



Universidade de Brasília – UnB
Faculdade UnB Gama – FGA
Projeto Integrador de Engenharia 2

Câmara de Termo-Vácuo para Testes de Cubesats

Professores: Alex Reis, Jose Felicio da Silva, Paolo Gessini,
Ricardo Matos Chaim e Rhander Viana

Brasília, DF

2021



André Aquino Braga, Ciro Barbosa Costa, Daniel Moreira Carreira, Débora da Silva Dantas, Gustavo de Barros Borges, Isla Kalleny Marques Brandão, João Pedro Mota Jardim, Marcos Breno da Silva Aguiar, Matheus Rodrigues do Nascimento, Maurício Sá Gontijo, Paulo Victor de Menezes Lopes, Priscila Yukie Yamada, Rana Mayeli Piêgas Taborda, Renato de Brito do Nascimento Filho, Shayane Marques Alcântara

Câmara de Termo-Vácuo para Testes de Cubesats

Relatório técnico referente ao projeto Câmara de Termo-Vácuo para Testes de Cubesats, no âmbito da disciplina Projeto Integrador de Engenharia 2.

Universidade de Brasília – UnB

Faculdade UnB Gama – FGA

Orientador: Alex Reis, Jose Felicio da Silva, Paolo Gessini, Ricardo Matos Chaim e Rhander Viana

Brasília, DF

2021

André Aquino Braga, Ciro Barbosa Costa, Daniel Moreira Carreira, Débora da Silva Dantas, Gustavo de Barros Borges, Isla Kalleny Marques Brandão, João Pedro Mota Jardim, Marcos Breno da Silva Aguiar, Matheus Rodrigues do Nascimento, Maurício Sá Gontijo, Paulo Victor de Menezes Lopes, Priscila Yukie Yamada, Rana Mayeli Piégas Taborda, Renato de Brito do Nascimento Filho, Shayane Marques Alcântara

Câmara de Termo-Vácuo para Testes de Cubesats/ André Aquino Braga, Ciro Barbosa Costa, Daniel Moreira Carreira, Débora da Silva Dantas, Gustavo de Barros Borges, Isla Kalleny Marques Brandão, João Pedro Mota Jardim, Marcos Breno da Silva Aguiar, Matheus Rodrigues do Nascimento, Maurício Sá Gontijo, Paulo Victor de Menezes Lopes, Priscila Yukie Yamada, Rana Mayeli Piégas Taborda, Renato de Brito do Nascimento Filho, Shayane Marques Alcântara. – Brasília, DF, 2021-

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

Projeto Integrador 2 – Universidade de Brasília – UnB
Faculdade UnB Gama – FGA , 2021.

1. Câmara de vácuo. 2. Cubesat. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Câmara de Termo-Vácuo para Testes de Cubesats

Listas de ilustrações

Figura 1 – CubeSat padrão 1U sem as paredes laterais (mm). Fonte: (DURÃO; SHUCH, 2016).	11
Figura 2 – Câmara de Vácuo do LaSE-FGA.	12
Figura 3 – Escopo do produto nos subsistemas.	24
Figura 4 – Divisão das soluções por área de engenharia.	25
Figura 5 – Vista isométrica da solução com um grau de liberdade.	34
Figura 6 – Vista isométrica da solução com dois graus de liberdade.	35
Figura 7 – Diagrama hidráulico	39
Figura 8 – Diagrama hidráulico dentro da câmara de termo-vácuo	39
Figura 9 – Fluxograma de operação do Sistema de Alimentação.	40
Figura 10 – Figura modelo PID	44
Figura 11 – Arquitetura inicial da eletrônica	44
Figura 12 – Plano de integração entre subsistemas	45
Figura 13 – Arquitetura de software da eletrônica	47
Figura 14 – CAD Simulador Solar. Fonte: (SILVEIRA, 2021)	48
Figura 15 – Diagrama Simulador Solar. Fonte: Autoria própria.	48
Figura 16 – Diagrama Parte Elétrica. Fonte: Autoria própria.	49
Figura 17 – Diagrama Trocadores de Calor. Fonte: Autoria própria.	51
Figura 18 – Paleta de cores para a aplicação. Fonte: (ADOBE, 2021).	52
Figura 19 – Tela do Painel inicial. Fonte: Autoria própria.	53
Figura 20 – Tela da definição dos parâmetros a serem realizados no teste. Fonte: Autoria própria.	53
Figura 21 – Tela que disponibiliza o histórico dos experimentos realizados. Fonte: Autoria própria.	54
Figura 22 – Tela que apresenta os sensores da câmara. Fonte: Autoria própria.	54
Figura 23 – EAP do Ponto de Controle 1.	67
Figura 24 – EAP do Ponto de Controle 2.	68
Figura 25 – EAP do Ponto de Controle 3.	69
Figura 26 – Organograma da equipe.	71
Figura 27 – Vista frontal da solução com dois graus de liberdade.	72
Figura 28 – Interface entre o motor e o <i>Cubesat</i> .	72
Figura 29 – Proteção térmica entre a interface entre o motor e o <i>Cubesat</i> .	73
Figura 30 – Suporte do <i>Cubesat</i> para o solução com dois graus de liberdade.	73
Figura 31 – Vista frontal da placa térmica da câmara de termo-vácuo (dimensões em milímetros).	79

Lista de tabelas

Tabela 1 – Modos de operação da Câmara.	13
Tabela 2 – Stakeholders e suas necessidades.	15
Tabela 3 – Riscos organizacionais do projeto.	16
Tabela 4 – Marcos do projeto.	17
Tabela 5 – Lista É/Não é	20
Tabela 6 – Backlogs das Sprints do projeto.	21
Tabela 7 – Requisitos da missão	26
Tabela 8 – Requisitos da solução estrutural.	27
Tabela 9 – Requisitos da solução eletrônica.	29
Tabela 10 – Requisitos da solução de software.	30
Tabela 11 – Requisitos da solução energética	32
Tabela 12 – Lista de materiais (MATWEB, 2021), (PELLEG, 2012).	35
Tabela 13 – Comparação entre os tipos de válvula (TISSERAND, 2014), (PETER; ZAPPE, 2004), (ASHLIN, 2020)	37
Tabela 14 – Software de Controle	46
Tabela 15 – Software de Interface (API)	46
Tabela 16 – Componentes de energia para o simulador solar	49
Tabela 17 – Componentes para o simulador solar.	50
Tabela 18 – Orçamento preliminar	55
Tabela 19 – Quantificação dos pesos de impacto e probabilidade.	56
Tabela 20 – Tipos de riscos por área de solução.	56
Tabela 21 – Descrições dos riscos por área de solução.	59
Tabela 22 – Ferramentas de comunicação da equipe	70
Tabela 23 – Autoavaliação dos integrantes por área.	74

Listas de abreviaturas e siglas

A/D	Analógico/Digital
API	Interface de programação de aplicações
CI	Círculo Integrado
EAP	Estrutura Analítica de Projeto
EMC	Eletromagnetic Compatibility
I^2C	Inter-Integrated Circuit
LIT	Laboratório de Integração e Testes
LN_2	Nitrogênio Líquido
N_2	Nitrogênio
PID	Proporcional Integral Derivativo
PMBOK	Project Management Body of Knowledge
SPI	Serial Peripheral Interface
TAP	Termo de Abertura do Projeto
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TCU	Thermal Control Unity
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter

Sumário

1	CONTEXTUALIZAÇÃO	10
1.1	Visão Geral	10
1.2	Problemática	11
2	TERMO DE ABERTURA DO PROJETO	13
2.1	Descrição do Projeto	13
2.2	Justificativa	13
2.3	Objetivos	14
2.3.1	Objetivos Gerais	14
2.3.2	Objetivos Específicos	14
2.4	StakeHolders	14
2.5	Premissas	15
2.6	Restrições	15
2.7	Riscos Gerais	16
2.8	Marcos do Projeto	16
3	ESCOPO DO PROJETO	18
3.1	Metodologia	18
3.1.1	SCRUM	18
3.1.2	Kanban	19
3.2	Estrutura Analítica de Projeto (EAP)	19
3.3	Lista É/Não É	20
3.4	Gerenciamento de Comunicação	21
3.5	Gerenciamento de Recursos Humanos	21
3.6	Gerenciamento de Tempo	21
4	ESCOPO DO PRODUTO	24
4.1	Delimitação do escopo	24
4.2	Visão geral das soluções	25
4.3	Requisitos	25
4.3.1	Requisitos de missão	26
4.3.2	Requisitos da solução estrutural	27
4.3.3	Requisitos da solução eletrônica	29
4.3.4	Requisitos da solução de Software	30
4.3.5	Requisitos da solução energética	32

5	SOLUÇÃO	33
5.1	Solução Estrutural	33
5.1.1	Arquitetura do Suporte de Dois Graus de Liberdade para o CubeSat e Suporte do Simulador Solar	33
5.1.2	Materiais e Componentes	35
5.1.3	Arquitetura do Sistema de Alimentação	37
5.1.4	Dinâmica de Operação do Sistema de Alimentação	39
5.2	Solução de Eletrônica	41
5.2.1	Central de Controle e Sensoriamento	41
5.2.2	Sistema de Atuadores	43
5.2.3	Arquitetura Eletrônica	44
5.3	Solução de Energia	47
5.3.1	Simulador Solar	47
5.3.2	Parte Elétrica	49
5.3.3	Trocadores de Calor	50
5.4	Solução de Software	51
5.4.1	Proposta de inovação	52
5.4.2	Prototipagem da aplicação	52
6	CUSTOS	55
7	RISCOS	56
7.1	Análise Quantitativa dos Riscos	56
7.2	Tipo dos Riscos	56
7.3	Descrição dos Riscos	59
8	CONSIDERAÇÕES	63
	REFERÊNCIAS	64
	APÊNDICES	66
	APÊNDICE A – ESTRUTURA ANALÍTICA DO PROJETO - EAP	67
	APÊNDICE B – PLANO DE GERENCIAMENTO DE COMUNICAÇÃO	70
B.1	Objetivo	70
B.2	Ferramentas	70
B.3	Diretrizes e Procedimentos de Comunicação	70

	APÊNDICE C – PLANO DE GERENCIAMENTO DE RECURSOS HUMANOS	71
C.1	Objetivo	71
C.2	Papéis e Responsabilidades	71
	APÊNDICE D – CAD'S PRELIMINARES	72
	APÊNDICE E – AUTOAVALIAÇÃO DOS INTEGRANTES	74
	ANEXOS	78
	ANEXO A – DESENHOS TÉCNICOS - PLACA TÉRMICA	79

1 Contextualização

1.1 Visão Geral

Os CubeSats, classe de nanossatélites, foram criados por motivos puramente educacionais como uma forma de baratear a construção e encurtar o tempo da missão de um satélite para que estudantes pudessem ter treinamento com tal tecnologia de uma forma viável. Porém, esses CubeSats tornaram-se uma das inovações que transformaram o setor aeroespacial ao integrar serviços de satélites para diferentes objetivos, abrindo os horizontes para novos negócios. Com a popularização desse modelo de satélite, instituições e países que ainda não tinham acesso ao espaço devido ao custo, encontraram nesse modelo uma solução para realizar missões espaciais de curto prazo. Dessa forma, os CubeSats tornaram-se uma tendência tecnológica sendo utilizado em aplicações espaciais para missões com custo baixo e equipe pequena, e capacitação de profissionais na área ([TWIGGS, 2008](#)).

A popularização dos CubeSats ocorreu principalmente pela necessidade de treinar alunos do nível superior numa missão espacial completa no período típico de suas graduações e sem custos exorbitantes. Posteriormente, foi introduzido como um modelo funcional para agências espaciais em todo o mundo desafiando os padrões de satélites, uma vez que um projeto de CubeSat aceita os riscos de utilizar componentes sem qualificação para uso no espaço e otimizar os testes. Mas esses riscos são compensados pela facilidade da rápida reposição de um desses projetos caso ocorra falhas.

Devido às vantagens comerciais apresentadas por esse tipo de satélite, iniciativas privadas começaram a adotar esse modelo e agências espaciais implementaram esse projeto em suas missões. Dessa forma, os lançamentos de CubeSats por ano superaram o lançamento de satélites convencionais em 2017 demonstrando como os CubeSats possibilitaram acesso ao espaço para países e organizações que não possuíam recursos para custear programas espaciais ([VILELA; BRANDÃO; LEONARDI, 2016](#)).

A arquitetura dos CubeSats obedece um padrão de especificações de domínio público, onde as principais características são a montagem padronizada em cubo de aproximadamente 10 centímetros com uma massa de até 1,3 quilogramas, conforme ilustra a figura 1. Esse único cubo constitui um módulo 1U e podem ser utilizados vários desses cubos para construir CubeSats maiores com uma arquitetura aberta ([TOORIAN, 2004](#)).

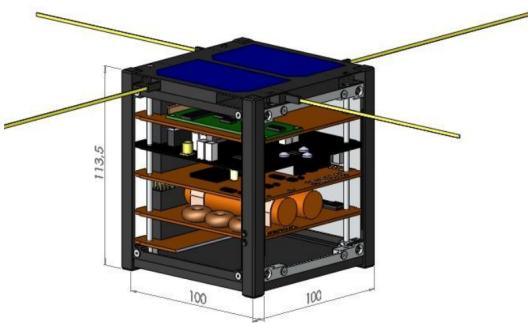


Figura 1 – CubeSat padrão 1U sem as paredes laterais (mm). Fonte: ([DURÃO; SHUCH, 2016](#)).

1.2 Problemática

Para que os CubeSats possam entrar em fase de operação, é necessário que os mesmos passem por todas as fases de desenvolvimento do ciclo de vida do produto espacial convencional, sendo eles: viabilidade, concepção, projeto detalhado, fabricação e integração e teste. Nas duas últimas fases, o CubeSat precisa passar por processos interativos para testar os subsistemas para verificar se as soluções propostas estão aptas para suportar as condições espaciais e o sistema como um todo deve ser submetido a testes de validação ([NASA, 2007](#)).

Para a execução do programa de testes que integram essas duas últimas etapas é necessário o uso de diferentes tipos de instalações, como instalação de teste de vibração, instalação de teste Acústico, instalação de teste de propriedades de massa, Câmara de termo-vácuo, instalação de teste EMC, instalação de teste magnético e outros. Porém, dentre todos esses, os testes de simulação de ambiente espacial realizados pela câmara de termo-vácuo desempenham um papel fundamental na qualificação dos três modelos sistêmicos do CubeSat (Modelo de Engenharia, Modelo de Qualificação e Modelo de Vôo) ([CHISABAS et al., 2017](#)).

Os três modelos sistêmicos podem ser definidos por meio das seguintes definições:
I. Modelo de Engenharia possui todas as funcionalidades de desempenho contempladas no protótipo; II. Modelo de Qualificação deve contemplar todas os requisitos do Modelo de voo (versão final) demonstrando que os subsistemas do protótipo atendem as especificações da missão com uma margem satisfatória; III. Modelo de voo é a versão final do projeto sendo construído após ajustes e revisão de qualificação.

A câmara de termo-vácuo é composta por uma Câmara de Vácuo, conforme ilustra a figura 2, com controle de temperatura interno. O controle de temperatura pode ser feito com a inserção numa placa dentro da Câmara de Vácuo de nitrogênio gasoso aquecido para temperaturas altas e nitrogênio líquido para simular a temperatura de fundo do

espaço. Junto a esse sistema térmico, também é implementado uma lâmpada capaz de simular a luz solar que incide sobre as faces do CubeSat no espaço, em que esse sistema é chamado de simulador solar ([ALMEIDA; PANISSI; SANTOS, 2016](#)).



Figura 2 – Câmara de Vácuo do LaSE-FGA.

Durante o modelo de engenharia, é possível realizar nesse dispositivo testes de exposição dos materiais e dos subsistemas para validação de seu comportamento em baixas pressões e temperaturas extremas. No modelo de qualificação, a câmara de termo-vácuo pode ser utilizada para estudar o CubeSat sob a influência da radiação e, no último caso, no modelo de voo pode ser realizado testes de ciclagem térmica para verificar se o projeto é capaz de suportar todas as variações térmicas do ambiente espacial. A maioria dos subsistemas de um CubeSat tem como requisito mandatório passar por testes de termo-vácuo para serem qualificados e aceitos para o lançamento ([SILVA; PERONDI, 2011](#)).

A falta desses testes pode ocasionar na não detecção de falhas dos subsistemas do CubeSat comprometendo toda a missão e perdendo todo o investimento feito no projeto. No Brasil, é possível realizar os testes de simulação do ambiente espacial na Câmara de Termo-Vácuo do LIT localizado no Instituto nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) ([CHISABAS et al., 2017](#)). Os pesquisadores realizam todos os protocolos de testes necessários para a validação do modelo de voo do CubeSat emitindo relatórios com certificação internacional. Porém, essa solução não contempla com satisfação projetos em fase de modelo de engenharia ou validação, uma vez que não é possível ter muita liberdade nos procedimentos de testes e o acesso é demorado e dificultado por conta de toda a burocracia.

Dessa forma, o tempo para desenvolver esses satélites prolongam-se mais do que o esperado e, geralmente, não é possível fazer testes menores para validar novas soluções em ambiente espacial de forma eficaz. Com o aumento da produção de CubeSats decentralizados do INPE no Brasil, torna-se necessário uma solução para viabilizar que esses novos projetos tenham a sua disposição todas as ferramentas necessárias para desenvolver um produto de qualidade com rapidez.

2 Termo de Abertura do Projeto

2.1 Descrição do Projeto

O projeto consiste em uma câmara de termo-vácuo com simulador solar para uso universitário com cinco modos de funcionamento: Simulação espacial, Ciclagem térmica e Vácuo frio, quente e simples. A câmara suportará CubeSats de dimensão até 3U e proporcionará um intervalo de temperatura de -20°C a 60°C na face do mesmo.

2.2 Justificativa

Tendo em vista a problemática exposta, foi idealizada uma solução que pudesse permitir que centros de pesquisas, como universidades, empresas privadas ou institutos, pudessem ter um meio de realizar testes em um ambiente que simula as condições espaciais para validação de modelos de engenharia e, parcialmente, modelos de qualificação em diversos subsistemas do CubeSat, oferecendo liberdade temporal e de projeto para o pesquisador e, dessa forma, viabilizar um rápido crescimento na produção e lançamento de CubeSats Brasileiros.

A delimitação de CubeSats com dimensão até 3U foi feita para que fosse possível ter uma câmara padrão que suportasse qualquer projeto de CubeSat dentro desse intervalo, além disso, CubeSats entre 1U e 3U contemplam aproximadamente 95% dos nanosatélites já produzidos e lançados até o momento. Logo, a câmara cobrirá a grande maioria dos projetos desenvolvidos ([VILELA et al., 2019](#)). Quanto ao intervalo de temperatura entre -20°C e 60°C, este foi definido com base nos principais testes de termo-vácuo realizado por instituições de pesquisas espaciais. Esse estudo pode ser conferido no artigo ([FERNANDES et al., 2016](#)). E, por último, os modos de operação serão definidos de acordo com a tabela 1, onde é possível visualizar em quais modos se tem o uso de Nitrogênio (N₂) resfriado ou aquecido para chegar às temperaturas desejadas, além do uso do simulador solar.

Tabela 1 – Modos de operação da Câmara.

Nº	Modo de operação	Alto Vácuo	LN2 Frio	GN2 Aquecido	Luz Solar
1	Vácuo simples	X			
2	Vácuo frio	X	X		
3	Vácuo quente	X		X	
4	Ciclagem térmica	X	X	X	
5	Simulação espacial	X	X	X	X

2.3 Objetivos

2.3.1 Objetivos Gerais

O objetivo é desenvolver os sistemas que integram uma câmara de termo-vácuo com simulador solar que possibilite a realização de diversos testes para validar modelos de engenharia e de qualificação de CubeSats de tamanho até 3U.

2.3.2 Objetivos Específicos

- Proporcionar um ambiente de alto vácuo ($<10^{-9}$ mbar) e um intervalo de temperatura de -20°C a 60°C na face do CubeSat;
- Acoplar Cubesats de até 3U;
- Possibilitar a movimentação do CubeSat em dois eixos dentro da Câmara;
- Permitir a simulação da I. Simulação espacial, II. Ciclagem térmica e III. Vácuo frio, IV. quente e V. simples;
- Acompanhar os dados dos sensores do sistema em tempo real;

2.4 StakeHolders

A definição dos Stakeholders do cenário de testes numa câmara de termo-vácuo foi feita com base em 4 categorias:

- Entrada: São os responsáveis por fornecer as entradas no cenário do projeto. Nesse caso, as entradas são o projeto de CubeSat a ser testado na câmara. É necessário identificar as necessidades que esses *stakeholders* possuem para inserir a entrada de forma correta.
- Controle: São as partes interessadas que influenciam indiretamente na execução do teste nesse dispositivo como, por exemplo, órgãos reguladores.
- Mecanismo: *Stakeholders* que atuarão diretamente no funcionamento do cenário operando os mecanismos dos mesmos.
- Saída: São as pessoas físicas ou jurídicas interessadas nas saídas que esse cenário geram. No caso desse projeto, a saída é os resultados dos testes.

