



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

ESTAÇÃO TERRENA DE COMUNICAÇÃO SOLO-BORDO PARA BALÕES ESTRATOSFÉRICOS E PEQUENOS SATÉLITES

João Pedro Polito Braga

Relatório de Iniciação Científica do Programa PIBIC, orientado pelo Antonio Cassiano Julio Filho e coorientado por Marconi de Arruda Pereira e Sérgio Oliveira.

INPE
São José dos Campos
2022

RESUMO

A crescente demanda das missões espaciais, incluindo a dos pequenos satélites, direciona o desenvolvimento de Estações Terrenas com o objetivo de atender aos requisitos de implementação e redução de custos, sendo configurável e capaz de suportar diferentes cenários de missões e operações. No cenário global, observamos que cada vez mais missões são validadas por meio de lançamentos em balões estratosféricos, principalmente pela agilidade na campanha de lançamento, rápida aquisição de dados e também pelo baixo custo em relação a um voo espacial. Por outro lado, ainda há uma lacuna quando tratamos do rastreamento e aquisição de dados, que geralmente são realizadas de forma manual. Este projeto tem como objetivo apresentar um modelo de uma estação terrena que realiza rastreamento e coleta de dados de cargas úteis embarcadas em balões. A estrutura proposta combina e aplica diferentes métodos existentes, gerando assim um sistema confiável de recebimento de dados da missão. O sistema proposto é composto por dois módulos: o segmento de voo e o segmento terrestre. O segmento de voo, que será embarcado em um balão, é composto por um subsistema de hardware e software. Este sistema será responsável pelo envio dos dados de localização para o Segmento Terrestre. O segmento terrestre, uma estação terrena, é responsável pelo rastreamento do balão, sendo composto por uma antena omnidirecional, um rotor, um suporte, antenas direcionais, software de controle, um subsistema de hardware responsável por realizar a interface entre o rotor e o software de controle e um Rádio Definido por Software (SDR), além de uma interface com o usuário. O segmento terrestre deve receber, através da antena omnidirecional, os dados enviados pelo segmento de voo, demodulando e calculando, em tempo real, os valores de azimute e elevação do balão. As informações de azimute e elevação são utilizadas para controlar o rotor e permitir o apontamento das antenas direcionais, realizando o rastreamento automático do balão.

Palavras-chave: Segmento Solo. Balões Estratosféricos. Missões Espaciais.
Sistema de Rastreamento.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 3.1a – Como o rastreamento é feito atualmente.	2
Figura 3.1b – Primeira ideia do Projeto	2
Figura 4.1 – Hardware do Segmento de Voo.	4
Figura 4.2 – PCB e Componentes do Segmento de Voo Versão 3.2	5
Figura 4.3 – Pacotes enviados pelo Segmento de Voo.	6
Figura 4.4 – Segmento Terrestre.	7
Figura 5.1 – Validação do Segmento de Voo.	8
Figura 5.2 – Validação do Segmento de Voo.	9

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 1: Requisitos do Segmento Terrestre.	3
Tabela 2: Requisitos do Segmento de Voo.	3
Tabela 3: Requisitos da Interface de Controle.	3
Tabela 4: Lista de componentes.	4

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

<i>P&I</i>	<i>Pesquisa e Inovação</i>
<i>SDR</i>	<i>Software Defined Radio</i>
<i>RF</i>	<i>Radiofrequência</i>
<i>GPS</i>	<i>Global Positioning System</i>
<i>LoRa</i>	<i>Long Range</i>

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
HISTÓRICO	1
INTRODUÇÃO	1
ENGENHARIA DE SISTEMAS	1
DESENVOLVIMENTO	3
TESTES	7
PUBLICAÇÕES 9	
CONCLUSÕES	10
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	11

1 HISTÓRICO

A Divisão de Pequenos Satélites (DIPST) do INPE realiza atividades para a implementação de satélites de pequeno porte, educacionais e científicos e possui um ambiente multidisciplinar equipado para o desenvolvimento, integração e testes de satélites miniaturizados de baixo custo dos tipos pico e nano, assim como de seus sistemas de recepção, comando e controle terrenos. Estes satélites permitem que um grande número de experimentos, científicos e tecnológicos sejam implementados a partir de suas bases.

