



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 Júlio Filho e coorientado por Marconi de Arruda Pereira e Sérgio Oliveira.

INPE
São José dos Campos
2023

RESUMO

Com o aumento do número de missões espaciais, principalmente as realizadas no meio acadêmico por meio do lançamento de pequenos satélites, surgem novos desafios em relação a testes e integração de sistemas. Dentre esses desafios, destacam-se os relacionados à avaliação da missão. Uma das principais dificuldades é a validação dos sistemas que formam a missão. Normalmente estes testes são realizados em ambientes controlados onde não é possível avaliar o comportamento da comunicação do satélite com o segmento terrestre, responsável por controlar o satélite quando ele é colocado em órbita. Este trabalho propõe, uma solução para testar Cubesats na estratosfera terrestre a bordo de um balão estratosférico. Essa solução é composta por quatro subsistemas principais: o computador de bordo, o sistema de rastreamento e telemetria que opera na frequência UHF, e o subsistema de Energia, além de uma interface para conectar o Cubesat à nossa plataforma. Esta plataforma de testes é complementada por uma estação terrena de comunicação solo-bordo capaz de receber telemetria e enviar comandos, e realizar cálculos para apontamento automático da antena para o balão. Este trabalho apresenta o processo de caracterização do módulo TTC, incluindo simulações, testes e os resultados obtidos para validação dos sistemas associados a plataforma e a estação terrena.

Palavras-chave: Estações Terrenas. Radio Definido por Software. Balões Estratosféricos.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 4.1 – Comparação PQ9 e PQ20.	3
Figura 4.2 – PCB e Componentes do Segmento de Voo Versão 4.0.	4
Figura 4.3 – Versão 5.0 Segmento de Voo.	5
Figura 4.4 – Formato pacote LoRa recebido em solo.	6
Figura 4.5 – Rotina de Voo.	6
Figura 5.1 – Espectro capturado usando o SDR.	7
Figura 5.2 – Validação do Segmento de Voo.	8

LISTA DE TABELAS

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

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	2
TESTES	7
PUBLICAÇÕES 8	
CONCLUSÕES GERAIS	9
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	10

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 muitos experimentos, científicos e tecnológicos sejam implementados a partir de suas bases.

Entre as atividades de pesquisa e inovação (P&I) está 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 barato e acessível. Essa nova corrida espacial, chamada New Space, trouxe grandes revoluções (ODGERS BERNDTSON, 2021), principalmente quando falamos de satélites como os Cubesats, que possibilitam lançamentos mais baratos. Com isso podemos observar uma quantidade maior de nações acessando o espaço pela primeira vez por meio desses satélites (FRĄCKIEWICZ, 2023).

Uma alternativa interessante para validar os sistemas que estão sendo embarcados em satélites e a utilização de balões de altas altitudes, muito utilizados na meteorologia, mas que trazem oportunidades além desses citados acima, possibilitando lançamento de qualquer tipo de experimento para a estratosfera terrestre, sendo estes voos um importante passo para qualificar o sistema a ser embarcado em satélites (MACGLYNN, 2018).

Este trabalho teve como principal referência de desenvolvimento, ser uma plataforma de rastreamento que pudesse operar em conjunto com a plataforma desenvolvida para a missão Raiosat (JULIO FILHO, 2020), sendo assim será

apresentado a seguir todo o processo de envolvimento deste sistema de rastreamento.

3 ENGENHARIA DE SISTEMAS

Visando complementar o trabalho: “*Ground and Flight Segment for tracking and transmissions for Stratospheric Balloons*” (BRAGA, 2022) e utilizando outras bibliografias como (DAS et al., 2022) e o trabalho de (PAOLO MARZIOLI et al., 2022) foi iniciado o aprimoramento do seguimento de voo apresentado por (BRAGA, 2022).

