

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA



Joliver de Souza Lisboa Kozlowski

**PROJETO DE SISTEMA DE TELEMETRIA PARA
BALÕES METEOROLÓGICOS**

Trabalho de Graduação
2022

Curso de Engenharia Aeroespacial

Joliver de Souza Lisboa Kozlowski

**PROJETO DE SISTEMA DE TELEMETRIA PARA
BALÕES METEOROLÓGICOS**

Orientador

Prof. Dr. Osamu Saotome (ITA)

Coorientador

Ten. Cel. Eng. Rogério Moreira Cazo (CLA)

ENGENHARIA AEROESPACIAL

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Divisão de Informação e Documentação

Kozlowski, Joliver de Souza Lisboa
Projeto de Sistema de Telemetria para Balões Meteorológicos / Joliver de Souza Lisboa
Kozlowski.
São José dos Campos, 2022.
82f.

Trabalho de Graduação – Curso de Engenharia Aeroespacial– Instituto Tecnológico de
Aeronáutica, 2022. Orientador: Prof. Dr. Osamu Saotome. Coorientador: Ten. Cel. Eng.
Rogério Moreira Cazo.

1. Balão. 2. Projeto. 3. Telemetria. I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Título.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

KOZLOWSKI, Joliver de Souza Lisboa. **Projeto de Sistema de Telemetria para Balões Meteorológicos** . 2022. 82f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Joliver de Souza Lisboa Kozlowski

TÍTULO DO TRABALHO: Projeto de Sistema de Telemetria para Balões Meteorológicos .

TIPO DO TRABALHO/ANO: Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) / 2022

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho de graduação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.

Joliver de Souza Lisboa Kozlowski

R. H8B, 213

12.228-461 – São José dos Campos–SP

PROJETO DE SISTEMA DE TELEMETRIA PARA BALÕES METEOROLÓGICOS

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação

Joliver de Souza Lisboa Kozlowski

Autor

Osamu Saotome (ITA)

Orientador

Rogério Moreira Cazo (CLA)

Coorientador

Prof. Dr. Cristiane Aparecida Martins
Coordenadora do Curso de Engenharia Aeroespacial

São José dos Campos, 15 de novembro de 2022.

Para aqueles que dedicaram suas vidas
ao Programa Espacial Brasileiro.

Agradecimentos

Primeiramente a Deus por me permitir chegar até aqui.

Aos meus pais e demais familiares por me incentivarem e me apoiarem.

A minha esposa, Maria Rosaly, por seu amor, cumplicidade e pela nossa vida juntos.

Aos muitos amigos que fiz ao longo desta jornada, em especial ao meu colega de quarto no H8, Gustavo Seiko, por sua lealdade, companheirismo e camaradagem.

A todas as pessoas e instituições que me concederam oportunidades e acreditaram em mim, em especial ao Colégio Sete de Setembro, de Fortaleza-CE, por me conceder uma bolsa de estudos em seu curso pré-vestibular e possibilitar que meu sonho de ser aprovado no ITA se tornasse real.

A todos os professores do ITA, em especial aos Professores Inacio Malmonge Martin, Tertuliano Ribeiro Pinto e Christopher Shneider Cerqueira, pela cooperação nas atividades realizadas neste projeto.

Ao Centro de Lançamento de Alcântara por propor o tema deste trabalho através do Ten. Cel. Eng. Rogério Moreira Cazo, meu coorientador. E também ao professor Osamu Saotome por aceitar ser meu orientador nesse projeto.

Aos membros da Divisão de Ciências Atmosféricas do IAE, em especial ao Cel. Cleber Souza Correa, ao Eng. Hildo e ao 1º Ten Santos, por toda a recepção e acolhimento e por todo apoio prestado durante as atividades de estágio.

Aos muitos amigos - veteranos, colegas e bixos - que fiz no âmbito das iniciativas técnicas ITA ROCKET e ITACUBE, juntos voamos cada vez mais alto.

Meu eterno agradecimento a todos que estiveram comigo até aqui, esse não é o fim, mas apenas o início de um novo ciclo em minha vida.

*“Pouco conhecimento faz com que as pessoas se sintam orgulhosas.
Muito conhecimento, que se sintam humildes. É assim que as espigas
sem grãos erguem desdenhosamente a cabeça para o céu, enquanto
que as cheias as baixam para a terra, sua mãe. ”*

— LEONARDO DA VINCI

Resumo

Este trabalho descreve o projeto de um SISTEMA DE TELEMETRIA PARA BALÕES METEOROLÓGICOS. O sistema projetado faz a transmissão por telemetria dos dados e medidas provenientes da carga útil embarcada em um balão estratosférico, além das coordenadas da posição do balão, para uma estação de solo. Ademais, o sistema fornece à carga útil embarcada a infraestrutura necessária para o bom funcionamento da mesma durante o voo do balão, como, por exemplo, potência elétrica e isolamento térmico. O projeto apresentado abrange tanto a concepção do sistema - parte teórica - quanto a construção de um protótipo - parte prática - a partir de componentes comerciais de prateleira (ou commercial off-the-shelf - COTS). O protótipo construído teve como payload base um contador Geiger para medição de radiação. A obtenção de uma série histórica atualizada e do monitoramento dos níveis de radiação atmosférica ionizante no Brasil faz-se necessária tendo em vista possíveis agravamentos de tensões internacionais envolvendo grandes potências nucleares, o que é ressaltado pelo recente conflito envolvendo a Rússia e a Ucrânia, e uma consequente contaminação do ar em território brasileiro por radiação transportada através dos ventos da alta atmosfera.

Abstract

This work describes the project of a TELEMETRY SYSTEM FOR WEATHER BALLOONS. The designed system transmits by telemetry the data and measurements from the payload on board a stratospheric balloon, in addition to the coordinates of the balloon's position, to a ground station. Furthermore, the system provides the on-board payload with the necessary infrastructure for its proper functioning during the balloon flight, such as, for example, electrical power and thermal insulation. The project presented covers both the design of the system - theoretical part - and the construction of a prototype - practical part - from commercial off-the-shelf - COTS - components. The prototype built was based on a Geiger counter for radiation measurement. Obtaining an updated historical series and monitoring the levels of ionizing atmospheric radiation in Brazil is necessary in view of possible worsening of international tensions involving major nuclear powers, which is highlighted by the recent conflict involving Russia and Ukraine, and a consequent contamination of the air in Brazilian territory by radiation transported through the winds of the upper atmosphere.

Lista de Figuras

FIGURA 2.1 – Representação da propagação de uma onda eletromagnética. Fonte: [1]	22
FIGURA 2.2 – Combinação de duas ondas linearmente polarizadas H e V, defasadas de 90 graus. Fonte: [1]	23
FIGURA 2.3 – Padrão de radiação tridimensional e suas projeções para uma antena dipolo de meia onda. Fonte: [1]	24
FIGURA 2.4 – Antena dipolo. Fonte: Autor.	26
FIGURA 2.5 – Antena monopolo um quarto de onda com plano terra formado por quatro elementos inclinados a 45°. Fonte: Autor.	26
FIGURA 2.6 – Antena helicoidal ou <i>rubber ducky antenna</i> ao lado de seu encapsulamento. Fonte: Autor.	27
FIGURA 2.7 – Antena Folha de Trevo. Fonte: Autor.	28
FIGURA 2.8 – Antena Yagi. Fonte:[2]	28
FIGURA 2.9 – Antena parabólica nas instalações do COPE em Brasília-DF. Fonte: Autor.	29
FIGURA 2.10 –Estrutura interna de um cabo coaxial. Fonte: [3].	30
FIGURA 2.11 –Nano VNA utilizado no desenvolvimento deste projeto. Fonte: Autor.	32
FIGURA 2.12 –câmara anecoica do IFI. Fonte: Autor.	32
FIGURA 2.13 –Representação da Zona de Fresnel. Fonte: Autor.	34
FIGURA 2.14 –Atmosfera vista do ônibus espacial dos EUA com nuvens cúmulo-nimbos na troposfera (laranja). São visíveis também a estratosfera (branco-azul) e mesoesfera (azul escuro). Fonte: [4]	36
FIGURA 2.15 –Variação da temperatura com a altitude ao longo da atmosfera padrão 1976. Fonte: [5]	37

FIGURA 2.16 –Variação das principais grandezas com a altitude no modelo da atmosfera padrão de 1962, além da relação das camadas da atmosfera e ocorrência de diversos fenômenos conhecidos. Fonte: [6]	38
FIGURA 2.17 –Configuração exterior da radiossonda RS41. Fonte: Adaptado de [7].	39
FIGURA 2.18 –Configuração interior da radiossonda RS41. Fonte: Adaptado de [8].	39
FIGURA 2.19 –(a) Gerador e (b) Tanque de armazenamento de gás hidrogênio da EMA do CLBI em Natal-RN. Fonte: Autor.	41
FIGURA 2.20 –Balão meteorológico logo após seu lançamento. Fonte: Autor.	41
FIGURA 3.1 – Cenário nominal de operação do Sistema de Telemetria para balões meteorológicos. Fonte: Autor.	44
FIGURA 3.2 – Arquitetura física do segmento de voo. Fonte: Autor.	46
FIGURA 3.3 – Arquitetura física do segmento solo. Fonte: Autor.	46
FIGURA 3.4 – Placa microcontroladora <i>Blue Pill</i> (STM32F103C8T6). Fonte: Autor.	47
FIGURA 3.5 – Ebyte LoRa E220-900T22D. Fonte: Autor.	48
FIGURA 3.6 – Antena rubber duck para 915 MHz. Fonte: Autor.	49
FIGURA 3.7 – Módulo GPS GY-NEO6MV2. Fonte: Autor.	49
FIGURA 3.8 – Pilhas da marca Energizer modelo <i>Ultimate Lithium</i> AA. Fonte: Autor.	50
FIGURA 3.9 – Módulo regulador de tensão <i>Step Down</i> . Fonte: Autor.	50
FIGURA 4.1 – Conexões entre adaptador FTDI e rádio Ebyte LoRa. Fonte: [9]. . .	53
FIGURA 4.2 – Janela do software de configuração dos rádios Ebyte LoRa E220. Fonte: [10]	53
FIGURA 4.3 – Conexões entre STLink V2 e STM32. Fonte: [9].	54
FIGURA 4.4 – Conexões entre rádio Ebyte LoRa e STM32. Fonte: [9].	54
FIGURA 4.5 – Conexões entre Módulo GPS e STM32. Fonte: [11].	55
FIGURA 4.6 – Montagem do sistema em <i>protoboard</i> . Fonte: Autor.	55
FIGURA 4.7 – Comparação entre (a) Representação em 3D da placa projetada no software KiCad e (b) Placa real fabricada na China. Fonte: Autor. .	56

FIGURA 4.8 – Comparação entre (a) Representação em 3D gerada no KiCad da placa principal do STBM projetado com componentes já integrados e (b) Imagem real da placa principal do STBM manufaturada e com componentes já integrados. Fonte: Autor.	56
FIGURA 4.9 – Vista lateral do STBM integrado a uma placa de <i>payload</i> . Fonte: Autor.	57
FIGURA 4.10 – Antena plano terra um quarto de onda fabricada para o STBM. Fonte: Autor.	58
FIGURA 4.11 – Antena no momento do ensaio na câmara anecoica no IFI. Fonte: Autor.	58
FIGURA 4.12 – Aparato de fixação da antena para teste em câmara anecoica no IFI. Fonte: Autor.	59
FIGURA 4.13 – Sistema de aquisição de dados da câmara anecoica do IFI durante a realização do ensaio. Fonte: Autor.	59
FIGURA 4.14 – Diagrama horizontal obtido para a antena plano terra quarto de onda fabricada. Fonte: Autor.	60
FIGURA 4.15 – Diagrama vertical obtido para a antena plano terra quarto de onda fabricada. Fonte: Autor.	60
FIGURA 4.16 – Diagrama vertical obtido para a antena comercial <i>rubber duck</i> . Fonte: Autor.	61
FIGURA 4.17 – Cargas de calibração do nano VNA. Fonte: Autor.	61
FIGURA 4.18 – Variação do parâmetro VSWR com a frequência para a antena monopolo fabricada. Fonte: Autor.	62
FIGURA 4.19 – Variação do parâmetro VSWR com a frequência para a antena <i>rubber duck</i> helicoidal adquirida inicialmente. Fonte: Autor.	62
FIGURA 4.20 – Fonte AC-DC com saída de 5 V empregada na estação de solo. Fonte: Autor.	63
FIGURA 4.21 – Antena Yagi da fabricante Aquario modelo 17dbi 900mhz Cf-917 com 16 elementos. Fonte: [2].	64
FIGURA 4.22 – Tubo Geiger utilizado no experimento. Fonte: Autor.	65
FIGURA 4.23 – Placa utilizada com o Geiger. Fonte: Autor.	66
FIGURA 4.24 – Subsistema de energia do STBM. Fonte: Autor.	67
FIGURA 4.25 – STBM no teste de robustez do sistema. Fonte: Autor.	69

FIGURA 4.26 –STBM posicionado dentro do isolamento térmico. Fonte: Autor. . .	69
FIGURA 4.27 –Algumas das amostras utilizadas durante os testes. Fonte: Autor. .	70
FIGURA 4.28 –STBM no teste de saturação da carga útil. Fonte: Autor.	71

Lista de Tabelas

TABELA 3.1 – Análise de Stakeholders. Fonte: Autor.	42
TABELA 3.2 – Cronograma de atividades inicialmente estabelecido. Fonte: Autor. .	43
TABELA 3.3 – Requisitos básicos do projeto. Fonte: Autor.	45
TABELA 3.4 – Características dos requisitos básicos do projeto. Fonte: Autor. . .	45
TABELA 3.5 – Massa medida para cada componente em gramas.	51
TABELA 3.6 – Custos de produção por unidade do protótipo de voo do STBM, sem <i>payload</i>	51
TABELA 4.1 – Consumo médio dos principais componentes do STBM e do <i>payload</i> estabelecido. Fonte: Autor.	67
TABELA 4.2 – Teste realizado com transmissor 250 mW e antenas <i>rubber duck</i> . Fonte: Autor.	70
TABELA 4.3 – Contagens obtidas para diferentes amostras radioativas posicionadas ao lado do tubo Geiger. Fonte: Autor.	71

Lista de Abreviaturas e Siglas

AEB	Agência Espacial Brasileira
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
BUS	Infraestrutura do Sistema Embarcado
CLA	Centro de Lançamento de Alcântara
CLBI	Centro de Lançamento da Barreira do Inferno
CNES	Centre National d'Études Spatiales
COPE	Centro de Operações Espaciais
COTS	<i>Commercial off-the-shelf</i>
DUT	<i>Device Under Test</i>
EMA	Estação Meteorológica de Altitude
EUA	Estados Unidos da América
GPS	<i>Global Positioning System</i>
H8	Alojamento dos alunos do ITA
IAE	Instituto de Aeronáutica e Espaço
IDE	Ambiente de Desenvolvimento Integrado
IFI	Instituto de Fomento e Coordenação Industrial
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ITA	Instituto Tecnológico de Aeronáutica
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
JAXA	<i>Japan Aerospace Exploration Agency</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LoRa	<i>Long Range</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
RF	Rádio Frequência
RSSI	<i>Received Signal Strength Indication</i>
SHF	<i>Super High Frequency</i>
SI	Sistema Internacional de Unidades
STBM	Sistema de Telemetria para Balões Meteorológicos
TG	Trabalho de Graduação

UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
UTC	<i>Coordinated Universal Time</i>
VSWR	<i>Voltage Standing Wave Ratio</i>
WAN	<i>Wide Area Network</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Objetivo	19
1.2	Contexto e Motivação	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	Transmissão de Rádio	22
2.1.1	Ondas Eletromagnéticas	22
2.1.2	Antenas e Associação de Antenas	24
2.1.3	Cabo Coaxial e Conectores	30
2.1.4	Casamento de Impedâncias	31
2.1.5	Câmara Anecoica	32
2.1.6	Alcance de Um Sinal de Rádio	33
2.1.7	Zona de Fresnel	34
2.1.8	Banda ISM	35
2.2	Atmosfera Terrestre	35
2.3	Tecnologias Atuais	38
2.3.1	Radiossondas	38
2.3.2	Balões Meteorológicos	40
3	CONCEPÇÃO DO SISTEMA	42
3.1	Análise de <i>Stakeholders</i> e Cronograma	42
3.2	Captura e Desenvolvimento de Requisitos	43
3.2.1	Conceitos de operações do projeto	43
3.2.2	Necessidades do projeto e requisitos básicos	45

3.2.3	Arquitetura e Conceitos de Missão	46
3.3	Escolha dos Componentes Utilizados	47
3.4	Medidas de Inércia	51
3.5	Custos	51
4	CONSTRUÇÃO, CONFIGURAÇÃO E TESTES DO SISTEMA	52
4.1	Construção e Configuração	52
4.1.1	Rádios	52
4.1.2	Conexões	53
4.1.3	PCB e Estrutura	55
4.1.4	Antena Embarcada	57
4.1.5	Estação de Solo	63
4.1.6	<i>Payload</i>	64
4.1.7	Subsistema de Energia	66
4.1.8	Software	68
4.2	Testes do Sistema	68
4.2.1	Teste de Robustez	68
4.2.2	Teste Térmico	69
4.2.3	Cálculo do <i>Link Budget</i> e Caracterização do Link a Curta Distância .	70
4.2.4	Teste de Saturação do <i>Payload</i>	70
5	CONCLUSÃO	72
5.1	Considerações Finais	72
5.2	Trabalhos Futuros	72
APÊNDICE A – ESQUEMÁTICO DA PCB		77
APÊNDICE B – MEDIDAS NO NANO VNA		78
B.1	Antena Monopolo Fabricada	78
B.2	Antena <i>rubber duck</i> helicoidal	79
APÊNDICE C – CÓDIGOS		80
C.1	Código do transmissor	80

ANEXO A – DIAGRAMAS	82
A.1 Pinagem da placa <i>Blue Pill</i>	82

1 Introdução

Neste primeiro capítulo, são apresentados o objetivo e o contexto deste trabalho, bem como a motivação para sua realização.

1.1 Objetivo

O principal objetivo deste trabalho de graduação é desenvolver um sistema de telemetria para balões meteorológicos de baixo custo e que tenha uma interface a qual possibilite comunicação entre um *payload* genérico embarcado no balão e a estação de solo. Tem-se ainda, como objetivo secundário, o desenvolvimento de uma estação de solo destinada a receber os dados do sistema de telemetria projetado.

1.2 Contexto e Motivação

Embora os voos de balões estratosféricos utilizados para diversas observações e experimentos científicos não ocorram no espaço, os balões estratosféricos podem ser colocados nos mesmos campos de foguetes e satélites, constituindo parte fundamental na ciência e tecnologia espacial e sendo um campo em voga no cenário mundial [4]. Organizações que realizam pesquisa e desenvolvimento, e que lançam e realizam operações com este tipo de balonismo científico, conseguem resultados científicos e desenvolvimento espacial relevantes a um custo mais acessível [12].

A utilização de balões meteorológicos para coletar dados de parâmetros atmosféricos, tais como pressão atmosférica, velocidade do vento, temperatura e umidade do ar, é realizada por inúmeros países e instituições ao redor do mundo. No Brasil, tais artefatos são lançados todos os dias pelas Estações Meteorológicas de Altitude (EMA) com o objetivo de efetuar observações meteorológicas do ar superior, por meio de radiossondas. A grande maioria das EMAs pertencem ao Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DCEA), enquanto uma minoria é de responsabilidade da Infraero (Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária). Seguindo normas internacionais, as radiossondagens são

realizadas todos os dias, visando coletar dados às 0:00 hrs e às 12:00 hrs UTC, sendo a atividade iniciada com antecedência de aproximadamente 30 minutos do horário padrão [13]. Atualmente são empregadas sondas comerciais modelo RS41, fabricadas pela empresa finlandesa Vaisala.

Para a realização de experimentos científicos de grande porte emprega-se, comumente, um Balão Estratosférico de Pressão Zero (*Zero-Pressure Balloon* - ZPB). Este tipo de balão constitui um veículo espacial sub-orbital, construído de um filme plástico com espessura de 3 a 25 μm , inflado com gás hidrogênio ou hélio, capaz de levar experimentos científicos com peso até três toneladas a altitudes até 45 km, voando até dezenas de horas. Nessa linha, existem diversos trabalhos que já foram desenvolvidos previamente em solo brasileiro, como no Setor de Lançamentos de Balões (SESLB), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) [14]. As áreas de astrofísica (linha de pesquisa de altas energias) e geofísica espacial (linha de pesquisa de eletricidade atmosférica) do INPE são os principais usuários do SESLB. Através de acordos de cooperação internacional, o SESLB já participou de dezenas de lançamentos de cargas úteis de instituições estrangeiras, tais como a NASA (EUA), o CNES (França) e o JAXA (Japão) [14].

Os balões estratosféricos utilizados para meteorologia também podem ser empregados para embarcar experimentos científicos de diversas naturezas. Com a crescente miniaturização da eletrônica, a utilização de balões meteorológicos para a realização de experimentos científicos é uma tendência. Um exemplo de lançamento de balão meteorológico com experimentos embarcados foi o realizado pelo Instituto Mauá de Tecnologia (IMT), no projeto Balão de Alta Altitude (HAB) [15]. A missão - que atingiu uma altitude estimada em 30 quilômetros - teve como objetivo a realização de testes preliminares nos sistemas que farão coleta de dados científicos para pesquisas aeroespaciais e astrobiológicas. Na mesma linha seguem os projetos do grupo Zenith da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP) [16].

O lançamento de balões estratosféricos também pode ser empregado no desenvolvimento de pequenos satélites (classes nanossatélite e picossatélite), como uma etapa de desenvolvimento de projeto. Como exemplo dessa utilização, podemos citar o lançamento na missão Aldebaran-I, que está produzindo um nanossatélite em uma parceria entre a Agência Espacial Brasileira (AEB) e a Universidade Federal do Maranhão (UFMA) [17]. Outro exemplo é o lançamento de balão estratosférico promovido pelo projeto Itacube 2021 realizado por alunos do 4º ano do curso de Engenharia Aeroespacial do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), no âmbito da disciplina de Eletrônica para Aplicações Espaciais (ELE-27). O lançamento do protótipo de voo possibilitou que o conceito seja utilizado em missões posteriores mais complexas e permitiu que os dados fossem utilizados em modelos de estudo da atmosfera do planeta [18].