Entre as atividades de pesquisa e inovação (P&I) é necessário o desenvolvimento de um módulo a ser embarcado e um outro a ser utilizado como estação terrena, estabelecendo assim um subsistema de comunicação solo bordo para satélites de pequeno porte.

2 INTRODUÇÃO

Estamos presenciando uma nova corrida espacial, onde temos um espaço mais acessível e barato. Essa nova corrida espacial, chamada New Space, trouxe grandes revoluções, principalmente em termos de lançamentos com menor custo (ODGERS BERNDTSON, 2021). Como resultado, podemos observar um grande aumento nas missões espaciais, principalmente as de pequenos satélites.

Este trabalho visa apresentar uma solução para facilitar testes de nano satélites ou cargas úteis em grandes altitudes utilizando balões estratosféricos, principalmente na aquisição de dados destes testes. Apresentaremos um sistema que pode ser embarcado em balões, permitindo o rastreamento desses artefatos automaticamente.

3 ENGENHARIA DE SISTEMAS

Como ponto de partida no desenvolvimento desta pesquisa realizamos estudos bibliográficos para analisar missões que realizam testes de seus satélites ou

cargas utilizando balões estratosféricos. Um exemplo das missões analisadas é o Raiosat (JULIO FILHO, 2020). Após esta análise fizemos algumas correlações com as técnicas atualmente utilizadas e propomos uma solução que dê maior precisão na recepção dos dados da missão, principalmente aqueles que possuem uma alta taxa de dados. A figura 3.1 mostra o método atualmente utilizado para rastreamento. E a figura 3.2 ilustra a nossa proposta.

Figura 3.1 – Como o rastreamento é feito atualmente.

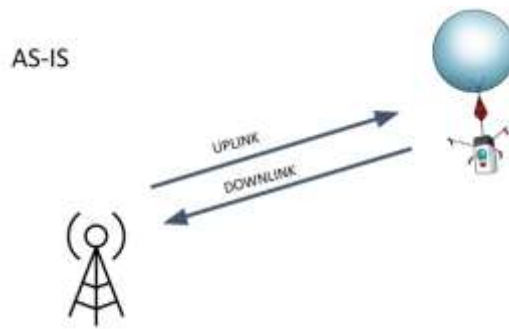
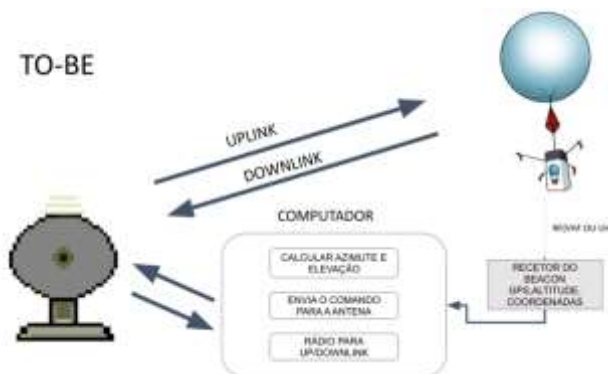


Figura 3.2 – Primeira ideia do Projeto



Fonte: AUTORES (2022).

A partir desta análise, optamos por desenvolver um sistema dividido em 3 partes. (1) Segmento Terrestre, (2) Segmento de Voo e (3) Interface de Controle. A partir da definição desses três segmentos, foram levantados requisitos a serem atendidos no desenvolvimento do projeto, na Tabela 1 são apresentados os requisitos do Segmento Terrestre, na Tabela 2 os requisitos do Segmento de Voo e na Tabela 3 os requisitos da Interface de controle.

Tabela 1: Requisitos do Segmento Terrestre.

ID	Requisitos de Sistema.
RGS.1	Realizar o Tracking de Balões e Satélites
RGS.2	Ser uma plataforma de baixo custo.
RGS.3	Possuir fácil adaptação para diferentes tipos de missão.

Tabela 2: Requisitos do Segmento de Voo.

ID	Requisitos de Sistema.
RFS.1	Possuir pelo menos 90% componentes de prateleira.
RFS.2	Capacidade de Envio de Beacons programados.
RFS.3	Possuir modularidade para diferentes tipos de missão.