Para melhor orientar o desenvolvimento deste segmento optamos por realizar o levantamento de requisitos que estão sendo apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Requisitos do Segmento de Voo

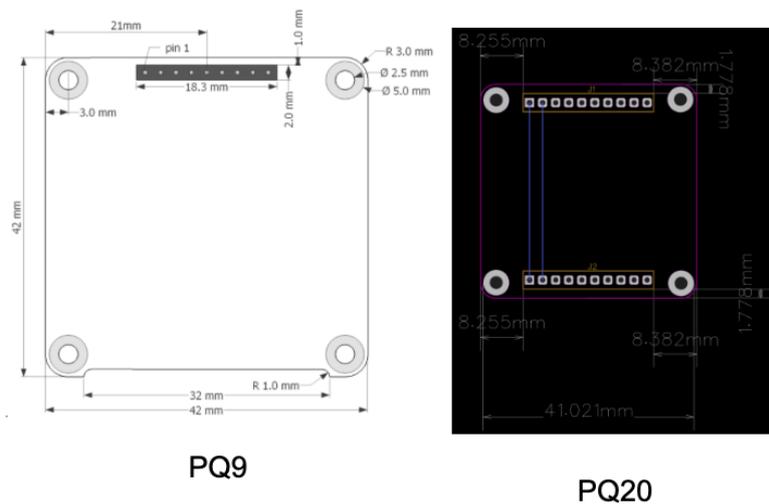
ID	Requisitos de Sistema.
RSV.1	Realizar envio de pacotes usando LoRa
RSV.2	Ser uma plataforma de baixo custo.
RSV.3	Possuir fácil adaptação para diferentes tipos de missão.
RSV.4	Possuir uma fácil integração entre as placas.
RSV.5	Capacidade de receber telecomandos.

4 DESENVOLVIMENTO

Com base nos requisitos levantados anteriormente no tópico Engenharia de sistemas foi iniciado o aperfeiçoamento do segmento de voo. Pensando no requisito RSV.4 iniciou o processo de pesquisa por padrões de placas de satélites que são utilizadas em missões espaciais. Com isso foram analisados os padrões PQ60 (Becnel E. et al., 2015) e também o PQ9 (J. BOUWMEESTER et al., 2018), por uma maior facilidade na implementação foi utilizado as dimensões do padrão das placas PQ9 mas com umas adaptações em relação aos barramentos para assim ser cumprido o requisito RSV.3. Na figura 4.1 está

representado a comparação entre o padrão do PQ9 e o padrão que criamos que pode ser denominado PQ20.

Figura 4.1 – Comparação PQ9 e PQ20



Fonte: AUTORES (2023).

Já com o padrão das placas definido foi iniciado o projeto da versão 4.0. O Segmento de Voo V4.0 foi projetado para operar em conjunto com o balão estratosférico, sendo interligado por um umbilical junto a *payload* do balão. A versão 4.0 é composta pelos seguintes componentes, mostrados na Tabela 4:

Tabela 4: Lista de componentes.

Componentes.	Quantidade
Esp32-S	01
Modulo LoRa SX-1278	01
NEO-6M GPS Module	01
Barra de pinos 1x10	08
Bateria <i>lithium</i>	01

Após a escolha dos componentes, foi desenvolvida a placa de circuito impresso. Onde foi integrada os componentes listados acima. O segmento voo como um todo possui 4 placas empilhadas na seguinte ordem: sistema de energia,

computador de bordo, modulo GPS e modulo de transmissão. O sistema totalmente integrado pode ser observado na Figura 4.2.

