

Universidade de Brasília – UnB
Faculdade de Ciências e Tecnologias em Engenharia – FCTE
Engenharia Aeroespacial

**Germinação em Ambiente Espacial:
Desenvolvimento de uma Câmara de Cultivo
para Simulação de Microgravidade
com Clinostato 3D**

Autor: Pedro Henrique Pereira Braga
Orientador: Dr. Lui Txai Calvoso Habl

Brasília, DF
2025



Pedro Henrique Pereira Braga

**Germinação em Ambiente Espacial: Desenvolvimento de
uma Câmara de Cultivo para Simulação de
Microgravidade com Clinostato 3D**

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 de Ciências e Tecnologias em Engenharia – FCTE

Orientador: Dr. Lui Txai Calvoso Habl

Brasília, DF

2025

Pedro Henrique Pereira Braga

Germinação em Ambiente Espacial: Desenvolvimento de uma Câmara de Cultivo para Simulação de Microgravidade com Clinostato 3D/ Pedro Henrique Pereira Braga. – Brasília, DF, 2025-

131 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Dr. Lui Txai Calvoso Habl

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília – UnB
Faculdade de Ciências e Tecnologias em Engenharia – FCTE , 2025.

1. Microgravidade. 2. Clinostato 3D. I. Dr. Lui Txai Calvoso Habl. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade de Ciências e Tecnologias em Engenharia - FCTE. IV. Germinação em Ambiente Espacial: Desenvolvimento de uma Câmara de Cultivo para Simulação de Microgravidade com Clinostato 3D

CDU

Pedro Henrique Pereira Braga

Germinação em Ambiente Espacial: Desenvolvimento de uma Câmara de Cultivo para Simulação de Microgravidade com Clinostato 3D

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.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 15 de dezembro de 2025:

Dr. Lui Txai Calvoso Habl
Orientador

Dra. Gabriela Cunha Possa
Convidado 1

**Postdoc Manuel Nascimento Dias
Barcelos Junior**
Convidado 2

Brasília, DF
2025

Agradecimentos

O curso de Engenharia nos apresenta uma nova maneira de observar o mundo, desenvolvendo um olhar mais analítico e voltado para a resolução de problemas. Passamos a pensar em como extrair o máximo de cada situação para melhorar a execução de tarefas que nos desafiam diariamente, muitas vezes em cenários sem gabarito, que nos fazem questionar se realmente estamos no caminho correto.

Entendo que parte do papel do engenheiro aeroespacial é apresentar à sociedade a importância desse campo para o desenvolvimento de tecnologias que utilizamos todos os dias, mesmo sem perceber, como é o caso do GPS, fundamental em diversas áreas.

Dessa forma, gostaria de agradecer a todos os professores da Faculdade de Ciências e Tecnologias em Engenharia, que se empenham em aperfeiçoar continuamente o ensino da Universidade de Brasília, nos colocando para estudar nos dias de folga, mesmo quando muitos acreditam que pouco fazemos em uma Universidade Federal.

Gostaria de agradecer especialmente aos professores Artem Andrianov e William Reis Silva pela dedicação em aprimorar suas disciplinas, ajudando seus alunos, retirando dúvidas, oferecendo novas matérias para o curso e contribuindo para o nosso crescimento profissional e pessoal.

Agradeço ao professor Lui Txai pela orientação, pelas ideias e pelas correções que me ajudaram a melhorar o desenvolvimento deste trabalho ao longo do tempo, assim como pela disponibilidade do laboratório e por tudo o que foi necessário para que eu procurasse fazer o melhor trabalho possível.

Também agradeço ao professor Olexiy Shynkarenko por disponibilizar o laboratório, o tempo e os equipamentos necessários para a realização deste projeto, também pensando sempre em maneiras de como ajudar seus alunos.

Registro, ainda, minha gratidão aos pesquisadores da Embrapa, referência mundial em agricultura e pecuária, em especial à pesquisadora Alessandra Fávero, que se reuniu conosco, nos recebeu muito bem, apresentou grandes nomes da instituição e trouxe excelentes ideias para serem utilizadas no desenvolvimento deste projeto.

*“O espaço representa um campo onde
o conhecimento humano pode atingir
sua expressão mais elevada.
(Marcos Pontes)*

Resumo

Com o avanço das tecnologias aplicadas ao setor aeroespacial, missões voltadas à habitação humana de longa duração têm se tornado cada vez mais relevantes. Nesse contexto, sistemas bioregenerativos baseados no cultivo de plantas surgem como uma alternativa promissora para o suporte à vida, reduzindo a dependência de reabastecimentos constantes. Dessa forma, a realização de estudos que avaliem os efeitos do ambiente espacial sobre o desenvolvimento vegetal constitui uma etapa fundamental para a concepção de sistemas capazes de apoiar missões de exploração espacial, como o Programa Artemis. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma câmara de cultivo e a avaliação de seus sistemas e estrutura, projetados para operar em um clinostato de dois eixos controláveis, utilizado para investigar um dos fatores críticos do ambiente espacial, a alteração na percepção do vetor gravitacional, por meio da simulação de microgravidade. Foi realizada uma análise comparativa do crescimento radicular durante a germinação de sementes de rabanete, com e sem clinorotação, na qual se observou um crescimento mais lateralizado das raízes sob condição de clinorotação. O sistema desenvolvido foi capaz de realizar captura contínua de imagens, administrar água de forma controlada, medir a temperatura interna e monitorar a orientação simulada do vetor gravitacional ao longo do experimento, permitindo uma análise integrada dos efeitos da simulação de microgravidade no crescimento vegetal. Além disso, foi discutida a importância de pesquisas envolvendo plantas como suporte ao avanço do setor aeroespacial e ao desenvolvimento de missões de longa duração, incluindo iniciativas associadas ao Programa Artemis. Os resultados obtidos indicaram alterações significativas no desenvolvimento das raízes de microverdes de rabanete cultivados em substrato inerte de espuma floral, evidenciando que mesmo condições simuladas de microgravidade são capazes de afetar processos fisiológicos sensíveis das plantas.

Palavras-chave: germinação, Clinostato3D, microgravidade.

Abstract

With the advancement of technologies applied to the aerospace sector, missions focused on long-duration human habitation have become increasingly relevant. In this context, bioregenerative systems based on plant cultivation emerge as a promising alternative for life support, reducing dependence on continuous resupply. Therefore, studies aimed at evaluating the effects of the space environment on plant development constitute a fundamental step toward the design of systems capable of supporting space exploration missions, such as the Artemis Program. This work presents the development of a plant growth chamber and the evaluation of its systems and structure, designed to operate on a two-axis controllable clinostat, used to investigate one of the critical factors of the space environment, namely changes in the perception of the gravitational vector through microgravity simulation. A comparative analysis of root growth during radish seed germination was conducted with and without clinorotation, in which a more lateralized root growth was observed under clinorotation conditions. The developed system was capable of continuous image acquisition, controlled water administration, internal temperature measurement, and monitoring of the simulated orientation of the gravitational vector throughout the experiment, allowing an integrated analysis of the effects of simulated microgravity on plant growth. In addition, the importance of plant-related research in supporting the advancement of the aerospace sector and the development of long-duration missions, including initiatives associated with the Artemis Program, was discussed. The results indicated significant changes in the root development of radish microgreens cultivated in an inert floral foam substrate, demonstrating that even simulated microgravity conditions are capable of affecting sensitive plant physiological processes.

Key-words: germination, 3D clinostat, microgravity.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Curvas de nível de gravidade residual na ISS, vistas no sentido oposto à trajetória de voo	26
Figura 2 – Clinóstato de eixo único (1D)	30
Figura 3 – Clinóstato 3D do Laboratório de Medicina Espacial e Farmacologia Espacial, Universidade de Aarhus, Dinamarca.	31
Figura 4 – Esquemático da rotação dos eixos em um Clinostato 3D com três eixos controláveis.	31
Figura 5 – Trajetória do movimento da ponta do vetor gravitacional avaliando os motores separadamente	32
Figura 6 – Trajetória do movimento da ponta do vetor gravitacional sobre uma esfera imaginária para 15 minutos de simulação a uma distância de 35 mm do centro	33
Figura 7 – Trajetória do movimento da ponta do vetor gravitacional sobre uma esfera imaginária para 2 horas de simulação a uma distancia de 35 mm do centro	33
Figura 8 – Valores máximos do vetor gravidade cumulativo com diferentes velocidades de rotação ao longo de 5 minutos.	34
Figura 9 – Nanossatélite SPORT.	40
Figura 10 – Nanossatélite NanoMirax.	40
Figura 11 – A Espiral Espacial é um fator significativo para o aumento de custos e para cronogramas mais longos.	41
Figura 12 – Peggy A. Whitson Segurando o Experimento de Crescimento de Soja	43
Figura 13 – CubeSat 3U desenvolvido pela equipe S5Lab	44
Figura 14 – Sementes de gonçalo -alves presas ao substrato por fita Kapton para administração de nutrientes e água.	45
Figura 15 – Natureza cíclica das interações entre plantas e animais que impulsionam o desenvolvimento do Sistema avançado de Suporte à Vida(ALS).	47
Figura 16 – Custo de uma missão utilizando diferentes sistemas de suporte à vida ao longo do tempo de missão.	49
Figura 17 – Experimento da NASA com diferentes meios de cultivo hidropônicos desenvolvidos no Centro Espacial Kennedy	54
Figura 18 – Clinostato de três eixos do Laboratório de Propulsão Química da UNB	58
Figura 19 – Esquemático para desenvolvimento da câmara de cultivo.	59
Figura 20 – Posição dos motores no Clinostato de 3 eixos	60
Figura 21 – Centro de massa para aplicação da massa distribuída.	61
Figura 22 – Massa do motor em grama	61

Figura 23 – Passagem de cabos por dentro da estruturas	62
Figura 24 – Possibilidades de encaixe da câmara de cultivo no Clinostato	66
Figura 25 – Placa de Cultivo feita em impressão 3D utilizada no projeto GreenCube.	67
Figura 26 – Fotos de vários microverdes tiradas no Laboratório de Pesquisa em Nutrição e Metabolismo da Universidade do Alabama, EUA.	69
Figura 27 – Germinação utilizando gel de cultivo como substrato.	70
Figura 28 – Germinação utilizando gel de cultivo como substrato.	71
Figura 29 – Opção de sistema para administração de água utilizando impressão 3D e motor de passo.	72
Figura 30 – Sistema médico para administração de nutrientes utilizado no projeto GreenCube	72
Figura 31 – ESP32-CAM com placa MB.	73
Figura 32 – Sensor de temperatura DS18B20	74
Figura 33 – Sensor de temperatura MF58	74
Figura 34 – Motor de passo 28byj-48 com driver Uln2003 Arduino robótica.	77
Figura 35 – Impressora 3D FLSUN QQ-S utilizada na impressão de peças.	78
Figura 36 – Isométrica da montagem preliminar da câmara de cultivo.	81
Figura 37 – Montagem completa para o sistema de administração de água.	82
Figura 38 – Montagem da câmara de cultivo com sistema de administração de água acoplado.	82
Figura 39 – Pinagem disponível para conexão do ESP32-Cam	83
Figura 40 – Interface de acesso local para download das imagens retiradas da câ- mara de cultivo.	84
Figura 41 – Imagem de teste capturada pelo ESP32-Cam.	85
Figura 42 – Pinagem disponível para conexão do ESP8266 12-E.	85
Figura 43 – Interface de acesso local para download e acesso das informações do ESP8266.	86
Figura 44 – Fita de LEDs SMD3528 utilizada no projeto	88
Figura 45 – Caixa de controle de iluminação	88
Figura 46 – Peças para construção do sistema de administração de água.	90
Figura 47 – Peças para montagem da região superior da câmara de cultivo com suportes para sistemas	90
Figura 48 – Suporte inferior da câmara de cultivo	91
Figura 49 – Paredes laterais	91
Figura 50 – Eixos para conexão com o Clinostato	92
Figura 51 – Montagem do sistema de administração de água.	92
Figura 52 – Montagem do sistema de administração de água.	93
Figura 53 – Montagem do sistema de administração de água.	93
Figura 54 – Câmara de cultivo montada com seus sistemas.	94

Figura 55 – Montagem do sistema de administração de água.	95
Figura 56 – Montagem final do sistema completo	95
Figura 57 – Sementes de rabanete utilizadas no experimento.	96
Figura 58 – Sementes de agrião utilizadas no experimento.	96
Figura 59 – Teste realizado para avaliar o funcionamento da espuma floral com germinação das sementes de rabanete após 6 dias	97
Figura 60 – Trajetória do vetor gravitacional sobre o experimento dado $\omega' = 1rad/s$ e $\omega'' = 4,3rad/s$ em um intervalo de 350 segundos.	99
Figura 61 – Disposição das sementes no experimento realizado fora da câmara de cultivo.	100
Figura 62 – Plantas germinadas avaliadas no 6 ^o dia	101
Figura 63 – 3 ^o Dia de germinação sem clinorotação	102
Figura 64 – 5 ^o Dia de germinação sem clinorotação	102
Figura 65 – Germinação das sementes em clinorotação. A Imagem do 3 ^o dia de simulação. B Imagem do 5 ^o dia de simulação.	103
Figura 66 – Distribuição das sementes de rabanete para simulação em clinorotação	103
Figura 67 – Germinação das sementes em clinorotação após um período de 5 dias. .	104
Figura 68 – 2 ^o Dia de germinação em clinorotação	105
Figura 69 – 3 ^o Dia de germinação em clinorotação	105
Figura 70 – 4 ^o Dia de germinação em clinorotação	105
Figura 71 – 5 ^o Dia de germinação em clinorotação	105
Figura 72 – Comparação entre o desenvolvimento das raízes sem clinorotação. . . .	106
Figura 73 – Comparação entre o desenvolvimento das raízes com clinorotação. . . .	106
Figura 74 – Campos de Radiação	114
Figura 75 – Radiação presente em um satélite em órbita LEO	115

Lista de tabelas

Tabela 1 – Comparativo entre Fontes de Iluminação Artificial.	51
Tabela 2 – Requisitos para o desenvolvimento da câmara de cultivo	59
Tabela 3 – Especificações técnicas do PETG utilizado	78
Tabela 4 – Requisitos específicos para construção das peças	79
Tabela 5 – Requisitos gerais para construção das peças	80
Tabela 6 – Características da Captura de Imagens da ESP32-CAM	84
Tabela 7 – Pinagem utilizada no módulo ESP8266 12-E	86
Tabela 8 – Características do sensor de temperatura DS18B20	87
Tabela 9 – Especificações da Fita de LEDs SMD3528	87
Tabela 10 – Massa e nível de preenchimento utilizados na fabricação das estruturas	89
Tabela 11 – Faixas de temperatura típicas para germinação de rabanete e agrião- d'água	97
Tabela 12 – Temperaturas médias diárias registradas ao longo de 6 dias de experi- mentos sem clinorotação.	101
Tabela 13 – Parâmetros médios medidos	101
Tabela 14 – Temperaturas médias diárias registradas ao longo de 5 dias de experi- mentos com clinorotação.	104
Tabela 15 – Temperaturas registradas ao longo de 6 dias de experimento sem cli- norotação (24 medições por dia).	130
Tabela 16 – Temperaturas registradas ao longo de 5 dias de experimento com cli- norotação (24 medições por dia).	131

Lista de abreviaturas e siglas

AEB	Agência Espacial Brasileira
ALS	Advanced Life Support
ARIS	Active Rack Isolation System
ASI	Agenzia Spaziale Italiana
CEH	Controlled Environment Horticulture
CFD	Computational Fluid Dynamics
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
CPL	Laboratório de Propulsão Química
CPPSs	Controlled Plant Production Systems
CubeSat	Tipo de nanossatélite padronizado em unidades
DWC	Deep Water Culture
EC	Condutividade elétrica
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FCTE	Faculdade de Ciências e Tecnologias em Engenharia
GLONASS	GLOBal NAVigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
ISS	International Space Station – Estação Espacial Internacional
LEMA	Laboratório de Estruturas e Materiais Aeroespaciais
LASE	Laboratório de Sistemas Espaciais
MEO	Medium Earth Orbit – Órbita Terrestre Média
MSD	Merck Sharp & Dohme
NASA	National Aeronautics and Space Administration

NFT	Nutrient Film Technique
NIR	Near-Infrared Radiation – Radiação Infravermelha Próxima
O ₃	Ozônio
OEEs	Objetivos Estratégicos Específicos
PAR	Photosynthetically Active Radiation – Radiação Fotossinteticamente Ativa
PETG	Polietileno Tereftalato Glicol
PFALs	Plant Factories with Artificial Light
PNAE	Programa Nacional de Atividades Espaciais
RTGs	Geradores Termoelétricos de Radioisótopos
SEU	Single Event Upset – erro temporário de lógica
SEL	Latchup – travamento que requer reinicialização
SEB	Burnout – destruição do circuito
LEO	Low Earth Orbit – Órbita Terrestre Baixa
GEO	Geostationary Earth Orbit – Órbita Geoestacionária
CME	Erupções solares e ejeções de massa coronal
GPS	Global Positioning System
Galileo	Sistema de Navegação por Satélite Europeu
GLONASS	GLObal NAVigation Satellite System

Lista de símbolos

A	Área efetiva iluminada da câmara de cultivo (m^2)
\vec{A}	Vetor arbitrário associado à orientação da amostra no clinóstato
A_1, A_2, A_3	Componentes do vetor \vec{A} nos eixos do referencial rotacional
\vec{a}'	Aceleração do corpo no referencial acelerado (m/s^2)
\vec{a}_s	Aceleração do referencial não inercial em relação ao referencial inercial (m/s^2)
E	Iluminância ($\text{lx} = \text{lm}/\text{m}^2$)
$\hat{e}_1, \hat{e}_2, \hat{e}_3$	Vetores unitários do sistema de coordenadas inercial
$\hat{e}'_1, \hat{e}'_2, \hat{e}'_3$	Vetores unitários do sistema de coordenadas rotacional
\vec{F}	Força real atuando sobre o corpo (N)
\vec{F}_c	Força centrífuga (N)
\vec{F}_f	Força fictícia de inércia (N)
\vec{F}_g	Força gravitacional (N)
G	Constante gravitacional universal ($6,674 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$)
\vec{g}	Vetor aceleração gravitacional local (m/s^2)
h	Métrica escalar associada ao grau de não-direcionalidade do vetor gravitacional
$h_1(t), h_2(t), h_3(t)$	Integrais temporais das componentes do vetor \vec{A}
L	Comprimento da fita de LED necessária para iluminação (cm)
m	Massa do corpo (kg)
M	Massa do corpo central (por exemplo, a Terra) (kg)
Φ	Fluxo luminoso total (lm)
Φ_{\min}	Fluxo luminoso mínimo requerido (lm)
Φ_{\max}	Fluxo luminoso máximo requerido (lm)

ϕ ou φ	Ângulo de rotação em torno do eixo z (rad)
PPFD	Densidade de Fluxo de Fótons Fotossintéticos ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
R	Raio da órbita ou distância ao eixo de rotação (m)
$R(\varphi)$	Matriz de rotação associada ao ângulo φ
\vec{r}	Vetor posição no referencial inercial (m)
\vec{r}'	Vetor posição no referencial acelerado (m)
S	Sistema de coordenadas inercial (fixo à Terra)
S'	Sistema de coordenadas rotacional (solidário ao clinóstato)
t	Tempo (s)
T	Período orbital ou período de rotação (s)
λ	Comprimento de onda da radiação luminosa (nm)
ω	Vetor velocidade angular total (rad/s)
ω'	Velocidade angular associada à rotação em torno do eixo z (rad/s)
ω''	Velocidade angular associada à rotação em torno do eixo x' (rad/s)

Sumário

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Contextualização	19
1.2	Problema	20
1.3	Justificativa	20
1.4	Objetivo Geral	21
1.5	Objetivos específicos	22
1.6	Metodologia	22
1.7	Organização do Trabalho	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E REFERENCIAL TEÓRICO	24
2.1	Ambiente espacial	24
2.1.1	A gravidade e a condição de microgravidade	25
2.2	Clinostato	30
2.2.1	Controle da velocidade entre os eixos como parâmetro de otimização	32
2.3	Missão Espacial	36
2.3.1	Conceito e importância	36
2.3.2	Relação da AEB no desenvolvimento de missões	38
2.3.3	Custos envolvendo missões	40
2.3.4	Missões tripuladas e o cultivo de Plantas	41
2.3.5	Missões realizadas para o estudo de germinação em microgravidade	42
2.3.5.1	GreenCube	43
2.3.5.2	Sonda chinesa Chang'e 4	44
2.3.5.3	Germinação realizada pela Embrapa	44
2.3.5.4	Brassica rapa	45
2.4	Germinação em ambiente espacial	46
2.4.1	Sistema avançado de suporte à vida (ALS)	48
2.4.2	Relação entre a carga e o sistema de suporte à Vida	48
2.4.3	Estrutura das Plantas	48
2.4.4	Crescimento das Raízes	50
2.4.5	Taxa de irradiância e iluminação	51
2.4.6	Métodos de Cultivo	52
2.4.6.1	Controle de parâmetros abióticos	53
2.4.6.2	Administração de Nutrientes	54
3	DESENVOLVIMENTO DA CÂMARA DE CULTIVO	57
3.1	Análise conceitual	57

3.1.1	Clinostato utilizado	60
3.1.2	Sistema eletrônico	62
3.1.2.1	Iluminação	63
3.1.3	Estruturas	65
3.1.4	Seleção das sementes para germinação	68
3.1.4.1	Germinação de microverdes	68
3.1.5	Substrato	70
3.1.6	Sistema de administração de nutrientes	71
3.2	Análise preliminar	72
3.2.1	Sistema eletrônico	72
3.2.1.1	Controlador	73
3.2.1.2	Sensor de temperatura	74
3.2.1.3	Iluminação	75
3.2.1.4	Sistema de administração de água	77
3.2.2	Estruturas	77
3.2.2.1	Fabricação	77
3.2.2.2	Características do material e requisitos da câmara de cultivo	78
3.2.2.3	Modelo tridimensional das peças para construção da câmara de cultivo	81
3.3	Análise detalhada	83
3.3.1	Sistema eletrônico	83
3.3.1.1	Alimentação do sistema	83
3.3.1.2	Controlador	83
3.3.1.3	Sensor de temperatura	86
3.3.1.4	Iluminação	87
3.3.2	Estruturas	88
3.3.2.1	Fabricação	88
3.3.2.2	Montagem	92
3.3.2.3	Estrutura final	94
3.3.3	Sementes e Substrato	96
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	98
4.1	Percepção do vetor gravitacional resultante da clinorotação	98
4.2	Observações sobre a temperatura	100
4.3	Resultado com a câmara de cultivo sem clinorotação	100
4.3.1	Germinação 1	100
4.4	Resultado obtido com a câmara de cultivo em clinorotação	102
4.4.1	Germinação 1	102
4.4.2	Germinação 2	103
4.5	Comparativo entre o desenvolvimento das raízes	105

5	CONCLUSÃO	107
	REFERÊNCIAS	109
	APÊNDICES	113
	APÊNDICE A – PRIMEIRO APÊNDICE	114
A.0.1	Radiação	114
A.0.1.1	Radiação de Partículas de Alta Energia	117
A.0.2	Influência Atmosférica	118
A.0.3	Vácuo	119
A.0.4	Detritos Espaciais	119
	APÊNDICE B – PLANTAS	121
	APÊNDICE C – CÓDIGO PARA OBTENÇÃO DA TRAJETÓRIA DO VETOR GRAVITACIONAL	128
	APÊNDICE D – TEMPERATURAS MEDIDAS PELO SENSOR DS18B20	130

1 Introdução

1.1 Contextualização

O setor aeroespacial vem se desenvolvendo cada vez mais ao longo dos anos, criando novas tecnologias e realizando missões espaciais progressivamente mais complexas, voltadas para diversas áreas do conhecimento, como as interações bioquímicas e fisiológicas no ambiente espacial (LAUNIS, 2004). Nesse contexto, novas tecnologias vêm sendo utilizadas para simular condições espaciais, tanto em Terra quanto em órbita de planetas (CAPPELLETTI; BATTISTINI; MALPHRUS, 2021).

Uma das tecnologias utilizadas em Terra para avaliar efeitos relacionados à microgravidade, como a alteração da percepção do vetor gravitacional, é o Clinostato. Esse instrumento modifica a percepção da direção gravitacional ao longo do tempo por meio da rotação de seus eixos internos (KIM et al., 2016), induzindo alterações biológicas em diferentes estruturas, como células humanas e plantas (ALVES, 2013).

Dentro dos projetos e missões que envolvem a habitação de longo prazo em espaçonaves ou em planetas, como no projeto Artemis (BRANDAO, 2022), estruturas de suporte à vida são desenvolvidas para garantir a viabilidade dessas iniciativas. Ao avaliar as opções disponíveis para a construção desses sistemas, realiza-se primeiramente uma análise para determinar até que ponto o método convencional de armazenamento e reabastecimento se mantém viável (FERL et al., 2002).

No contexto da exploração espacial, a pesquisa sobre a germinação em microgravidade tem se tornado uma área de crescente interesse, devido às suas implicações para o cultivo de alimentos em missões espaciais. A microgravidade altera as condições ambientais para as sementes, modificando seus processos fisiológicos e de germinação (KAUFMAN; NICKERSON; DINEEN, 2001). Experimentos realizados na Estação Espacial Internacional (ISS) e em outros ambientes de microgravidade têm mostrado que a ausência de gravidade pode influenciar não apenas a orientação do crescimento das plantas, mas também sua velocidade de desenvolvimento e alterações cromossômicas (FERL et al., 2002).

Entender o comportamento de sementes em microgravidade é essencial para o desenvolvimento de sistemas agrícolas autossustentáveis em missões de longa duração. A microgravidade, segundo Ley, Wittmann e Hallmann (2009), ocorre porque os corpos em órbita estão em constante queda livre em torno de um corpo celeste, como a Terra. Essa condição afeta fluidos, alterando propriedades como flutuação, empuxo e convecção. Tais variações impactam diretamente o ambiente ao redor da semente, tornando fundamental

o estudo detalhado desses efeitos sobre o processo de germinação (LEY; WITTMANN; HALLMANN, 2009).

Segundo Embrapa (2006), a ISS foi utilizada para a germinação de 10 sementes de Gonçalo-Alves (*Astronium fraxinifolium*), obtendo-se uma germinação mais rápida fora do planeta. Resultado semelhante foi observado na sonda chinesa Chang'e 4, que, embora tenha realizado experimentos em solo lunar utilizando sementes de algodão, apresentou uma resposta mais rápida na germinação e uma adaptação inesperada das sementes às mudanças abruptas de temperatura (XIE et al., 2023). Tais resultados evidenciam que as pesquisas sobre germinação em ambiente espacial ainda estão em andamento e continuam a revelar novos achados.

1.2 Problema

A estrutura convectiva induzida pela temperatura é significativamente afetada em microgravidade, assim como a difusão de gases, o que dificulta a administração adequada de luz e oxigênio para o bom desenvolvimento das plantas (FERL et al., 2002). Esse cenário evidencia a necessidade de pesquisas voltadas ao correto dimensionamento dos requisitos operacionais em sistemas de suporte à vida baseados em plantas.

Nesse contexto, o desenvolvimento de mecanismos experimentais capazes de operar em microgravidade simulada e adaptados para CubeSats, como pequenas câmaras de cultivo, pode reduzir a dependência de experimentos a bordo da ISS ou de sistemas embarcados complexos em satélites de maior porte. Dessa forma, tais plataformas surgem como uma alternativa viável para investigar processos de germinação em microgravidade, com menor custo e maior frequência de experimentação.

1.3 Justificativa

A germinação é um dos processos biológicos essenciais para o ciclo de vida das plantas, sendo diretamente responsável pela renovação da matéria orgânica e pela produção de alimentos. As plantas desempenham um papel fundamental na manutenção da vida na Terra, que não se restringe a fonte de alimentos, mas também como reguladoras do ambiente, fornecendo oxigênio, absorvendo dióxido de carbono e formando a base das cadeias alimentares. Essa interdependência natural entre plantas, seres humanos e outros organismos é um dos pilares do equilíbrio ecológico global (TAIZ et al., 2015).

Com o avanço da exploração espacial e a crescente ambição de missões de longo prazo, como o programa Artemis, que visa a criação de uma presença sustentável na Lua e, eventualmente, a ocupação de Marte (BRIDENSTINE, 2020), torna-se imprescindível compreender como as plantas podem se adaptar a ambientes com microgravidade, como

os encontrados no espaço. Em missões espaciais de longa duração, a necessidade de um sistema de suporte à vida autossustentável torna-se evidente, já que os recursos são limitados e o reabastecimento de alimentos vindos da Terra é logisticamente complexo e caro. Nesse cenário, o cultivo de plantas em microgravidade, especialmente no que se refere à germinação e ao crescimento inicial das sementes, se apresenta como um desafio e ser superado, com implicações diretas para a alimentação e a sustentabilidade de futuras colônias espaciais (AVERNER; BECK, 1993).

As plantas não apenas fornecem oxigênio e alimentos, mas também ajudam a regular o ambiente, absorvendo substâncias como dióxido de carbono (CO₂) e participando no ciclo de água (FERL et al., 2002). A pesquisa sobre germinação em ambiente espacial visa entender como as sementes em condições de microgravidade e as dificuldades encontradas em realizar esse cultivo (SMITH; STUTTE, 2016).

Compreender os efeitos da microgravidade sobre a germinação das sementes é crucial para desenvolver sistemas de cultivo mais eficientes, garantindo que as plantas possam crescer de forma saudável em condições espaciais restritas e controladas. Além disso, a adaptação das plantas a essas condições pode abrir caminho para o desenvolvimento de tecnologias de cultivo em ambientes extremos, beneficiando não apenas a exploração espacial, mas também a agricultura em locais de difícil acesso na Terra, como regiões desérticas ou áreas de condições climáticas severas (SMITH; STUTTE, 2016).

Por se tratar de um projeto de curta duração e baixo custo, quando comparado a satélites convencionais, o desenvolvimento de uma câmara de cultivo preliminar para utilização em um Clinostato, com vistas a uma futura aplicação em nanossatélites, configura-se como uma oportunidade de aplicar os conhecimentos adquiridos ao longo do curso de Engenharia Aeroespacial.

Além disso, o projeto contribui para a formação e capacitação do aluno, uma vez que envolve a concepção de um sistema de pesquisa destinado a investigar os efeitos do ambiente espacial sobre um problema real enfrentado em missões tripuladas de longa duração: a germinação de sementes em condições de microgravidade.

1.4 Objetivo Geral

O objetivo geral desta monografia é desenvolver um modelo preliminar de câmara de cultivo, equipada com sensores e sistemas simplificados, para simular a germinação de sementes por meio de um Clinostato. O modelo proposto é concebido como ponto de partida para adaptações futuras que possibilitem sua utilização em CubeSats.

1.5 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Apresentar os conceitos relacionados à microgravidade e seus efeitos biológicos.
- Demonstrar o impacto do projeto no avanço das pesquisas sobre germinação em ambiente espacial.
- Contribuir para o cumprimento dos objetivos estratégicos do PNAE 2022 (AEB, 2022), alinhando o projeto ao Programa Artemis da NASA, reforçando a colaboração brasileira em pesquisa agrícola espacial e o desenvolvimento de tecnologias de cultivo em ambientes fechados, com potencial impacto positivo tanto para a agricultura espacial quanto terrestre (EMBRAPA, 2023).
- Desenvolver sistemas capazes de fornecer maior autonomia para a câmara de cultivo projetada.
- Testar a câmara de cultivo e seus sistemas durante a simulação de microgravidade utilizando o Clinostato.
- Relatar e analisar possíveis alterações observadas durante os experimentos.

1.6 Metodologia

A metodologia deste trabalho consistiu no desenvolvimento e na aplicação de um sistema experimental para a investigação da germinação e do crescimento radicular de sementes de rabanete sob condições de clinorotação, com simulação de microgravidade. Para isso, foi construída uma câmara de cultivo compatível com a operação em um clinostato tridimensional, permitindo a fixação das sementes em substrato inerte de espuma floral, bem como a integração de sistemas de iluminação, irrigação, monitoramento ambiental e aquisição de imagens.

Os experimentos foram conduzidos com 24 sementes por ensaio, distribuídas de forma uniforme no substrato, permanecendo fixas durante todo o período experimental. Cada ensaio teve duração aproximada de sete dias, com iluminação constante fornecida por LEDs brancos neutros e irrigação controlada, realizada por meio da administração de 2 ml de água a cada 12 horas. A temperatura interna da câmara foi monitorada continuamente ao longo dos experimentos, sem controle ativo.

A simulação de microgravidade foi realizada por meio da operação contínua de um clinostato 3D, responsável por alterar a orientação do vetor gravitacional percebido pelas plantas. Paralelamente, foram realizados experimentos em uma câmara de cultivo

idêntica, operando sem clinorotação, a fim de constituir um grupo controle. Durante todo o período experimental, foram adquiridas imagens a cada 10 minutos, possibilitando o acompanhamento do processo de germinação e do desenvolvimento radicular.

O sistema experimental foi automatizado por meio do desenvolvimento de códigos dedicados à aquisição de dados de temperatura e à sincronização da captura de imagens. Ao término dos experimentos, foi realizada uma análise qualitativa do crescimento das raízes, comparando-se os padrões observados nos ensaios com e sem clinorotação, com base em referenciais teóricos relacionados à influência do vetor gravitacional no desenvolvimento vegetal.

1.7 Organização do Trabalho

O trabalho é desenvolvido em cinco capítulos, nos quais o processo de desenvolvimento da câmara de cultivo é apresentado no Capítulo 3, enquanto os resultados são discutidos no Capítulo 4. Os capítulos anteriores têm o objetivo de contextualizar o cenário aeroespacial e fundamentar a germinação em microgravidade, atendendo aos demais objetivos propostos.

Os capítulos estão organizados da seguinte forma:

- Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica e Referencial Teórico: aborda os principais fatores presentes no ambiente espacial, complementados pelo Apêndice A, seguido da explicação do funcionamento de um clinostato, do conceito de missão espacial e da relação da Agência Espacial Brasileira (AEB) nesse contexto, além da apresentação de missões que realizaram experimentos de germinação em ambiente espacial. O capítulo também discute fatores relevantes para a germinação de plantas.
- Capítulo 3 – Desenvolvimento da Câmara de Cultivo: descreve todas as etapas adotadas para o projeto e a construção da câmara de cultivo utilizada nos experimentos, bem como os critérios empregados para a escolha das sementes ao final do capítulo.
- Capítulo 4 – Resultados Experimentais: apresenta os resultados de germinação obtidos com a utilização da câmara de cultivo operando com e sem clinorotação, bem como a comparação qualitativa entre os resultados.
- Capítulo 5 – Conclusão: apresenta as conclusões referentes ao desenvolvimento do trabalho, avaliando o atendimento aos objetivos propostos.

2 Revisão Bibliográfica e Referencial Teórico

O presente capítulo aborda os principais fundamentos teóricos necessários para a compreensão do trabalho desenvolvido. Inicialmente, a Seção 2.1 (Ambiente Espacial) apresenta o conceito de microgravidade e os fatores associados a esse ambiente, sendo complementada pelo Apêndice A, que aprofunda os conceitos físicos envolvidos. Em seguida, a Seção 2.2 (Clinostato) descreve o funcionamento do aparato experimental utilizado, cujo princípio de operação baseia-se na alteração contínua da percepção do vetor gravitacional ao qual o experimento é submetido.

A Seção 2.3 (Missão Espacial) introduz os conceitos fundamentais relacionados a missões espaciais e discute como a germinação de plantas em ambiente espacial pode contribuir para o suporte à vida em missões de longa duração, bem como sua relação com iniciativas da Agência Espacial Brasileira (AEB) no contexto do Programa Artemis. Por fim, a Seção 2.4 (Germinação em Ambiente Espacial) apresenta os principais conceitos associados ao desenvolvimento vegetal, os quais servem de base para a definição dos parâmetros adotados no projeto e na operação da câmara de cultivo desenvolvida neste trabalho.

