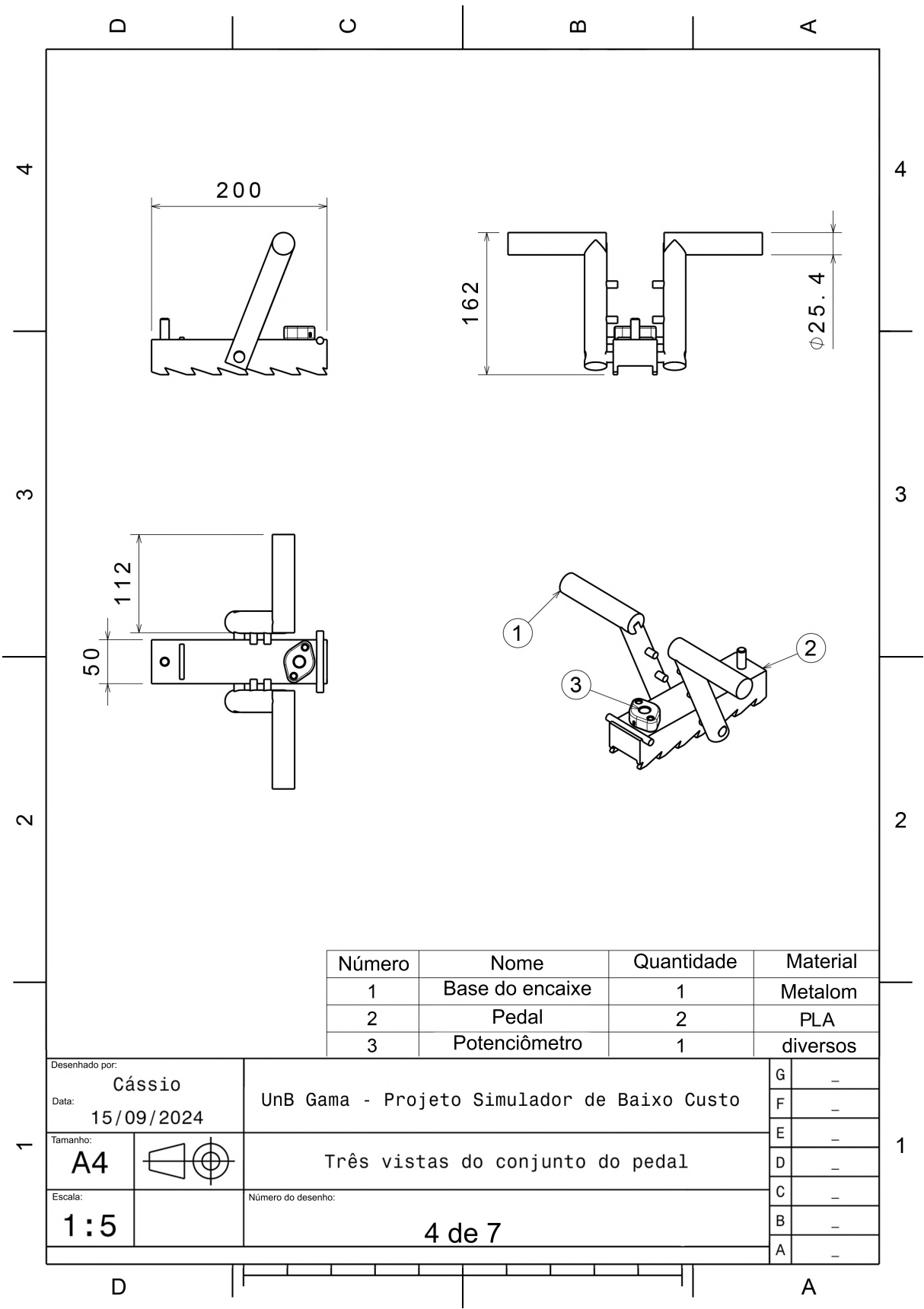


Figura 86 – Planta de três vistas do conjunto do pedal, fonte: autor.

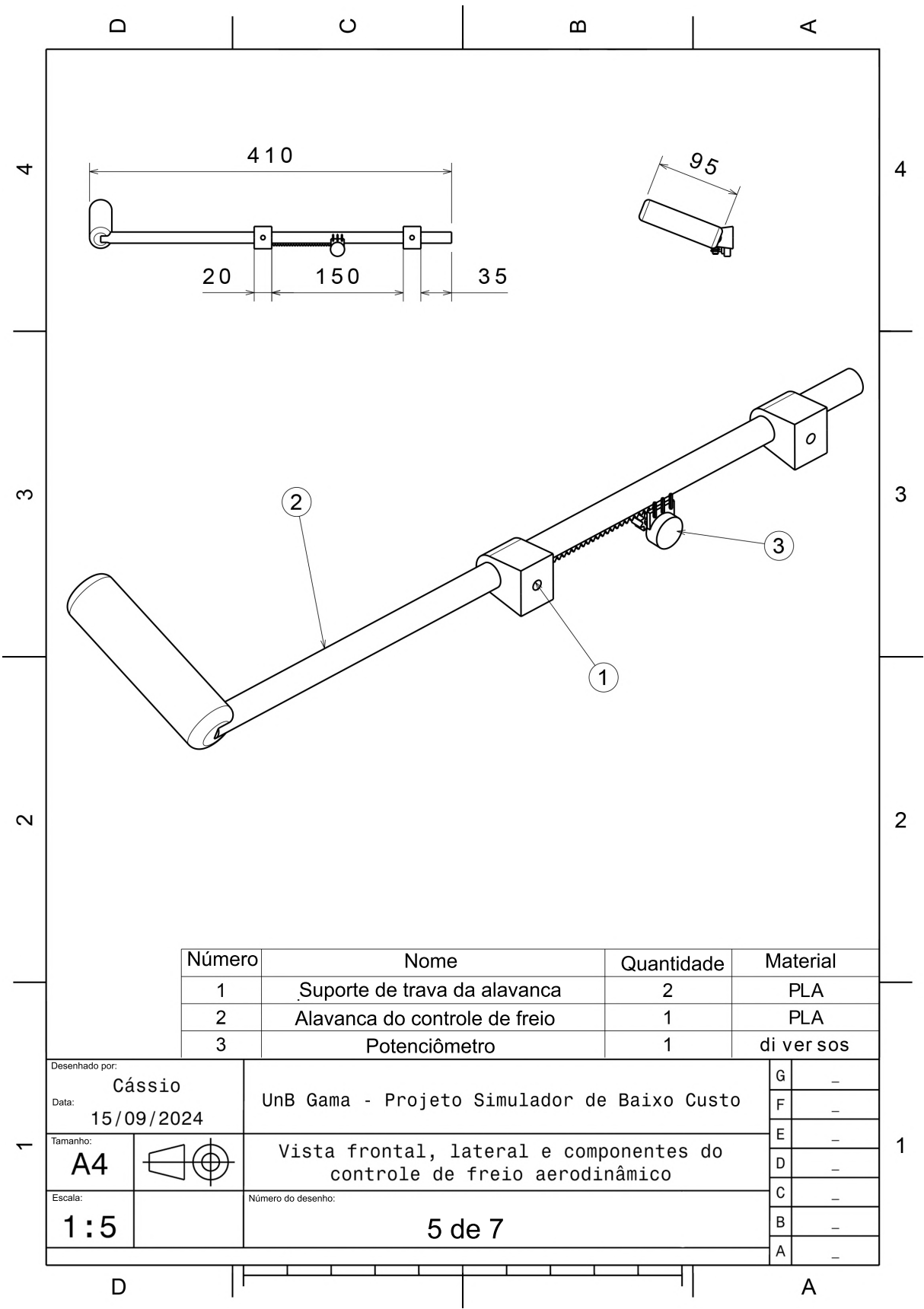


Figura 87 – Planta da vista isométrica da operação do freio aerodinâmico. fonte: autor.

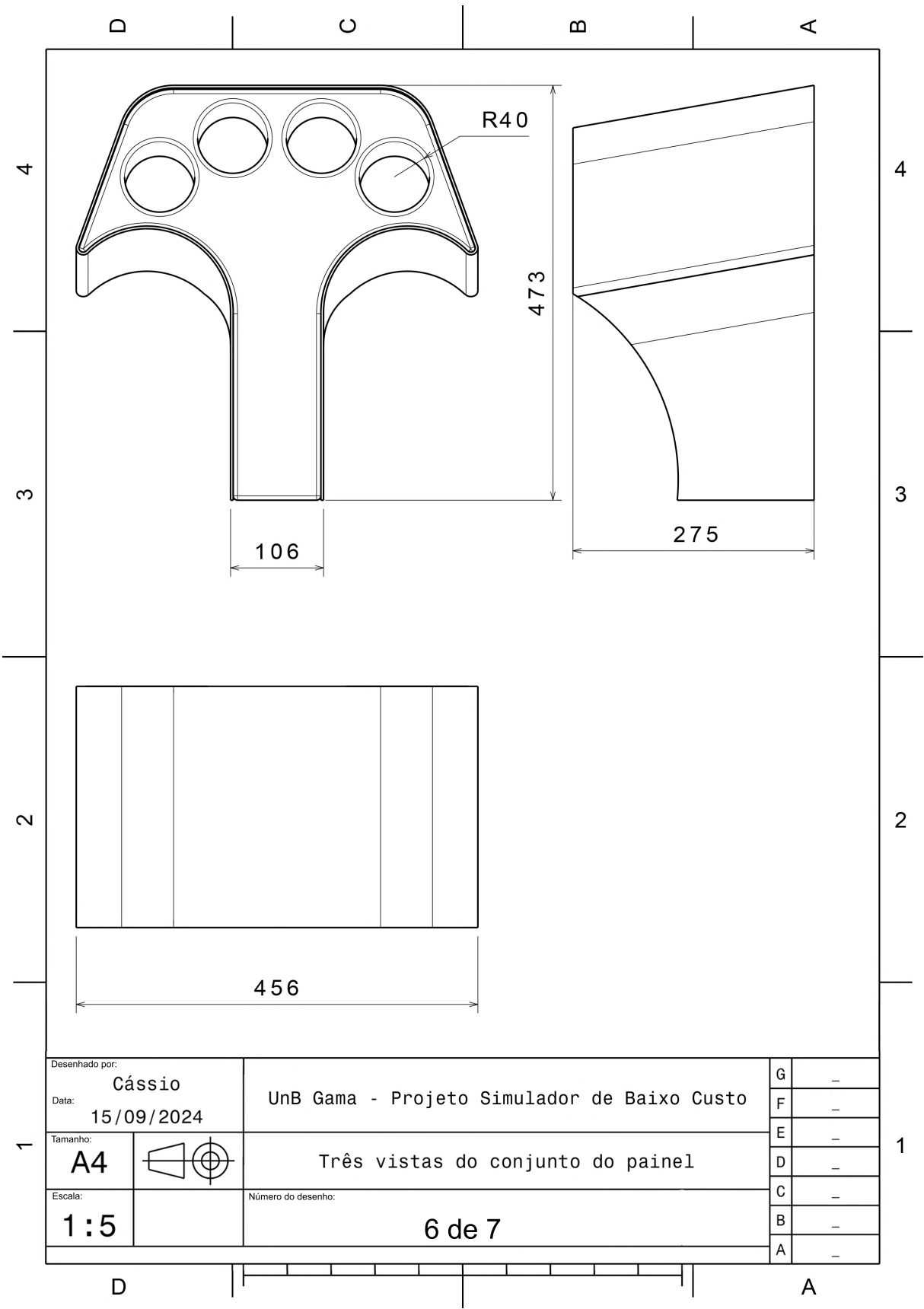


Figura 88 – Planta de três vistas do controle de freio aerodinâmico, fonte: autor.