Tabela 3: Requisitos da Interface de Controle.

ID	Requisitos de sistema.
RCI.1	Capacidade de realizar os Cálculos de Azimute e Elevação do Segmento de Voo.
RCI.2	Capacidade de realizar o controle de diferentes tipos de rotores de forma automática.
RCI.3	Possuir fácil integração com diferentes rotores

4 DESENVOLVIMENTO

Com base nos requisitos levantados, iniciou-se o processo de desenvolvimento dos três segmentos, começando pelo segmento de voo. Este segmento é composto pelo hardware e software que serão incorporados ao balão. Este segmento é responsável por enviar em tempo real os dados necessários para realizar o rastreamento do balão. Conforme informado na seção 3 o sistema possui alguns requisitos que foram utilizados durante o desenvolvimento dos protótipos. No total, a equipe desenvolveu 7 versões de hardware. As versões que tiveram maiores mudanças foram a 1.0, 2.0 e 3.0 tendo como principal alteração a troca de componentes e configurações das placas. Todas essas alterações foram realizadas para adequar o seguimento de voo aos requisitos levantados no início do projeto. A Figura 4.1 apresenta algumas versões desenvolvidas pela equipe.

Figura 4.1 – Hardware do Segmento de Voo.



Fonte: AUTORES (2022).

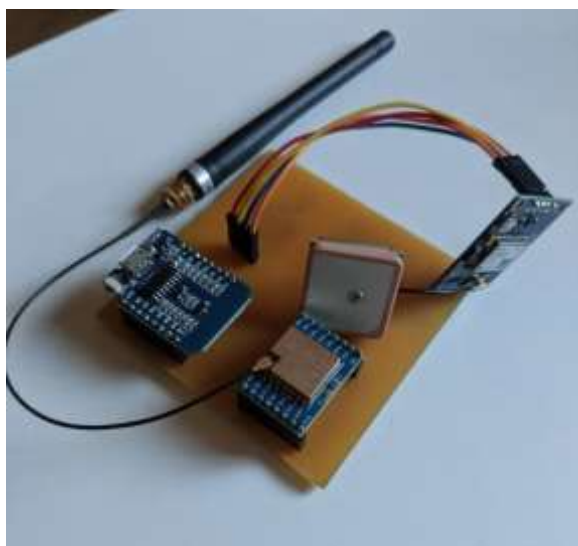
Como a versão 3.2 é a versão mais recente e robusta. Optamos por apresentá-la com mais detalhes. O Segmento de Voo foi projetado para operar independentemente do Balão Estratosférico, dando assim mais autonomia ao sistema. A versão 3.2 é composta pelos seguintes componentes, mostrados na Tabela 4:

Tabela 4: Lista de componentes.

Componentes.	Quantidade
Lolin D1 Mini V4.0.0 Wemos Esp8266	01
SX1278 LoRa 433MHz Ra-02	01
NEO-6M GPS Module	01

Após a escolha dos componentes, foi desenvolvida a placa de circuito impresso. Esta placa é responsável por integrar os componentes, apresentado na figura 4.2.

Figura 4.2 – PCB e Componentes do segmento de voo versão 3.2.

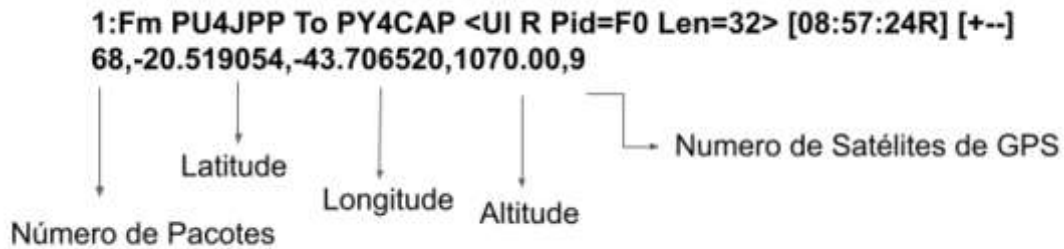


Fonte: AUTORES (2022).

Após a integração dos componentes, foi realizado o desenvolvimento do software, que foi embarcado no hardware do segmento de Voo. Este software foi desenvolvido utilizando a plataforma Arduino IDE (ARDUINO, 2022), em sua primeira versão o sistema era capaz de enviar via RF (Rádio Frequência) seus dados de localização.