2.1 Ambiente espacial

A compreensão do ambiente espacial e de suas condições extremas é fundamental para a definição dos requisitos necessários ao desenvolvimento de sistemas e missões espaciais (WERTZ, 2011).

De acordo com Ley, Wittmann e Hallmann (2009), o ambiente espacial é composto por diversas interações entre astros, como o Sol e a Terra, e por condições físicas que vão muito além daquelas às quais estamos acostumados na atmosfera terrestre, podendo comprometer a integridade de espaçonaves e satélites, tais como:

- A Gravidade e a Condição de Microgravidade
- Radiação
- Vácuo
- Colisão com detritos espaciais

Essas condições devem ser avaliadas e verificadas no início da fase de projeto quanto ao seu impacto na missão, pois contribuem fundamentalmente para as decisões tomadas

em relação à definição da órbita, orçamento, sistemas de controle térmico e seleção de componentes e materiais.

O referencial teórico desta seção apoia-se, em grande parte, nos conceitos apresentados por Maini e Agrawal (2011) e na obra Handbook of Space Technology de Ley, Wittmann e Hallmann (2009). Ao longo desta seção são analisados os fenômenos relacionados à gravidade e à condição de microgravidade. Os conceitos de radiação, vácuo e colisões entre detritos espaciais são detalhados no Apêndice A.

2.1.1 A gravidade e a condição de microgravidade

A gravidade é uma das forças fundamentais da natureza e, assim como a força eletrostática de Coulomb, atua a longas distâncias. No entanto, enquanto os campos elétricos exercem influência apenas sobre corpos eletricamente carregados ou polarizáveis, o campo gravitacional afeta todos os corpos que possuem massa. Essa interação ocorre com a chamada massa gravitacional, que está relacionada à força da gravidade, em oposição à massa inercial, que descreve a resistência do corpo à mudança de seu estado de movimento (MAINI; AGRAWAL, 2011).

O fato de a gravidade atuar a grandes distâncias implica que o campo gravitacional da Terra se estende significativamente para além de sua superfície. Um exemplo claro é a Estação Espacial Internacional (ISS), que, mesmo estando em órbita, ainda se encontra sob cerca de 90% da intensidade do campo gravitacional terrestre presente ao nível do mar. Isso significa que a condição de aparente ausência de peso observada por astronautas não se deve à inexistência de gravidade nesse ambiente, mas sim a uma situação dinâmica de queda livre contínua (LEY; WITTMANN; HALLMANN, 2009).

A condição de microgravidade é explicada melhor ao se considerar o referencial adotado. Por exemplo, se uma pessoa estivesse dentro de um elevador cujos cabos tivessem se rompido, tanto ela quanto qualquer objeto solto dentro do elevador estariam em queda livre. Para a pessoa, os objetos pareceriam não se mover, flutuando ao seu redor. No entanto, um observador externo veria tanto a pessoa quanto os objetos acelerando para baixo devido à gravidade (LEY; WITTMANN; HALLMANN, 2009). Nesse contexto, o observador externo está em um referencial inercial, enquanto a pessoa no elevador encontra-se em um referencial acelerado.

Para que as leis de Newton sejam aplicáveis em referenciais acelerados, é necessário introduzir uma força adicional denominada força fictícia de inércia, a qual se opõe à aceleração do sistema. Essa força para um referencial acelerado em translação é expressa por:

$$\vec{F}_f = -m \cdot \vec{a}_s \quad (2.1)$$

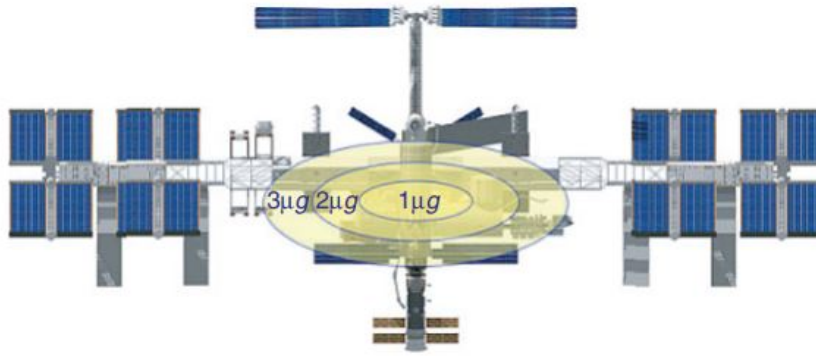


Figura 1 – Curvas de nível de gravidade residual na ISS, vistas no sentido oposto à trajetória de voo

Fonte: [Ley, Wittmann e Hallmann \(2009\)](#).

onde \vec{a}_s é a aceleração do referencial em relação ao referencial inercial e m a massa do corpo em análise.

Assim, a equação do movimento de uma massa m em um referencial acelerado com coordenadas \vec{r}' pode ser escrita como:

$$m \cdot \vec{a}' = \vec{F} + \vec{F}_f \quad (2.2)$$

sendo \vec{a}' a aceleração observada no referencial acelerado e \vec{F} a força real atuando sobre o corpo.

Aplicando isso ao caso do elevador em queda, temos: $\vec{a} = -\vec{g}$ e $\vec{a}_s = -\vec{g}$, em que \vec{g} é aceleração gravitacional e \vec{a} a aceleração absoluta do corpo, medida em um referencial inercial, resultando em $\vec{a}' = 0$. Isso explica a condição de microgravidade sentida no interior do elevador. Essa mesma formulação se aplica a ambientes controlados, como a torre de queda ZARM, voos parabólicos e veículos espaciais orbitando a Terra, como a própria ISS ([BRICKHOUSE, 2020](#)).

A chamada condição de microgravidade, válida de forma ideal apenas para pontos materiais, se torna mais complexa quando aplicada a corpos extensos, como a Estação Espacial Internacional (ISS) (1). Nesses casos, a compensação exata das forças gravitacionais e centrífugas só ocorre ao longo de uma linha específica, aproximadamente coincidente com a trajetória do centro de gravidade da estação em um plano perpendicular à direção de voo. Ao se afastar dessa linha central, surgem forças residuais da gravidade, o que caracteriza a microgravidade real do ambiente orbital ([LEY; WITTMANN; HALLMANN, 2009](#)).

Em altitudes próximas a 300 km acima da superfície terrestre, essas forças residuais podem atingir valores da ordem de $0,3 \cdot 10^{-6} g_0/m$ na direção radial e $0,1 \cdot 10^{-6} g_0/m$ na direção lateral, onde $g_0 = 9,81 \text{ m/s}^2$ representa a aceleração da gravidade ao nível do

mar. Esses valores revelam que, mesmo em órbita, a eliminação completa dos efeitos gravitacionais não é possível (LEY; WITTMANN; HALLMANN, 2009).

Além dessas limitações geométricas, outros fatores contribuem para a presença contínua da gravidade residual. Um dos mais significativos é o arrasto atmosférico: embora a atmosfera seja extremamente rarefeita nessa altitude, a resistência do ar ainda afeta a ISS. Esse efeito depende da densidade residual do ar, do atrito da estrutura com o fluxo atmosférico e do coeficiente de arrasto do veículo, resultando em forças da ordem de $10^{-6}g_0$. Plataformas experimentais específicas empregam sistemas de propulsão a gás frio para compensar esse tipo de perturbação (MAINI; AGRAWAL, 2011).

Há também fontes dinâmicas de microgravidade, associadas a eventos temporais variáveis, como o acionamento de propulsores de controle de atitude ou o movimento dos astronautas. De acordo com a terceira lei de Newton, toda ação gera uma reação de igual intensidade, resultando em impulsos transmitidos ao veículo espacial. Essas perturbações podem atingir amplitudes superiores a $10^{-3}g_0$, afetando significativamente a estabilidade dos experimentos. Por isso, o projeto de subsistemas espaciais busca minimizar tais interferências por meio de técnicas como o isolamento ativo da carga útil, exemplificado pelo sistema ARIS (Sistema Ativo de Isolamento Vibracional de Rack) utilizado na ISS (LEY; WITTMANN; HALLMANN, 2009).

Mesmo com a adoção dessas medidas, não é possível eliminar completamente as perturbações presentes no ambiente espacial. Dessa forma, uma estratégia complementar consiste no planejamento criterioso do cronograma experimental, de modo a evitar que distúrbios coincidam com etapas críticas dos experimentos, abordagem conhecida como *timelining*.

De maneira geral, experimentos que demandam níveis mais rigorosos e estáveis de microgravidade devem ser conduzidos fora da Estação Espacial Internacional (ISS), em plataformas espaciais não tripuladas e dedicadas exclusivamente à realização de pesquisas científicas de alta precisão.

A condição de equilíbrio dinâmico de um satélite em órbita circular pode ser analisada a partir da força centrípeta, responsável por manter o corpo em trajetória orbital, expressa por:

$$F_c = m \cdot \omega^2 \cdot R \quad (2.3)$$

em que m representa a massa do satélite, ω a velocidade angular orbital e R o raio da órbita em relação ao centro da Terra. Essa força deve equilibrar a força gravitacional terrestre, dada por:

$$F_g = -\frac{G \cdot M \cdot m}{R^2} \quad (2.4)$$

onde G é a constante gravitacional universal e M corresponde à massa da Terra. Ao se

igualarem as magnitudes das forças centrípeta e gravitacional, obtém-se:

$$\omega^2 \cdot R^3 = G \cdot M = \text{constante} \quad (2.5)$$

Essa relação constitui uma forma da terceira lei de Kepler, a qual estabelece que o quadrado do período orbital, definido como $T = 2\pi/\omega$, é proporcional ao cubo do raio da órbita. Esse princípio é fundamental para a compreensão do equilíbrio dinâmico de satélites artificiais e para a manutenção da condição de microgravidade em órbita (LEY; WITTMANN; HALLMANN, 2009).

Os organismos vivos, especialmente durante a germinação, apresentam maior sensibilidade à ausência de gravidade. Isso se deve ao fato de que a germinação envolve etapas críticas que dependem de processos físicos e bioquímicos mediados por fluidos, como a absorção de água, o transporte de nutrientes e gases, e o estabelecimento da orientação gravitacional (VOGT; MORENO; COUNTRYMAN, 2012).

Por outro lado, os líquidos são extremamente sensíveis à gravidade, devido à presença de superfícies livres e à incapacidade de sustentar tensões de cisalhamento. Por esse motivo, a maioria dos experimentos em microgravidade na área de materiais concentra-se nos estados líquidos e, em menor escala, gasosos. Em ambiente verdadeiramente microgravitacional, um líquido não escoar nem se deposita, ele flutua, sem a necessidade de recipientes. Além disso, fenômenos como flutuação, sedimentação e convecção (mais precisamente, convecção por empuxo) deixam de ocorrer, permitindo a observação clara de processos normalmente ocultos por essas interferências gravitacionais (LEY; WITTMANN; HALLMANN, 2009).

Existem instrumentos para simulação de microgravidade utilizados em solo para a realização de pesquisas científicas, permitindo estudos sobre células, microorganismos e plantas (ALVES, 2013). Esses dispositivos possibilitam avaliar como a alteração na orientação do vetor gravitacional influencia reações bioquímicas e processos de desenvolvimento dessas estruturas. Um desses instrumentos é o Clinostato, um aparato experimental que utiliza a rotação contínua do eixo de amostragem. Nesse equipamento, não é criada uma microgravidade real, mas sim modificada a forma como a amostra percebe o vetor gravitacional, devido à mudança contínua de sua orientação ao longo do tempo (DEDOLPH; DIPERT, 1971). Assim, o Clinostato não remove por completo os efeitos gravitacionais, mas reduz a direção fixa do vetor gravitacional, produzindo um ambiente que simula alguns dos efeitos do ambiente de microgravidade.

A microgravidade simulada por Clinostato já foi empregada em estudos com plantas, incluindo experimentos com microverdes realizados por Metelli (2021) utilizando um Clinostato 1D, e os trabalhos de Colla et al. (2007), que investigou o desenvolvimento de tomates-cereja. Nesse último estudo, foram observadas alterações significativas nas características morfológicas das plantas, incluindo redução de peso, diminuição do tamanho

das raízes e menor rendimento dos frutos, evidenciando o impacto da ausência de uma orientação gravitacional fixa sobre o desenvolvimento vegetal.

Após compreender a origem da microgravidade, torna-se essencial avaliar por que esse ambiente é relevante para experimentos de germinação no espaço e até que ponto os distúrbios residuais, sejam constantes ou dinâmicos, podem ser tolerados sem comprometer os processos biológicos.

2.2 Clinostato

Os Clinostatos são dispositivos de compensação gravitacional que submetem plantas a um dos fenômenos envolvidos na microgravidade que é a percepção do vetor gravitacional. Eles vêm sendo utilizados desde 1879, quando o botânico alemão Julius von Sachs inventou o clinostato para estudar os efeitos da luz e da gravidade sobre o movimento das plantas em crescimento. Sachs foi contemporâneo de Charles Darwin e trocou muitas correspondências com ele sobre esses temas. Darwin e seu filho, Francis, também utilizaram clinostatos para investigar o crescimento das plantas (VOGT; MORENO; COUNTRYMAN, 2012).

O Clinostato possui variações em sua estrutura, podendo ser constituído por um ou mais eixos, no qual o modelo de um eixo é chamado Clinostato 1D (Figura 2), enquanto o modelo com dois ou três eixos é chamado de Clinostato 3D (Figura 3), por conseguir realizar a durante seu funcionamento a varredura de dois planos distintos durante sua movimentação ((BRICKHOUSE, 2020)). Esse movimento rotacional entre os eixos costuma ter velocidade constante, podendo ser de rotação baixa ou alta, em que a baixa rotação realiza movimentos próximas a 2 e 4 rpm. Essa rotação depende do experimento a ser feito, que depende de como o seu sistema biológico se adapta as mudanças da percepção do vetor gravitacional ((VOGT; MORENO; COUNTRYMAN, 2012)), velocidade das reações bioquímicas e controle do efeito de centrifugação (DEDOLPH; DIPERT, 1971).



Figura 2 – Clinóstato de eixo único (1D)
Fonte: Metelli (2021).



Figura 3 – Clinóstato 3D do Laboratório de Medicina Espacial e Farmacologia Espacial, Universidade de Aarhus, Dinamarca.

Fonte: Grimm (2013).

O Clinostato 3D possui dois eixos de movimentação principal, um responsável pela rotação do anel externo, realizando um movimento de revolução, enquanto o anel interno realiza o movimento de rotação do experimento. Esse Clinostato pode conter um terceiro eixo em um anel mais interno, utilizado como eixo desorientador, aumentando a aleatoriedade do vetor gravitacional (DEDOLPH; DIPERT, 1971) (ALVES, 2013). O terceiro eixo nem sempre é utilizado em experimentos, podendo ser fixo durante o experimento em análise.

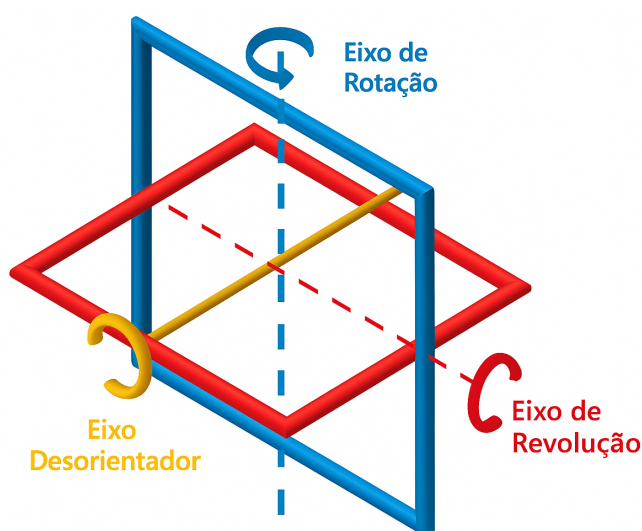


Figura 4 – Esquemático da rotação dos eixos em um Clinostato 3D com três eixos controláveis.

Fonte: Alves (2013).

2.2.1 Controle da velocidade entre os eixos como parâmetro de otimização

Este tópico busca abordar como a alteração da relação entre as velocidades dos motores afeta a percepção do campo gravitacional. Por meio de análises experimental e computacional, é investigada a melhor combinação entre as velocidades angulares, com o objetivo de maximizar os efeitos da forma como o experimento percebe o vetor gravitacional, obtendo-se uma relação ideal entre as velocidades do anel externo e do anel interno na proporção de 4:1,8.

A otimização é baseada na obtenção de uma maior randomização do vetor normal formado entre a amostra e o vetor gravitacional (KIM et al., 2016). Esse vetor, em função do movimento combinado dos dois eixos, descreve diferentes trajetórias circulares (Figura 5) sobre uma esfera imaginária quando adotado um referencial solidário ao corpo, conforme ilustrado na Figura 6.

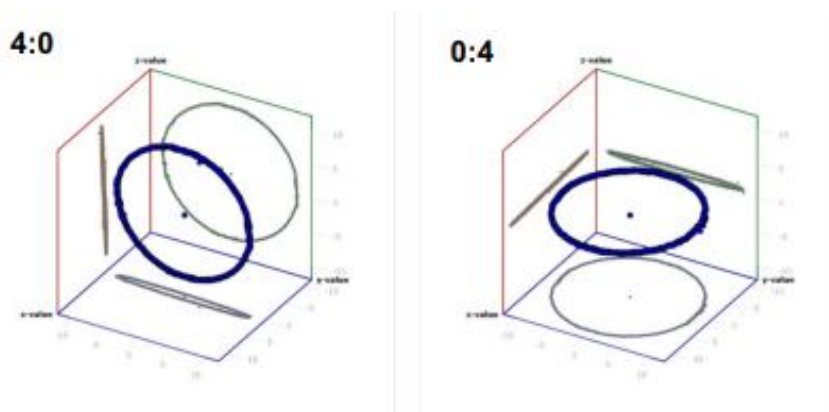


Figura 5 – Trajetória do movimento da ponta do vetor gravitacional avaliando os motores separadamente

Fonte: Kim et al. (2016).

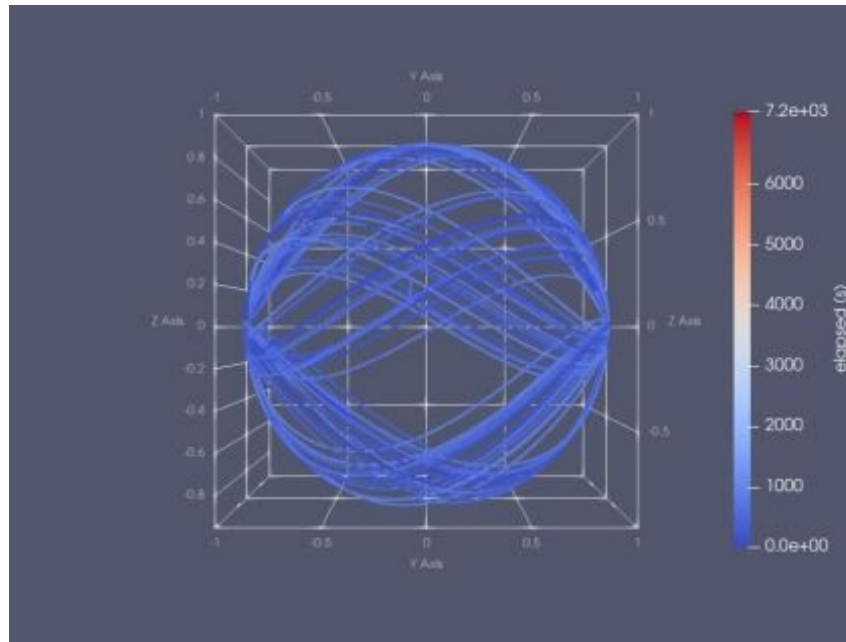


Figura 6 – Trajetória do movimento da ponta do vetor gravitacional sobre uma esfera imaginária para 15 minutos de simulação a uma distância de 35 mm do centro
Fonte: Yotov et al. (2022).

A maior randomização desse vetor segundo (YOTOV et al., 2022), preenchendo uma grande área externa dessa esfera imaginária (Figure 7), foi encontrado utilizando a rotação de $\omega_{\phi z} = 0,157[\text{rad}/s]$ e $\omega_{\phi x} = 0,262[\text{rad}/s]$.

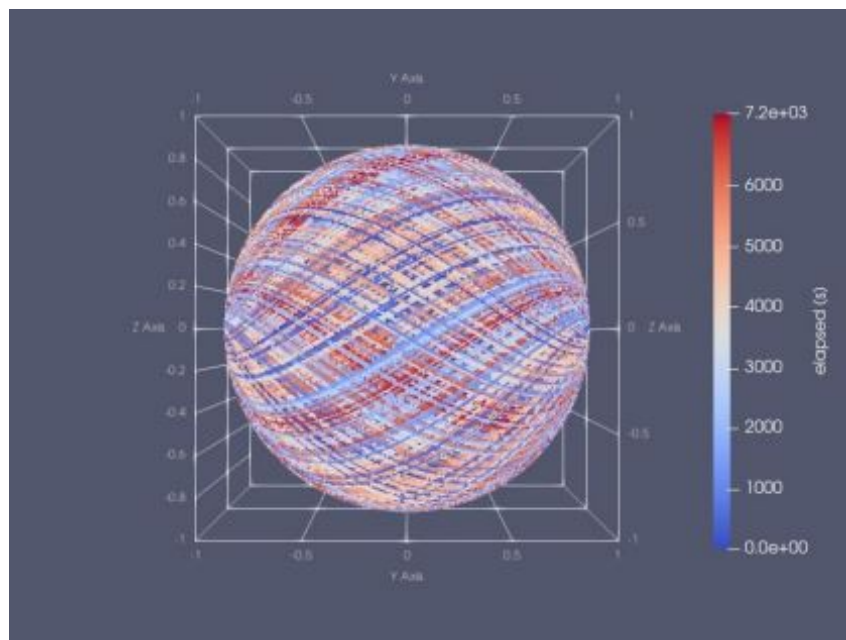


Figura 7 – Trajetória do movimento da ponta do vetor gravitacional sobre uma esfera imaginária para 2 horas de simulação a uma distancia de 35 mm do centro
Fonte: Yotov et al. (2022).

Já Kim et al. (2016) relata que encontrou para o caso a melhor proporção des-

crita como sendo 4:1,8. Apresentando como resultado a figura 8 , relacionando diferentes proporções analisadas numericamente.

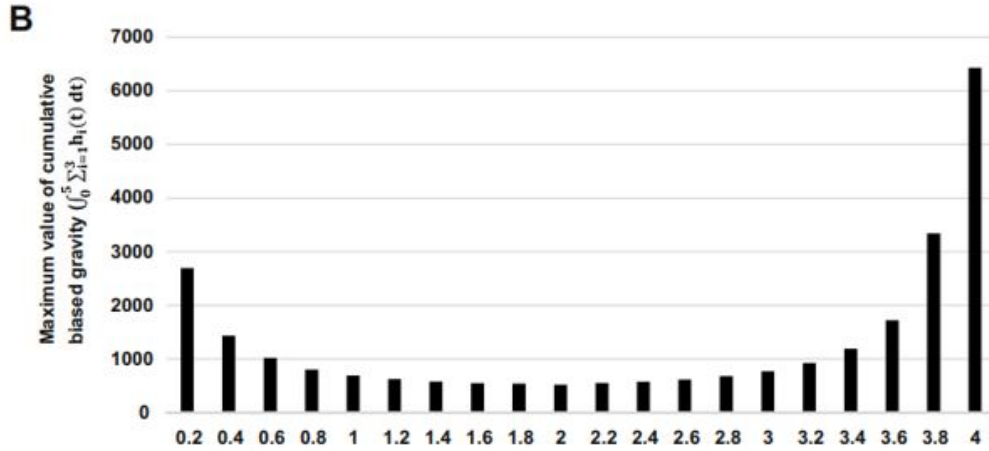


Figura 8 – Valores máximos do vetor gravidade cumulativo com diferentes velocidades de rotação ao longo de 5 minutos.

Fonte:: Sun Myong Kim [Metelli \(2021\)](#).

As equações que descrevem esses resultados descritos por [Kim et al. \(2016\)](#), são apresentadas no decorrer dessa seção. Em que todas as equações utilizadas até o final da seção, são resultantes do trabalho de apresentado por Sun Myong.

Em primeiro momento é considerado um vetor arbitrário \vec{A} , localizado na origem do sistema de coordenadas que gira a uma velocidade angular $\vec{\omega}$, o que altera o vetor ao longo do tempo:

$$\frac{d\vec{A}}{dt} = \vec{\omega} \times \vec{A} \quad (2.6)$$

$$\vec{\omega} = \vec{\omega}' + \vec{\omega}'' \quad (2.7)$$

Nosso vetor velocidade angular é composto por duas velocidade de rotação independentes $\vec{\omega}'$ e $\vec{\omega}''$. Em que no sistema de coordenadas adotado representam a rotação no sistema de coordenadas S , que está em repouso na Terra (observador), e rotação em torno do eixo x' no sistema de coordenadas S' , respectivamente. Considerando a rotação com o ângulo ϕ em torno do eixo z , a rotação em torno do eixo z de S para S' pode ser expressa como:

$$R(\phi) = \begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

Os vetores unitários resultantes no referencial rotacional representados no reerencial rotacional passam a ser:

$$\begin{pmatrix} \hat{e}'_1 \\ \hat{e}'_2 \\ \hat{e}'_3 \end{pmatrix} = R(\varphi) \begin{pmatrix} \hat{e}_1 \\ \hat{e}_2 \\ \hat{e}_3 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{aligned} \hat{e}'_1 &= \hat{e}_1 \cos \varphi + \hat{e}_2 \sin \varphi, \\ \hat{e}'_2 &= -\hat{e}_1 \sin \varphi + \hat{e}_2 \cos \varphi, \\ \hat{e}'_3 &= \hat{e}_3. \end{aligned} \quad (2.9)$$

Em que \hat{e}_1 , \hat{e}_2 e \hat{e}_3 , são vetores unitários nas direções dos eixos x , y e z , respectivamente do sistema S , e \hat{e}'_1 , \hat{e}'_2 e \hat{e}'_3 .

Utilizando a definição de velocidade angular que é constante para condição inicial, $\phi = 0$ em $t = 0$, podemos escrever ϕ como

$$\omega' = \frac{d\varphi}{dt} \Rightarrow \varphi(t) = \omega' t \quad (\text{se } \omega' \text{ é constante}) \quad (2.10)$$

Uma vez que qualquer vetor pode ser expresso em termos de vetores unitários no sistema de coordenadas, podemos escrever ω' e ω'' em seus respectivos sistemas de coordenadas:

$$\varphi(t) = \omega' \hat{e}_3 \quad (2.11)$$

$$\omega'' = \omega'' \hat{e}'_1 = (\omega'' \cos(\omega' t), \omega'' \sin(\omega' t), 0) \quad (2.12)$$

Com forma final da velocidade angular dada por:

$$\omega = (0, 0, \omega') + (\omega'' \cos(\omega' t), \omega'' \sin(\omega' t), 0) \quad (2.13)$$

$$\omega = (\omega'' \cos(\omega' t), \omega'' \sin(\omega' t), \omega') \quad (2.14)$$

A direção normal do vetor gravitacional com as amostras \vec{A} , é alterado durante o movimento de rotação, obtendo a seguinte equação.

$$\frac{d\vec{A}}{dt} = \omega \times \vec{A} = \begin{vmatrix} \hat{e}'_1 & \hat{e}'_2 & \hat{e}'_3 \\ \omega'' \cos(\omega' t) & \omega'' \sin(\omega' t) & \omega' \\ A_1 & A_2 & A_3 \end{vmatrix} \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned}
 \frac{dA_1}{dt} &= \omega'' \sin(\omega't) A_3 - \omega' A_2, \\
 \frac{dA_2}{dt} &= \omega' A_1 - \omega'' \cos(\omega't) A_3, \\
 \frac{dA_3}{dt} &= \omega'' \cos(\omega't) A_2 - \omega' \sin(\omega't) A_1.
 \end{aligned}
 \tag{2.16}$$

A solução para a sistema de equações 2.16, podem ser resolvidas numericamente, escolhendo razões entre as velocidades angulares analisadas. Traçando o vetor normal para vários valores da razão.

A solução numérica necessita de um critério para julgar qual proporção entre as velocidades produz uma percepção mais aleatória do vetor gravitacional. Sun Myong utilizou das Equações 2.17, 2.18 e 2.19, em que observou que a não-direcionalidade seria melhor para o caso em que h torna-se menor para um dado tempo t , propondo calcular esse valor utilizando a Equação 2.20.

$$h_1(t) = \int_0^t A_1(t) dt \tag{2.17}$$

$$h_2(t) = \int_0^t A_2(t) dt \tag{2.18}$$

$$h_3(t) = \int_0^t A_3(t) dt \tag{2.19}$$

$$\int_0^5 \sum_{i=1}^3 h_i(t) dt \tag{2.20}$$

2.3 Missão Espacial

2.3.1 Conceito e importância

Uma missão espacial é descrita como uma operação bem planejada e estruturada, de caráter exploratório, científico, militar, comercial ou com outra finalidade ligada ao setor espacial. Seu planejamento e execução são realizados com base em objetivos bem definidos (WERTZ, 2011), podendo envolver desde sistemas de observação da Terra para monitoramento ambiental e estudo de corpos celestes até o desenvolvimento de tecnologias voltadas à avaliação dos efeitos da microgravidade em organismos vivos.

Além dos objetivos já citados, a variedade de missões espaciais proporciona uma lista com diferentes classificações, que segundo Wertz (2011) e Ley, Wittmann e Hallmann (2009) podem ser divididos em:

- **Exploração espacial:** abrange missões destinadas a investigar corpos celestes, como planetas, luas, asteroides e cometas, além de estudar fenômenos no espaço profundo.
- **Observação astronômica:** envolve o uso de telescópios espaciais para estudar estrelas, galáxias e outros objetos celestes em diferentes comprimentos de onda, como infravermelho, ultravioleta, raios X e gama.
- **Missões de transporte espacial:** focadas no lançamento e entrega de cargas úteis, como satélites, componentes para estações espaciais ou missões tripuladas para outros corpos celestes.
- **Sensoriamento remoto:** inclui a coleta de dados para monitorar e mapear a superfície terrestre, sua atmosfera e oceanos, utilizando satélites equipados com sensores, com aplicações em áreas como agricultura, urbanismo e monitoramento ambiental.
- **Monitoramento climático:** objetiva a coleta de informações sobre padrões climáticos globais e a análise de mudanças climáticas para previsões meteorológicas mais precisas.
- **Tecnologias de comunicação:** abrange satélites que permitem a transmissão de sinais para rádio, televisão, telefonia e internet, com foco em ampliar a conectividade global.
- **Navegação:** sistemas como GPS, Galileo e GLONASS fornecem dados precisos de posicionamento e sincronização para aplicações em transporte, agricultura, logística e defesa.
- **Missões de defesa:** envolvem o uso de satélites para observação estratégica, comunicação e navegação com fins militares, além da proteção de ativos espaciais e da segurança nacional.
- **Teste de tecnologias:** missões voltadas à validação de novos sistemas e componentes sob condições reais do ambiente espacial. Esses testes podem incluir sistemas de propulsão, comunicação ou técnicas de detecção.

A importância das missões espaciais vai além dos objetivos diretos de exploração ou experimentação. Essas iniciativas têm sido fundamentais para o avanço tecnológico em várias áreas. De acordo com [Wertz \(2011\)](#), a busca por soluções inovadoras para desafios específicos do ambiente espacial, como o controle térmico, a diminuição de componentes e a eficiência energética, resultam em aplicações que beneficiam diretamente a população. Tecnologias originalmente desenvolvidas para o espaço, como os sistemas de posicionamento global (GPS), avanços na comunicação via satélite e materiais de alta performance,

estão presentes na vida das pessoas de maneira direta ou indireta, sendo indispensáveis em diversas aplicações.

Além disso, missões espaciais estimulam o progresso científico e a cooperação internacional. A exploração de Marte, por exemplo, impulsiona a pesquisa sobre habitabilidade em outros planetas, enquanto programas como a Estação Espacial Internacional (ISS) promovem colaborações entre nações, unindo esforços e recursos para alcançar metas comuns. [Wertz \(2011\)](#) destaca que o impacto dessas missões não se limita aos resultados materiais, mas inclui também a inspiração para o desenvolvimento

2.3.2 Relação da AEB no desenvolvimento de missões

Segundo o portal oficial do Governo Federal [Brasil \(2024\)](#), a Agência Espacial Brasileira (AEB) foi criada pela Lei nº 8.854, de 10 de fevereiro de 1994, com o objetivo de promover a autonomia do setor espacial nacional e coordenar o desenvolvimento de atividades espaciais de interesse estratégico. Sua atuação é guiada pela Política Nacional de Desenvolvimento das Atividades Espaciais (PNDAE), estabelecida pelo Decreto nº 1.332/1994, tendo como principal instrumento de planejamento o Programa Nacional de Atividades Espaciais (PNAE), vigente no período de 2022 a 2031.

Antes de apresentar o conceito oficialmente estabelecido do PNAE, é importante distinguir dois termos frequentemente utilizados no setor espacial brasileiro: PNAE e PEB. Essa distinção é enfatizada no próprio documento do Programa Nacional de Atividades Espaciais (PNAE) ([AEB, 2022](#)).

“O PNAE compreende o conjunto de atividades espaciais que a Agência Espacial Brasileira propõe. Contudo, o termo Programa Espacial Brasileiro, ou PEB, coloca-se, historicamente, como algo mais abrangente. Mesmo sem uma formalização específica, uma vez que a PNDAE define o conjunto de atividades espaciais como o Programa Espacial do País, compreende-se, usualmente, o conceito de Programa Espacial Brasileiro como a junção das diversas iniciativas que, mesmo independentemente, ocorrem em todo o território nacional. Além do próprio PNAE, são universidades com os seus programas de pesquisa, indústrias que se capacitam para as novas tendências de empreendedorismo privado nas atividades espaciais, startups que surgem a partir do empenho de jovens profissionais, entre outras tendências, que traduzem as correntes de atuação no contexto das atividades espaciais nacionais.” ([AEB, 2022](#), p. 14)

O PNAE 2022–2031 estabelece os objetivos e diretrizes da Política Espacial Brasileira, com base na Política Nacional de Desenvolvimento das Atividades Espaciais (PNDAE). O documento busca promover o desenvolvimento de atividades espaciais que gerem

benefícios concretos à sociedade, contribuindo para o fortalecimento da soberania nacional, a melhoria da qualidade de vida e o avanço tecnológico do país.

Nesse contexto, são estabelecidos os Objetivos Estratégicos de Espaço (OEEs), que orientam o planejamento e a execução das missões espaciais brasileiras (AEB, 2022). De acordo com o PNAE 2022–2031, os OEEs totalizam sete, descritos a seguir:

- **OEE.1** – Estabelecer, desenvolver e manter um Programa Espacial Brasileiro de Estado, com garantia de recursos de curto, médio e longo prazos.
- **OEE.2** – Promover o atendimento efetivo às necessidades da sociedade e do Estado em geral.
- **OEE.3** – Desenvolver a indústria nacional de forma a consolidá-la competitivamente nos mercados de bens e serviços espaciais, gerando benefícios socioeconômicos ao país.
- **OEE.4** – Estimular negócios e o empreendedorismo no setor privado nacional para o desenvolvimento e a utilização de bens e serviços espaciais.
- **OEE.5** – Fomentar o desenvolvimento de competências científica, tecnológica e de inovação voltadas ao setor espacial.
- **OEE.6** – Garantir a não dependência no desenvolvimento e no controle dos sistemas espaciais nacionais.
- **OEE.7** – Consolidar de forma ativa, em todos os setores da sociedade, o entendimento sobre os benefícios diretos e indiretos, existentes e potenciais, do setor espacial para o Brasil.