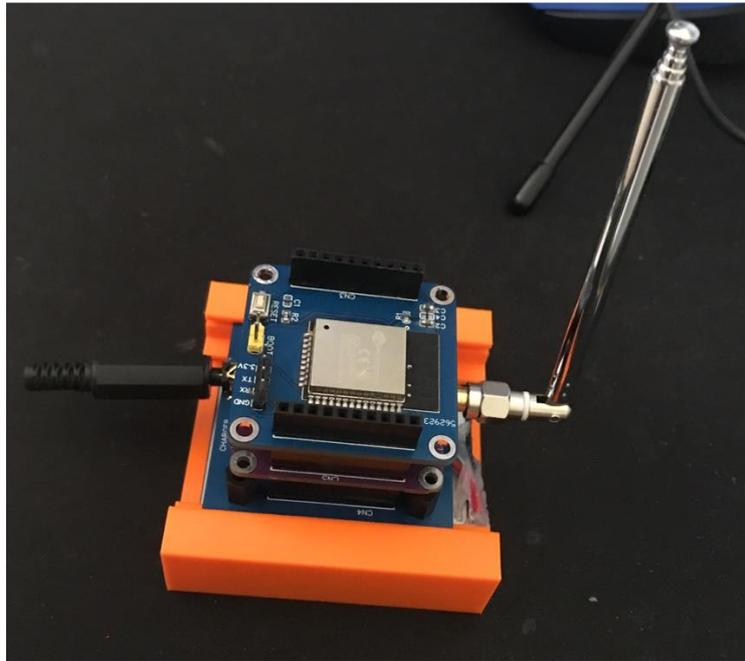
Figura 4.2 – PCB e Componentes do Segmento de Voo Versão 4.0.



Fonte: AUTORES (2023).

Após algumas análises e testes, foi encontrado algumas instabilidades no circuito da versão 4.0, fazendo com que tivéssemos que desenvolver a versão 5.0 logo em seguida. Que está sendo apresentada na Figura 4.3.

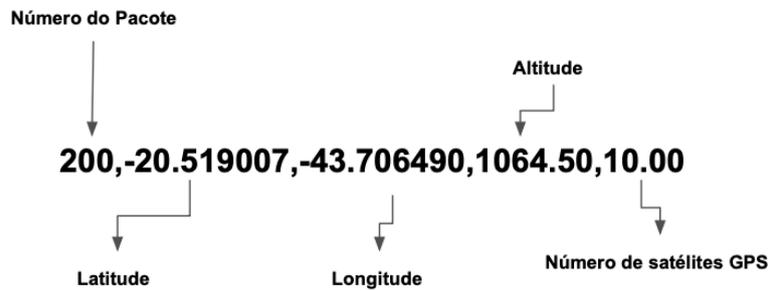
Figura 4.3 – Versão 5.0 Segmento de Voo.



Fonte: AUTORES (2023).

Após a integração dos componentes da V5.0, 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) com a modulação LoRa. O pacote enviado possui as seguintes informações apresentadas na Figura 4.4.

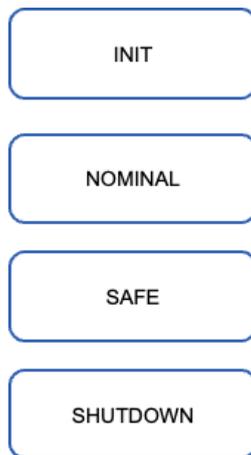
Figura 4.4 – Formato pacote LoRa recebido em solo.



Fonte: AUTORES (2023).

Com o propósito de atender ao requisito RSV5.0, cujo objetivo é possibilitar que o sistema receba telecomandos da Estação Terrena, foi desenvolvida uma rotina de modos denominada Rotina de Voo. As etapas dessa rotina são ilustradas na Figura 4.5.

Figura 4.5 – Rotina de voo.



Fonte: AUTORES (2023).

5 TESTES

Nesta seção apresentaremos alguns testes e resultados obtidos neste trabalho. Após a integração da Versão 5.0 foi realizado o teste para validar a recepção dos dados do segmento de voo e recepção de telecomandos da estação de terrena. Com isso foram realizados alguns testes em bancada para validar o segmento e qualificar o mesmo para o voo. Na Figura 5.1 está sendo apresentado a captura do espectro da transmissão e recepção de Telecomando do Segmento de Voo.