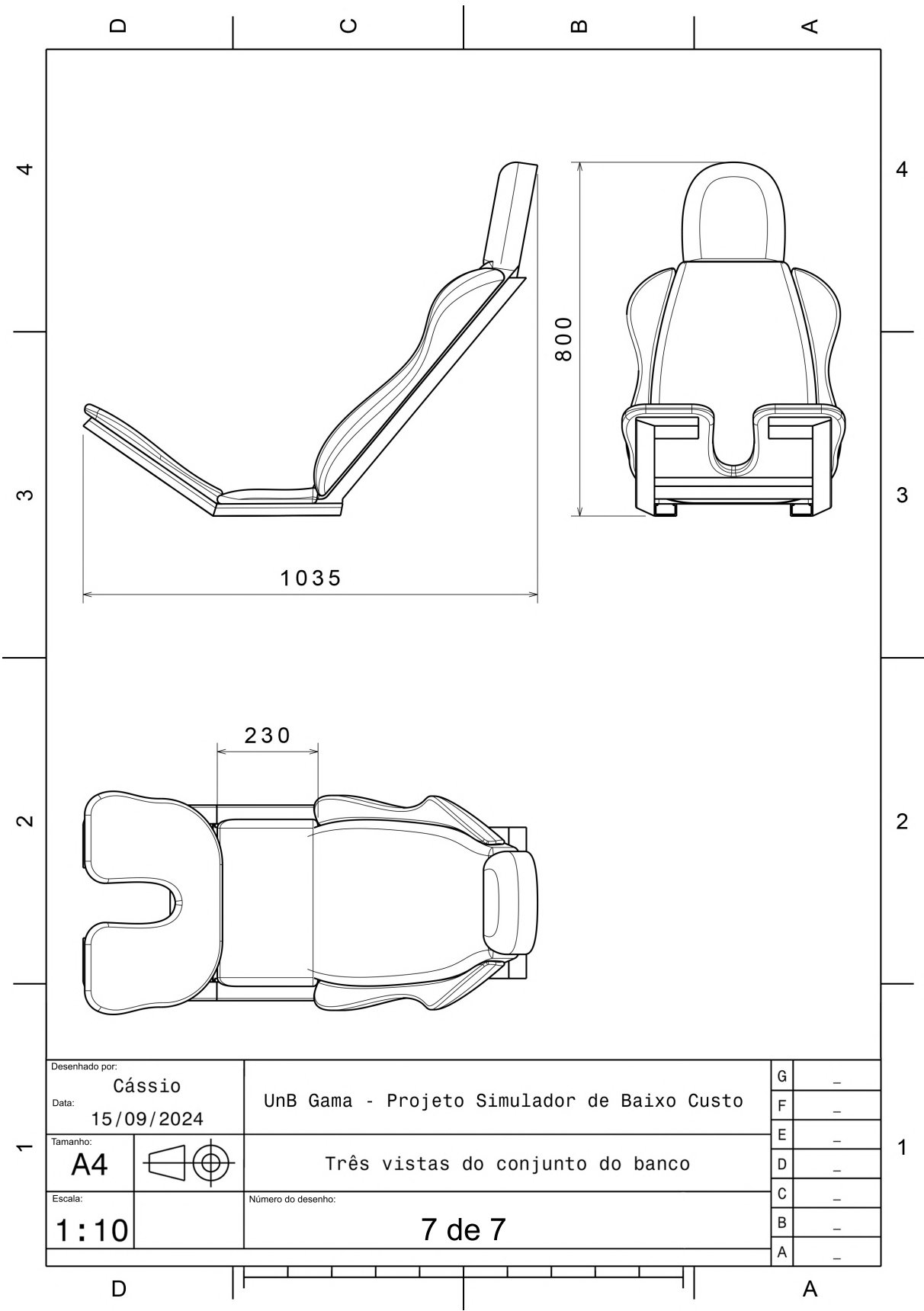
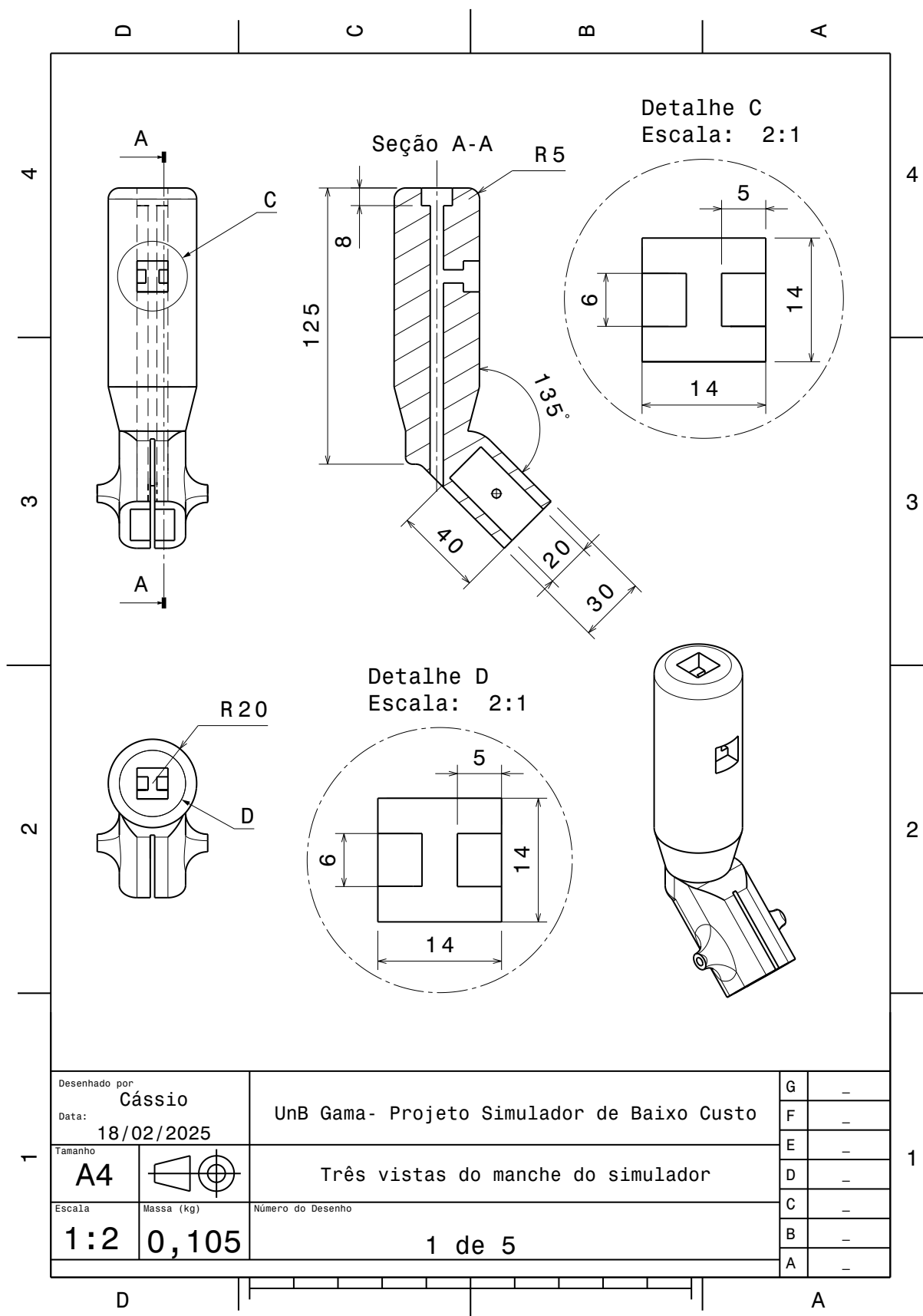


Figura 89 – Planta de três vistas do banco, fonte: autor.

## APÊNDICE C – Desenhos técnicos do simulador final



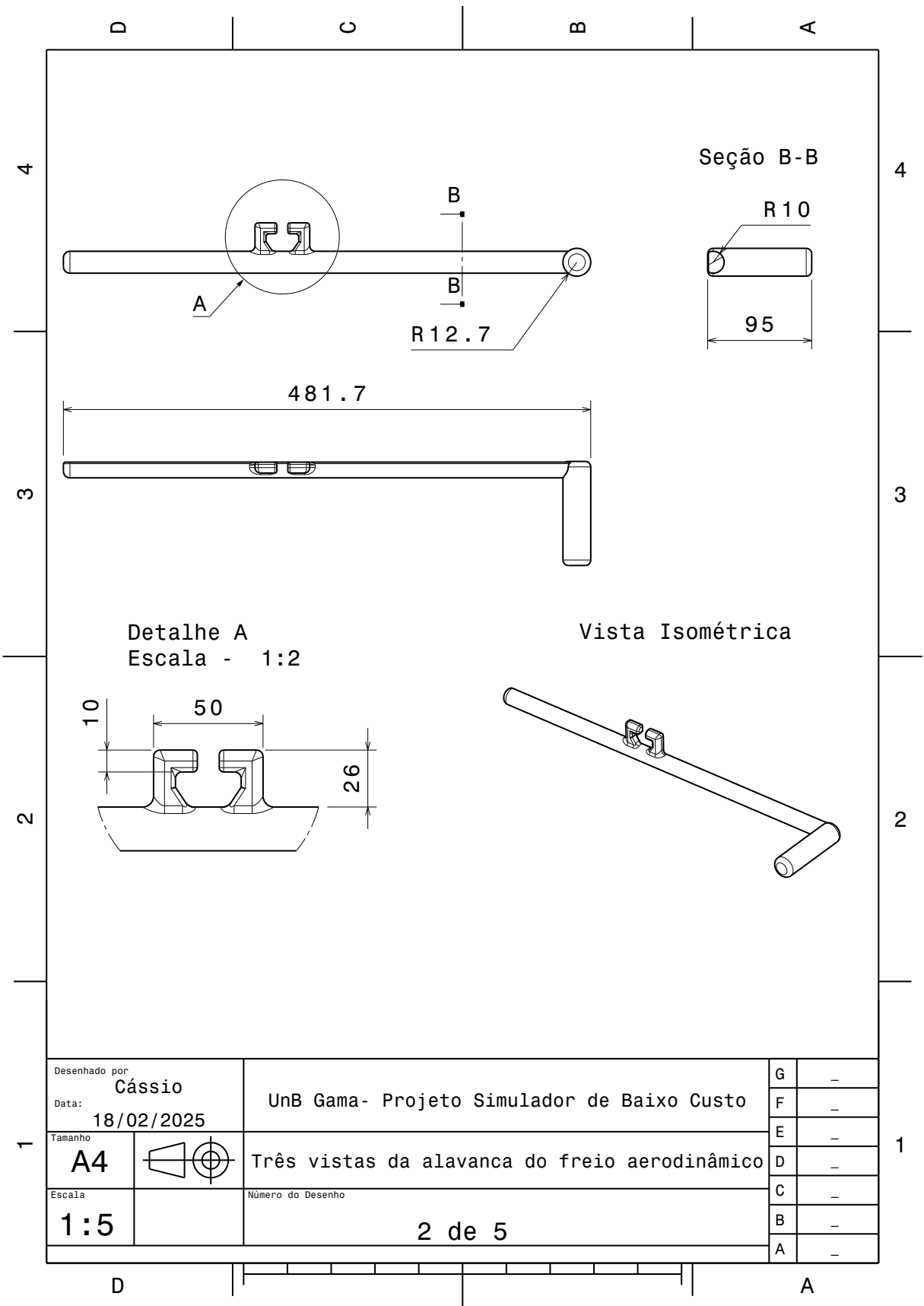


Figura 91 – Planta de Três vistas da alavanca do freio aerodinâmico. fonte: autor.