Uma vez definidas as principais categorias, é possível realizar o levantamento dos *stakeholders* e suas necessidades, presente na tabela 2. Ressaltando que um mesmo *stakeholder* pode se encaixar em mais de uma das categorias do cenário.

Tabela 2 – Stakeholders e suas necessidades.

ID	Stakeholder	Categoria	Necessidade
STK-01	Desenvolvedores do CubeSat	Entrada	Supporte que acomode com segurança CubeSats de 1U até 3U
STK-02	INPE	Controle	Confiabilidade de todos os subsistemas durante os procedimentos de teste para garantir a validade dos dados
STK-03	Instituição em que a câmara está sendo implementada	Controle	Dispositivo que possa ser implementado na rede elétrica da instituição
STK-04	Fornecedor de nitrogênio	Controle	Local apropriado para armazenar o nitrogênio com descarte correto para a atmosfera
STK-05	Responsável pela execução dos testes	Mecanismo	Comandos claros para a execução do teste e liberdade para configurar os testes conforme demandas específicas
STK-06	Desenvolvedores do CubeSat	Saída	Relatório contendo todas as informações relevantes do teste

2.5 Premissas

- A instituição que adquirir a Câmara conseguirá o fornecimento de nitrogênio necessário para abastecê-la
- O equipamento funcionará ligado a rede elétrica
- A instituição terá condições de arcar com o orçamento da Câmara de termo-vácuo;
- A instituição terá um local grande o suficiente para comportar toda a câmara de termo-vácuo e local para descarte de gases;
- Todos os integrantes do grupo estarão comprometidos com o desenvolvimento do trabalho até o final;
- O local que todo o equipamento será instalado terá um computador para acessar o *software* do simulador;
- O projeto de Trabalho de Conclusão de Curso que está sendo desenvolvido em paralelo com esse projeto cumprirá o cronograma previsto (Essa parceria será detalhada na seção do escopo do produto);

2.6 Restrições

- Será desenvolvido apenas a parte teórica do projeto;

- A câmara de termo-vácuo só poderá suportar CubeSats padronizados de até 3U, ou seja, as dimensões máximas do protótipo podem ser de até 10x10x30 centímetros e ter uma massa de no máximo 4 quilogramas;
- O orçamento pode não contemplar todos os itens do projeto por conta de dificuldade para orçar peças especiais devido ao *LockDown*;
- O prazo de desenvolvimento do projeto tem duração até o fim da execução da disciplina Projeto Integrador 2;

2.7 Riscos Gerais

A seguir, a tabela 3 apresenta os riscos que envolvem o projeto a nível organizacional com base nas necessidades dos *Stakeholders*, nas premissas e nas restrições.

Tabela 3 – Riscos organizacionais do projeto.

Risco	Consequência	Probabilidade	Impacto	Medida
Desistência da disciplina	Atraso do cronograma do projeto; Carga de trabalho maior para os demais membros	Moderada	Alto	Prevenção: Acompanhamento dos membros; Mitigação: Redistribuir as atividades com os demais integrantes;
Cumprimento inadequado das atividades previstas	Atraso do cronograma do projeto	Alta	Médio	Prevenção: Realização de acompanhamento contínuo do desenvolvimento das atividades
Cliente final não possuir todas as premissas levantadas	Impossibilidade de implementar a solução na instituição do cliente	Baixa	Alto	Prevenção: Ajustar os requisitos de acordo com os Stakeholders
Atraso no TCC desenvolvido em paralelo	Atraso do cronograma do projeto; Projeto incompleto	Baixa	Alto	Prevenção: Delimitação de um escopo de produto que pode ser desenvolvido de forma independente mas também complementar o TCC
Complexidade do projeto maior que a esperada	Projeto incompleto; Erros no desenvolvimento projeto	Moderada	Alto	Mitigação: Adaptação do escopo do projeto; Prevenção: Acompanhamento do projeto por especialistas da área
Interrupções devido a problemas relacionados ao Covid-19	Atraso do cronograma	Alta	Médio	Mitigação: Adaptação do escopo do projeto

2.8 Marcos do Projeto

Os principais marcos do projeto são as entregas dos Pontos de Controle da disciplina. Essas entregas definirão a divisão das atividades e a evolução do desenvolvimento do projeto. É possível observar esses marcos na tabela 4.

Tabela 4 – Marcos do projeto.

Marco	Data	Descrição
Ponto de Controle 1	14/03	Definição da solução inicial, escopo do projeto e do produto
Ponto de Controle 2	11/04	Definição da solução crítica com apresentação de cálculos, simulações e modelagem
Ponto de Controle 3	03/05	Integração dos subsistemas e plano de construção

3 Escopo do Projeto

3.1 Metodologia

Para auxiliar o desenvolvimento do projeto com eficiência e mais organização, é proposta uma metodologia a fim de alcançar os objetivos da disciplina. Logo adota-se o uso do método SCRUM e o Kanban.

3.1.1 SCRUM

O SCRUM é uma metodologia ágil, que busca auxiliar nas entregas de valor, com mais rapidez, adaptabilidade e eficiência. Este método propõe papéis, eventos e artefatos, que permitem a manutenção de projetos. O SCRUM é baseado no conhecimento por experiências e em sua posterior tomada de decisão por meio de observações, trabalhando também na constante otimização e abertura para mudanças rápidas ([SCHWABER; SUTHERLAND, 2017](#)).

O principal artefato, relacionado a todos os eventos e papéis é o Backlog. Ele é uma fonte de informação, por meio de uma lista, sobre todas as demandas ou tarefas do produto de forma clara e concisa, além de representar o progresso do time, por meio de suas finalizações.

O método define alguns papéis:

- Product Owner: é responsável por representar as necessidades do produto. Ele conhece e desenvolve o objetivo do produto, bem como comunica ao time de forma clara e gerencia o *Backlog* para um desenvolvimento mais eficaz e com qualidade.
- Scrum Master: É responsável por coordenar os eventos, auxiliar o time a entregar valor, gerenciar possíveis impedimentos, além de otimizar constantemente o processo do projeto.
- Desenvolvedores: São pessoas com habilidades diversas a desenvolverem o produto mediante *Backlog* definido. Além disso, mantêm uma constante comunicação com o Product Owner e o Scrum Master, relatando obstáculos ou avanços.

Com os papéis, é possível seguir uma série de eventos propostos, que são:

- Sprints: São as iterações no processo de desenvolvimento. Durante uma Sprint, são realizadas tarefas planejadas, de acordo com o *Backlog*, o que é chamada de Sprint

Backlog. Cada uma pode ter a duração entre 1 a 2 semanas ou por mês, de acordo com o contexto e necessidades da equipe;

- Sprint Planning: É o evento em que ocorre o planejamento de uma Sprint. Esta reunião busca responder às demandas do Product Owner, bem como alocar tarefas e adequar a disponibilidade com habilidades dos desenvolvedores para entregar valor;
- Daily: São reuniões diárias e curtas, com no máximo 15 minutos, para atualizar o time quanto o que a pessoa está fazendo, o que vai fazer e se possui algum impedimento no andamento da tarefa. O objetivo deste evento é manter a comunicação constante e tentar resolver esses impedimentos antes do prazo final da Sprint.
- Sprint Review: É o período com duração definida, ou seja, *Time-box*, em que as tarefas realizadas da Sprint são demonstradas para o time e validadas pelo Product Owner como "feitas" ou "necessitando ajustes".
- Sprint Retrospective: É um evento que possibilita que o time possa avaliar como foi a Sprint, com pontos positivos ou de melhoria. Ela tem o objetivo de melhorar a qualidade e eficácia do trabalho desenvolvido por todo o time, buscando melhorar o processo.

3.1.2 Kanban

O Kanban é um *checklist* de atividades que precisam ser desenvolvidas com o máximo de clareza possível. Esse método surge para indicar o andamento de tarefas.

No desenvolvimento do produto são utilizadas as seguintes notações para gerenciamento:

- Backlog: Lista de demandas do projeto;
- A fazer: Tarefas que precisam ser feitas no período determinado;
- Em andamento: Tarefas que estão em progresso;
- Em teste: Tarefas que precisam de testes;
- Em revisão: Tarefas que a princípio foram finalizadas, logo necessitam de revisão;
- Concluído: Tarefas revisadas e finalizadas.

3.2 Estrutura Analítica de Projeto (EAP)

No apêndice A, é possível visualizar a EAP de cada marco do projeto, que são os pontos de controle. A EAP divide-se em um nível hierárquico de produto, subproduto,

componentes e subcomponentes. Os pacotes de componentes e subcomponentes serão apresentados na seção de solução.

3.3 Lista É/Não É

Tabela 5 – Lista É/Não é

É	Não é
É um sistema de validação de modelo de engenharia de CubeSats.	Não é um sistema de validação de modelo de voo de CubeSats.
É um sistema que oferece funcionalidades automáticas.	Não é um sistema totalmente autônomo.
É capaz de suportar Cubesats padronizados de até 3U.	Não é capaz de suportar Cubesats que não obedeçam o padrão de até 3U.
É um sistema de simulação de termovácuo.	Não é um sistema de simulação vibracional e acústica.
É um projeto de sistemas de simulação de termovácuo.	Não é um projeto que fornece a estrutura da câmara de termovácuo.
É um sistema que permite a movimentação interna do Cubesat em 2 eixos.	Não é um sistema que permite a mobilidade automática da câmara de termovácuo.
É um sistema capaz de acompanhar/armazenar dados dos testes em tempo real.	Não é um sistema capaz de análise dos dados recebidos.
É um sistema que permite simular o ambiente térmico espacial.	Não é um sistema capaz de reproduzir as condições exatas do ambiente espacial.
É um sistema que permite teste de ciclagem térmica no Cubesat.	Não é um sistema que permite a passagem de fluido no interior câmara.
É um sistema que deve conter um sistema de controle de manutenção dos dados.	Não é um sistema que deve realizar manutenção dos dados.
É um sistema que permite a variação da temperatura na face do CubeSat entre -20°C e 60°C.	Não é um sistema que permite condições mais extremas de temperatura.
É um sistema capaz de fornecer informações do teste realizado, offline, por meio de aplicação de sistema embarcados e aplicação web.	Não é um sistema capaz de funcionamento sem energia elétrica para realização dos testes.

3.4 Gerenciamento de Comunicação

O documento de Plano de Comunicação previsto no PMBOOK contempla as ferramentas e métodos de comunicação que serão utilizados no projeto. No apêndice B encontra-se o plano de comunicação da equipe.

3.5 Gerenciamento de Recursos Humanos

O Apêndice C consta o plano de gerenciamento de recursos humanos da equipe.

3.6 Gerenciamento de Tempo

O plano de gerenciamento de tempo foi feito seguindo a metodologia SCRUM e baseando-se na Estrutura analítica do Projeto apresentada anteriormente. Definiu-se Sprints de uma semana para o desenvolvimento de todo o projeto e as atividades de cada uma dessas Sprints podem ser observadas na tabela 6. O projeto terá duração de oito sprints.

Tabela 6 – Backlogs das Sprints do projeto.

PONTO DE CONTROLE 1 14/03	
Sprint 0 01/03 a 05/03	
Tarefas	Área
Definição e entrevista com Stakeholders	Todas
Definição da metodologia	Gestão e Software
Pesquisas iniciais do projeto	Todas
Divisão da equipe	Gestão
Definição da problematização e justificativa	Gestão
Delimitação inicial do escopo	Todas
Sprint 1 08/03 a 12/03	
Tarefas	Área
Definição do TAP	Gestão
Definição do EAP	Todas
Definição do escopo do produto	Gestão
Levantamento dos requisitos	Todas
Projeto conceitual do suporte do CubeSat	Estrutura e fluídos
Cad preliminar do suporte do CubeSat	Estrutura e fluídos
Projeto conceitual do sistema de alimentação	Estrutura e fluídos
Diagrama hidráulico do sistema de alimentação	Estrutura e fluídos
Formulação do protótipo de interface com o usuário	Software

Projeto conceitual do simulador solar	Estrutura e fluídos
Estudo dos trocadores de calor	Estrutura e fluídos
Definição do escopo do sistema elétrico	Eletrônica
Definição da solução para o controle térmico	Eletrônica
Formulação da arquitetura inicial de eletrônica	Eletrônica
Levantamento de custos	Todas
Levantamento de riscos	Todas
PONTO DE CONTROLE 2 11/04	
Sprint 2 15/03 a 19/03	
Projeto crítico do sensoriamento	Eletrônica
Calculo de vazão do sistema de alimentação	Estrutura e fluídos
Cálculo estrutural do suporte do CubeSat	Estrutura e fluídos
Projeto crítico dos trocadores de calor	Estrutura e fluídos
Planejamento da arquitetura de software	Software
Planejamento e escrita das histórias de usuário	Software
Desenvolvimento do documento de visão	Software
Desenvolvimento do diagrama de casos de uso	Software
Desenvolvimento do diagrama de sequência	Software
Sprint 3 22/03 a 26/03	
Projeto crítico do controle do sistema térmico	Eletrônica
Dimensionamento de motor para o suporte do CubeSat	Estrutura e fluídos
Dimensionamento da tubulação do sistema de alimentação	Estrutura e fluídos
Definição do quadro elétrico	Eletrônica
Projeto crítico do simulador solar	Estrutura e fluídos
Desenvolvimento do documento de arquitetura do software	Software
Desenvolvimento do diagrama de classes	Software
Configuração do ambiente de desenvolvimento	Software
Sprint 4 29/03 a 02/04	
Projeto crítico do controle do simulador Solar	Eletrônica
Projeto crítico do controle do suporte de CubeSat	Eletrônica
CAD dos subprojetos	Estrutura e fluídos
Seleção e conexão dos componentes da linha de gas	Estrutura e fluídos
Definição do sistema de proteção dos motores	Estrutura e fluídos
Implementação de funcionalidades na aplicação	Software
Sprint 5 05/04 a 09/04	
Integração do sensoriamento com o controle térmico	Eletrônica
Simulação da integração	Eletrônica

Simulação estrutural	Estrutura e fluídos
Elaboração do diagrama de fluxo	Estrutura e fluídos
Elaboração do diagrama unifilar	Eletrônica
Implementação de funcionalidades na aplicação	Software
Elaboração da apresentação	Todas
Escrita do ponto de controle	Todas
PONTO DE CONTROLE 3 03/05	
Sprint 6 12/04 a 16/04	
Elaboração do projeto de interface com a câmara	Estrutura e fluídos
Especificação do custo e viabilidade do projeto de energia	Estrutura e fluídos
Implementação de funcionalidades na aplicação	Software
Integração de subsistemas	Todas
Refinamento dos circuitos	Eletrônica
Sprint 7 19/04 a 23/04	
Implementação de funcionalidades na aplicação	Software
Elaboração do plano de montagem	Estrutura e fluídos
Validação dos subsistemas	Todas
Integração de subsistemas	Todas
Sprint 8 26/04 a 30/04	
Elaboração do Ponto de Controle 3	Todas
Elaboração do Manual de Operações	Todas
Finalização da integração dos subsistemas	Todas
Elaboração da apresentação	Gestão
Elaboração do vídeo	Gestão

4 Escopo do Produto

4.1 Delimitação do escopo

Devido a complexidade do sistema, o presente trabalho será desenvolvido em parceria com uma Tese de Conclusão de Curso para possibilitar que toda a câmara de termo-vácuo seja desenvolvida durante a disciplina. É possível conferir o TCC na referência ([SILVEIRA, 2021](#)). A figura 3 apresenta todos os subsistemas necessários para o funcionamento da câmara de Termo-Vácuo. Os subsistemas marcados como "Fora de Escopo" não serão contemplados nesse projeto e serão abordados com a premissa de que já estão concluídos. Além disso, tanto o projeto dessa disciplina como o TCC estão desenvolvendo uma solução que se encaixe no sistema de vácuo (Câmara de vácuo + sistema de bombeamento) presente no Laboratório de Sistemas Espaciais da Universidade de Brasília, campus FGA.

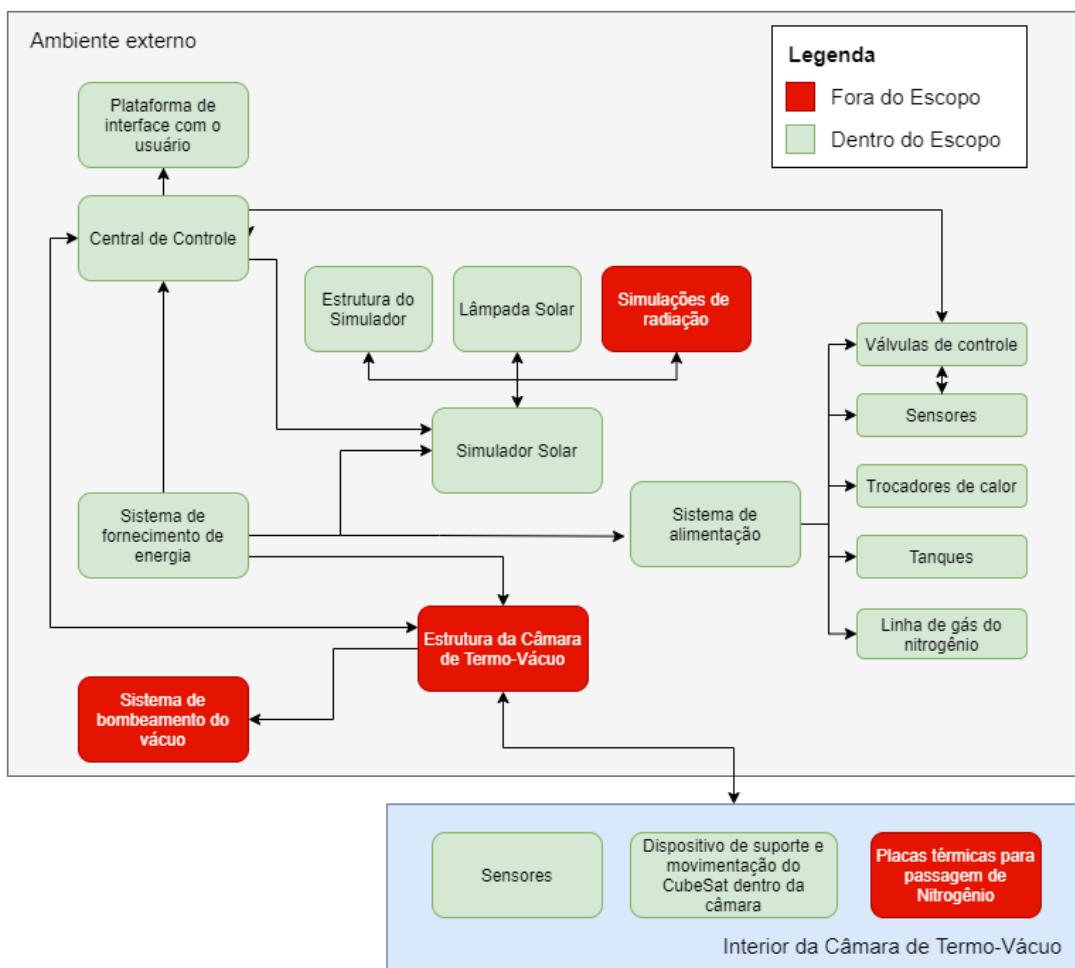


Figura 3 – Escopo do produto nos subsistemas.

4.2 Visão geral das soluções

Tendo o conhecimento dos subsistemas contemplados no escopo desse projeto, as soluções para o projeto serão divididas e apresentadas no próximo capítulo por área de engenharia. A figura 4 mostra como os subsistemas estão alocados dentro dos núcleos de trabalho da equipe (Estruturas e fluídos, Eletrônica e Software) e qual área de engenharia é responsável por cada subsistema. Os subsistemas do simulador solar e sistema de alimentação serão divididos entre a solução estrutural e a solução energética.

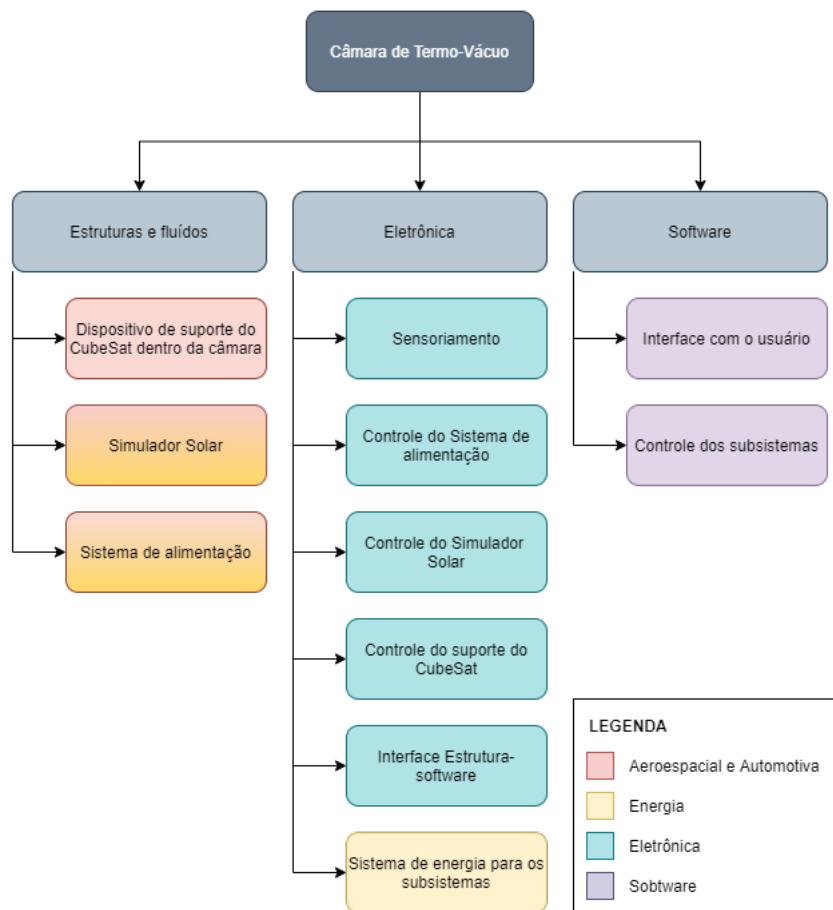


Figura 4 – Divisão das soluções por área de engenharia.