Em novembro de 2023, o Brasil oficializou sua adesão ao programa Artemis da NASA, tornando-se um dos 27 países signatários comprometidos com o avanço da presença humana sustentável no espaço (EMBRAPA, 2023). Essa colaboração internacional representa uma oportunidade estratégica para o fortalecimento da ciência e tecnologia espacial nacional. A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) desempenha um papel de destaque nesse esforço, devido à sua expertise em agricultura tropical, capacidade de inovação tecnológica e uma sólida rede de mais de 30 pesquisadores distribuídos em 12 instituições parceiras (EMBRAPA, 2023). Nesse contexto, o desenvolvimento de pesquisas voltadas à criação de sistemas bioregenerativos, capazes de sustentar a vida humana em missões espaciais de longa duração, configura-se como uma importante contribuição brasileira para a missão Artemis. Tais iniciativas também atendem aos Objetivos Estratégicos Específicos (OEE) 5 e 7, promovendo a cooperação internacional e o avanço científico em benefício mútuo.

Outros exemplos do cumprimento dos objetivos estratégicos OEE.2 e OEE.5 podem ser observados em missões com nanossatélites. A missão SPORT (Scintillation Prediction Observation Research Task), um CubeSat 6U (Figura 9), tem como objetivo compreender os efeitos da ionosfera e da Anomalia Magnética do Atlântico Sul sobre comunicações aeroespaciais. Outro exemplo é o NanoMirax, um CubeSat 2U (Figura 10), desenvolvido para investigações astrofísicas na faixa de raios X (AEB, 2022).

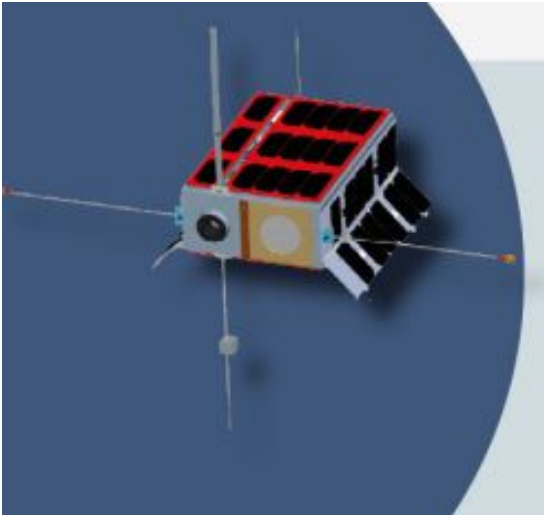


Figura 9 – Nanossatélite SPORT.

Fonte: AEB (2022).

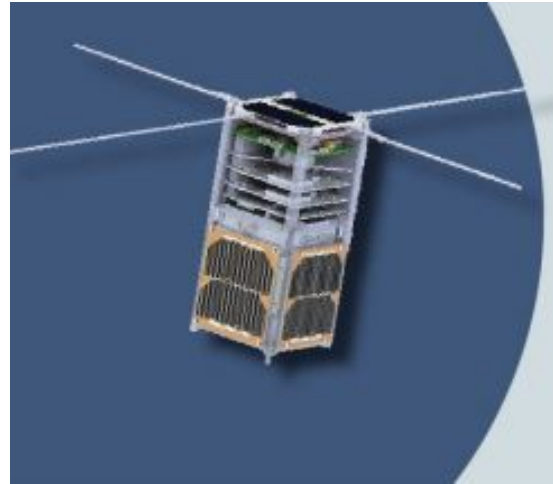


Figura 10 – Nanossatélite NanoMirax.

Fonte: AEB (2022).

2.3.3 Custos envolvendo missões

O custo de um sistema é influenciado por diversos fatores, como o objetivo da missão, os recursos humanos envolvidos, a complexidade, as dimensões, o peso e as inovações tecnológicas. Esse custo está relacionado aos parâmetros da espiral espacial (Figura 11), o que pode torná-lo extremamente elevado e, dependendo do grau de desenvolvimento, inviabilizar o projeto

A espiral espacial é um conceito utilizado para descrever um ciclo vicioso no desenvolvimento de missões espaciais e tecnologias relacionadas, associando confiabilidade, complexidade, cronograma e custo. A demanda por maior confiabilidade exige requisitos rigorosos e testes extensivos, o que aumenta o tempo necessário e resulta em cronogramas mais longos, reiniciando o processo e elevando ainda mais os custos (WERTZ, 2011).

Como exemplo do alto custo empregado no setor aeroespacial, destaca-se o programa Apollo, ocorrido em uma época em que a disponibilidade de recursos financeiros era relativamente ilimitada (WERTZ, 2011), tendo gasto, em 1970, o equivalente a 20 bilhões de dólares. Outra estimativa aponta que, até hoje, os Estados Unidos tenham investido valores bilionários em voos tripulados no espaço (LAFLEUR, 2010), incluindo programas com etapas adiadas, como o Artemis (REUTERS, 2024).



Figura 11 – A Espiral Espacial é um fator significativo para o aumento de custos e para cronogramas mais longos.

Fonte: Adaptado do [Wertz \(2011\)](#).

Devido ao elevado custo dessas missões, seus objetivos devem ser claramente definidos, e torna-se essencial avaliar se esses objetivos podem ser alcançados por soluções terrestres. Embora em alguns casos soluções em solo sejam viáveis, os fins científicos de missões de baixo custo podem justificar a elaboração de sistemas a serem lançados em órbita, mesmo que isso implique maiores investimentos.

2.3.4 Missões tripuladas e o cultivo de Plantas

O cultivo de plantas em missões espaciais tripuladas de longa duração é uma área de pesquisa essencial para sustentar a vida humana no espaço, especialmente em missões interplanetárias. Esse tipo de sistema pode fornecer oxigênio, alimentos e auxiliar no controle da qualidade do ar e da água, aspectos vitais para o sucesso de missões prolongadas ([FERL et al., 2002](#)). A seguir, destacam-se algumas missões espaciais de longo prazo que poderiam se beneficiar de um CubeSat focado na germinação em microgravidade:

Programa Artemis

O Programa Artemis visa retornar astronautas à Lua e estabelecer uma presença sustentável até 2027. A missão Artemis II, planejada para setembro de 2025, levará astronautas em um voo ao redor da Lua, enquanto a Artemis III, prevista para setembro de 2026, realizará o primeiro pouso tripulado próximo ao Polo Sul lunar ([NASA, 2024](#)).

Outra etapa futura do projeto Artemis, baseada no sucesso dos projetos de colonização lunar, é a missão de longa duração para Marte, prevista para 2030, que também pretende estabelecer uma colônia no planeta ([BRANDAO, 2022](#)).

As missões de colonização na Lua e em Marte, como as planejadas no âmbito do programa Artemis, exigem soluções de longo prazo para sustentar bases em outros planetas. Um sistema baseado no cultivo de plantas pode ser uma forma sustentável de fornecer alimentos e suporte à vida para os astronautas (FERL et al., 2002). A pesquisa sobre germinação em microgravidade pode contribuir para o entendimento dos efeitos de ambientes com gravidade reduzida (como a gravidade lunar) sobre o crescimento e a saúde das plantas, além de otimizar as condições para a produção de alimentos em uma base lunar.

Missão Mars Crew

A NASA planeja enviar astronautas a Marte na década de 2030 para realizar uma missão de longa duração com o objetivo de estudar o planeta vermelho de perto. A missão tripulada está programada para a década de 2030, com lançamento estimado entre 2031 e 2033. As missões devem durar entre 18 meses e 3 anos, considerando o tempo de ida, permanência e retorno à Terra (NASA, 2021).

Considerando a duração da missão e o desenvolvimento prolongado semelhante ao do programa Artemis, o uso de sistemas desenvolvidos em fases intermediárias poderia contribuir para o equilíbrio entre a tripulação e o progresso tecnológico, podendo ainda representar uma alternativa financeiramente mais viável.

2.3.5 Missões realizadas para o estudo de germinação em microgravidade

Os experimentos realizados no espaço envolvendo plantas variam desde recipientes simples, como placas de Petri escuras sem controle ambiental, até equipamentos sofisticados capazes de fornecer e monitorar luz, nutrientes e água (FERL et al., 2002). O avanço tecnológico permitiu observar diferenças na germinação das plantas, identificando e estudando problemas biofísicos decorrentes dos efeitos da microgravidade, da fisiologia vegetal e do processo de transdução de sinais, pelo qual a célula converte um estímulo externo em uma resposta interna.

A transdução de sinais em algumas plantas demonstrou alterações na divisão celular e na mitose durante os primeiros experimentos espaciais com vegetais. Exames citológicos realizados após o retorno à Terra revelaram que células de raízes de feijão-mungo e girassol, interrompidas durante a primeira divisão celular pós-voo, apresentaram uma redução significativa no número de divisões, além de anomalias e alterações cromossômicas, como quebras, deleções e translocações, que não foram observadas nas plantas do grupo controle cultivadas em solo (FERL et al., 2002). Essas alterações podem comprometer a estrutura e a função celular, afetando o crescimento, o desenvolvimento e até a viabilidade da planta ou do organismo como um todo.

Na Figura 12, a astronauta Peggy A. Whitson, oficial de ciência da NASA na Ex-

pedição 5 da ISS, segura o experimento de crescimento de soja do Advanced Astroculture no laboratório Destiny da ISS.



Figura 12 – Peggy A. Whitson Segurando o Experimento de Crescimento de Soja
Fonte: Vogt et al., (2012).

2.3.5.1 GreenCube

O projeto GreenCube, desenvolvido pela equipe de pesquisa S5Lab da Universidade de Roma "La Sapienza" com o apoio da ASI (Agência Espacial Italiana), tem como objetivo demonstrar um laboratório biológico autônomo para o cultivo de plantas a bordo de um CubeSat 3U (Figura 13). Lançado em 13 de julho de 2022 no voo inaugural do foguete Vega-C, o satélite foi inserido em órbita média (MEO), a cerca de 5800 km de altitude, passando por dentro do cinturão interno de Van Allen, com os altos níveis de radiação, carregando sementes de microverdes da família Brassicaceae para um experimento inédito de germinação em microgravidade a essa distância (S5Lab – Sapienza University of Rome and partners, 2022).

A carga principal do CubeSat consiste em uma cápsula pressurizada de 20 x 10 x 10 cm, equipada com sensores e atuadores para monitoramento e controle ambiental, incluindo um sistema autônomo de medição da composição do ar, umidade, pressão, recirculação de ar e iluminação. O crescimento das plantas também é acompanhado por câmeras ópticas nas faixas visível e infravermelha. Além disso, o sistema de comunicação opera em duas bandas (UHF e S-band), permitindo transmissão a distâncias superiores às habituais em missões LEO. O satélite ainda conta com uma carga secundária, desenvolvida pela Universidade de Stuttgart: um propulsor a plasma pulsado (PETRUS), utilizado como sistema auxiliar de controle de atitude, integrado ao volume adicional do CubeSat (S5Lab – Sapienza University of Rome and partners, 2022).

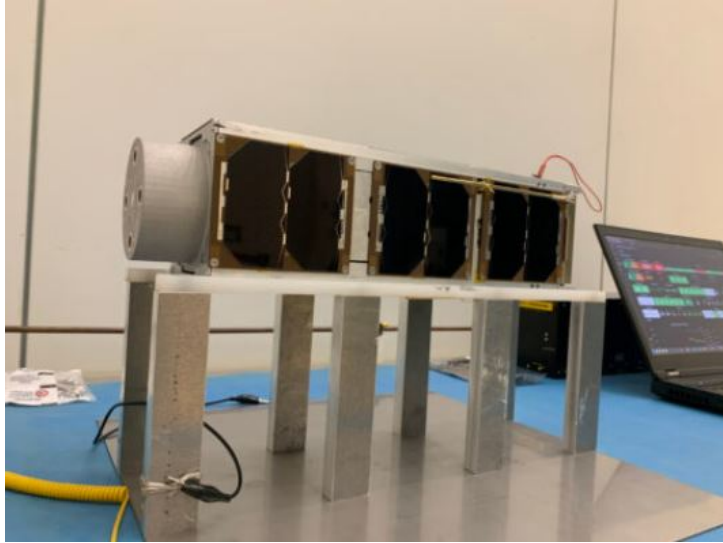


Figura 13 – CubeSat 3U desenvolvido pela equipe S5Lab
Fonte: S5Lab – Sapienza University of Rome and partners (2022).

2.3.5.2 Sonda chinesa Chang'e 4

O estudo *The Lunar One-Sixth Low Gravity Conductiveness to the Improvement of the Cold Resistance of Plants* investigou os efeitos da gravidade lunar (1/6 da terrestre) na germinação e resistência ao frio de plantas cultivadas nesse ambiente simulado. Os pesquisadores observaram que as sementes germinaram mais rapidamente sob essa condição, indicando que a microgravidade parcial pode favorecer o início do desenvolvimento vegetal (XIE et al., 2023).

Além disso, as plântulas demonstraram uma notável aclimação ao frio extremo, suportando temperaturas abaixo de -52°C por 18 a 24 horas sem danos aparentes, mantendo-se eretas e verdes (XIE et al., 2023). Esse fenômeno sugere que a baixa gravidade pode influenciar mecanismos celulares e moleculares responsáveis por aumentar a tolerância ao estresse térmico.

As descobertas do estudo são fundamentais para futuras missões espaciais, pois demonstram que plantas cultivadas na Lua podem desenvolver maior resistência ao frio, o que pode facilitar a produção de alimentos e a sustentabilidade de colônias humanas em ambientes extraterrestres (XIE et al., 2023).

2.3.5.3 Germinação realizada pela Embrapa

O experimento sobre a germinação de sementes de gonçalo-alves foi realizado na Estação Espacial Internacional (ISS) como parte da Missão Centenário, conduzida pelo astronauta Marcos Pontes. O estudo, desenvolvido pela Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, teve como objetivo avaliar os efeitos da microgravidade no processo germinativo e nas fases iniciais de desenvolvimento da planta (Embrapa, 2006).

As sementes foram fixadas em um substrato com fita Kapton e acondicionadas em barreiras plásticas (figura 14). Durante sete dias, o astronauta monitorou e fotografou a germinação, iniciada pela injeção de água no substrato. Paralelamente, o experimento foi replicado em laboratório terrestre para comparação dos resultados (Embrapa, 2006).

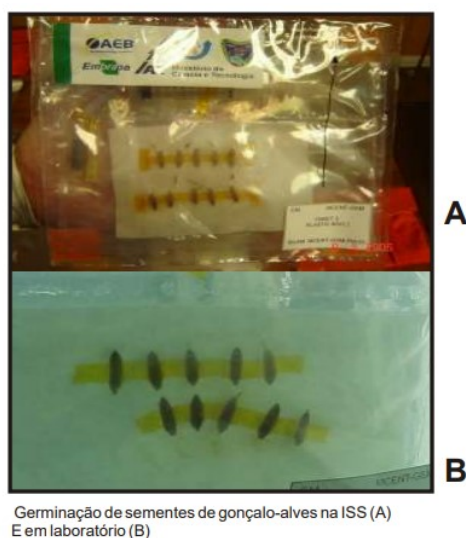


Figura 14 – Sementes de gonçalo -alves presas ao substrato por fita Kapton para administração de nutrientes e água.

Fonte: Embrapa (2006).

Os dados obtidos indicaram que a germinação em microgravidade ocorreu de maneira mais rápida e homogênea, independentemente da presença ou ausência de luz. Essas observações contribuem para o avanço do conhecimento sobre os processos fisiológicos e bioquímicos envolvidos na germinação e no desenvolvimento inicial de plantas em ambientes espaciais.

2.3.5.4 Brassica rapa

O experimento *Plants in Space* (VOGT; MORENO; COUNTRYMAN, 2012) investigou o crescimento de raízes da *Brassica rapa* (também conhecida como *Wisconsin Fast Plants*) na microgravidade da Estação Espacial Internacional (ISS). Planta considerada ideal para estudos educacionais por ter um ciclo de vida rápido (cerca de 30 dias), foi escolhida por exigir poucos cuidados e apresentar rápido desenvolvimento radicular.

A pesquisa envolveu 72 plantas, divididas em quatro sessões de 18 sementes cada. As sementes germinaram em um gel transparente (variante de *ágar*) durante cinco dias por sessão, totalizando 28 dias de experimento. As condições de luz e germinação foram mantidas idênticas tanto no espaço quanto na Terra, utilizando iluminação artificial branca enriquecida com azul (VOGT; MORENO; COUNTRYMAN, 2012).

O estudo contribui para o entendimento da viabilidade de cultivar plantas no espaço. Essencial para futuras missões espaciais de longa duração, visando geração de

alimento, oxigênio e processamento de resíduos.

A pesquisa reforça a importância da microgravidade como ambiente de investigação científica e abre perspectivas para futuros estudos, como a produção de biomoléculas em células vegetais e a análise da expressão gênica para a transformação genética de plantas.

2.4 Germinação em ambiente espacial

A fim de tornar possível a permanência humana em ambientes confinados no espaço, pesquisadores da NASA conduzem estudos sobre as reações das plantas a diferentes condições de luz, temperatura e concentrações de dióxido de carbono. Essas investigações buscam compreender como as plantas podem contribuir para a sustentabilidade de missões espaciais, fornecendo alimento, produzindo oxigênio, absorvendo *CO* e auxiliando na purificação da água (VOGT; MORENO; COUNTRYMAN, 2012). Além disso, o cultivo de vegetais pode exercer um papel psicológico positivo nos astronautas, auxiliando na adaptação e criando um ambiente mais próximo ao da Terra.

Organismos fotossintéticos desempenham um papel fundamental tanto na produção de energia quanto na reciclagem de elementos essenciais na Terra. Por meio da fotossíntese, as plantas capturam dióxido de carbono da atmosfera e o transformam em energia, o que permite seu crescimento e desenvolvimento. Nesse processo, também liberam oxigênio, elemento vital para a manutenção da vida. Além de sustentarem cadeias alimentares, as plantas fornecem fibras, combustíveis e substâncias com propriedades medicinais, apresentando vários caminhos para gerar suporte em ambiente espacial (VOGT; MORENO; COUNTRYMAN, 2012).

O estudo para uso de plantas no espaço é abordado na área de missões do setor aeroespacial, principalmente nas missões que envolvem habitação de longo prazo tanto em naves espaciais quanto em superfícies planetárias. Segundo Ferl et al. (2002) a lógica essencial que orienta essa prioridade é que as inter-relações entre plantas e animais são complementares: as plantas produzem nutrientes e materiais para o desenvolvimento e manutenção dos sistemas do corpo humano, que por sua vez produzem resíduos que auxiliam no desenvolvimento das plantas em formato de adubo (Figura 15). Dessa maneira, o desenvolvimento e cultivo de plantas no ambiente espacial poderia ser uma parte integral dos sistemas de suporte à vida bioregenerativos de longo prazo, fornecendo alimentos e matéria prima para outros setores de pesquisa.

Hoje existem diversos artigos que apresentam várias informações relacionadas à estudos envolvendo diferentes tipos de plantas no ambiente espacial, avaliando efeitos de microgravidade, radiação, gradiente de temperatura, movimentos de fluídos em baixa gravidade dentre outros. Costumam realizar esses experimentos em dois ambientes controlados de maneira simultânea, sendo um na Terra e outro em alguma plataforma em

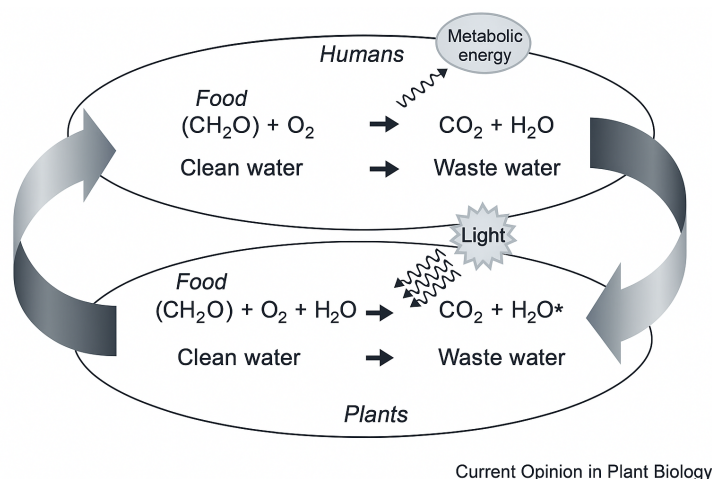


Figura 15 – Natureza cíclica das interações entre plantas e animais que impulsionam o desenvolvimento do Sistema avançado de Suporte à Vida(ALS).

Fonte: Ferl et al. (2002).

ambiente espacial como a ISS (International Space Station), CubeSats, e estruturas montadas em outros planetas, para observar as diferenças encontradas no desenvolvimento da mesma espécie em condições com variáveis diferentes. Mas esses experimentos ainda destacam questões que ainda precisam ser resolvidas para efetivar as plantas como mecanismo de sobrevivência.

Uma das adversidades encontradas em missões tripuladas no espaço é garantir o fornecimento contínuo água limpa, oxigênio e comida durante o andamento da missão espacial por se tratar de uma tarefa cara, atendida normalmente pelo armazenamento e reabastecimento. Onde a quantidade armazenada utiliza como variável o tempo de missão, as janelas de oportunidade para reabastecimento, capacidade de carga e principalmente os recursos financeiros disponíveis, que conforme a distância percorrida aumenta, o custo de armazenamento torna-se insustentável, abrindo espaço para o desenvolvimento sistemas bioregenerativos (FERL et al., 2002).

Segundo Ferl et al. (2002), os estudos que deram início aos sistemas bioregenerativos envolviam o cultivo de algas, mas a conversão dessas em alimentos úteis e palatáveis mostrou-se difícil, pelo menos até a data do artigo, em 2002. O estudo também relatou a adoção do cultivo de culturas mais convencionais por meio da hidroponia, a fim de eliminar o estresse hídrico e nutricional.

Os desafios para a germinação de plantas no ambiente espacial se dividem em dois cenários, embora ambos tenham exigências quanto controle de radiação e temperatura, entrega de água e reciclagem de água, a germinação em sistemas operando em microgravidade será mais difícil (por exemplo utilizando a ISS, naves e CubeSats) do que em sistemas montados em superfícies planetárias (por exemplo, na Lua ou em Marte) em que é permitido métodos de irrigação e cultivos mais convencionais.

2.4.1 Sistema avançado de suporte à vida (ALS)

O conceito de *Advanced Life Support* (ALS) dentro da Nasa envolve princípios biológicos das relações fundamentais entre organismos animais e vegetais, impulsionados pelos exigentes requisitos práticos da ocupação humana em sistemas confinados.

Ao gerar oxigênio, remover dióxido de carbono e purificar a água, as plantas vivas podem ajudar a manter uma atmosfera saudável em espaçonaves e estações permanentes, reduzindo os custos de reabastecimento de ar e água. As pesquisas com plantas também possuem importância em aplicações diretas na produção futura de alimentos que a tripulação de missões de longa duração poderam consumir, o que também auxilia na diminuição de custos (VOGT; MORENO; COUNTRYMAN, 2012). As plantas podem servir de base para construção de um ALS fechado e autossustentável, que exigiria apenas a entrada de energia solar.

2.4.2 Relação entre a carga e o sistema de suporte à Vida

As funções das plantas no ciclo atmosférico e na produção de alimentos as tornam extremamente importantes para missões espaciais. Viagens a outros planetas exigirão o reabastecimento contínuo de alimentos, água e atmosfera.

Ideias de projeto no setor aeroespacial envolvendo lançamentos consideram a carga como um fator crítico para avaliar o custo da missão. Realizar a entrega de suprimentos de maneira contínua exige o uso recorrente de lançadores, cujo custo varia conforme o valor da carga, tornando a missão cada vez mais cara. O custo de uma missão é expresso em unidades de *Equivalent System Mass* (Massa Equivalente ao Sistema), uma medida que inclui os custos de lançamento, entrega e operação do sistema. Os custos de armazenamento e reabastecimento, assim como os de sistemas baseados em plantas, aumentam linearmente com a duração da missão, mas com diferentes inclinações. Para uma missão de cerca de 2,2 anos de duração, os custos utilizando um sistema baseado em plantas são mais elevados do que os de um sistema baseado em armazenamento e reabastecimento (Figura 16). Todavia, para missões com duração maior, o sistema *ALS BIO-Plex* apresenta um aumento mais lento nos custos em comparação ao armazenamento. Consequentemente, os sistemas de suporte à vida baseados em plantas tornam-se viáveis para missões com duração superior a 2,5 anos, como uma missão a Marte (FERL et al., 2002).

2.4.3 Estrutura das Plantas

Segundo Vogt, Moreno e Countryman (2012), as plantas estão distribuídas por quase toda a superfície terrestre, adaptando-se desde ambientes extremos como desertos até florestas tropicais e regiões montanhosas. Estima-se que existam cerca de 300 mil espécies, variando desde formas microscópicas até os maiores organismos vivos conhecidos.

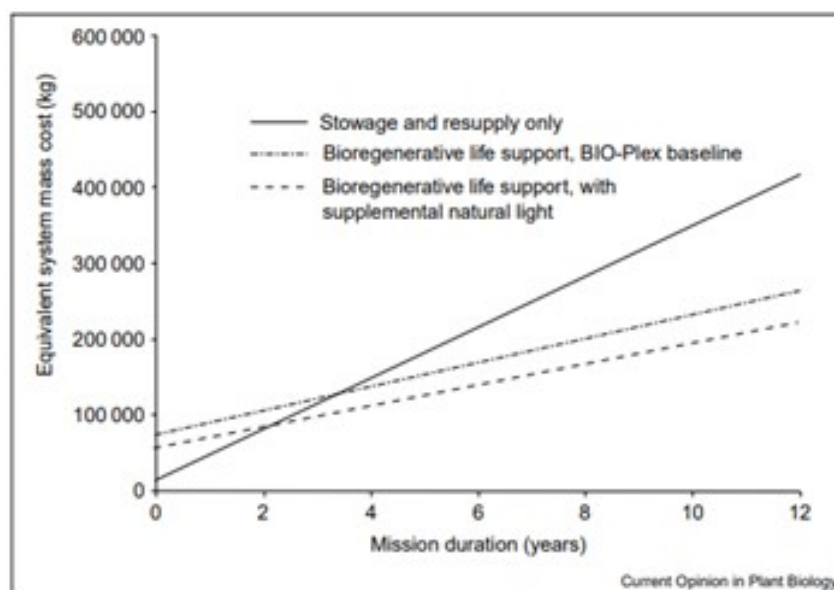


Figura 16 – Custo de uma missão utilizando diferentes sistemas de suporte à vida ao longo do tempo de missão.

Fonte: Ferl et al. (2002).

Como todos os seres vivos, as plantas necessitam de energia, nutrientes, ar e água, além de apresentarem características como reprodução, crescimento, resposta ao ambiente e morte. O publicação também apresenta a diversidade de plantas terrestres, que incluem musgos, samambaias, pinheiros e plantas com flores e frutos, denominadas angiospermas, com mais de 250.000 espécies e estruturas compostas geralmente por raízes, caules, folhas e flores:

- As raízes fixam a planta ao solo e absorvem nutrientes e água essenciais.
- Os caules fornecem sustentação, elevando folhas e flores acima do solo, e servem como canais por onde nutrientes, moléculas de alimento e água circulam entre as raízes, folhas e outras partes.
- As folhas aumentam a área verde da planta para maximizar a captação de energia solar.
- Poros nas folhas permitem a troca de gases, especialmente oxigênio e dióxido de carbono, entre as plantas e a atmosfera.

Já as sementes de plantas que possuem flores, são constituídas de uma casca protetora, com um embrião e alimento armazenado. Esse alimento armazenado serve para nutrir o desenvolvimento da planta até que ela seja capaz de produzir seu próprio alimento por conta da fotossíntese. Esse alimento pode estar contido nas folhas da semente, chamadas cotilédones, ou em outros casos, envolvendo o embrião sob forma de uma reserva de amido, conhecida como endosperma (VOGT; MORENO; COUNTRYMAN, 2012).

O embrião que dará origem à planta completamente desenvolvida, permanece em suspensão temporária de crescimento até que surjam condições favoráveis para seu desenvolvimento. Quando satisfeitas, fazem com que a semente do embrião absorva água e em um processo chamado germinação, a pequena nova planta consome suas reservas de alimento e começa a crescer (VOGT; MORENO; COUNTRYMAN, 2012).

Uma dessas condições para germinação pode ser um sinal ambiental adicional, como a luz com certo comprimento de onda ou uma sequência de dias com uma temperatura específica.

(VOGT; MORENO; COUNTRYMAN, 2012), apresentam que assim como no desenvolvimento animal, a germinação, o crescimento, a reprodução, e as respostas das plantas ao ambiente externo são regulados por vias sinalização internas e hormônios.

2.4.4 Crescimento das Raízes

As plantas são capazes de perceber e reagir a estímulos do ambiente por meio de receptores moleculares presentes em suas células, que detectam alterações externas, como a presença de luz, e desencadeiam mecanismos de sinalização interna para promover respostas apropriadas, como a fototrópica. Resposta fototrópica responsável pela detecção de um comprimento de onda da luz por moléculas receptoras nas células da planta, convertendo esse sinal em respostas bioquímicas que levam à alterações nos padrões de crescimento. Essa comunicação interna ocorre por meio de hormônios vegetais, produzidos em uma região da planta e capazes de provocar efeitos fisiológicos ou de desenvolvimento em outra. Entre os sete tipos principais desses hormônios, destaca-se a auxina, que atua principalmente na regulação do crescimento direcional (VOGT; MORENO; COUNTRYMAN, 2012),.

O ácido indolacético, ou auxina, em altas concentrações, estimula o crescimento e o alongamento das células nos caules, ao mesmo tempo que retarda o crescimento das células das raízes. Quando a auxina está distribuída uniformemente por todo o caule, todos os lados do caule crescem na mesma taxa, permitindo que a planta cresça em direção à luz e para longe da gravidade (VOGT; MORENO; COUNTRYMAN, 2012),.

A luz exerce um papel fundamental no desenvolvimento das plantas, influenciando processos como a germinação de sementes e o florescimento, além de ser indispensável para a realização da fotossíntese. Adicionalmente, a incidência luminosa pode direcionar o crescimento vegetal, induzindo respostas orientadas em direção ou afastamento de determinados comprimentos de onda. Esse comportamento de crescimento em resposta à luz é denominado fototropismo (VOGT; MORENO; COUNTRYMAN, 2012).

A gravidade também gera influência no crescimento do caule e das raízes. Essa resposta é chamada de gravitropismo, sendo que os caules são negativamente gravitró-

picos (crescem no sentido contrário à força gravitacional) e as raízes são positivamente gravitropicas (crescem no mesmo sentido da aplicação da força gravitacional) (VOGT; MORENO; COUNTRYMAN, 2012).

2.4.5 Taxa de irradiância e iluminação

A agricultura vertical interna adota como princípio fundamental o objetivo de maximizar a produtividade com o menor consumo energético possível. Para atingir esse equilíbrio, é indispensável um domínio aprofundado da fisiologia vegetal, especialmente no que se refere ao papel da luz no desenvolvimento das plantas. A luz, nesse contexto, é composta por fótons, que são partículas cuja energia está diretamente relacionada ao comprimento de onda. Tendo uma faixa do espectro visível que compreende de 390 a 760 nm, denominada PAR (Radiação Fotossinteticamente Ativa), representa o intervalo aproveitado pelas plantas para realizar a fotossíntese (METELLI, 2021).

Três parâmetros luminotécnicos se destacam no cultivo controlado: o espectro (ou qualidade da luz), que influencia diretamente a morfologia e os processos fisiológicos das plantas; a intensidade luminosa, medida em PPF (mol/m² · s), diretamente relacionada à produção de biomassa; e o fotoperíodo, ou duração do estímulo luminoso, que afeta eventos fenológicos como floração e senescência. A integração desses fatores ao longo do dia resulta no DLI (Integral Diária de Luz), indicador crucial para o planejamento de sistemas de iluminação artificial (METELLI, 2021).

As taxas de fotossíntese e a quantidade de matéria orgânica gerada depende da quantidade de radiação solar, denominada taxa de irradiância, que para a maioria das culturas segundo o (FERL et al., 2002) aumentam linearmente com a luz em faixas de baixa irradiância. Também relata que a otimização da eficiência da iluminação apresenta pontos positivos e negativos apresentados na tabela 1.

Iluminação	Pontos positivos	Pontos negativos
Lâmpada de sódio de alta pressão	Eficientes em termos de energia	Deficientes em comprimento de onda
Lâmpadas de enxofre por micro-ondas	Possuem espectro amplo	São mais difíceis de obter uma fonte de energia confiável que possa suportar um funcionamento contínuo.
Diodos emissores de luz	Eficientes e sua construção em estado sólido proporciona uma longa vida útil de operação.	Sua emissão espectral é estreita, exigindo combinações de LEDs de luz vermelha e azul para o crescimento eficaz das plantas.

Tabela 1 – Comparativo entre Fontes de Iluminação Artificial.

O uso de luz solar passiva, que seria o contato direto dos raios solares com a câmara de cultivo exigiria estufas transparentes ou sistemas condutores para direcionar os raios

solares. Além de considerações importantes envolvendo a distância entre o sistema de cultivo e o sol, ciclos diurnos e condições atmosféricas como as tempestades de poeira (FERL et al., 2002).

Estufas e ambientes controlados utilizam predominantemente a luz solar, mas frequentemente são equipados com fontes artificiais para compensar variações sazonais ou atmosféricas. Dentre essas fontes, as lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão (High-Pressure Sodium – HPS) ainda são amplamente empregadas devido ao seu baixo custo, apesar da limitada eficiência na conversão de energia elétrica em fótons úteis. Em contrapartida, os LEDs (Light Emitting Diodes) vêm se consolidando como tecnologia de destaque, por aliarem maior eficiência energética à capacidade de emitir comprimentos de onda específicos. Isso permite a formulação de espectros personalizados para potencializar a fotossíntese e modular o desenvolvimento vegetal. Estudos também indicam que comprimentos de onda fora da faixa clássica de absorção dos pigmentos fotossintéticos exercem efeitos fisiológicos relevantes. Mais recentemente, os LEDs brancos com espectro contínuo abriram novas possibilidades para a agricultura controlada, permitindo a investigação mais ampla das respostas fisiológicas das plantas a diferentes composições espectrais (METELLI, 2021).

Segundo Vogt, Moreno e Countryman (2012), os caules das plantas apresentam uma resposta fototrópica positiva, pois crescem em direção a fontes de luz azul ou branca. Já as raízes, por outro lado, tendem a crescer na direção oposta à luz, o que caracteriza uma resposta fototrópica negativa.

Além da luz azul, a luz vermelha também influencia o comportamento vegetal, podendo estimular ou inibir a germinação das sementes e participar do controle do momento da floração, embora envolva receptores e vias de sinalização distintas das relacionadas ao fototropismo. Em algumas espécies, as raízes podem responder positivamente à luz vermelha, podendo indicar uma certa especificidade para esse estímulo.

O fototropismo, inclusive, é tema de diversas pesquisas, sendo a planta *Arabidopsis thaliana* amplamente utilizada em experimentos tanto na Terra quanto na Estação Espacial Internacional (VOGT; MORENO; COUNTRYMAN, 2012)(Vogt et al., 2012).

2.4.6 Métodos de Cultivo

Com o desenvolvimento da tecnologia ao longo da evolução humana, novas técnicas de cultivo surgiram para promover um melhor desenvolvimento das plantações, assim como novos termos para tratar dessas técnicas. O termo horticultura é caracterizado como o conjunto de práticas e técnicas aplicadas para gerenciar um jardim. Assim como o termo CEH (*Horticultura em Ambiente Controlado*), que se refere à aplicação dessas técnicas em um ambiente controlado, visando obter condições que atendam aos melhores parâmetros

bióticos e abióticos para o desenvolvimento de determinada espécie (METELLI, 2021).