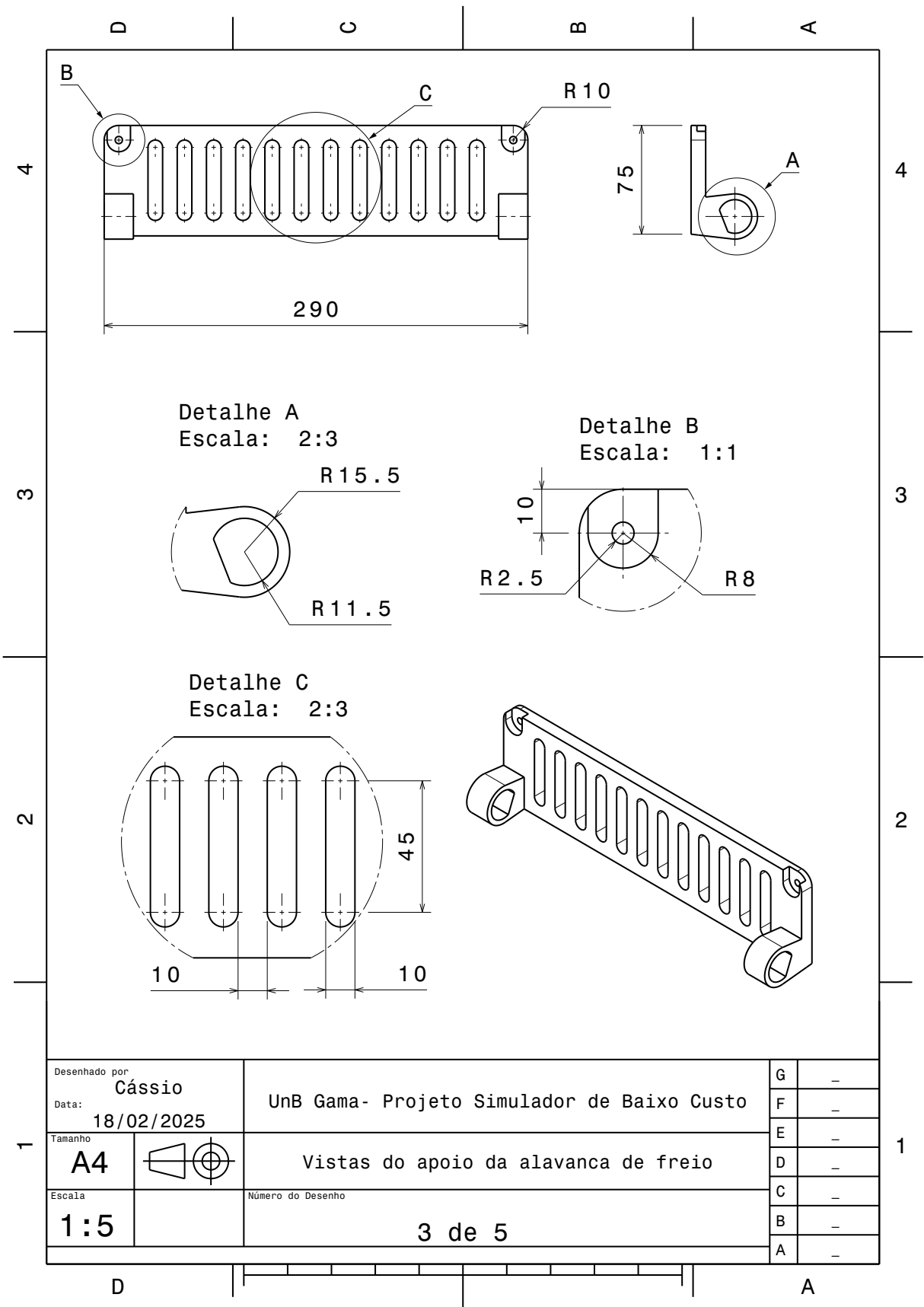


Figura 92 – Vistas do apoio da alavanca de freio. fonte: autor.

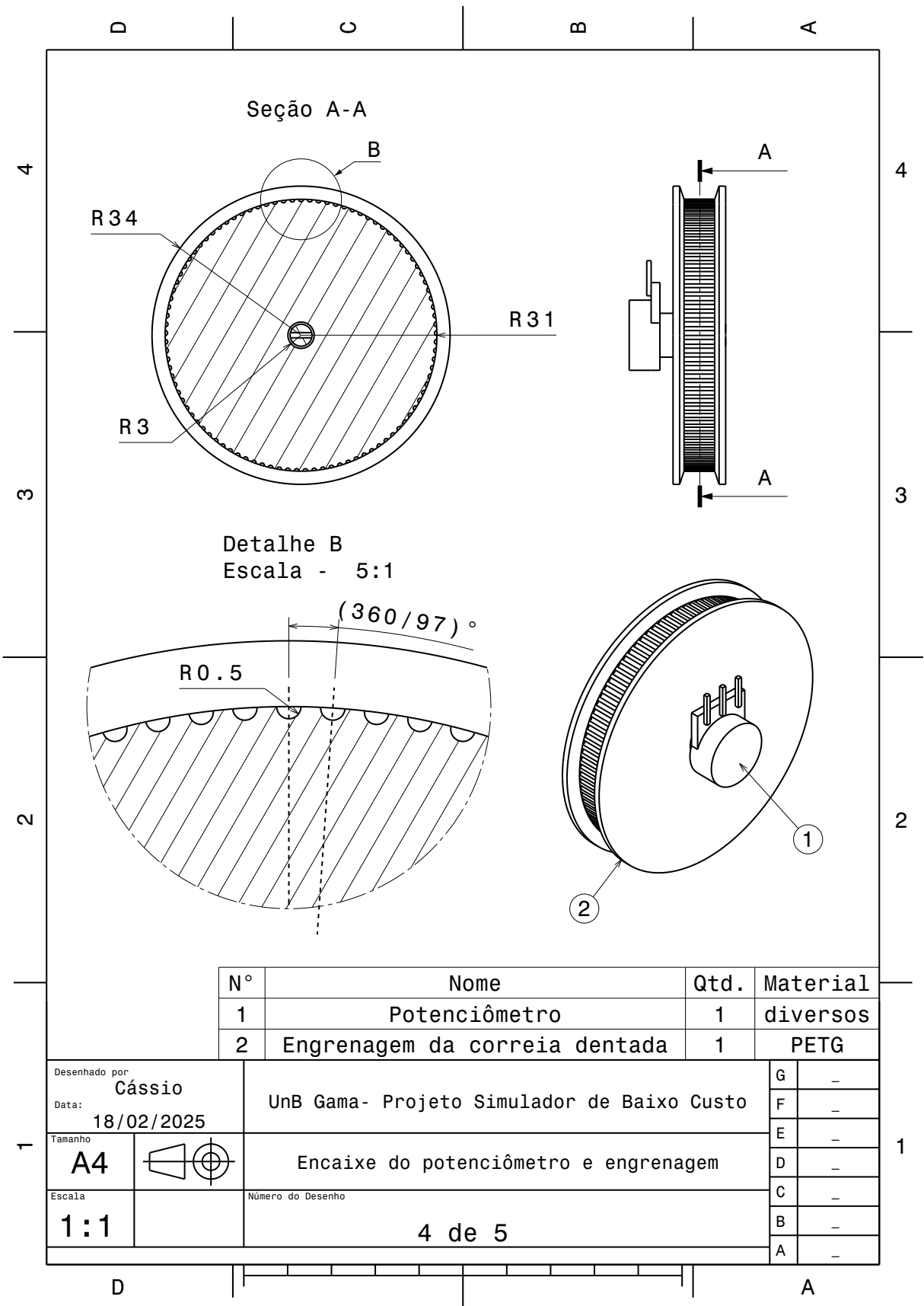
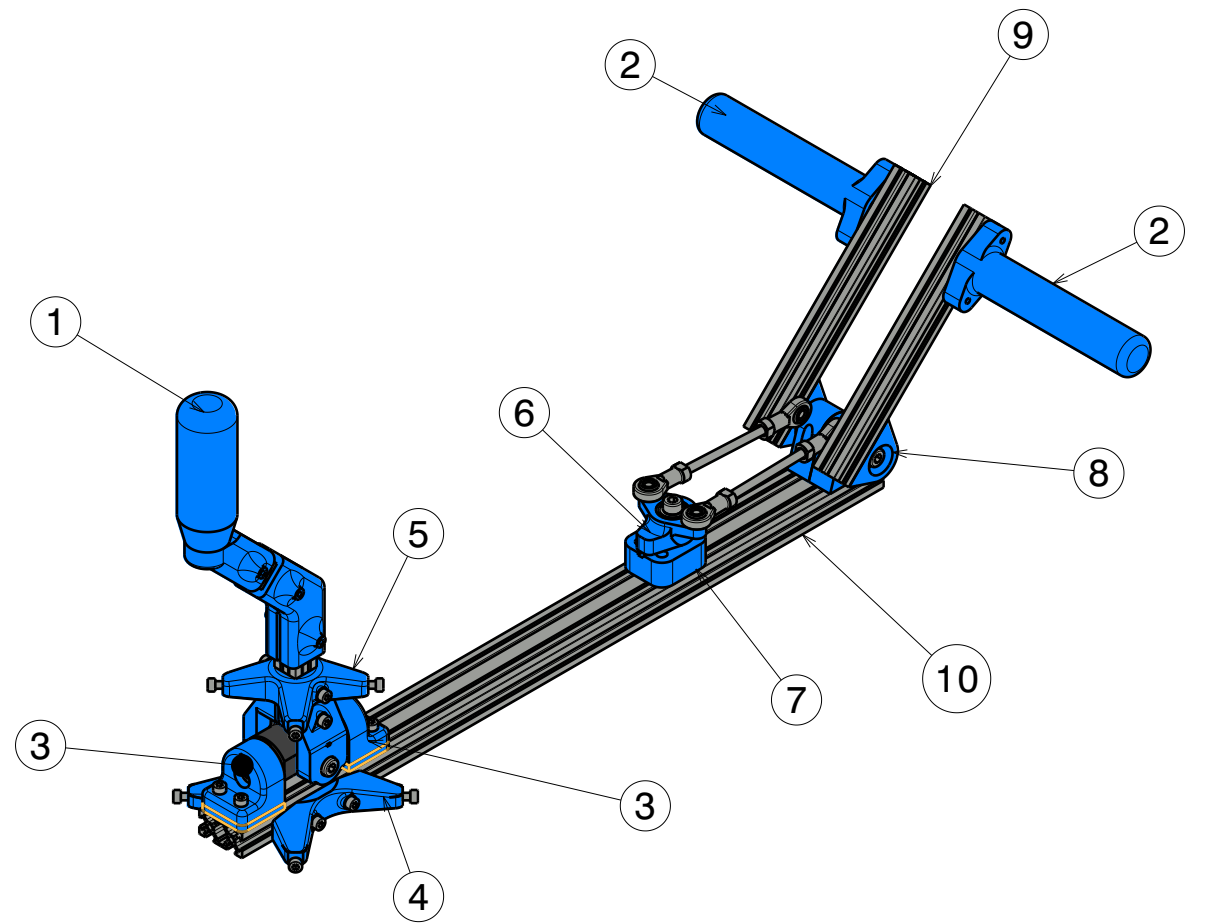
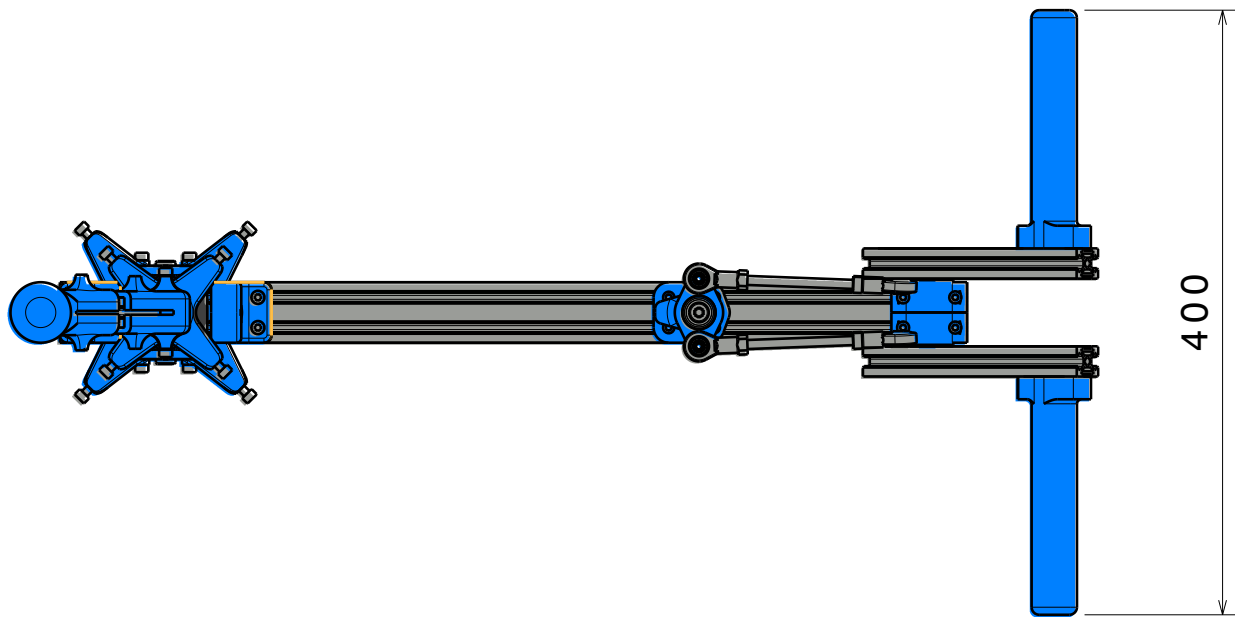
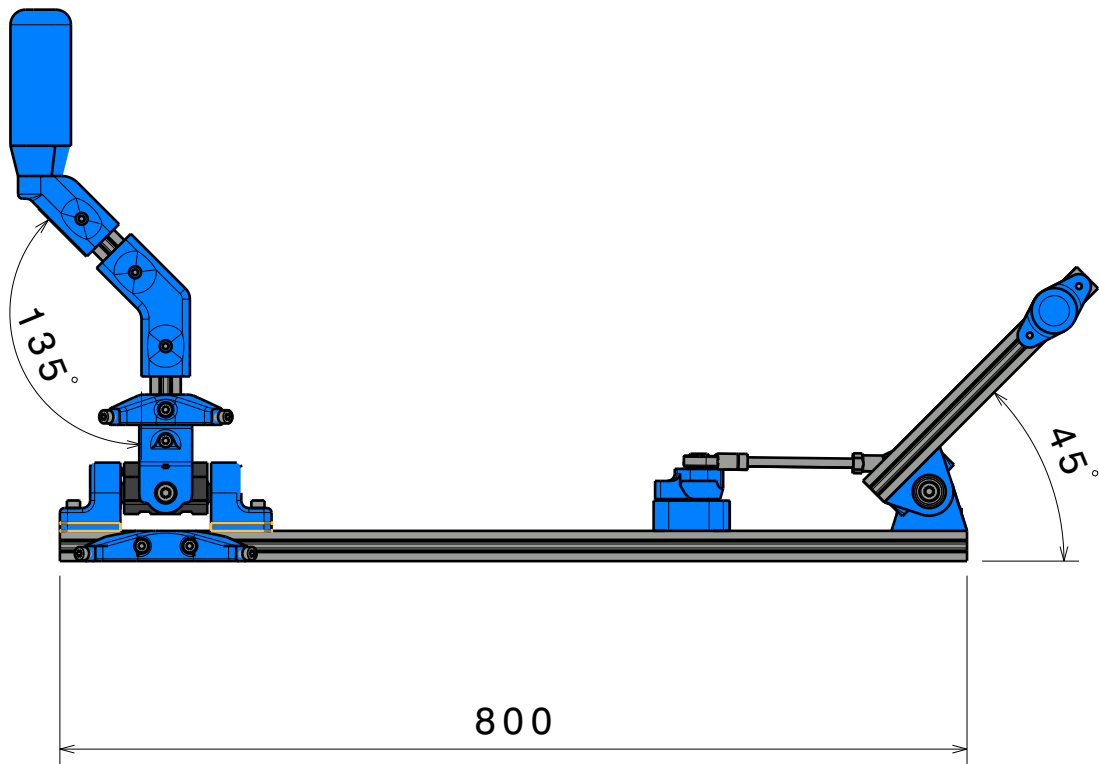
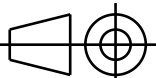