Após algumas análises, desenvolvemos a versão 2.0 do software, onde optamos por adicionar mais alguns dados necessários para o rastreamento. O formato final dos pacotes é mostrado na Figura 4.3.

Figura 4.3 – Pacotes enviados pelo Segmento de Voo.



Fonte: AUTORES (2022).

A interface de controle foi desenvolvida para realizar a comunicação entre o segmento de voo e o rotor. Sendo capaz de processar os dados recebidos do segmento de voo, esses dados são usados para calcular o azimute e a elevação que o rotor precisa para apontar a antena para fazer o *downlink* dos dados.

Para calcular o azimute, utilizamos o Teorema de Haversine, e para calcular a elevação utilizamos como base os cálculos realizados pelo Projeto Horus que estão disponíveis no GitHub do Projeto (PROJECT HORUS, 2022). Após o cálculo dos dados necessários para o controle do rotor, foi realizado o desenvolvimento da função de controle. Esta função tem como objetivo enviar os dados de azimute e elevação via serial para o rotor conectado à interface de controle.

Outra parte desenvolvida pela equipe foi o segmento terrestre. Este segmento é responsável por receber e enviar dados para o balão e suas cargas a bordo, o sistema desenvolvido é composto pelos seguintes componentes: antena omnidirecional, rotor, SDR e antenas direcionais.

Os primeiros componentes a serem desenvolvidos foram a antena omnidirecional e o sistema de recepção de dados do balão. Como o segmento de voo envia pouca quantidade de dados, optamos por utilizar uma antena de

plano terra. Além disso optamos por utilizar um modulo LoRa devido à baixa complexidade e também o baixo custo em relação a outros módulos existentes no mercado. Para fazer a decodificação dos dados desenvolvemos um receptor que é responsável por enviar os dados recebidos do segmento de voo para a interface de controle.

Para o desenvolvimento do rotor, optou-se por utilizar um sistema *open-source* do SatNOGS (SATNOGS, 2022), mais especificamente a versão 2.0 do hardware.

Para montar o sistema, realizamos algumas alterações no projeto para adequar o rotor às realidades do Brasil e as necessidades do projeto. Com o sistema integrado, conforme mostrado na Figura 6, realizamos algumas validações. A principal validação foi o rastreamento e recepção de telemetria do Satélite Alfacrux (ALFACRUX, 2022).

Figura 4.4 – Segmento Terrestre.



Fonte: AUTORES (2022).

5 TESTES

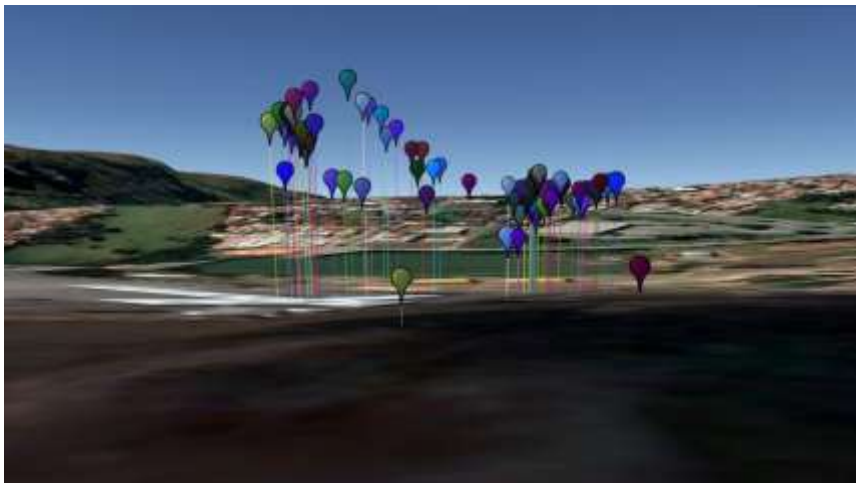
Nesta seção apresentaremos alguns testes e resultados obtidos neste trabalho. O primeiro sistema testado e a ter sua validação realizada foi a interface de

controle. Para realizar a validação, foram utilizados dados de balões estratosféricos coletados pela plataforma SondeHub (SONDEHUB, 2022).