4.3 Requisitos

Os requisitos do projeto seguem o nível hierárquico de: I. Necessidades dos Stakeholders, II. Requisitos da missão e III. Requisitos técnicos. A partir das necessidades dos Stakeholders, presente no TAP, definiu-se os requisitos da missão e, pelos requisitos da missão, foram definidos os requisitos técnicos de cada solução. Os requisitos técnicos possuem uma coluna chamada "Rast.", que indica a rastreabilidade daquele requisito, ou seja, de qual requisito de missão aquele item originou-se. As outras duas colunas indicam o tipo Funcional (F) ou não-funcional (N-F) e se ele é Mandatório (M) ou Desejável (D).

Todas as soluções apresentadas na seção Solução foram baseadas nos respectivos requisitos técnicos de cada área.

4.3.1 Requisitos de missão

Tabela 7 – Requisitos da missão

ID	Requisitos
GER-01	O projeto deve conter um sistema de controle para manutenção, ativação e arquivamento dos dados da câmara de vácuo
GER-02	O sistema deve gerar um vácuo de 10E-3 mbar até 10E-9 mbar (alto vácuo)
GER-03	O sistema deve produzir alto vácuo em no máximo 3 horas
GER-04	O sistema deve propiciar que a face do Cubesat varie entre as temperaturas -20 °C e 60 °C
GER-05	O sistema deve informar em tempo real a temperatura e pressão dentro da câmara e na linha de gás
GER-06	Os materiais no interior da câmara devem manter suas propriedades mecânicas sobre circunstâncias de radiação, extrema temperatura e alto vácuo
GER-07	A pressão de vapor dos materiais do sistema deve ser mínima quando exposto a altas temperaturas ($\geq 126,85^{\circ}\text{C}$) durante a operação
GER-08	Os materiais estruturais do sistema devem ser impermeáveis aos gases, com superfície que impeça a retenção de impurezas e substâncias
GER-09	As bombas de vácuo devem possuir um sistema de energia emergencial
GER-10	Todos os componentes ligados a face interna da câmara devem suportar as temperaturas máximas e mínimas
GER-11	A câmara de vácuo deve permitir a transmissão e comunicação de dados e temperatura do cubesat
GER-12	O sistema deve iniciar os testes apenas quando alcançar o alto vácuo
GER-13	O sistema não deve aquecer o cubesat por condução
GER-14	O sistema deve ser capaz de suportar um Cubesat de dimensões até 3U
GER-15	O sistema deve ser controlado remotamente durante toda a operação

GER-16	Todos os sistemas devem possuir fonte de energia para seus respectivos abastecimento
GER-17	Os sistemas térmico e de vácuo devem ter um sistema de automação e controle para as rampas de refrigeração/aquecimento
GER-18	O sistema deve possuir um simulador solar
GER-19	O sistema deve possuir um sistema de rotação para simular o sistema solar em todas as faces do cubesat
GER-20	Todos os subsistemas devem ser exequíveis para operação e manutenção
GER-21	O sistema deve atender todas as especificações do TCC (parceria) e da câmara de vácuo existente no LASE

4.3.2 Requisitos da solução estrutural

Tabela 8 – Requisitos da solução estrutural.

ID	Categoría	Requisitos	Tipo	M/D	Rast.
EST-01	Suporte do Cubesat	Os materiais do sistema não devem reagir no vácuo	N-F	M	GER-06
EST-02	Suporte do Cubesat	Os materiais do sistema não devem reagir com outros materiais adjacentes	N-F	M	GER-06
EST-03	Suporte do Cubesat	A expansão térmica dos materiais adjacentes deve corresponder ao sistema sem gerar distorções indesejáveis e interações mecânicas	N-F	M	GER-06
EST-04	Suporte do Cubesat	Os materiais do sistema não devem emanar gases excessivamente sob interação de partículas de alta energia	N-F	M	GER-08
EST-05	Suporte do Cubesat	Os materiais do sistema devem ter um baixo potencial de liberação de gás sob vácuo	N-F	M	GER-07
EST-06	Suporte do Cubesat	Os materiais do sistema devem ter propriedades de desgaseificação adequadas para manipulação	N-F	M	GER-08

EST-07	Suporte do Cubesat	Os materiais do sistema devem ser adequados para minimizar ou cancelar a presença de fontes de vapor e gases indesejáveis	N-F	M	GER-08
EST-08	Suporte do Cubesat	Os materiais escolhidos não devem interferir na telemetria	N-F	M	GER-14
EST-09	Suporte do Cubesat	O suporte deve ter o mínimo contato com a estrutura do satélite para evitar transferência de calor por condução	N-F	M	GER-13
EST-10	Sistema de alimentação	Deve haver medição de temperatura e pressão na linha para monitoramento das condições do Nitrogênio	F	M	GER-11
EST-11	Sistema de alimentação	O sistema de alimentação deve ter interface com a placa térmica para fornecimento de Nitrogênio	N-F	M	GER-15
EST-12	Sistema de alimentação	É necessário um controle de vazão para garantir que a quantidade correta de Nitrogênio chegue à placa térmica	F	M	GER-17
EST-13	Sistema de alimentação	Deve contar com uma linha de resfriamento capaz de levar a temperatura na face do Cubesat até -20°	F	M	GER-04
EST-14	Sistema de alimentação	A câmara deve ser capaz de manter nos limites de temperatura durante o período dos testes térmicos	F	M	GER-04
EST-15	Sistema de alimentação	Deve contar com uma linha de aquecimento capaz de levar a temperatura na face do Cubesat até 60°	F	M	GER-04
EST-16	Sistema de alimentação	O sistema térmico deve conter um sistema específico de ventilação	F	D	GER-04
EST-17	Suporte do Cubesat	O sistema deve ter dois graus de liberdade	F	D	GER-14
EST-18	Suporte do Cubesat	O sistema não deve entrar em contato com a placa térmica durante a operação	F	M	GER-14

4.3.3 Requisitos da solução eletrônica

Tabela 9 – Requisitos da solução eletrônica.

ID	Categoría	Requisitos	Tipo	M/D	Rast.
ELE-01	Sensoria-mento	O sistema eletrônico deve possuir um sensor de temperatura em cada face do cubesat que suporte temperaturas entre -20 °C e 60 °C	F	M	GER-04 GER-05
ELE-02	Sensoria-mento	O sistema eletrônico deve possuir pelo menos 4 sensores de temperatura na placa térmica que suporte temperaturas entre -20 °C e 60 °C	F	M	GER-04 GER-05
ELE-03	Sensoria-mento	O sistema eletrônico deve possuir sensores de temperatura na linha dos tanques que suporte temperaturas entre -20 °C e 60 °C	F	M	GER-04 GER-05
ELE-04	Sensoria-mento	O sistema eletrônico deve possuir um sensor de alto vácuo e um sensor de baixo vácuo na placa térmica	F	M	GER-02 GER-05
ELE-05	Sensoria-mento	O sistema eletrônico deve possuir sensores de pressão na linha dos tanques que suporte pressões entre $10^{-3} mbar$ à $10^{-7} mbar$	F	M	GER-02 GER-05
ELE-06	Sistema de atuadores	O sistema eletrônico deve controlar a rotação dos motores utilizados para a rotação no próprio eixo e a rotação de 180°	F	M	GER-19 GER-20
ELE-07	Sistema de atuadores	O sistema eletrônico deve ligar e desligar o simulador solar	F	M	GER-18
ELE-08	Controle térmico	O sistema de controle de temperatura da placa térmica deve iniciar o teste apenas quando estiver em $60^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$	N-F	M	GER-17
ELE-09	Controle térmico	O sistema de controle de temperatura da placa térmica deve estagnar a temperatura em $60^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ durante 2 horas	N-F	M	GER-17
ELE-10	Controle térmico	O sistema de controle de temperatura da placa térmica deve diminuir a temperatura em uma velocidade de 5 °C/min	N-F	M	GER-17

ELE-11	Controle térmico	O sistema de controle de temperatura da placa térmica deve estagnar a temperatura em $-20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ após o decaimento da temperatura	N-F	M	GER-17
ELE-12	Sensoria-mento	Os componentes eletrônicos devem manter sua calibração e integridade sobre circunstâncias de radiação, extrema temperatura e alto vácuo	N-F	M	GER-06
ELE-13	Central	A central de controle deve coletar os dados de todos os sensores de temperatura e de pressão em tempo real	F	M	GER-05
ELE-14	Sistema de atuadores	O sistema de atuadores deve coletar a situação do simulador solar, dos motores e das válvulas	F	D	GER-01
ELE-15	Central	A central de controle deve transmitir todos os dados coletados para a interface gráfica de usuário	F	M	GER-01
ELE-16	Central	A central de controle deve receber todos os comando da interface gráfica de usuário e executá-lo	F	M	GER-15

4.3.4 Requisitos da solução de Software

Tabela 10 – Requisitos da solução de software.

ID	Categoría	Requisitos	Tipo	M/D	Rast.
SOF-01	Câmara de vácuo	A aplicação deve permitir a integração com a câmara	N-F	M	GER-11
SOF-02	Sistema térmico	A aplicação deve ativar e desativar o sistema térmico	F	M	GER-01
SOF-03	Sistema térmico	A aplicação deve coletar dados do sistema térmico	F	M	GER-01
SOF-04	Sistema térmico	A aplicação deve monitorar o sistema térmico	F	M	GER-01
SOF-05	Sistema térmico	A aplicação deve alertar o usuário sobre possíveis obstáculos do sistema térmico	F	D	SOF-04

SOF-06	Sistema térmico	A aplicação deve coletar em tempo real os índices de temperatura mediante sensor	F	M	GER-05
SOF-07	Câmara de vácuo	A aplicação deve coletar em tempo real os índices do vácuo mediante sensor	F	M	GER-05
SOF-08	Interface com o usuário	A aplicação deve gerar gráficos de temperatura e pressão pelo tempo	F	D	GER-05
SOF-09	Aquisição de dados	A aplicação deve registrar o histórico de dados de cada experimento	F	M	GER-01
SOF-10	Câmara de Vácuo	A aplicação deve permitir cancelar a missão em qualquer momento	F	M	GER-01
SOF-11	Interface com o usuário	A aplicação deve informar ao usuário quando o sistema entrar no modo de energia emergencial	F	D	GER-09
SOF-12	Interface com o usuário	A aplicação deve permitir realizar testes que possuam seu parâmetros setados	F	M	OBJ-03
SOF-13	Aquisição de dados	A aplicação deve permitir exportar os dados do experimento	F	D	GER-01
SOF-14	Câmara de Vácuo	A aplicação deve informar o nível de N2 e de GN2	F	M	GER-13
SOF-15	Câmara de Vácuo	A aplicação deve controlar a rotação do CubeSat	F	M	SOF-01
SOF-16	Câmara de Vácuo	A aplicação deve iniciar o teste somente após a pressão alcançar o nível ideal	F	M	GER-12
SOF-17	Interface com o usuário	A aplicação deve possibilitar que o usuário escolha outro tipo de teste em sequência	F	D	SOF-19
SOF-18	Aquisição de dados	A aplicação deve informar o estado dos sensores	F	D	SOF-01
SOF-19	Interface com o usuário	A aplicação deve ser intuitiva e acessível para os operadores	N-F	D	GER-01

4.3.5 Requisitos da solução energética

Tabela 11 – Requisitos da solução energética

ID	Categoría	Requisitos	Tipo	M/D	Rast.
ENE-01	Simulador Solar	O sistema deve ter uma fonte pontual de luz para simulação solar, possuindo um fluxo de radiação solar de 1400 W/m ² e potência de 274,89W	N-F	M	GER-18 GER-21
ENE-02	Simulador Solar	O sistema deve possuir um sensor para aferição do fluxo de radiação do simulador solar	F	M	GER-18
ENE-03	Simulador Solar	A fonte de luz deve possuir um reator externo de descarga para auxiliar na estabilidade e partida das lâmpadas	F	M	GER-18
ENE-04	Parte Elétrica	O sistema deve possuir uma fonte de alimentação principal para duração dos testes de no mínimo 2 horas e máximo de 10 horas	F	M	GER-16
ENE-05	Parte Elétrica	O sistema deve ter uma fonte de alimentação emergencial capaz de mantê-lo funcionando durante período de testes perante à um pico ou falha de energia	F	M	GER-16
ENE-06	Parte Elétrica	O sistema deve fornecer energia suficiente para todos os subsistemas	F	M	GER-16
ENE-07	Trocador de calor	Os trocadores de calor devem fornecer energia suficiente para garantir o aquecimento ou resfriamento do nitrogênio para que a face do Cubesat varie entre -20°C até 60°C	F	M	GER-04

5 Solução

5.1 Solução Estrutural

A solução estrutural para o projeto consiste na arquitetura de sistemas que viabilizam os cinco modo de operações de teste previstos na justificativa. As soluções consistem em um **Suporte com dois graus de liberdade** para o pequeno satélite, um **Suporte para a lâmpada** do simulador solar e um **Sistema de alimentação** de Nitrogênio (N_2) para a placa térmica, responsável pelo resfriamento/aquecimento do sistema.

5.1.1 Arquitetura do Suporte de Dois Graus de Liberdade para o CubeSat e Suporte do Simulador Solar

O suporte deve ser responsável por manter o *Cubesat* girando em torno do próprio eixo, a uma taxa e em momentos pré-determinados pelo operador, para que todas as faces do satélite sejam expostas à radiação luminosa, dessa forma, permitindo a avaliação da temperatura e da exposição luminosa em todas as faces. Inicialmente, foi proposto que o suporte possibilitasse apenas o giro em torno de seu próprio eixo, porém foi identificado que dessa forma apenas cinco das seis faces do *Cubesat* estariam sempre expostas à luz. O modelo com apenas o giro em torno do próprio eixo pode ser visto na figura 5.

Assim, foi proposto que o sistema também fizesse um giro de 180° em um eixo perpendicular ao eixo que ocorre o giro completo, possibilitando assim que todas as seis faces pudessem ser igualmente exposta à radiação durante o teste de ciclagem térmica.

Essa estrutura será encaixada na placa térmica projetada no TCC feito em parceria com esse trabalho. As dimensões da placa térmica podem ser conferidas no Anexo A, assim como conferir as dimensões do trilho acoplado junto a ela.

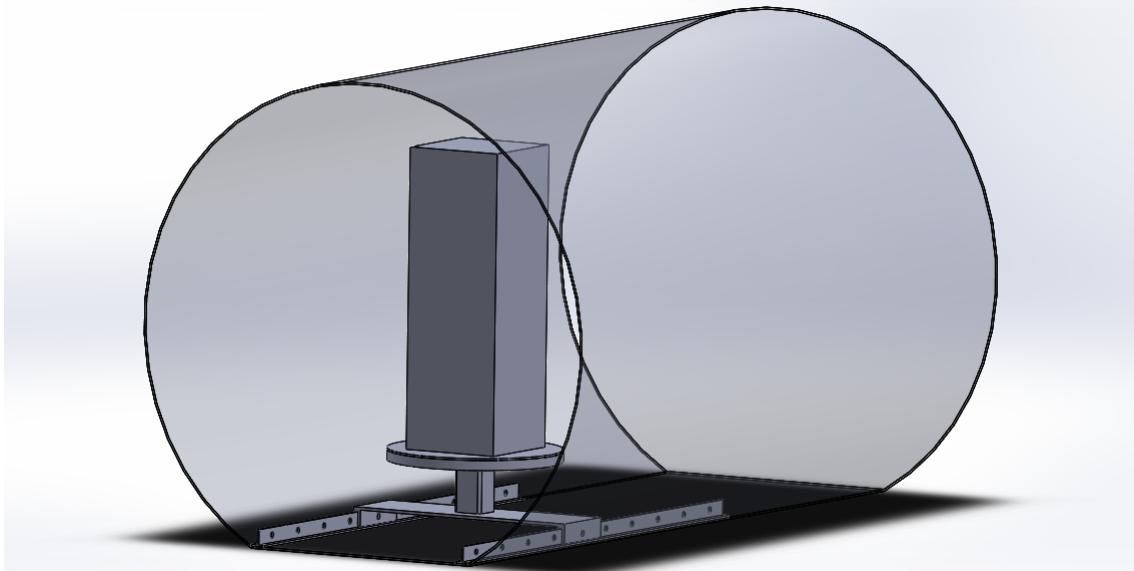


Figura 5 – Vista isométrica da solução com um grau de liberdade.

Para tal, serão necessários três motores, um para o giro em torno do próprio eixo e dois para o giro em 180° . O principal requisito do motor é a capacidade de suportar o torque referente ao peso do sistema, de modo a manter o modelo com rotação constante em relação ao simulador solar. As informações necessárias para o dimensionamento dos motores incluem a carga de torque e o momento de inércia da carga, sabendo que, como o motor não tem a necessidade de acelerar rápido, o impacto da aceleração do torque não será significativo nos cálculos, uma vez que o fator de segurança do projeto já engloba esses elementos. O detalhamento do sistema consta do Apêndice D.

Além do suporte, cinco trilhos de aço 304 e seção T de $15 \times 15 \times 2$ mm, serão alocados no interior da câmara, sendo que dois trilhos de 500 mm de comprimento estarão na base e um de 250 mm no topo. Outros dois trilhos de 250 mm serão fixados na lateral da placa térmica, onde servirão de apoio para os motores. Todos têm furos de 6 mm de diâmetro espaçados em 50 mm, para fixação de equipamentos. O sistema suportará *Cubesat* de no máximo 10x10x30 (3U), tendo isso como requisito, os motores laterais serão fixados com o eixo de rotação coincidindo com o centro de massa da unidade 3U, para garantir que durante a rotação de 180° a estrutura do *Cubesat* não entre em contato com a placa térmica. A câmara descrita no texto acima pode ser verificada na figura 6.

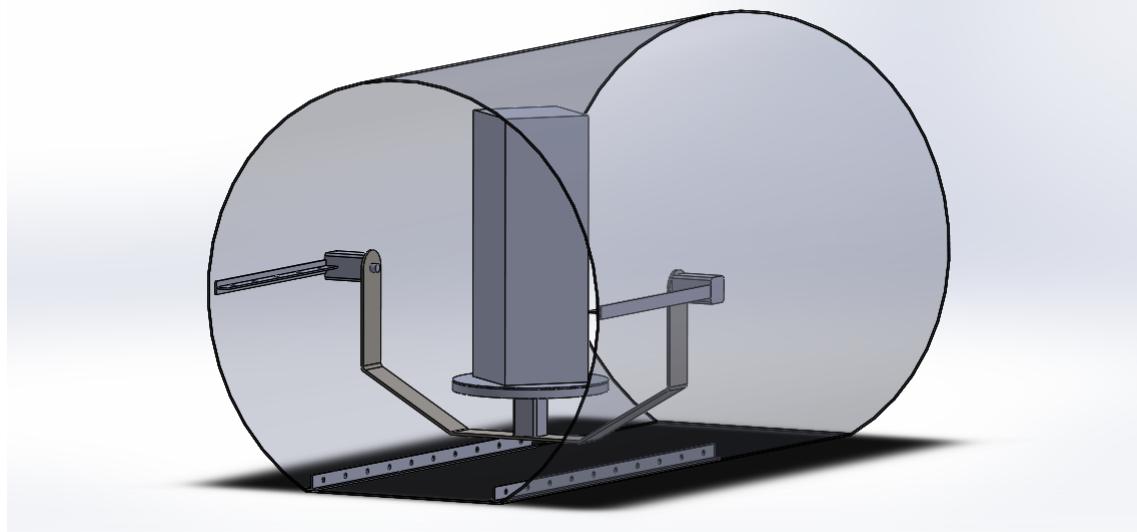


Figura 6 – Vista isométrica da solução com dois graus de liberdade.

Para a configuração do simulador solar, o sistema deve garantir a estabilidade da estrutura durante toda a duração do teste. É provável que esse conjunto seja composto de hastes de alumínio e tenha comprimento suficiente para que a lâmpada seja posicionada adequadamente em relação ao visor da câmara.