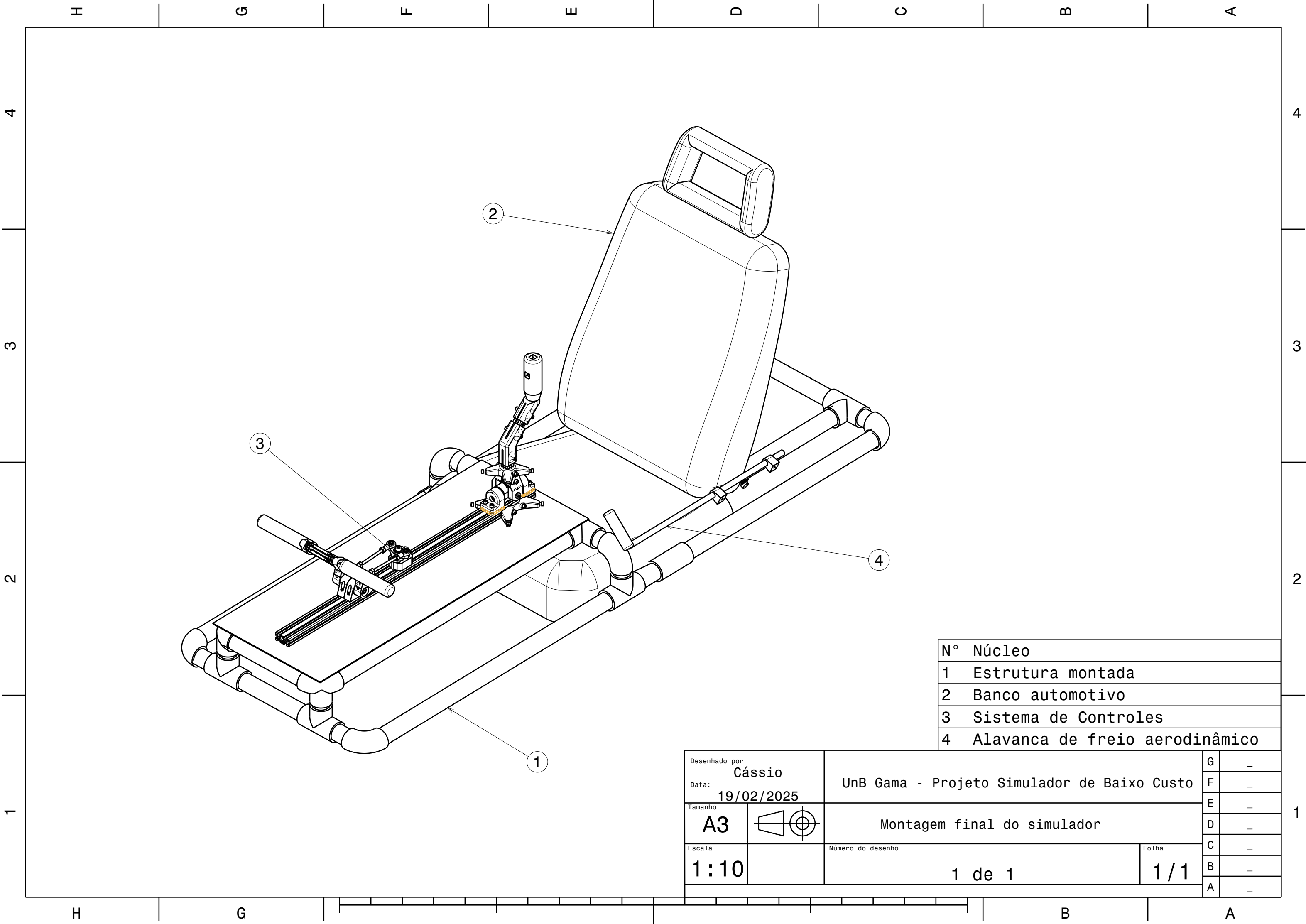
Figura 93 – Encaixe do potenciômetro e engrenagem. fonte: autor.



| N° | Nome                         | Qtd. | Material                |
|----|------------------------------|------|-------------------------|
| 1  | Manche                       | 1    | PETG                    |
| 2  | Pedal                        | 2    | PETG                    |
| 3  | Mancal                       | 2    | PETG                    |
| 4  | Apoio da mola de base        | 2    | PETG                    |
| 5  | Apoio da mola superior       | 1    | PETG                    |
| 6  | Rotor do pedal               | 1    | PETG                    |
| 7  | Suporte do rotor do pedal    | 1    | PETG                    |
| 8  | Conexão do alumínio do pedal | 2    | PETG                    |
| 9  | Barra de alumínio 200mm      | 2    | Alumínio v-slot 20x20mm |
| 10 | Barra de alumínio 800mm      | 1    | Alumínio v-slot 20x40mm |

|                         |                                                                                       |                                              |                    |   |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------|---|
| Desenhado por<br>Cássio |                                                                                       | UnB Gama - Projeto Simulador de Baixo Custo  | G                  | — |
| Data:<br>19/02/2025     |                                                                                       |                                              | F                  | — |
| Tamanho<br>A3           |  | Montagem do sistema de controle do simulador | E                  | — |
|                         |                                                                                       |                                              | D                  | — |
|                         |                                                                                       |                                              | C                  | — |
|                         |                                                                                       |                                              | B                  | — |
|                         |                                                                                       |                                              | A                  | — |
| Escala<br>1 : 5         |                                                                                       | Número do desenho<br><br>5 de 5              | Folha<br><br>1 / 1 |   |

## APÊNDICE D – Montagem final do simulador



|    |                                |
|----|--------------------------------|
| N° | Núcleo                         |
| 1  | Estrutura montada              |
| 2  | Banco automotivo               |
| 3  | Sistema de Controles           |
| 4  | Alavanca de freio aerodinâmico |

|                                |                                                                                       |                                             |              |   |   |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------|---|---|
| Desenhado por<br><b>Cássio</b> |                                                                                       | UnB Gama - Projeto Simulador de Baixo Custo | G            | — |   |
| Data:<br><b>19/02/2025</b>     |                                                                                       |                                             | F            | — |   |
| Tamanho<br><b>A3</b>           |  | Montagem final do simulador                 | E            | — |   |
| Escala<br><b>1:10</b>          |                                                                                       |                                             | D            | — |   |
|                                |                                                                                       | Número do desenho                           | Folha        | C | — |
|                                |                                                                                       | <b>1 de 1</b>                               | <b>1 / 1</b> | B | — |
|                                |                                                                                       |                                             |              | A | — |

## APÊNDICE E – Manual de Montagem Estrutural

Este manual tem como objetivo fornecer um guia passo a passo para a montagem da estrutura do simulador de voo, detalhando cada etapa do processo de forma clara e acessível. A estrutura é um dos componentes fundamentais do projeto, responsável por suportar todos os demais sistemas e garantir a análise ergonômica. A Tabela 14 abaixo mostra os materiais necessários para a montagem estrutural.