Após o download dos dados de voo, simulamos a recepção, tratamento, cálculos e por fim os comandos enviados ao rotor. Com este teste conseguimos validar a interface de controle e a comunicação com o rotor.

Em seguida, foi realizado o teste para validar a recepção dos dados do segmento de voo. Como o objetivo deste teste era verificar o comportamento do segmento de voo, optamos por utilizar um drone nesta fase de testes, com 9 voos realizados. Para analisar os dados recebidos, plotamos os pontos coletados no Google Earth, conforme mostra a figura 7.

Figura 5.1 – Validação do Segmento de Voo.



Fonte: AUTORES (2022).

Com todas as partes que compõem o sistema testadas separadamente, passamos para o teste mais importante de nossa pesquisa: testar os três sistemas integrados e trabalhando juntos. Um total de 6 voos foram realizados com todos os sistemas integrados, conforme mostra a figura 5.2. Nesta imagem podemos ver os sistemas integrados e o drone voando, transportando o segmento de voo.

Figura 5.2 – Validação do Segmento de Voo.



Fonte: AUTORES (2022).

Após os voos, observamos alguns problemas que não foram vistos nos testes de bancada, como o tempo de transmissão do pacote e a variação de altitude coletada pelo GPS. Essa variação de altitude pode ser comparada a partir dos dados coletados pelo altímetro embutido no drone. Vale ressaltar que para as próximas versões será adicionado um altímetro em nosso segmento de voo, para ter maior precisão com os dados de altitude.

6 PUBLICAÇÕES CIENTÍFICAS REALIZADAS DURANTE O PERÍODO DA BOLSA

ESTAÇÃO TERRENA DE COMUNICAÇÃO SOLO-BORDO PARA BALÕES ESTRATOSFÉRICOS E PEQUENOS SATÉLITES. Seminário de Iniciação

Científica e Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação - SICINPE, 2022, São José dos Campos.

Artigo aceito para publicação: Ground and Flight Segment for tracking and transmissions for Stratospheric Balloons. IAA Joint 5th Latin American CubeSat Workshop and 3rd Latin American Symposium on Small Satellites, 2022, Brasília.

7 CONCLUSÕES

Conforme apresentado no início do trabalho, o objetivo do projeto era desenvolver um sistema de rastreamento para balões estratosféricos, principalmente para auxiliar na coleta de dados das cargas embarcadas neles. Para isso, desenvolvemos o segmento de voo, a interface de controle e o segmento de solo, que, quando operados em conjunto, têm a vantagem de proporcionar maior precisão no apontamento de antenas para recepção de telemetria e envio de telecomandos para as cargas a bordo dos balões.

Podemos destacar que esta primeira fase de desenvolvimento atendeu a todos os requisitos apresentados e permitiu o desenvolvimento do modelo de engenharia do nosso projeto e preparar o segmento de voo para a campanha de lançamento onde o sistema será embarcado em um balão estratosférico. Este lançamento está sendo organizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) que tem planos de realizar 3 lançamentos de balões estratosféricos até o final de 2022.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ODGERS BERNDTSON. (2021). New space presents new opportunities for exploration [Online]. Disponível em: <https://www.odgersberndtson.com/fr-fr/publications/new-space-presents-new-opportunities-for-exploration>

JÚLIO FILHO, A. C. Cubesat development for lightning flashes detection: raiosat project. Journal of Aerospace Technology and Management, v. 12, p. 80-93, 2020. DOI: <10.5028/jatm.cab.1161>. Available.: <<http://doi.org/10.5028/jatm.cab.1161>>.

ARDUINO IDE. <https://www.arduino.cc/en/software>, Último acesso em 2022-08-30.

PROJECT HORUS, 2022. <https://github.com/projecthorus>, Último acesso em 2022-08-31.

SATNOGS, 2022. <https://gitlab.com/librespacefoundation/satnogs/satnogs-rotator/-/tree/v2.0>,
Último acesso em 2022-08-31.

THE ALFACRUX PROJECT, 2022. <https://lodestar.aerospace.unb.br/projects/alfacrux>, Último
acesso em 2022-08-31.