O microclima compreende os diferentes fatores ambientais que podem ser ajustados para criar condições ideais ao cultivo, favorecendo a qualidade final do produto (METELLI, 2021). À medida que se aprofunda o entendimento sobre os parâmetros que afetam o crescimento vegetal, torna-se possível aprimorar o controle do ambiente, resultando em sistemas de produção mais eficientes e adaptados às necessidades específicas das plantas.

Esse ambiente controlado oferece uma variedade de possibilidades para seu desenvolvimento, podendo ser uma estufa completamente fechada ou parcialmente aberta, capaz de controlar os níveis e tipos de iluminação, umidade e temperatura da cultura. Isso permite prolongar as melhores condições climáticas para cada espécie.

Segundo Metelli (2021), a aplicação de materiais fotoseletivos contendo pigmentos que refletem a radiação infravermelha próxima (NIR) pode contribuir para a redução do aquecimento excessivo em períodos de verão, sem comprometer a captação da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) pelas plantas. Em contrapartida, coberturas alternativas, como os painéis fotovoltaicos, podem sombrear as culturas ou capturar parte da radiação essencial à fotossíntese, exigindo, nesses casos, a adoção de sistemas complementares de iluminação artificial pelos produtores.

2.4.6.1 Controle de parâmetros abióticos

A temperatura é um dos fatores ambientais mais relevantes em ambientes de cultivo controlado, como estufas e PFALs (*Fábricas de Plantas com Iluminação Artificial*). Esse parâmetro influencia diretamente o crescimento e o desenvolvimento das plantas, sendo que cada espécie apresenta limites mínimos, máximos e ideais de temperatura para seu desempenho adequado. Quando esses limites são ultrapassados, podem ocorrer diferentes níveis de estresse abiótico, que afetam negativamente a produtividade e a qualidade das plantas. Em CPPSs (*Sistemas Controlados de Produção de Plantas*), o controle térmico deve abranger não só o ar, mas também a superfície foliar, o substrato e a solução nutritiva, pois fontes de luz artificial, como lâmpadas, podem aquecer as folhas por radiação infravermelha, exigindo ventilação natural ou forçada para dissipação do calor (METELLI, 2021).

O movimento do ar também é essencial, pois influencia diretamente a resistência da camada limite da folha e a condutância estomática, fatores que afetam a absorção de CO₂ e a transpiração. Para manter essas trocas gasosas em níveis ideais, recomenda-se que a velocidade do ar fique entre 0,5 e 1 m/s. O uso de CFD (*Dinâmica de Fluidos Computacional*) é comum para simular e otimizar o comportamento do fluxo de ar nesses ambientes (METELLI, 2021).

Outro fator importante do microclima é a umidade do ar, expressa em termos de umidade absoluta e umidade relativa (UR). A UR influencia a evapotranspiração e a fotossíntese: valores baixos podem causar estresse hídrico, enquanto valores altos podem reduzir a transpiração e afetar negativamente a atividade estomática. Para integrar o controle de temperatura e UR, utiliza-se o VPD (*Déficit de Pressão de Vapor*), que representa a diferença entre a quantidade de vapor de água presente no ar e a quantidade máxima que ele pode conter a uma dada temperatura. O VPD permite o ajuste fino do ambiente durante as diferentes fases do desenvolvimento vegetal, como crescimento vegetativo, florescimento e frutificação. Em PFALs, o controle preciso da UR e do VPD é geralmente feito por meio de sistemas HVAC (*Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado*), que oferecem aos produtores uma interface eficiente para o gerenciamento climático (METELLI, 2021).

Vale ressaltar que os métodos para controle térmico devem ser adaptados para o ambiente espacial. Pois, como citado na Seção 2.1, métodos de controle térmico por convecção não são efetivos.

2.4.6.2 Administração de Nutrientes

Na microgravidade, a ausência de peso torna o uso de substratos ainda mais relevante, pois eles ajudam a ancorar as plantas e facilitam a retenção de água e nutrientes sem que estes fiquem dispersos no ambiente da estação espacial (ZABEL et al., 2016).

A hidroponia é um método de cultivo de plantas que dispensa o uso de solo (Figura 17), fornecendo diretamente os nutrientes essenciais por meio de uma solução nutritiva dissolvida em água. Esse sistema permite um controle mais preciso das variáveis ambientais, resultando em maior eficiência na absorção de nutrientes e no uso da água, além de possibilitar a produção agrícola em locais onde o solo é inadequado ou inexistente (RESH, 2016).



Figura 17 – Experimento da NASA com diferentes meios de cultivo hidropônicos desenvolvidos no Centro Espacial Kennedy

Fonte: Vogt, Moreno e Countryman (2012).

Em alguns sistemas hidropônicos, as plantas podem ser cultivadas com o auxílio de substratos, igual ao escolhido pela Embrapa em seu experimento, que são materiais porosos utilizados para dar suporte físico às raízes e reter umidade e nutrientes. Diferentes materiais podem ser usados como substratos, incluindo lã de rocha, fibra de coco, perlita e argila expandida (RESH, 2016).

Diversas abordagens têm sido empregadas na hidroponia para garantir o fornecimento eficiente de nutrientes às plantas, e cada técnica possui características, vantagens e limitações próprias. Entre os métodos mais simples está o sistema de gotejamento, que utiliza microirrigação para distribuir a solução nutritiva diretamente às raízes. Apesar da sua economia de água e eficiência, esse método pode enfrentar problemas como entupimento dos emissores ou concentração de sais, especialmente em caso de falha no fornecimento de energia (METELLI, 2021).

Outras estratégias, como a técnica *Técnica do Filme Nutriente* (NFT), utilizam uma fina lâmina de solução continuamente oxigenada fluindo sob as raízes. Essa técnica permite o cultivo em várias camadas empilhadas, sendo amplamente adotada em ambientes como as PFALs (*Fábrica de Plantas com Iluminação Artificial*). Já o sistema Ebb&Flow, baseado em ciclos de inundação e drenagem, exige substratos com boa capacidade de retenção hídrica e é sensível ao excesso de submersão, que pode causar estresse por falta de oxigênio nas raízes (METELLI, 2021).

A **Aeroponia** é um método no qual as raízes ficam suspensas no ar e recebem névoa rica em nutrientes, garantindo um ambiente de alta oxigenação e absorção eficiente de nutrientes. Esse sistema é promissor para cultivos em ambientes fechados e controlados, como em missões espaciais (Stoner & Clawson, 2000). Sistemas de cultivo por aeroponia permitem uma produção de alimentos mais limpa, rápida e eficiente, com ciclos contínuos de plantio e colheita ao longo de todo o ano. Como não utilizam solo nem pesticidas, evitam contaminações comuns e reduzem drasticamente o risco de doenças que geralmente afetam as plantas. Esse ambiente controlado e estéril é especialmente vantajoso em locais confinados, como a Estação Espacial Internacional ou futuras missões espaciais tripuladas (VOGT; MORENO; COUNTRYMAN, 2012).

A técnica *Cultivo em Água Profunda* (DWC), por sua vez, submerge as raízes em tanques com solução nutritiva altamente oxigenada, enquanto os sistemas de aeroponia borrifam diretamente a solução sobre as raízes suspensas. Ambos os métodos requerem atenção especial à aeração, ao controle de pH e à condutividade elétrica (EC), além de serem vulneráveis a falhas de energia e obstruções (METELLI, 2021).

Em todos os casos, o manejo da solução nutritiva exige que ela seja mantida longe da luz e com temperatura controlada, para evitar crescimento de algas e estresses térmicos. A utilização de chillers ajuda a manter a solução em faixas ideais, contribuindo para a estabilidade do ambiente de cultivo.

Por fim, todo esse ecossistema de cultivo exige um sistema de controle integrado, capaz de gerenciar temperatura, umidade relativa (UR), VPD, qualidade da água, luz artificial e outras variáveis que garantem o desenvolvimento saudável das plantas em ambientes controlados (METELLI, 2021).

A aplicação da hidroponia em microgravidade tem sido estudada como uma solução viável para o cultivo de plantas no espaço. Em ambientes de microgravidade, a ausência de convecção natural e a baixa eficiência na distribuição de água e nutrientes impõem desafios ao desenvolvimento vegetal. No entanto, a hidroponia, especialmente os sistemas baseados em aeroponia e membranas capilares, pode ser adaptada para superar essas limitações (ZABEL et al., 2016).

Como método para o fornecimento de nutrientes dentro do CubeSat algumas ideias utilizando a hidroponia para germinação em microgravidade podem ser abordadas por meio de:

- Uso de substratos porosos ou membranas capilares para fornecer umidade controlada às sementes.
- Aplicação de sistemas aeropônicos para otimizar a absorção de nutrientes em gravidade reduzida.
- Desenvolvimento de sistemas fechados para controlar fatores como luz, temperatura e concentração de gases.

3 Desenvolvimento da Câmara de Cultivo

Os sistemas de suporte à vida bioregenerativos têm sido amplamente estudados e requerem um conhecimento aprofundado tanto sobre o ambiente espacial quanto sobre o controle dos parâmetros ambientais que favorecem uma germinação mais eficiente. Para que esses sistemas possam ser replicados em colônias espaciais voltadas a missões de longa duração, é essencial desenvolver e testar, ainda em solo, estruturas capazes de simular as condições críticas encontradas no espaço.

Dessa forma, para a execução do projeto, tornou-se necessária a concepção, desenvolvimento e fabricação de um protótipo de câmara de cultivo, destinado à avaliação da etapa de germinação de sementes. O sistema foi projetado para possibilitar o controle automatizado dos recursos essenciais à germinação, como iluminação, substrato e irrigação, de modo a viabilizar, inicialmente, pesquisas de microgravidade em solo por meio de Clinostatos. Futuramente, prevê-se o escalonamento para ensaios mais complexos, capazes de simular condições do ambiente espacial, contribuindo para o desenvolvimento de tecnologias aplicáveis a missões espaciais reais. Nesse contexto, a câmara de cultivo desenvolvida poderá ser utilizada como modelo preliminar, a ser posteriormente modificado e embarcado em CubeSats, funcionando como ferramenta de pesquisa em ambiente orbital.

Os principais parâmetros a serem investigados são o desenvolvimento do sistema e a simulação de microgravidade, que pode ser obtida por meio de um Clinostato multieixos, aparato capaz de submeter as amostras a um regime de desorientação do vetor gravitacional, técnica já consolidada em pesquisas biológicas e biomédicas ([BRICKHOUSE, 2020](#)).

A construção da câmara de cultivo será realizada seguindo as etapas de projeto, compreendendo as fases conceitual, preliminar e detalhada, nas quais será apresentada a estrutura física e os subsistemas necessários à simulação, como o subsistema de iluminação, o uso de câmera e o sensor de temperatura para coleta e tratamento de dados.

As dimensões do clinostato não puderam ser apresentadas neste trabalho como anexo devido ao contrato de confidencialidade firmado juntamente com o coordenador do Laboratório de Propulsão Química (CPL), responsável pela disponibilização do equipamento utilizado nas simulações.

3.1 Análise conceitual

A câmara de cultivo deve possibilitar o adequado posicionamento e fixação das sementes ou tubérculos de batata ao substrato, garantindo condições apropriadas para o seu desenvolvimento. No projeto, devem ser considerados os efeitos associados ao movimento

de rotação imposto pelo sistema.

A Figura 18 apresenta o clinostato 3D a ser utilizado no experimento, localizado no Laboratório de Propulsão Química (CPL), sob a coordenação do professor Dr. Olexiy Shynkarenko. O clinostato foi desenvolvido pelo professor da Faculdade de Ciências e Tecnologias em Engenharia (FCTE) da Universidade de Brasília, Dr. Olexiy Shynkarenko em parceria com o Departamento de Biologia da Universidade de Brasília.

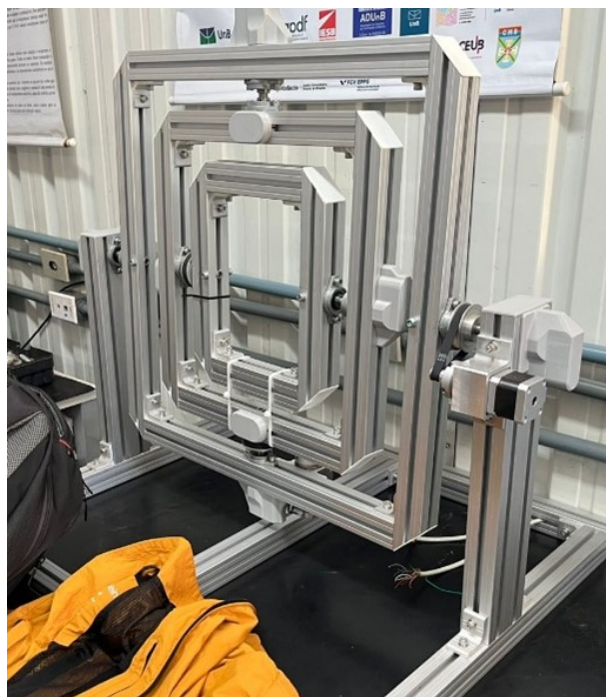


Figura 18 – Clinostato de três eixos do Laboratório de Propulsão Química da UNB
. Fonte: Autor.

A câmara de cultivo deverá ser acoplada ao anel central do Clinostato por meio de eixos fixados nas extremidades superiores ou laterais, mantendo as amostras o mais centralizadas possível, minimizando efeitos de aceleração centrípeta (ALVES, 2013).

O esquemático da câmara de cultivo, sem os eixos e mancais, é apresentado na Figura 19 e deverá ser desenvolvido conforme os requisitos estabelecidos na Tabela 2, referentes à germinação de talos de batata-doce e germinação de microverdes. O projeto prevê a utilização de um acelerômetro para coleta de dados e comparação entre resultados teóricos e analíticos, além do registro de imagens por meio de uma câmera fixada na estrutura superior.

Na mesma região superior será instalado um sensor de temperatura, acoplado a um controlador responsável pela programação do sistema.

A região inferior da câmara de cultivo será destinada à fixação das sementes ao substrato, que poderá ser composto por gel ou solução líquida aplicada sobre um substrato inerte, com aplicações periódicas de água realizadas por um sistema automatizado de

irrigação. Essa configuração foi pensada de modo a permitir futura adaptação para missões em CubeSats, tomando como referência o projeto GreenCube.

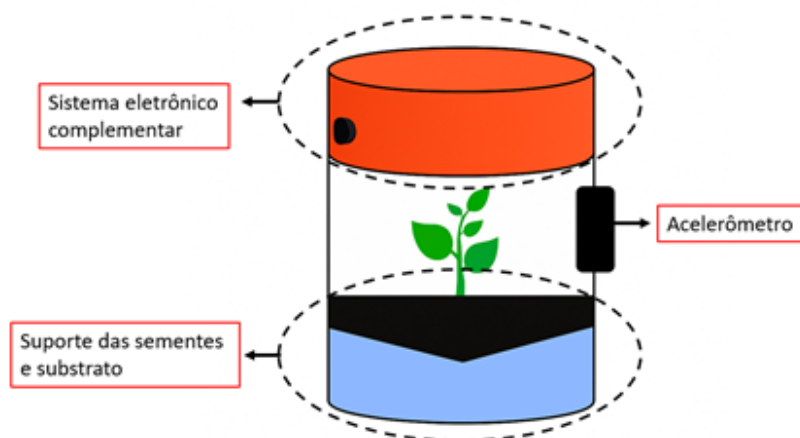


Figura 19 – Esquemático para desenvolvimento da câmara de cultivo.

Fonte: Autor.

Tabela 2 – Requisitos para o desenvolvimento da câmara de cultivo

Requisito	Descrição
Estrutura de fixação	A estrutura projetada deve respeitar as dimensões máximas compatíveis com o Clinostato utilizado, incluindo um eixo central para acoplamento aos mancais.
Estrutura da câmara de cultivo	Deve ser construída com geometria simples e comportar todos os subsistemas, substrato, sementes ou talos a serem germinados.
Administração de luz	A iluminação será feita artificialmente e controlada pelo sistema eletrônico.
Cálculo de microgravidade	A avaliação do nível de microgravidade obtido necessita de um acelerômetro integrado ao sistema para comparar valores medidos com respostas analíticas.
Temperatura	A temperatura interna da câmara será monitorada por sensor de temperatura.
Tempo de germinação	O sistema deve operar continuamente por, no mínimo, duas semanas, atendendo ao período necessário para a germinação dos talos de batata-doce. Para microverdes, o tempo necessário é menor.
Substrato	O substrato, constituído por gel de cultivo ou substrato inerte com administração de nutrientes automatizada, deverá ser aplicado exclusivamente na região inferior do tubérculo, com consistência suficiente para evitar sua dispersão ao longo da estrutura de germinação.

A divisão do trabalho dentro do projeto pode ser agrupada nos seguintes blocos temáticos, que serão abordados posteriormente:

- Adaptação do Funcionamento do Clinostato
- Construção do Sistema Eletrônico
- Desenvolvimento das Estruturas
- Escolha do Substrato e Sementes

3.1.1 Clinostato utilizado

O Clinostato utilizado possui capacidade de rotação em três eixos, podendo operar com até três motores, conforme apresentado na Figura 20. Para este projeto, serão utilizados apenas dois motores, correspondentes aos anéis mais externos, mantendo o terceiro eixo interno livre, o que ainda permite resultados relevantes, conforme observado em trabalhos biológicos desenvolvidos por Brickhouse (2020) e Alves (2013). Devido à presença dos motores, forma-se um braço de alavanca entre os eixos responsáveis pela rotação e a estrutura na qual estão acoplados (Figura 20), gerando desequilíbrio de movimento e esforço adicional nos motores. Como apenas os motores dos eixos 1 e 2 serão utilizados, o desequilíbrio deve ocorrer predominantemente em um único eixo, uma vez que o primeiro motor está fixado na estrutura de suporte do clinostato (Figura 20)

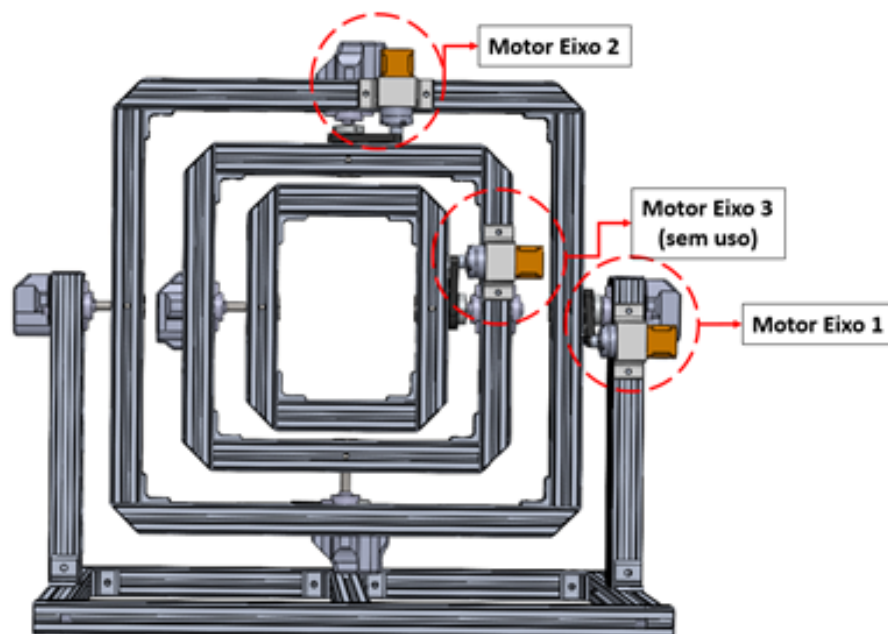


Figura 20 – Posição dos motores no Clinostato de 3 eixos

Fonte: Autor.

Para mitigar esse problema, foi adicionado ao sistema um torque compensatório no sentido oposto ao do motor acoplado, obtido por meio da distribuição de massa na região oposta ao anel (Figura 22). Para isso, foi utilizado um tarugo de aço inoxidável de

seção quadrada 19×19 mm, comprimento de 508 mm e massa total de 1.444 g, valor calculado para promover o balanceamento do sistema.

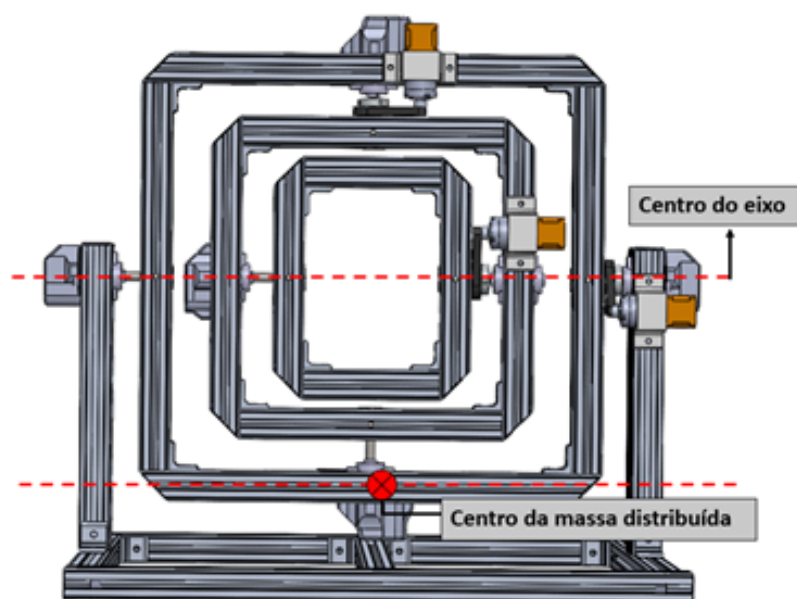


Figura 21 – Centro de massa para aplicação da massa distribuída.

Fonte: Autor.

A massa do motor utilizado foi aferida experimentalmente (Figura 22), apresentando 689 g, já considerando o suporte de fixação.



Figura 22 – Massa do motor em grama

Fonte: Autor.

Como a massa do motor é aproximadamente duas vezes menor que a massa do tarugo, este foi seccionado ao meio e empregado em ensaios de balanceamento do sistema. Observou-se que um pequeno deslocamento do motor foi suficiente para promover o equilíbrio adequado do Clinostato, sem necessidade de cortes adicionais no contrapeso.

O Clinostato também possui passagem interna para cabos de conexão dos motores e dos sistemas eletrônicos, que podem ser utilizados para a alimentação elétrica e comunicação do sistema desenvolvido para o anel central.

3.1.2 Sistema eletrônico

Ao analisar o sistema eletrônico como um todo, este pode ser dividido em dois subsistemas: um destinado à movimentação do Clinostato e outro, próprio da câmara de cultivo. No qual será melhor detalhado o sistema da câmara de cultivo, uma vez que o desenvolvimento do mesmo é principal foco deste trabalho.

O sistema de movimentação dos motores é composto por uma fonte de 12 V e dois drivers, responsáveis pelo controle individual de cada motor de passo. O conjunto é comandado por uma placa ESP32, que conta com módulos Step-Up e Step-Down, responsáveis por fornecer a diferença de potencial adequada a cada componente do circuito. Essa alimentação pode ser utilizada para alimentar os sistemas internos da câmara de cultivo, devido à passagem de condutores por dentro da estrutura do Clinostato [23](#).

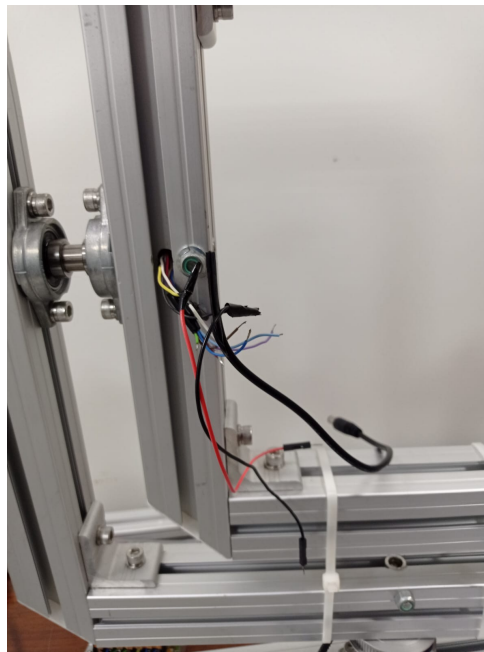


Figura 23 – Passagem de cabos por dentro da estruturas

O sistema eletrônico da câmara de cultivo será desenvolvido a partir da seleção de um controlador central. Serão avaliadas diferentes alternativas, incluindo microcontroladores como o ESP32 e o Arduino com câmera acoplada, além de placas de baixo custo com recursos integrados.

Embora controladores mais robustos ofereçam suporte a sistemas operacionais completos, maior capacidade de processamento de imagens e programação em linguagens de alto nível, esses dispositivos apresentam custo e consumo energético significativamente

superiores, demandando fontes de alimentação mais potentes e aumentando a complexidade geral do sistema.

Considerando o baixo custo, a integração de câmera e conectividade sem fio, e a viabilidade técnica para o controle dos periféricos, a utilização do microcontrolador ESP32 mostra-se a alternativa mais adequada para o desenvolvimento do sistema de cultivo proposto.

Os demais componentes eletrônicos necessários destinam-se ao sistema de administração de água e iluminação, bem como à aquisição de dados por meio de sensores ambientais que possibilitam a análise dos resultados experimentais e o monitoramento das condições internas. Lista de Materiais para Sistema Eletrônico:

- Controlador com capacidade de processamento de imagem e comunicação sem fio integrada (ESP32 ou equivalente).
- Módulo de câmera digital, integrado ao controlador, para registro do crescimento das plantas.
- Sensor de temperatura digital à prova d'água, destinado ao monitoramento ambiental interno da câmara.
- LEDs de iluminação para o cultivo, com driver ou circuito de controle compatível.
- Servo motor para o sistema automatizado de administração de água.
- Módulo de armazenamento de dados não volátil (cartão microSD ou memória interna do controlador).
- Placa de circuito impresso (PCI) ou suporte eletrônico para integração e fixação dos componentes.
- Cabos e conectores internos para interligação dos sensores, atuadores e controlador.

3.1.2.1 Iluminação

A iluminação artificial desempenha papel central na viabilidade do experimento, sendo responsável por reproduzir as condições de radiação fotossinteticamente ativa (PAR) necessárias ao crescimento e ao desenvolvimento das espécies vegetais. A configuração da área iluminada deve garantir distribuição uniforme do fluxo luminoso sobre as amostras, evitando gradientes de intensidade que possam gerar variações morfológicas indesejadas entre os espécimes (CHEN et al., 2025).

Entre os principais parâmetros que definem a qualidade da iluminação, destaca-se o PPF (Photosynthetic Photon Flux Density), ou densidade de fluxo de fótons fotossintéticos, medido em micromoles de fótons por metro quadrado por segundo ($\mu\text{mol}, \text{m}^{-2}, \text{s}^{-1}$). Esse

parâmetro indica a quantidade de luz efetivamente disponível para a fotossíntese e, portanto, influencia diretamente o metabolismo, a morfologia e o rendimento final das plantas (CHEN et al., 2025).

Estudos realizados em sistemas de cultivo controlado indicam combinações ideais entre intensidade luminosa e fotoperíodo para otimização do crescimento vegetal e redução do consumo energético, apresentando parâmetros a serem utilizados no desenvolvimento do sistema de iluminação. A intensidade luminosa e o fotoperíodo regulam processos fisiológicos essenciais, como a fotomorfogênese, o rendimento e a qualidade das culturas, além de impactarem o consumo de energia do sistema.

A intensidade controla o fornecimento de energia fotossintética, regulando a taxa fotossintética líquida P_N , o ciclo de Calvin e o transporte de fotossintatos. Já o fotoperíodo garante o tempo adequado de exposição luminosa, fundamental para o equilíbrio entre crescimento vegetativo e consumo energético (CHEN et al., 2025).

A resposta morfológica das plantas à variação da intensidade luminosa reflete sua capacidade adaptativa. Sob altas intensidades de luz, as plantas tendem a reduzir a área foliar e aumentar a espessura das folhas, mecanismo de defesa contra o estresse luminoso. Em contrapartida, sob baixas intensidades, ocorre expansão da área foliar e alongamento dos caules, estratégias que maximizam a captura de fótons e favorecem a fotossíntese (CHEN et al., 2025).

A qualidade espectral da luz também exerce influência significativa sobre o desenvolvimento vegetal. A luz vermelha estimula o aumento do rendimento dos tubérculos, enquanto a combinação de luz vermelha e azul antecipa a tuberização e acelera o acúmulo de biomassa na fase intermediária de crescimento. Além disso, o uso combinado de luz azul e branca resulta em maior proporção de tubérculos com peso fresco acima de 2 g, em comparação com combinações vermelho-branco (CHEN et al., 2025).

No contexto deste projeto, o sistema de iluminação deverá utilizar fontes de luz baseadas em LEDs, por apresentarem estabilidade espectral e baixa dissipação térmica. A escolha da intensidade e do fotoperíodo deve levar em consideração a espécie vegetal em estudo, o volume da câmara de cultivo e o nível de uniformidade da área iluminada, assegurando que o PPFD médio atinja valores adequados para promover a germinação das sementes.

Para converter iluminância (E, em lux) em densidade de fluxo de fótons fotossintéticos (PPFD, em $\mu\text{mol}, \text{m}^{-2}, \text{s}^{-1}$), utilizou-se o fator de conversão aproximado de $54 \text{ lux} \approx 1 \mu\text{mol}, \text{m}^{-2}, \text{s}^{-1}$ para fonte de luz semelhante à luz solar, conforme tabela de Instruments (2025). Esses valores são alterados conforme a fonte de emissão de luz.

A conversão entre iluminância e densidade de fluxo de fótons fotossintéticos pode ser feita utilizando um fator de conversão aproximado. A relação geral é:

$$\text{PPFD } (\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}) = E \text{ (lux)} \cdot CF \quad (3.1)$$

onde:

$$CF = 0,0185 \quad (3.2)$$

O fator de conversão (CF) depende da distribuição espectral da fonte de luz (SPD), sendo este valor uma aproximação adequada para fontes semelhantes à luz solar ou LEDs brancos na faixa de 4000–6500 K (LIGHTING, 2025).

No mesmo capítulo, ao apresentar o cálculo do fluxo luminoso total, utiliza-se:

$$\Phi = E \cdot A \quad (3.3)$$

onde:

- Φ = fluxo luminoso (lúmens),
- E = iluminância (lux),
- A = área (m^2).

Em horticultura, normalmente se trabalha com PPFd ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), que se relaciona com a iluminância por meio de fatores que envolvem constantes físicas (como Planck e Avogadro) e o espectro da fonte de luz (FRESHDESK, 2025).

3.1.3 Estruturas

As estruturas projetadas não estarão submetidas a altas solicitações mecânicas, uma vez que sua função principal se restringe ao suporte do sistema durante o funcionamento do clinostato. Dessa forma, os carregamentos atuantes serão predominantemente esforços inerciais, decorrentes da rotação do conjunto, cuja velocidade angular não pode ser elevada devido às interferências que provoca nos resultados experimentais (ALVES, 2013).

O conjunto estrutural poderá ser segmentado em módulos menores, unidos por sistemas de fixação mecânica, seja por encaixes de pressão ou por elementos de união rosqueados. A fixação da câmara de cultivo ao clinostato pode ser realizada em duas regiões distintas: nas paredes laterais ou nas regiões superior e inferior (Figura 24). As amostras devem permanecer o mais centralizadas possível, de modo a melhorar a qualidade dos resultados, com o acelerômetro posicionado próximo a essa região, conforme indicado por Metelli (2021).

As estruturas de suporte devem incluir eixos ajustáveis para o prolongamento e posicionamento da câmara de cultivo, juntamente com uma estrutura externa opaca, de cor clara, projetada para bloquear a entrada de luz ambiente e minimizar a absorção de calor gerado pela iluminação interna. Essa configuração visa validar o desempenho do sistema desenvolvido, mantendo as condições experimentais controladas dentro da câmara.

As possibilidades de encaixe são ilustradas na Figura 24, na qual se optou por utilizar conexões nas regiões superior e inferior. Essa escolha deve-se ao fato de que uma conexão lateral exigiria adaptações adicionais para manter a distribuição simétrica de massa no anel central, uma vez que o centro da parede lateral é utilizado como ponto de conexão para o giro do anel (Figura 24).

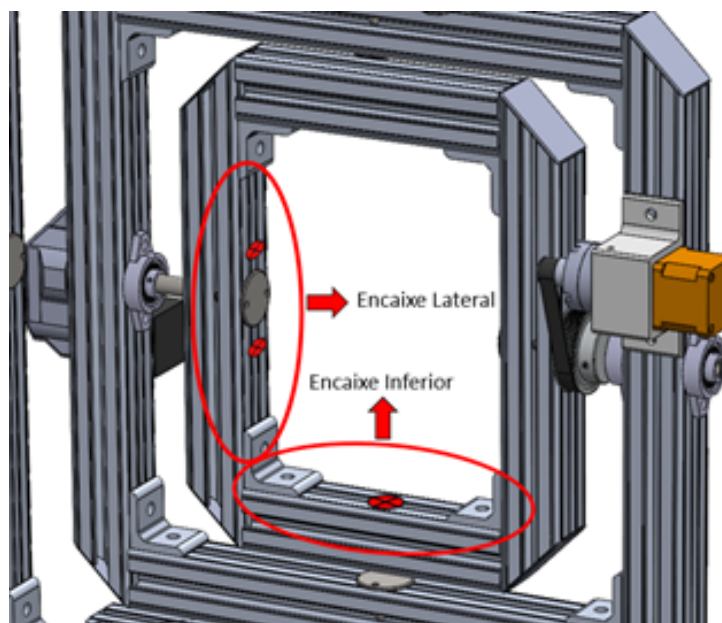


Figura 24 – Possibilidades de encaixe da câmara de cultivo no Clinostato

Fonte: Autor.

Após a divisão das estruturas em módulos, deverão ser desenvolvidos os seguintes componentes estruturais, os quais poderão ser fabricados por manufatura aditiva ou usinagem de peças:

- Suportes para encaixe dos eixos;
- Estrutura de fixação do sistema eletrônico de controle;
- Suporte para germinação;
- Reservatório de substrato;
- Paredes laterais da câmara de cultivo;
- Suporte para o sistema de administração de água.

A região interna da câmara de cultivo apresentará elevada umidade, resultante das trocas gasosas e da presença do substrato vegetal, fator que deve ser considerado na seleção do material entre PETG e PLA, no caso da opção por manufatura aditiva.

Opções utilizando manufatura aditiva já foram utilizadas em projetos semelhantes, como no desenvolvimento da placa de cultivo utilizada no projeto GreenCube. Desenvolvida por meio de impressão 3D (Figura 25), com capacidade de armazenar o substrato de cultivo (METELLI, 2021).

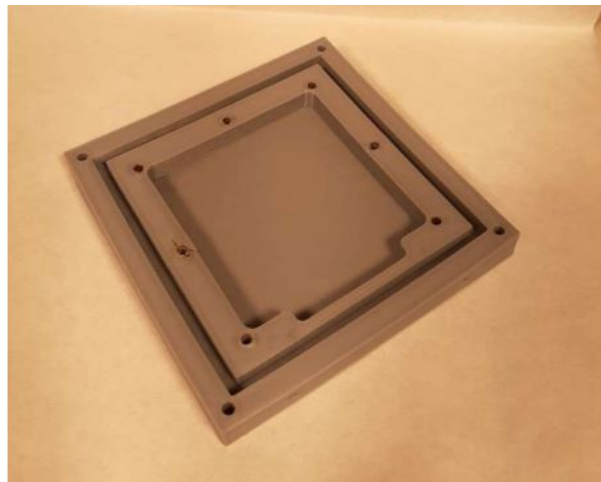


Figura 25 – Placa de Cultivo feita em impressão 3D utilizada no projeto GreenCube.
Fonte: Metelli (2021) .