5.1.2 Materiais e Componentes

Para o suporte de rotação do *Cubesat*, a princípio o aço inoxidável 304 está sendo considerado. A escolha desse material se justifica com a finalidade de minimizar a emissão de gás e radiação, dessa forma, todas as flanges, conexões e acessórios deverão utilizar aço inoxidável 304.

Pensando em reduzir custos, o aço inoxidável se mostra um aliado para os componentes expostos ao vácuo, além de ser um material escolhido para muitas aplicações. Alumínio, titânio, inconel, monel, fibra de vidro, Teflon® e policarbonato também podem ser usados em outros componentes. Deve-se evitar materiais porosos e sujos. ([KHAN, 2012](#)).

Tabela 12 – Lista de materiais ([MATWEB, 2021](#)), ([PELLEG, 2012](#)).

Material	Vantagens	Desvantagens
Aço Inox	Alta resistência	Elevada massa específica
Alumínio	Menor massa específica e melhor usabilidade	Menor resistência
Teflon	Baixa condutividade térmica	Baixa resistência à tração e à fluência
Titânio	Baixa densidade e alta resistência à tração e à corrosão	Baixa resistência à fadiga com o aumento de temperatura
Inconel	Alta resistência à temperatura e pressão	Custos altos
Monel	Boa soldabilidade e resistência mecânica	Custos altos
Fibra de Vidro	Alta resistência e baixo custo	Baixa rigidez
Policarbonato	Alta estabilidade dimensional	Baixa resistência à baixas temperaturas

Para o estoque de nitrogênio foi pesquisado tanques de uso próprio para o seu armazenamento. Os tanques são feitos em aço inoxidável por dentro e por fora, trata-se de um material que mesmo submetido a baixas temperaturas e alta pressão tenha um desempenho satisfatório e assim seja um ótima opção tanto para o tanque, quanto para as linhas de alimentação do sistema de refrigeração. Um componente industrial de 1000 litros foi escolhido, este foi o de menor tamanho encontrado que se adequava as necessidades do projeto. Alguns orçamentos foram solicitados junto a empresa *Metal Cryo*, mas por conta da pandemia o tempo de resposta é indeterminado.

Já para o Dewar, equipamento que tem isolamento térmico para manter a temperatura do nitrogênio em sua forma liquefeita, foi encontrado o tamanho mais apropriado de 250 litros. O orçamento também foi solicitado junto a empresa *Air Products*, mas assim como o tanque, o tempo de resposta com o orçamento é indeterminado.

Como foi explicado, o projeto exige o uso de válvulas projetadas para um controle extremamente preciso em aplicações de baixo fluxo de gás ou líquidos. As válvulas agulha são usadas em muitas operações industriais com controle do fluxo. São assim denominadas porque possuem uma agulha de metal e, geralmente, são feitas de bronze, aço inoxidável ou outra liga de aço. As válvulas agulha são usadas em procedimentos que possuem a necessidade de estancamento, com praticidade e segurança no processo, e efetuam as vedações de forma eficiente com o seu encaixe em formato de agulha.

Outras válvulas como as válvulas portão, válvulas esfera e válvulas borboletas e diafragma foram consideradas. A Tabela 13 mostra algumas vantagens e desvantagens dessas válvulas. Analisando a Tabela 13 e a Tabela 8, pode-se concluir que a válvula mais adequada é a válvula agulha.

Tabela 13 – Comparação entre os tipos de válvula (TISSERAND, 2014), (PETER; ZAPPE, 2004), (ASHLIN, 2020)

Válvulas	Vantagens	Desvantagens
Borboleta	1/4 de volta para abertura completa	Difícil de limpar
	Design compacto e leve	Controle de vazão limitado
	Disponível em vários tamanhos	Potencial cavitação
	Baixa queda de pressão	
	Alto coeficiente de vazão	
Esfera	Fácil operação	Pobre controle de vazão
	Robusto	Difícil de limpar
	Baixo custo de compra e manutenção	
	Fácil manutenção sem remover da linha	
	Não requer lubrificação	
Diafragma	Extremamente limpa	Apenas em temperaturas moderadas (222 a 505 K)
	Alta selagem	Apenas em pressões moderadas (até 20,7 bar)
	Fecha bem sem vazamentos	Não pode dar várias voltas
	Fácil manutenção	O corpo precisa ser resistente a corrosão
	Reparos podem ser feitos sem desconectar da linha	Não há padrão industrial
Portão	Disponível em vários tamanhos	Límite de pressão baixo
	Bom em condições de aberto/fechado	Tempo de abertura e fechamento lento
	Fácil manutenção	Não indicado para controle de vazão
	Baixo custo	Difícil de consertar em caso de danos
Agulha	Alta acurácia de controle de vazão	Alta queda de pressão
	Design compacto e leve	Apenas em baixas vazões mássicas
	Baixa manutenção requerida	
	Fácil de fechar	

5.1.3 Arquitetura do Sistema de Alimentação

O sistema de alimentação tem o objetivo de suprir o nitrogênio líquido e gasoso à câmara de vácuo para atingir as temperaturas requeridas. O sistema de alimentação deve oferecer uma operação simples, segura e confiável ao usuário. Para isso, válvulas de controle, de retenção e sensores e transdutores serão implementados para controlar e monitorar o sistema.

O sistema vai contar com duas linhas principais, uma com nitrogênio líquido e uma com nitrogênio gasoso, responsáveis pelo processo de resfriamento e aquecimento, respectivamente. O sistema tem inicio em um tanque de armazenamento de nitrogênio gasoso, esse gás é bombeado para as duas linhas de resfriamento/aquecimento, que vão operar em momentos distintos. Esse controle é feito através de válvulas de controle atuadas automaticamente. Na linha de resfriamento o nitrogênio gasoso passa por um condensador, de onde sai na fase líquida e é armazenado em um *Dewar*, que é um dispositivo utilizado para manter o líquido a baixas temperaturas, mantendo o mesmo no estado líquido.

Para o sistema de resfriamento é importante que o nitrogênio esteja no estado líquido, pois quanto maior a densidade do fluido usado no resfriamento, menor a quantidade necessária por hora de operação para conseguir obter o mesmo nível de resfriamento. Na linha de aquecimento, o Nitrogênio gasoso passa através de um aquecedor e vai direto para a placa térmica.

Ambas as linhas contam com válvulas de controle de vazão e medidores de vazão para que se tenha o controle necessário da quantidade de gás e líquido que chegam na placa térmica, para que a transferência de calor seja eficiente no controle de temperatura do ambiente interno da câmara.

Após circular na placa térmica, todo o Nitrogênio deverá ser retirado do sistema. Nesse caso, existem duas opções: liberar o Nitrogênio utilizado em ambiente externo ou reutiliza-lo. A segunda opção tem por consequência uma maior complexidade no sistema de alimentação, pois é necessário avaliar o estado termodinâmico do Nitrogênio na saída da placa térmica e, se necessário, resfriá-lo ou aquecê-lo para ser utilizado novamente (KIECKHAFER; WALKER, 2011).

A Figura 7 mostra o diagrama hidráulico do sistema de alimentação, representando os equipamentos e as linhas de distribuição do nitrogênio. Na Figura 8 é possível ver em detalhes a disposição dos componentes dentro da câmara de termo-vácuo.

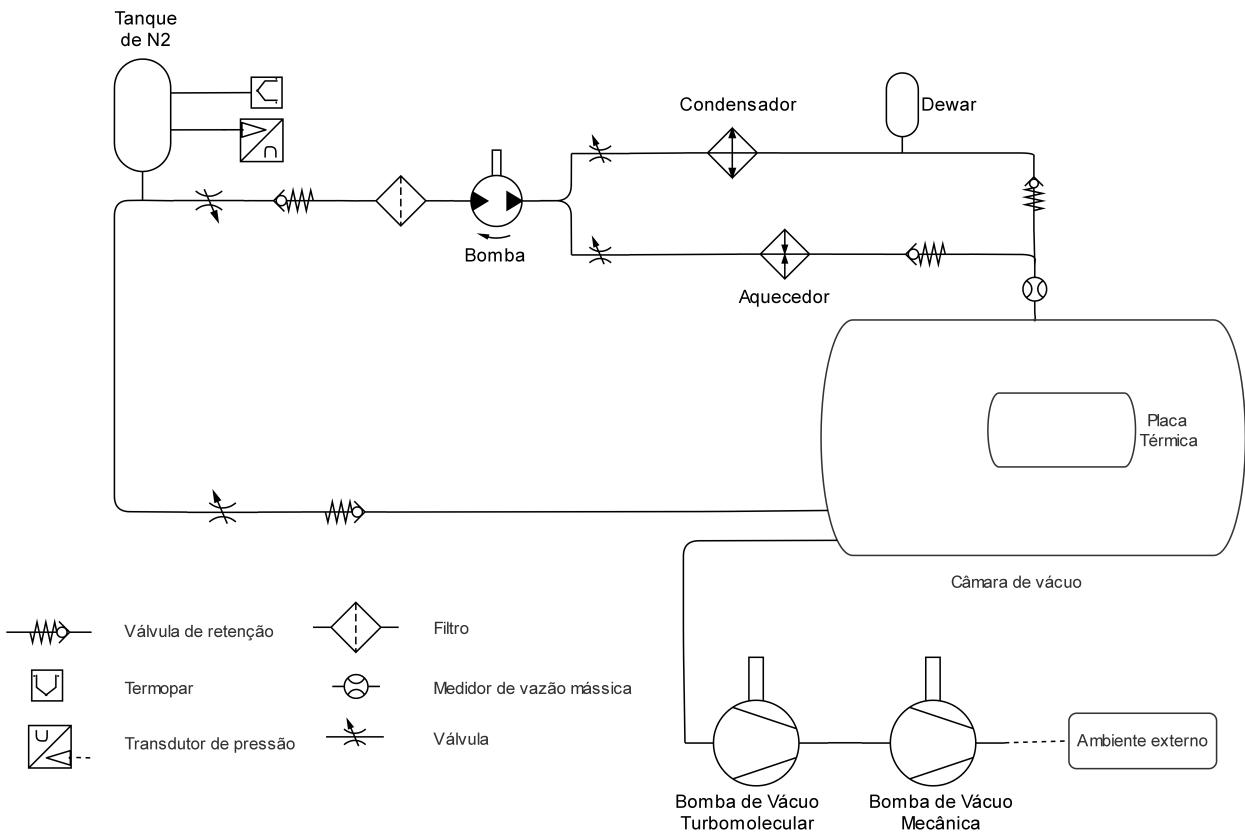


Figura 7 – Diagrama hidráulico

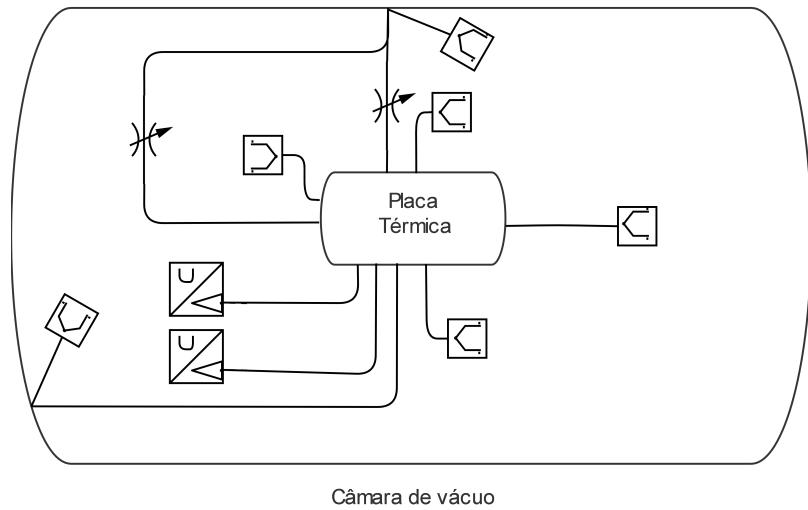


Figura 8 – Diagrama hidráulico dentro da câmara de termo-vácuo

5.1.4 Dinâmica de Operação do Sistema de Alimentação

Para representar como a operação do sistema será feita de forma clara e intuitiva, o fluxograma da Figura 9 foi feito. O sistema foi pensado para que as seja possível operar

as linhas de resfriamento/aquecimento separadamente, de acordo com a necessidade dos testes térmicos. O primeiro procedimento trata-se da geração de vácuo com as bombas. Primeiro a bomba de vácuo mecânica leva a pressão interna à ordem de $10^{-3} mBar$, então a bomba de vácuo turbomolecular é acionada para gerar vácuo até um pressão na ordem de $10^{-6} mBar$. Com o vácuo gerado, define-se então o modo de operação do sistema térmico e tem inicio o teste. (CHISABAS et al., 2017)

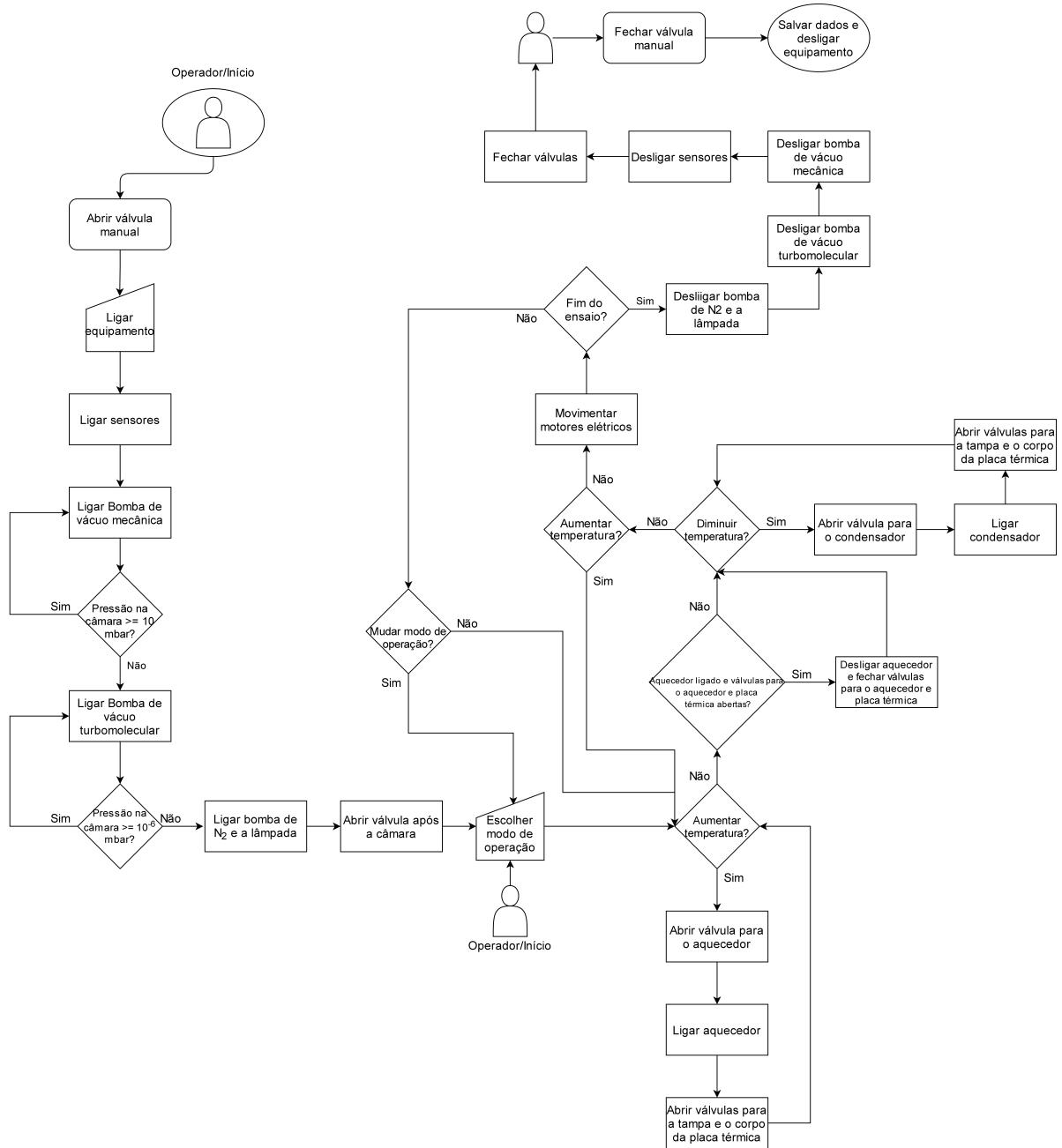


Figura 9 – Fluxograma de operação do Sistema de Alimentação.

5.2 Solução de Eletrônica

A solução proposta para o sistema eletrônico é baseada no desenvolvimento de um grande componente que pode ser dividido em dois: **Central de Controle e Sensoriamento** e **Sistema de Atuadores**.

5.2.1 Central de Controle e Sensoriamento

A Central de Controle engloba os requisitos ELE-13, ELE-15 e ELE-16. Nesse sentido, a Central de Controle é responsável por interpretar dados sensoriais provenientes dos sensores, processar esses dados, comunicar com a API, e controlar o Sistema de Atuadores de forma a fornecer a rotina de funcionamento desejada. Ademais, recebe os comandos de *start* através da interface gráfica utilizada pelo usuário. Por fim, a central controla a temperatura dentro da câmara e monitora a pressão.

A adoção de um sistema microprocessado, como a Raspberry, com suporte para um sistema operacional e entradas e saídas de propósito geral, protocolos de comunicação como *UART* (do inglês: Universal Asynchronous Receiver/Transmitter), *SPI* (do inglês: Serial Peripheral Interface), *I²C* (do inglês: Inter-Integrated Circuit) e afins, acesso à internet e conexão Bluetooth, além da grande versatilidade e facilidade de conduzir a abertura de processos e *threads* para otimização das tarefas, acaba sendo preferível para a realização da filtragem de uma grande quantidade de dados e controle na Central. Destaca-se também a viabilidade do uso de um sistema de comunicação em *SPI*, que cobre mais taxas de transmissão, e também considerando que os medidores são posicionados a uma distância próxima.

O Módulo de Sensoriamento encontra-se integrado a Central de Controle. Este realiza a coleta dos dados de interesse. Trata-se de um conjunto de componentes condicionadores de sinais, que comunica-se unicamente com a Central de Controle para transmissão dos dados coletados via *SPI*. A Raspberry conta somente com dois pinos que exercem a função de *chip select* nativos, os quais são responsáveis por selecionar o módulo a ser lido pelo barramento *SPI* naquele instante.

Entretanto, como há uma grande quantidade de sensores, propõe-se o uso de um demultiplexador, que é um circuito lógico que comuta dados digitais de uma linha de entrada para diversas linhas de saída numa sequência temporal específica (FLOYD, 2007). Por meio deste demultiplexador pode-se implementar uma quantidade maior de pinos *chip select*, permitindo a conexão de um número maior de dispositivos ao barramento *SPI*.

As funcionalidades de maior valor visual referentes ao resultado do processo, serão parte constituinte da solução de *software*.

- Sensor de temperatura

No projeto se faz necessário o uso de sensores de temperaturas para monitorar e controlar a variação de temperatura na linha de fluxo de gases e líquidos, na placa térmica e nas faces do Cubesat, totalizando 13 sensores. Visto o requisito ELE-01, ELE-02 e ELE-03, é necessário um sensor com a temperatura de operação com range mínimo de -20 °C a 60 °C. Além disso, é necessário que o sensor suporte alto vácuo.

O termopar é um sensor de temperatura que tem o princípio de funcionamento baseado na junção de dois metais distintos, a junção desses materiais cria uma tensão formando o fenômeno *Seebeck* ([HOLMAN, 2012](#)). Esse tipo de sensor é um dos mais utilizados para esse tipo de aplicação e fornece medições em uma ampla faixa de temperatura ([HOLMAN, 2012; CARVALHAIS, 2019](#)).

O range de temperatura depende dos metais que o compõe. O termopar tipo T (cobre e contantán) realiza medições entre -250 °C e 350 °C com um limite padrão de erro superior a 1 °C ou 0,75 %, satisfazendo o range necessário para o projeto. Outros tipos de termopar, também, suprem as necessidades do projeto, no entanto, o limite superior é muito alto, não tendo essa necessidade, outro sim, quanto maior o range maior o erro.

O processo de aquisição das temperaturas por meio de termopar, faz necessário a utilização de um amplificador operacional, com o objetivo de amplificar o sinal elétrico gerado pelo termopar já que este apresenta baixas amplitudes, após o estágio de amplificação, será necessário um processo de filtragem para reduzir os ruídos apresentados, além de ser necessário um conversor analógico digital (A/D) devido ao sinal ser analógico, isso demandará uma quantidade elevada de processamento por conta da elevada quantidade de sensores.

Por fim o dado de interesse é a temperatura, sendo necessário cálculos para converter os valores de tensão em graus Celsius. Diante da quantidade de processos necessários para se obter a temperatura e ainda o número de sensores, propõe-se o uso de um módulo condicionador de sinal baseado no CI MAX31856, que deve ser utilizado individualmente conectado ao termopar. Este realiza a amplificação do sinal, conta com um filtro interno para rejeição de ruído, com conversor A/D e já realiza a conversão do sinal de tensão para valores de temperatura em graus Celsius, pouparindo dessa forma uma alta quantidade de processamento da Raspberry, a temperatura pode ser obtida por meio da leitura de cada módulo no barramento *SPI*, o protocolo de comunicação utilizado pelo módulo condicionador de sinal.