O presente trabalho tem como principal motivação a necessidade do Centro de Lan-

çamento de Alcântara, i.e. Força Aérea Brasileira, de possuir um sistema específico para fornecer telemetria de dados a experimentos científicos de universidades federais, e.g. Universidade Federal do Maranhão, embarcados em balões e lançados em parceria com o CLA.

2 Revisão Bibliográfica

Neste segundo capítulo, são apresentados os principais conceitos acerca de sistemas de telemetria, as tecnologias relacionadas a balões meteorológicos e a teoria que rege a transmissão de ondas de rádio.

2.1 Transmissão de Rádio

2.1.1 Ondas Eletromagnéticas

As quatro equações de Maxwell traduzem as leis fundamentais que governam o eletromagnetismo clássico [19]. Tais equações regem, portanto, a propagação de uma onda eletromagnética, na qual temos sempre a presença de um campo elétrico e de um campo magnético situados em planos ortogonais, variando em fase, e com vetor velocidade de propagação estando a 90 graus dos vetores dos campos possuindo módulo idêntico ao módulo da velocidade da luz no meio. Por serem ondas eletromagnéticas, as ondas de rádio estão sujeitas aos mesmos fenômenos destas, tais como reflexão, refração e difração.

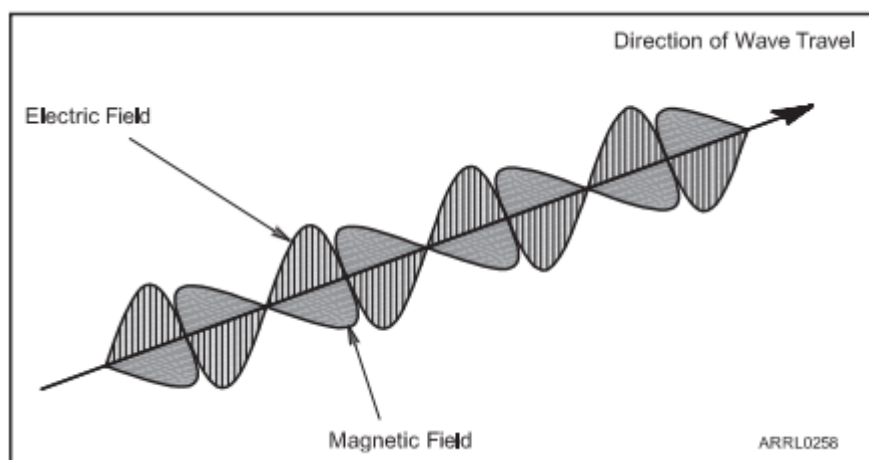


FIGURA 2.1 – Representação da propagação de uma onda eletromagnética. Fonte: [1]

No que tange às citadas equações, uma consequência da lei de Gauss (elétrica) é que estes campos não se propagam no interior de superfícies condutoras. Tal fenômeno é

denominado de blindagem eletrostática e foi demonstrado em 1836, por Michael Faraday (1791-1867), através de um experimento que ficou conhecido como a gaiola de Faraday [19].

Outra característica importante ao considerarmos uma onda eletromagnética propagando-se no espaço é sua polarização. A polarização de uma onda eletromagnética é definida como o plano no qual se encontra a componente elétrica da onda em questão. Um dipolo posicionado verticalmente gera uma onda polarizada na vertical, pois o componente campo elétrico está na vertical (o campo magnético vai estar na horizontal). Como esta onda está sempre situada no mesmo plano, é chamada de onda com polarização linear. Duas ondas linearmente polarizadas, uma vertical e outra horizontal, em fase, quando combinadas resultam em uma onda inclinada. A combinação de duas ondas linearmente polarizadas, uma vertical e outra horizontal, com amplitudes iguais e eletricamente defasadas de 90 graus, resulta em uma onda circularmente polarizada [20].

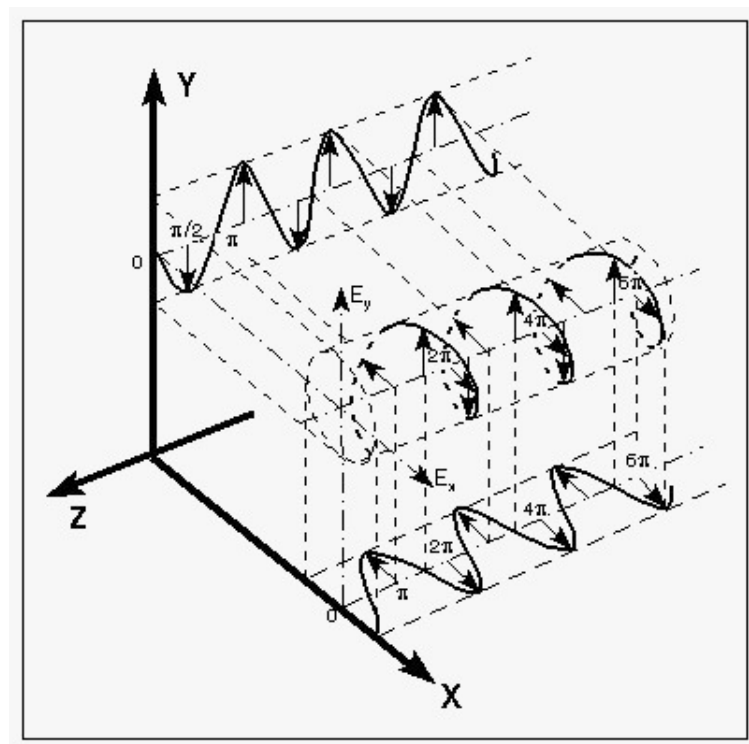


FIGURA 2.2 – Combinação de duas ondas linearmente polarizadas H e V, defasadas de 90 graus. Fonte: [1]

Adicionalmente as ondas podem ser RHCP (*Right-Hand Circular Polarized*) e LHCP (*Left-Hand Circular Polarized*), classificação que leva em conta o sentido de rotação do campo elétrico [20].

Uma vantagem da polarização circular é não ser afetada pela rotação de Faraday em ondas que atravessam a atmosfera e/ou a ionosfera, principalmente em comunicações via satélite. Outra vantagem é que não é necessário ajustar a polarização das antenas (posição

em torno do eixo de propagação) como acontece com antenas linearmente polarizadas [20].

2.1.2 Antenas e Associação de Antenas

Apesar de muitos considerarem uma antena como um simples acessório, na verdade é o fator primordial no bom desempenho de um sistema de rádio. Para o correto desenvolvimento de um projeto de telemetria, algumas características das antenas devem ser conhecidas e estudadas com afinco.

2.1.2.1 Padrão de Radiação

A energia irradiada por uma antena é representada por um padrão de radiação associado. Padrões de radiação são representações esquemáticas da distribuição da energia irradiada no espaço, em função da direção. Tal padrão é essencialmente tridimensional, no entanto, como forma de simplificar a representação e a obtenção, um padrão pode ser dividido em representação horizontal e vertical.

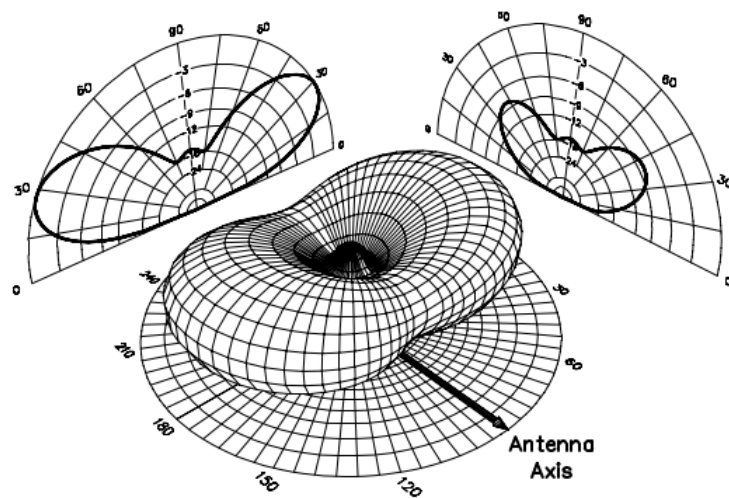


FIGURA 2.3 – Padrão de radiação tridimensional e suas projeções para uma antena dipolo de meia onda. Fonte: [1]

2.1.2.2 Diretividade

A diretividade de uma antena é uma medida da concentração de seu padrão de radiação em uma direção particular. A diretividade é expressa em dB. Quanto maior a diretividade, mais concentrado ou focado é o padrão de radiação da antena. Uma antena que irradia de forma igualitária em todas as direções é denominada omnidirecional e possui uma diretividade igual a 1 (0 dB).

Uma diretividade alta nem sempre é um fator desejável. Por exemplo, em muitas aplicações como na telefonia móvel, dispositivos - nesse caso os celulares - requerem antenas omnidirecionais. No entanto, em outros casos, uma diretividade alta é muito importante, como no caso de aparelhos de televisão via satélite.

2.1.2.3 Ganho

O método mais fundamental para analisar o desempenho de uma antena é verificar seu ganho. O ganho de uma antena nos diz a potência transmitida por ela em uma determinada direção em comparação com uma antena isotrópica. Tal especificação descreve a intensidade do sinal que uma antena pode enviar ou receber em uma direção específica. A antena isotrópica é utilizada apenas como referência para a diretividade e ganho de uma antena real, uma vez que tal radiador isotrópico esférico não existe na prática - um ponto não pode gerar ondas transversais. Comumente, são utilizadas antenas de referência calibradas com ganho conhecido e o resultado é convertido num radiador isotrópico. Essa conversão não é necessária se um simples dipolo tiver sido utilizado como referência. Pode-se distinguir qual antena de referência foi utilizada para a medição do ganho de determinada antena, ou se o resultado foi extrapolado para uma antena isotrópica, pelo índice da unidade auxiliar de medida de decibel:

- 0 dB_i (ou também 0 dBi) possui uma antena isotrópica omnidirecional como referência;
- 0 dBd ($= 2,15\text{ dBi}$) possui a radiação máxima de um dipolo de meia-onda como referência.

O ganho é uma especificação mais importante que a diretividade da antena, pois leva em conta todas as perdas. Tecnicamente, o ganho é o produto entre diretividade e eficiência. Onde a diretividade é a medida da concentração do padrão de radiação de uma antena em uma determinada direção. Já a eficiência é responsável pelas perdas da antena devido a falhas de fabricação, irregularidades do revestimento da superfície, dielétrico, resistência ou qualquer outro fator como, por exemplo, a VSWR - indicação da ordem de descasamento entre a fonte e a carga ou indicação da relação entre a tensão máxima e mínima na linha de transmissão [19].

2.1.2.4 Tipos de Antenas

Existem diversos tipos e variações de antenas, de modo que uma listagem e descrição completa foge ao propósito deste trabalho. Essa seção apresenta as antenas mais comuns ou que mais se relacionam ao tema em questão.

O dipolo é a forma de antena fundamental e tem sido usada desde o início da radiocomunicação. Em sua forma clássica, possui aproximadamente a dimensão de meio comprimento de onda ($\lambda/2$) da frequência de operação. Ela serve de base para a construção de muitas formas mais complexas de antenas. Seu nome está relacionado ao fato de uma polarização oposta ser aplicada em cada metade da antena. A direção das varretas de um dipolo é também sua direção de ganho mínimo. Indica-se a utilização de uma antena dipolo quando faz-se necessária uma antena direcional simples com ganho pequeno ($< 2,15 \text{ dBi}$) e de baixo custo, ou com diagrama omnidirecional (circular) no plano perpendicular à antena [1].



FIGURA 2.4 – Antena dipolo. Fonte: Autor.

Outra forma primordial de antena é o monopolo. O nome salienta o fato de ser a metade de um dipolo. Os monopolos devem possuir um plano terra, pois sem ele a performance da antena cai demasiadamente. O plano terra age como um espelho elétrico. Uma antena monopolo deve ser utilizada quando se deseja uma antena de baixo custo e baixo ganho (0 dBi ou menos), quando se tem restrições de tamanho para a antena ou quando se deseja um padrão omnidirecional em torno desta [1].



FIGURA 2.5 – Antena monopolo um quarto de onda com plano terra formado por quatro elementos inclinados a 45° . Fonte: Autor.

Como as antenas do tipo dipolo ou monopolo são antenas de polarização linear, duas

dessas antenas precisam estar alinhadas para funcionarem bem. Quando não estão alinhadas existem perdas de potência no sinal recebido, uma vez que se uma antena recebe um campo elétrico que não está alinhado com seu eixo de transmissão, ela irá interagir apenas com a componente do campo com a qual está alinhada. Assim, caso o campo chegue com um desalinhamento de 90 graus, ele é totalmente rejeitado pela antena. Tal característica é conhecida como rejeição da polarização cruzada. Captar uma onda polarizada circularmente com uma antena de polarização linear (ou vice e versa) causa sempre uma perda de exatos 3 dB [21].

Existem também antenas helicoidais, as quais são formadas por um fio condutor enrolado em espiral e com plano de terra semelhante ao dos monopolos. Basicamente são um monopolo enrolado em espiral. A antena helicoidal tem dois modos básicos de operação:

- Modo normal: no modo normal são denominadas *rubber ducky antenna*, as dimensões da hélice (diâmetro e passo) são pequenos em comparação com o comprimento de onda. Para este modo de operação a antena descreve um comportamento omnidirecional;
- Modo axial: as dimensões da hélice são comparáveis ao comprimento de onda, funciona como uma antena direcional que irradia um feixe das extremidades da hélice, ao longo do eixo da antena, apresentando um comportamento direcional [22].



FIGURA 2.6 – Antena helicoidal ou *rubber ducky antenna* ao lado de seu encapsulamento. Fonte: Autor.

Antenas *rubber ducky* têm ganho menor do que uma antena de um quarto de comprimento de onda de tamanho normal, o que reduz o alcance do rádio. Elas são normalmente usadas em rádios bidirecionais de curto alcance, nos quais o alcance máximo não é um objetivo. Seu design é um compromisso entre ganho e redução das dimensões da antena.

Uma antena Folha de Trevo pode ter 3 ou 4 pétalas ou loops de fio. É uma antena omnidirecional circularmente polarizada e seu diagrama de irradiação é semelhante ao do dipolo. Tem ganho baixo e é melhor para transmissão do que para recepção. O diâmetro desta antena é a metade do comprimento de onda. É bastante utilizada para transmissão de vídeo em drones [23].



FIGURA 2.7 – Antena Folha de Trevo. Fonte: Autor.

Já a Yagi - ou uma antena Yagi-Uda - é uma antena direcional que irradia sinais em uma direção principal. É um equipamento bastante popular devido a sua simplicidade e baixo custo. Consiste em uma longa linha de transmissão com um único elemento excitador e duas hastes conectadas em ambos os lados da linha de transmissão, denominado elemento irradiante. Também possui um único refletor de um lado da linha e vários elementos parasitas que atuam como diretores. O elemento irradiante de uma Yagi é equivalente a uma antena dipolo de meia onda alimentada pelo centro. Paralelamente ao elemento irradiante estão hastes ou fios retos chamados refletores e diretores. Um refletor é colocado atrás do elemento irradiante e é ligeiramente mais longo que este; um diretor é colocado na frente do elemento irradiante e é ligeiramente mais curto que este. Uma antena Yagi típica tem um refletor e um ou mais diretores [19].



FIGURA 2.8 – Antena Yagi. Fonte:[2]

Outro tipo popular de antena é a parabólica, inventada pelo físico alemão Heinrich Hertz durante sua descoberta das ondas de rádio em 1887. Ele usou refletores parabólicos cilíndricos com antenas dipolo, excitadas por faísca em seu foco, para transmitir e receber durante seus famosos experimentos. Ela Utiliza um refletor parabólico, uma superfície curva com a forma de seção transversal de uma parábola, para direcionar as ondas de rádio. A forma mais comum tem o formato de um prato e é popularmente chamada de parabólica. A principal vantagem dessa antena é que ela possui alta diretividade. Ela funciona de forma semelhante a um holofote ou refletor de luz para direcionar as ondas de rádio em um feixe estreito ou receber ondas de rádio apenas de uma direção específica. As antenas parabólicas têm alguns dos ganhos mais altos, o que significa que podem produzir as larguras de feixe mais estreitas entre todos os tipos de antenas. Para obter larguras de feixe estreitas, o refletor parabólico deve ser muito maior do que o comprimento de onda das ondas de rádio usadas. Desse modo, as antenas parabólicas são usadas na parte de alta frequência do espectro de rádio, nas faixas UHF e SHF (micro-ondas), em que os comprimentos de onda são pequenos o suficiente para que refletores de tamanho conveniente possam ser empregados [19].



FIGURA 2.9 – Antena parabólica nas instalações do COPE em Brasília-DF. Fonte: Autor.

As antenas parabólicas são usadas como antenas de alto ganho para comunicações ponto a ponto, em aplicações como links de retransmissão de micro-ondas que transportam sinais de telefone e televisão entre cidades próximas, links WAN/LAN sem fio para comunicações de dados, comunicações por satélite e antenas de comunicação de naves espaciais. Elas também são usadas em radiotelescópios [19].

O outro grande uso de antenas parabólicas são os sistemas de radar, nos quais há a necessidade de transmitir um feixe estreito de ondas de rádio para localizar objetos, como navios, aviões e mísseis guiados, e muitas vezes para detecção de clima. Com o advento

dos receptores domésticos de televisão por satélite, as antenas parabólicas tornaram-se uma característica comum das paisagens dos países modernos [1].

2.1.3 Cabo Coaxial e Conectores

O cabo coaxial foi inventado por Oliver Heaviside em 1880. Foi desenvolvido para transmitir sinais de RF e micro-ondas de um ponto a outro com perda mínima de sinal. Um cabo coaxial típico consiste em condutores internos e externos separados por um dielétrico. Essas três camadas são então encapsuladas por uma capa de polímero, conforme mostrado na Figura 2.10 abaixo. A capa externa protege o cabo e o sinal dentro dele de qualquer interferência externa. As dimensões do condutor interno, do condutor externo e do espaço entre eles são mantidas uniformes ao longo do comprimento do cabo [3].

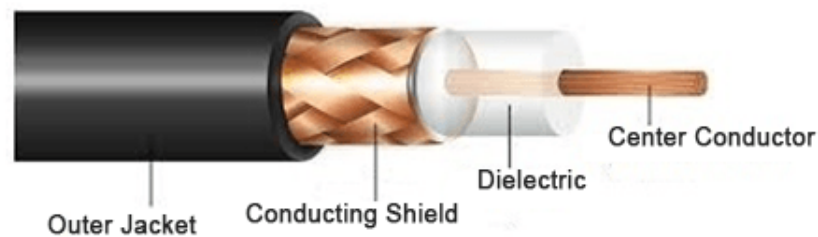


FIGURA 2.10 – Estrutura interna de um cabo coaxial. Fonte: [3].

A atenuação do cabo (em dB) é linearmente proporcional ao seu comprimento, e é proporcional a raiz quadrada da variação de frequência, quando o cabo está ligado a uma carga casada [24].

Na prática, cabos coaxiais necessitam de conectores para serem ligados aos rádios e antenas. Existem muitos tipos de conectores, mas os mais utilizados em componentes do nível dos empregados neste trabalho são os conectores SMA e tipo N. Ambos existem e se conectam aos pares: um macho e uma fêmea. Deve-se tomar cuidado para não confundir o tipo RP-SMA com o SMA normal, pois tais tipos possuem roscas inversas e não são compatíveis entre si. Adaptadores podem ser utilizados para possibilitar o emprego de componentes e cabos com diferentes tipos de conectores [19].

2.1.4 Casamento de Impedâncias

Uma antena deve estar com sua impedância casada com a impedância da linha de transmissão e do dispositivo de RF para que o sistema opere com a máxima eficiência possível na faixa de frequência desejada. A eficiência ideal resulta em alcance máximo, consumo mínimo de energia, aquecimento reduzido e maior confiabilidade na transferência de dados. A antena transmite a energia recebida através do rádio (com impedância de $50\ \Omega$ na maior parte dos casos) para o espaço livre (impedância de $377\ \Omega$) [1]. Casar a impedância de entrada da antena em $50\ \Omega$ é um requisito para garantir que a potência máxima seja transferida do circuito de RF para a antena com uma quantidade insignificante sendo refletida de volta. A razão de onda estacionária (SWR) é uma medida que define quão bem a impedância da antena está casada com a impedância da linha de transmissão. Um valor inferior a 1,5 é desejável. Um SWR baixo permite a máxima transferência de potência da linha de transmissão [19].

Um analisador de redes vetoriais (*Vector Network Analyzer* - VNA) é um instrumento utilizado para medir ou caracterizar a resposta em frequência de dispositivos de RF e micro-ondas. Este equipamento gera um sinal e mede a amplitude e fase do sinal proveniente do DUT. Pode ser usado para medir a impedância de entrada da antena no ambiente de operação, pois isso ajuda a otimizar a antena para o funcionamento nas condições reais. O VNA deve ser calibrado conforme o mais próximo possível do plano de medição ou o local de rede correspondente. A impedância técnica de correspondência deve considerar qualquer comprimento da linha de transmissão, se presente entre o ponto de calibração e a rede correspondente [19].

A Carta de Smith é uma excelente ajuda gráfica para visualizar a impedância em qualquer ponto da linha de transmissão ou na entrada do sistema de antena nas diferentes frequências. Tal gráfico consiste em círculos de resistência constante e círculos de condutância constante e pode ser usado para realizar uma correspondência de impedância trazendo a impedância para o centro do gráfico, o que corresponde a uma resistência pura de $50\ \Omega$ ajustando a valores de reactância. Isso é conseguido projetando uma rede ou circuito correspondente entre a linha de alimentação e a antena [19].