Embora o PLA apresente maior facilidade de impressão, trata-se de um material suscetível à hidrólise, podendo degradar-se em ambientes úmidos e perder propriedades mecânicas ao longo do processo de germinação. Por outro lado, o PETG apresenta maior resistência à umidade e menor propensão à degradação acelerada (NIETO et al., 2021).

Para mitigar a penetração porosa em regiões de alta umidade e corrigir possíveis fissuras ou lacunas resultantes do processo de impressão, considera-se a aplicação de massa plástica, verniz ou resina epóxi, os quais também facilitam a limpeza e manutenção dos componentes, quando necessário.

O processo de fabricação pode exigir a adoção de espessuras mínimas para os componentes, visto que estruturas excessivamente delgadas, quando produzidas por manufatura aditiva, apresentam maior propensão a falhas. Nessas condições, podem ocorrer lacunas, descontinuidades ou fissuras durante a deposição do material ou na remoção das peças da impressora 3D, comprometendo a integridade estrutural do conjunto, conforme observado por Baechle-Clayton et al. (2022).

No caso da manufatura aditiva pelo método FDM (Modelagem por Deposição Fundida), as peças projetadas devem ser planejadas considerando sua orientação de impressão, uma vez que a posição de fabricação pode aumentar a necessidade de suportes,

o que prejudica o acabamento superficial, gera descontinuidades e eleva o consumo de filamento de forma desnecessária.

3.1.4 Seleção das sementes para germinação

A seleção das espécies a serem germinadas deverá considerar, prioritariamente, a velocidade de germinação das sementes e o atual cenário de cooperação internacional no qual o Brasil está inserido, especialmente por meio da parceria entre a Embrapa e a Agência Espacial Brasileira (AEB) no desenvolvimento de tecnologias agrícolas voltadas para o programa Artemis (EMBRAPA, 2023).

Essa colaboração, oficializada em novembro de 2023, integra o país ao programa Artemis da NASA e posiciona o Brasil como um dos 27 signatários comprometidos com o avanço da presença humana sustentável no espaço. A Embrapa se destaca nesse esforço por sua experiência em agricultura tropical, inovação tecnológica e uma ampla rede de pesquisa composta por mais de 30 pesquisadores de 12 instituições parceiras (EMBRAPA, 2023).

O projeto contempla o desenvolvimento de sistemas de germinação e cultivo em ambientes fechados, com ênfase em métodos como hidroponia e aeroponia. As primeiras espécies a serem investigadas, batata-doce e grão-de-bico, foram escolhidas com base em seu valor nutricional, rusticidade e adaptabilidade a condições extremas (EMBRAPA, 2023).

Além da contribuição direta ao ambiente espacial, os resultados da pesquisa poderão trazer benefícios à agricultura terrestre, como cultivares mais resistentes, sistemas de produção mais eficientes e soluções inovadoras para enfrentar os efeitos das mudanças climáticas (EMBRAPA, 2023).

3.1.4.1 Germinação de microverdes

A adoção de microverdes (Figura 26) como modelo para experimentos de germinação em microgravidade apresenta-se como uma alternativa estratégica e promissora. Esses vegetais são colhidos poucos dias após a germinação, quando os cotilédones estão completamente desenvolvidos e a primeira folha verdadeira começa a emergir, caracterizando um estágio fenológico precoce, porém estável para análises científicas. A principal vantagem dos microverdes está no seu rápido ciclo de cultivo, permitindo resultados em poucos dias, o que é ideal em condições espaciais onde o tempo disponível para experimentos pode ser limitado (METELLI, 2021).

Além disso, os microverdes se destacam pela elevada concentração de compostos bioativos, como fenóis, flavonoides, vitaminas e antioxidantes, cuja função natural é proteger a planta contra estresses ambientais. Essa característica é especialmente útil em

ambientes adversos como o espaço, onde a radiação e a ausência de convecção natural impõem desafios ao desenvolvimento vegetal (METELLI, 2021). Sua resiliência ao estresse abiótico, aliada ao porte reduzido e à possibilidade de cultivo em sistemas hidropônicos ou aeropônicos, reforça sua adequação a ambientes controlados e de gravidade simulada.



Figura 26 – Fotos de vários microverdes tiradas no Laboratório de Pesquisa em Nutrição e Metabolismo da Universidade do Alabama, EUA.

Fonte: Zhang et al. (2021)

Do ponto de vista logístico, os microverdes demandam pouca água, energia e substrato, podendo ser cultivados em estruturas compactas e até em sistemas multilevel, otimizando o uso do espaço, uma limitação crítica em missões espaciais. Além disso, sua produção pode ser feita em câmaras de cultivo com controle preciso de variáveis ambientais, como luminosidade e temperatura, permitindo modular os estímulos externos para obter respostas fisiológicas específicas (METELLI, 2021).

A resposta dos microverdes à variação espectral da luz artificial, em especial ao uso de LEDs com comprimentos de onda ajustados (vermelho, azul, UV), também representa uma oportunidade de investigar a fotomorfogênese em microgravidade, aspecto de interesse crescente em programas espaciais que envolvem a produção de alimentos frescos a bordo. A correlação entre espectro luminoso e produção de compostos antioxidantes pode ser explorada como critério adicional de eficiência na escolha das espécies a serem embarcadas (METELLI, 2021).

Em conjunto, essas características fazem dos microverdes não apenas uma ferramenta útil para o estudo da germinação em microgravidade, mas também um modelo

promissor para futuros sistemas de cultivo espacial, contribuindo para a autonomia alimentar de tripulações em missões de longa duração (METELLI, 2021).

3.1.5 Substrato

Para o sistema de administração de água e nutrientes, podem ser considerados dois cenários distintos ao longo do experimento.

O primeiro cenário envolve o uso de gel de cultivo (Figura 27) como meio de crescimento, atuando simultaneamente como substrato e fonte de nutrientes. Essa abordagem elimina a necessidade de intervenções frequentes para o controle nutricional, embora exija consistência mínima adequada, de modo a evitar que o substrato se espalhe dentro da câmara de cultivo durante a rotação do clinostato.

O gel de cultivo é mencionado em Vogt, Moreno e Countryman (2012) como uma opção alternativa para o cultivo de plantas em Clinostatos de pequeno porte. Existem variações experimentais que utilizam água com agar-agar para o endurecimento, soluções comerciais disponíveis em lojas de jardinagem e formulações laboratoriais mais elaboradas, desenvolvidas especificamente para pesquisas científicas (VOGT; MORENO; COUNTRYMAN, 2012).



Figura 27 – Germinação utilizando gel de cultivo como substrato.

Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=YT0WwaCBCKk>.

O segundo cenário considera a utilização de um substrato inerte (Figura 28), como algodão ou espuma floral, que não fornece nutrientes de forma autônoma. Nessa configuração, a administração da solução nutritiva deve ser realizada de maneira controlada, por meio de um subsistema automatizado, coordenado por um servomotor ou motor de passo, garantindo a dosagem adequada de água e nutrientes ao longo do tempo.

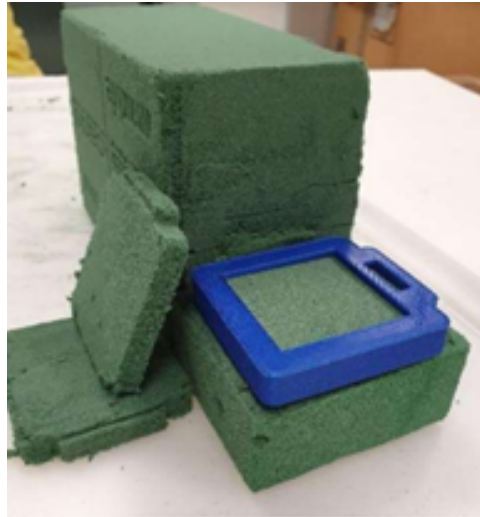


Figura 28 – Germinação utilizando gel de cultivo como substrato.
Fonte: [Metelli \(2021\)](#)

A espuma polifenólica usada em horticultura (Figura 28), é utilizada pensando em evitar vazamento da solução nutritiva durante o voo espacial, devido a sua capacidade de retenção de líquidos ([METELLI, 2021](#)).

3.1.6 Sistema de administração de nutrientes

Entre as soluções avaliadas, foram identificados projetos semelhantes de sistemas automáticos para administração de nutrientes. A Figura 29 apresenta um modelo fabricado por impressão 3D, em que um motor de passo aciona uma engrenagem conectada a uma canaleta, responsável pelo movimento do êmbolo da seringa, um conceito de simples implementação e baixo custo.

Outro modelo, utilizado no projeto GreenCube, faz uso de uma estrutura comercial programável originalmente desenvolvida para o setor médico (Figura 30). Embora apresente maior confiabilidade e precisão, essa solução reduz a autonomia de adaptação do sistema e demanda uma aquisição mais seletiva, devido à sua disponibilidade limitada e custo superior.



Figura 29 – Opção de sistema para administração de água utilizando impressão 3D e motor de passo.

Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=UDNN5T4efgw>.



Figura 30 – Sistema médico para administração de nutrientes utilizado no projeto Green-Cube

Fonte: [Metelli \(2021\)](#)

3.2 Análise preliminar

3.2.1 Sistema eletrônico

Na comparação entre microcontroladores com câmera integrada e soluções adaptadas com módulos externos, optou-se por utilizar um microcontrolador com câmera integrada e conectividade sem fio. Essa escolha reduz o número de componentes externos necessários, simplifica a integração do sistema e oferece recursos suficientes para captura fotográfica e transmissão de vídeo em baixa taxa de quadros, atendendo ao requisito de registro do crescimento das plantas.

A presença de conectividade sem fio nativa possibilita o envio remoto de imagens ou vídeos para monitoramento em tempo real. Com acionamento do servomotor para controle de envio de nutrientes para o caso de substrato inerte.

Com base na escolha do microcontrolador integrado, o projeto do sistema de cultivo passa a contemplar a integração de todos os subsistemas necessários para o monitoramento e registro do crescimento das plantas. O controlador deverá gerenciar a captura de imagens, a aquisição de dados de temperatura, o acionamento da iluminação e o controle de movimentos mecânicos para administração de substrato, garantindo operação coordenada e confiável da câmara de cultivo. Para atender a esses requisitos, torna-se necessário definir os componentes que comporão o sistema, incluindo sensores, atuadores, módulos de armazenamento e circuitos de interface, permitindo que todas as funções sejam executadas de forma eficiente e segura dentro da estrutura do equipamento. Esta abordagem permite visualizar o conjunto de materiais essenciais para o desenvolvimento do protótipo, assegurando a viabilidade técnica do sistema antes de sua implementação física.

3.2.1.1 Controlador

O sistema eletrônico será desenvolvido com base no ESP32-CAM (Figura 31), que integra microcontrolador dual-core de 32 bits, câmera digital, interface para cartão microSD e conectividade sem fio (Wi-Fi/Bluetooth). Essa configuração reduz a quantidade de componentes externos e simplifica a integração do sistema, atendendo aos requisitos de captura e registro do crescimento das plantas, bem como de monitoramento remoto.

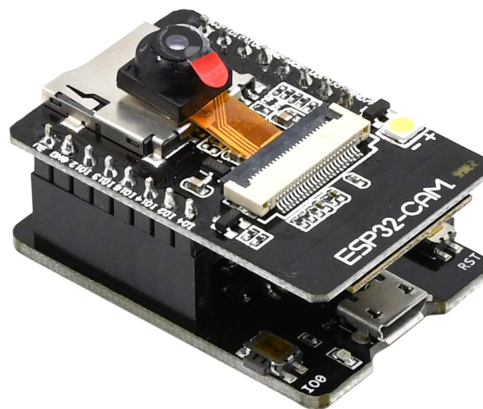


Figura 31 – ESP32-CAM com placa MB.

Fonte: [Eletrônicos \(2025\)](#)

O armazenamento de imagens e vídeos será realizado em cartão microSD, permitindo registro contínuo das condições de cultivo. Para programação inicial e comunicação com o computador, será utilizado um módulo conversor de comunicação serial, garantindo transferência de código e dado.

3.2.1.2 Sensor de temperatura

A precisão na captura de dados sobre a temperatura não precisa de alto grau de precisão, pois não será feito um estudo detalhado para diferentes casos de temperatura, servindo apenas de uma base para avaliação do sistema.

O sensor deve ter resistência ao ambiente úmido e de fácil conexão, avaliando para uso dois modelos com proteção em aço inoxidável: DS18B20 (Figura 32) e MF58 (Figura 33), que possuem comunicação simples, através de um único fio (1-Wire) para o DS18B20, e por pinos no MF58, o que lhe permite utilizar apenas uma porta digital do microcontrolador para transferir os dados.

O sensor DS18B20 (Figura 32) opera entre -55°C até $+125^{\circ}\text{C}$ e com precisão de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ se estiver trabalhando dentro da faixa de -10°C até $+85^{\circ}\text{C}$. Porém apesar do sensor operar em uma temperatura máxima de 125°C , o seu cabo é feito em PVC, dessa forma a temperatura de trabalho aconselhada pelo fabricante é abaixo de 100°C .



Figura 32 – Sensor de temperatura DS18B20
Fonte: [Eletrônicos \(2025\)](#)

O sensor MF58, que é um termistor NTC fabricado usando uma combinação de técnicas de cerâmica e semicondutor, envolto em vidro purificado. Ele opera dentro da faixa de temperatura entre -55°C até $+200^{\circ}\text{C}$ com precisão entre $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ e $\pm 1^{\circ}\text{C}$.



Figura 33 – Sensor de temperatura MF58
Fonte: [Eletrônicos \(2025\)](#)

3.2.1.3 Iluminação

Nessa etapa, será calculado o comprimento mínimo da fita de LED necessária para a iluminação da câmara de cultivo. Primeiramente, é calculado o fluxo luminoso necessário (Φ), considerando a área efetiva a ser iluminada (A).

A área fornecida, segundo o espaço interno projetado pela câmara de cultivo, é dada por:

$$A = \frac{4222,94}{10^6} \text{ cm}^2 = 0,00422 \text{ m}^2 \quad (3.4)$$

Logo, a área de cultivo é de aproximadamente 42 cm² (cerca de um quadrado de 6,5 × 6,5 cm).

Densidade de Fluxo de Fótons Fotossintéticos (PPFD) e Conversão para Iluminância (Lux)

A Densidade de Fluxo de Fótons Fotossintéticos (PPFD) adotada, expressa em $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, previamente definida no projeto conceitual, será a mesma tanto para a germinação das microverdes quanto para a germinação da batata-doce, para evitar gastos e modificações adicionais ao projeto.

- **Valor de PPFD considerado:** 100 – 150 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (Microverdes e batata-doce: germinação e primeiras folhas).

Fatores de conversão para iluminância segundo Waveform Lighting (2025):

- LEDs brancos de 4000 – 6500 K: 54 lux \approx 1 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.
- LEDs brancos frios 6500 K: 58 lux \approx 1 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

Assim, as exigências mínimas em lux (lm/m²) considerando LEDs brancos são:

$$\text{Lux}_{\text{mínimo}} = 100 \cdot 54 = 5400 \text{ lx} \left(\frac{\text{lm}}{\text{m}^2} \right) \quad (3.5)$$

$$\text{Lux}_{\text{máximo}} = 150 \cdot 54 = 8100 \text{ lx} \left(\frac{\text{lm}}{\text{m}^2} \right) \quad (3.6)$$

Cálculo do Fluxo Luminoso Total (Φ)

Sabendo que a relação entre fluxo luminoso, iluminância e área é dada por:

$$\Phi = E \cdot A \quad (3.7)$$

onde:

- Φ = fluxo luminoso total em lúmens (lm)
- E = iluminância em lux (lm/m²)
- A = área iluminada em m²

Cálculo:

$$\Phi_{\min} = 5400 \cdot 0,00422 = 22,79 \text{ lm} \quad (3.8)$$

$$\Phi_{\max} = 8100 \cdot 0,00422 = 34,18 \text{ lm} \quad (3.9)$$

Cálculo do Comprimento da Fita de LED (L)

Avaliando o fluxo luminoso emitido por fitas de LED 2835. Um LED típico 2835 branco fornece 20 – 22 lm a 60 mA. As fitas normalmente possuem:

- **Caso 1:** 60 LEDs/m: ≈ 1200 lm/m
- **Caso 2:** 120 LEDs/m: ≈ 2400 lm/m

Logo, o fluxo luminoso por centímetro (lm/cm) é:

$$\text{Fluxo}_{\text{Caso 1}} = \frac{1200}{100} = 12 \text{ lm/cm} \quad (3.10)$$

$$\text{Fluxo}_{\text{Caso 2}} = \frac{2400}{100} = 24 \text{ lm/cm} \quad (3.11)$$

Portanto, o comprimento necessário da fita LED (L) para germinação, dado por $L = \Phi/\text{Fluxo}_{\text{cm}}$, será:

Caso 1 (12 lm/cm):

$$L_{\text{MinCaso1}} = \frac{22,79}{12} \approx 1,90 \text{ cm} \quad (3.12)$$

$$L_{\text{MáxCaso1}} = \frac{34,18}{12} \approx 2,85 \text{ cm} \quad (3.13)$$

Caso 2 (24 lm/cm):

$$L_{\text{MinCaso2}} = \frac{22,79}{24} \approx 0,95 \text{ cm} \quad (3.14)$$

$$L_{\text{MáxCaso2}} = \frac{34,18}{24} \approx 1,43 \text{ cm} \quad (3.15)$$

3.2.1.4 Sistema de administração de água

Para esse sistema será necessário o uso de um motor para movimentar a engrenagem conectada ao trilho. Coordenado o movimento programado para períodos específicos por meio de um motor de passo (Figura 34).



Figura 34 – Motor de passo 28byj-48 com driver Uln2003 Arduino robótica.
Fonte: [Eletrônicos \(2025\)](#)

3.2.2 Estruturas

3.2.2.1 Fabricação

A estrutura do projeto será desenvolvida a partir de componentes confeccionados por meio de manufatura aditiva, utilizando impressoras 3D disponíveis no Laboratório de Estruturas e Materiais Aeroespaciais (LEMA) (Figura 35). Dessa forma, optou-se pela utilização do PETG, por apresentar maior resistência à umidade e menor propensão à degradação acelerada ([NIETO et al., 2021](#)).

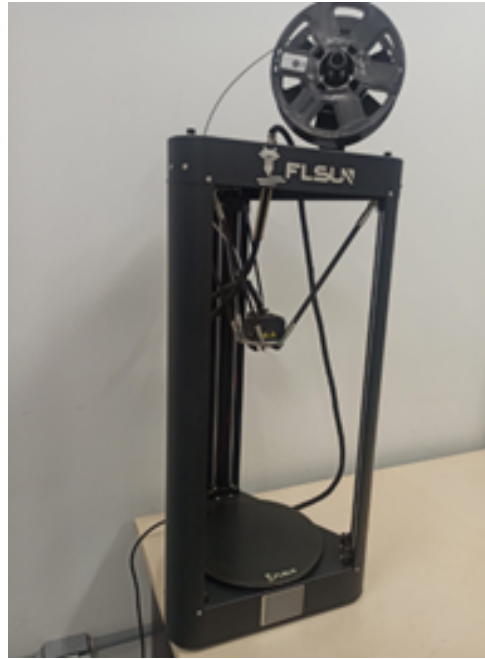


Figura 35 – Impressora 3D FLSUN QQ-S utilizada na impressão de peças.
Fonte: Autor.

A impressora possui aquecimento de bico de até 260 °C, área de impressão com 260 mm x 360 mm, diâmetro de filamento de 1.75 mm. Condições necessárias para escolha do filamento e dimensões das peças, o que possibilita a impressão de peças em PETG, que exige temperaturas na faixa de 220° a 245°C, especificadas pelo fabricante.

3.2.2.2 Características do material e requisitos da câmara de cultivo

As características do PETG escolhido para fabricação são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Especificações técnicas do PETG utilizado

Matéria prima	Politereftalato de Etileno com Glycol
Diâmetro do Filamento	1,75 mm \pm 0,02 mm
Temperatura de extrusão	220° C ~ 245° C
Temperatura da mesa	70° C
Transição Vítreia (Tg)	75° ~ 80° C
Velocidade Volumétrica	20 mm ³ /s
Densidade	1,27 g/cm ³

Definido o método de fabricação a ser adotado, tornou-se possível a construção do CAD das estruturas, que seriam posteriormente alteradas para fabricação por meio de impressão utilizando PETG.

O projeto estrutural também possui restrições de dimensão para fixação ao anel central, sendo máximo de 180 mm lateral e 240 mm de altura, em que a estrutura deve ter o comprimento limite de altura para fixação na região superior e inferior do anel central.

Os requisitos para desenvolvimento das estruturas são divididos em requisitos gerais (Tabela 5), aplicáveis a todas as peças, e requisitos específicos (Tabela 4) necessários para cada componente.

Tabela 4 – Requisitos específicos para construção das peças

Suporte do sistema eletrônico de controle	Deve conter passagem para apoio da câmera, fios e sensor de temperatura, além de suporte para o ESP32 e aberturas para conexão com o suporte do eixo superior e paredes da câmara de cultivo.
Paredes laterais	Devem ser divididas em quatro partes para facilitar correções futuras, substituições e garantir boa impressão.
Suporte inferior	Necessita de aberturas para encaixe com as paredes da câmara de cultivo, espaço para fixação do eixo, reserva de substrato e espaço para o suporte das sementes.
Eixos	Devem possuir comprimento suficiente para centralizar as sementes no anel, apresentando baixa flexibilidade e fácil encaixe com os conectores.
Conectores dos eixos	Devem possuir chanfro ou conexão quadrada para evitar rotações indesejadas, além de espaço para passagem de parafusos.
Suporte para as sementes	Deve conter divisões internas para separação das sementes, espaço para substrato inerte e paredes superiores para fixação do material.
Suporte para talos de batata	Deve conter aberturas para fixação dos talos, com comprimento adequado para encaixe.
Suporte para seringa	Deve conter diâmetro interno de 35 mm.
Engrenagem	Deve possuir dente compatível com a canaleta e abertura interna para fixação do motor de passo.
Trilho	Comprimento maior que 160 mm para garantir controle máximo do volume de água dentro da seringa.
Suporte do sistema de administração de água	Deve possuir espaço para fixação de todos os componentes do sistema e conexão com a parede lateral da câmara.

Tabela 5 – Requisitos gerais para construção das peças

Suportes	Usar o mínimo de suportes possíveis para não danificar o acabamento das peças, evitando lacunas que possam gerar infiltração de água.
Posições para impressão	As peças devem ser posicionadas de modo que não fiquem com regiões muito alongadas no sentido vertical, pois o mau controle térmico pode gerar defeitos ao final da impressão.
Inclinação de impressão	A inclinação sem suporte não deve ultrapassar 50°, valor observado na fabricação de outras peças feitas no LEMA.
Proteção contra umidade	Regiões em contato direto com áreas úmidas devem conter reforço contra umidade, utilizando resina ou verniz que não danifiquem o PETG.

O modelo tridimensional das peças foi elaborado por meio do software *SolidWorks* versão 2025, dividido nas estruturas da câmara de cultivo e do sistema de administração de água.

3.2.2.3 Modelo tridimensional das peças para construção da câmara de cultivo

As plantas das estruturas desenvolvidas individualmente estão presentes no Apêndice (B), com as respectivas dimensões.

A Figura 36 apresenta a câmara de cultivo desenvolvida, com paredes laterais transparentes apenas para visualização da estrutura interna. O modelo real será completamente opaco, para melhor controle do sistema de iluminação.

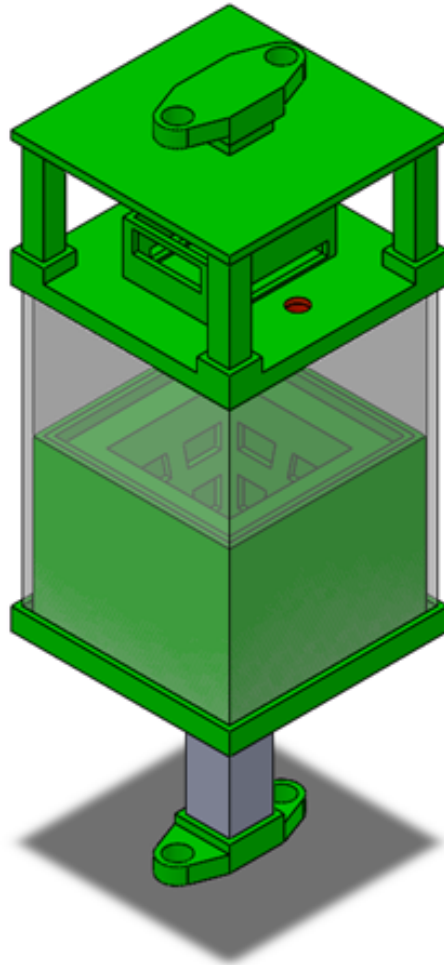


Figura 36 – Isométrica da montagem preliminar da câmara de cultivo.

Fonte: Autor.

A Figura 36 utiliza o suporte para germinação da batata doce, que pode ser alterado, encaixado o suporte das sementes caso necessário.

Nesse modelo com fixação feito por porca materlo para perfil estrutural, componentes podem ser fixados nas paredes laterais planas. Modelo que simplifica possíveis conexões laterais, como possíveis sistemas eletrônicos e sistemas auxiliares.

O sistema de administração de água (Figura 37) possui o motor de passo na região de trás, responsável por movimentar uma engrenagem, movendo o trilho e adicionando água ao substrato inerte por meio de uma mangueira de silicone.

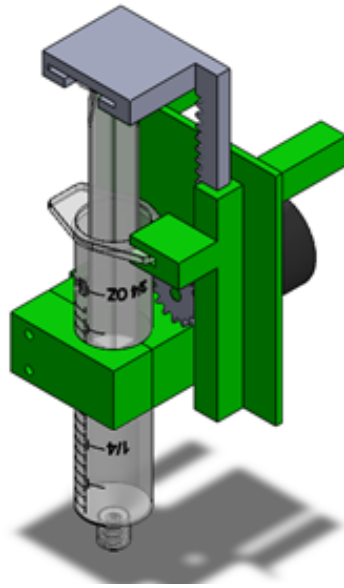


Figura 37 – Montagem completa para o sistema de administração de água.
Fonte: Autor.

O esquemático completo do sistema é apresentado pela Figura 38, nele as amostras ficam a uma distância de 10 mm do eixo horizontal e até 20 mm do eixo vertical.

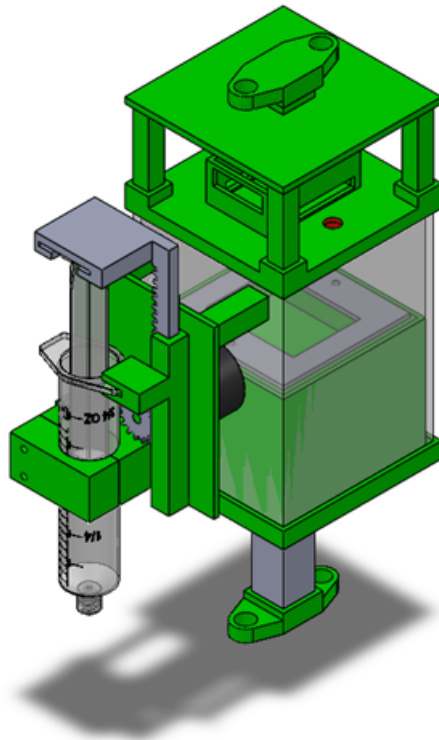


Figura 38 – Montagem da câmara de cultivo com sistema de administração de água acoplado.

Fonte: Autor.

3.3 Análise detalhada

3.3.1 Sistema eletrônico

3.3.1.1 Alimentação do sistema

A alimentação do sistema eletrônico foi realizada utilizando a mesma fonte de alimentação que controla os motores do Clinostato com tensão de 12V. Utilizando um regulador de tensão (Step Down) para conversão da voltagem para 5 Volts, suficiente para alimentação dos ESPs e do motor de passo. Enquanto a alimentação de 12V também foi utilizada para alimentação dos LEDs

No total foram utilizados 3 fios para a passagem de corrente, sendo um terminal como o terra (GND) e outros dois responsáveis pela tensão de 5V e 12V.

3.3.1.2 Controlador

Tornou-se necessário o uso de 2 controladores para conexão de todo o sistema, uma vez que o ESP32-Cam (Figura 39) indisponibiliza terminais quando utilizado as funções de controle para a câmera e armazenamento por microSD . Sendo essas funções necessárias para fazer o armazenamento e coleta de imagens para apresentação de resultados.

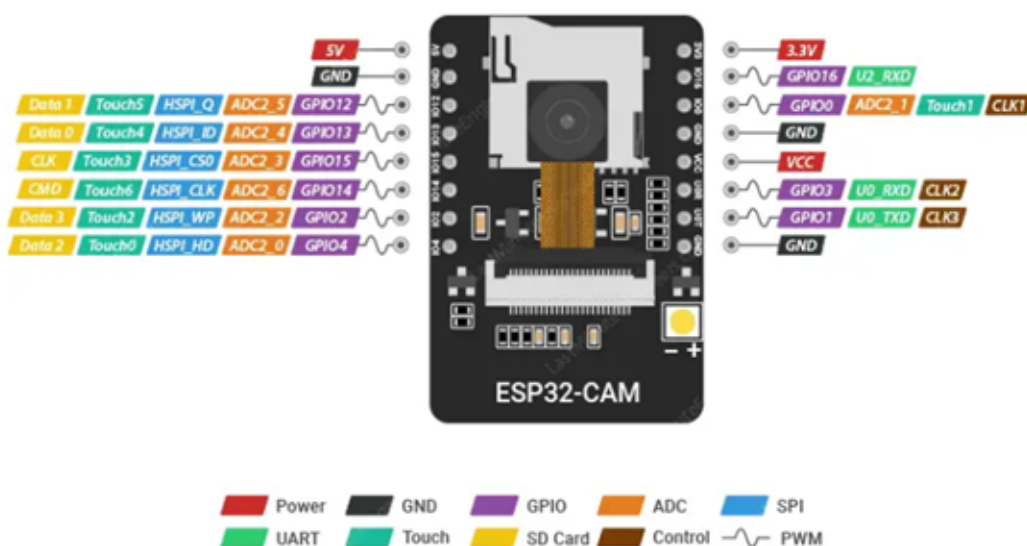


Figura 39 – Pinagem disponível para conexão do ESP32-Cam

Fonte: Autor.

O cartão de memória utilizado para captura das imagens é um MasterDrive de 16 GB, que já possui formatação em FAT32 necessária para o controlador utilizado.

A programação do ESP32-Cam é feita para retirar imagens do interior da câmara de cultivo a cada 10 minutos de simulação, separando os arquivos em pastas para cada

dia, podendo ser baixadas por uma interface web simples de acesso ao armazenamento do cartão de memória (Figura 40), disponibilizada na red local do LASE, laboratório da Universidade de Brasília. As configurações adotadas para cada imagem e armazenamento são apresentadas na Tabela 6.



Figura 40 – Interface de acesso local para download das imagens retiradas da câmara de cultivo.

Fonte: Autor.

Tabela 6 – Características da Captura de Imagens da ESP32-CAM

Resolução da Imagem	640 × 480 pixels (VGA)
Formato	JPEG
Qualidade JPEG	valor = 10
Tamanho médio por imagem	Aproximadamente 40–80 kB (dependendo da cena)
Intervalo entre imagens	Uma foto a cada 10 minutos
Imagens por dia	144 imagens/dia
Capacidade de armazenamento em 16 GB	Aproximadamente 200.000 a 320.000 imagens
Tempo total até atingir o limite de memória	Aproximadamente 1.400 a 2.200 dias de operação contínua

A Figura 41, apresenta o modelo de imagem fornecido pelos testes do sistema de captura de imagens por meio da câmera OV2640 de 2MP.

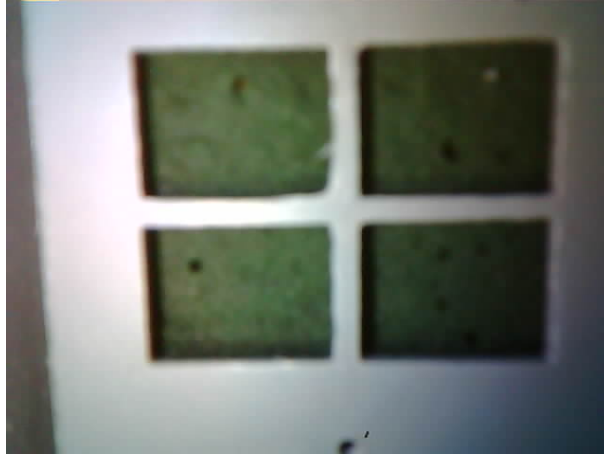


Figura 41 – Imagem de teste capturada pelo ESP32-Cam.
Fonte: Autor.

O ESP8266 12-E complementa o sistema, utilizado para conexão do sensor de temperatura, giroscópio e motor de passo. Em que o giroscópio não é utilizado em todos os experimentos, pois depende apenas da trajetória de rotação que repete-se durante os experimentos após um dado intervalo de tempo, dependendo da combinação entre a velocidade dos motores.

Dada a pinagem do ESP8266 12 -E (Figura 42), as respectivas conexões são apresentadas na Tabela 7.

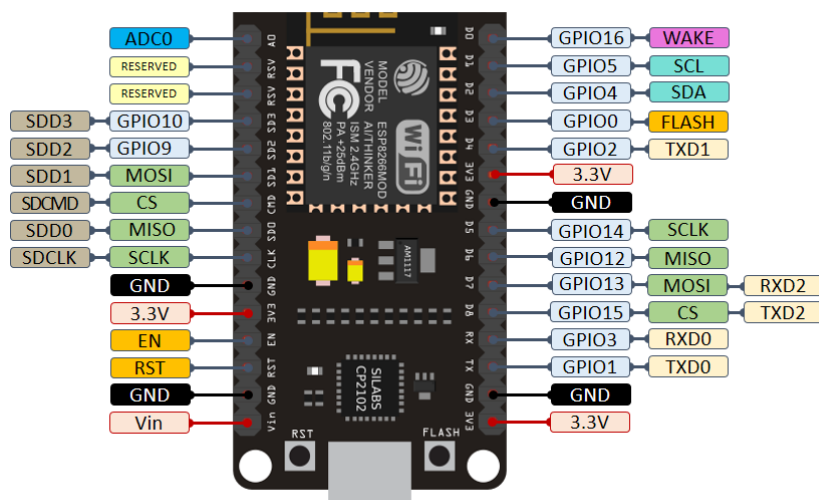


Figura 42 – Pinagem disponível para conexão do ESP8266 12-E.
Fonte: [Eletrônicos \(2025\)](#).

Tabela 7 – Pinagem utilizada no módulo ESP8266 12-E

IN1	Motor de passo – bobina 1 (GPIO5 / D1)
IN2	Motor de passo – bobina 2 (GPIO4 / D2)
IN3	Motor de passo – bobina 3 (GPIO14 / D5)
IN4	Motor de passo – bobina 4 (GPIO12 / D6)
PIN_DS18B20	Sensor de temperatura DS18B20 (GPIO13 / D7)

O ESP8266 foi programado para armazenar as temperaturas em arquivo txt, a cada 1 hora de experimento, coletando 24 temperaturas por dia. O acionamento dos motores ocorre a cada 12 horas. As informações referentes à temperatura e acionamentos do motor podem também ser acessadas pela rede local do laboratório Figura 43.



Figura 43 – Interface de acesso local para download e acesso das informações do ESP8266.
Fonte: Autor.