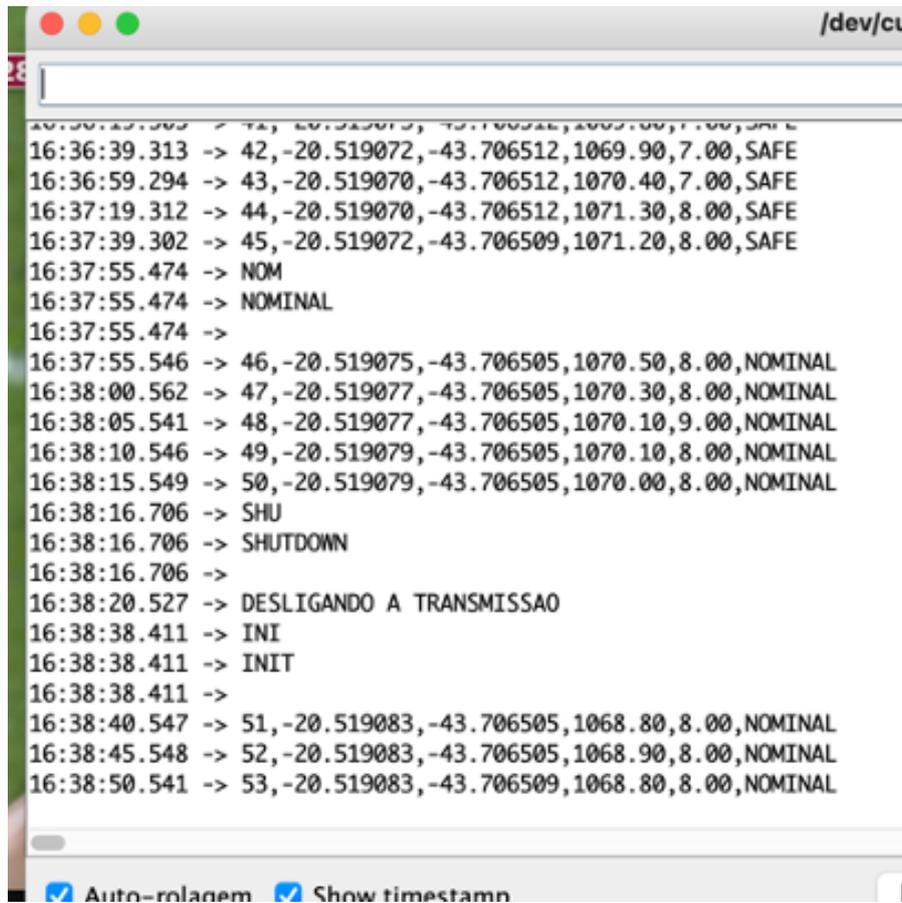
Figura 5.1 – Espectro capturado usando o SDR.



Fonte: AUTORES (2023).

Além da captura do espectro da transmissão também foi realizado testes de recepção dos dados enviados pelo Segmento de Voo e a mudança dos modos da Rotina de Voo apresentado na Figura 5.2.

Figura 5.2 – Validação do Segmento de Voo.



```
16:36:39.313 -> 42,-20.519072,-43.706512,1069.90,7.00,SAFE
16:36:59.294 -> 43,-20.519070,-43.706512,1070.40,7.00,SAFE
16:37:19.312 -> 44,-20.519070,-43.706512,1071.30,8.00,SAFE
16:37:39.302 -> 45,-20.519072,-43.706509,1071.20,8.00,SAFE
16:37:55.474 -> NOM
16:37:55.474 -> NOMINAL
16:37:55.474 ->
16:37:55.546 -> 46,-20.519075,-43.706505,1070.50,8.00,NOMINAL
16:38:00.562 -> 47,-20.519077,-43.706505,1070.30,8.00,NOMINAL
16:38:05.541 -> 48,-20.519077,-43.706505,1070.10,9.00,NOMINAL
16:38:10.546 -> 49,-20.519079,-43.706505,1070.10,8.00,NOMINAL
16:38:15.549 -> 50,-20.519079,-43.706505,1070.00,8.00,NOMINAL
16:38:16.706 -> SHU
16:38:16.706 -> SHUTDOWN
16:38:16.706 ->
16:38:20.527 -> DESLIGANDO A TRANSMISSAO
16:38:38.411 -> INI
16:38:38.411 -> INIT
16:38:38.411 ->
16:38:40.547 -> 51,-20.519083,-43.706505,1068.80,8.00,NOMINAL
16:38:45.548 -> 52,-20.519083,-43.706505,1068.90,8.00,NOMINAL
16:38:50.541 -> 53,-20.519083,-43.706509,1068.80,8.00,NOMINAL
```

Fonte: AUTORES (2023).