- **Sensor de pressão**

O sensor de pressão é necessário no projeto para monitorar a pressão dentro da câmara de vácuo e no tanque de LN2. O monitoramento da pressão da câmara de vácuo será feito com dois sensores, um de baixo vácuo e outro de alto vácuo. O sensor de baixo

vácuo é um medidor de pressão de condutividade térmica, com a faixa de medição entre a pressão atmosférica e 10^{-3} mbar. O sensor de alto vácuo é um sensor de ionização elétrica, o qual mede pressões entre 10^{-9} mbar e 10^{-2} mbar. Para realizar o monitoramento da pressão do tanque de LN₂ pode ser utilizado o medidor de pressão de condutividade térmica. A escolha desses sensores foi baseada nos requisitos ELE-04, ELE-05 ELE-12.

5.2.2 Sistema de Atuadores

O Sistema de Atuadores é o componente de estrutura contendo todo o sistema de bombeamento e controle de radiação ou válvulas. Do ponto de vista da eletrônica, destacam-se as responsabilidades em receber comandos da Central de Controle para ativação do aquecimento ou resfriamento da câmara, de acordo com os dados captados pelo sensoriamento, e ativação da iluminação e dos motores, de acordo com o ponto em que o processo se encontra, previsto no requisito ELE-14.

Este é microcontrolado por uma ESP32 que possui um poderoso processador, 2 canais DAC de 8 bits, suportam conexões *Bluetooth* e *WiFi* simultaneamente e rodam o sistema de operação em tempo real, *FreeRTOS*. Além de serem energeticamente eficientes e suportarem temperaturas entre -40°C e 125°C. A ESP32 é utilizada como microcontrolador, apesar de ter poder o suficiente para trabalhar com o sistema independentemente da Raspberry, essa forma de uso reduz as despesas sobre a pilha de comunicação no processador da aplicação principal, tornando o sistema mais modular.

A forma de implementação do controle para o sistema de iluminação é apenas um controle ON/OFF, onde em determinadas situações, dependendo da iteração em que o procedimento estiver, a lâmpada será ligada ou se manterá desligada, como previsto no requisito ELE-07. O controle dos motores é um controle de velocidade do giro dos motores, como demandado pelo requisito ELE-06, no qual o motor responsável pelo giro no próprio eixo funcionará independente dos outros dois motores responsável pelo giro de 180°. Os motores responsável pelo giro de 180° precisam funcionar em conjunto, ou seja, eles precisam ligar simultaneamente, girar com velocidades idênticas e desligar sincronicamente.

O funcionamento do controle proporcional integral derivativo (PID) é mais complexo, se tratando da soma das respostas de controle proporcional, derivativo e integrativo de forma simultânea, como pode ser visto na figura 10. Uma forma de controle necessária quando se deseja obter resultados precisos em processos que são auto reguladores ([OELSCHLEGEL; RAFIC, 2003](#)).

A porção integrativa integra o erro do sinal em relação ao tempo, esse resultado é, então, somado ao sinal para deslocar a banda proporcional. A saída é aumentada ou diminuída para deslocar a banda proporcional e trazer a temperatura de volta ao ponto de ajuste, que é o valor desejado para que a temperatura alcance. Enquanto isso, a parte

derivativa da função é responsável por compensar a banda proporcional, levando em conta um curto tempo de resposta, ou seja, modificações rápidas demais na temperatura. A saída do PID pode ser um controle de relé por ciclo de trabalho.

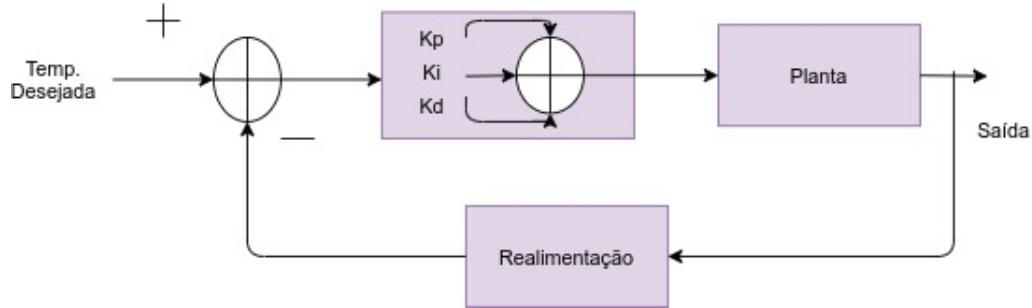


Figura 10 – Figura modelo PID

De forma simplificada e seguindo os requisitos ELE-08, ELE-09, ELE-10 e ELE-11, o controle PID precisa elevar a temperatura até $60^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ e permanecer nessa temperatura por aproximadamente 2 horas. Depois, é necessário abaixar a temperatura até $-20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ em uma velocidade constante de no máximo $5^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$. A temperatura precisa permanecer em $-20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ por aproximadamente 2 horas. Por fim, é preciso voltar a temperatura ambiente, esse último procedimento segue nenhum requisito.

5.2.3 Arquitetura Eletrônica

Nas Figuras 11 e 12 estão apresentadas as conexões iniciais do subsistema eletrônico e as conexões iniciais da eletrônica com os outros subsistemas, respectivamente.

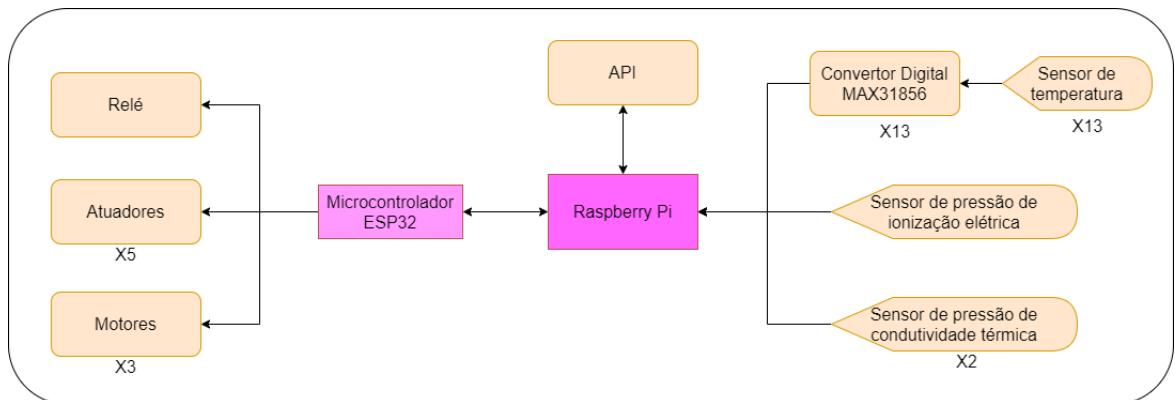


Figura 11 – Arquitetura inicial da eletrônica

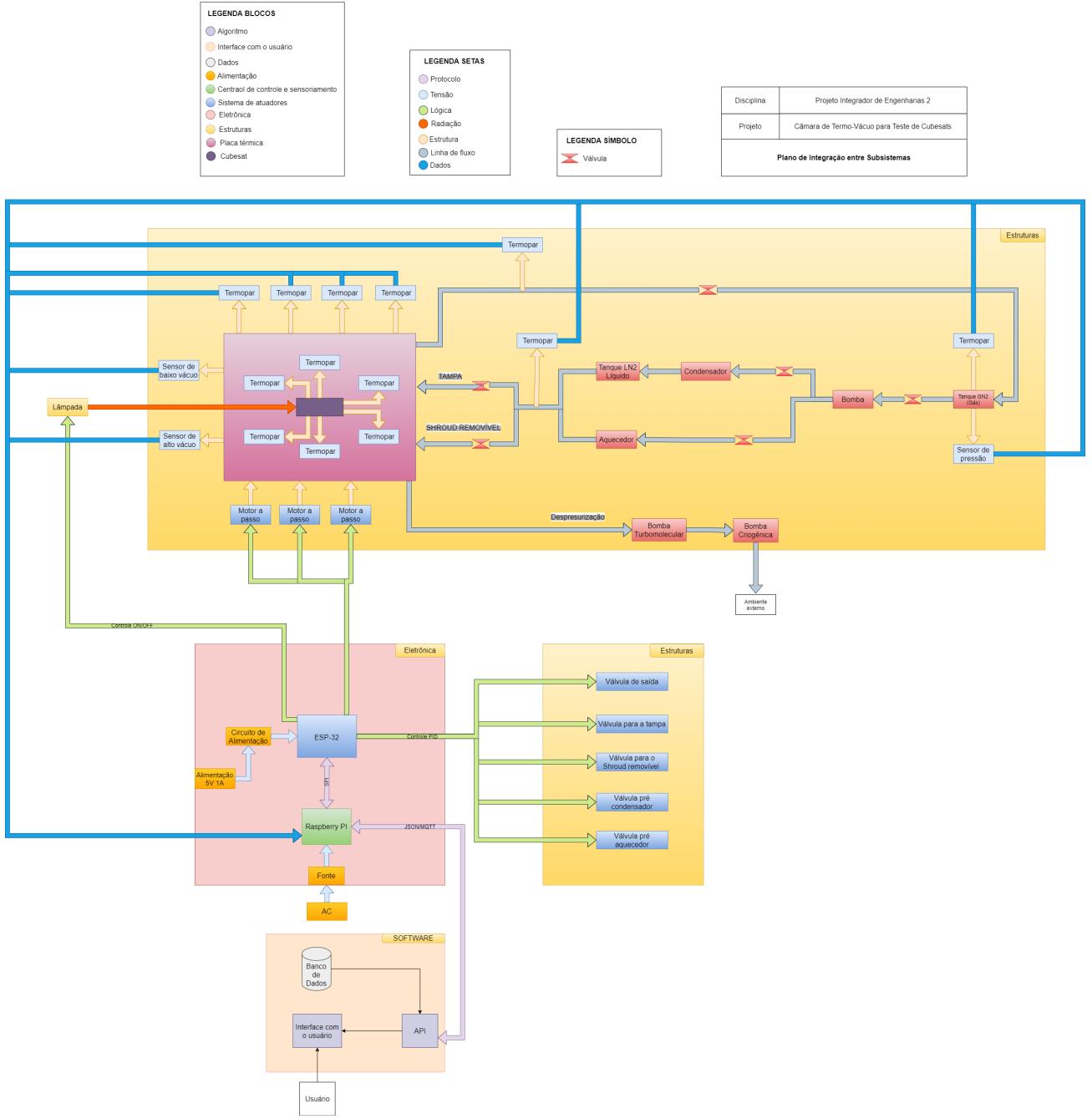


Figura 12 – Plano de integração entre subsistemas

A unidade de *software* da eletrônica é dividida em *software* de controle e *software* de interface, suas funções estão descritas nas Tabelas 14 e 15, respectivamente. A figura 13 mostra a arquitetura de *software* do sistema eletrônico baseados nos IDs das tabelas 14 e 15.

Tabela 14 – Software de Controle

ID	Funções
SC-01	Leitura de sensores de pressão
SC-02	Configuração de comunicação de sistema
SC-03	Controle de pressão
SC-04	Filtro adaptativo na leitura dos sensores
SC-05	Calibração de temperatura
SC-06	Controle de PID
SC-07	Controle de motor
SC-08	Controle dos atuadores
SC-09	Calibração de motor
SC-10	Calibração dos atuadores
SC-11	Serialização de dados
SC-12	Desserialização de dados

Tabela 15 – Software de Interface (API)

ID	Funções
SI-01	Configuração de comunicação de sistema
SI-02	Serialização e desserialização de dados
SI-03	Definição de layout da tela do usuário
SI-04	Definição de layout da tela de configuração
SI-05	Geração e apresentação dos gráficos
SI-06	Sistema de exportação de dados
SI-07	Funções de configurações junto ao sistema operacional

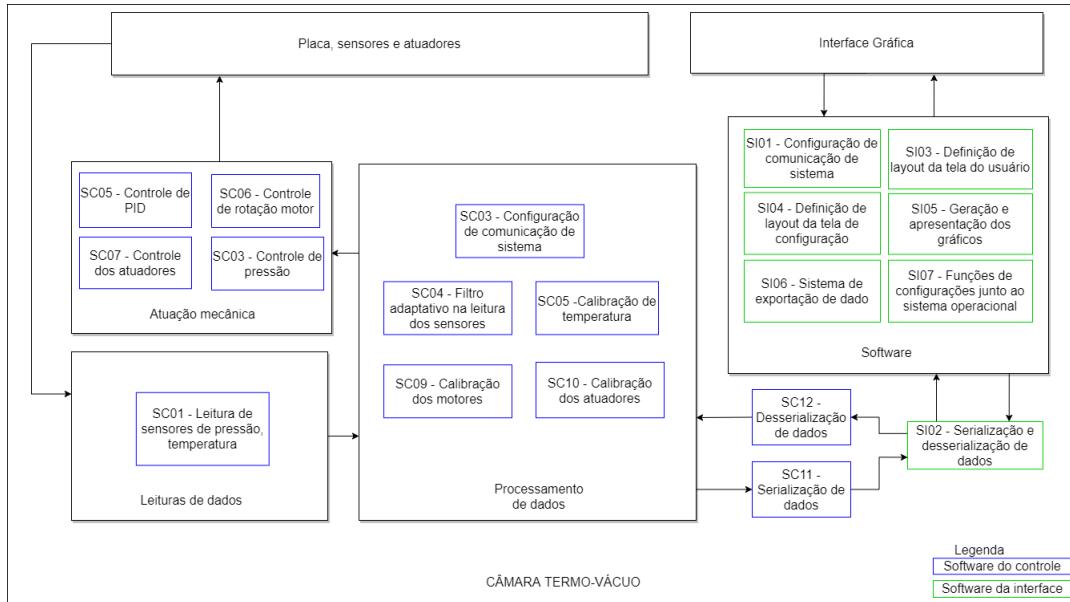


Figura 13 – Arquitetura de software da eletrônica

5.3 Solução de Energia

A solução proposta para o sistema de energia consiste na implementação de um simulador solar, uma fonte de alimentação principal, uma fonte de alimentação emergencial, um aquecedor e um condensador. A finalidade dessas soluções é para viabilizar os testes a serem realizados na câmara de termovácuo.

Desta maneira, é colocada abaixo a concepção inicial de cada projeto, possuindo seus respectivos diagramas e premissas, para aqueles que possuir.

5.3.1 Simulador Solar

Como mencionado anteriormente, um importante teste a ser realizado na câmara de vácuo é a simulação de radiação solar incidente no CubeSat. Assim, são utilizadas lâmpadas que permitem reproduzir as conjunções da luz solar espacial, sendo que essa solução deve promover qualidade espectral, estabilidade temporal e adequada intensidade de iluminação.

Atualmente, são utilizadas lâmpadas de vapor metálico pelo fato de que essas apresentam baixo custo e eficiência de iluminação, o que configura em uma boa qualidade espectral que pode simular a radiação solar (COSTA; OLIVEIRA; KRENZINGER, 2018).

Além disso, é necessário que para esse simulador solar tenha sensores que permitam a aferição do fluxo de radiação da lâmpada, sendo comumente utilizados radiômetros. Dessa forma, será medido a energia proveniente da lâmpada, a quantidade de energia

que é absorvida e a que é transmitida para a câmara de termovácuo ([JUNIOR; WINCK; KRENZINGER, 2020](#)).

Pelo fato deste projeto estar sendo realizado em conjunto com o TCC já mencionado, foram adotadas as mesmas premissas de projeto. Assim, será utilizada uma fonte pontual de luz, como mostrado na figura [abaixo 14](#), em que é necessário um fluxo de radiação solar de 1400 W/m^2 e potência de 274,89 W. Para isso, é colocada uma espira circular de 14 cm de diâmetro na câmara para que seja permitido a passagem do feixe de luz internamente.

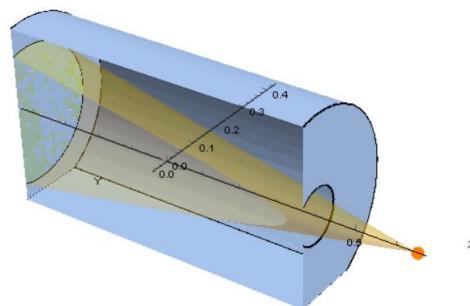


Figura 14 – CAD Simulador Solar. Fonte: ([SILVEIRA, 2021](#))

Portanto, para a concepção do simulador solar foram escolhidas lâmpadas de vapor metálico, a partir das premissas ditadas anteriormente, além disso é necessário que essas lâmpadas estejam associadas a reatores externos AFP de descarga, conforme é estabelecido na norma ABNT NBR ISO 14305/2015. Abaixo é apresentado o diagrama da arquitetura do simulador, figura e a tabela com os componentes necessários.

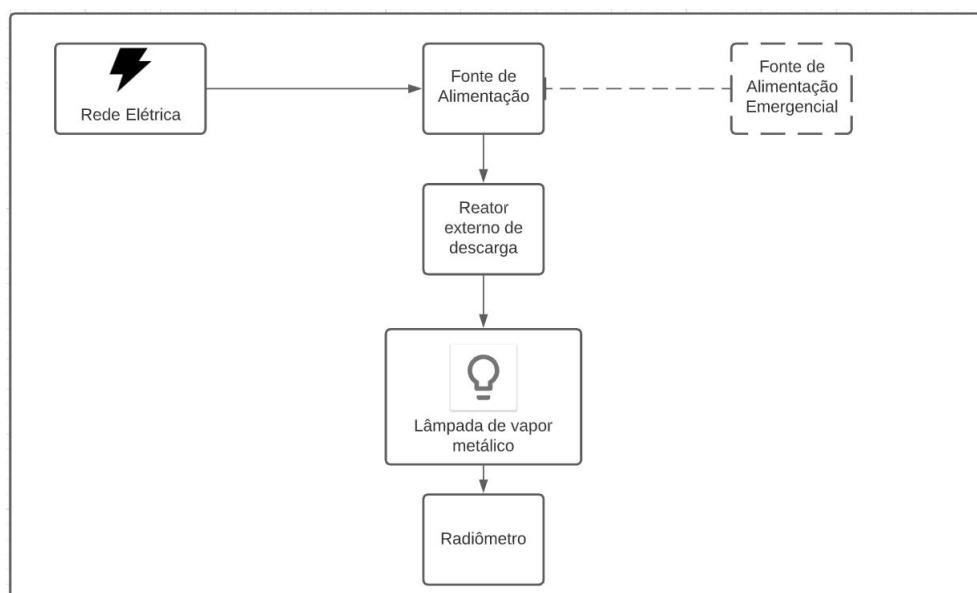


Figura 15 – Diagrama Simulador Solar. Fonte: Autoria própria.

Para os componentes foi considerado um conjunto de lâmpadas de vapor metálico de 70W em série para que chegássemos à potência de 280W. A mesma lógica de cálculo foi utilizada para o dimensionamento dos reatores que serão conectados às lâmpadas. Além disso, para esse sistema foi pensado em uma fonte de alimentação secundária conectada à rede elétrica, uma bateria para alimentação emergencial e um sensor radiômetro para aferição da irradiância da lâmpada.

Tabela 16 – Componentes de energia para o simulador solar

Quantidade (unidade)	Componentes
4	Lâmpada de vapor metálico
4	Reator para lâmpada de vapor metálico
1	Fonte de alimentação principal do sistema do simulador solar
1	Fonte de alimentação emergencial do circuito (bateria)
1	Radiômetro

5.3.2 Parte Elétrica

Para dimensionar a fonte de alimentação necessária para abastecer a parte elétrica do projeto, será dividido em 2 seções: principal e secundária, a primeira abastecerá os sensores, motores utilizados na câmara, microcontroladores, válvulas e bombas. A segunda seção abastecerá o simulador e o radiômetro, assim como mostrado no esquemático abaixo:

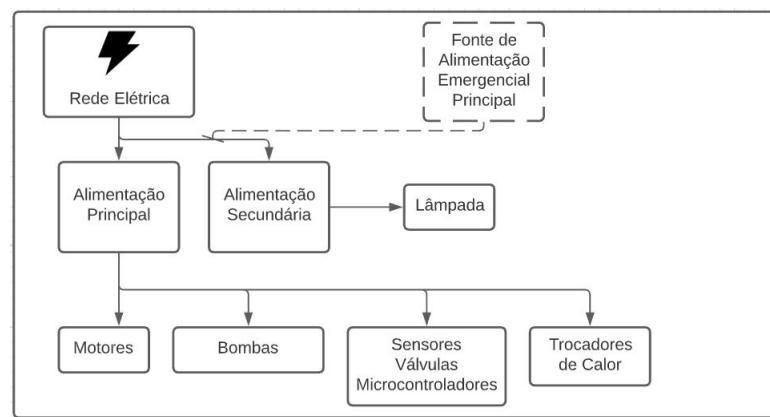


Figura 16 – Diagrama Parte Elétrica. Fonte: Autoria própria.