Tabela 14 – Tabela de materiais necessários para a montagem estrutural

| Quantidade  | Item                              |
|-------------|-----------------------------------|
| 10m         | Tubo de esgoto 40mm               |
| 16 unidades | Conexão tipo "T" de 40mm          |
| 8 unidades  | Conexão tipo "Joelho" de 40mm     |
| 1 unidade   | Adesivo PVC                       |
| 1 unidade   | Placa de madeira 800x400x6mm      |
| 1 unidade   | Banco automotivo                  |
| 4 unidades  | Abraçadeira de aço para cano 40mm |
| 4 unidades  | Parafuso M4 com porcas            |
| 4 unidades  | Parafuso M8 de 50mm com porcas    |

A lista de ferramentas necessária para a montagem pode ser consultada abaixo:

### Ferramentas Necessárias:

- Furadeira;
- Broca 4mm de madeira;
- Broca 8mm de madeira;
- Lixa ferro para tubo PVC.
- Arco de serra manual com serra

### Passo 1: Corte e preparação dos tubos de PVC

Os tubos devem ser cortados utilizando o arco de serra manual conforme a seguinte lista da Tabela 15

Tabela 15 – Tabela de materiais necessários para a montagem estrutural

| Quantidade  | Comprimento | Cor de referência |
|-------------|-------------|-------------------|
| 8 unidades  | 770mm       | Azul              |
| 4 unidades  | 250mm       | Verde             |
| 6 unidades  | 200mm       | Vermelho          |
| 12 unidades | 120mm       | Amarelo           |

A Figura 96 Representa visualmente as cores dos canos relacionada a cada comprimento para facilitar sua identificação na etapa de montagem.

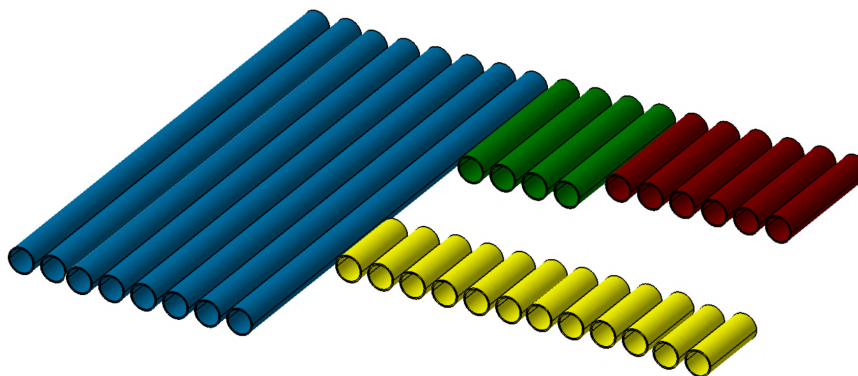


Figura 96 – Esquema de cores para os canos de PVC. fonte: autor

Após o corte, as pontas dos tubos devem ser lixadas para remover as rebarbas e facilitar sua junção pelas conexões.

### Passo 2: Montagem da parte frontal

A montagem da parte frontal deve ser realizada com base na Figura 97:

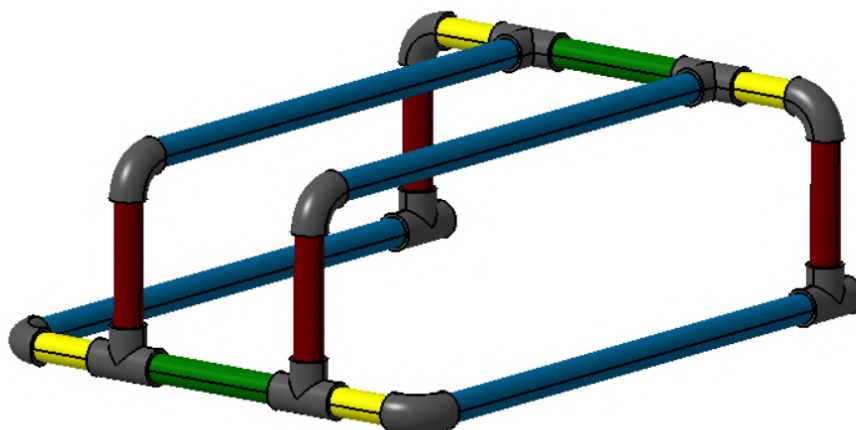


Figura 97 – Montagem frontal da estrutura do simulador. fonte: autor

Nessa etapa, são utilizadas quatro unidades do tubo azul (770 mm), quatro unidades do tubo vermelho (200 mm), quatro unidades do tubo amarelo (120 mm) e duas unidades do tubo verde (250 mm), além de 6 conexões do tipo "joeelho" e 6 conexões do tipo "T". **É importante que o adesivo PVC seja utilizado somente quando não houver mais alterações a serem realizadas na estrutura. Dessa forma, recomenda-se a montagem inicial e a conferência dos encaixes antes de proceder com a colagem.**

É importante que a conexão utilizada na parte traseira seja do tipo "T" e que uma de suas entradas fique direcionada para a parte traseira, onde fará a conexão com o restante da estrutura do simulador.

### **Passo 3: Furação e montagem da placa de madeira**

Para a fixação da placa de madeira na estrutura do simulador, deve-se realizar a furação da mesma. Recomenda-se a utilização de abraçadeiras de aço para a marcação do gabarito de furação na placa. Para tanto, posiciona-se a parte frontal da estrutura de ponta-cabeça sobre a placa de madeira (conforme representado na Figura 98) e realizam-se as marcações para a furação.

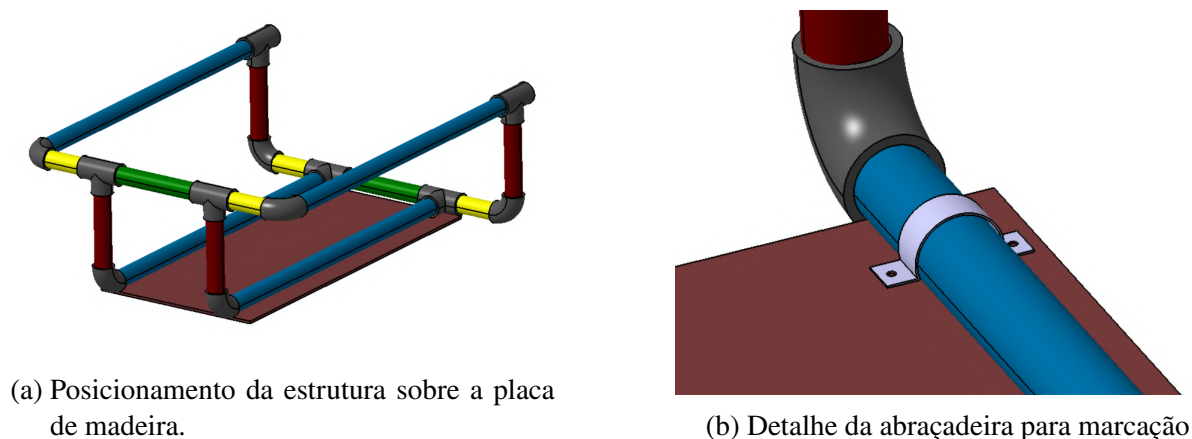


Figura 98 – Processo de marcação e furação da placa de madeira. fonte: autor.

Não há uma posição fixa ou exata para o posicionamento das abraçadeiras. Elas devem ser dispostas de maneira que garantam uma fixação firme e estável da estrutura à placa. Após a marcação e a furação, realizada com uma broca de 4 mm, utilizam-se parafusos M4 com porcas para a fixação definitiva. A Figura 99 ilustra o resultado final dessa etapa.

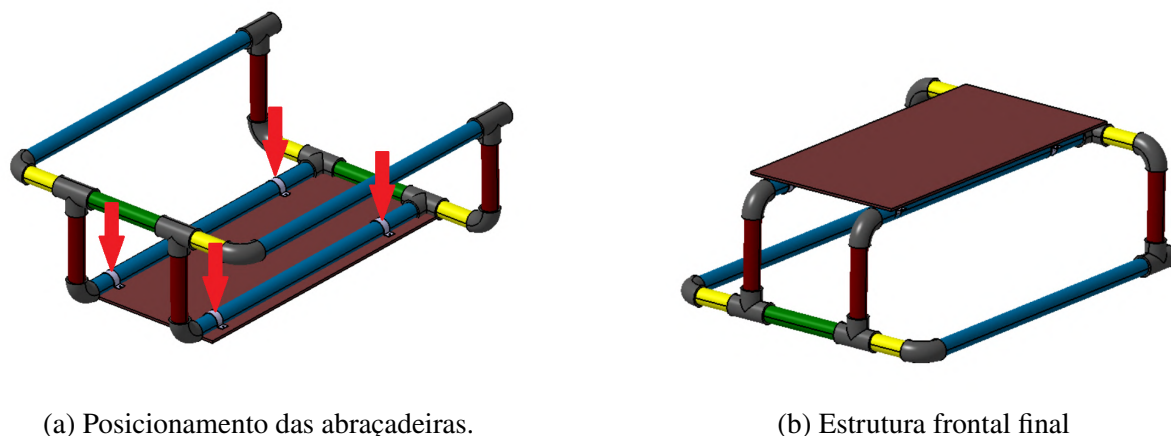


Figura 99 – Placa de madeira fixa na estrutura. fonte: autor.

#### **Passo 4: Montagem da estrutura de fixação do banco automotivo**

Para iniciar essa etapa deve-se separar quatro canos azuis (770mm), dois canos amarelos (120mm) e um cano verde (250mm), juntamente com quatro conexões do tipo "T" e realizar a montagem da Figura 100.

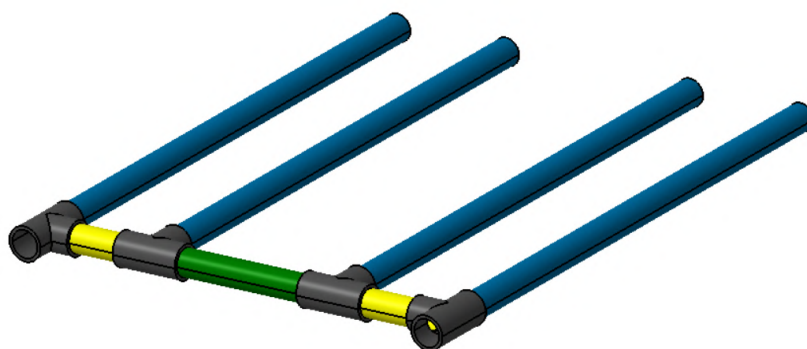


Figura 100 – Montagem preliminar da estrutura de fixação do banco automotivo. fonte: autor

Para a fixação dessa estrutura devemos agora posicionar o banco sobre ela e realizar as marcações para os cortes dos tubos azuis. Recomenda-se apoiar o banco sobre uma mesa ou superfície elevada, de ponta a cabeça, para a marcação da linha de corte nos tubos. A Figura 101 ilustra essa sugestão:

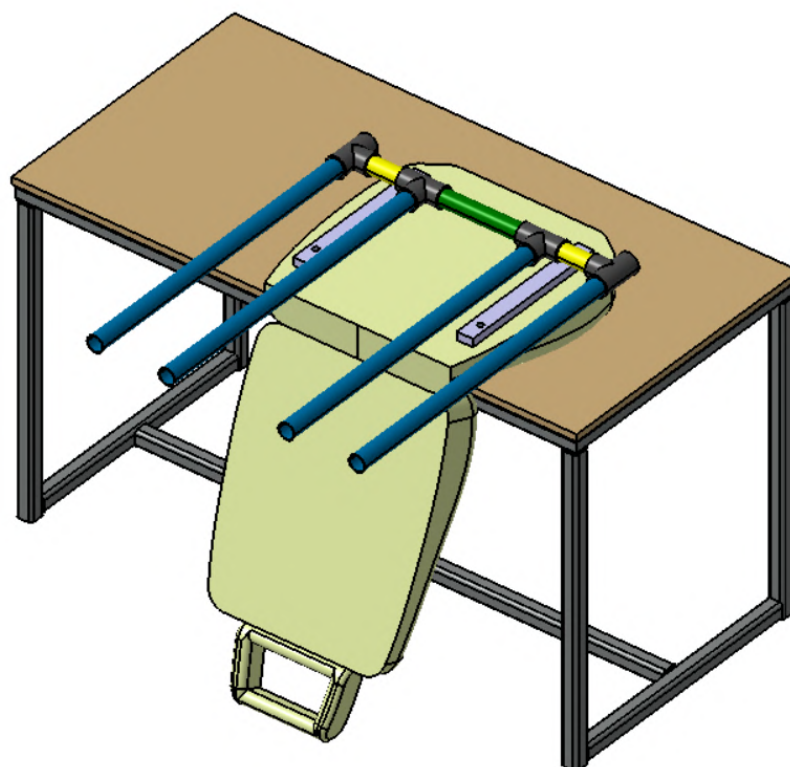
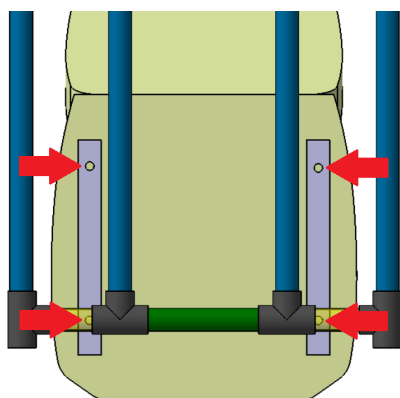
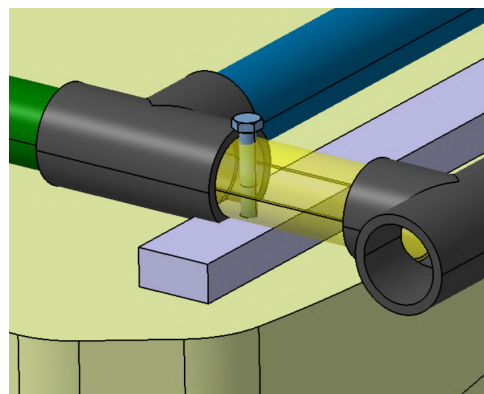


Figura 101 – Posicionamento da estrutura para marcação com o banco. fonte: autor

O trilho do banco possui uma série de furos que podem ser utilizados para a fixação do mesmo na base. Para a marcação do corte, pode-se utilizar qualquer par de furos, dependendo do modelo do banco e das distâncias disponíveis. Nesse exemplo será utilizado o par de furos mais distante, conforme representado na visualização superior através da Figura 102a:



(a) [Furação do banco vista de cima.



(b) Detalhe e demonstração do parafuso de trava do banco.

Figura 102 – Fixação preliminar do banco na estrutura. fonte: autor.

Observa-se que a estrutura deve ser posicionada de forma que os tubos amarelos se sobreponham aos furos do banco. **Nessa etapa, pode-se realizar a furação do tubo amarelo utilizando uma broca de 8 mm, seguindo o furo do banco, e, em seguida, passar o parafuso M8, travando-o na porca posicionada sobre o trilho do banco.** Essa última instrução pode ser visualizada na Figura 102b.

Para finalizar a montagem da fixação do banco, é necessário agora definir os pontos de fixação da parte traseira. Para obtê-los, deve-se cortar os quatro tubos azuis 20 mm antes do segundo furo do banco, de modo que a nova conexão crie uma "ponte" que será utilizada para a fixação da parte traseira do trilho do banco. Essa linha de corte pode ser visualizada na Figura 103.

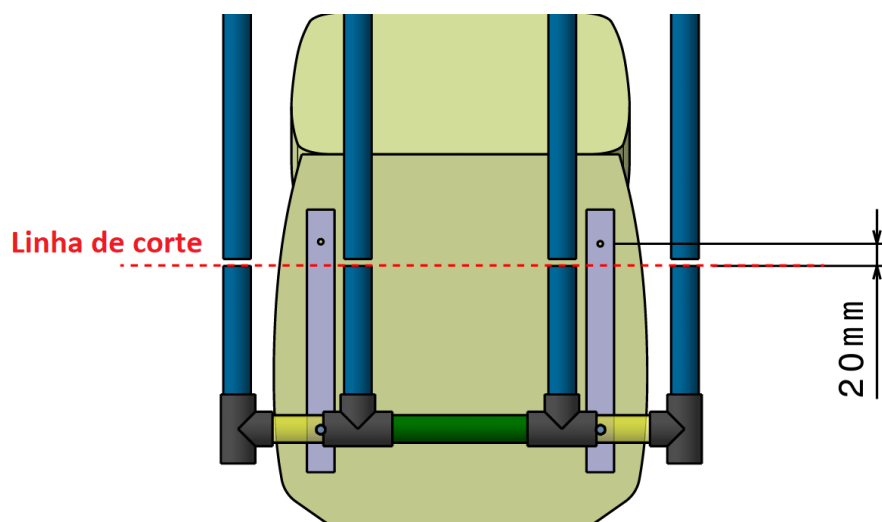


Figura 103 – Linha de corte para os tubos azuis da fixação do banco. fonte: autor

Com o corte realizado, deve-se agora utilizar quatro conexões do tipo "T" para unir as partes cortadas. As junções devem ser feitas conforme o modelo ilustrado na Figura 104.

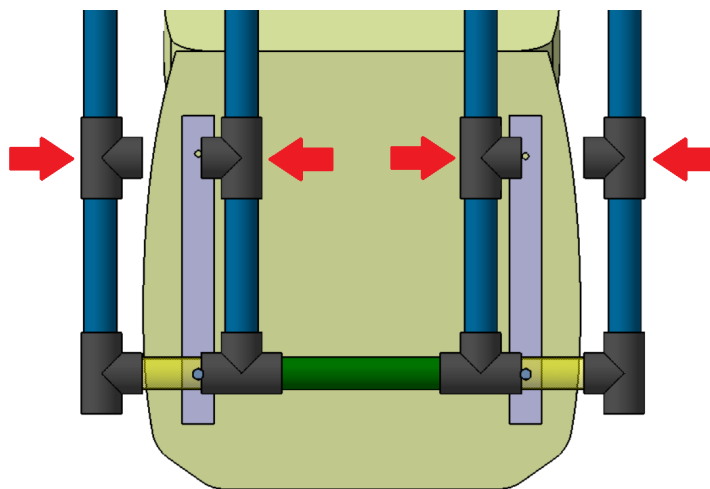


Figura 104 – Conexões em "T" para junção dos cortes nos tubos azuis. fonte: autor

Por fim, dois tubos amarelos (120 mm) devem ser posicionados de maneira análoga aos da parte dianteira. **Furos de 8 mm devem ser realizados para que, assim como na realização dos furos frontais do trilho, a estrutura possa ser fixada ao banco por meio dos parafusos M8.** O posicionamento dos tu-

os amarelos, assim como a fixação com os parafusos, pode ser visualizado na Figura 105.

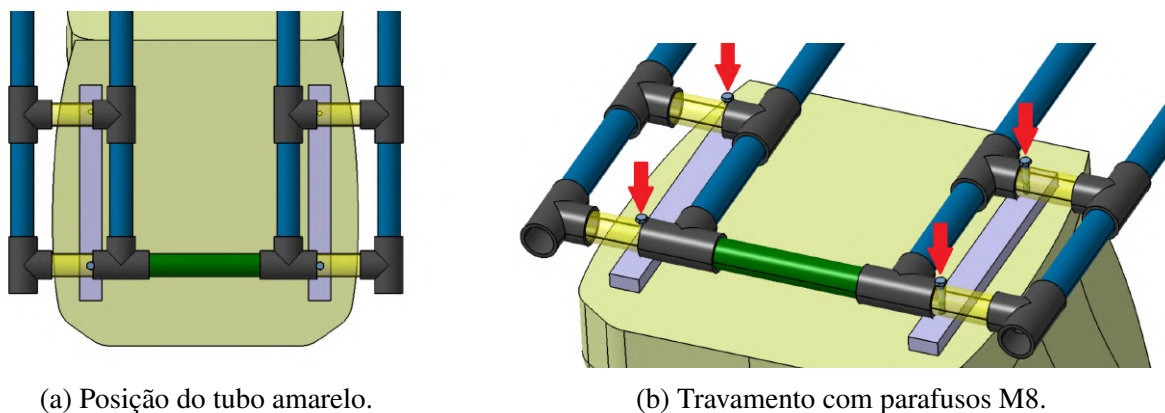


Figura 105 – Fixação final do banco na estrutura. fonte: autor.

Para finalizar a parte traseira do simulador, posiciona-se a estrutura de pé, juntamente com dois tubos amarelos (120 mm), um tubo verde (250 mm), duas conexões do tipo "joelho" e duas conexões do tipo "T". Realizando a junção conforme a Figura 106b:

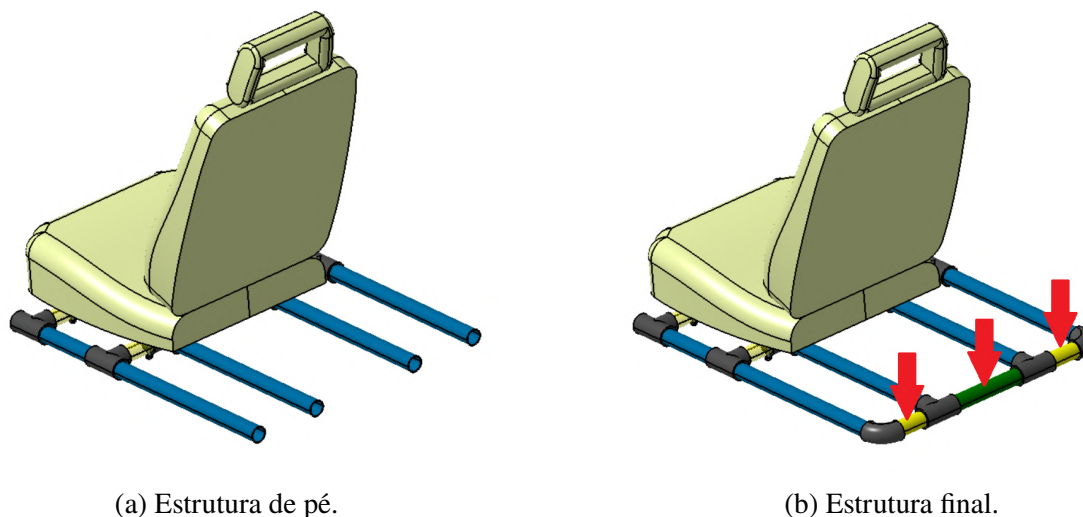


Figura 106 – Etapa final de montagem da estrutura de fixação do banco. fonte: autor.

Observa-se por fim a estrutura de fixação do banco totalmente montada.