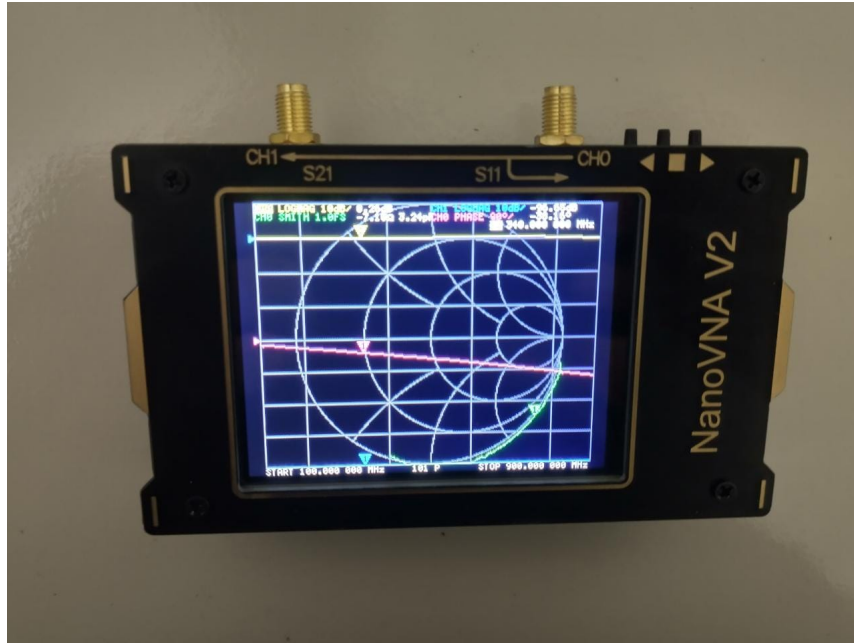


FIGURA 2.11 – Nano VNA utilizado no desenvolvimento deste projeto. Fonte: Autor.

2.1.5 Câmara Anecoica

Uma câmara anecoica (anecoica significa não reflexiva, sem eco) é uma sala com blindagem eletromagnética, projetada para proporcionar um ambiente sem ondas eletromagnéticas indesejadas advindas de seu exterior e sem reflexão em suas paredes por parte de ondas eletromagnéticas emitidas em seu interior.

A ideia por trás de uma câmara anecoica perfeita é que um dispositivo sob teste (DUT), como antenas e radares, não deve testemunhar nenhum sinal indesejado quando colocado dentro da câmara [19].

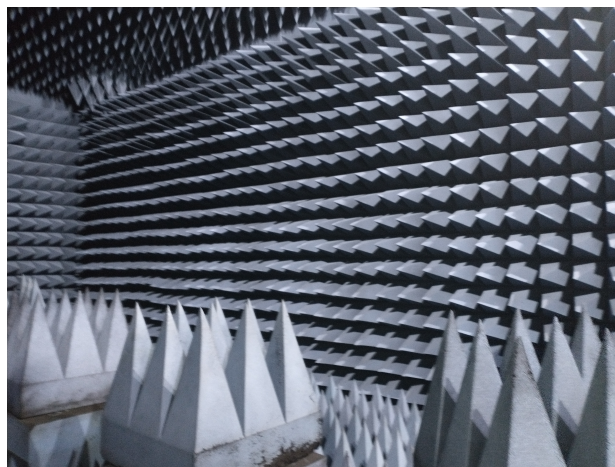


FIGURA 2.12 – câmara anecoica do IFI. Fonte: Autor.

2.1.6 Alcance de Um Sinal de Rádio

No projeto de um sistema de telemetria é importante ser capaz de estimar o alcance máximo do sistema. Na ausência de obstáculos entre a antena transmissora e a antena receptora (dentre outras condições ideais tais como mesma polarização e orientação adequada), como no caso da comunicação via satélite, a potência no receptor pode ser obtida usando a conhecida fórmula de transmissão de Friis [1] apresentada na Equação 2.1.

$$P_r = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 G_t G_r \quad (2.1)$$

Na qual P_r é a potência recebida, P_t é a potência transmitida, G_t e G_r são os ganhos das antenas do transmissor e do receptor respectivamente, r é a distância entre as antenas e λ é o comprimento de onda correspondente à frequência de transmissão utilizada. A Equação 2.1 trabalha com unidades de potência lineares do SI (mW/W), no entanto é comum especificações de equipamentos estarem expressas em unidades logarítmicas (dBm/dBW), nesse caso podemos converter as unidades ou utilizar a Equação 2.2.

$$P_r(dB) = P_t + G_t + G_r + 20 \log_{10} \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right) \quad (2.2)$$

Analisando-se a equação de Friis é possível constatar que a potência recebida (e consequentemente o alcance de um sinal) aumenta com o quadrado do comprimento de onda, ou seja, diminui com o quadrado da frequência. Com isso, dados sinais de mesma potência de transmissão, o sinal de menor frequência obterá maior alcance.

Outros fatores que influenciam o alcance de um sinal são a atenuação do sinal ocasionada por água e por outros obstáculos, como a curvatura da Terra e a reflexão de certos comprimentos de onda nas altas camadas da atmosfera. Além de possíveis interferências destrutivas, conforme analisado na Seção 2.1.7 a seguir.

Uma medida que auxilia na determinação do alcance de um sinal de rádio é a indicação de intensidade do sinal recebido (RSSI), a qual fornece o nível de potência na recepção de um sinal proveniente de uma antena. Uma coisa a se ter em mente é que o RSSI é apenas uma indicação da energia de RF detectada na porta da antena. O nível de potência relatado pode ser artificialmente alto, porque pode incluir energia de ruído de fundo e interferência, bem como a energia do sinal desejado. Essa situação é pior em um ambiente propenso a interferências, onde é possível obter leituras RSSI consistentemente altas, mas ainda com erros de comunicação. Se o objetivo for medir a confiabilidade do link e não apenas a “intensidade do sinal”, pode ser útil levar em consideração “% de pacotes recebidos” ou dados semelhantes [1] [25].

2.1.7 Zona de Fresnel

A zona de Fresnel pode ser usada para analisar a possibilidade de interferência ocasionada por obstáculos próximos do caminho de um sinal transmitido. Considere a situação teórica ilustrada na Figura 2.13. D é distância entre transmissor e receptor, r_n é o raio da n -ésima zona de Fresnel em um ponto cuja projeção sobre a linha de visada dista d_1 do transmissor e d_2 do receptor, h_1 e h_2 são as altitudes do transmissor e do receptor. A diferença de caminho entre o sinal que percorre a linha de visada e o que poderia ser refletido por um obstáculo na zona de Fresnel [19] é dada por:

$$\Delta r = \sqrt{d_1^2 + r_n^2} + \sqrt{d_2^2 + r_n^2} - (d_1 + d_2) \approx \frac{r_n^2}{2} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right) \quad (2.3)$$

Para que ocorra interferência, devemos ter $\Delta r = n\frac{\lambda}{2}$. Com isso, temos:

$$n\frac{\lambda}{2} \approx \frac{r_n^2}{2} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right) \quad (2.4)$$

$$r_n \approx \sqrt{n \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2} \lambda} \quad (2.5)$$

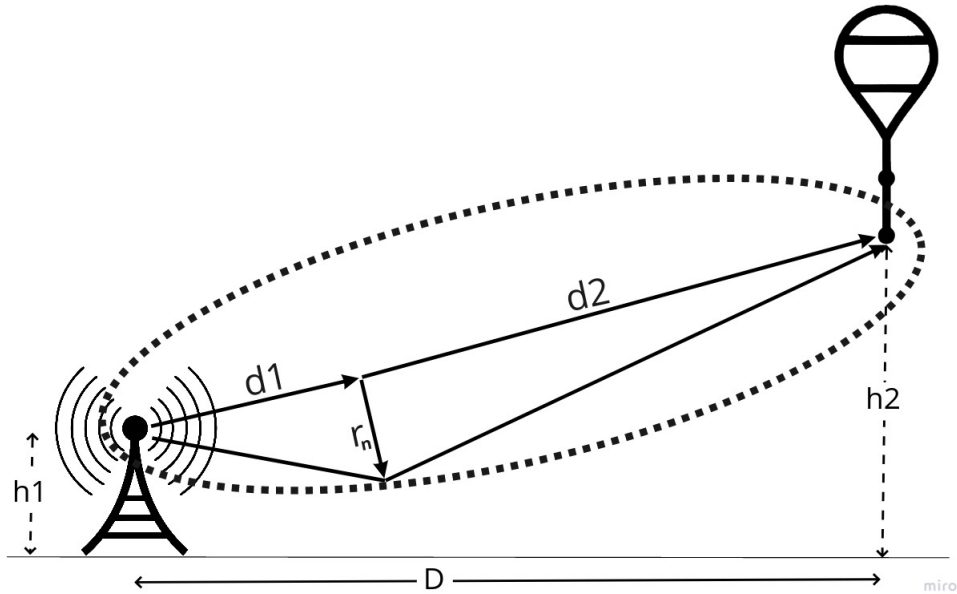


FIGURA 2.13 – Representação da Zona de Fresnel. Fonte: Autor.

O tamanho da zona de Fresnel calculada a qualquer distância específica do transmissor e do receptor pode ajudar a prever se obstruções ou discontinuidades ao longo do caminho causarão interferência significativa. Em teoria existem infinitas zonas de Fresnel, no entanto em casos práticos apenas as primeiras são importantes [19].

Elevar a antena de forma a garantir uma linha de visada livre de obstáculos e uma zona de Fresnel limpa é uma solução adequada quando possível.

2.1.8 Banda ISM

As Bandas ISM (Industrial, Scientific and Medical) são faixas de frequência reservadas internacionalmente para o desenvolvimento industrial, científico e médico. Elas foram criadas pelas agências reguladoras para diminuir a burocracia e facilitar o uso do espectro eletromagnético. Não é necessário obter nenhum tipo de licença para a utilização de tais bandas. Enquanto a faixa de 2400 MHz a 2484 MHz (2,4 GHz a 2,484 GHz) é alocada em escala mundial, outras faixas são específicas de certos países ou regiões, como por exemplo, a faixa de 902 MHz a 928 MHz no Brasil. As únicas restrições impostas se referem à potência máxima transmitida e a largura de banda, que deve ser mantida dentro de certos limites. Enquanto na Europa, na África e na Rússia, a faixa de 433.05 MHz a 434.79 MHz é ISM, em países da região 2 do ITU, como o Brasil e os EUA, 433 MHz não é uma banda ISM. Entretanto, existe grande quantidade de dispositivos de operação não-licenciada (advindos em grande parte da China) nessa banda em solo brasileiro e nos EUA, controles RF em 433 MHz são extremamente populares em ambos os locais, por exemplo [26].

A Anatel é o órgão brasileiro responsável pela fiscalização e regulamentação do espectro eletromagnético. Uma autorização de uso temporário de radiofrequências pode ser solicitada no site da agência [27].

2.2 Atmosfera Terrestre

Para projetar um sistema destinado a ser embarcado em balão, devemos ter em mente as condições ambientais às quais ele estará sujeito ao longo de sua trajetória ascendente pela atmosfera [4].

A atmosfera terrestre pode ser subdividida em camadas com diferentes características de temperatura, pressão, umidade, composição química e etc. Balões meteorológicos atingem seu apogeu a uma altitude máxima em torno dos 30 km, na região da estratosfera [4].



FIGURA 2.14 – Atmosfera vista do ônibus espacial dos EUA com nuvens cúmulo-nimbos na troposfera (laranja). São visíveis também a estratosfera (branco-azul) e mesoesfera (azul escuro). Fonte: [4]

Apesar das condições atmosféricas variarem ao longo do dia principalmente devido ao nascer e ao por do sol, e ao longo das estações do ano, devido a maior ou menor incidência de radiação solar, uma “Atmosfera Padrão” pode ser adotada com uma pressão média, temperatura e densidade do ar para várias altitudes.

O “*U.S. Standard Atmosphere 1976*” é um modelo atmosférico de como a pressão, temperatura, densidade e viscosidade da atmosfera terrestre mudam com a altitude. É definido como tendo uma temperatura de 288,15 K e uma pressão de 101325 Pa (1013,25 hPa, 1013,25 mbar, 760 mm Hg, 29,92 in Hg) ao nível do mar (0 km de altitude geopotencial). As Figuras 2.15 e 2.16 sintetizam alguns dados relativos ao modelo [4].

Nesse modelo, a atmosfera é dividida em:

- Troposfera - 0 a 11 km (36.000 pés) de altitude.

- Estratosfera - 11 a 51 km (167.000 pés) de altitude.
- Mesosfera - 51 a 71 km (232.000 pés) de altitude.
- Ionosfera - acima de 71 km (232.000 pés) de altitude.

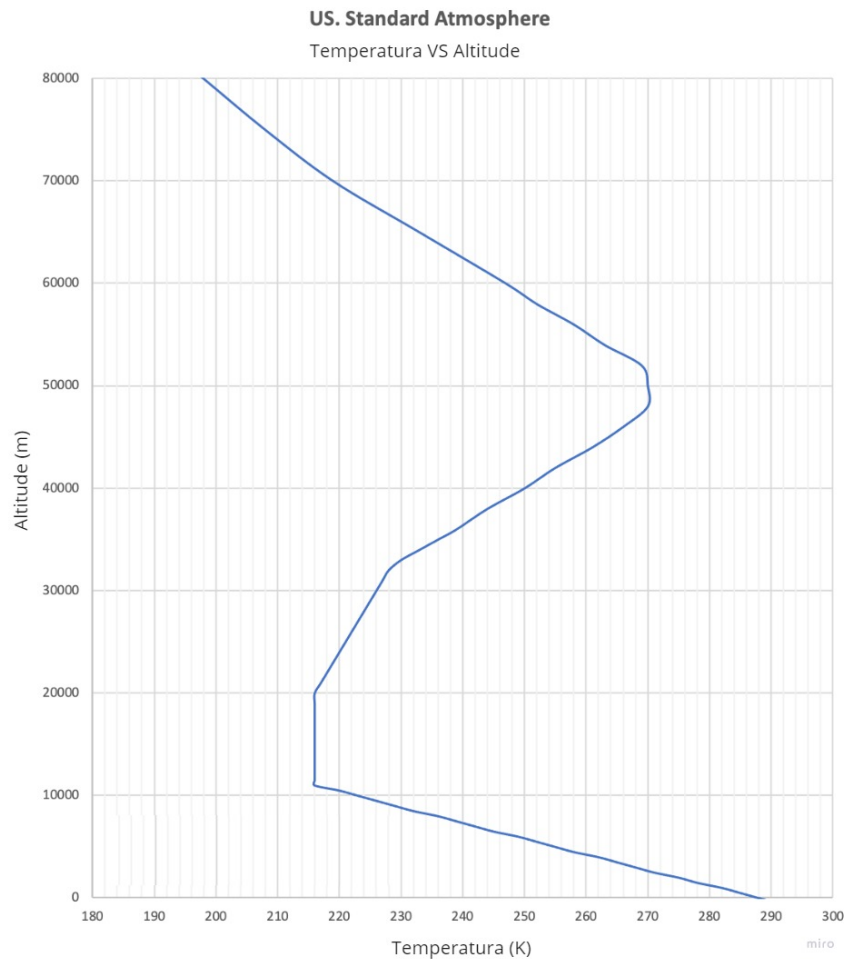


FIGURA 2.15 – Variação da temperatura com a altitude ao longo da atmosfera padrão 1976. Fonte: [5]

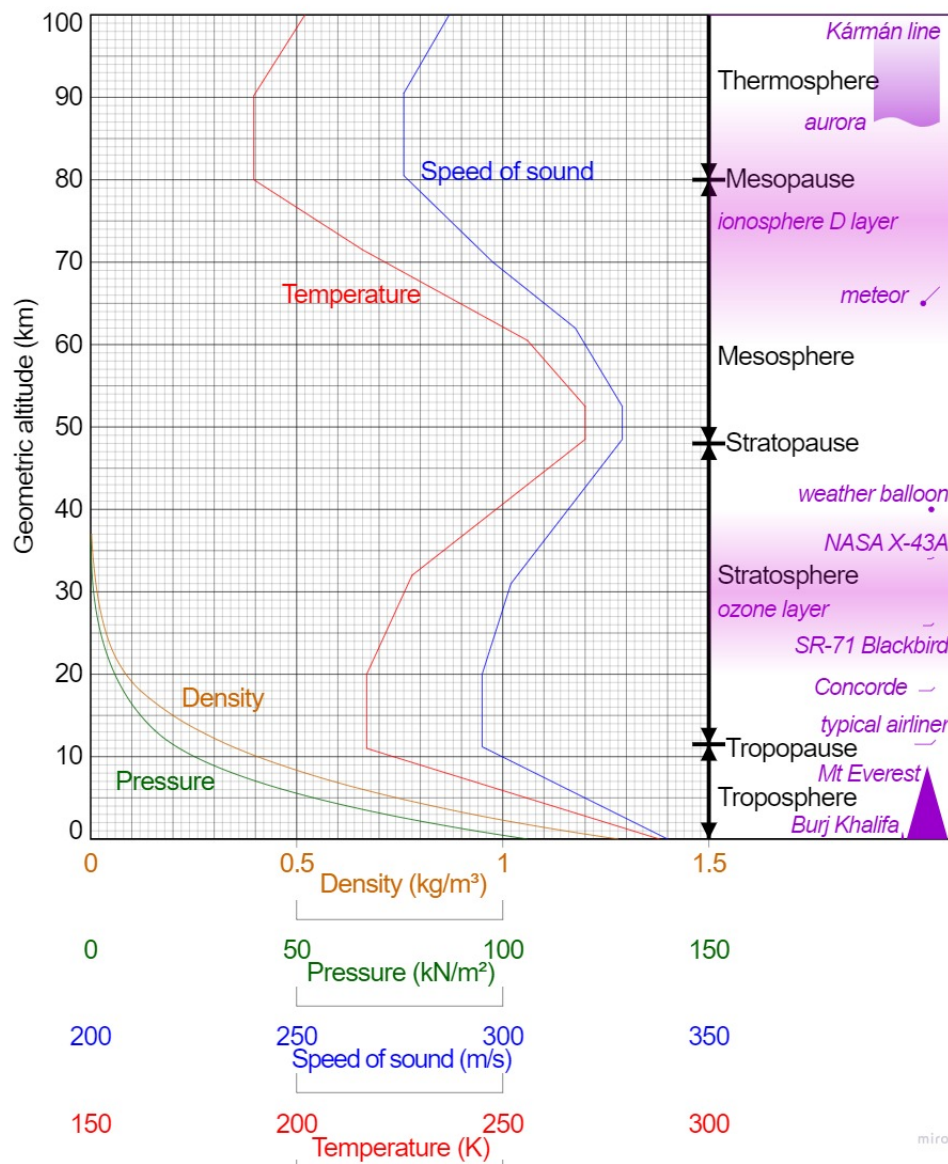


FIGURA 2.16 – Variação das principais grandezas com a altitude no modelo da atmosfera padrão de 1962, além da relação das camadas da atmosfera e ocorrência de diversos fenômenos conhecidos. Fonte: [6]

2.3 Tecnologias Atuais

2.3.1 Radiossondas

Uma radiossonda é um instrumento dotado de telemetria e alimentado por bateria que é transportado para a atmosfera, geralmente por um balão meteorológico que mede vários parâmetros atmosféricos e os transmite via rádio para um receptor terrestre [28]. As radiossondas modernas medem ou calculam as seguintes variáveis: altitude, pressão, temperatura, umidade relativa, vento (velocidade e direção do vento) e, em alguns casos, até leituras de raios cósmicos em altitude elevada e posição geográfica - latitude e

longitude. A radiossonda RS41, fabricada pela empresa finlandesa Vaisala [7], é um dos modelos de radiossonda mais empregados em território nacional nos dias de hoje.

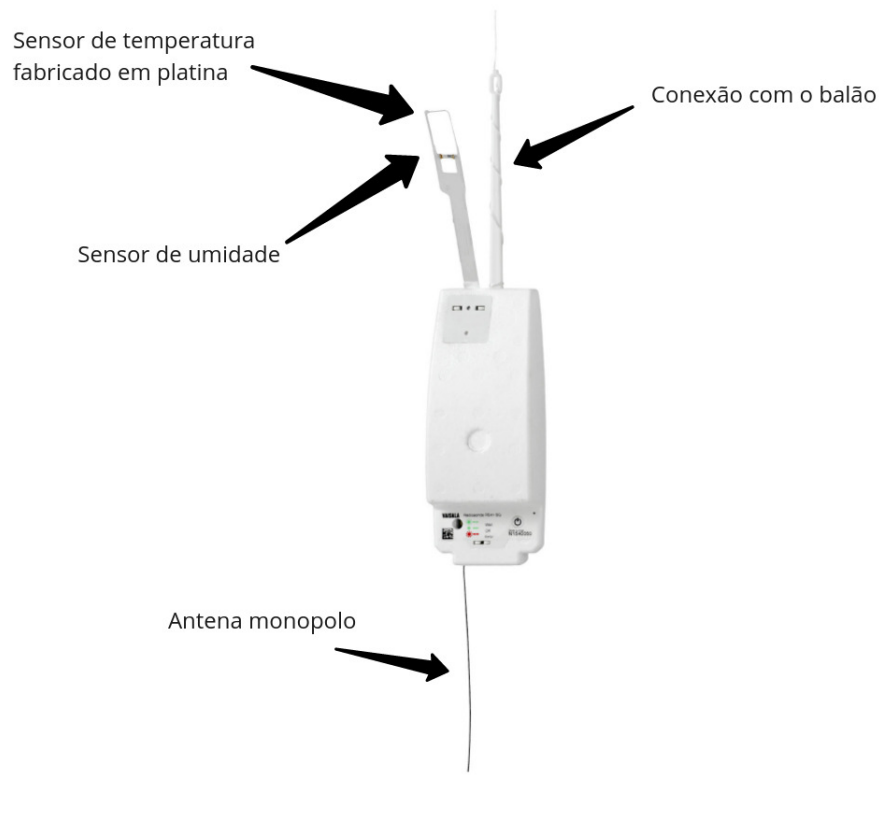


FIGURA 2.17 – Configuração exterior da radiossonda RS41. Fonte: Adaptado de [7].