3.3.1.3 Sensor de temperatura

O sensor de temperatura DS18B20 foi testado e apresentou boa calibração ao medir a temperatura local antes do experimento. Conectado ao ESP8266, ele apresenta a temperatura interna da câmara de cultivo a cada 1 hora e possui características de funcionamento apresentadas na Tabela 8

Tabela 8 – Características do sensor de temperatura DS18B20

Faixa de Temperatura	-55 °C a +125 °C
Precisão	±0,5 °C (na faixa de -10 °C a +85 °C)
Tempo de Resposta	Menor que 750 ms
Resolução	Configurável entre 9-bit e 12-bit
Identificação	Número de série único de 64-bit, permitindo uso de múltiplos sensores no mesmo pino
Encapsulamento da Ponteira	Aço inoxidável, Ø 6 mm × 30 mm, com vedação em cola e tubo termorretrátil, adequado para isolamento e uso submerso
Cabo de Ligação	90 cm, revestido em PVC
Interface de Conexão	3 fios: Vermelho (VCC), Branco/Amarelo (Dados) e Preto (GND)

3.3.1.4 Iluminação

A iluminação é feita por LEDs do tipo SMD3528 com tensão de alimentação de 12V. Flexível e impermeável, atendendo ao requisito operacional de trabalho em ambiente úmido.

As informações referentes a fita de LEDs utilizada é apresentada pela Tabela 9.

Tabela 9 – Especificações da Fita de LEDs SMD3528

Quantidade de LEDs por metro	60 peças
Tensão de alimentação direta (Vf)	12 VDC
Potência consumida por metro (60 LEDs)	6 W
Temperatura de operação	-25 °C a +60 °C
Ângulo do feixe luminoso	120°
Vida útil	≥ 50.000 horas
Tipo de fixação	Fita adesiva dupla face no dorso

A fita utilizada (Figura 44) foi cortada em uma seção de 50 mm de comprimento, para atender à iluminação necessária apresentada na seção anterior ao utilizar LED branco neutro.

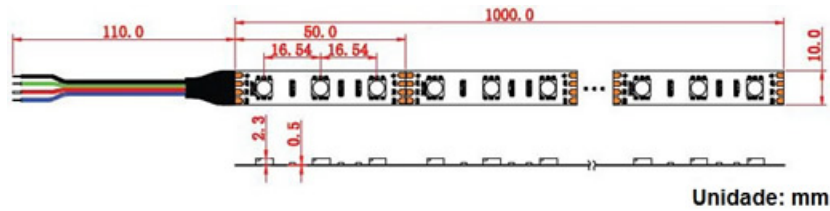


Figura 44 – Fita de LEDs SMD3528 utilizada no projeto
Fonte: [Eletrônicos \(2025\)](#).

Esse modelo de fita foi utilizado pela disponibilidade local do material, em que a tensão de funcionamento de 12V atrapalha a comunicação e o controle de aluminação pelo ESP8266, necessitando ser alterada para uma com alimentação de 5V. Dando maior liberdade de controle durante o processo de iluminação, que atualmente foi feito de maneira manual utilizando uma caixa de controle para RGB (Figura 45).



Figura 45 – Caixa de controle de iluminação
Fonte: Autor.

3.3.2 Estruturas

3.3.2.1 Fabricação

Para impressão das peças em PETG, utilizou-se 240°C como temperatura de impressão, com temperatura de mesa de 80° C para corrigir problemas de aderência da primeira camada durante a impressão. No qual o nível de preenchimento e massa de material utilizado é apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 – Massa e nível de preenchimento utilizados na fabricação das estruturas

Suporte do sistema eletrônico	Quantidade: 1	Preenchimento: 20%	Massa: 44 g
Paredes laterais	Quantidade: 4 (cada)	Preenchimento: 30%	Massa: 18 g
Suporte inferior	Quantidade: 1	Preenchimento: 30%	Massa: 57 g
Eixos	Quantidade: 2 (cada)	Preenchimento: 30%	Massa: 10 g
Conectores dos eixos	Quantidade: 4 (cada)	Preenchimento: 30%	Massa: 4 g
Suporte das sementes (superior)	Quantidade: 1	Preenchimento: 30%	Massa: 12 g
Suporte das sementes (inferior)	Quantidade: 1	Preenchimento: 30%	Massa: 30 g
Suporte para seringa	Quantidade: 1	Preenchimento: 40%	Massa: 15 g
Engrenagem	Quantidade: 1	Preenchimento: 40%	Massa: 1 g
Trilho	Quantidade: 1	Preenchimento: 30%	Massa: 9 g
Suporte do sistema de administração de água	Quantidade: 1	Preenchimento: 30%	Massa: 22 g
Total	Quantidade total: 18 peças		Massa total: 298 g

Optou-se por utilizar PETG na cor cinza claro, uma vez que não foi encontrado o material na cor branca, na qual traria mais reflexão da iluminação vinda do ambiente externo, absorvendo menos calor, causando menos interferência na temperatura interna da câmara.

Ao todo, sem considerar reposições, foram fabricadas duas câmaras de cultivo, sendo uma para realizar experimento fora do Clinostato e outra utilizada na simulação.

As Figuras 46, 47, 48, 49 e 50 apresentam as peças fabricadas para a primeira câmara de cultivo.



Figura 46 – Peças para construção do sistema de administração de água.

Fonte: Autor.



Figura 47 – Peças para montagem da região superior da câmara de cultivo com suportes para sistemas

Fonte: Autor.

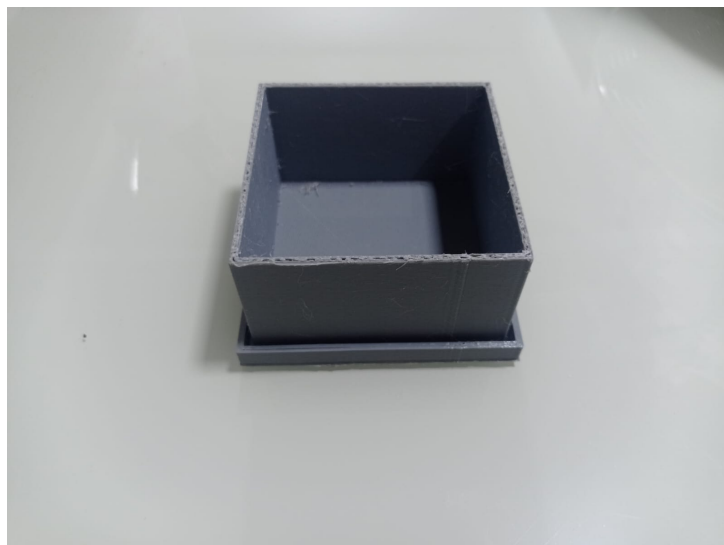


Figura 48 – Suporte inferior da câmara de cultivo
Fonte: Autor.

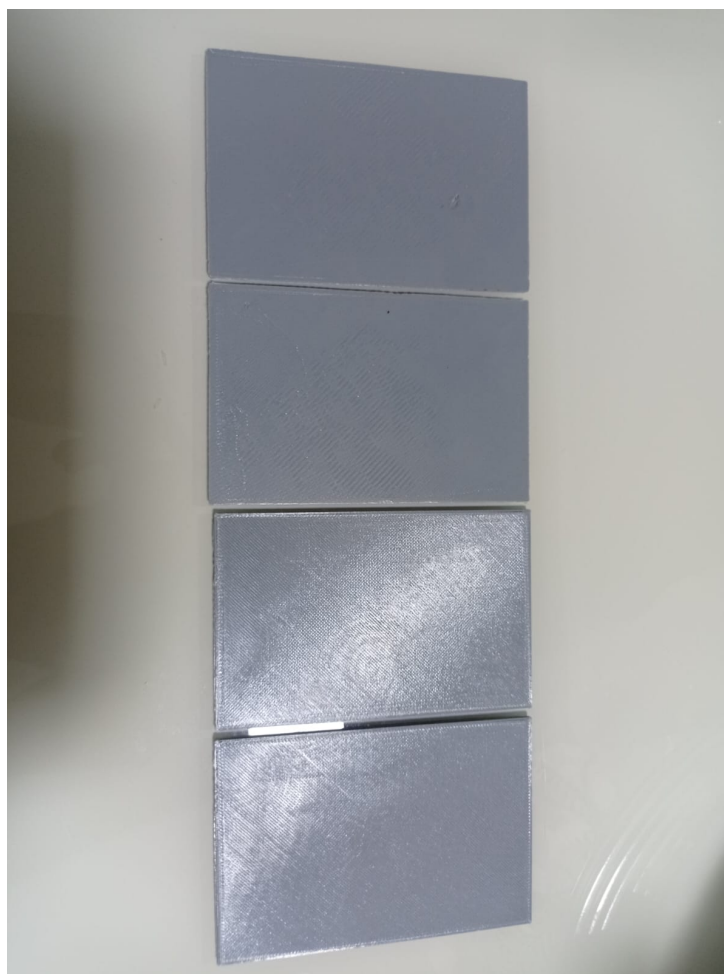


Figura 49 – Paredes laterais
Fonte: Autor.



Figura 50 – Eixos para conexão com o Clinostato
Fonte: Autor.

3.3.2.2 Montagem

As peças projetadas foram feitas com folga entre 0.2 mm e 0.35 mm, para facilitar o encaixe por pressão. Utilizando de lixa grão 40 para aumentar a folga entre peças caso necessário.

A estrutura da câmara de cultivo responsável pela fixação dos sisemas e placa de cultivo, consiste da junção dos suporte superiores e inferiores, conectados por pressão pelas paredes laterais (Figura 51). Em que após conexão, foi utilizado a cianoacrilato entre as paredes laterais da câmara de cultivo, o que diminui aberturas laterais durante o movimento do sistema, sem prejudicar a demontagem futura da estrutura.



Figura 51 – Montagem do sistema de administração de água.
Fonte: Autor.

O suporte para as sementes (Figura 52) apresenta tampa para melhor fixação do substrato inerte por meio de parafusos. O substrato teve ótima fixação à estrutura mesmo sem o uso da tampa. Abaixo dele é utilizado uma mangueira de silicone, presa na estrutura por cianoacrilato (Adesivo instantâneo).

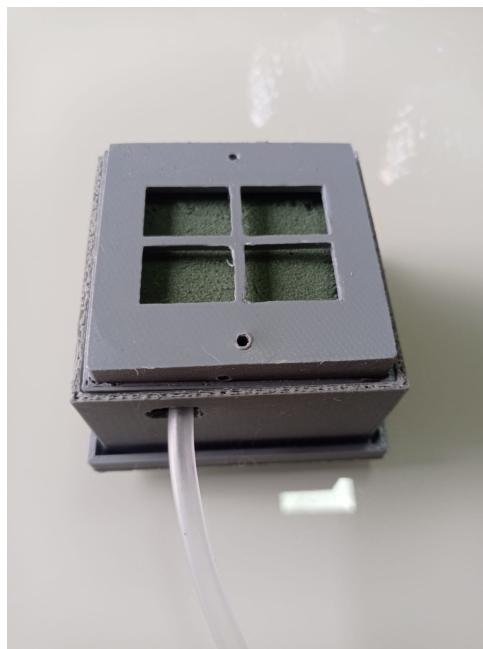


Figura 52 – Montagem do sistema de administração de água.
Fonte: Autor.

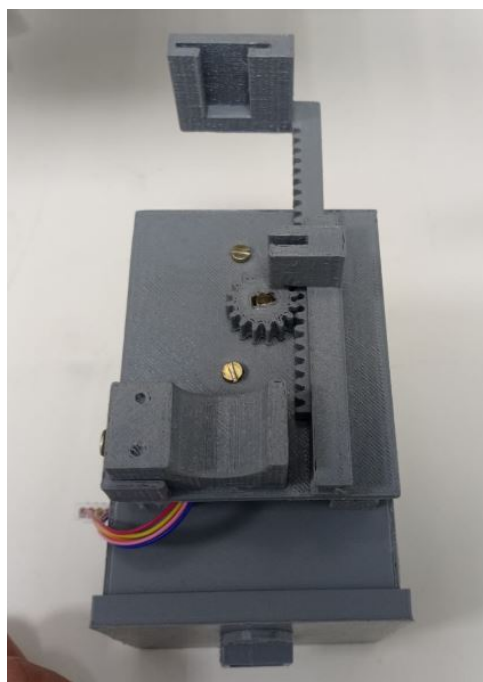


Figura 53 – Montagem do sistema de administração de água.
Fonte: Autor.

A Figura 53, apresenta a montagem do sistema de administração de água, em que

parafusos foram utilizados para auxiliar na fixação da base central da seringa, além de fixarem o motor de passo na placa central.

3.3.2.3 Estrutura final

Para testes o modelo foi mantido com a protoborde e testado no Clinostato, anexando os sistemas eletrônicos necessários à estrutura, aproveitando o espaço disponível nas paredes laterais (Figura 54) para fixação. O comprimento dos cabos foi mantido pensando em reaproveitar os sistemas para projetos futuros.

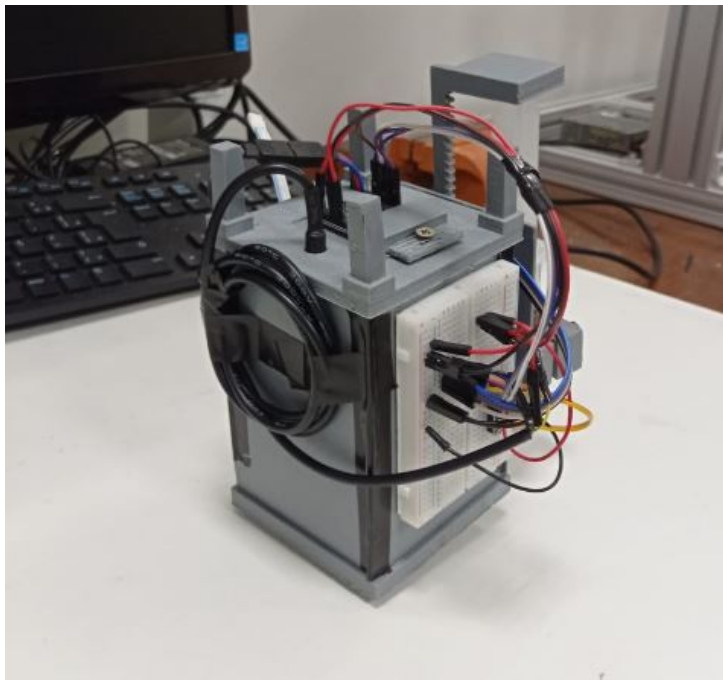


Figura 54 – Câmara de cultivo montada com seus sistemas.

Fonte: Autor.

A estrutura interna da câmara de cultivo montada é apresentada pela Figura 55.

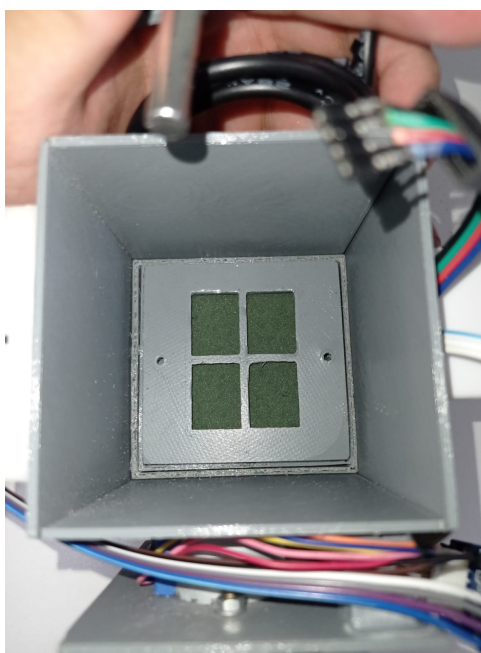


Figura 55 – Montagem do sistema de administração de água.
Fonte: Autor.

Após os testes individuais dos sistemas, a estrutura foi montada no Clinostato para teste do sistema completo (Figura 56). Realizando a fixação por porca martelo e parafusos M6 disponíveis no laboratório.

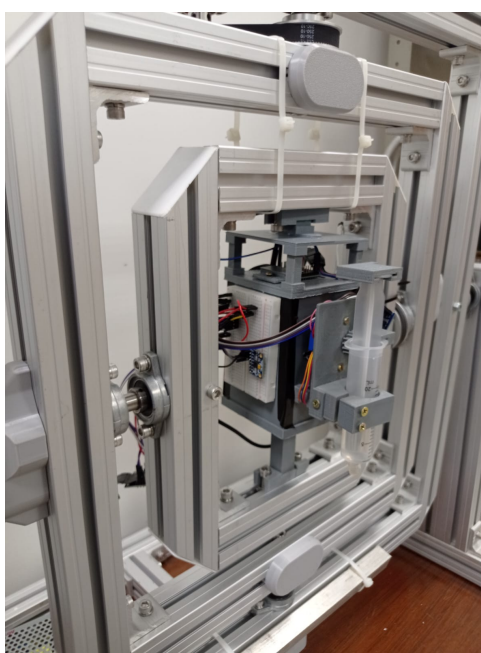


Figura 56 – Montagem final do sistema completo
Fonte: Autor.

3.3.3 Sementes e Substrato

Devido ao tempo disponível para o projeto, optou-se por realizar apenas a germinação de sementes, escolhendo a germinação de microverdes por ser mais rápida. Dentre as sementes escolhidas para germinação, buscando uma rápida resposta e considerando a disponibilidade local para compra, selecionaram-se dois tipos de semente, sendo elas sementes de rabanete Crimson Gigante (Figura 57) e agrião-d'água (Figura 58), da marca Feltrin Sementes.

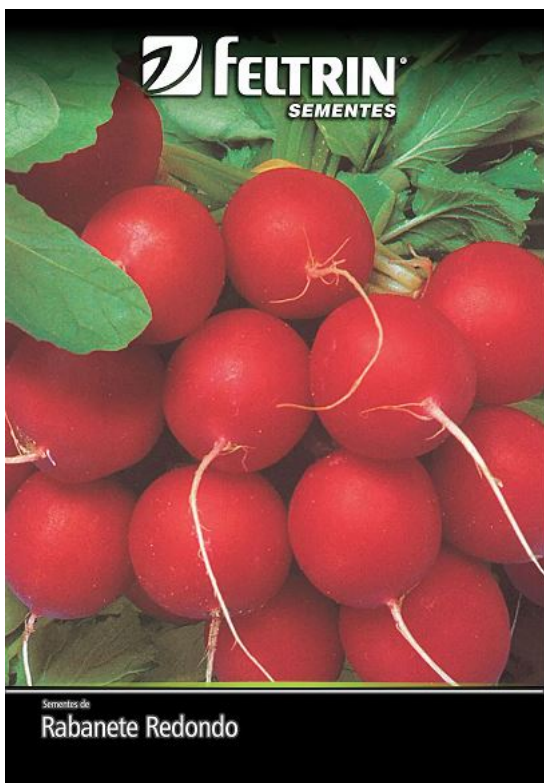


Figura 57 – Sementes de rabanete utilizadas no experimento.

Fonte: Feltrin (2025).



Figura 58 – Sementes de agrião utilizadas no experimento.

Fonte: Feltrin (2025).

O agrião-d'água necessita de uma quantidade constante de água, com irrigações de duas a três vezes ao dia, apresentando germinação entre 4 e 10 dias. A escolha deve-se à tentativa de avaliar se a espuma floral consegue armazenar água suficiente para a germinação dessa semente (FELTRIN, 2025).

Já o rabanete necessita de menos água para germinação, apresentando germinação entre 4 e 10 dias. Possui raízes grandes, fáceis de serem identificadas nos experimentos, e preferência por solos arenosos, o que pode indicar uma facilidade de germinação ao utilizar a espuma floral (FELTRIN, 2025).

A escolha das sementes foi feita considerando o tempo de germinação avaliando também a disponibilidade local, selecionando uma com maior afinidade ao processo es-

colhido, como a semente de rabanete, e outra com maiores exigências para germinação, verificando a capacidade do sistema para esse tipo de semente.

A temperatura ideal de germinação para essas sementes (Tabela 11) foi definida com base nos trabalhos [Toscano et al. \(2025\)](#), [Useful Tropical Plants / TheFerns.info \(2024\)](#) e [supplier \(2025\)](#).

Tabela 11 – Faixas de temperatura típicas para germinação de rabanete e agrião-d'água

Nome comum	Nome científico	Faixa de temperatura de germinação (°C)
Rabanete Redondo	<i>Raphanus sativus</i>	20–25 °C (ótimo); germina bem em 5–35°C dependendo de estresse hídrico.
Agrião-d'água	<i>Nasturtium officinale</i>	Aprox. 12–18 °C (condições ideais diurnas); recomendações práticas comerciais: ~ 15.5–18.3 °C.

Foram realizados testes para avaliar a capacidade de absorção de água da espuma floral, verificando-se que ela absorve a umidade disponível até o ponto de saturação, demonstrando eficiência no transporte de líquidos por capilaridade.

Já os testes envolvendo germinação, realizados fora da câmara de cultivo, com administração de 2 mL de água a cada 12 horas e temperatura média de 25,85 °C, resultaram em germinação aparente do rabanete em um período de 6 dias (Figura 59). Nesse processo, não houve germinação do agrião em nenhum momento, o que evidencia a dificuldade de sua germinação diante dos fatores abióticos oferecidos.

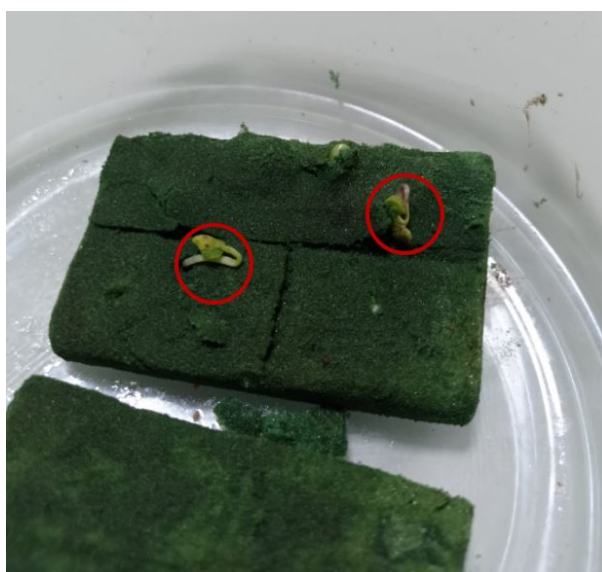


Figura 59 – Teste realizado para avaliar o funcionamento da espuma floral com germinação das sementes de rabanete após 6 dias

Fonte: Autor.

4 Resultados Experimentais

Neste tópico são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da combinação das velocidades de operação do clinostato, empregada com o objetivo de otimizar o movimento de rotação, bem como o desempenho dos sensores da câmara de cultivo e as observações registradas durante os experimentos de germinação realizados em duas condições distintas: uma câmara de cultivo sem clinorotação e outra com clinorotação.

Os experimentos foram conduzidos sob iluminação contínua, a fim de permitir a aquisição automática das imagens ao longo do período experimental. A temperatura média diária foi calculada a partir das leituras fornecidas pelo sensor em intervalos de 1 hora, totalizando 24 medições por dia. Todas as temperaturas registradas encontram-se disponibilizadas no Apêndice D.

As sementes de rabanete foram distribuídas sobre o meio de suporte com espaçamento uniforme de 3 mm, utilizando-se no mínimo 12 sementes por experimento. A irrigação foi realizada de forma automática por meio de um motor de passo, com aplicação de 2 mL de água a cada 12 horas. Esse volume foi definido a partir dos ensaios descritos na Análise Detalhada (Capítulo 3), nos quais se verificou que a espuma floral apresentou capacidade adequada de retenção hídrica e permitiu a germinação eficiente com esse regime de irrigação.

Parte dos experimentos realizados com clinostatos em estruturas biológicas envolve análises com o uso de reagentes químicos e observações microscópicas, permitindo avaliar como hormônios e demais processos biológicos se manifestam nas estruturas celulares (ALVES, 2013). Na ausência desse tipo de análise laboratorial no presente trabalho, buscou-se avaliar a capacidade da câmara de cultivo desenvolvida em fornecer um ambiente de germinação autônomo, bem como comparar possíveis variações na velocidade de germinação, no comprimento das plantas germinadas e na formação das raízes.

Conforme discutido no Capítulo 2, as plantas apresentam hormônios cujo comportamento é influenciado pela gravidade, incluindo aqueles responsáveis pelo direcionamento do crescimento radicular. Esse parâmetro pode indicar uma resposta macroscópica às alterações induzidas na estrutura da planta, uma vez que os hormônios tendem a orientar o crescimento das raízes na direção do vetor gravitacional.

4.1 Percepção do vetor gravitacional resultante da clinorotação

Com o objetivo de avaliar a influência da percepção do vetor gravitacional sobre o experimento, utilizaram-se as equações de otimização do movimento apresentadas no

Capítulo 2 para a realização das simulações por meio do software *MATLAB*. Entre as combinações possíveis entre as velocidades dos anéis externo e interno, adotaram-se como velocidades angulares $\omega' = 1 \text{ rad/s}$ e $\omega'' = 4,3 \text{ rad/s}$ para a rotação do anel externo (rotação em z) e interno (rotação em x), respectivamente.

O código empregado encontra-se no Apêndice C e gerou como resultado a Figura 60, que apresenta o trajeto percorrido pelo vetor gravitacional sobre um experimento de geometria esférica após 350 segundos de operação. Os resultados obtidos são consistentes com aqueles observados no trabalho de [Kim et al. \(2016\)](#), indicando uma maior dificuldade das plantas em se adaptarem às variações impostas ao vetor gravitacional, o qual mantém sua intensidade, porém altera continuamente sua direção ao longo do tempo.

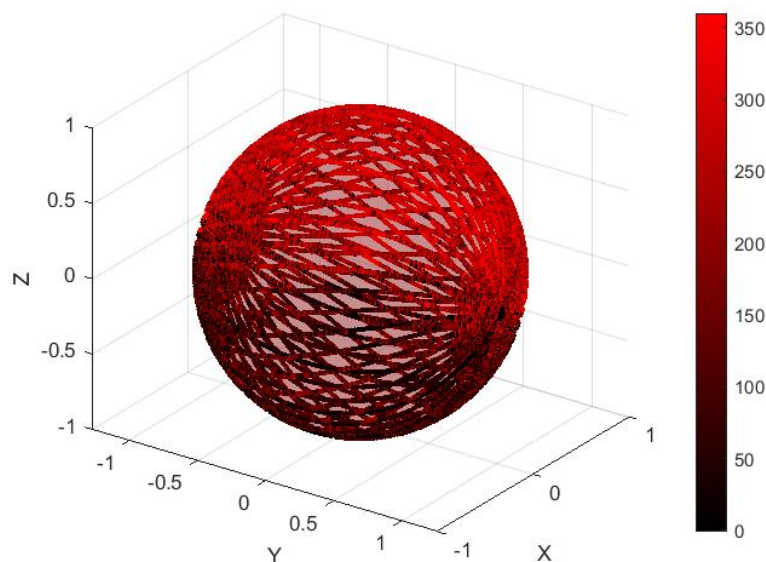


Figura 60 – Trajetória do vetor gravitacional sobre o experimento dado $\omega' = 1 \text{ rad/s}$ e $\omega'' = 4,3 \text{ rad/s}$ em um intervalo de 350 segundos.

Fonte: Autor.

A coluna de cor apresentada pelo gráfico, refere-se ao ponto de uma trajetória gerada pelo vetor gravitacional ao longo do tempo de 350 segundos sobre um experimento esférico. Nele é apresentado que o experimento possui uma desorientação constante do vetor gravitacional, seguindo uma trajetória que muda ao longo do tempo e procura percorrer uma maior área externa do experimento.

Para uma observação e compreensão da trajetória adotada, é recomendado utilizar o código presente no Apêndice C e comprar o resultado para diferentes intervalos de tempo.

4.2 Observações sobre a temperatura

Optou-se por utilizar iluminação contínua nos experimentos para facilitar a captura das imagens, devido a problemas com o flash encontrados na ESP32-CAM. Como consequência, observou-se um aumento na temperatura da câmara de cultivo de aproximadamente 2 °C após as primeiras medições, atribuído ao aquecimento local causado pelo laser.

Neste capítulo, são apresentadas as temperaturas médias de cada dia de simulação, enquanto os valores registrados a cada hora estão detalhados no Apêndice D.

4.3 Resultado com a câmara de cultivo sem clinorotação

4.3.1 Germinação 1

Nesta etapa também foi avaliada a germinação do agrião e do rabanete. As sementes de rabanete foram distribuídas em duas regiões distintas sobre o substrato inerte, conforme ilustrado na Figura 61, totalizando 12 sementes de rabanete.

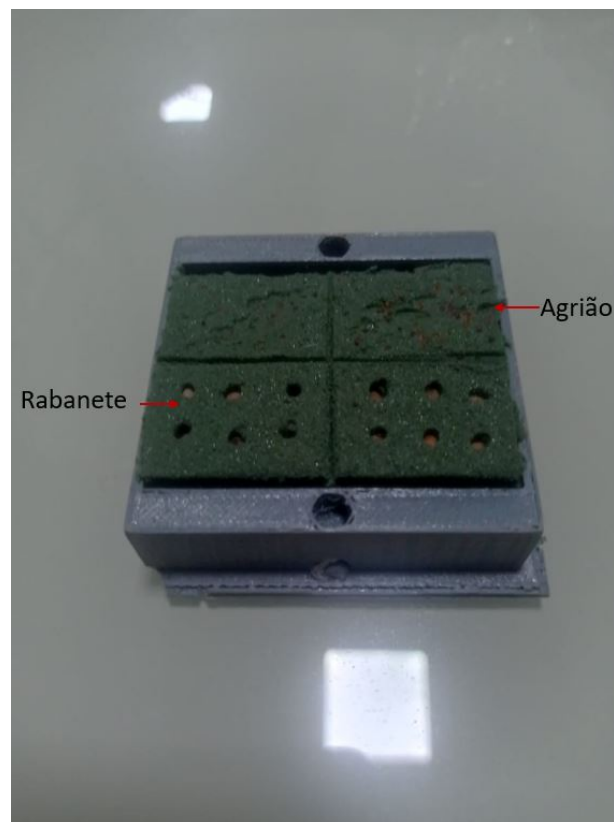


Figura 61 – Disposição das sementes no experimento realizado fora da câmara de cultivo.
Fonte: Autor.

Como discutido anteriormente, as sementes de agrião necessitavam de condições mais controladas para germinação, uma quantidade maior de água e temperaturas pró-

ximas a 18°C, situação diferente das expostas pela câmara de cultivo. Dessa forma, em nenhum experimento houve germinação das sementes de agrião, o que levou a continuar os experimentos apenas com as sementes de rabanete.

A temperatura média medida para cada dia é apresentada na seguinte:

Dia	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6
Temperatura média (°C)	27.57	27.48	27.52	27.15	26.96	26.62

Tabela 12 – Temperaturas médias diárias registradas ao longo de 6 dias de experimentos sem clinorotação.

Observa-se que a temperatura se manteve próxima ao valor considerado ótimo para a germinação, em torno de 25 °C. Essa condição favorece o desenvolvimento rápido das plantas durante o processo de germinação.

A germinação evidente ocorreu próximo ao 5º dia, se desenvolvendo melhor pelo sexto dia. As raízes apresentaram desenvolvimento do sentido do vetor gravitacional (Figura 62), com um bom desenvolvimento aparente e seus parâmetros médios são apresentados na Tabela 13.

Um comparativo entre os experimentos será melhor detalhado na seção final desse capítulo



Figura 62 – Plantas germinadas avaliadas no 6º dia
Fonte: Autor

Tabela 13 – Parâmetros médios medidos

Parâmetro	Valor
Massa média	0,03 g
Comprimento médio	7,9 mm

O início do desenvolvimento da germinação é apresentado a seguir:



Figura 63 – 3º Dia de germinação sem clinorotação
Fonte: Autor.



Figura 64 – 5º Dia de germinação sem clinorotação
Fonte: Autor.

4.4 Resultado obtido com a câmara de cultivo em clinorotação

4.4.1 Germinação 1

Nessa primeira etapa de germinação, envolvendo 12 sementes de rabanete, a câmara de cultivo apresentou problemas na administração de água para as sementes, devido à programação antiga do ESP8266. Isso resultou no fornecimento de um volume três vezes maior que o programado, causando estresse nas sementes devido ao excesso de água.

O estresse causado pelo excesso de água durante a germinação é denominado estresse por encharcamento. Esse tipo de estresse ocorre quando o solo ou substrato permanece saturado, reduzindo a difusão de oxigênio e levando a condições de hipóxia ou anóxia, que prejudicam a respiração radicular. Como resultado, sementes submetidas ao encharcamento apresentam queda na taxa de germinação, maior suscetibilidade ao apodrecimento e redução do crescimento inicial, devido à limitação dos processos metabólicos essenciais (COLMER; VOESENEK, 2003).

Tais resultados reforçam a importância do controle adequado dos fatores abióticos desses organismos vivos. Em projetos mais complexos, como a germinação por meio de CubeSats, deve-se considerar uma administração mais precisa de água e oxigênio, pois o líquido pode cobrir completamente a região da semente em um cenário de microgravidade, dificultando o contato com o oxigênio.

A Figura 65 apresenta, na imagem **A**, a germinação registrada pelo ESP32 no início do terceiro dia, em um sistema sem acionamentos desnecessários do mecanismo de

administração de água. Já a imagem **B**, registrada no quinto dia, mostra um início de germinação que ocorreu entre o terceiro e quarto dia. Nessa mesma imagem, observa-se que o substrato já apresentava altos volumes de água e estava prestes a receber mais 3 ml de água, o que dificultaria o contato das sementes com o oxigênio nesta fase inicial de germinação. Após três dias, as sementes ainda não apresentavam desenvolvimento significativo.

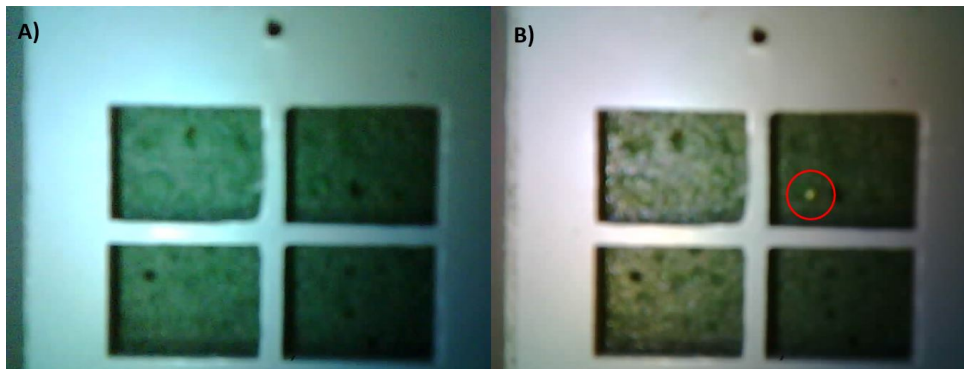


Figura 65 – Germinação das sementes em clinorotação. **A** Imagem do 3º dia de simulação. **B** Imagem do 5º dia de simulação.

Fonte: Autor

4.4.2 Germinação 2

Nessa etapa, foram corrigidos os problemas no sistema de administração de água, além de posicionar as sementes mais próximas da superfície do substrato, aumentando o contato natural com o oxigênio. As sementes de agrião foram retiradas da simulação, uma vez que não germinaram em nenhum dos experimentos, devido à incompatibilidade esperada com as condições da câmara de cultivo. Dessa forma, foram simuladas 24 sementes de rabanete, conforme mostrado na Figura 66.



Figura 66 – Distribuição das sementes de rabanete para simulação em clinorotação

Fonte: Autor

A temperatura média dos dias de experimento é apresentada a seguir:

Dia	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5
Temperatura média (°C)	26.39	26.83	29.06	27.27	27.16

Tabela 14 – Temperaturas médias diárias registradas ao longo de 5 dias de experimentos com clinorotação.