### **Passo 5: Junção da parte frontal do simulador com a parte de fixação do banco**

Por fim, separa-se os dois tubos amarelos(120mm) restantes e posiciona eles de tal forma que possibilitem a junção entre a parte frontal e a parte de

fixação do banco conforme a Figura 107

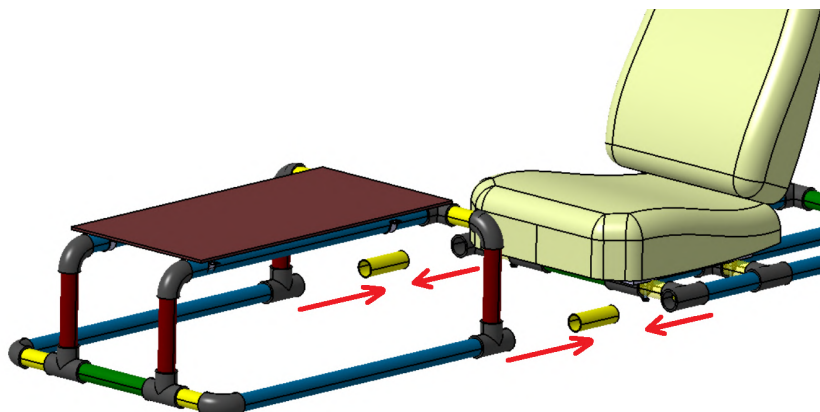


Figura 107 – Encaixe final da estrutura do simulador. fonte: autor

**A estrutura finalizada está representada abaixo na Figura 108:**

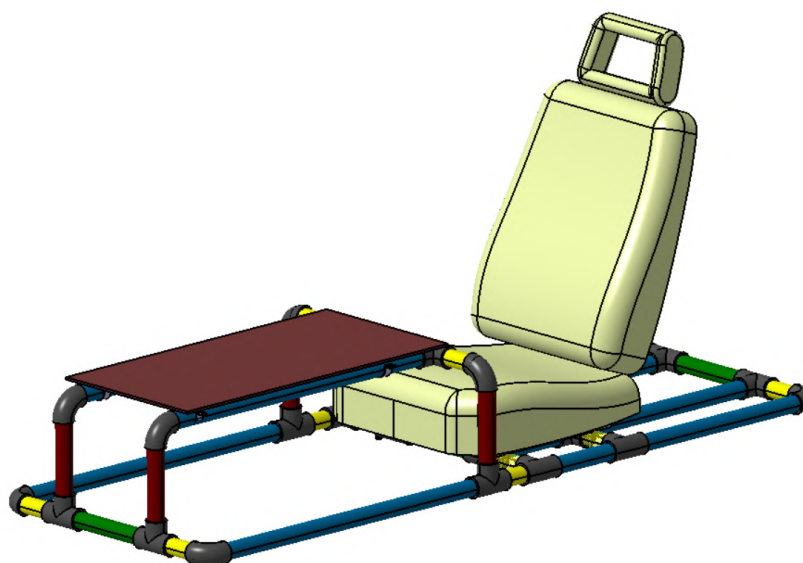


Figura 108 – Estrutura do simulador finalizada. fonte: autor

## APÊNDICE F – Manual de montagem do comando do freio aerodinâmico

Este manual tem como objetivo fornecer um guia passo a passo para a montagem do comando de freio aerodinâmico do simulador. A Tabela 16 abaixo mostra os materiais necessários para a montagem desse sistema.

Tabela 16 – Tabela de materiais necessários para a montagem do controle de freios. Fonte: autor

| Quantidade | Item                             |
|------------|----------------------------------|
| 350g       | Filamento PETG para impressão 3D |
| 2 unidades | Potenciômetro                    |
| 1m         | Correia GT2                      |
| 2 unidades | Fita hellermann                  |

A lista de ferramentas necessária para a montagem pode ser consultada abaixo:

Ferramentas Necessárias:

- Cola quente;

### Passo 1: Impressão dos componentes

Para o início da montagem, é necessário imprimir os componentes essenciais, mais especificamente a alavanca do freio aerodinâmico, o apoio da alavanca e a engrenagem, que estão representados nas Figuras 91, 92 e 93 do Apêndice C, respectivamente. Essa última, por sua vez, deve ser impressa duas vezes.

Não há, para essa etapa, a recomendação de utilização de configurações específicas para a impressão desses componentes, uma vez que se tratam de peças que não estão sujeitas a grandes esforços mecânicos ou cargas significativas. Pode-se também, caso necessário, o seccionamento das peças em partes menores a depender do tamanho da mesa de impressão disponível, essas devem ser coladas posteriormente.

Há ainda a necessidade de um corte próximo da **seção B-B** da figura 91 para proporcionar a entrada da alavanca do freio em seu suporte.

O resultado final da impressão inicial pode ser visualizado na Figura 109:

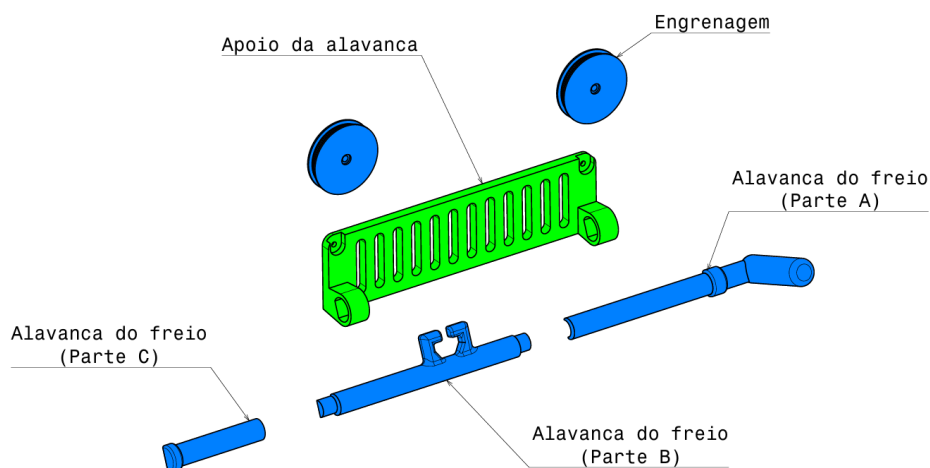


Figura 109 – Peças de impressão do conjunto do freio aerodinâmico. fonte: autor

Nota-se que a alavanca foi subdividida novamente agora no lado oposto, essa segunda subdivisão é opcional e tem a finalidade somente de facilitar a montagem final.

### **Passo 2: Encaixes das engrenagens nos potenciômetros**

Após a impressão dos componentes, deve-se realizar o encaixe dos potenciômetros nos furos centrais das engrenagens. Para essa etapa, é possível colar os potenciômetros nas engrenagens caso haja necessidade de maior fixação; no entanto, o encaixe foi projetado para ser realizado apenas por pressão. A Figura 110 ilustra o processo de encaixe para uma das engrenagens.

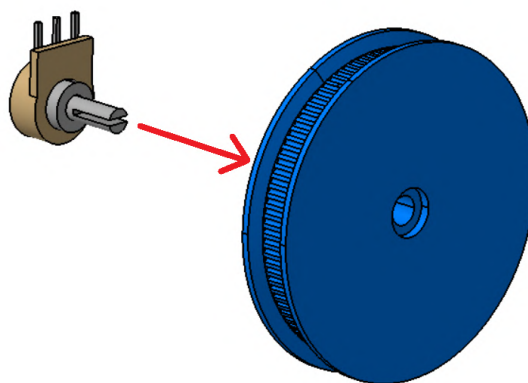


Figura 110 – Encaixe do potenciômetro na engrenagem. fonte: autor

### **Passo 3: Encaixes dos potenciômetros no apoio da alavanca**

Com os potenciômetros devidamente fixos às engrenagens, o próximo passo é encaixá-los na peça de apoio da alavanca. Nessa etapa, é essencial aplicar cola na base do encaixe entre o potenciômetro e o apoio, garantindo uma fixação. A Figura 111 ilustra detalhadamente esses encaixes nos rasgos pré-determinados na peça.

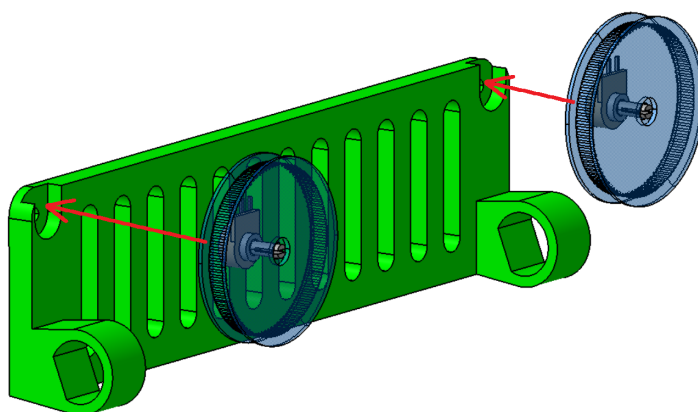


Figura 111 – Encaixe do potenciômetro no apoio da alavanca. fonte: autor

### **Passo 4: Posicionamento da alavanca do freio no apoio**

Com o apoio da alavanca pré-montado, o próximo passo é posicionar a alavanca do freio no conjunto. Para isso, as partes individuais laterais da alavanca devem ser deslizadas pelos furos laterais do apoio e, em seguida, coladas à parte central para completar a montagem da peça. Observa-se, na Figura 112,

que é fundamental realizar cortes estratégicos nas partes da alavanca, durante o **Passo 1**, para permitir sua correta introdução no apoio.

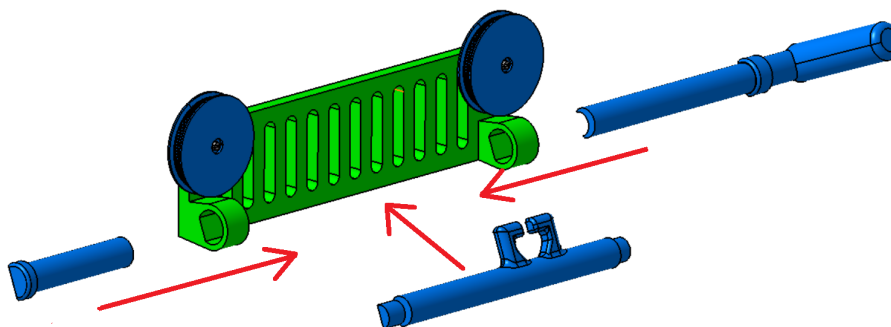


Figura 112 – Posicionamento da alavanca no suporte. fonte: autor

### Passo 5: Posicionamento da correia

Por fim, deve-se envolver as engrenagens com as correias, posicionando os dentes internamente nos raios de ambas. Com o auxílio das **fitas Heller-mann**, realiza-se o travamento das correias nas estruturas indicadas na Figura 113. Recomenda-se, nessa etapa, deslocar a alavanca totalmente para a esquerda e rotacionar ambos os potenciômetros no sentido horário, garantindo que a posição mais estendida seja a mesma para ambos e assegurando a sincronização correta do sistema.

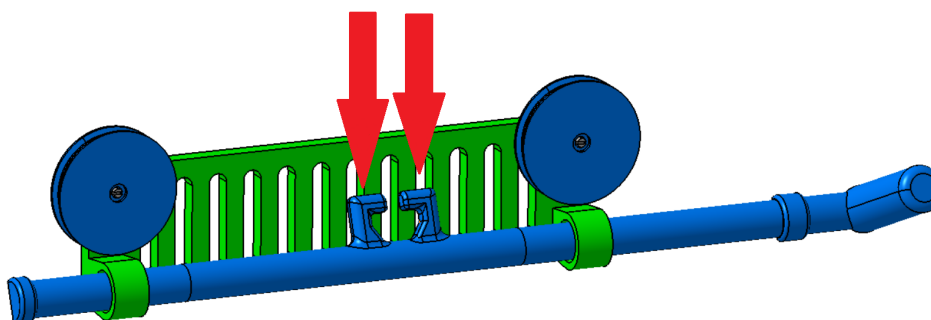


Figura 113 – Sinalização dos locais de fixação da correia. fonte: autor

O passo 5 finaliza a montagem do sistema de controle do freio aerodinâmico. O resultado final pode ser visualizado na Figura 114.