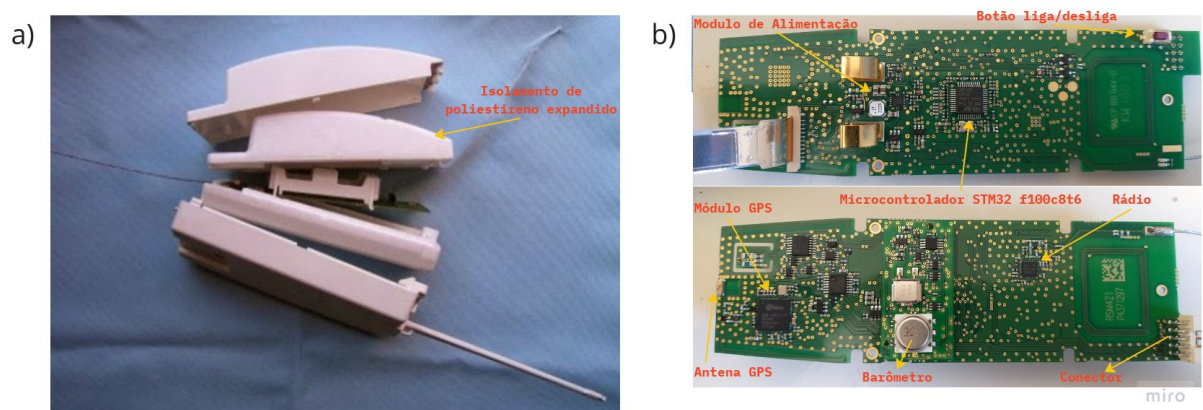


FIGURA 2.18 – Configuração interior da radiossonda RS41. Fonte: Adaptado de [8].

Pode-se observar da configuração externa da radiossonda comercial RS41 (Figura 2.17) que a radiossonda possui uma conexão por fio com o balão. Tal fio no momento do lançamento encontra-se enrolado em um carretel, e se desenrola à medida que ocorre a ascensão do balão, posicionando a sonda em sua configuração final a aproximadamente 30

metros do balão, de modo a diminuir a influência das perturbações causadas pelo balão nas medidas da radiossonda. Na configuração externa pode-se notar ainda os sensores de temperatura e umidade posicionados de modo a ter contato direto com o ar atmosférico, e uma antena monopolo destinada à telemetria dos dados coletados.

Já na configuração interna (Figura 2.18) é possível notar que a estrutura externa de plástico possui um isolamento térmico em poliestireno expandido. Na placa de circuito impresso estão presentes um microcontrolador, um módulo GPS com antena de cerâmica integrada na placa, um transmissor que transmite na faixa de 403 MHz e demais sensores, além do suporte para as duas pilhas AA de lítio. O principal componente do módulo de alimentação é o MAX8887, o qual fornece uma corrente máxima de 300 mA continuamente, e por um curto período de tempo também atende os níveis de saída ajustados de 1,5 V, 1,8 V, 2,85 V e 3,3 V com meio ampere. Além disso, três reguladores de tensão TLV70030 são empregados nas RS41 mais recentes, os quais podem fornecer 200 mA a 3 V [8].

O rádio transmissor presente na placa é o Si4032 da família EZRadioPRO, o qual ajusta a modulação GFSK para a frequência de operação. A potência de transmissão é cerca de 100 mW, com um consumo de corrente inferior a 85 mA em 3 V.

A configuração completa de voo da radiossonda RS41 tem uma massa de 109 g. Já quando desprovida dos acessórios, ou seja, munida apenas de sua estrutura, a sonda possui uma massa de aproximadamente 65 g.

2.3.2 Balões Meteorológicos

Os balões meteorológicos utilizados na radiossondagem são de borracha natural ou sintética, possuem forma homogênea e esférica, espessura uniforme e tipo extensível provido de gola de 1 a 5 cm de diâmetro e comprimento de 10 a 20 cm. O tamanho e a capacidade de carga do balão são mais bem identificados pelo seu peso nominal em gramas e estão diretamente relacionados ao peso da radiossonda empregada. O balão é inflado com gás hélio ou hidrogênio, em quantidade suficiente para garantir uma razão de subida de aproximadamente 5 m/s. O gás hélio é considerado mais seguro do que o hidrogênio, uma vez que o hidrogênio é inflamável. No entanto, o hélio é mais caro pois sua obtenção é realizada por meio de mineração em depósitos naturais. Já o gás hidrogênio pode ser produzido por vários processos, dentre eles a eletrólise da água [29].

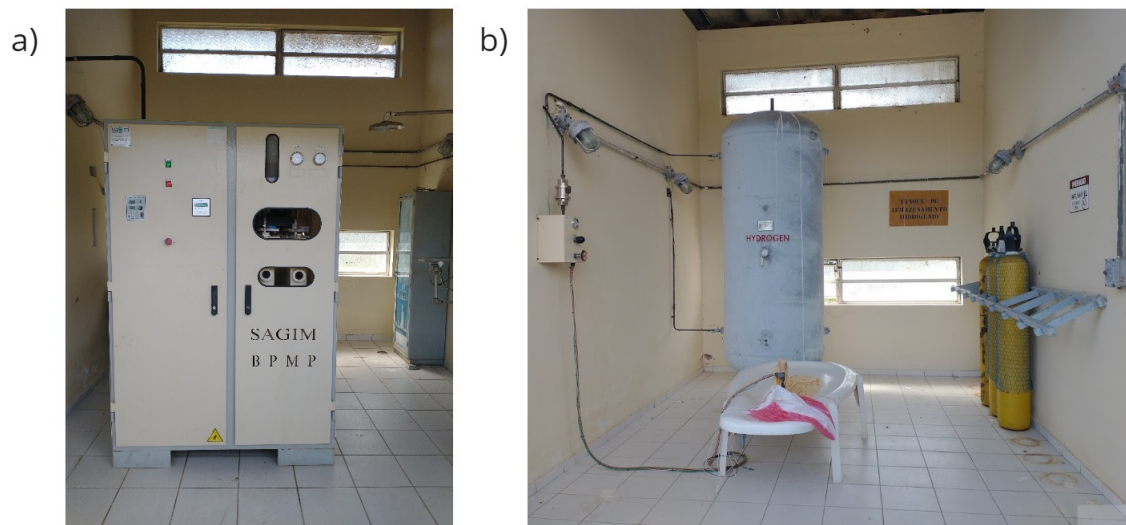


FIGURA 2.19 – (a) Gerador e (b) Tanque de armazenamento de gás hidrogênio da EMA do CLBI em Natal-RN. Fonte: Autor.

Como acessórios no conjunto são utilizados um paraquedas e um desenrolador. O paraquedas é fabricado em material resistente e possui linhas de suspensão ligadas a um dispositivo que é atado ao desenrolador. A parte superior do paraquedas, quando atada ao balão meteorológico, fica 1,5 m abaixo do mesmo [29].



FIGURA 2.20 – Balão meteorológico logo após seu lançamento. Fonte: Autor.

3 Concepção do Sistema

Neste terceiro capítulo é feita a concepção do Sistema de Telemetria para Balões Meteorológicos, aplicando-se conceitos da Engenharia de Sistemas. Além disso, são selecionados componentes específicos para serem utilizados no projeto.

3.1 Análise de *Stakeholders* e Cronograma

A Tabela 3.1 apresenta uma lista dos principais *Stakeholders* e seus interesses, classificando-os conforme o nível de influência na execução do projeto. Além disso, são apresentadas as principais ações que devem ser tomadas junto aos citados interessados.

TABELA 3.1 – Análise de Stakeholders. Fonte: Autor.

ID	Stakeholder	Interesse	Poder de influenciar				Ação
			0	1	2	3	
STK01	Fornecedores	Venda de componentes				X	- Avaliar alternativas - Gerenciar
STK02	ITA	Aprendizado do graduando			X		- Manter informado
STK03	CLA	Investimento e posterior utilização do produto desenvolvido				X	- Canal de comunicação acerca do avanço do projeto
STK04	UFMA	Utilização do produto desenvolvido			X		- Levantar requisitos funcionais
STK05	Prof ^o Dr. Osamu Saotome	Aprendizado de seu orientando				X	- Canal de comunicação acerca do avanço do projeto
STK06	TCel Rogério Moreira Cazo	Aprendizado de seu orientando				X	- Canal de comunicação acerca do avanço do projeto
STK07	Prof ^o Dr. Inacio Malmonge Martin	Utilização do produto desenvolvido			X		- Canal de comunicação acerca do avanço do projeto
STK08	Divisão de Ciências Atmosféricas (ACA - IAE)	Utilização do produto desenvolvido			X		- Canal de comunicação acerca do avanço do projeto
STK09	FAB	Reconhecimento dos alunos/instituição		X			- Manter informado
STK10	DECEA	Autorização para lançamento do balão meteorológico		X			- Manter Informado

O tema deste Trabalho de Graduação foi proposto pelo Centro de Lançamento de Alcântara, por meio do TCel Rogério Moreira Cazo. Para entender as necessidades deste *Stakeholder* foram realizadas conversas acerca da demanda que originou a proposta e, de modo a produzir uma solução conveniente, foram levantados alguns dos requisitos apresentados na seção seguinte.

Os componentes eletrônicos para a prototipagem do sistema serão adquiridos de diversos fornecedores distintos, prezando-se pela obtenção do menor preço sem perda de uma qualidade mínima. Como o orçamento para o presente projeto é bastante limitado e o prazo para a entrega deste trabalho está previsto no calendário acadêmico do ITA, um atraso por parte dos fornecedores pode comprometer a obtenção de um protótipo funcional.

A Divisão de Ciências Atmosféricas do IAE (ACA) tem a radiossondagem como uma de suas atividades de rotina, possuindo experiência na operação de preparação e lançamento de balões meteorológicos. No entanto, atualmente a divisão não possui um sistema de telemetria funcional para a transmissão de dados experimentais genéricos, valendo-se apenas da telemetria de dados de radiossondas comerciais.

O Prof^o Dr. Inacio Malmonge Martin, do Departamento de Física do ITA, possui vasta experiência na área de plasma solar e atmosférico, dentre outros campos, e manifestou extremo interesse em integrar um *payload* com o protótipo que este trabalho se propõe a desenvolver.

Para a realização de radiossondagem eventuais autorizações devem ser solicitadas tanto ao DECEA para o efetivo lançamento do balão, quanto à Anatel para eventual uso de uma faixa de frequência específica para a transmissão da telemetria.

A Tabela 3.2 apresenta o cronograma para o desenvolvimento do projeto do STBM.

TABELA 3.2 – Cronograma de atividades inicialmente estabelecido. Fonte: Autor.

Tarefa	Prazo final para conclusão	31/mar.	30/abr.	31/mai.	24/jun.	31/jul.	31/ago.	30/set.	31/out.	18/nov.
Planejamento do Projeto										
Projeto Teórico										
Compra de Componentes										
Apresentação TG-1										
Construção do protótipo										
Programação do software embarcado										
Campanha de Testes										
Análise do desempenho na Campanha										
Apresentação TG-2										

3.2 Captura e Desenvolvimento de Requisitos

3.2.1 Conceitos de operações do projeto

A Figura 3.1 ilustra o conceito básico de operação para o sistema desenvolvido.

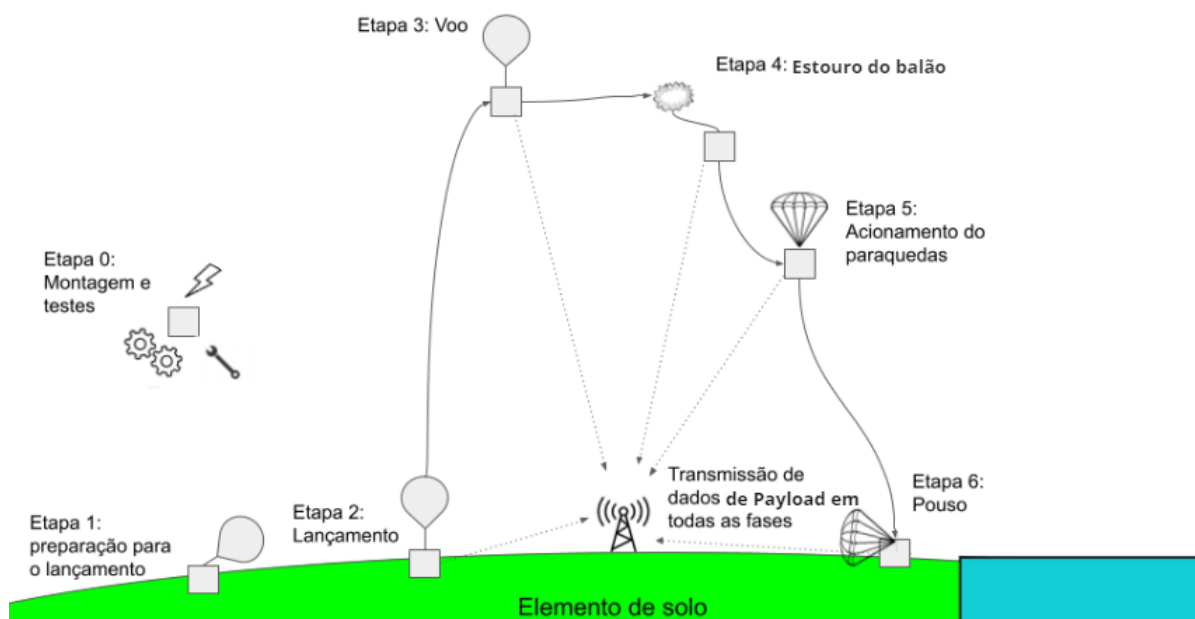


FIGURA 3.1 – Cenário nominal de operação do Sistema de Telemetria para balões meteorológicos. Fonte: Autor.

O início da operação ocorrerá ainda em solo, certificando-se de que a comunicação com os receptores que ficarão em solo está funcionando em condições adequadas. Também deverá ser feita a ativação do *payload* por parte dos responsáveis, caso o experimento embarcado necessite de algum acionamento. Após a verificação do correto funcionamento do equipamento, faz-se a ligação para a torre de controle aéreo com antecedência mínima de meia hora para o lançamento. A realização de todos esses procedimentos pode ser melhor guiada com a utilização de uma *checklist*. Inicia-se o enchimento do balão, após o término é feito o acoplamento do balão à sua carga paga e em seguida é realizado o lançamento. Durante a subida do balão, os dados referentes ao *payload*, bem como o sinal GPS, serão transmitidos em tempo real para a base em solo. Ao atingir a altitude máxima, ocorrerá, então, o estouro do balão. Durante a descida, um paraquedas atuará de forma a permitir um pouso com um baixo impacto, reduzindo as chances de provocar danos a estruturas, animais e/ou pessoas em solo. Para a classe de balões meteorológicos pode-se esperar uma duração média do voo em torno de duas horas.

A recuperação da carga paga pode ser inviável se a queda se der no mar ou em local ermo de difícil acesso. A transmissão de dados do *payload*, por meio do sistema de telemetria desenvolvido, dificilmente será efetiva após o pouso devido ao efeito solo.

3.2.2 Necessidades do projeto e requisitos básicos

A determinação dos requisitos para o voo de um balão está fundamentada na natureza da missão da carga útil que será embarcada. Alguns *payloads* visam atingir maiores altitudes, outros desejam levar mais massa e/ou mais volume, enquanto outros almejam um maior tempo de duração de voo. Alguns experimentos estão interessados na superfície da Terra, outros investigam sua atmosfera, sem citar aqueles cujo foco é a visualização do espaço.

TABELA 3.3 – Requisitos básicos do projeto. Fonte: Autor.

ID	REQUISITO
STBM1	O conjunto balão- <i>bus-payload</i> deve ter razão de subida mínima de aproximadamente 5 m/s para atender exigências dos regulamentos de tráfego aéreo.
STBM2	O sistema deve ser capaz de operar na faixa de 0 a 30 km de altitude.
STBM3	O sistema de telemetria deve possuir alcance nominal de 100 km.
STBM4	O custo total do protótipo desenvolvido deve ser inferior a 300 reais.
STBM5	O sistema de telemetria deve transmitir, além dos dados provenientes do <i>payload</i> , dados de sinal GPS do balão (latitude, longitude, altitude, velocidade, data e hora).
STBM6	A bateria deve ter capacidade de fornecer carga para 180 minutos de operação contínua.
STBM7	O sistema de recuperação deve garantir razão de descida não maior que 8 m/s.
STBM8	O sistema deve ser capaz de prover uma taxa de transmissão de dados de 2 kbps.
STBM9	A potência e a frequência de transmissão do sistema devem estar dentro dos limites legais estabelecidos pela Anatel.

TABELA 3.4 – Características dos requisitos básicos do projeto. Fonte: Autor.

ID	Rationale	Método de verificação	Critério de sucesso na verificação
STBM1	Deve-se seguir a lei e normas vigentes.	Análise	Velocidade encontrada entre o intervalo descrito.
STBM2	A altitude típica de apogeu para um balão meteorológico é em torno de 30 km de altitude.	Teste	Sistema apresentou comportamento nominal durante o teste térmico.
STBM3	Ventos podem deslocar horizontalmente o balão para distâncias maiores que seu apogeu nominal.	Análise	Alcance encontrado entre o intervalo descrito.
STBM4	O sistema pode não ser recuperado após o voo; O custeio será feito com recursos próprios do autor.	Inspeção	Somatório dos custos foi menor ou igual ao estabelecido.
STBM5	Assim pode-se relacionar dados de posição com os dados adquiridos pelo payload; A posição faz-se necessária caso se deseje recuperar o sistema.	Demonstração	O segmento solo recebeu dados.
STBM6	O tempo médio de duração de um voo de balão meteorológico é cerca de 1h:40min, assim tem-se boa margem de segurança.	Análise	Tempo de duração encontrado entre o intervalo descrito.
STBM7	Deve-se evitar que o pouso do sistema cause danos de qualquer natureza.	Análise	Velocidade encontrada entre o intervalo descrito.
STBM8	Estipulado com base na natureza dos dados a serem coletados.	Demonstração	O sistema transmitiu dados na taxa estipulada.
STBM9	Deve-se seguir a lei e normas vigentes.	Análise	A potência e a frequência de transmissão estão dentro das normas ou foi concedida uma autorização para uso.

3.2.3 Arquitetura e Conceitos de Missão

Os diagramas apresentados nas Figuras 3.2 e 3.3 apresentam a arquitetura física preliminar pensada para o projeto em seus segmentos de voo e de solo, respectivamente.

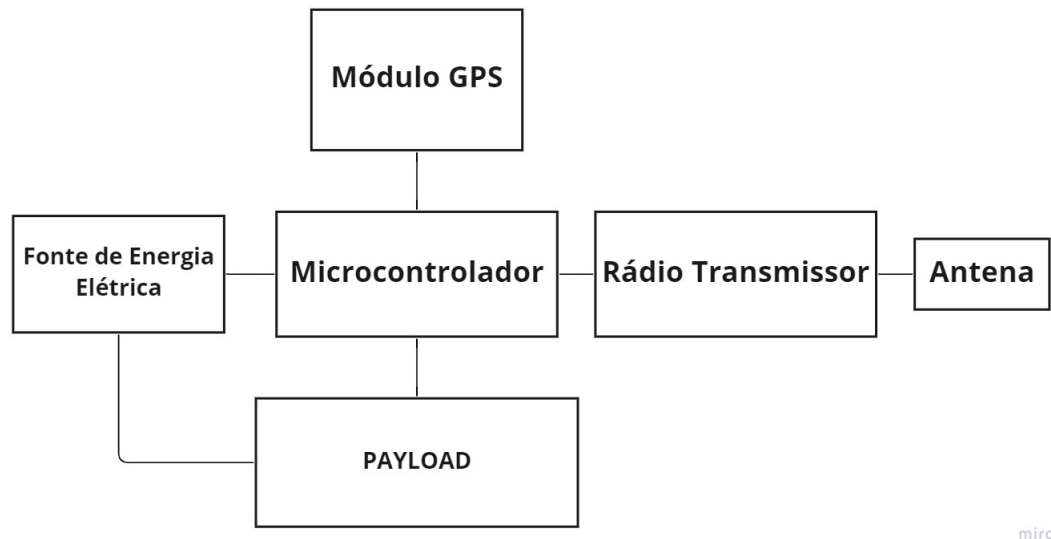


FIGURA 3.2 – Arquitetura física do segmento de voo. Fonte: Autor.

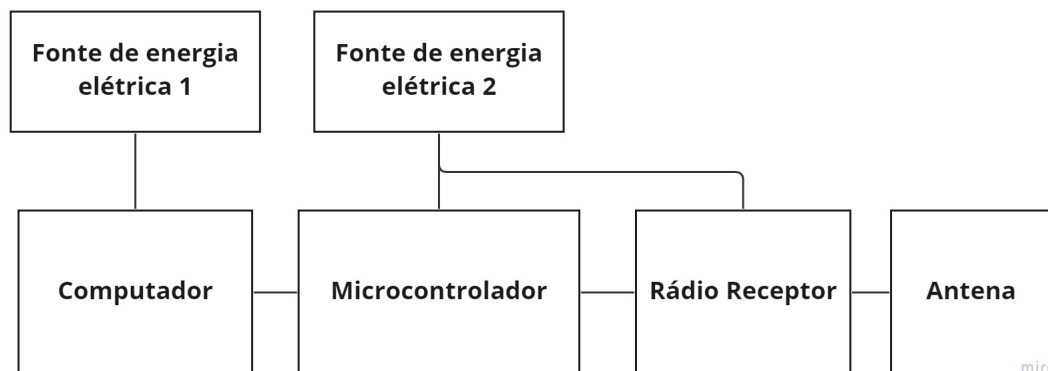


FIGURA 3.3 – Arquitetura física do segmento solo. Fonte: Autor.

No segmento de voo, o sistema proposto pretende prover ao *payload*, além da telemetria, uma infraestrutura possivelmente necessária para seu funcionamento, na forma de recursos, tais como fonte de energia elétrica e isolamento térmico. Salienta-se que o módulo GPS contém uma antena dedicada e que a fonte de energia elétrica pode conter componentes para ajuste de tensão de modo a garantir seu funcionamento em consonância com as especificações do *payload*. Optou-se, nessa primeira versão, em não possibilitar a gravação dos dados do *payload* em memória interna embarcada (como por exemplo um cartão SD) pela grande probabilidade de não ocorrer a recuperação do sistema após o voo.