Para a primeira seção até o momento foram mapeados a utilização de sensores termopar, motores a passo, válvulas, bombas e trocadores de calor, sendo nessa parte a inserção da fonte de alimentação principal, bem como a principal emergencial que abaste-

cerá o sistema em caso de alguma falha na rede elétrica. Já para a alimentação secundária, essa já tratada em seção anterior, será exclusivamente para a simulação solar.

Alguns componentes podem precisar de corrente contínua e não alternada como viria da rede elétrica, dessa forma seria necessário um conversor de corrente AC/DC. Da mesma forma, outros componentes podem necessitar de uma corrente contínua variável para seu funcionamento, e assim precisaremos de um retificador de tensão. Esse material também pode contribuir para uma melhora na economia de energia do sistema e maior precisão de resultado quando tratado de processos industriais, além de evitar panes em equipamentos descritos na tabela 17.

Tabela 17 – Componentes para o simulador solar.

Componentes	Quantidade
Fonte de alimentação principal	1
Fonte de alimentação secundária	1
Fonte de alimentação emergencial	2
Conversor de Corrente	1
Retificador de Tensão	1

5.3.3 Trocadores de Calor

No sistema de alimentação, deverá ter equipamentos para esquentar e resfriar o nitrogênio até a temperatura ideal. Para isso, serão utilizados trocadores de calor para que seja permitida uma variação de temperatura na face do microssatélite entre -20°C e 60°C, além disso, esses deverão operar no mínimo 2 horas até no máximo 10 horas, a depender do tempo da experimentação, conforme o requisito ENE-04.

Com o intuito de atender essas premissas, o sistema contará com duas linhas principais, sendo uma para resfriamento e outra para aquecimento. Na primeira será utilizado nitrogênio gasoso e esse será liquefeito através de um condensador, necessitando de seu armazenamento em um dispositivo Dewar, que tem por finalidade isolar termicamente esse fluido e, assim, permitir que o líquido chegue aos níveis necessários de resfriamento.

Em paralelo, existe a linha de aquecimento que também utiliza nitrogênio gasoso, porém para alcançar temperaturas maiores é utilizado um aquecedor e este tem conexão direta com a câmara de vácuo, diferentemente da primeira linha que deve armazenar o fluido em um outro equipamento.

Para o dimensionamento de ambos os trocadores de calor, deve-se considerar que a temperatura que o nitrogênio deve aquecer/resfriar a câmara de termovácuo é diferente daquela que chega à superfície do CubeSat, a qual é objeto desse projeto (-20°C a 60°C). Também é necessário que a escolha dos trocadores de calor leve em consideração o menor custo, eficiência da operação e economia de energia, visto que estes testes tendem a durar

muitas horas e ocorrem em momentos distintos. Por exemplo, em um determinado tempo X é feito o resfriamento da câmara e só depois é feito o aquecimento para teste térmico do CubeSat.

Assim, é apresentado abaixo o diagrama de blocos para a arquitetura de solução inicial desta etapa:

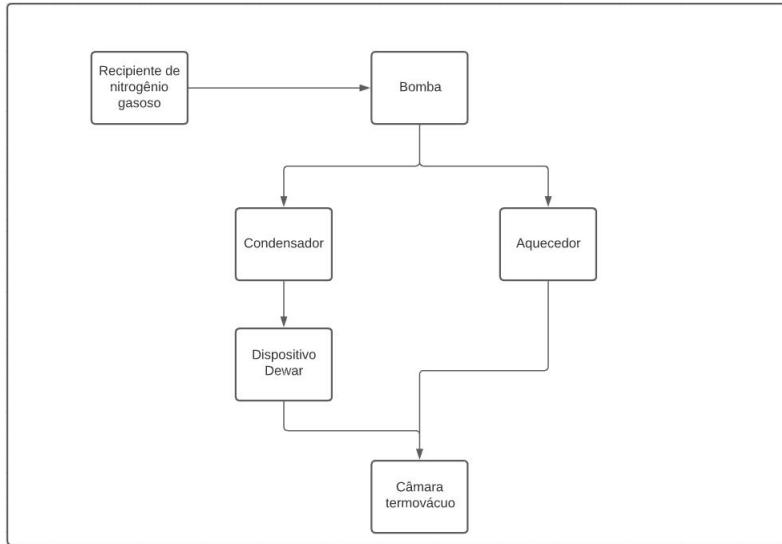


Figura 17 – Diagrama Trocadores de Calor. Fonte: Autoria própria.

5.4 Solução de Software

Será desenvolvida uma aplicação *web* que facilite a execução e o monitoramento dos testes aplicados ao CubeSat, contido em uma câmara termo-vácuo. A aplicação tem como principais objetivos:

- Preparar a câmara para o início dos testes;
- Apresentar ao usuário os indicadores da câmara termo-vácuo, dentre eles a temperatura, pressão e nível dos tanques de gás;
- Informar saúde e aspectos de cada sensor contido na câmara;
- Gerar histórico e relatórios de testes.

Tanto para a coleta dos dados, quanto para a automatização de algumas tarefas da câmara termo-vácuo, a aplicação se comunicará com o sistema eletrônico integrado, possibilitando a visualização dos indicadores em tempo real e o armazenamento dos dados para análises futuras.

A aplicação também tem como opção executar algumas ações que interferem na missão, como rotacionar o CubeSat e controlar a ativação da lâmpada solar.

5.4.1 Proposta de inovação

Além da própria proposta do projeto geral, e da automatização de várias etapas por parte da aplicação, é necessário pensar cuidadosamente sobre cada etapa dos testes, a fim de facilitar ao máximo o trabalho do usuário.

As informações estão dispostas de forma a não poluir a tela e mostrar apenas os itens indispensáveis durante cada fase. Assim, na tela principal são dispostas apenas as médias das temperaturas e o status do andamento de cada fase dos testes, e em demais telas são dispostos os dados individuais de cada sensor e gráficos gerados em cada experimento. Dessa forma, o sistema se torna mais intuitivo e consequentemente, há uma melhoria na experiência do usuário.

5.4.2 Prototipagem da aplicação

Para validar as funcionalidades da aplicação, foi desenvolvido um protótipo de baixa fidelidade utilizando o Draw¹, e posteriormente o Paint, para validar um *design* inicial e as principais funcionalidades, além de auxiliar no entendimento da visão do produto. Em seguida, foi desenvolvido um protótipo de alta fidelidade utilizando o *software* Figma², em que foram elaboradas funcionalidades com mais estilização e pensando na experiência do usuário, bem como utilizando também uma paleta de cores, com um *design* baseado em *softwares* similares, como o Open MCT - Open Source Mission Control Software (NASA, 2021).

Algumas telas principais serão apresentadas nesta seção e têm como objetivo ilustrar as principais funcionalidades. Para estilizar o protótipo, é proposta uma paleta de cores, ilustrada na figura 18.



Figura 18 – Paleta de cores para a aplicação. Fonte: ([ADOBE](#), 2021).

A figura 19 ilustra o painel com as opções que o usuário pode realizar, como realizar o teste de ciclagem térmica, visualizar os sensores, o histórico de experimentos, bem como informar ao usuário que a câmara está com pressão ambiente, controlar a rotação, ligar a

¹ [draw.io](#)

² [figma.com](#)

lâmpada solar e visualizar as temperaturas médias da câmara e da linha gás e a pressão média da câmara.

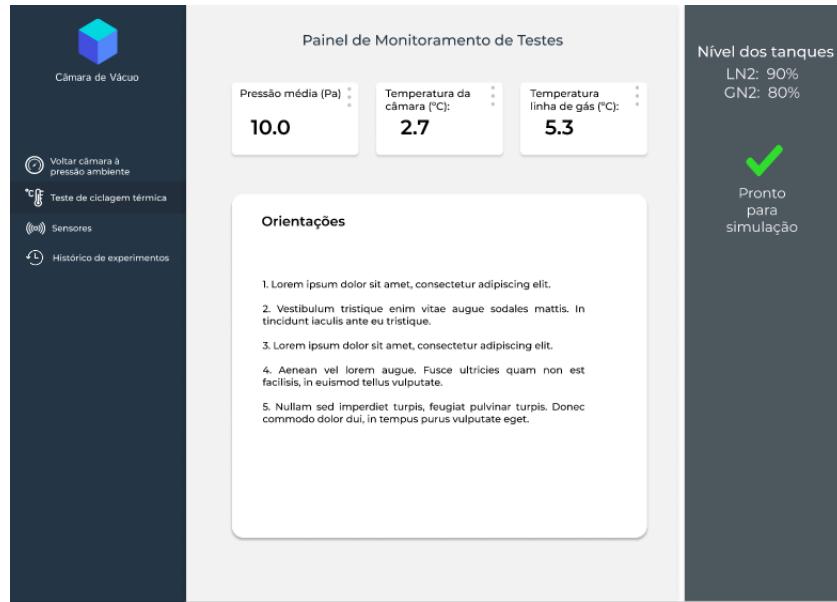


Figura 19 – Tela do Painel inicial. Fonte: Autoria própria.

A figura 20 ilustra a tela em que o usuário define e insere os parâmetros a serem utilizados durante o teste.

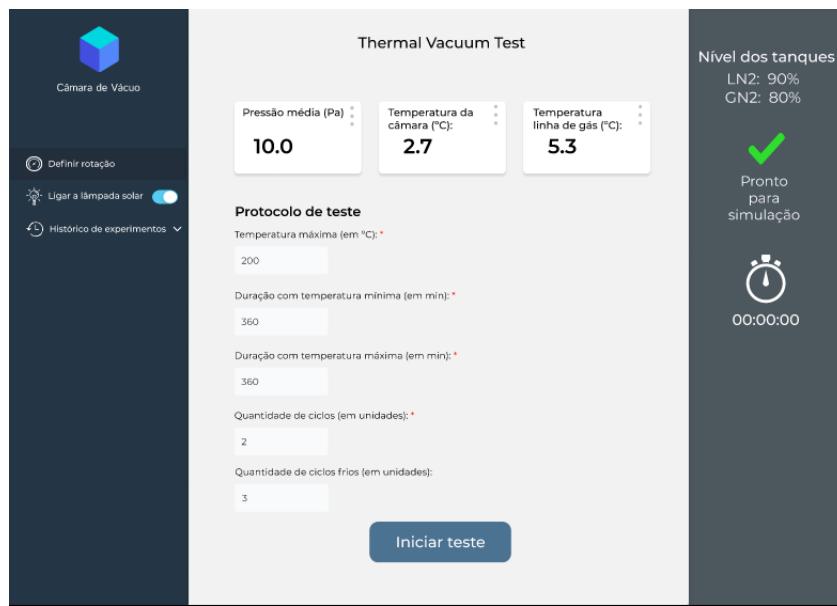


Figura 20 – Tela da definição dos parâmetros a serem realizados no teste. Fonte: Autoria própria.

A figura 21 ilustra a tela em que é possível visualizar os dados e gráficos gerados durante um experimento, armazenando então dados como pressão, temperatura e duração, além de permitir a exportação desses dados para um arquivo externo.

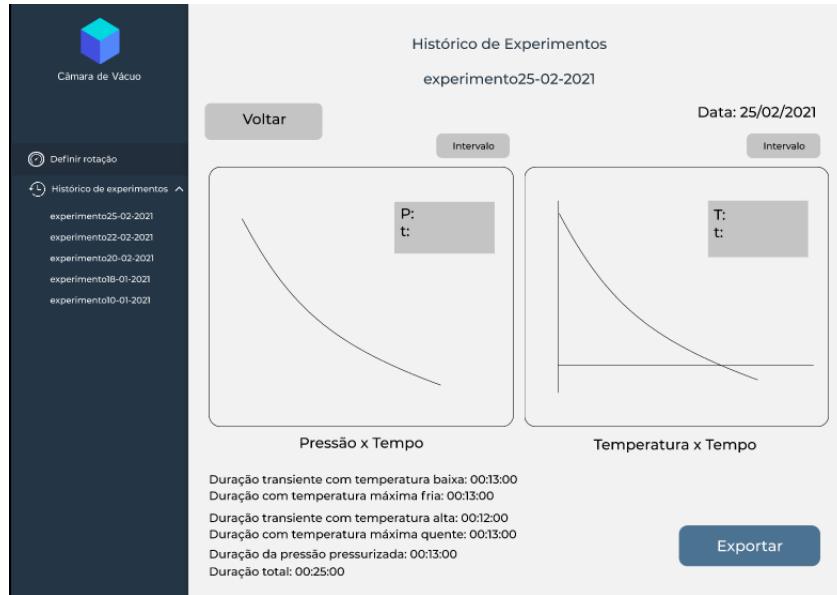


Figura 21 – Tela que disponibiliza o histórico dos experimentos realizados. Fonte: Autoria própria.

A figura 22 permite que o usuário visualize os sensores instalados, bem como conferir sua conexão e dados qualitativos, como pressão, temperatura ou radiação.



Figura 22 – Tela que apresenta os sensores da câmara. Fonte: Autoria própria.

A versão mais atualizada do protótipo de alta fidelidade está disponível [clicando aqui](#).

6 Custos

A tabela 18 apresenta o orçamento dos componentes dimensionados até o PC1. Os demais componentes não contemplados, como trocadores de calor, tanques e bombas para o sistema de alimentação serão orçados no plano de controle 2, pois esses subsistemas só podem ser precificados depois de calculado suas especificações ou estão aguardando a resposta dos fornecedores.

Tabela 18 – Orçamento preliminar

ID	Componente	Modelo	Fornecedor	Quant.	Preço Total
EN1	Conversor de corrente	1800W 40A DC-DC	Ali Express	1	R\$ 106,76
EN2	Retificador de tensão	Ponte Retificadora	Mercado Livre	1	R\$ 33,08
EN3	Lâmpada vapor metálico	Ovóide 70W E27 220V Luz Branco Frio - Empalux	Eletroastro	4	R\$ 154,48
EN4	Reator para lâmpada de vapor metálico	Externo AFP 70W - Serwal	Eletroastro	4	R\$ 221,12
EN5	Sensor radiômetro	SI1146-M01-GMR	Digikey	1	R\$ 22,40
EL1	Leitura de sensores e transmissão	Raspberry Pi 3B+	FelipeFlop	1	R\$ 419,90
EL2	Microcontrolador de atuadores	Esp32	Eletrogate	1	R\$ 79,90
EL3	Sensor de temperatura	Termopar tipo T	*	13	*
EL4	Sensor de pressão	Pirani	Edwards	2	*
EL5	Sensor de pressão	Penning	Edwards	1	*
EL6	Módulo relé 5V	MDLRL5V	Hu Infinito	1	R\$ 19,90
EL7	Amplificador de sinal	MAX31856	Eiectrimaker	13	R\$ 1.263,86
ES1	Motores	Redutor	Mercado livre	3	R\$ 750,00
ES2	Barro de aço Inox Aisi 304	Tarugo	Mercado livre	1	R\$ 40,00
ES3	Flange de conexão	24200001	Agro Bull Peças	1	R\$ 350,00
ES4	Tubos Aço Inox 304	3 metros redondo e polido	Aperam Serviço	1	R\$ 420,00
ES5	Válvulas de agulha	NV-004-HR	Mass Flow	6	R\$ 1.060,00
ES6	Manta de Teflon	Modelo Adesivo	Socd	5	R\$ 300,00
SO1	Custos de rede	Digital Ocean	Digital Ocean	1	R\$ 113,80
MO1	Custos de mão-de-obra	Engenheiros e Full Stack	PI2	15	R\$ 60.000,00
Total					R\$ 65.355,20
Total com margem de segurança de 20%					R\$ 78.466,24

* Aguardando resposta do fornecedor

7 Riscos

7.1 Análise Quantitativa dos Riscos

O gerenciamento de riscos é apresentado no Guia PMBOOK 6^a edição e envolve a identificação dos riscos individuais do projeto, fontes de risco geral do projeto e suas características. Dessa forma, é possível executar ações preventivas e/ou mitigar o impacto da consequência no projeto.

Sabendo da importância de identificação dos riscos, é necessário quantificar qual será o impacto e probabilidade de cada risco ocorrer ao longo do desenvolvimento. A probabilidade de ocorrência de cada risco e o impacto que o mesmo tem é quantificada a partir do intervalo de 1 a 5, representado pela tabela 19.

Tabela 19 – Quantificação dos pesos de impacto e probabilidade.

Peso	Descrição	Valor
1	Muito Baixo	0% - 20%
2	Baixo	21% - 40%
3	Médio	41% - 60%
4	Alto	61% - 80%
5	Muito Alto	81% - 100%

7.2 Tipo dos Riscos

Na tabela 20, está presente todos os riscos que o projeto apresenta dividido por área de solução e com os valores que cada um tem de probabilidade de ocorrer e impacto sobre o projeto.

Tabela 20 – Tipos de riscos por área de solução.

Eletrônica			
ID	Risco	Probabilidade	Impacto
REL-01	Controle térmico exceder a temperatura de 63 °C	1	5
REL-02	Controle térmico aquém da temperatura -23 °C	1	5
REL-03	Mal funcionamento de algum sensor de temperatura durante a realização do teste do Cubesat	2	2

REL-04	Mal funcionamento de algum sensor de pressão	2	4
REL-05	Mal funcionamento na central de controle	2	5
REL-06	Mal funcionamento no controle dos atuadores	2	4
REL-07	Mal funcionamento no controle de dispositivos de suporte e lâmpada	3	2
REL-08	Mal funcionamento no sistema de alimentação dos componentes eletrônicos	2	5
REL-09	Curto circuito	2	5
REL-10	Mal funcionamento na transmissão de dados para a interface com o usuário	1	4

Software

ID	Risco	Probabilidade	Impacto
RSO-01	Limitação técnica dos desenvolvedores sobre as tecnologias	2	3
RSO-02	Dificuldade de integração com componentes eletrônicos	4	4
RSO-03	Baixa produtividade dos integrantes	2	3
RSO-04	Não entendimento da visão do produto	3	4
RSO-05	Membros muito atarefados com tarefas de outras disciplinas	4	3
RSO-06	Não cumprir o escopo planejado	3	4
RSO-07	Comunicação falha entre os membros da equipe	4	4
RSO-08	Trancamento da matéria por membros	3	4

RSO-09	Problemas técnicos nos equipamentos dos membros	3	2
RSO-10	Mudança de escopo	3	4
Energia			
ID	Risco	Probabilidade	Impacto
REN-01	Falha na rede elétrica	2	5
REN-02	Mal funcionamento do radiômetro	2	3
REN-03	Sobrecarga nas fontes de alimentação emergenciais	2	5
REN-04	Mal funcionamento do conversor de corrente	2	4
REN-05	Falha no retificador de tensão	2	4
REN-06	Mal funcionamento das lâmpadas para o simulador solar	3	3
REN-07	Mal funcionamento do aquecedor	3	4
REN-08	Mal funcionamento do condensador	3	4
REN-09	Falha no sistema de abastecimento das fontes emergenciais	3	5
REN-10	Falha no quadro elétrico	2	5
Estrutura			
ID	Risco	Probabilidade	Impacto
RES-01	Vazamento na linha	2	4
RES-02	Estrutura não suportar as cargas estáticas e dinâmicas	1	4
RES-03	Fixação inadequada dos componentes da estrutura	1	4
RES-04	Falha dos motores de movimentação do Cubesat	2	4
RES-05	Falta de manutenção preventiva nos equipamentos	3	3
RES-06	Corrosão nos elementos estruturais e hidráulicos	2	4

RES-07	Congelamento de válvulas	4	4
RES-08	Falta de lubrificação dos elementos rotativos	2	3
RES-09	Falha no medidor de vazão mássica	3	3

7.3 Descrição dos Riscos

Na tabela 21 foi feita a descrição de cada risco apresentado na seção anterior com sua respectiva ação e medida de ação para diminuir o impacto e probabilidade de falhas no projeto.

Tabela 21 – Descrições dos riscos por área de solução.