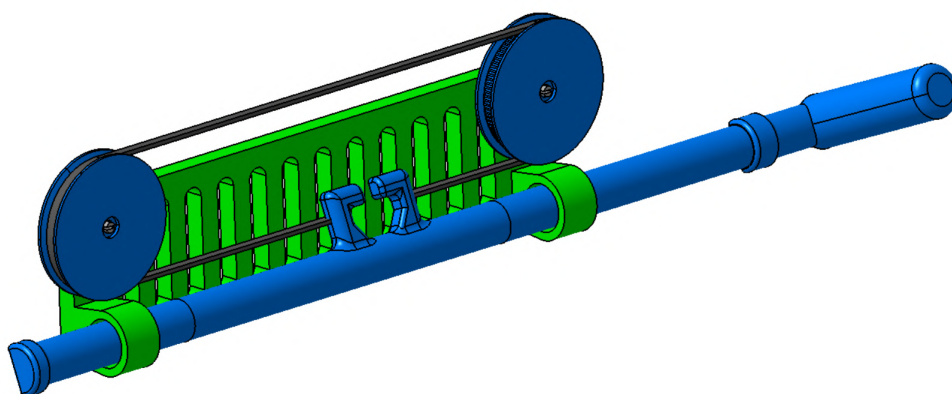
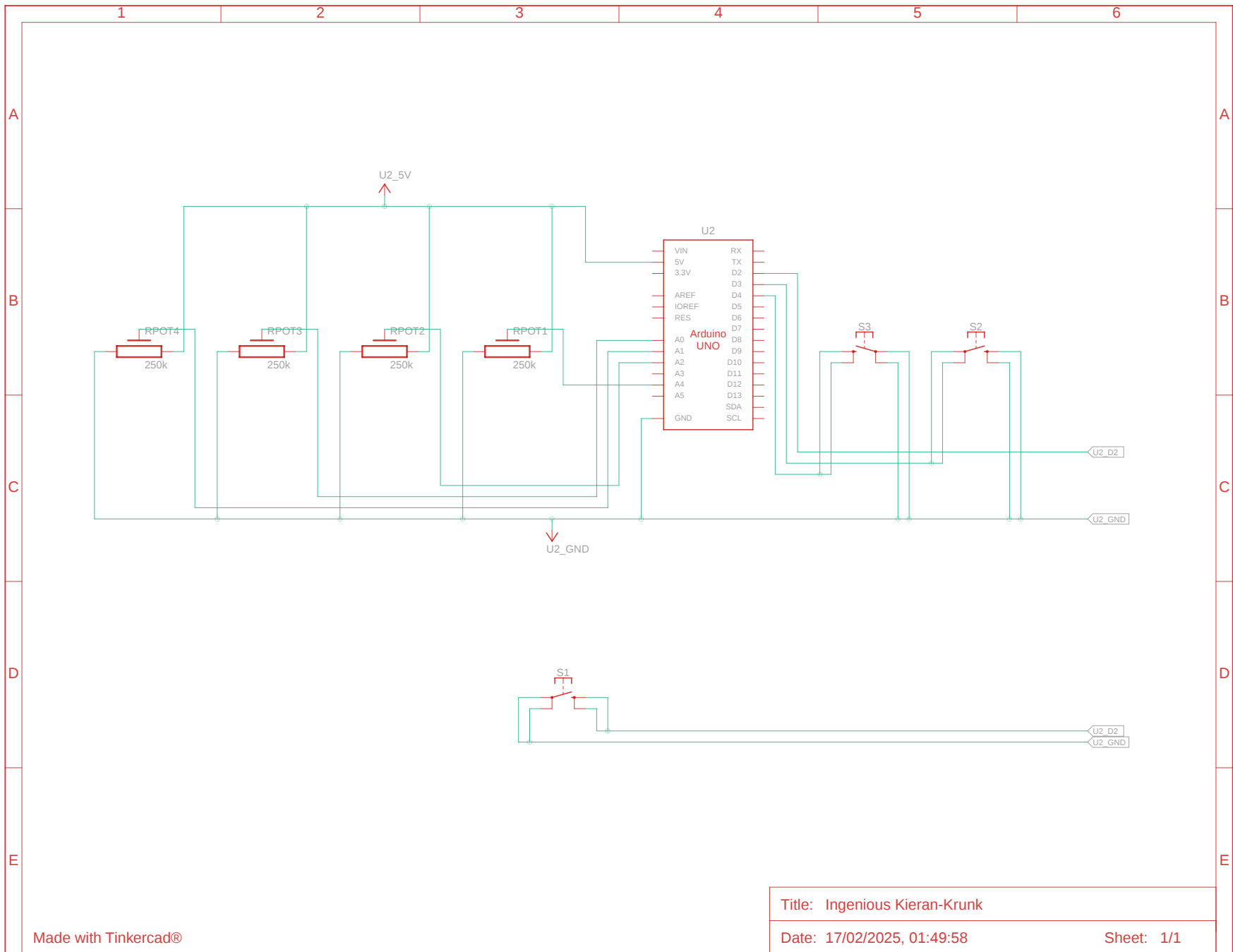


Figura 114 – Sistema de controle do freio aerodinâmico montado. fonte: autor

## APÊNDICE G – Vista esquemática da conexão eletrônica



## APÊNDICE H – Código Arduino

```

1 // Requires Arduino Joystick Library
  https://github.com/MHeironimus/ArduinoJoystickLibrary
2 #include <Joystick.h>
3
4 Joystick_ Joystick;
5
6 // Definicao dos eixos do joystick
7 int JoystickX;
8 int JoystickY;
9 int JoystickZ;
10 int JoystickRotationX;
11
12 // Configuracao dos botoes
13 const int buttonPin1 = 2;
14 const int buttonPin2 = 3;
15 bool buttonState1 = false;
16 bool lastButtonState1 = false;
17 bool buttonState2 = false;
18 bool lastButtonState2 = false;
19
20 // Configuracao dos potenciometros
21 const int potRotXPin = A5; // Pino do potenciometro para rotacao X
22 int potValue = 0;          // Valor lido do potenciometro
23 int lastState = 0;          // Ultima posicao registrada da alavanca
24 const int hysteresis = 50; // Margem para evitar flutuacoes
25
26 void setup() {
27   Joystick.begin();
28   Joystick.setXAxisRange(0, 1024);
29   Joystick.setYAxisRange(0, 1024);
30   Joystick.setZAxisRange(0, 1024);
31   Joystick.setRxAxisRange(0, 1024);
32
33   pinMode(buttonPin1, INPUT_PULLUP);
34   pinMode(buttonPin2, INPUT_PULLUP);
35   Serial.begin(9600);
36   delay(1000);
37
38   // Define o estado inicial do potenciometro
39   potValue = analogRead(potPin);
40   lastState = getLeverPosition(potValue);
41 }
42

```

```
43 void loop() {
44     // Le os sensores Hall
45     JoystickX = analogRead(A0);
46     delay(5);
47     JoystickY = analogRead(A1);
48     delay(5);
49     JoystickZ = analogRead(A2);
50     delay(5);
51     JoystickRotationX = analogRead(potRotXPin);
52     delay(5);
53
54     // Atualiza eixos no joystick virtual
55     Joystick.setXAxis(JoystickX);
56     Joystick.setYAxis(JoystickY);
57     Joystick.setZAxis(JoystickZ);
58     Joystick.setRxAxis(JoystickRotationX);
59
60     // Le o estado do botao fisico 1
61     buttonState1 = digitalRead(buttonPin1);
62     if (buttonState1 != lastButtonState1) {
63         Joystick.setButton(2, buttonState1 == LOW ? 1 : 0);
64         lastButtonState1 = buttonState1;
65     }
66
67     // Le o estado do botao fisico 2
68     buttonState2 = digitalRead(buttonPin2);
69     if (buttonState2 != lastButtonState2) {
70         Joystick.setButton(3, buttonState2 == LOW ? 1 : 0);
71         lastButtonState2 = buttonState2;
72     }
73 }
74
75 // Funcao para mapear o valor do potenciometro para as 3 posicoes da
    alavanca
76 int getLeverPosition(int potValue) {
77     if (potValue < 341) return 0; // Posicao inicial
78     if (potValue < 682) return 1; // Posicao intermediaria
79     return 2; // Posicao final
80 }
```

Code Listing H.1 – Código Arduino para Joystick Virtual

## ANEXO A – Vistas do AC-21

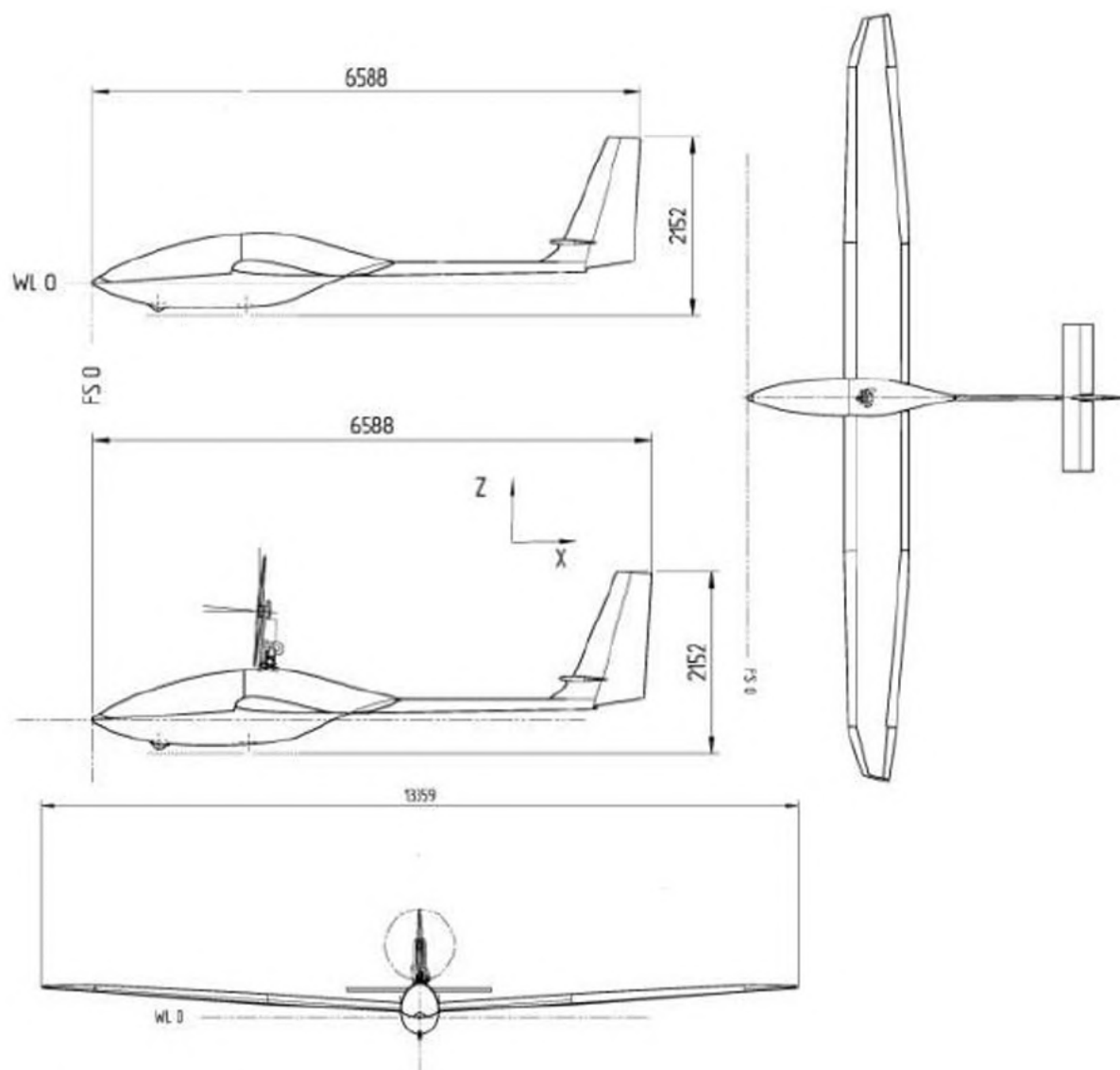


Figura 116 – Blueprint AC-21 (FREITAS, 2021)