No segmento solo, as fontes de energia elétrica 1 e 2 podem ser coincidentes ou distintas. Um computador faz-se necessário para a visualização e gravação dos dados da telemetria. Existe a possibilidade de substituição do microcontrolador por um adaptador de USB para Serial (FTDI *adapter*).

3.3 Escolha dos Componentes Utilizados

De modo a atender aos requisitos levantados sem elevar sobremaneira o custo da construção do protótipo, buscou-se eleger componentes que, de alguma maneira, já tivessem desempenho comprovado nas condições de operação. Em especial, foram analisados os componentes de prateleira (ou *commercial off-the-shelf* - COTS) já empregados por radiossondas comerciais.

Dessa forma, escolheu-se como microcontrolador a placa *Blue Pill* (STM32F103C8T6), a qual além de possuir um microcontrolador de mesmo fabricante do empregado na radiossonda RS41, é mais barata e mais rápida do que microcontroladores mais conhecidos e populares, como o presente na placa Arduino Uno (ATmega328P) [30]. Ademais, possui memórias Flash e RAM com o dobro da capacidade fornecida pelos seus concorrentes analisados.

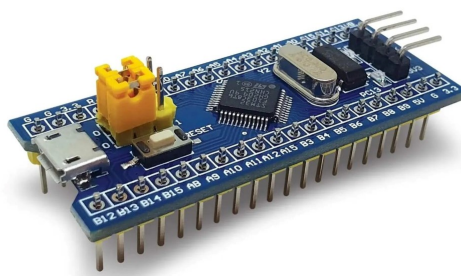


FIGURA 3.4 – Placa microcontroladora *Blue Pill* (STM32F103C8T6). Fonte: Autor.

Na escolha do par de transceptores (rádio transmissor e rádio receptor) buscou-se, além de atender ao critério de custo, um equipamento com longo alcance e baixo consumo de energia. Dentre os protocolos mais difundidos no mercado, optou-se pela tecnologia LoRa, por apresentar ambas as características, apesar de apresentar uma taxa de transferência de dados relativamente baixa, o que limita a aplicação do sistema a *payloads* com baixo volume de geração de dados, assim como ocorre com os sistemas de radiossondas comerciais. De acordo com normas da Anatel que regulamentam o protocolo no Brasil, a frequência destinada a essa tecnologia é a faixa de 915MHz a 928MHz e a potência máxima de transmissão para aplicações particulares com dispensa de licença de funcionamento é de 100 mW. Nessa faixa de frequência, uma boa opção é o rádio Ebyte LoRa modelo E220-900T22D.

A radiossonda RS41 utiliza uma faixa de transmissão de aproximadamente 403 MHz, e emite uma potência de aproximadamente 100 mW. Analisando a dependência do alcance em relação a frequência da onda e da potência de transmissão por meio da equação de Friss, pode-se perceber que a configuração de potência e frequência descritas no parágrafo anterior possui um alcance esperado menor que o da radiossonda RS41, fato que pode inviabilizar a recepção de dados do experimento, caso o balão se afaste muito da estação de solo devido à ação de ventos. Para aumentar o poder de transmissão, tem-se como alternativas aumentar a potência de transmissão, o que poderia ser feito com um transceiver Ebyte LoRa modelo E220-900T30D, o qual possui potência de 1 W (30 dBm) e/ou diminuir a frequência de transmissão, mantendo-se características semelhantes às do modelo anteriormente citado poderia-se escolher o rádio Ebyte LoRa E220-400T30D que possui frequência ajustável de 410,125 a 493,125 MHz e potência de até 1 W (30 dBm). Infelizmente, tal configuração necessita de outorga de autorização de uso de radiofrequência da Anatel, pois não pertence à banda ISM (*industrial, scientific and medical*) no Brasil, diferentemente do que ocorre na Europa, em que tal banda de frequência tem uso liberado para tal finalidade. Além disso, o módulo E220-400T30D possui preço ligeiramente mais elevado e não foi possível efetuar sua compra para esse projeto inicial. No entanto, um par de rádios da geração anterior Ebyte LoRa E32-433T30D (mesma frequência e potência do módulo E220-400T30D mas sem RSSI) foi gentilmente cedido pelo Prof. Dr. Mauro A. Alves para a realização de testes.



FIGURA 3.5 – Ebyte LoRa E220-900T22D. Fonte: Autor.

O fato dos modelos de rádio citados possuírem uma mesma estrutura física e interface, tornou viável o desenvolvimento do sistema de forma a ser compatível com ambos os modelos. Dessa forma, tem-se a flexibilidade de fazer a escolha de frequência e potência do rádio (além de seu custo) de acordo com as necessidades da missão em questão.

A escolha final do par de antenas para recepção e transmissão da telemetria de dados depende da frequência a ser utilizada. No entanto, como opções elegíveis, pensou-se em uma antena monopolo quarto de onda ou uma *rubber duck* para a transmissão e uma antena direcional do tipo Yagi para a recepção.



FIGURA 3.6 – Antena rubber duck para 915 MHz. Fonte: Autor.

A escolha do modelo de módulo GPS empregado se deu baseada no custo (optou-se pelo módulo GPS mais barato) e compatibilidade. Dessa forma, elegeu-se o módulo GPS GY-NEO6MV2, por ser extremamente acessível e de largo emprego em projetos dessa natureza. O módulo adquirido acompanha uma antena de cerâmica. Um fator importante é que o receptor GPS deve receber sinal de um número mínimo de satélites da constelação para o cômputo de diferentes informações, a saber: UTC - 1 satélite, latitude e longitude - 3 satélites, altitude - 4 satélites. O parâmetro velocidade informado pelo GPS não é muito preciso.



FIGURA 3.7 – Módulo GPS GY-NEO6MV2. Fonte: Autor.

Como fonte de energia elétrica, tem-se a pilha da marca Energizer modelo *Ultimate Lithium* AA2 como ideal em termos funcionais, pois por serem de lítio são mais leves que pilhas alcalinas e possuem uma excelente resistência a baixas temperaturas, além de grande durabilidade. Ademais, sua curva de descarga apresenta um patamar mais estável, garantindo estabilidade de tensão por um maior tempo. Pilhas desse modelo são utilizadas em radiossondas comerciais como a RS41. No entanto, salienta-se que tais pilhas possuem um custo mais elevado que o de pilhas comuns tipo AA. De modo a viabilizar a utilização de quatro ou mais pilhas AA, para conseguir a tensão padrão de 5V a ser fornecida para

o sistema (pois essa é a tensão típica dos componentes aqui destacados) planejou-se usar um módulo regulador de tensão *Step Down* ajustável DC-DC como o modelo Lm2596.



FIGURA 3.8 – Pilhas da marca Energizer modelo *Ultimate Lithium* AA. Fonte: Autor.



FIGURA 3.9 – Módulo regulador de tensão *Step Down*. Fonte: Autor.

3.4 Medidas de Inércia

TABELA 3.5 – Massa medida para cada componente em gramas.

COMPONENTE	Massa (g)
Microcontrolador STM32f103c8t6	7
GPS	20
LORA transceiver 1W	9
4 Pilhas de Lítio	60
Regulador de tensão	10
PCB	18
Caixa Térmica	27
Antena	50
Suportes, Conexões e <i>payload</i> atual	152
TOTAL	353

A Tabela 3.5 apresenta a massa medida em balança comum para cada item do sistema. Vale destacar que a massa total ficou condizente com a massa de projetos semelhantes [18] - o que permitiu validar os requisitos STBM1 E STBM7.

3.5 Custos

A Tabela 3.6 apresenta os custos para os principais componentes do segmento de voo do STBM. Nota-se que o valor mais elevado é referente às 4 pilhas de lítio. Destaca-se que o requisito STBM4 foi verificado com sucesso por meio da tabela citada.

TABELA 3.6 – Custos de produção por unidade do protótipo de voo do STBM, sem *payload*.

COMPONENTE	Custo (R\$)
Microcontrolador STM32f103c8t6	40
GPS	20
LORA transceiver 1W	50
4 Pilhas de Lítio	120
Regulador de tensão	12
PCB	5,5
Caixa Térmica	10
Antena	20
Suportes e Conexões	20
TOTAL	297,5

4 Construção, Configuração e Testes do Sistema

Neste quarto capítulo é descrito o processo de construção e de configuração de um protótipo do sistema. Descrevem-se, ainda, os testes realizados.

4.1 Construção e Configuração

Após a etapa de definição dos componentes a serem empregados, iniciou-se a construção do protótipo do sistema. Para isso foi necessário preparar o ambiente computacional para programar o microcontrolador STM32. Dentre as várias possibilidades de IDEs existentes, optou-se por trabalhar na IDE do Arduíno [30] devido a sua simplicidade e pela maior familiaridade do autor com esse ambiente de desenvolvimento. Para tal preparação, seguiu-se instruções difundidas na internet [31].

As primeiras validações de funcionamento do hardware, tanto do segmento de voo quanto do segmento solo, foram realizados através de montagem em *protoboard*. A prototipação é necessária para verificar se o projeto eletrônico está correto, eg. se as conexões foram feitas entre os pinos corretos, ademais permite que o software seja testado antes do desenvolvimento do hardware definitivo, o que ajuda a evitar e a corrigir problemas de software.

4.1.1 Rádios

Os rádios Ebyte LoRa possuem um software próprio para configuração, o qual pode ser baixado no site da fabricante [10]. Para configurar o componente é necessário utilizar um adaptador FTDI, realizando as conexões conforme representado na Figura 4.2. Existe também a possibilidade da utilização de um arduino UNO como adaptador FTDI, para isso basta conectar um jumper entre os pinos de *reset* e *ground*. Maiores detalhes podem ser encontrados através de tutoriais disponíveis na internet [9].

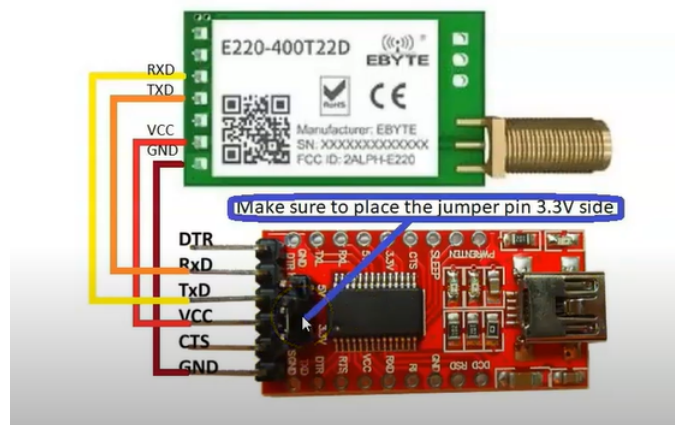


FIGURA 4.1 – Conexões entre adaptador FTDI e rádio Ebyte LoRa. Fonte: [9].

A interface gráfica do software de configuração dos rádios pode ser vista na Figura 4.2. Nela é possível escolher o canal a ser utilizado, a taxa de transmissão de dados, a potência de transmissão, dentre outros recursos, tais como o sinal RSSI para monitorar a potência recebida.

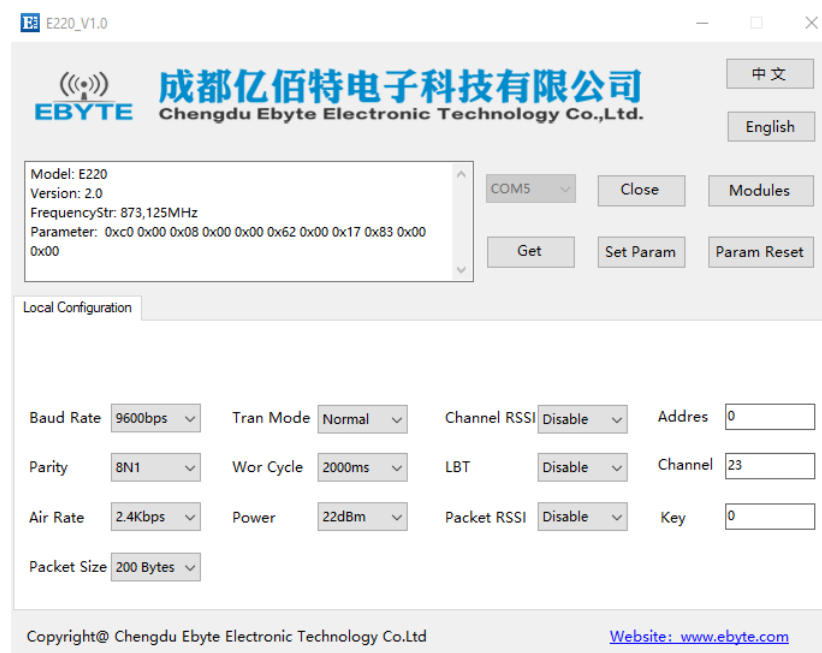


FIGURA 4.2 – Janela do software de configuração dos rádios Ebyte LoRa E220. Fonte: [10]

4.1.2 Conexões

Para programar a placa *blue pill* empregou-se um ST-Link V2, realizando-se as ligações apresentadas na Figura 4.3.

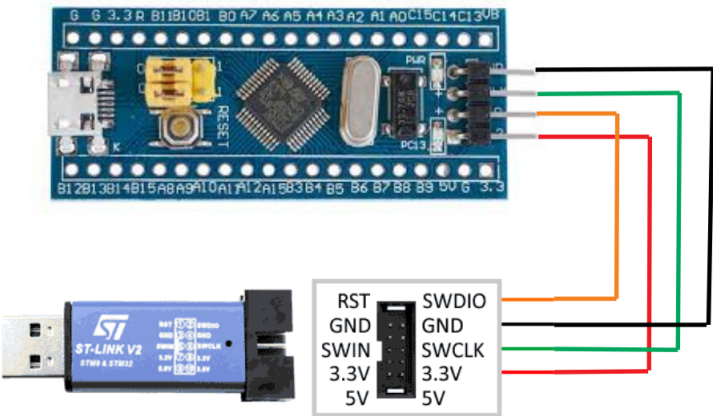


FIGURA 4.3 – Conexões entre STLink V2 e STM32. Fonte: [9].

A Figura 4.4 ilustra como se dá a conexão do rádio LoRa em uma das seriais do STM32.

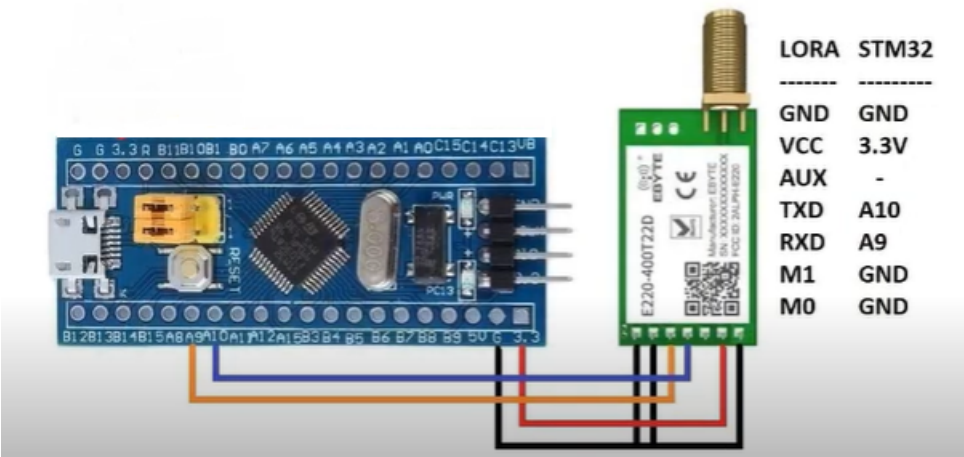


FIGURA 4.4 – Conexões entre rádio Ebyte LoRa e STM32. Fonte: [9].

A Figura 4.5 ilustra como se dá a conexão do módulo GPS em uma das seriais do STM32.

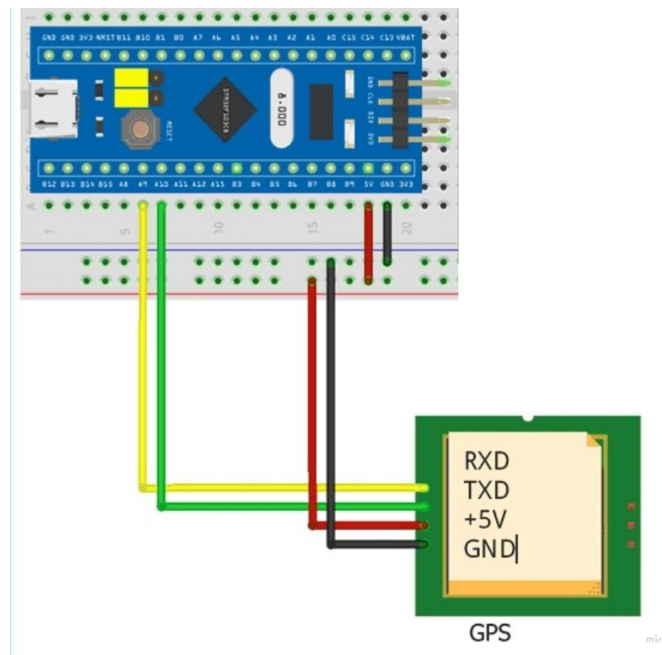
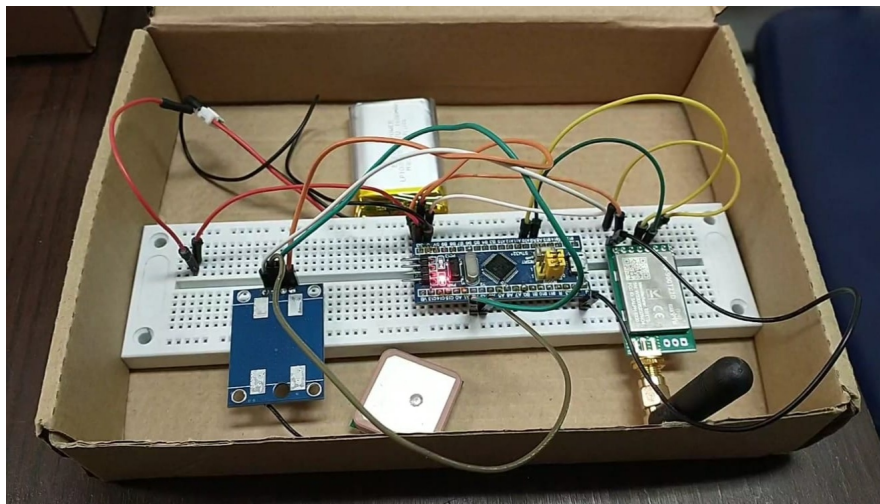


FIGURA 4.5 – Conexões entre Módulo GPS e STM32. Fonte: [11].

A Figura 4.6 mostra o sistema montado em *protoboard* e alimentado por uma bateria recarregável de Lítio-polímero, tal configuração possibilitou checar a efetividade das conexões.

FIGURA 4.6 – Montagem do sistema em *protoboard*. Fonte: Autor.

4.1.3 PCB e Estrutura

A placa de circuito impresso (PCB) é a estrutura fundamental do projeto, pois permite unir os diferentes componentes do sistema com maior robustez do que quando empregados os *jumpers* e a *protoboard* utilizados nas etapas anteriores. A ferramenta escolhida para a elaboração da placa de telemetria do STBM foi o software KiCad [32]. Os fatores

motivantes dessa escolha foram os recursos oferecidos pelo programa, que se mostram adequados dada a simplicidade do projeto de uma placa de apenas duas camadas, e a sua fácil aquisição e instalação, por se tratar de um software gratuito disponível na internet.

Optou-se por dividir o sistema em uma placa principal (contendo o microcontrolador, o rádio e o módulo de GPS) e uma placa secundária, para servir como interface de conexão com o *payload* e conter o subsistema de energia composto pela bateria e um regulador de tensão a serem definidos de acordo com especificações da carga útil, cujos dados serão transmitidos. As dimensões da placa principal foram definidas em 60 mm x 100 mm de modo a comportar os componentes de forma elegante e compacta conforme pode ser visto na Figura 4.8. Para o roteamento da placa foram utilizadas trilhas de 0,5 mm e vias de 0,8 mm de diâmetro.

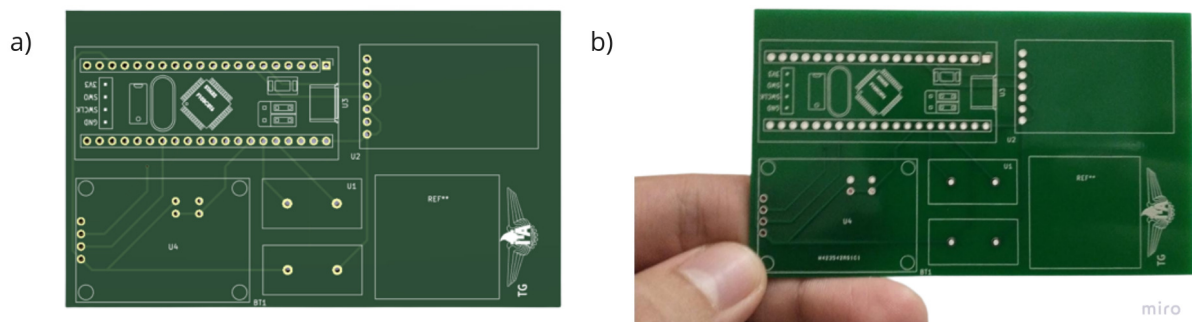


FIGURA 4.7 – Comparação entre (a) Representação em 3D da placa projetada no software KiCad e (b) Placa real fabricada na China. Fonte: Autor.