A tabela apresenta temperaturas próximas ao valor considerado ótimo para germinação, além de estarem próximas das registradas no experimento realizado sem clinorotação. Isso permite uma boa comparação entre os experimentos, que devem apresentar germinação em períodos semelhantes.

Dentre as 24 sementes simuladas, 9 apresentaram germinação aparente, conforme mostrado na Figura 67, sendo que uma delas apresentou desenvolvimento mais acelerado. Observou-se um crescimento mais lateral das sementes, assim como uma ligeira dificuldade no desenvolvimento das raízes.

Ao comparar o crescimento das raízes entre a semente com melhor desenvolvimento no sistema de clinorotação e a semente no sistema sem rotação, é perceptível uma alteração na orientação das raízes. No sistema de clinorotação, a semente mais desenvolvida apresenta a raiz realizando uma curvatura de aproximadamente 90° em relação ao plano do substrato inerte, o que pode representar alterações no gravitropismo, conforme discutido no Capítulo 5.

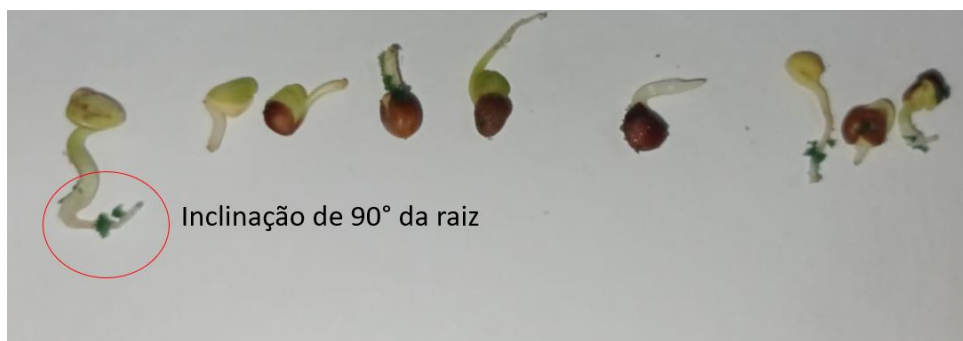


Figura 67 – Germinação das sementes em clinorotação após um período de 5 dias.

Fonte: Autor

Observou-se uma germinação mais rápida das sementes em uma região específica da placa de cultivo. As sementes de rabanete apresentaram maior rapidez no processo de germinação no lado que não se encontrava diretamente abaixo dos LEDs utilizados para a iluminação, estando essas amostras horizontalmente afastadas em até 30 mm em relação às sementes posicionadas no lado esquerdo, conforme ilustrado na Figura 71.

O desenvolvimento das sementes ao longo do tempo, registrado pelo ESP32-CAM, é apresentado a seguir:



Figura 68 – 2º Dia de germinação em clinorotação
Fonte: Autor.



Figura 69 – 3º Dia de germinação em clinorotação
Fonte: Autor.



Figura 70 – 4º Dia de germinação em clinorotação
Fonte: Autor.



Figura 71 – 5º Dia de germinação em clinorotação
Fonte: Autor.

4.5 Comparativo entre o desenvolvimento das raízes

A resposta do crescimento das plantas à influência da gravidade, conhecida como gravitropismo, ocorre devido à ação de hormônios vegetais sensíveis à percepção do vetor gravitacional, principalmente as auxinas. Nesse processo, as raízes apresentam gravitropismo positivo, desenvolvendo-se preferencialmente no sentido do vetor gravitacional. Esse comportamento pôde ser observado experimentalmente e está em concordância com os resultados apresentados por [Vogt, Moreno e Countryman \(2012\)](#).

A Figura 72 A, apresenta o desenvolvimento das raízes na condição sem clinorotação, na qual se observa o crescimento das raízes predominantemente alinhado ao vetor gravitacional, comportamento semelhante ao observado na planta de referência (Figura 72 B).

Figura 72 – Comparação entre o desenvolvimento das raízes sem clinorotação.



(A) Plantas germinadas avaliadas no 6º dia.

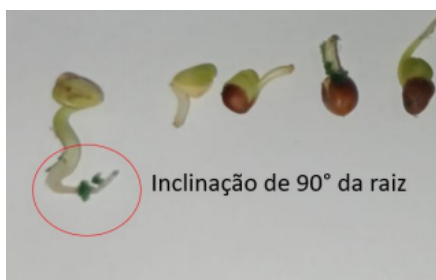


(B) Crescimento das raízes de *Brassica rapa* sem clinorotação.

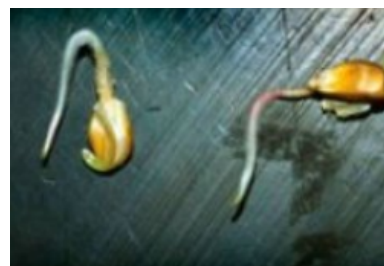
Fonte: (A) Elaboração própria. (B) Adaptado de [Vogt, Moreno e Countryman \(2012\)](#).

Embora o melhor desenvolvimento radicular no caso com clinorotação tenha sido observado de forma mais evidente em apenas uma das amostras (Figura 73A), nota-se um crescimento mais lateralizado da raiz de *Raphanus sativus*. Esse resultado é consistente com o comportamento descrito na literatura para plantas submetidas à clinorotação, sendo semelhante ao crescimento radicular observado em *Brassica rapa*, conforme apresentado na Figura 73 B.

Figura 73 – Comparação entre o desenvolvimento das raízes com clinorotação.



(A) Plantas germinadas avaliadas no 5º dia.



(B) Crescimento das raízes de *Brassica rapa* com clinorotação.

Fonte: (A) Elaboração própria. (B) Adaptado de [Vogt, Moreno e Countryman \(2012\)](#).

5 Conclusão

O trabalho conseguiu cumprir os objetivos propostos, em que o referencial teórico serviu como base para compreender a importância de realizar pesquisas sobre o ambiente espacial e como ele pode afetar estruturas biológicas, especialmente plantas. Embora muitos experimentos ainda precisem ser conduzidos em órbita para reproduzir com fidelidade as condições de microgravidade, estudos realizados em solo, mesmo que não contemplem todos os fatores presentes no espaço, desempenham um papel essencial. Trabalhar inicialmente com alguns desses fatores permite desenvolver métodos, validar procedimentos e reduzir incertezas até que seja possível alcançar um sistema mais completo e adequado para testes em órbita terrestre.

As pesquisas desenvolvidas neste trabalho resultaram em um modelo preliminar de câmara de cultivo projetado para operar em conjunto com um clinostato de três eixos. Foi possível programar o sistema para funcionar de maneira autônoma. Ele realizou a captura contínua de imagens, monitorou a temperatura, administrou água, armazenou sementes e permitiu avaliar o comportamento do vetor gravitacional simulado pelo equipamento. Essa integração tornou viável observar, mesmo em ambiente terrestre, efeitos relevantes da ausência de orientação gravitacional no desenvolvimento inicial das plantas.

Durante os experimentos observou-se uma boa adaptação das sementes de rabe-nete à câmara de cultivo desenvolvida. A escolha de espuma floral como substrato inerte mostrou-se adequada para a germinação, apresentando boa capacidade de absorção de líquidos por capilaridade. Essa característica pode ser especialmente vantajosa em ambientes espaciais, onde o comportamento de fluidos sofre alterações significativas devido à ausência de gravidade efetiva.

As mudanças visuais no crescimento das plantas sob o clinostato foram evidentes. Foi possível identificar alterações no direcionamento das raízes, efeito diretamente relacionado ao gravitropismo. A modificação contínua no vetor gravitacional influenciou a distribuição de hormônios reguladores, em especial as auxinas, o que resultou em padrões de crescimento distintos dos normalmente observados em condições terrestres. Esse comportamento reforça a relevância de sistemas capazes de simular a ausência de gravidade em estudos preparatórios.

De modo geral, a câmara de cultivo atingiu o propósito inicial proposto neste trabalho. Contudo, identificam-se diversas oportunidades de aprimoramento que podem ser exploradas em trabalhos futuros, visando torná-la mais adequada para aplicações em ambiente espacial. Entre essas melhorias, destaca-se a implementação de um sistema de controle da iluminação, permitindo a programação de períodos com presença e ausência

de luz, possibilitando a avaliação da influência do fotoperíodo no processo de germinação. Além disso, recomenda-se a realização de um maior número de experimentos, com tempos de observação mais longos, de forma a acompanhar integralmente as diferentes fases da germinação e do desenvolvimento inicial das plântulas. Sugere-se também a ampliação do escopo experimental para incluir testes de germinação a partir de talos de batata-doce, explorando diferentes mecanismos de propagação vegetal em condições de microgravidade simulada. Por fim, a incorporação de análises laboratoriais quantitativas, voltadas à identificação de possíveis alterações nos níveis hormonais, como auxinas e giberelinas, permitiria uma avaliação mais aprofundada dos efeitos da microgravidade simulada sobre os mecanismos fisiológicos responsáveis pelo crescimento vegetal. Essas extensões contribuiriam para elevar a maturidade tecnológica do sistema e aproximá-lo do nível de confiabilidade necessário para sua aplicação como carga útil em futuros CubeSats voltados à pesquisa em agricultura espacial.

Referências

- AEB. *Programa Nacional de Atividades Espaciais – PNAE 2022–2031*. Brasília, DF: [s.n.], 2022. <<https://www.gov.br/aeb/pt-br/programa-espacial-brasileiro/programa-nacional-de-atividades-espaciais>>. Acesso em: 5 Mar. 2025. Citado 4 vezes nas páginas 22, 38, 39 e 40.
- ALVES, K. d. O. *Desenvolvimento de um clinostato tridimensional com três eixos de rotação que permite a troca de suportes de amostras*. Dissertação (Master's thesis) — Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2013. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica; Área de concentração: Sinais, Sistemas e Tecnologia da Informação; Linha de pesquisa: Engenharia Biomédica; Orientadora: Profa. Dra. Marlise Araújo dos Santos. Citado 7 vezes nas páginas 19, 28, 31, 58, 60, 65 e 98.
- AVERNER, M. M.; BECK, C. W. Bioregenerative life support systems for long-term space missions. *Acta Astronautica*, v. 31, n. 1, p. 57–69, 1993. Citado na página 21.
- BAECHLE-CLAYTON, M. et al. Failures and flaws in fused deposition modeling (fdm) additively manufactured polymers and composites. *Journal of Composites Science*, v. 6, n. 7, p. 202, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/jcs6070202>>. Citado na página 67.
- BRANDAO, I. K. M. *Análise da utilidade de missão do Programa Artemis*. Monografia (Graduação em Engenharia Aeroespacial) — Universidade de Brasília, Faculdade UnB Gama, Brasília, DF, 2022. Orientador: Dr. Ronne Toledo. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 41.
- BRASIL. *Institucional — AEB*. 2024. <<https://www.gov.br/aeb/pt-br/acesso-a-informacao/institucional/aeb>>. Acesso em: 11 jul. 2025. Citado na página 38.
- BRICKHOUSE, M. *A Study on the Viability of 3D Clinorotation as an Accurate Simulator of Microgravity in Triticum aestivum L. cv. USU Apogee*. Dissertação (Bachelor thesis) — New College of Florida, Sarasota, FL, USA, 2020. Under the sponsorship of Dr. Amy Clore. Disponível em: <https://digitalcommons.ncf.edu/theses_etds/5912>. Citado 4 vezes nas páginas 26, 30, 57 e 60.
- BRIDENSTINE, J. *Artemis plan – NASA's lunar exploration program overview*. [S.l.], 2020. Disponível em: <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2020/12/artemis_plan-20200921.pdf>. Citado na página 20.
- CAPPELLETTI, C.; BATTISTINI, S.; MALPHRUS, B. K. *CubeSat Handbook: From Mission Design to Operations*. London: Academic Press, 2021. Acesso em: [coloque a data de acesso]. ISBN 978-0-12-817884-3. Disponível em: <<https://www.elsevier.com/books-and-journals>>. Citado na página 19.
- CHEN, S. et al. The comprehensive regulation of light intensity and photoperiod on growth and yield of virus-free potato under the same daily light integral. *Agronomy*,

- v. 15, n. 4, p. 898, 2025. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4395/15/4/898>>. Citado 2 vezes nas páginas 63 e 64.
- COLLA, G. et al. Plant adaptation in space: Tomato plant growth under microgravity conditions simulated by clinostat rotation. *Journal of Plant Physiology*, v. 164, p. 871–880, 2007. Citado na página 28.
- COLMER, T. D.; VOESENEK, L. A. C. J. Flooding tolerance: suites of plant traits in variable environments. *Functional Plant Biology*, v. 30, n. 5, p. 1–21, 2003. Discussão abrangente sobre hipoxia e anóxia em plantas submetidas ao encharcamento. Citado na página 102.
- DEDOLPH, R. R.; DIPERT, M. H. The physical basis of gravity stimulus nullification by clinostat rotation. *Plant Physiology*, v. 47, n. 6, p. 756–764, 1971. Disponível em: <<https://doi.org/10.1104/pp.47.6.756>>. Citado 3 vezes nas páginas 28, 30 e 31.
- ELETRÔNICOS, H. I. C. *Hu Infinito – Componentes Eletrônicos*. 2025. Disponível em: <<https://www.huinfinito.com.br/>>. Acesso em: 09 de dezembro de 2025. Citado 5 vezes nas páginas 73, 74, 77, 85 e 88.
- Embrapa. *Embrapa na era espacial*. Brasília: Embrapa, 2006. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/187204>>. Citado 3 vezes nas páginas 20, 44 e 45.
- EMBRAPA. *Embrapa e AEB firmam parceria para projeto de base na Lua*. 2023. Acesso em: 10 jul. 2025. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/85195507/embrapa-e-aeb-firmam-parceria-para-projeto-de-base-na-lua>>. Citado 3 vezes nas páginas 22, 39 e 68.
- FELTRIN, S. *Sementes Feltrin – Catálogo de produtos*. 2025. Disponível em: <<https://produtor.sementesfeltrin.com.br/>>. Acesso em: 09 dez. 2025. Citado na página 96.
- FERL, R. et al. Plants in space. *Current Opinion in Plant Biology*, v. 5, n. 3, p. 258–263, 2002. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/s1369-5266\(02\)00254-6](https://doi.org/10.1016/s1369-5266(02)00254-6)>. Citado 11 vezes nas páginas 19, 20, 21, 41, 42, 46, 47, 48, 49, 51 e 52.
- FRESHDESK. *CA — Support Article*. 2025. <<https://lightinganalysts.freshdesk.com/support/solutions/articles/22000221499-ca>>. Accessed: 2025-12-09. Citado na página 65.
- GRIMM, D. G. *Overview of the Different Devices and Techniques for Simulated Microgravity*. 2013. Available at: <http://www.grimm-spaceresearch.com/RPM/RPM.html>. Accessed: 26 May 2013. Citado na página 31.
- INSTRUMENTS, I. A. *Conversion – PPFd to Lux*. 2025. Accessed: 2025-12-09. Disponível em: <<https://www.apogeeinstruments.com/conversion-ppfd-to-lux/>>. Citado na página 64.
- KAUFMAN, R. H.; NICKERSON, D. W.; DINEEN, J. Microgravity effects on seedling development: implications for plant growth in space. *Astrobiology*, v. 1, n. 1, p. 41–49, 2001. Citado na página 19.

- KIM, S. M. et al. An experimental and theoretical approach to optimize a three-dimensional clinostat for life science experiments. *Microgravity Science and Technology*, v. 29, n. 1-2, p. 97–106, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12217-016-9529-2>>. Citado 5 vezes nas páginas 19, 32, 33, 34 e 99.
- LAFLEUR, C. *Costs of US piloted programs*. 2010. Disponível em: <<https://www.thespacereview.com/article/1579/1>>. Citado na página 40.
- LAUNIS, R. D. *Apollo – a retrospective analysis*. [S.l.]: NASA History Office, 2004. (Monographs in Aerospace History, 3). Citado na página 19.
- LEY, W.; WITTMANN, K.; HALLMANN, W. *Handbook of Space Technology*. 1. ed. [S.l.: s.n.], 2009. Citado 13 vezes nas páginas 19, 20, 24, 25, 26, 27, 28, 36, 114, 115, 117, 118 e 119.
- LIGHTING, W. *Convert PPFd to Lux – Online Calculator*. 2025. <<https://www.waveformlighting.com/horticulture/convert-ppfd-to-lux-online-calculator>>. Accessed: 2025-12-09. Citado na página 65.
- MAINI, A. K.; AGRAWAL, V. *Satellite technology: principles and applications*. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 27.
- METELLI, G. *GreenCube: on-ground space environment simulation effects on *Lepidium sativum* L. microgreens: A multidisciplinary approach to study the effects of multiple abiotic stress*. Tese (Doutorado) — Università degli Studi della Tuscia di Viterbo, Viterbo, Italy, 2021. Ph.D. thesis, co-supervised with ENEA, Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development. Citado 16 vezes nas páginas 28, 30, 34, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 65, 67, 68, 69, 70, 71 e 72.
- NASA. *Plans for Mars Human Exploration*. [S.l.]: NASA Mars Exploration, 2021. Citado na página 42.
- NASA. *Compartilha atualizações sobre as primeiras missões lunares Artemis com tripulação*. 2024. Disponível em: <<https://www.nasa.gov/news-release/nasa-compartilha-atualizacoes-sobre-as-primeiras-missoes-lunares-artemis-com-tripulacao/>>. Citado na página 41.
- NIETO, F. D. M. et al. Product design by additive manufacturing for water environments: Study of degradation and absorption behavior of pla and petg. *Polymers*, v. 13, n. 7, p. 1036, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/polym13071036>>. Citado 2 vezes nas páginas 67 e 77.
- RESH, H. M. *Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower*. 7. ed. [S.l.]: CRC Press, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 54 e 55.
- REUTERS. *NASA announces further delays in Artemis moon missions*. 2024. Disponível em: <<https://www.reuters.com/technology/space/nasa-announces-further-delays-artemis-moon-missions-2024-12-05/>>. Citado na página 40.

S5Lab – Sapienza University of Rome and partners. *GreenCube: autonomous biological laboratory for plants cultivation on-board a CubeSat*. 2022. Website, S5Lab. Lançado em 13 julho 2022. Acesso em: 11 jul. 2025; <<https://www.s5lab.space/index.php/greencube-home/>>. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 44.

SMITH, S. M.; STUTTE, G. W. Space agriculture: The challenges of growing food in space. *Frontiers in Plant Science*, v. 7, p. 124, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00124>>. Citado na página 21.

SUPPLIER), S. (seed. *Watercress — germination information (optimum soil temperature 60–65 °F)*. 2025. Disponível em: <<https://www.superseeds.com/products/watercress-50-days>>. Acesso em: 09 dez. 2025. Citado na página 97.

TAIZ, L. et al. *Plant Physiology and Development*. 6. ed. [S.l.]: Sinauer Associates, 2015. Citado na página 20.

TOSCANO, S. et al. Annual garden rocket and radish as microgreens: Seed germination response to thermal and salt stress. *Agronomy*, v. 15, n. 2, p. 361, 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/agronomy15020361>>. Citado na página 97.

Useful Tropical Plants / TheFerns.info. *Nasturtium officinale – cultivation details (watercress): optimal daytime temperatures*. 2024. Disponível em: <<https://tropical.theferns.info/viewtropical.php?id=Nasturtium+officinale>>. Acesso em: 09 dez. 2025. Citado na página 97.

VOGT, G. L.; MORENO, N. P.; COUNTRYMAN, S. *Plants in Space*. Houston, Texas: Baylor College of Medicine, Center for Educational Outreach, 2012. Supported by the National Space Biomedical Research Institute through NASA NCC 9-58, Houston Endowment Inc., and the Howard Hughes Medical Institute. ISBN 978-1-888997-77-4. Disponível em: <<https://www.bcm.edu/edoutreach>>. Citado 14 vezes nas páginas 28, 30, 45, 46, 48, 49, 50, 51, 52, 54, 55, 70, 105 e 106.

WERTZ, J. R. *Space Mission Engineering: The New SMAD*. [S.l.]: Microcosm Press, 2011. Citado 6 vezes nas páginas 24, 36, 37, 38, 40 e 41.

XIE, G. et al. The lunar one-sixth low gravity conduciveness to the improvement of the cold resistance of plants. *Microgravity Science and Technology*, v. 35, p. 35, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12217-023-10058-9>>. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 44.

YOTOV, V. V. et al. A new random positioning machine modification applied for microgravity simulation in laboratory experiments with rats. *Inventions*, v. 7, n. 3, p. 85, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/inventions7030085>>. Citado na página 33.

ZABEL, F. et al. *The Application of Hydroponics in Microgravity for Plant Growth: Challenges and Solutions*. 2016. Citado 2 vezes nas páginas 54 e 56.

ZHANG, Y. et al. Nutritional quality and health benefits of microgreens, a crop of modern agriculture. *Journal of Future Foods*, v. 1, n. 1, p. 58–66, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2021.07.001>>. Citado na página 69.

Apêndices

APÊNDICE A – Primeiro Apêndice

A.0.1 Radiação

As condições de radiação para uma espaçonave são essencialmente definidas pela influência do Sol, como expressas pela Figura (74). Divididas em campos magnéticos de erupções solares e ventos solares como gás ionizado por prótons e elétrons, que são blindados pelo campo magnético da terra, com exceção das calotas polares.

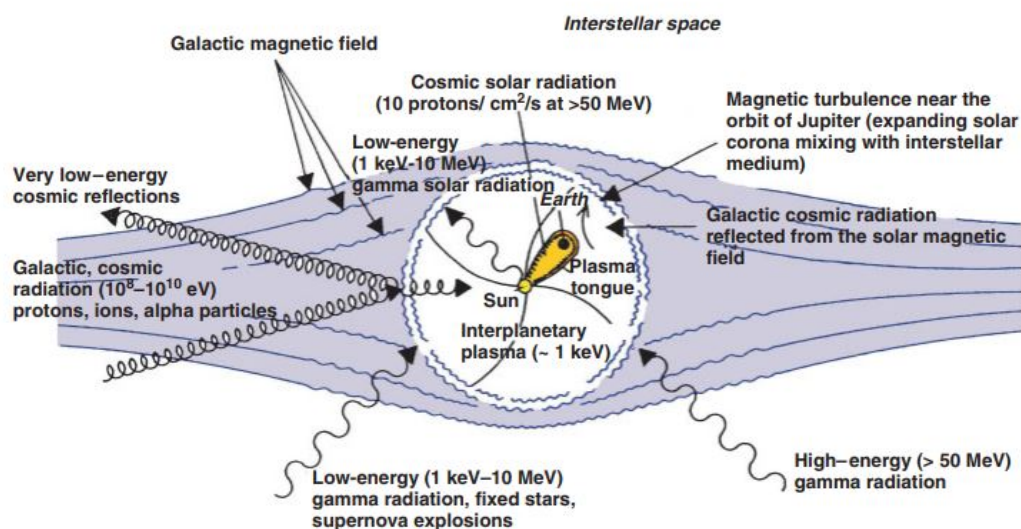


Figura 74 – Campos de Radiação
Fonte: Ley, Wittmann e Hallmann (2009).

A altura da órbita é capaz de influenciar na radiação que chega até meu satélite (Figura 75), em que para uma órbita LEO (Órbita Terrestre Baixa) a 200-300 km, temos a presença de radiações geradas por albedo, pela própria terra, espaçonaves próximas e radiação solar (LEY; WITTMANN; HALLMANN, 2009).

A radiação eletromagnética pode incidir sobre um satélite por todas as direções e ter várias fontes de emissão, mas a que mais causa impacto em uma operação espacial é a radiação eletromagnética emitida pelo sol (LEY; WITTMANN; HALLMANN, 2009). No qual sua influência pode ser dividida em:

- **Influência Térmica:** a radiação eletromagnética incidente é a principal responsável pelo aquecimento da espaçonave, sendo o fator externo mais relevante no balanço térmico. Durante o projeto, é essencial analisar detalhadamente o comportamento esperado da energia térmica ao longo da missão, considerando a intensidade, ângulo de incidência e comprimento de onda da radiação solar direta, refletida, e da

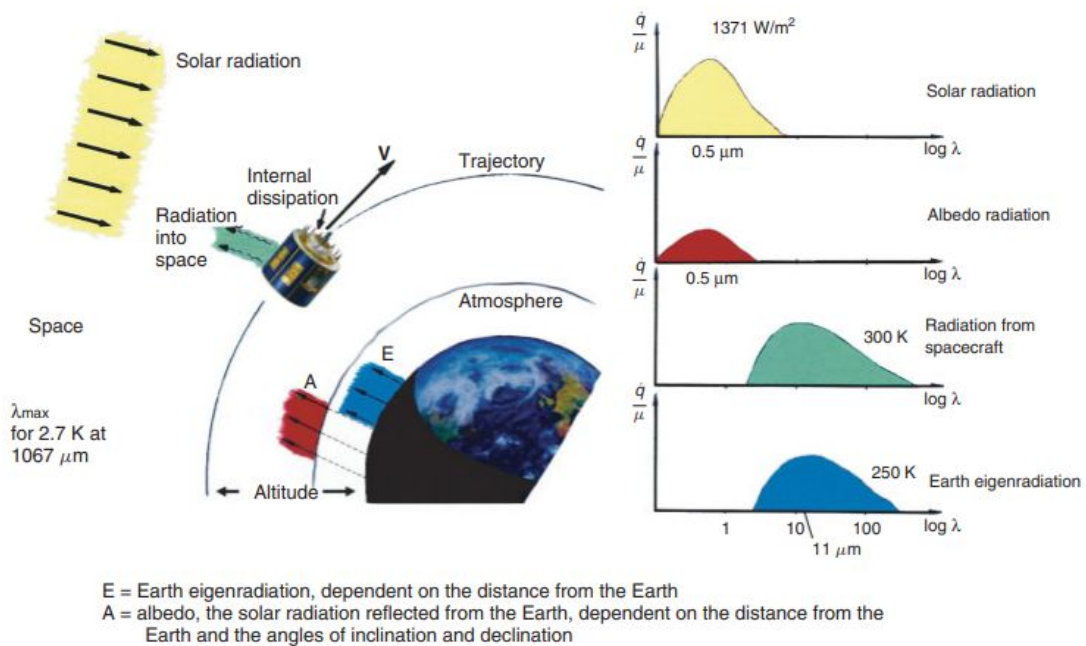


Figura 75 – Radiação presente em um satélite em órbita LEO

Fonte: Ley, Wittmann e Hallmann (2009).

emitida pela Terra e outros corpos celestes. Essas informações servem para orientar o desenvolvimento do sistema de controle térmico (SCT), que precisa lidar com variações extremas de temperatura entre as regiões iluminadas e sombreadas da espaçonave. Além disso, a expansão térmica dos materiais é um critério de projeto importante. Embora a radiação cósmica de fundo não afete o balanço térmico geral, sua baixa temperatura (2,7 K) se torna significativa no caso de instrumentos científicos sensíveis, como telescópios infravermelhos.

- **Influência Química:** a radiação eletromagnética solar, especialmente nas faixas de ondas curtas como os raios UV e raios X, pode provocar alterações na estrutura atômica dos materiais irradiados, arrancando elétrons e gerando elétrons livres. Podendo ocasionar vários problemas em sistemas eletrônicos, degradar painéis solares e interferir nas comunicações e sensores.
- **Efeito Fotoelétrico:** as células solares utilizam o efeito fotovoltaico, no qual os fótons incidentes sobre um semicondutor liberam elétrons que são coletados como corrente elétrica. Essa tecnologia é amplamente usada na geração de energia para satélites e espaçonaves, com painéis solares modernos atingindo até 350 W/m^2 em órbita terrestre. No entanto, como a irradiância solar diminui com o quadrado da distância ao Sol, a eficiência desses sistemas cai drasticamente em regiões além de Marte. Por isso, geradores termoelétricos de radioisótopos (RTGs) são empregados em missões para os planetas externos, como Júpiter e Saturno, oferecendo energia estável e independente da radiação solar.

- **Carregamento Eletrostático:** quando a radiação solar remove elétrons da superfície de uma espaçonave, isso causa um efeito chamado carregamento eletrostático. O lado iluminado pelo Sol tende a ficar carregado positivamente, enquanto o lado oposto, na sombra, pode manter uma carga diferente, gerando o chamado carregamento diferencial. Esse desequilíbrio pode causar acúmulo de tensão elétrica na estrutura da nave.

O grau desse carregamento depende da orientação da espaçonave em relação ao Sol. Por exemplo, satélites em órbitas sol-síncronas (que mantêm sempre o mesmo lado voltado para o Sol) sofrem mais com isso do que sondas que giram continuamente (como as estabilizadas por rotação), pois a exposição desigual à radiação é mais intensa. Quando há aumentos repentinos da radiação solar, como durante erupções solares, que podem aumentar em até mil vezes a quantidade de radiação de ondas curtas (UV, raios X), a carga acumulada pode atingir um nível crítico e disparar uma descarga elétrica espontânea. Isso também pode ocorrer durante a passagem de zonas de sombra para zonas iluminadas (como ao entrar ou sair de um eclipse), ou durante eventos operacionais como manobras orbitais ou transmissão de dados (downlink).

Essas descargas eletrostáticas podem liberar correntes muito intensas que percorrem a superfície da nave (caso de carregamento diferencial), ou até se manifestar como um arco elétrico (arcing) entre a espaçonave e o plasma espacial, danificando seus componentes.

Consequências possíveis das descargas:

- Danos às células solares
- Degradação de sensores ópticos

Aceleração da degradação dos revestimentos externos uma forma de evitar esses problemas é usar materiais condutores na parte externa da espaçonave, permitindo que a carga elétrica se distribua e descarregue de forma mais segura. No entanto, nos painéis solares, isso é mais difícil, porque eles precisam ser transparentes para deixar passar a luz. Por isso, utiliza-se um revestimento de óxido de índio, que equilibra transparência óptica e condutividade elétrica, reduzindo a resistência superficial para menos de $5000 / \text{cm}^2$, o que ajuda a dissipar cargas sem bloquear a luz.

- **Alteração da Resistência Elétrica:** a radiação ultravioleta (UV) proveniente do Sol, ao incidir sobre os materiais externos de uma espaçonave, pode remover elétrons de suas ligações atômicas. Esse processo causa pequenas variações na resistência elétrica dos componentes eletrônicos embarcados, o que geralmente não compromete seu funcionamento imediato. No entanto, os efeitos sobre as propriedades mecânicas

e ópticas dos materiais são mais significativos, demandando uma atenção no projeto e na escolha dos materiais utilizados .

No aspecto mecânico, destaca-se o fenômeno da fragilização, também conhecido como embrittlement. Esse efeito é causado principalmente pela radiação UV de alta energia, que altera a estrutura molecular de materiais poliméricos, tornando-os mais rígidos e suscetíveis a fissuras ou rupturas. Essa degradação é especialmente crítica em partes da espaçonave que estão sob tensão mecânica constante ou que fazem parte de mecanismos móveis, como dobradiças, atuadores ou estruturas desdobráveis.

Além disso, a radiação UV também provoca alterações ópticas, como o escurecimento de materiais inicialmente transparentes. Esse escurecimento ocorre em lentes ópticas, nas camadas de vidro que recobrem as células solares dos painéis e até mesmo nos adesivos utilizados entre esses vidros e as células. Como consequência, há uma redução da quantidade de luz que atinge os instrumentos ópticos e as superfícies fotossensíveis da espaçonave. No caso específico das células solares, essa diminuição da transmissão de luz compromete a eficiência da conversão de energia solar em energia elétrica.

Outro impacto importante desse escurecimento está na alteração da relação entre a absorvidade (α) e a emissividade (ϵ) da superfície do vidro protetor das células solares. Essa mudança pode provocar um aumento da temperatura superficial das células, prejudicando o balanço térmico da espaçonave. Com o aumento da temperatura e a redução da iluminação incidente, o sistema de geração de energia sofre perda de desempenho, resultando em uma eficiência inferior ao longo do tempo de missão.

A.0.1.1 Radiação de Partículas de Alta Energia

Durante uma missão, uma espaçonave é constantemente exposta a partículas de alta energia que atingem a espaçonave à altas velocidade, podem causar sérios danos como os já citados anteriormente. Essas partículas, vindas de fontes como os cinturões de radiação da Terra, erupções solares, raios cósmicos e partículas secundárias, afetam desde a estrutura até os sistemas eletrônicos do veículo(LEY; WITTMANN; HALLMANN, 2009).

Os cinturões de Van Allen concentram elétrons e prótons capturados pelo campo magnético terrestre, com. A região da Anomalia do Atlântico Sul (SAA), onde esse cinturão se aproxima da Terra, é especialmente crítica para veículos em órbita baixa (LEO), pois concentra altas doses de radiação devido à proximidade do cinturão de radiação interno que se aproxima da Terra a uma distância de 500 km. Além disso, órbitas mais distantes como as geostacionárias (GEO) também são afetadas, enquanto órbitas pola-

res com inclinação maior que 80° , são mais expostas ao vento solar, limitando o tempo de permanência seguro para astronautas (LEY; WITTMANN; HALLMANN, 2009).

Esse carregamento pode ocorrer na superfície da espaçonave ou no interior, afetando isolantes e placas eletrônicas, levando a descargas elétricas que comprometem sistemas. Eventos causados por partículas únicas e muito energéticas, como os fenômenos de evento único (SEEs), são uma ameaça direta a sistemas eletrônicos. Eles incluem:

- **SEU (Single Event Upset)**: erro temporário de lógica.
- **SEL (Latchup)**: travamento que requer reinicialização.
- **SEB (Burnout)**: destruição do circuito.

Erupções solares e ejeções de massa coronal (CMEs) liberam grandes quantidades de partículas energéticas que atingem rapidamente a espaçonave. Já os raios cósmicos galácticos, compostos por 83% de prótons, 13% de partículas alfa, 3% de elétrons e 1% de núcleos atômicos com número atômico superior a 2, possuem energias extremamente altas, variando de 100 até 10^{20} MeV. Apesar de sua baixa densidade, essas partículas podem danificar materiais e tecidos biológicos ao colidirem com velocidades próximas à da luz (LEY; WITTMANN; HALLMANN, 2009).

A.0.2 Influência Atmosférica

Os efeitos da atmosfera terrestre são significativos a distâncias curtas da superfície da Terra, especialmente em órbitas baixas (LEO), como é o caso da Agência Espacial Internacional (ISS). Embora a atmosfera seja extremamente fina a partir de 120 km de altitude, ela ainda tem impacto nas espaçonaves em LEO, principalmente devido ao arrasto atmosférico, necessitando de correções de órbita utilizando algum sistema propulsivo. Arrasto esse que é influenciado pela atividade solar, que altera a densidade da atmosfera residual, podendo variar em até 100 vezes, e deve ser considerado no projeto da missão e na estimativa de sua vida útil (LEY; WITTMANN; HALLMANN, 2009).

O oxigênio atômico presente em LEO é altamente reativo e, ao colidir com a espaçonave a velocidades próximas de 8 km/s, causa erosão e degradação de materiais, como Kapton e prata, além de autocontaminação e brilho superficial. Sistemas ópticos sensíveis e satélites de longa duração, como a ISS, são particularmente vulneráveis.

A ionosfera, gerada por radiação solar, afeta a propagação de ondas de rádio e pode prejudicar as comunicações com satélites. O campo magnético da Terra também interfere, alterando a polarização das ondas eletromagnéticas.

Por fim, atmosferas de outros planetas também causam efeitos semelhantes. Técnicas como a aerofrenagem aproveitam o atrito atmosférico para ajustar órbitas com menor consumo de combustível .

A.0.3 Vácuo

O ambiente de alto vácuo no espaço, com pressões extremamente baixas, cerca de 10^{-7} Pa em LEO e até 10^{-15} Pa em GEO, afeta significativamente o desempenho e a confiabilidade das espaçonaves. Dentre os principais efeitos estão: desgaseificação, ausência de convecção, alterações nas propriedades dos materiais e o fenômeno de solda a frio (LEY; WITTMANN; HALLMANN, 2009).