Eletrônica			
ID	Consequência	Ação	Medida
REL-01	Falha do teste	Prevenir	Abrir a válvula de resfriamento
REL-02	Falha do teste	Prevenir	Abrir a válvula de aquecimento
REL-03	Perda de dados	Prevenir Mitigar	Realizar uma rotina de testes individuais dos sensores e comunicar o usuário sobre qualquer falha
REL-04	Perda de dados	Prevenir Mitigar	Realizar uma rotina de testes individuais dos sensores e ter sensores reservas
REL-05	Perda das principais funcionalidades	Prevenir	Assegurar que todas as ligações, as alimentações e as condições ambientais sejam corretas
REL-06	Falha no controle de temperatura	Prevenir	Ter um sistema que comande os atuadores individualmente
REL-07	Falha na rotação e translação do Cubesat e no aquecimento por radiação	Mitigar	Comunicar o usuário do mal funcionamento e os dados no momento da falha
REL-08	Perda das funcionalidades	Mitigar	Ter uma fonte de alimentação emergencial
REL-09	Falha nas funcionalidades	Prevenir	Realizar manutenção antes dos testes
REL-10	Falha do teste	Mitigar	Armazenar todos os dados na central de controle

Software			
ID	Consequência	Ação	Medida
RSO-01	Atraso no desenvolvimento do produto	Prevenir	Escolher tecnologias que a maioria tem conhecimento. Realizar pareamentos e estudos constantes
RSO-02	Atraso no desenvolvimento do produto	Prevenir	Manter comunicação e estudos iniciais sobre a integração
RSO-03	Atraso no desenvolvimento do produto	Prevenir	Manter comunicação e transparência acerca de dificuldades
RSO-04	Atraso e/ou retrabalho no desenvolvimento do produto	Prevenir	Realizar reuniões gerais com todas as engenharias Gerar documento de visão; Gerar TAP; Seguir modelo de histórias de usuário e descrever critérios de aceitação bem definidos.
RSO-05	Baixa produtividade e atraso no desenvolvimento	Prevenir	Definir pequenas tarefas condizentes com a carga horária do membro e de acordo com a metodologia
RSO-06	Entrega parcial do produto	Prevenir	Melhorar o planejamento das tarefas e comunicar possíveis gargalos com os professores e entre a equipe
RSO-07	Dificuldade no entendimento do projeto e integração; Atraso e retrabalho do desenvolvimento do produto; Conflitos entre membros	Prevenir	Definir canais de comunicação entre a equipe; Documentar as reuniões em forma de ata. Gravar as reuniões
RSO-08	Sobrecarga de tarefas para os membros	Prevenir	Manter comunicação com membros da equipe para estar ciente das expectativas dos membros para com a disciplina.

RSO-09	Atraso no desenvolvimento do produto	Mitigar	Emprestar equipamento para o membro da equipe prejudicado; Realizar pair programming por outros meios
RSO-10	Dificuldade de integração e retrabalho	Mitigar	Comunicar rapidamente à equipe e deixar os professores cientes
Energia			
ID	Consequência	Ação	Medida
REN-01	Impossibilidade de executar os testes	Mitigar	Disposição de fontes de alimentação emergenciais
REN-02	Erro na aferição do fluxo de radiação	Prevenir	Dimensionamento adequado do sensor para que ele suporte o fluxo de radiação a ser recebido
REN-03	Provável circuito elétrico e impossibilidade de executar os testes	Prevenir	Realizar o dimensionamento correto das cargas do sistema
REN-04	Danificar equipamentos	Prevenir	Dimensionamento adequado do conversor, realizar rotina de supervisão para diagnóstico dessas falhas e testes
REN-05	Danificar equipamentos	Prevenir	Dimensionamento adequado do retificador, realizar rotina de supervisão para diagnóstico dessas falhas e testes
REN-06	Impossibilidade de executar o teste de simulação solar corretamente	Prevenir	Dimensionamento adequado das lâmpada, e realizar uma rotina de supervisão e manutenção
REN-07	Temperatura insuficiente e funcionamento incorreto do modelo, o teste será afetado	Prevenir	Dimensionamento adequado do condensador e realizar rotinas de testes
REN-08	Impossibilidade de obter a N2 líquido e operação incorreta do sistema de resfriamento	Prevenir	Dimensionamento adequado do condensador e realizar rotinas de testes
REN-09	Não acionamento dessas fontes	Prevenir	Realizar manutenções recorrentes no equipamento
REN-10	Não acionamento correto dos equipamentos	Prevenir	Dimensionamento adequado do quadro elétrico e realizar supervisão sobre o mesmo

Estrutura			
ID	Consequência	Ação	Medida
RES-01	Não atingir a vazão necessária de N2 para a placa térmica	Prevenir	Utilizar medidor de vazão na linha de alimentação e realizar um controle de válvulas
RES-02	Falha estrutural no suporte e danos no Cubesat	Prevenir	Dedicar tempo para seleção adequada de materiais e fazer simulações de desempenho e dinâmica estrutural
RES-03	Impossibilidade de operar	Prevenir	Atribuir valores adequados de cotagem e tolerâncias além de realizar manutenções preventivas
RES-04	Funcionamento incorreto do modelo, o teste será afetado	Prevenir	Dimensionamento adequado dos motores considerando a máxima carga que deve ser suportada.
RES-05	Operação incorreta	Prevenir	Garantir a periodicidade da realização de manutenção
RES-06	Falha estrutural	Mitigar	Garantir a periodicidade da realização de manutenção
RES-07	Impossibilidade de operar	Mitigar	Seleção de válvulas com materiais que suportem a temperatura de operação do sistema
RES-08	Desgaste prematuro dos componentes	Prevenir	Garantir a periodicidade da realização de manutenção
RES-09	Erro no monitoramento de vazão de N2 e possível falha no teste	Mitigar	Dimensionamento da tubulação para que já seja limitante da vazão.

8 Considerações

O projeto apresentado tem como objetivo solucionar problemas atuais no mercado de testes de Cubesats de até 3U. Sendo este uma concepção da matéria de Projeto Integrador 2 da Faculdade do Gama, Universidade de Brasília.

Assim, para este primeiro ponto de controle foram abordadas possíveis soluções de engenharia para possibilitar a execução de testes de ciclagem térmica, simulação solar e de vácuo simples, frio e quente. Sendo delimitada uma variação de temperatura para teste de - 20°C até 60°C.

Além disso, o documento apresentado visa demonstrar os parâmetros a serem seguidos na concepção final do projeto, bem como prever a execução de etapas de gerenciamento, de dimensionamento das arquiteturas de solução e administrar a integração de todas as engenharias presentes no projeto: aeroespacial, eletrônica, energia, automotiva e software.

Por fim, devido as restrições desse semestre em função da pandemia pelo COVID-19, o trabalho só projetará as estruturas necessárias para realização dos testes de simulação espacial em uma câmara de termovácuo, mas não construirá nenhuma de suas soluções. Portanto, pela elaboração do cronograma, todos os custos de projeto, fabricação, montagem e testes dos subsistemas serão detalhados através de desenhos técnicos e especificações de materiais. A autoavaliação de todos os integrantes do projeto está disponível no Apêndice E.

Referências

- ADOBE. *Adobe Color*. 2021. <<https://color.adobe.com/pt/create/color-wheel>>. Acesso em: 26 fev. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 52.
- ALMEIDA, J.; PANISSI, D.; SANTOS, M. Thermal-vacuum tests of the amazonia-1 satellite tm performed at inpe with success. 67th International Astronautical Congress. Guadalajara, Mexico, 2016. Citado na página 12.
- ASHLIN. *What is a needle valve and what is the purpose of needle valves*. 2020. <<https://automationforum.co/what-is-a-needle-valve-and-what-is-the-purpose-of-needle-valves/>>. Acesso em: 10 mar. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 37.
- CARVALHAIS, D. C. Thermal modelling and experiments for small satellites. Universidade da Beira Interior, 2019. Citado na página 42.
- CHISABAS, R. et al. Development of a thermal-vacuum chamber for testing in small satellites. 47th International Conference on Environmental Systems, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 11, 12 e 40.
- COSTA, E.; OLIVEIRA, F.; KRENZINGER, A. Desenvolvimento de simulador solar para exposição contínua de módulos fotovoltaicos. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar - Gramado, RS, 2018. Citado na página 47.
- DURÃO, O.; SHUCH, N. Nanosatc-br1 e 2. INPE/CRS, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 11.
- FERNANDES, G. et al. Thermal tests for cubesat in brazil: lessons learned and the challenges for the future. 67th International Astronautical Congress(IAC), 2016. Citado na página 13.
- FLOYD, T. L. *Sistemas digitais: fundamentos e aplicações*. [S.l.]: Bookman, 2007. Citado na página 41.
- HOLMAN, J. P. *Experimental Methods for Engineers, Eighth Edition*. [S.l.]: McGraw-Hill, 2012. Citado na página 42.
- JUNIOR, L.; WINCK, A.; KRENZINGER, A. Determinação da variação espectral da irradiação na substituição das lâmpadas de um simulador solar. VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar - Gramado, RS, 2020. Citado na página 48.
- KHAN, M. S. Conceptual design of vacuum chamber for testing of high heat flux components using electron beam as a source. J. Phys.: Conf. Ser. 390 012060, 2012. Citado na página 35.
- KIECKHAFER, A. W.; WALKER, M. L. R. Recirculating liquid nitrogen system for operation of cryogenic pumps. 32nd International Electric Propulsion Conference, 2011. Citado na página 38.
- MATWEB. *MatWeb, Your Source for Materials Information*. 2021. <<http://www.matweb.com>>. Acesso em: 10 mar. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 35.

- NASA. *Systems Engineering Handbook*. [S.l.]: Headquarters Washington, D.C., 2007. Citado na página 11.
- NASA. *Open MCT - Open Source Mission Control Software*. 2021. <<https://nasa.github.io/openmct/>>. Acesso em: 24 fev. 2021. Citado na página 52.
- OELSCHLEGEL, M.; RAFIC, B. A project in pid temperature control and loop tuning. Texas AM University-Corpus Christi, 2003. Citado na página 43.
- PELLEG, J. Mechanical properties of materials. Springer Science Business Media, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 35.
- PETER, S.; ZAPPE, R. W. *Valve Selection Handbook*, 5ed. [S.l.]: Elsevier, 2004. 413 p. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 37.
- SCHWABER, K.; SUTHERLAND, J. *The Scrum Guide*. 2017. <<https://www.scrumguides.org/scrum-guide.html>>. Acesso em: 12 mar. 2021. Citado na página 18.
- SILVA, H.; PERONDI, L. Testes ambientais e verificação de requisitos em projetos da Área espacial. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2011. Citado na página 12.
- SILVEIRA, M. Projeto estrutural de uma câmara de simulação espacial. Monografia - Universidade de Brasília, DF, 2021. Citado 3 vezes nas páginas 3, 24 e 48.
- TISSERAND, O. *How to Select the Right Valve (With Pros Cons)*. 2014. <<https://www.indelac.com/blog/bid/333897/how-to-select-the-right-valve-with-pros-cons>>. Acesso em: 10 mar. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 37.
- TOORIAN, A. Cubesat design specification. ITAR, 2004. Citado na página 10.
- TWIGGS, R. *Small satellite: past, present and future*. [S.l.]: El Segundo, CA: The Aerospace Press, 2008. 151-173 p. Citado na página 10.
- VILELA, T.; BRANDÃO, A.; LEONARDI, R. Cubesats e oportunidades para o setor espacial brasileiro. Contribuições do CGEE ao SNCTI, 2016. Citado na página 10.
- VILELA, T. et al. Towards the thousandth cubesat: A statistical overview. International Journal of Aerospace Engineering, 2019. Citado na página 13.

Apêndices

APÊNDICE A – ESTRUTURA ANALÍTICA DO PROJETO - EAP

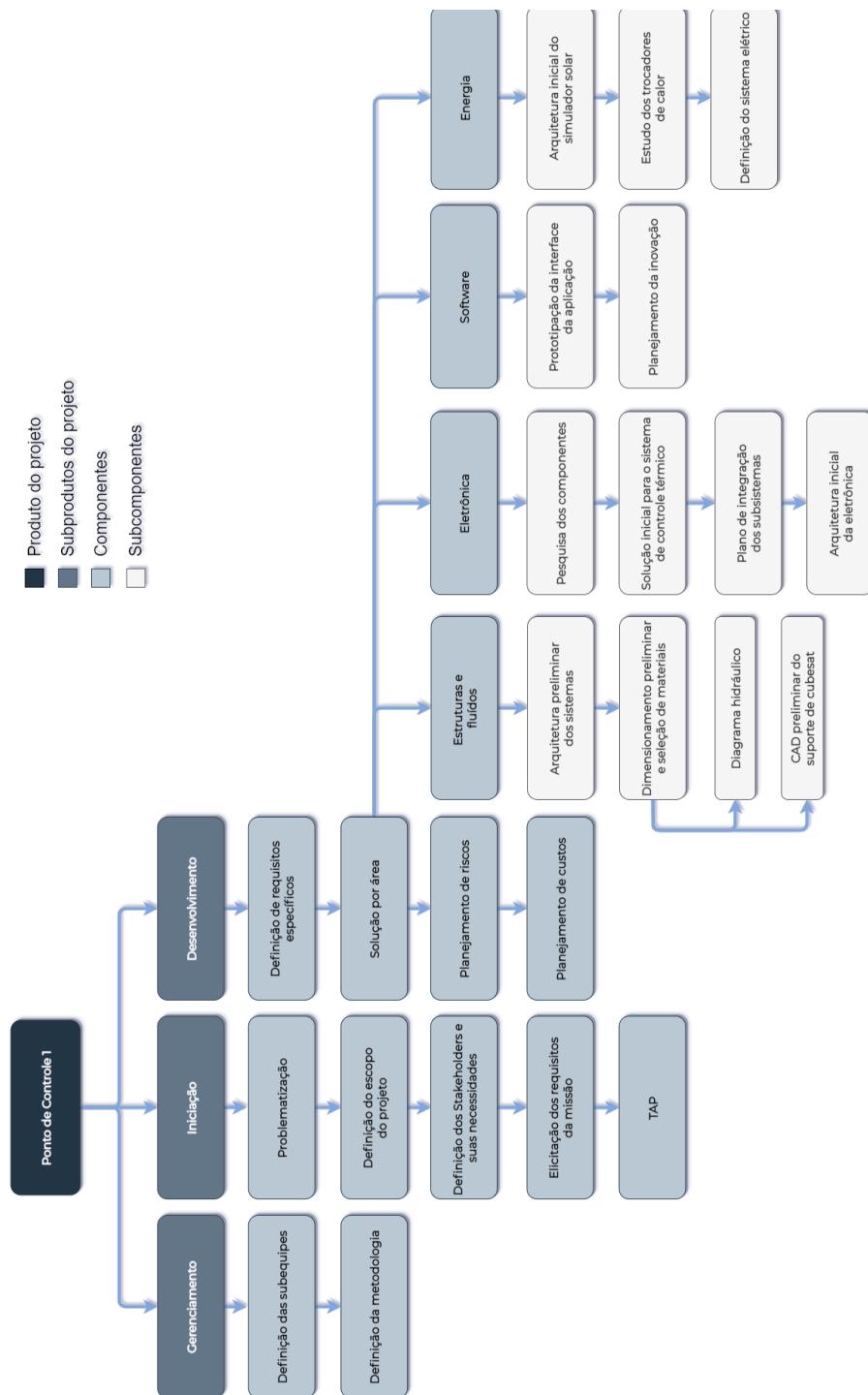


Figura 23 – EAP do Ponto de Controle 1.

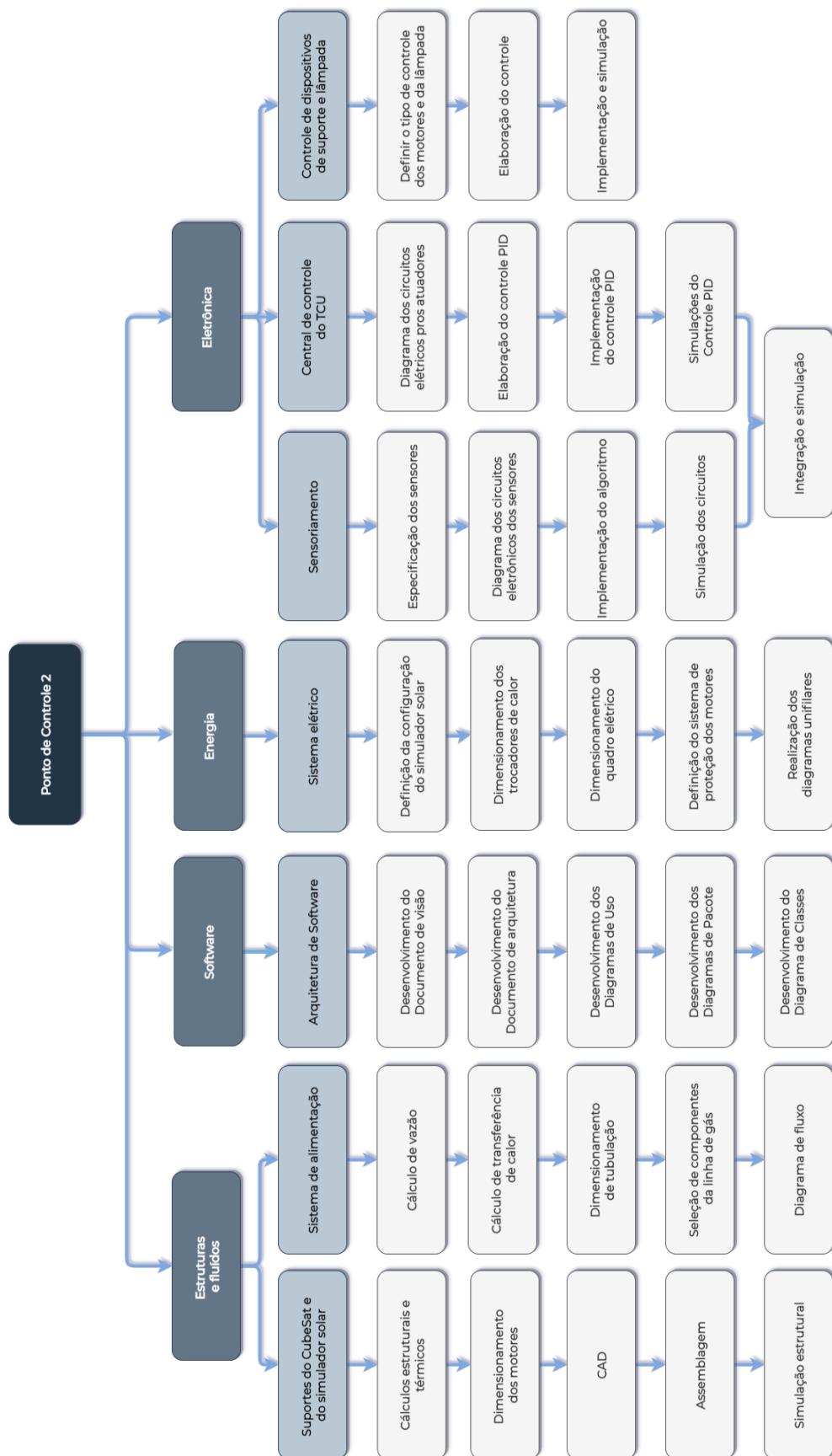


Figura 24 – EAP do Ponto de Controle 2.

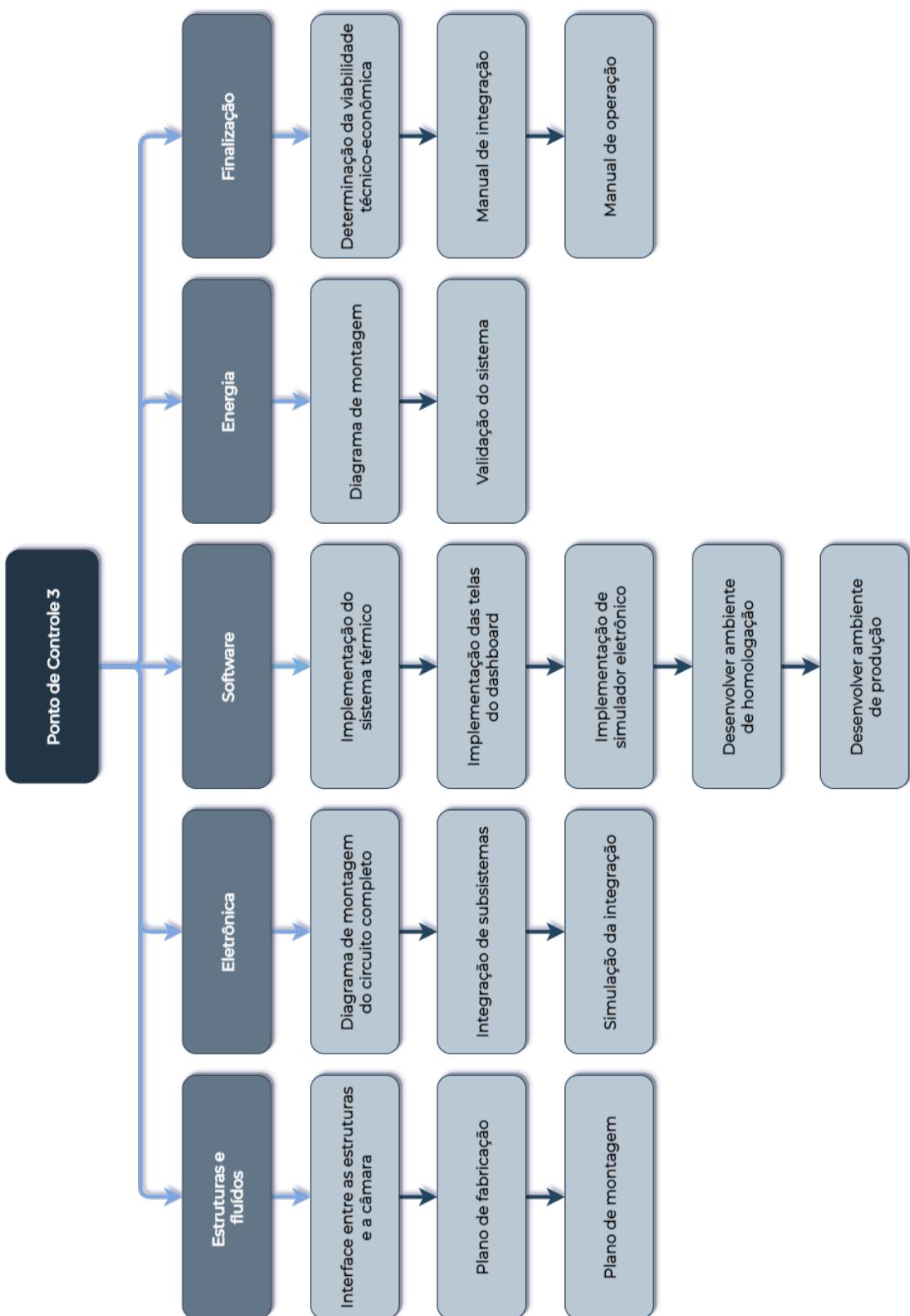


Figura 25 – EAP do Ponto de Controle 3.