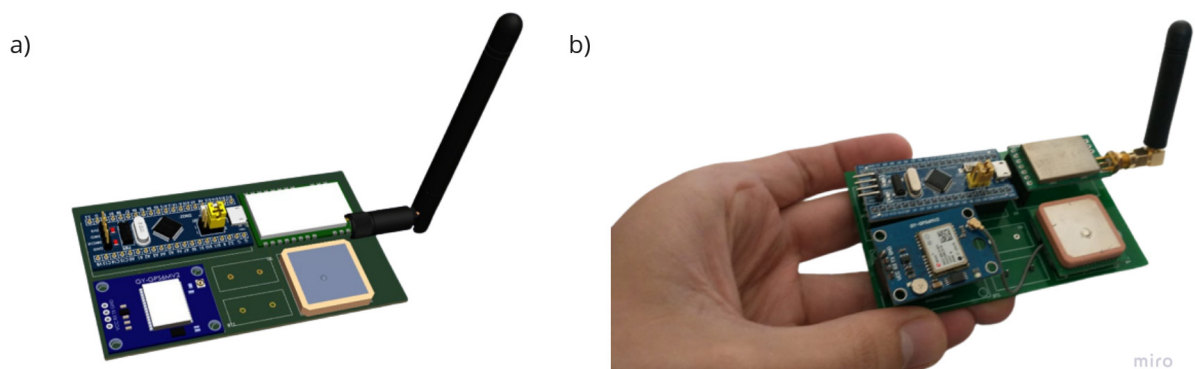


FIGURA 4.8 – Comparação entre (a) Representação em 3D gerada no KiCad da placa principal do STBM projetado com componentes já integrados e (b) Imagem real da placa principal do STBM manufaturada e com componentes já integrados. Fonte: Autor.

Após terminado o projeto da PCB, foram analisadas as possibilidades de confecção. Tentativas anteriores por parte do autor de produzir PCBs em laboratórios do ITA para outros projetos ao longo da graduação mostraram-se extremamente desgastantes e apresentaram um resultado final de baixa qualidade. Ademais, o mercado nacional de produção de PCBs se mostra uma alternativa extremamente custosa. Devido ao exposto,

decidiu-se por encomendar a fabricação das placas em uma empresa chinesa por meio de um site online de nome “PCB way” [33]. Tal prática de produção é corriqueira no âmbito das iniciativas técnicas extracurriculares do H8, de modo que possui qualidade notadamente comprovada.

Para a conexão entre as placas empregou-se espaçadores e porcas.

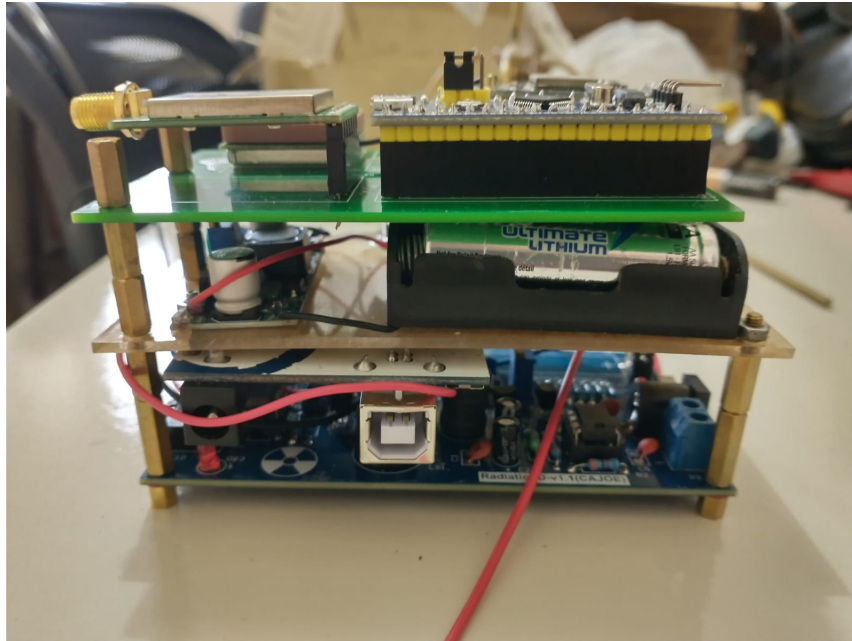


FIGURA 4.9 – Vista lateral do STBM integrado a uma placa de *payload*. Fonte: Autor.

Para garantir o isolamento térmico necessário para o funcionamento dos componentes, uma vez que estes não suportariam uma exposição direta às condições de temperatura apresentadas pela estratosfera, decidiu-se pela utilização de uma pequena caixa de poliestireno expandido (popularmente conhecido como isopor).

4.1.4 Antena Embarcada

No caso da antena embarcada no balão, devido às restrições de dimensões e de massa, inicialmente optou-se pela compra de uma antena *rubber ducky* (Figura 3.6), adquirida via internet. No entanto, como uma pesquisa na literatura especializada indicou que esse tipo de antena possui uma baixa eficiência, buscou-se uma outra alternativa que fosse mais adequada para um sistema de telemetria de longa distância.

Uma pesquisa pela internet [34] mostrou que muitos rádio amadores ao utilizarem a tecnologia LoRa, optam pela fabricação de uma antena um quarto de onda plano terra. Existem diversas calculadoras na internet que podem auxiliar no cálculo das medidas para a produção de uma antena quarto de onda de uma dada frequência [34].

A antena fabricada foi ensaiada na câmara anecóica do IFI para obtenção de seu diagrama de irradiação e do ganho. Também foi realizado o ensaio da antena comercial *rubber ducky* para analisar suas características e comparar os resultados obtidos para as duas antenas.



FIGURA 4.10 – Antena plano terra um quarto de onda fabricada para o STBM. Fonte: Autor.

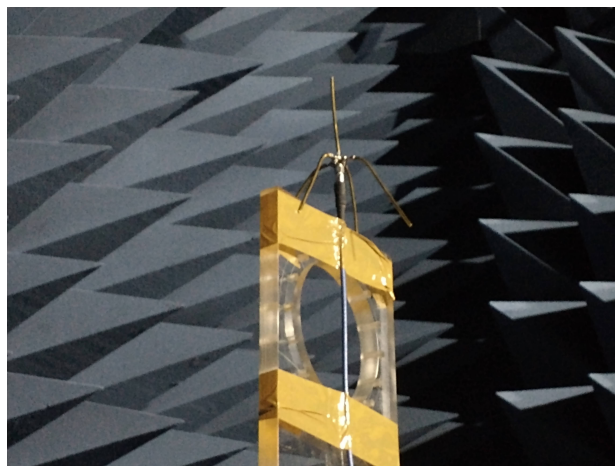


FIGURA 4.11 – Antena no momento do ensaio na câmara anecoica no IFI. Fonte: Autor.

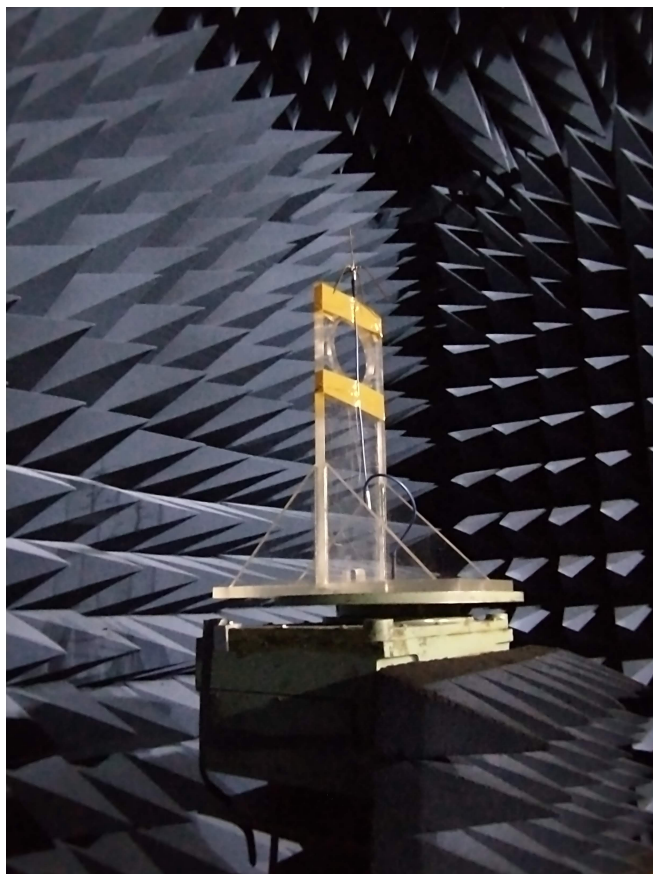


FIGURA 4.12 – Aparato de fixação da antena para teste em câmara anecoica no IFI. Fonte: Autor.



FIGURA 4.13 – Sistema de aquisição de dados da câmara anecoica do IFI durante a realização do ensaio. Fonte: Autor.

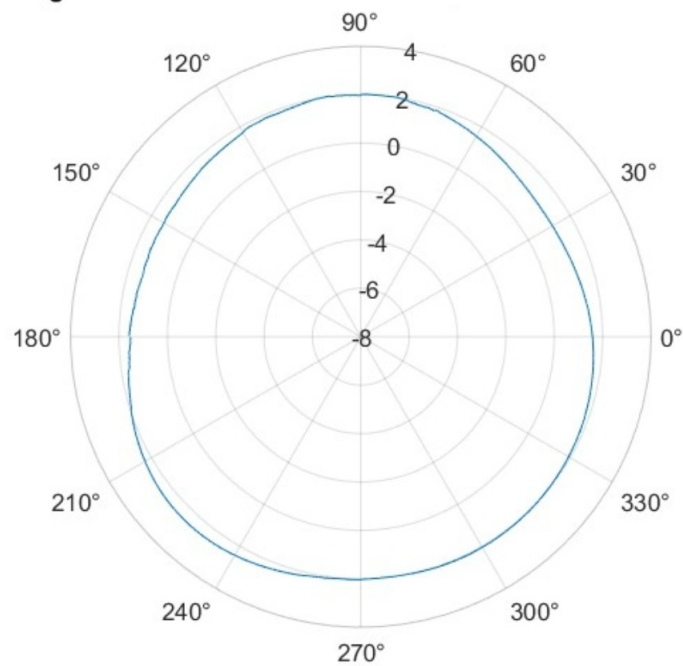
Diagrama Horizontal da antena 1/4 onda - Ganho em dBi

FIGURA 4.14 – Diagrama horizontal obtido para a antena plano terra quarto de onda fabricada. Fonte: Autor.

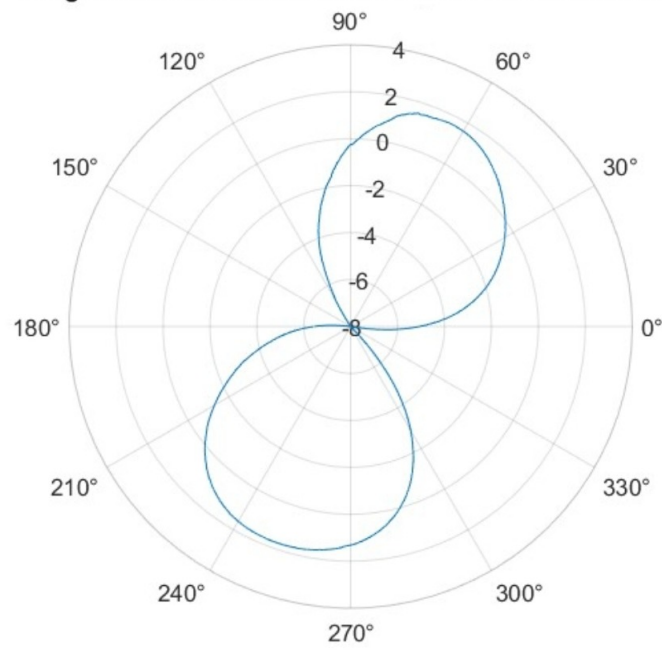
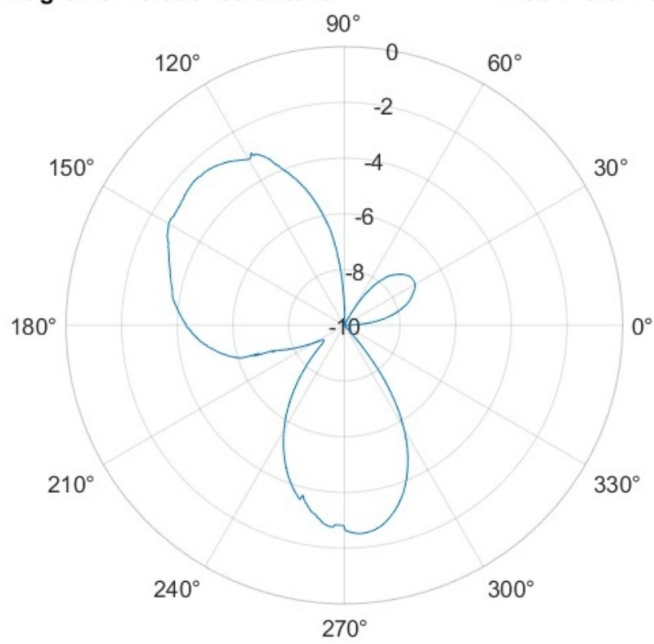
Diagrama Vertical da antena 1/4 onda - Ganho em dBi

FIGURA 4.15 – Diagrama vertical obtido para a antena plano terra quarto de onda fabricada. Fonte: Autor.

Diagrama Vertical da antena rubber duck - Ganho em dBi

FIGURA 4.16 – Diagrama vertical obtido para a antena comercial *rubber duck*. Fonte: Autor.

Pode-se constatar pelos gráficos apresentados que a antena de fabricação caseira confeccionada neste trabalho possui um ganho bem mais elevado que a antena helicoidal adquirida inicialmente, conforme o esperado. Apesar da antena *rubber duck* possuir menores dimensões, a antena monopolo possui menor custo e um processo de fabricação bastante simples, e pode ser posicionada no exterior do isolamento térmico sem prejuízo à configuração de voo final, conforme realizado por radiossondas comerciais. Com isso, a antena monopolo, portanto, deve ser a escolhida para uma configuração de voo final.

Outra análise realizada a cerca das antenas apresentadas foi a medição do VSWR. Para isso utilizou-se um nano VNA, do tipo apresentado na Figura 2.11. Inicialmente foi realizada a calibração do nano VNA diretamente no aparelho ligado ao cabo coaxial empregado no sistema. A Figura 4.17 apresenta as cargas de calibração utilizadas. O procedimento de calibração completo pode ser facilmente encontrado na internet. Após isso, conectou-se o VNA ao computador e fez-se uso do software NanoVNA-Saver [35].



FIGURA 4.17 – Cargas de calibração do nano VNA. Fonte: Autor.

As medições realizadas mostraram que para a antena monopolo fabricada o parâmetro VSWR ficou abaixo de 1,5 para uma banda próxima a 900 MHz, conforme o desejado.

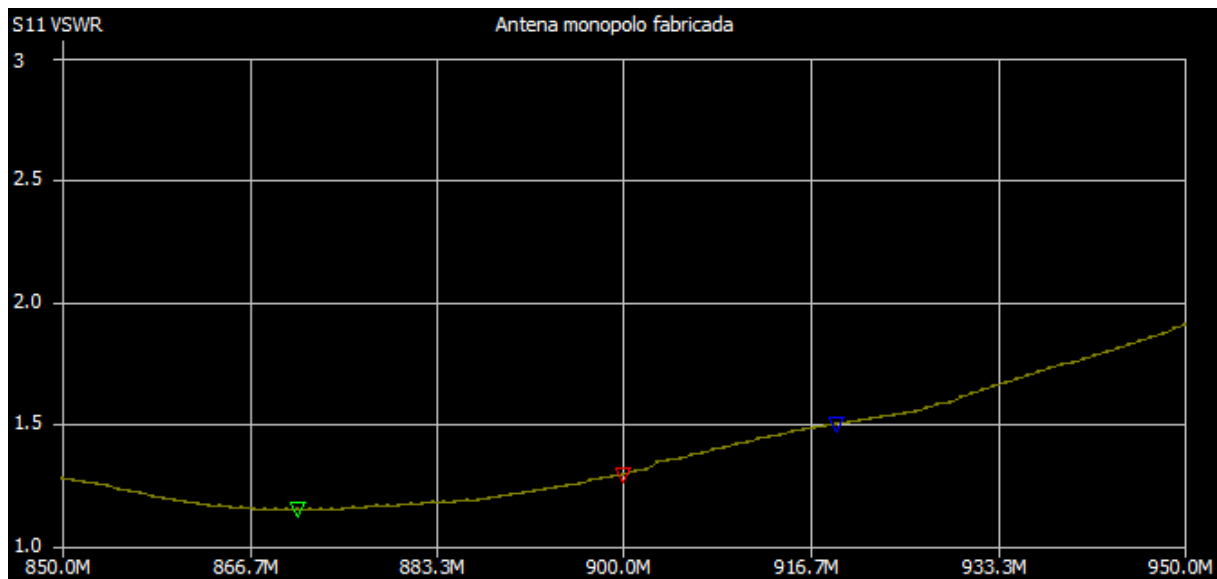


FIGURA 4.18 – Variação do parâmetro VSWR com a frequência para a antena monopolo fabricada. Fonte: Autor.

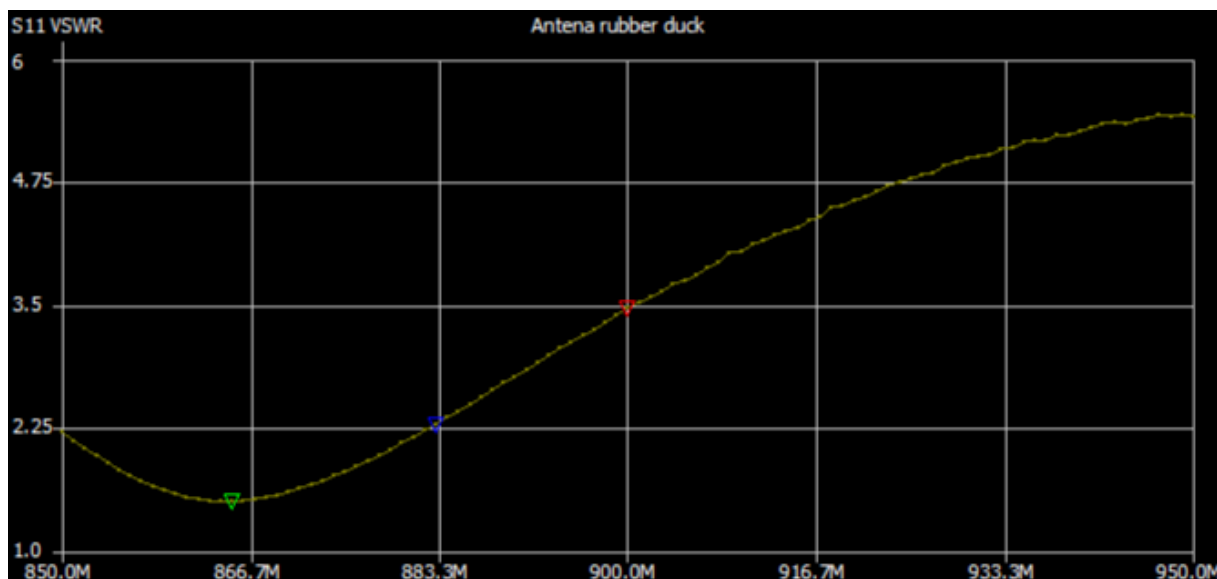


FIGURA 4.19 – Variação do parâmetro VSWR com a frequência para a antena *rubber duck* helicoidal adquirida inicialmente. Fonte: Autor.

Já para a antena *rubber duck* temos uma banda menor, com frequência ótima em aproximadamente 865 MHz. Fez-se ainda a análise de outro exemplar do mesmo modelo da antena *rubber duck* citada, a qual indicou uma frequência menor que a primeira. Tal resultado mostra, apesar da incerteza do equipamento empregado, que as próprias antenas de mesmo modelo e fabricante adquiridas na internet não tem um comportamento idêntico. Os dados completos das medições pelo VNA encontram-se no apêndice.

4.1.5 Estação de Solo

Seguindo-se a arquitetura estabelecida para o segmento solo na Seção 3.2.3 fez-se a prototipagem da estação de solo para receber os dados enviados pelo balão.

Como componente principal da estação tem-se um rádio Ebyte LoRa 900 MHz. Uma vez que em algumas missões pode ser de interesse do pesquisador responsável pelo experimento embarcado o envio de telecomandos para o segmento de voo, faz-se necessário a utilização do rádio em sua versão de 1 W de potência (E220-900T30D). No entanto se não houver tal necessidade a versão de menor potência (E220-900T22D) pode ser utilizada, uma vez que ambas apresentam a mesma sensibilidade.

Ainda nessa linha para garantir a possibilidade do envio de telecomandos, faz-se necessária a utilização de uma fonte AC/DC ou bateria ligada diretamente ao rádio, uma vez que a corrente necessária para transmissão pode queimar a porta USB do computador caso o rádio seja alimentado diretamente por ela. Vale destacar que não se deve esquecer de conectar todos os pinos de terra (*ground*) para correto funcionamento do sistema.



FIGURA 4.20 – Fonte AC-DC com saída de 5 V empregada na estação de solo. Fonte: Autor.

Para a conexão entre o rádio e um computador, conforme apresentado na arquitetura já citada, foi empregado um microcontrolador, para o qual foram levantadas duas possibilidades. A primeira é a utilização de um STM32, mesmo modelo empregado no segmento de voo. Para tanto faz-se necessário também a presença de um adaptador USB-serial conforme já descrito na Seção 4.1.1. A segunda possibilidade é a utilização de um Arduino UNO atuando como adaptador diretamente. Nessa segunda configuração, deve-se empregar um conversor de nível lógico caso se queira enviar telecomandos para o segmento de voo, uma vez que a lógica do arduíno é 5 V e a do rádio Ebyte LoRa é 3,3 V. A não utilização do conversor citado para o envio de telecomandos pode ocasionar queima do rádio transmissor.

Como forma de redundância, decidiu-se pelo emprego simultâneo de dois sistemas de recepção independentes, funcionando com antenas de tipos diferentes, de modo a complementarem-se. Em um dos sistemas decidiu-se pelo emprego de uma antena yagi da fabricante Aquário, modelo 17dbi 900mhz Cf-917, enquanto no outro deve-se operar com a antena monopolo quarto de onda (identica à embarcada no segmento de voo). Dessa forma, caso ocorra perda de apontamento por parte da yagi nos primeiros minutos de missão, pode-se fazer a correção por meio da posição GPS recebida no sistema com emprego da antena omnidirecional.