A desgaseificação ocorre quando gases ou vapores, como água e solventes, escapam dos materiais à medida que a pressão cai abaixo de seus valores de vapor. Essa liberação é intensificada com o aumento da temperatura e pode provocar autocontaminação, afetando instrumentos ópticos e superfícies críticas.

Os lubrificantes convencionais não funcionam adequadamente no vácuo por evaporarem; por isso, usam-se alternativas sólidas, como revestimentos de grafite ou dissulfeto de molibdênio (*MoS*), mais estáveis nesse ambiente.

Como a convecção térmica é praticamente inexistente no espaço, a transferência de calor entre a espaçonave e o ambiente ocorre principalmente por radiação, exigindo sistemas térmicos robustos e bem projetados.

O comportamento dos materiais também muda nesse ambiente de alto vácuo, onde muitos deles apresentam aumento na vida útil e melhora significativa na resistência à fadiga em alto vácuo. O vidro, por exemplo, tem sua resistência mecânica triplicada com a redução da pressão.

Já a solda a frio ocorre quando superfícies metálicas entram em contato no vácuo, devido à ausência da fina camada de gás que, na Terra, evita esse efeito. Isso pode comprometer peças móveis, tornando-o um ponto crítico para o projeto de mecanismos espaciais.

A.0.4 Detritos Espaciais

Outro fator ambiental relevante para o projeto de espaçonaves é a presença de partículas sólidas no espaço, que podem ser de origem natural (como micrometeoroides, asteroides e poeira cósmica) ou artificial, constituindo os chamados detritos espaciais (LEY; WITTMANN; HALLMANN, 2009).

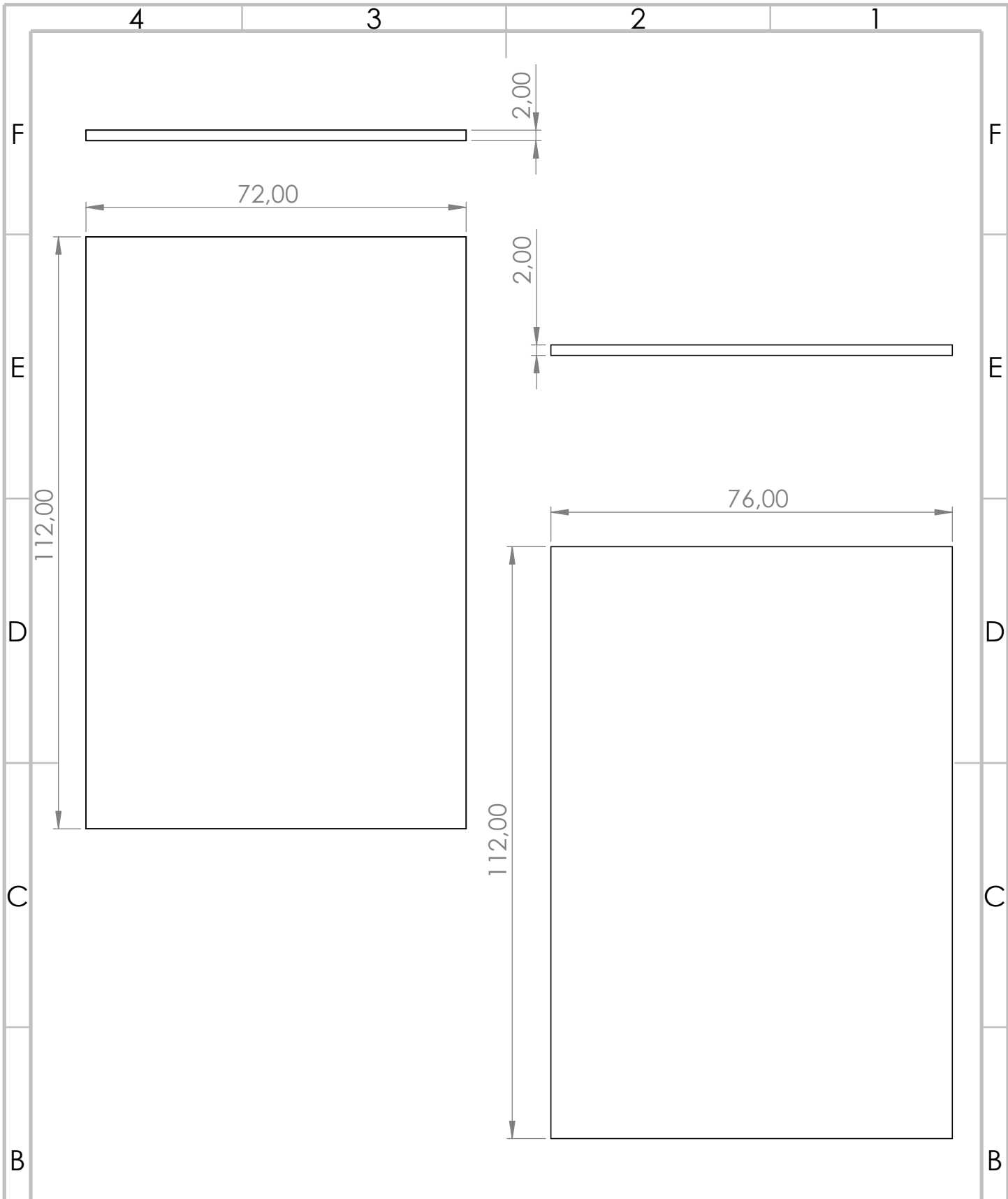
Embora os impactos com objetos naturais sejam raros, eventos como chuvas de meteoros periódicas (ex.: Perseidas, Leonídeos) aumentam temporariamente o risco. Já os

objetos artificiais, incluindo satélites inativos, fragmentos de foguetes, ferramentas perdidas e até partículas de tinta, representam maior ameaça, especialmente aqueles pequenos e não rastreáveis, por sua grande quantidade em órbita.

Detritos com mais de 10 cm são monitorados por radares terrestres, mas são os menores, invisíveis a esses sistemas, que oferecem risco mais crítico, pois colidem com altíssimas velocidades (acima de 10 km/s) e podem danificar seriamente sistemas sensíveis.

Para mitigar esses riscos, vêm sendo desenvolvidas blindagens multicamadas, que fragmentam o objeto no impacto e dissipam sua energia cinética como calor. Instituições como o Instituto Ernst Mach, na Alemanha, têm conduzido experimentos e simulações avançadas para otimizar esse tipo de proteção.

APÊNDICE B – Plantas



SE NÃO ESPECIFICADO:
DIMENSÕES EM MILÍMETROS
ACABAM. SUPERFÍCIE:
TOLERÂNCIAS:
LINEAR:
ANGULAR:

ACABAMENTO:

REBARBAR E
QUEBRAR
ARESTAS
AGUDAS

NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

Escala: 1:1

	NOME	ASSINATURA	DATA		
DESEN.	Pedro H.				
VERIF.					
APROV.					
MANUF.					
QUALID				MATERIAL:	
				PETG	
				PESO:	

TÍTULO:	Paredes Laterais - Câmara de Cultivo	
DES. Nº	1º	A4
FOLHA 1 DE 1		

A

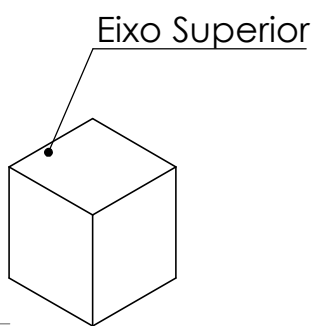
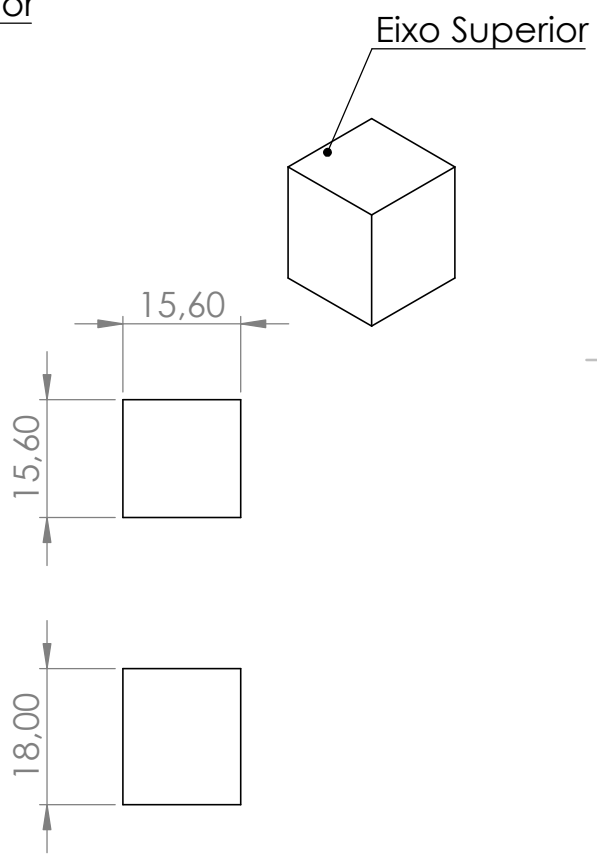
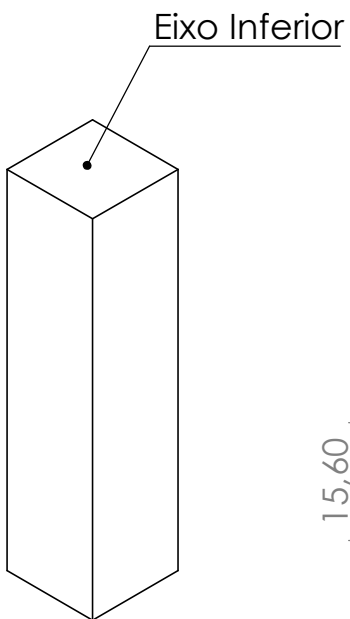
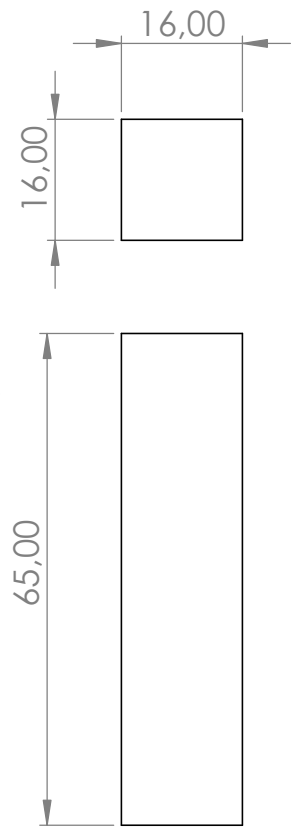
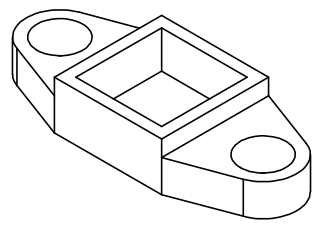
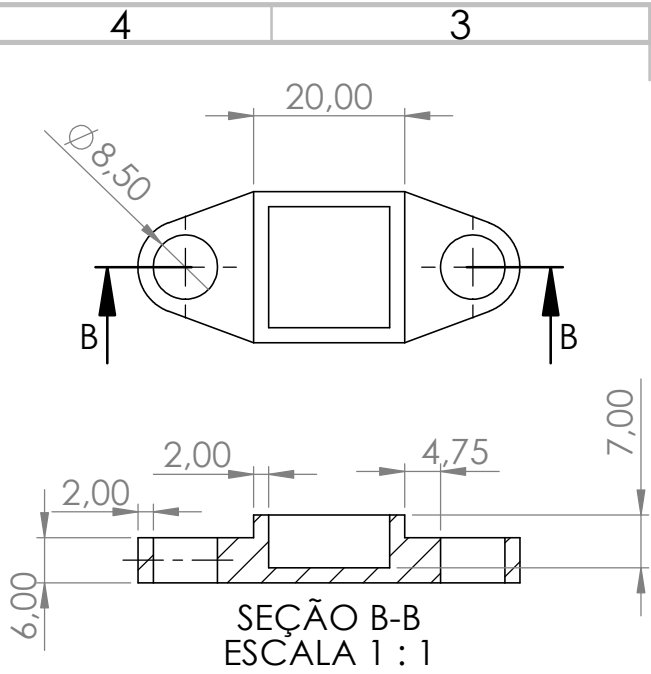
A

4

3

2

1



SE NÃO ESPECIFICADO:
DIMENSÕES EM MILÍMETROS
ACABAM. SUPERFÍCIE:
TOLERÂNCIAS:
LINEAR:
ANGULAR:

ACABAMENTO:

REBARBAR E
QUEBRAR
ARESTAS
AGUDAS

NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

Escala 1:1

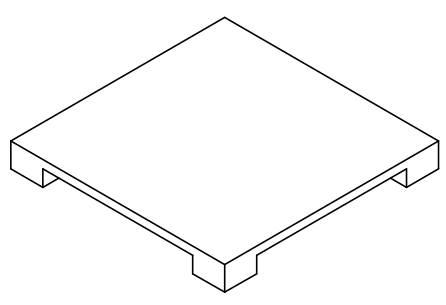
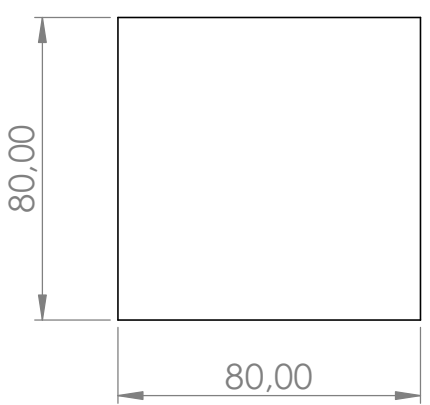
	NOME	ASSINATURA	DATA
DESEN.	Pedro H.		
VERIF.			
APROV.			
MANUF.			
QUALID			

TÍTULO:	Eixos e Encaixe - Câmara de Cultivo
DES. Nº	
MATERIAL:	PETG
PESO:	
FOLHA	1 DE 1

4 3 2 1

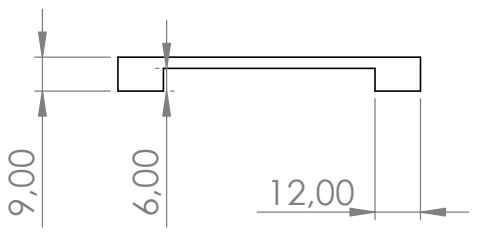
F

F



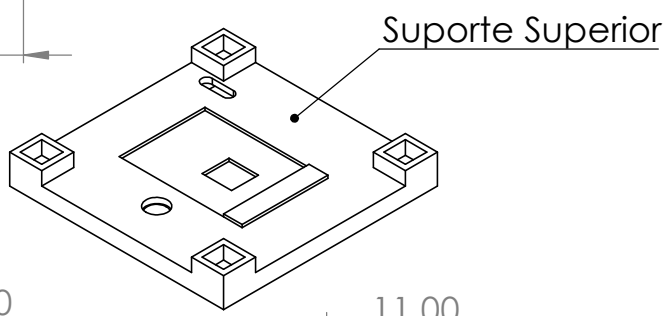
E

E



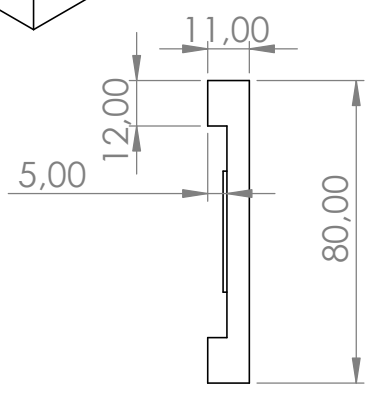
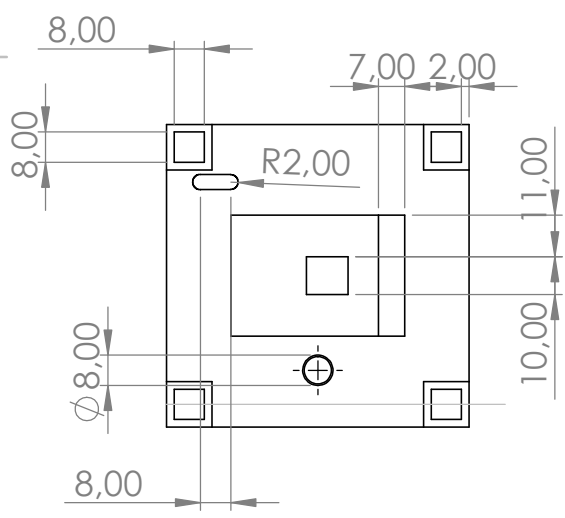
D

D



C

C



B

B

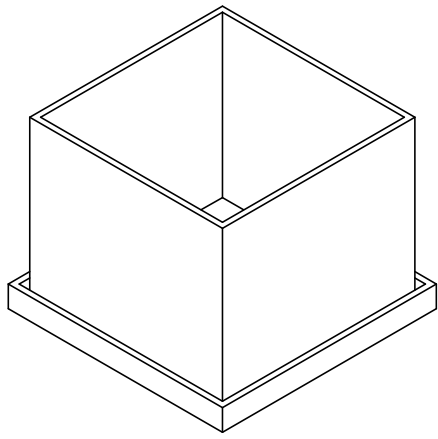
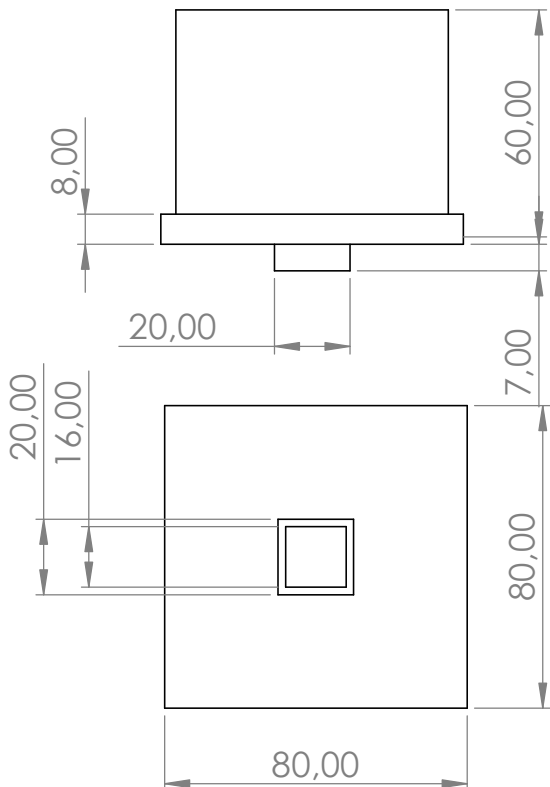
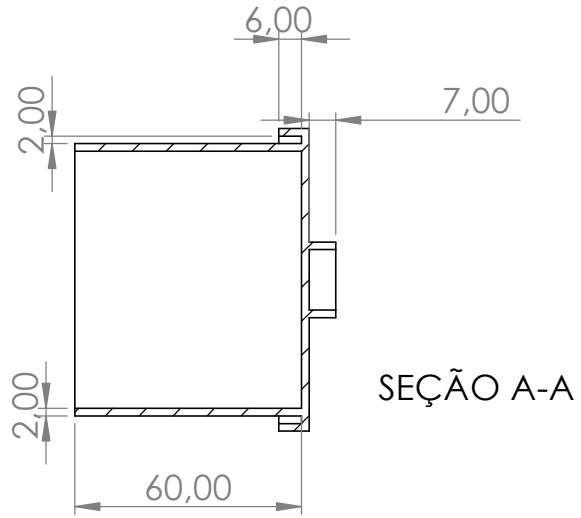
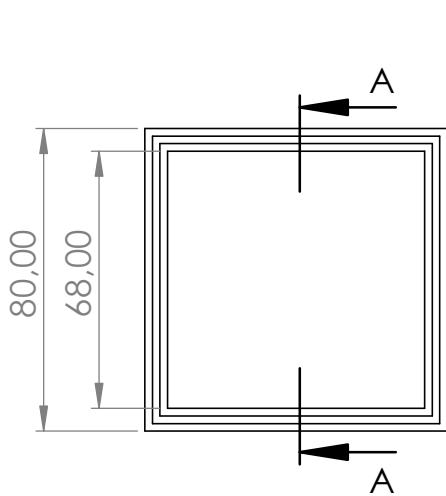
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:	ACABAMENTO:	REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS	NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO	REVISÃO
				Escala 1:2

A

A

DESEN.	NOME	ASSINATURA	DATA	TÍTULO: Suporte Superior - Câmara de Cultivo	DES. Nº 3º	A4
VERIF.	Pedro H.					
APROV.						
MANUF.						
QUALID						
		MATERIAL:				
		PETG				
		PESO:				
						FOLHA 1 DE 1

4 3 2 1



SE NÃO ESPECIFICADO:
DIMENSÕES EM MILÍMETROS
ACABAM. SUPERFÍCIE:
TOLERÂNCIAS:
LINEAR:
ANGULAR:

ACABAMENTO:

REBARBAR E
QUEBRAR
ARESTAS
AGUDAS

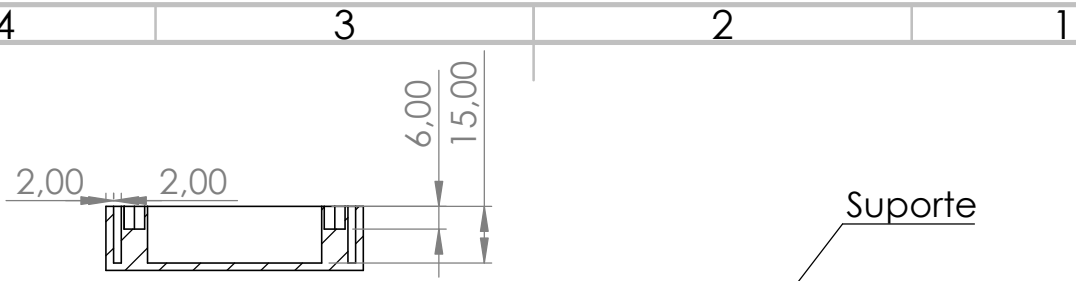
NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

Escala 1:2

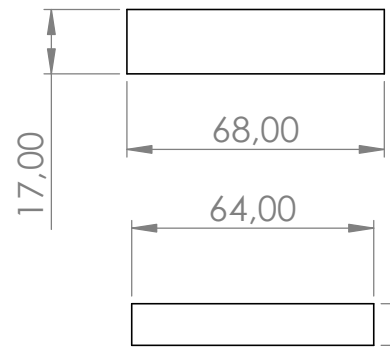
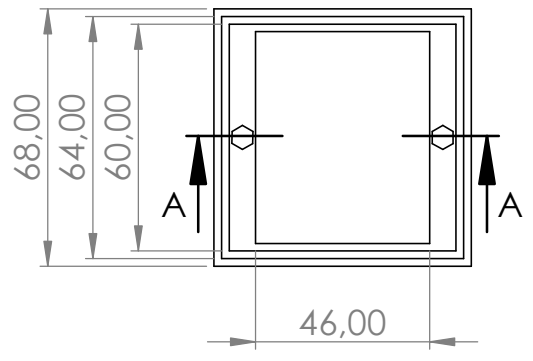
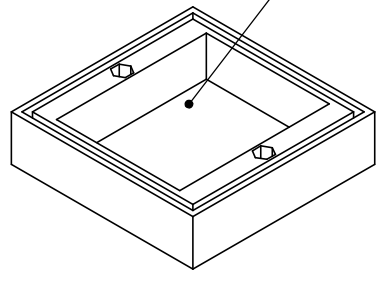
	NOME	ASSINATURA	DATA
DESEN.	Pedro H.		
VERIF.			
APROV.			
MANUF.			
QUALID			

TÍTULO:	Suporte Inferior - Câmara de Cultivo	
DES. Nº	4º	A4
PESO:		FOLHA 1 DE 1

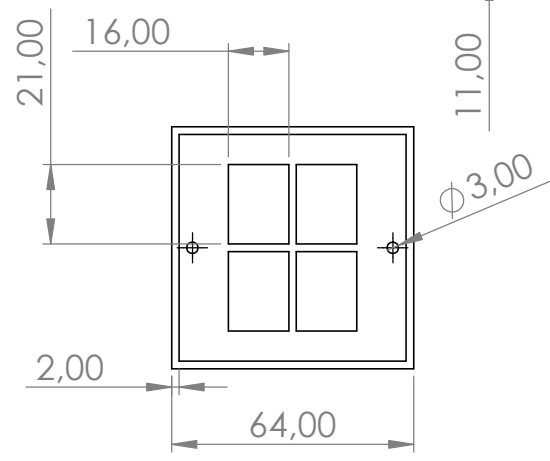
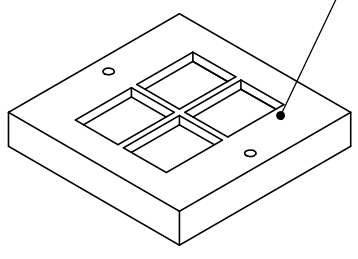


SEÇÃO A-A

Suporte

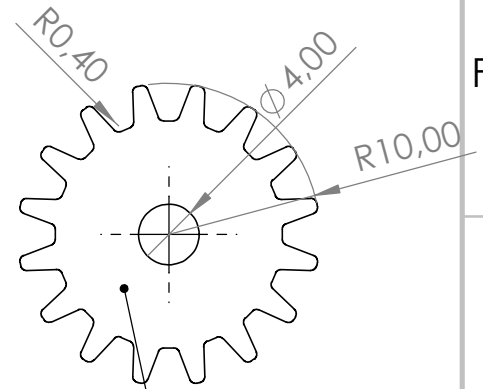
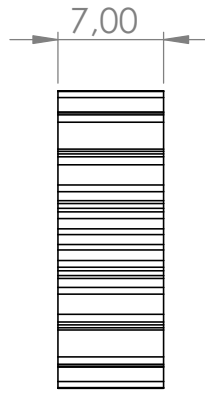
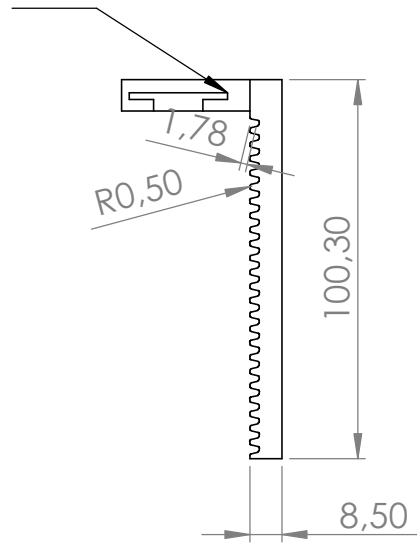


Tampa



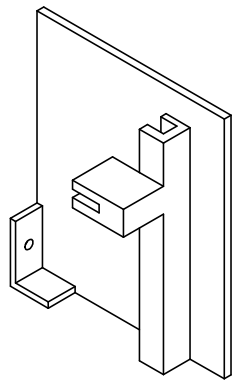
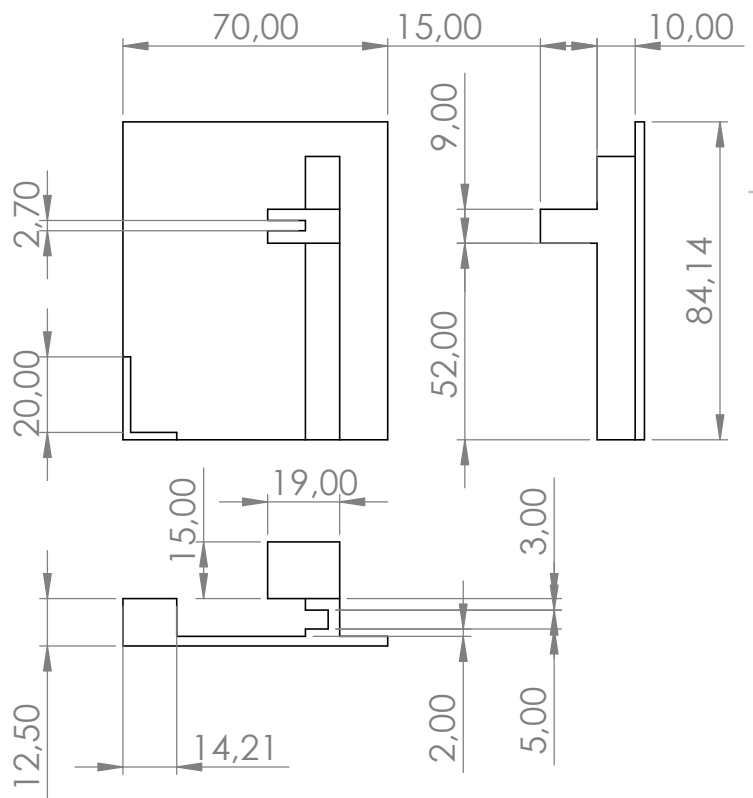
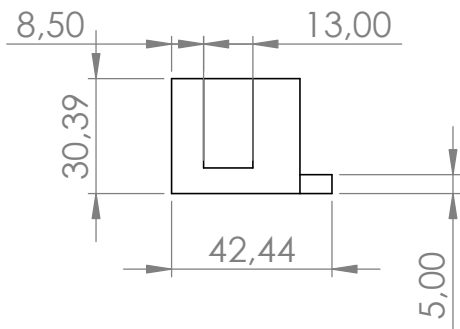
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:			ACABAMENTO:	REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS	NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO	REVISÃO
					Escala 1:2	
NOME: Pedro H.				ASSINATURA	DATA	TÍTULO: Suporte para Substrato - Câmara de Cultivo
MATERIAL: PETG				DES. Nº 5°		A4
PESO:				FOLHA 1 DE 1		

Trilho



Engrenagem

Esacala 2:1



SE NÃO ESPECIFICADO:
DIMENSÕES EM MILÍMETROS
ACABAM. SUPERFÍCIE:
TOLERÂNCIAS:
LINEAR:
ANGULAR:

ACABAMENTO:

REBARBAR E
QUEBRAR
ARESTAS
AGUDAS

NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

Escala 1:2

	NOME	ASSINATURA	DATA	
DESEN.	Pedro H.			
VERIF.				
APROV.				
MANUF.				
QUALID				
				MATERIAL:
				PETG
				PESO:

TÍTULO:
Sistema de Administração de Água -
Câmara de Cultivo

DES. Nº

6º

A4

FOLHA 1 DE 1

APÊNDICE C – Código para obtenção da trajetória do vetor gravitacional

```
1 % SIMULA AO DE CLINOSTATO 2-EIXOS + TRAJETORIA NA ESFERA
2 % Codigo Desenvolvido por Pedro Henrique Pereira Braga
3
4 clear; clc;
5
6 omega_p = 4.3;
7 omega_s = 1;
8
9 T = 360;
10 dt = 0.001;
11
12 t = 0:dt:T;
13 N = length(t);
14
15 % Condição inicial
16 A = zeros(N,3);
17 A(1,:) = [0 0 1];
18
19 % Campo de velocidades
20 omega = @(tt) [ ...
21     omega_p * cos(omega_s*tt), ...
22     omega_p * sin(omega_s*tt), ...
23     omega_s ...
24 ];
25
26 % Integração
27 for k = 1:N-1
28     w = omega(t(k));
29     A(k+1,:) = A(k,:) + dt * cross(w, A(k,:));
30 end
31
32 An = A ./ vecnorm(A,2,2);
33
34 % Troca de eixos no plot
35 X = An(:,3); % A2
36 Y = An(:,1); % A1
37 Z = An(:,2); % A3
38
39 %% Gráfico 3D
40 figure; hold on; axis equal;
```

```
41
42 [Xs,Ys,Zs] = sphere(60);
43 surf(Xs,Ys,Zs, ...
44     'FaceAlpha',0.25, ...
45     'EdgeColor','none', ...
46     'FaceColor',[0.5 0 0]); % cor
47
48 % trajet ria
49 scatter3(X,Y,Z, 6, t, 'filled');
50
51 % colormap vermelho sem branco
52 % do preto ao vermelho puro
53 redmap = [linspace(0,1,256)' zeros(256,1) zeros(256,1)];
54 colormap(redmap)
55
56 colorbar
57
58 xlabel('Y')
59 ylabel('X')
60 zlabel('Z')
61
62 plot3(X, Y, Z, 'k-', 'LineWidth', 1.0)
63
64 plot3(X(1), Y(1), Z(1), 'ko', 'MarkerSize',8, 'MarkerFaceColor','k')
65 grid on
66 view(35,25)
67
68 hold off
```

APÊNDICE D – Temperaturas medidas pelo sensor DS18B20

Hora	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6
1	25.19	27.44	27.88	27.31	27.00	26.63
2	28.13	27.44	27.81	27.31	27.00	26.69
3	28.13	27.44	27.69	27.25	27.13	26.75
4	28.13	27.44	27.69	27.25	27.13	26.81
5	28.06	27.44	27.69	27.19	27.00	26.75
6	28.00	27.38	27.69	27.19	27.13	26.94
7	28.00	27.31	27.56	27.13	27.06	26.81
8	27.94	27.38	27.56	27.19	27.06	26.88
9	27.94	27.25	27.50	27.06	27.00	26.75
10	27.69	27.25	27.50	27.31	27.06	26.75
11	27.44	27.19	27.44	27.25	27.00	26.69
12	27.50	27.25	27.50	27.25	27.00	26.69
13	27.44	27.19	27.38	27.19	26.94	26.44
14	27.44	27.13	27.44	27.19	26.94	26.50
15	27.50	27.25	27.38	27.13	26.88	26.38
16	27.50	27.31	27.50	27.19	26.88	26.38
17	27.63	27.56	27.44	27.06	26.88	26.31
18	27.63	27.81	27.44	27.13	26.94	26.31
19	27.50	27.88	27.50	27.06	26.94	26.25
20	27.38	27.88	27.50	27.06	26.88	26.31
21	27.38	27.81	27.38	26.94	26.81	26.38
22	27.38	27.75	27.38	27.00	26.88	26.44
23	27.38	27.81	27.38	27.06	26.75	26.44
24	27.44	27.88	27.38	27.06	26.63	26.50
Média	27.57	27.48	27.52	27.15	26.96	26.62

Tabela 15 – Temperaturas registradas ao longo de 6 dias de experimento sem clinorotação (24 medições por dia).

Hora	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5
1	26.63	26.50	28.75	26.88	28.94
2	26.56	26.50	29.31	26.94	28.20
3	26.63	26.44	29.25	27.06	28.06
4	26.50	26.38	29.25	27.13	27.63
5	26.50	26.44	29.25	27.19	27.63
6	26.38	26.38	29.31	27.13	27.25
7	26.44	26.31	29.38	27.06	27.31
8	26.31	26.31	29.50	27.13	27.25
9	26.44	26.31	29.50	27.19	27.19
10	26.31	26.19	29.50	27.25	27.13
11	26.31	26.19	29.56	27.31	27.06
12	26.31	26.13	29.69	27.38	27.13
13	26.31	26.25	28.75	27.44	27.19
14	26.25	26.00	28.69	27.38	27.25
15	26.31	26.06	28.69	27.31	27.31
16	26.25	26.06	28.69	27.38	27.25
17	26.50	27.75	28.56	27.44	27.19
18	26.50	27.63	28.63	27.50	27.25
19	26.56	27.56	28.75	27.44	27.31
20	26.56	27.50	28.81	27.38	27.25
21	26.63	27.50	28.88	27.31	27.19
22	26.50	27.44	29.00	27.38	27.25
23	25.13	27.44	29.38	27.44	27.31
24	26.56	27.50	29.44	27.50	27.25
Média	26.39	26.83	29.06	27.27	27.16

Tabela 16 – Temperaturas registradas ao longo de 5 dias de experimento com clinorotação (24 medições por dia).