APÊNDICE B – PLANO DE GERENCIAMENTO DE COMUNICAÇÃO

B.1 Objetivo

Apresentação dos processos e ferramentas de comunicação utilizados pela equipe durante o desenvolvimento do projeto.

B.2 Ferramentas

Tabela 22 – Ferramentas de comunicação da equipe

Ferramenta	Descrição
WhatsApp	Mensageiro para compartilhamento de informações pequenas e rápidas, discussões menores acerca do projeto e realização dos Dailys
Teams	Plataforma para realização de reuniões online e arquivamento da biblioteca de artigos e livros utilizados no projeto
Trello	Plataforma de organização de atividades em quadros para aplicar a metodologia Kanban
Google Drive	Plataforma para criação de documentos e planilhas compartilháveis por todos os membros da equipe, além de arquivamento de arquivos não-oficiais do projeto.
Overleaf	Editor online de textos em L ^A T _E Xonde será elaborado os Pontos de Controle do projeto.

B.3 Diretrizes e Procedimentos de Comunicação

A equipe e subequipes se comunicarão através da ferramenta WhatsApp, e armazenarão suas informações no Teams (informações oficiais) e no Google Drive (Informações não-oficiais). As reuniões da equipe ocorrerão toda quarta e sexta durante o horário da aula e poderão acontecer reuniões das subequipes no decorrer da semana.

A Planning e Review ocorrem durante a reunião de sexta-feira e as atividades definidas são atualizadas no Trello. As *dailys* ocorrerão de segunda à sexta até as 21 horas.

APÊNDICE C – PLANO DE GERENCIAMENTO DE RECURSOS HUMANOS

C.1 Objetivo

Gerenciamento dos recursos humanos do projeto e detalhamento dos papéis e responsabilidades dos integrantes do projeto.

C.2 Papéis e Responsabilidades

Como determinado pela disciplina, a equipe será organizada de acordo com os seguintes papéis: Coordenador Geral (1), Diretor de Qualidade (1), Direto Técnico (3) Desenvolvedores. A figura 26, apresenta o arranjo da equipe que possui um total de **15 integrantes**.

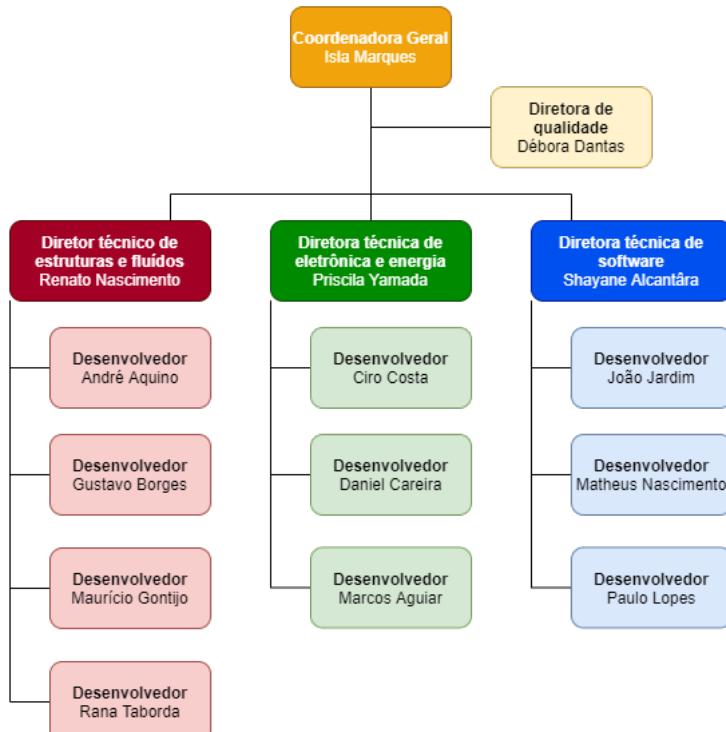


Figura 26 – Organograma da equipe.

APÊNDICE D – CAD's Preliminares

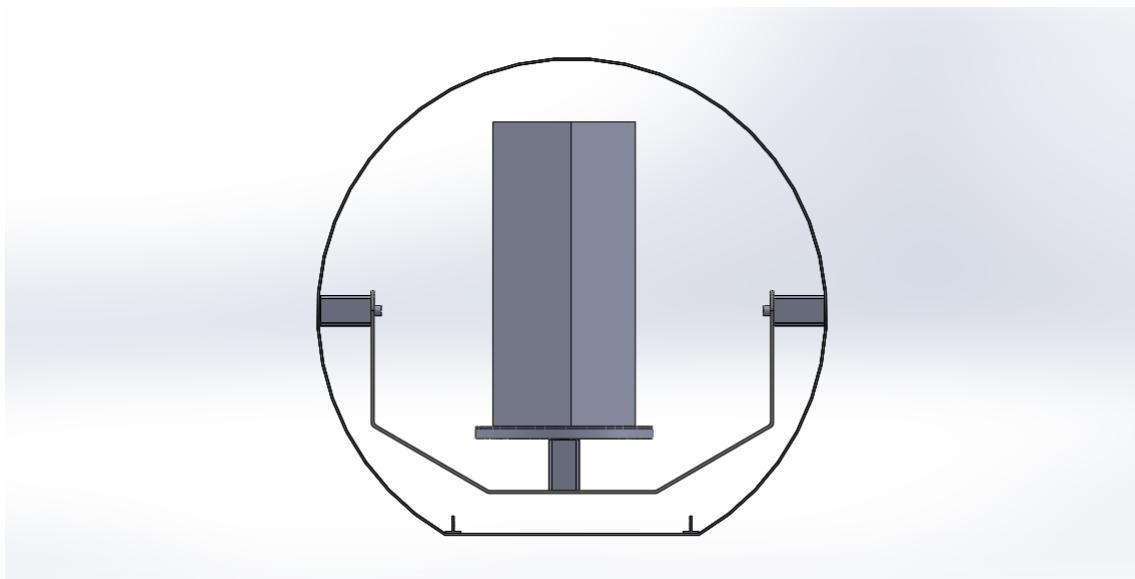


Figura 27 – Vista frontal da solução com dois graus de liberdade.

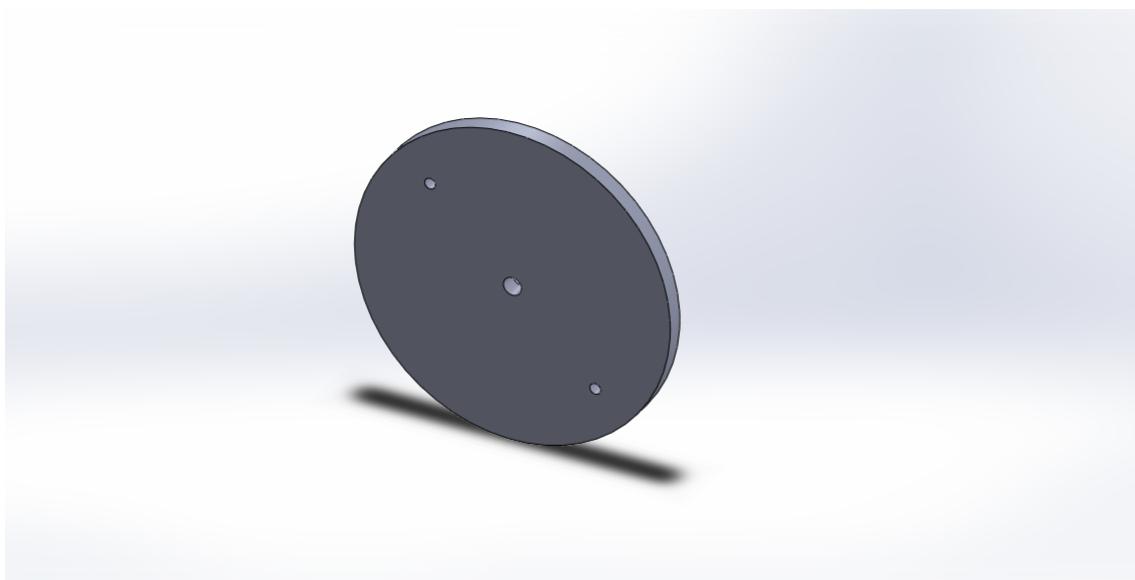


Figura 28 – Interface entre o motor e o *Cubesat*.

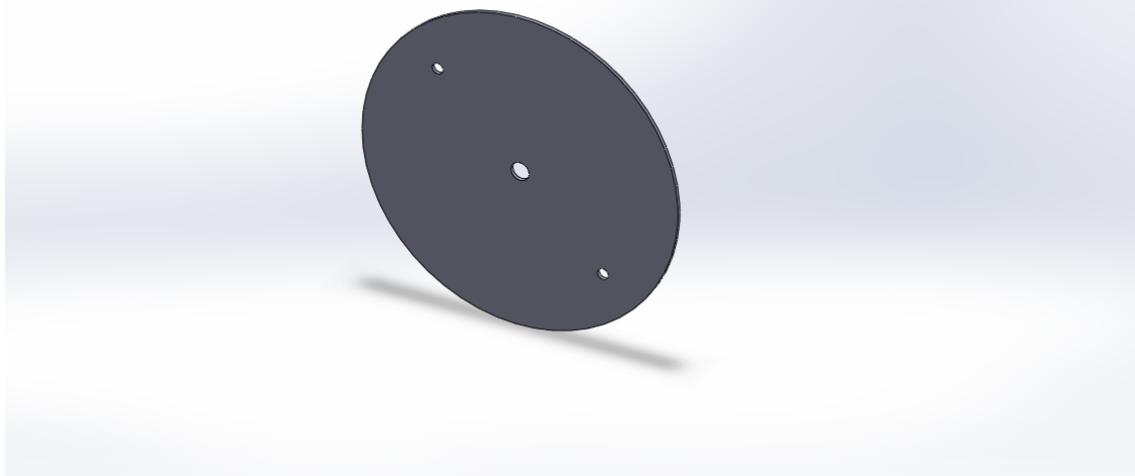


Figura 29 – Proteção térmica entre a interface entre o motor e o *Cubesat*.

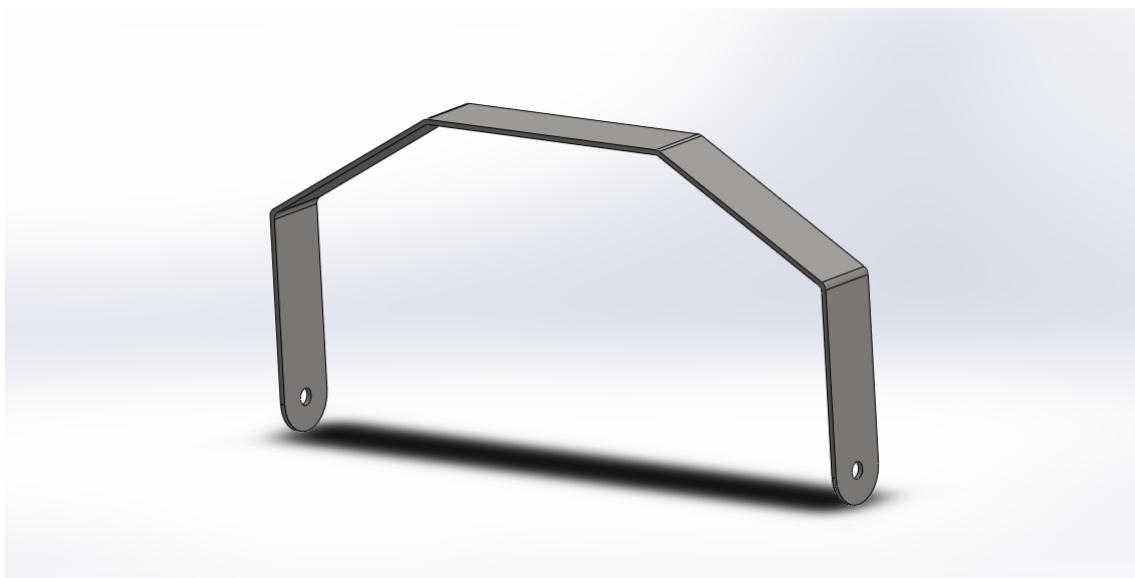


Figura 30 – Suporte do *Cubesat* para o solução com dois graus de liberdade.

APÊNDICE E – AUTOAVALIAÇÃO DOS INTEGRANTES

Tabela 23 – Autoavaliação dos integrantes por área.

Estuturas		
Nome	Matrícula	Descrição da contribuição
André Aquino Braga	140090045	Pesquisa e orçamento de componentes para o sistema de refrigeração; Definição de Material utilizado para as linhas de alimentação de N2; Escrita e revisão do relatório.
Gustavo de Barros Borges	140142584	Estudo acerca de alguns componentes aplicáveis ao projeto; Auxílio na elaboração dos diagramas; Participação nas reuniões pré-estabelecidas; Auxílio na elaboração dos custos; Escrita e revisão de relatório.
Isla Kalleny Marques Brandão	170059308	Levantamento das necessidades com os Stakeholders; Consulta com especialistas da área; Levantamento da problemática e da justificativa; Delimitação do escopo do projeto; Elicitação dos requisitos da missão; Acompanhamento do desenvolvimento das soluções de cada área; Elaboração e manutenção da metodologia; Elaboração do TAP e do EAP; Controle de qualidade dos requisitos técnicos e dos riscos;
Maurício Sá Gontijo	140155791	Elaboração dos requisitos, proposta e implementação de soluções para o sistema de alimentação e suporte do cubesat, elaboração da matriz de risco, construção dos diagramas hidráulicos e de processos, participação em reuniões de grupos, escrita do relatório, desenvolvimento de CAD's e revisão

Rana Mayeli Piêgas Taborda	170163938	Estudo acerca dos materiais aplicáveis ao projeto; Contribuições aos requisitos de estrutura; Pesquisa acerca do dimensionamento dos motores; Auxílio na elaboração dos custos e riscos de estrutura; Escrita do relatório;
Renato de Brito do Nascimento Filho	160143551	Estudo das soluções gerais aplicáveis a área de estrutura (suportes e sistema de alimentação); participação em reuniões; Elaboração conjunta dos requisitos gerais e de estrutura; Auxílio na elaboração do TAP; Elaboração dos riscos iniciais de estrutura; Elaboração do TAP e EAP de estrutura; Escrita do relatório; Elaboração de CAD's
Energia		
Nome	Matrícula	Descrição da contribuição
Daniel Moreira Carreira	150122438	Elaboração das soluções gerais aplicáveis na área de alimentação à parte elétrica; Validação dos requisitos de Energia; Elaboração dos riscos e custos iniciais de energia; Escrita do relatório e auxílio na validação do relatório
Débora da Silva Dantas	150123060	Elaboração das soluções gerais aplicáveis a área de energia (simulador solar, parte elétrica e trocadores de calor); Elaboração conjunta dos requisitos gerais e de energia; Validação dos requisitos de todas áreas; Auxílio na elaboração do TAP; Auxílio na elaboração do escopo do projeto; Elaboração dos riscos e custos iniciais de energia; Elaboração do TAP e EAP de energia; Escrita do relatório e auxílio na validação da documentação geral do projeto
Software		
Nome	Matrícula	Descrição da contribuição

Ciro Barbosa Costa	150121873	Auxílio no desenvolvimento e escrita da solução eletrônica; Elaboração conjunta dos requisitos para eletrônica; Justificativas para utilização de microprocessadores com microcontroladores e definições para suas respectivas funções no projeto; Definição das formas de controle e comunicação geral dos subitens de eletrônica; Desenvolvimento da arquitetura eletrônica/software; Configuração conjunta do layout geral.
Marcos Breno da Silva Aguiar	150016883	Estudos das soluções de eletrônica; Elaboração conjunta dos requisitos gerais e de eletrônica; Levantamento dos custos iniciais; Definição da arquitetura eletrônica (microprocessador e microcontroladores); Solução da integração dos sensores, condicionadores de sinais com conectividade SPI junto ao microprocessador; Escrita do relatório.
Priscila Yukie Yamada	160141974	Estudo das soluções gerais aplicáveis a área de eletrônica (sensor de temperatura, sensores de pressão, integração com o subsistema de estruturas e fluídos); Elaboração conjunta dos requisitos gerais e de eletrônica; Elaboração do EAP e das sprints de eletrônica; Elaboração dos riscos e custos iniciais; Elaboração conjunta da arquitetura de eletrônica; Escrita do relatório
Software		
Nome	Matrícula	Descrição da contribuição
João Pedro Mota Jardim	160031982	Elaboração de protótipo de baixa fidelidade; Elicitação e atualização dos requisitos do subsistema de software; Escrita do documento de custos de software e proposta de inovação; Elaboração e atualização do protótipo de alta fidelidade
Matheus Rodrigues do Nascimento	160015294	Elicitação e atualização dos requisitos do subsistema de software; Escrita da solução de software; Elaboração e atualização do protótipo de alta fidelidade

Paulo Victor de Menezes Lopes	160016428	Planejamento inicial quanto à documentação necessária para elicitação de requisitos e projeto, elicitação de requisitos por meio da prototipação da solução, elaboração do protótipo de baixa e alta fidelidade, planejamento de demais subsistemas e proposta de inovação, participação nas reuniões, participação na integração entre engenharias, escrita do relatório
Shayane Marques Alcântara	160144949	Pesquisa de softwares no contexto de missões espaciais; Elicitação e atualizações dos requisitos do subsistema; Levantamento e gerenciamento de tarefas; Contribuição no diagrama de integração de eletrônica; Escrita da metodologia, dos riscos, EAP e do cronograma; Planejamento, desenvolvimento e atualização do protótipo de baixa fidelidade e escrita do protótipo de alta fidelidade; Escrita e revisão do relatório;

Anexos

ANEXO A – Desenhos Técnicos - Placa térmica

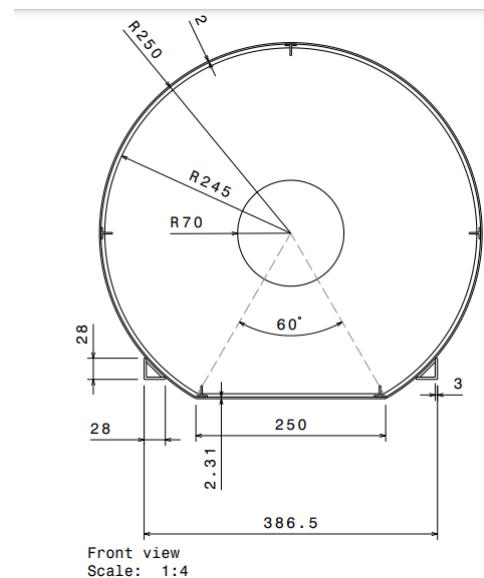


Figura 31 – Vista frontal da placa térmica da câmara de termo-vácuo (dimensões em milímetros).

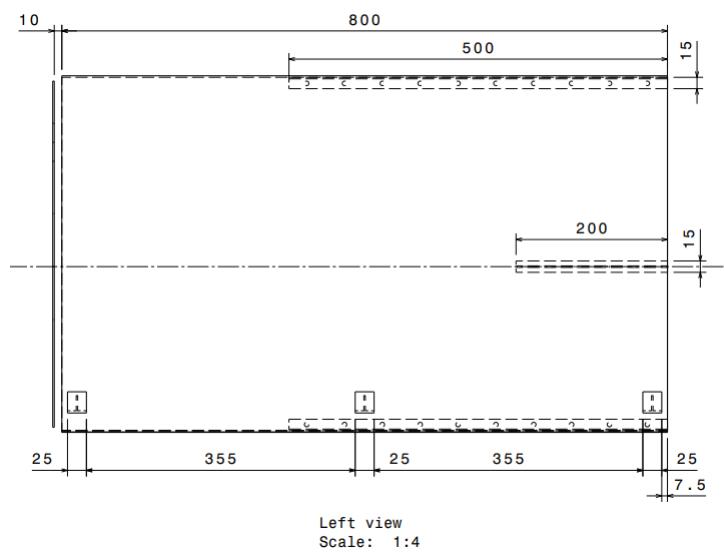


Figura 32 – Vista lateral da placa térmica da câmara de termo-vácuo (dimensões em milímetros).