Para garantir uma menor perda de potência, optou-se pela utilização de um cabo coaxial de apenas 1 m de comprimento conectando rádio à respectiva antena. A antena da Aquário possui conector fêmea do tipo N, portanto faz-se necessário o uso de um adaptador ou cabo adaptador para conector SMA, tipo empregado pelo rádio.

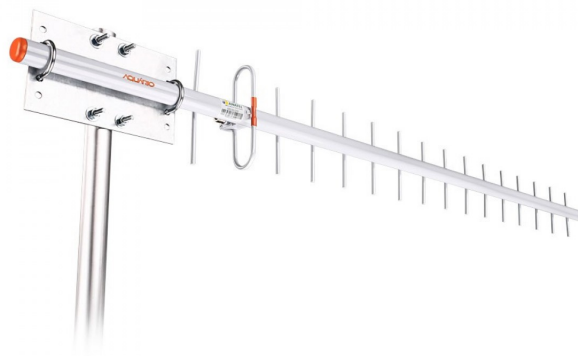


FIGURA 4.21 – Antena Yagi da fabricante Aquario modelo 17dbi 900mhz Cf-917 com 16 elementos. Fonte: [2].

4.1.6 *Payload*

A plataforma aqui desenvolvida possibilitará, já em suas primeiras versões desenvolvidas, a realização de inúmeros experimentos científicos idealizados por professores e pesquisadores do ITA e demais instituições de pesquisa, e de interesse para a comunidade científica nacional. Dentre os experimentos passíveis de serem embarcados como carga útil nesse projeto, destacamos os do Prof. Dr. Inacio Malmonge Martim, pesquisador deste instituto, que possui vasta experiência na área de radiação e no emprego de balões científicos. Ele idealizou experimentos de medição do perfil da radiação ionizante atmosférica

por meio de tubos Geiger embarcados em balões.



FIGURA 4.22 – Tubo Geiger utilizado no experimento. Fonte: Autor.

O experimento consiste de um tubo Geiger construído no laboratório de Física Atmosférica e Solar de Moscou (Dolgaproudny), Rússia. O tubo utilizado modelo CTC-6 de 19 cm de comprimento por 2 cm de diâmetro, contendo argônio e outros gases a baixa pressão, é submetido a uma tensão de aproximadamente 500 V por meio de uma placa dedicada a elevar o potencial base de 5 V para a alta voltagem necessária à ionização do gás presente no tubo. Além disso, a placa possui um amplificador que atua no sinal gerado na ionização do gás interno devido à radiação. O circuito impresso possui origem chinesa e originalmente funciona com um Geiger de menores dimensões, conforme apresentado na Figura 4.25. Um arduino UNO faz a contagem do número de pulsos emitidos da placa do Geiger e transmite tal dado ao sistema de telemetria [36].



FIGURA 4.23 – Placa utilizada com o Geiger. Fonte: Autor.

A obtenção de uma série histórica atualizada e do monitoramento dos níveis de radiação atmosférica ionizante no Brasil faz-se necessária tendo em vista possíveis agravamentos de tensões internacionais envolvendo grandes potências nucleares, o que é ressaltado pelo recente conflito envolvendo a Rússia e a Ucrânia, e a consequente contaminação do ar por radiação transportada através dos ventos da alta atmosfera.

Nessa primeira versão do sistema optou-se, por questão de simplicidade, por oferecer apenas um canal serial ao *payload*.

Ademais, idealiza-se experimentos para monitorar os níveis de partículas na atmosfera oriundas de eventos naturais tais como a erupção do Hunga Tonga, vulcão localizado no arquipélago de Tonga que se situa na Polinésia Ocidental, o qual entrou em erupção no corrente ano de 2022, com especialistas tendo relatado que havia uma coluna de 5 km de cinzas, vapor e gás subindo a uma altitude de 18 a 20 km acima do nível do mar, com consequente disseminação de partículas por todo o globo [37].

4.1.7 Subsistema de Energia

O subsistema de energia foi montado sobre uma placa de acrílico, a qual também possui importante papel estrutural, de dimensões 6,6 cm x 11,4 cm. Ademais, utilizou-se um suporte com capacidade para 4 pilhas ligadas em série, o qual fixou-se na placa por

meio de parafusos. A saída de tensão do conjunto de pilhas conecta-se a um módulo regulador de tensão *Step Down* ajustável DC-DC como o modelo Lm2596, ajustado de modo a obter-se uma saída de 5 V. Tal tensão de saída foi a escolhida por ser a de melhor desempenho para o rádio, conforme informado em datasheet.

O consumo de cada componente do sistema pode ser resumido pela Tabela 4.1. Por meio de informações presentes no datasheet da pilha Energizer modelo *Ultimate Lithium* AA, foi possível verificar que a configuração estabelecida consegue fornecer a corrente necessária por pouco mais de 180 minutos - requisito STBM6.

TABELA 4.1 – Consumo médio dos principais componentes do STBM e do *payload* estabelecido. Fonte: Autor.

COMPONENTE	Unidades	TENSÃO (V)	CORRENTE (mA)	POTÊNCIA (mW)
STM32f103c8t6	1	5	15	75
GPS	1	5	40	200
LORA transceiver 1W	1	5	6,20E+02	3,10E+03
ARDUINO UNO	1	5	30	150
PCB Tubo Geiger	1	5	10	50
TOTAL	6	-	7,15E+02	3,58E+03

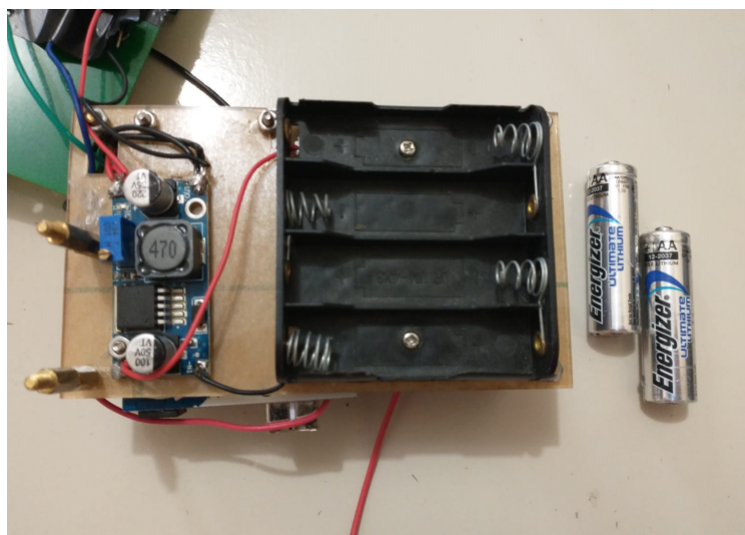


FIGURA 4.24 – Subsistema de energia do STBM. Fonte: Autor.

Ademais, na placa de telemetria, foram alocados dois resistores de modo a constituir um divisor de tensão destinado a leitura de nível da bateria. Tal item pode ser visto no esquemático disponível no Apêndice A.

4.1.8 Software

O software embarcado no microcontrador presente na placa principal do STBM, essencialmente, realiza a leitura dos dados provenientes de dois canais seriais, um referente ao GPS e outro ao *payload*, e os envia por um terceiro canal serial ligado ao rádio. Todos os seriais foram configurados com taxa de 9600 bits/s.

Um watchdog foi implementado para resguardar o sistema contra a ocorrência de falhas inesperadas (implementação comum em códigos embarcados).

Neste primeiro momento, a configuração do GPS - modo 6, *Airborn* ($< 1g$) e taxa de 1 Hz - foi realizada através do software u-center [38] da fabricante u-blox. No entanto, em configurações futuras pode-se implementar uma mudança de configuração em voo através de telecomandos enviados da estação de solo.

O código completo está disponível no Apêndice C.

4.2 Testes do Sistema

4.2.1 Teste de Robustez

O teste de robustez (*endurance test*) realizado consistiu em monitorar o sistema em funcionamento durante horas a fio para verificar a ocorrência de falhas. O teste foi realizado na sala 225 do prédio de Ciências Fundamentais do ITA, no dia 17 de outubro de 2022, tendo o sistema funcionado por aproximadamente 24 horas sem apresentar falhas. Durante esse teste a alimentação do sistema ficou a cargo de uma fonte DC ajustável ligada na entrada do regulador de tensão de modo a simular a tensão obtida por meio da associação de pilhas. Ao longo do teste o sistema fez a transmissão de dados do *payload* e do GPS, empregando taxa de 2,4 kbps. Dessa forma, validou-se tanto o requisito STBM5 quanto o requisito STBM8.

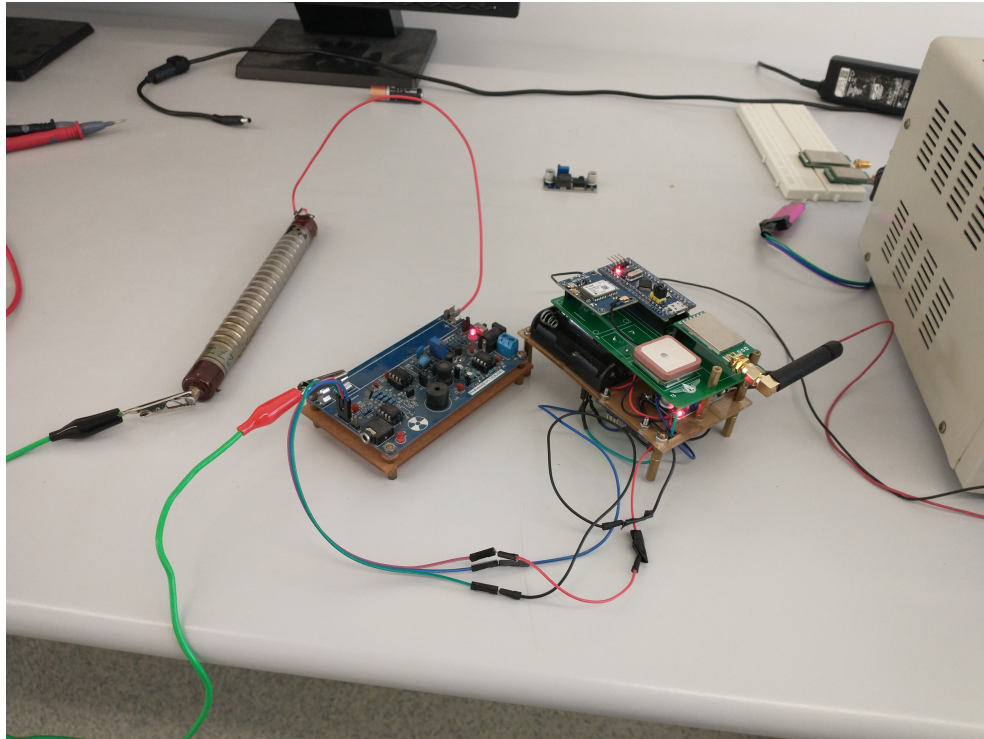


FIGURA 4.25 – STBM no teste de robustez do sistema. Fonte: Autor.

4.2.2 Teste Térmico

Com o objetivo de obter dados sobre a performance do isolamento térmico do sistema em condições de temperatura próximas às do ambiente em que ele deve funcionar, idealizou-se um teste térmico. O teste consiste em inserir o sistema (já encapsulado em sua proteção térmica) em uma caixa térmica contendo gelo seco, passando-se então a monitorar a temperatura interna do STBM por cerca de uma hora. O gelo seco possui temperatura de sublimação de $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperatura esta que pode simular as condições presentes na estratosfera. Com a realização deste teste pode-se validar o requisito STBM2.

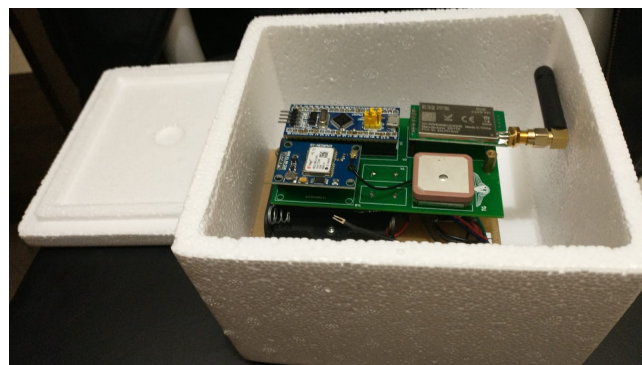


FIGURA 4.26 – STBM posicionado dentro do isolamento térmico. Fonte: Autor.

4.2.3 Cálculo do *Link Budget* e Caracterização do Link a Curta Distância

Um cálculo inicial do *link budget* foi realizado através da equação de Friss, valendo-se de uma implementação em calculadora online [39]. Os resultados obtidos deste cálculo inicial mostravam um alcance teórico extremamente elevado para o sistema. Isso não está correto pois deve-se levar em consideração que no mundo real existem perdas. Assim, de modo a inserir um fator de correção na previsão, fez-se uma medida da potência recebida a curta distância. Tais medidas foram realizadas apenas com as antenas *rubber duck* pois não houve tempo hábil para preparar um par de antenas monopolo quarto de onda, ou para utilização da antena yagi adquirida. Além disso, por não ter sido possível a aquisição do rádio de 1 W, utilizou-se rádio de 250 mW.

TABELA 4.2 – Teste realizado com transmissor 250 mW e antenas *rubber duck*. Fonte: Autor.

Distância	Antenas	Teórico dBm	Valor recebido dBm	Alcance Teórico	Alcance previsto	Alcance previsto com transmissor 1W
0,44km	Linear/Linear	-56,2	-70	265 Km	44,7 Km	89,4 Km
1,35km	Linear/Linear	- 64,14	-80	265 Km	43,2 Km	86,4 Km

4.2.4 Teste de Saturação do *Payload*

Para o funcionamento conjunto do par *bus-payload*, realizou-se um teste de saturação do contador Geiger embarcado com o conjunto final em funcionamento na sala do 225 do prédio de Ciências Fundamentais do ITA. Foram utilizadas diversas fontes radioativas tais como areia monazítica das praias de Guarapar-ES e outras amostras apresentadas na Figura 4.27.



FIGURA 4.27 – Algumas das amostras utilizadas durante os testes. Fonte: Autor.

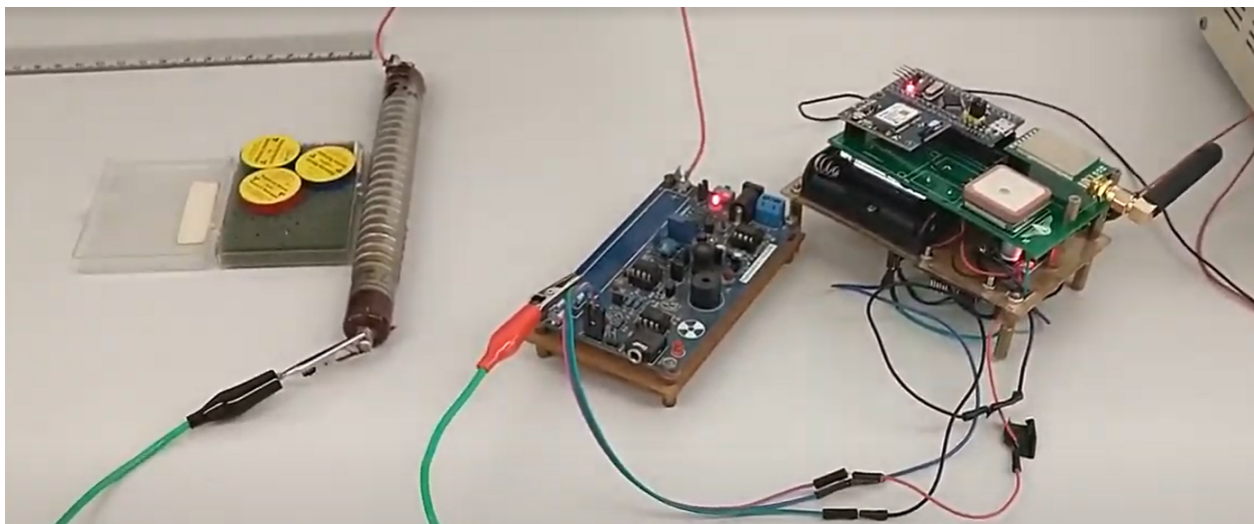


FIGURA 4.28 – STBM no teste de saturação da carga útil. Fonte: Autor.

TABELA 4.3 – Contagens obtidas para diferentes amostras radioativas posicionadas ao lado do tubo Geiger. Fonte: Autor.

Amostra	Contagens por minuto
Ambiente	120
Areia Monazítica	300
Cs-137; Sr-90; Po-210;	900

O *payload* e o sistema de telemetria apresentaram funcionamento nominal durante o teste, com o número de contagens do tubo Geiger aumentando à medida que se utilizava uma amostra radioativa mais forte - conforme o esperado. Nesse teste, a telemetria fez uso da antena *rubber duck* helicoidal, de menor volume e mais fácil manuseio, devido à proximidade entre o par transmissor e receptor possibilitar o emprego dessa antena.

5 Conclusão

5.1 Considerações Finais

Neste trabalho, realizou-se o projeto e a prototipagem de um sistema de telemetria para balões meteorológicos, bem como sua integração com uma carga útil funcional, a saber, um contador Geiger. Fez-se a seleção dos componentes COTS mais adequados para comporem o sistema em questão, baseando-se nos requisitos levantados após análise do conceito de operações. Dimensionou-se um subsistema de energia de modo a alimentar tanto o sistema de telemetria quanto sua carga útil. Foi produzida e ensaiada uma antena monopolo quarto de onda, a qual apresentou um bom desempenho. Foram desenhadas e fabricadas placas de circuito impresso para o sistema. Além disso, montou-se uma estação de solo para operar junto com o sistema embarcado no balão. Com isso, pode-se afirmar que os objetivos propostos foram atingidos com louvor.

O desenvolvimento deste projeto, apesar da simplicidade de certos conceitos aqui tratados, mostrou-se ser um grande desafio. Durante a realização deste trabalho o autor teve de empenhar grande parte dos conhecimentos adquiridos ao longo dos cinco anos de formação em Engenharia Aeroespacial, além de se iniciar em muitos outros campos.

5.2 Trabalhos Futuros

Uma extensão deste trabalho pode ser a implementação de melhorias e atualizações no sistema desenvolvido. Além disso, deve-se atentar para a necessidade de implementação de certos recursos, como por exemplo uma interface gráfica específica para a estação de solo, a qual facilite o envio de telecomandos e o armazenamento e interpretação dos dados recebidos do balão. Ademais, pode-se trabalhar no projeto de um subsistema de energia de mais baixo custo, sem perda de confiabilidade. Outra sugestão é o projeto e construção de uma antena direcional para a estação de solo do sistema, de modo a dispensar a compra da antena yagi comercial apresentada. Alguns estudos foram feitos nesse sentido, usando projetos de rádio amadores e softwares de modelamento de antenas, mas sem resultados satisfatórios até o momento.

Referências

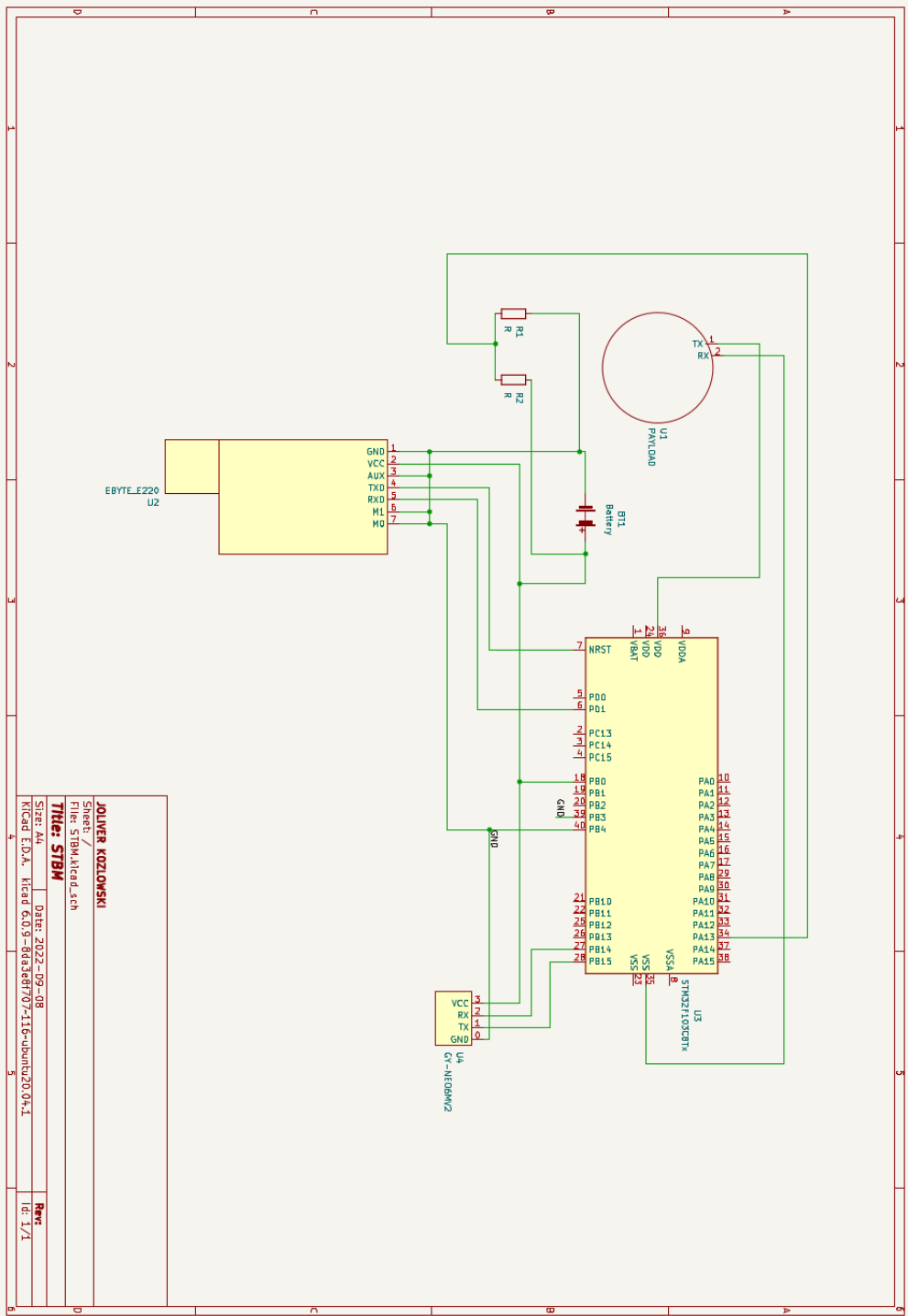
- [1] The American Radio Relay League. **The ARRL Antenna Book**: For radio communications. 23rd. ed. USA: ARRL, 2015. ix, 22, 23, 24, 26, 30, 31, 33
- [2] AQUARIO. **CF-917 Antena Celular 900MHz 17dBi**. 2022. Disponível em: <<https://aquario.com.br/produto/antena-externa-celular-900mhz-17db-cf-917/>>. ix, xi, 28, 64
- [3] RF, E. **Coaxial Cable Construction**. Disponível em: <<https://www.everythingrf.com/community/coaxial-cable-construction>>. ix, 30
- [4] ENRENFRIED, M. V. **Stratospheric Balloons**: Science and commerce at the edge of space. [S.l.]: Springer, 2021. ix, 19, 35, 36
- [5] TOOLBOX, T. E. **U.S. Standard Atmosphere vs. Altitude**. ix, 37
- [6] WIKIPEDIA. **U.S. Standard Atmosphere**. x, 38
- [7] VAISALA. **Vaisala Upper Air Radiosondes**. 2022. Disponível em: <<https://www.vaisala.com/en/products/weather-environmental-sensors/upper-air-radiosondes-rs41>>. x, 39
- [8] ALLE, A. D. S. **VAISALA RS41-SG - radiosonde**. 2014. Disponível em: <<http://air-radorama.blogspot.com/2014/03/vaisala-rs41-sg-radiosonde.html>>. x, 39, 40
- [9] MOHIDEEN, N. **Micro Peta**: Micro-controllers, wireless transmission and database. 2021. Disponível em: <<https://www.micropeta.com/>>. x, 52, 53, 54
- [10] Chengdu Ebyte Electronic Technology Co.,Ltd. **Site da Ebyte**. 2022. Disponível em: <<https://www.cdebyte.com/>>. x, 52, 53
- [11] THANGAVEL, P. **How to Use GPS module with STM32F103C8 to Get Location Coordinates**. circuitdigest, 2019. Disponível em: <<https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/interfacing-stm32f103c8-with-gps-module-to-track-location-coordinates>>. x, 55