6 PUBLICAÇÕES CIENTÍFICAS REALIZADAS DURANTE O PERÍODO DA BOLSA

Artigo publicado: 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.

Artigo aceito para publicação: Ground and Flight Segment for testing space system integration for Stratospheric Balloons. 74th International Astronautical Congress, 2023, Baku, Azerbaijão.

Artigo aceito para publicação: Development of a low-cost and open-source cubesat payload to measure radiation in Low Earth Orbit. 74th International Astronautical Congress, 2023, Baku, Azerbaijão.

Artigo aceito para publicação: Open-source ground segment and satellite communication employing Gnuradio, LoRa and SDR technologies. 74th International Astronautical Congress, 2023, Baku, Azerbaijão.

Artigo aceito para publicação: Development of a S-band ground station to receive data from nanosatellites. 74th International Astronautical Congress, 2023, Baku, Azerbaijão.

7 CONCLUSÕES GERAIS

Conforme apresentado, o objetivo do projeto era desenvolver um sistema de rastreamento para balões estratosféricos, para auxiliar na coleta de dados das cargas embarcadas. Para isso, aperfeiçoamos o segmento de voo, constituído por um computador de bordo, sistema de comunicação e um sistema de energia. Esse segmento quando operados em conjunto a Estação Terrena desenvolvida no primeiro ano (2022) de pesquisa (BRAGA, 2022), 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 segunda fase de desenvolvimento atendeu a todos os requisitos apresentados e permitiu o desenvolvimento do modelo de voo que será embarcado em um balão estratosférico. Vale ressaltar que o seguimento de Voo já se encontra no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) disponível para lançamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FRAÇKIEWICZ, M. CubeSats and the Emergence of New Space Nations. Disponível em: <<https://ts2.space/en/cubesats-and-the-emergence-of-new-space-nations/>>. Acesso em: 1 ago. 2023.

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>

MACGLYNN, D, "The HAB project: A platform for space research", Student Archives, Berkeley Engineering, 2018. Disponível em: <<https://engineering.berkeley.edu/news/2018/04/the-hab-project-a-platform-for-space-research/>>. Acesso em: 4 ago. 2023.

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>>..

BRAGA, J. P. P.; JULIO FILHO, A. C.; OLIVEIRA, S.; ARRUDA, M. Ground and Flight Segment for tracking and transmissions for Stratospheric Balloons. In: IAA LATIN AMERICAN CUBESAT WORKSHOP, 5., 2022, Brasília, DF. Proceedings... 2022. Disponível em: <<http://urlib.net/ibi/8JMKD3MGP3W34T/489ALGB>>.

DAS, J. et al. Ground Station with VHF and UHF Band Antenna to Track Satellites and Testing with High Altitude Balloon(HAB) Experiment. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/10040115>>. Acesso em: 4 ago. 2023.

PAOLO MARZIOLI et al. Stratospheric balloon tracking system design through Software Defined Radio applications: STRAINS experiment. v. 193, p. 744–755, 1 abr. 2022.

J. BOUWMEESTER et al. Towards an innovative electrical interface standard for PocketQubes and CubeSats. v. 62, n. 12, p. 3423–3437, 1 dez. 2018.

BECNEL E. et al., PQ 60 Standard Document (v1.1), 2015.

ARDUINO IDE. <https://www.arduino.cc/en/software>, último acesso em 2023-08-04.

BRAGA, J. P. P.; JULIO FILHO, A. C.; PEREIRA, M. A.; OLIVEIRA, S. Estação terrena de comunicação Solo-Bordo para balões estratosféricos e pequenos satélites. São José dos Campos: INPE, 2022. 18 p. Bolsa PIBIC/PIBITI/INPE/CNPq. IBI: <8JMKD3MGP3W34T/47NM5HL>. Disponível em: <<http://urlib.net/ibi/8JMKD3MGP3W34T/47NM5HL>>.