- [12] YAJIMA, N.; IZUTSU, N.; IMAMURA, T.; ABE, T. **Scientific Ballooning**: Technology and applications of exploration balloons floating in the stratosphere and the atmospheres of other planets. [S.l.]: Springer, 2009. 19
- [13] WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation**. 7rd. ed. CH-1211 Geneva 2, Switzerland: Chairperson, Publications Board, 2008. 20
- [14] INPE. **SESLB: Setor de Lançamento de Balão**. Disponível em: <<http://www.slb.inpe.br/>>. 20
- [15] ABCDOABC. **Instituto Mauá de Tecnologia lança balão de sondagem de alta altitude**. Disponível em: <<https://www.abcdoabc.com.br/sao-caetano/noticia/instituto-maua-tecnologia-lanca-balao-sondagem-alta-altitude-66162>>. 20
- [16] ZENITH Aerospace. Disponível em: <<https://zenith.eesc.usp.br/en/zenith>>. 20
- [17] AEB/MCTI. **Missão Aldebaran-I**: Lançamento do balão estratosférico da missão aldebaran-i. 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/entregas/2021/aeb-mcti-lancamento-do-balao-estratosferico-da-missao-aldebaran-i>>. 20
- [18] ITACUBE 2021: Projeto itacube 2021, em parceria com o iae, lançou cubesat a 30 km de altitude. 2021. Disponível em: <<http://www.ita.br/noticias/alunosdoitalanamsatlitenaatmosfera>>. 20, 51
- [19] HUANG, Y.; BOYLE, K. **ANTENNAS**: From theory to practice. [S.l.]: John Wiley / Sons, 2008. 22, 23, 25, 28, 29, 30, 31, 32, 34
- [20] PY4ZBZ. **Polarização de Ondas**. qsl.net, 2005. Disponível em: <<https://www.qsl.net/py4zbz/antenas/polarizacao.htm>>. 23, 24
- [21] BLATTENBERGER, K. **Electronic Warfare and Radar Systems Engineering Handbook**: Polarization. RF Cafe. Disponível em: <<http://www.rfcafe.com/references/electrical/ew-radar-handbook/polarization.htm>>. 27
- [22] ANTENNA Theory - Helical. Disponível em: <https://www.tutorialspoint.com/antenna_theory/antenna_theory_helical.htm>. 27
- [23] LIANG, O. **The Best 5.8GHz Antenna for FPV Drone**. 2017. Disponível em: <<https://oscarliang.com/best-fpv-antenna/#the-best-fpv-antennas-for-mini-quad>>. 27
- [24] PY4ZBZ. **O comprimento do cabo coaxial**: Folclore versus técnica. qsl.net, 2005. Disponível em: <<https://www.qsl.net/py4zbz/antenas/comcabo.htm>>. 30

- [25] INC., D. I. **Signal strength and the RSSI pin**. 2021. Disponível em: <https://www.digi.com/resources/documentation/Digidocs/90001456-13/concepts-/c_rssi_pin_and_signal_strength.htm?tocpath=Signal>. 33
- [26] RF, E. **ISM Frequency Bands**. 2018. Disponível em: <<https://www.everythingrf.com/community/ism-frequency-bands>>. 35
- [27] SITE da Anatel. 2018. Disponível em: <<https://www.gov.br/anatel/pt-br>>. 35
- [28] DUBOIS, J. L.; MULTHAUF, R. P.; ZIEGLER, C. A. **The Invention and Development of the Radiosonde**: with a catalog of upper-atmospheric telemetering probes in the national museum of american history, smithsonian institution. [S.l.]: SMITHSONIAN INSTITUTION, 2002. 38
- [29] (MCA) 105-9: Manual de estações meteorológicas de altitude, 2022. Rio de Janeiro: [s.n.], 2016. Disponível em: <<https://publicacoes.decea.mil.br/filtro?s=Meteorologia>>. 40, 41
- [30] ARDUINO IDE. 2022. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/software>>. 47, 52
- [31] WATSON, R. How to program the stm32 “blue pil” with arduino ide. **Maker Pro**, 2019. Disponível em: <<https://maker.pro/arduino/tutorial/how-to-program-the-stm32-blue-pill-with-arduino-ide>>. Acesso em: 15 ago. 2022. 52
- [32] KiCad Development Team. **KiCad**. 2022. Disponível em: <<https://www.kicad.org/>>. 55
- [33] PCBWay. **Site da PCBWay**. 2022. Disponível em: <<https://www.pcbway.com/>>. 57
- [34] Moukd: Amateur Radio blog, projects and electronics. **1/4 Wave Ground Plane Antenna Calculator**. Disponível em: <<https://m0ukd.com/calculators/quarter-wave-ground-plane-antenna-calculator/>>. 57
- [35] SOFTWARE NanoVNA-Saver. Disponível em: <<https://github.com/NanoVNA-Saver/nanovna-saver>>. 61
- [36] MARTIN, I. M.; GOMES, M. P.; CARVALHO, R. R. F. de; GOMES, R. Study of a portable experimental set for the monitoring of ionizing radiation in the tropical region of brazil. **Journal of Environmental Science and Engineering A** 6, David Publishing, v. 6, p. 144–148, 2017. 65

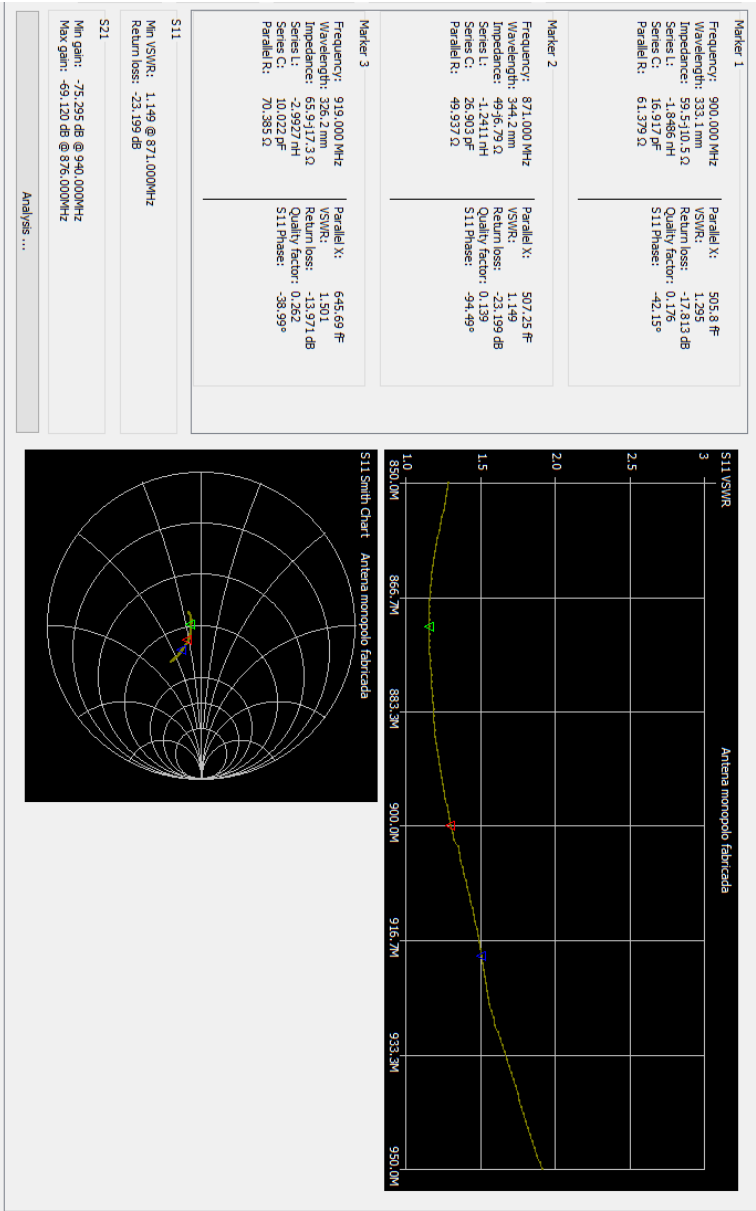
-
- [37] TERRY, J.; GOFF, J. **Tonga volcanic eruption and tsunami, January 2022**: sub-tuloglobally the most significant opportunity to observe an explosive and tsunamigenic submarine eruption since ad 1883 krakatau. *Geoscience Letters*, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/s40562-022-00232-z>>. 66
- [38] UBLOX. **u-center**: Gnss evaluation software for windows. Disponível em: <<https://www.u-blox.com/en/product/u-center>>. 68
- [39] PASTERNAK. **RF Friis Transmission Calculator Formula**. Disponível em: <<https://www.pasternack.com/t-calculator-friis.aspx>>. 70

Apêndice A - Esquemático da PCB

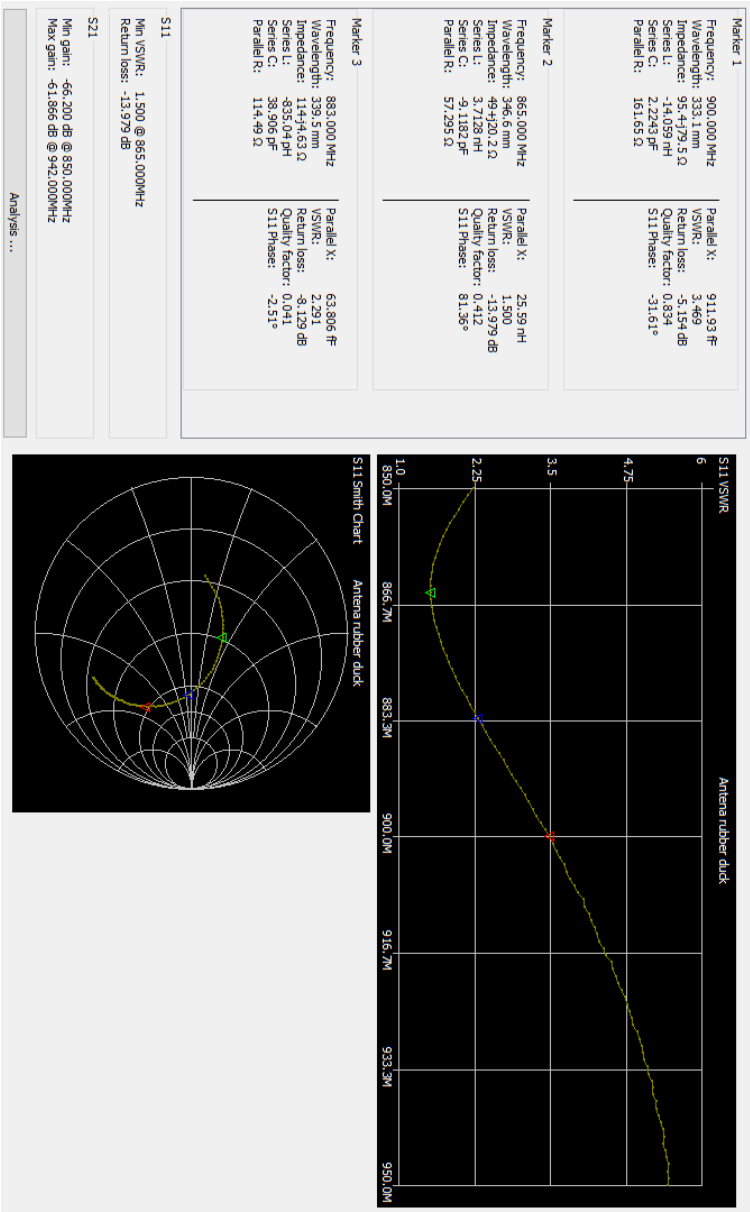


Apêndice B - Medidas no Nano VNA

B.1 Antena Monopolo Fabricada



B.2 Antena *rubber duck* helicoidal



Apêndice C - Códigos

C.1 Código do transmissor

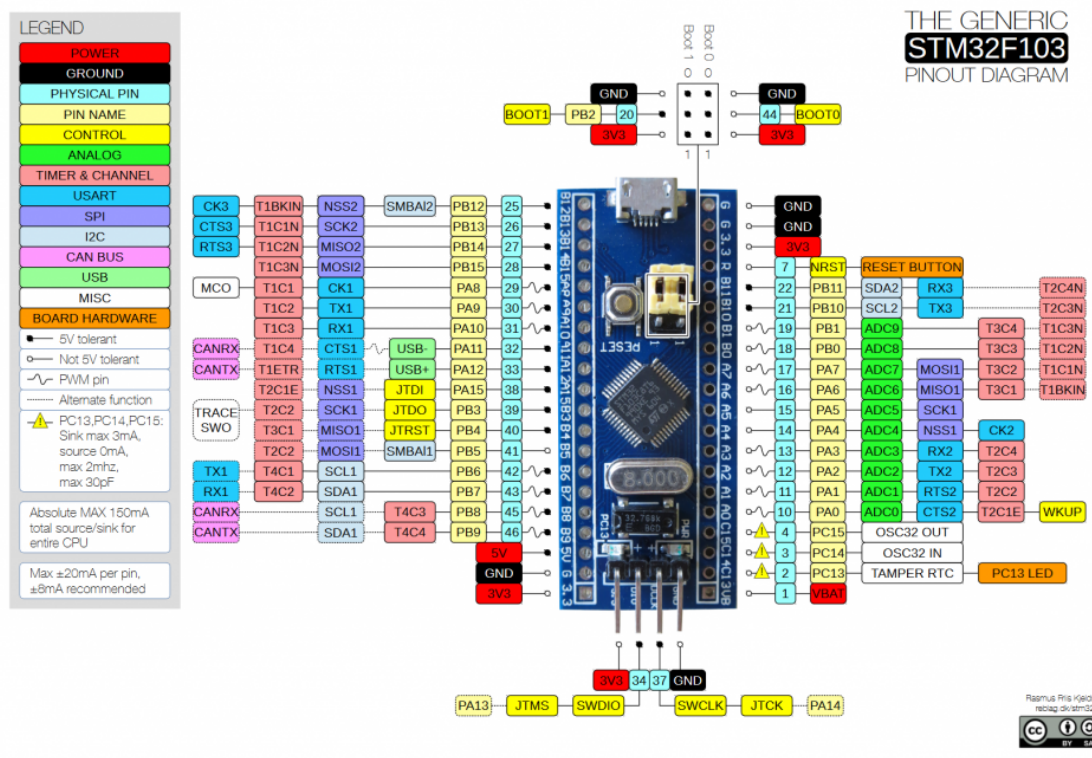
```
//Joliver Lisboa Kozlowski (Tchubiler AESP-22) - Transmissor - STBM
//14/10/2022 STM32f103c8t6
//----- Bibliotecas:
#include <libmaple/iwdg.h> // WatchDog
#include <TinyGPS.h> //biblioteca do GPS
//VARIÁVEIS GLOBAIS-----
String DATA = "";
int n = 0;
//PAYLOAD
String Payload_DATA = "";
char Byte;
//GPS
TinyGPS gps1; //Criando o GPS
//-----
void setup() {
  Serial1.begin(9600); // Velocidade do serial rádio - STM32(A9, A10) -> RADIO(RX, TX)
  Serial1.println("-----*****-----");
  Serial1.println("Iniciando");
  //GPSsetup();
  PAYLOADsetup();
  iwdg_init(IWDG_PRE_256, 12 * 156); // reinicialize se não houver atualização em 7 segundos
}
void loop() {
  iwdg_feed(); // se isso não for chamado em 12 segundos, a reinicialização ocorrerá automaticamente
  GPSread();
  PAYLOADread();
}
void GPSsetup() {
  Serial2.begin(9600); //The serial connection to the GPS module, não é possível modificar a taxa - MODULO(RX, TX) -> STM32(A2, A3)
  Serial.println("GPS SETUP");
}
void GPSread() {
  bool recebido = false; // indicará quando o GPS conseguiu se conectar aos satélites
  while (Serial2.available()) { //realiza a leitura se disponível
    char cIn = Serial2.read();
    recebido = gps1.encode(cIn);
  }
  // quando conseguir se conectar aos satélites ele irá realizar as leituras
  if (recebido) {
    Serial1.println("-----");
    //Latitude e Longitude
    long latitude, longitude;
    unsigned long idadeInfo;
```

```

unsigned long idadeInfo;
gpsl.get_position(&latitude, &longitude, &idadeInfo); // obtem a latitude, longitude e a idade da informação
DATA = "Latitude: " + String(float(latitude) / 1000000, 6) + " Longitude: " + String(float(longitude) / 1000000, 6);
Serial1.println(DATA);
DATA = "";
//Obtem o Dia e Hora no GMT, ou seja, com 3 horas de diferença do horário de Brasília;
int ano;
byte mes, dia, hora, minuto, segundo, centesimo;
gpsl.crack_datetime(&ano, &mes, &dia, &hora, &minuto, &segundo, &centesimo, &idadeInfo); //obtendo a data, horário e a idade da informação

// imprimindo os dados
DATA = "UTC: " + String(dia) + "/" + String(mes) + "/" + String(ano) + " - " + String(hora) + ":" + String(minuto) + ":" + String(segundo) + ":" + String(centesimo);
Serial1.println(DATA);
DATA = "";
//Obtendo a altitude
float altitudeGPS;
altitudeGPS = gpsl.f_altitude();
//obtem a velocidade de locomoção do gps em km/h
float velocidade;
velocidade = gpsl.f_speed_kmph();
//obtem o sentido do movimento em centesima de graus
unsigned long sentido;
sentido = gpsl.course();
DATA = "alt: " + String(altitudeGPS) + " m" + " - " + String(velocidade) + " km/h - Sentido (graus): " + String(float(sentido) / 100, 2);
Serial1.println(DATA);
DATA = "";
}
}
void PAYLOADsetup() {
  Serial3.begin(9600); //The serial connection to the PAYLOAD module, não é possível modificar a taxa - MODULO(RX, TX) -> STM32(B10, B11)
}
void PAYLOADread() {
  while (Serial3.available()) {
    Serial1.write(Serial3.read());
  }
}
}

```



FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO TC	2. DATA 17 de novembro de 2022	3. DOCUMENTO Nº DCTA/ITA/TC 053/2022	4. Nº DE PÁGINAS 82
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Projeto de Sistema de Telemetria para Balões Meteorológicos			
6. AUTOR(ES): Joliver de Souza Lisboa Kozlowski			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: Telemetria; Balão; Projeto			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Telemetria; Balões meteorológicos; Projeto; Processamento digital de sinais; Sincronização; Telecomunicações; Computação; Engenharia eletrônica.			
10. APRESENTAÇÃO: (X) Nacional () Internacional Trabalho de Graduação, ITA, São José dos Campos, 2022. 82 páginas.			
11. RESUMO: Este trabalho descreve o projeto de um SISTEMA DE TELEMETRIA PARA BALÕES METEOROLÓGICOS. O sistema projetado faz a transmissão por telemetria dos dados e medidas provenientes da carga útil embarcada em um balão estratosférico, além das coordenadas da posição do balão, para uma estação de solo. Ademais, o sistema fornece à carga útil embarcada a infraestrutura necessária para o bom funcionamento da mesma durante o voo do balão, como, por exemplo, potência elétrica e isolamento térmico. O projeto apresentado abrange tanto a concepção do sistema - parte teórica - quanto a construção de um protótipo - parte prática - a partir de componentes comerciais de prateleira (ou commercial off-the-shelf - COTS). O protótipo construído teve como payload base um contador Geiger para medição de radiação. A obtenção de uma série histórica atualizada e do monitoramento dos níveis de radiação atmosférica ionizante no Brasil faz-se necessária tendo em vista possíveis agravamentos de tensões internacionais envolvendo grandes potências nucleares, o que é ressaltado pelo recente conflito envolvendo a Rússia e a Ucrânia, e uma consequente contaminação do ar em território brasileiro por radiação transportada através dos ventos da alta atmosfera.			
12. GRAU DE SIGILO: (X) OSTENSIVO () RESERVADO () SECRETO			