

Desenvolvimento de Sistema de Telemetria e Telecomando para CubeSats

Diego A. Coutinho, Jessé J. Netto, Guilherme P. Aquino, Evandro C. Vilas Boas
Cyber Security and IoT Lab. (CS&I Lab.), Centro de Segurança Cibernética do Inatel (CxSC Telecom),
Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel
diego.anestor@gec.inatel.br, jesse.justino@get.inatel.br, guilhermeaquino@inatel.br, evandro.cesar@inatel.br

Abstract—This work discusses the implementation of a telemetry and telecommand module to provide connectivity to a CubeSat applied to 1^ª MCTI's Brazilian Satellite Olympiad. LoRa technology was used, complementing the system with WiFi connectivity to meet the requirements of the competition. The communication module was integrated into a University CubeSat for proof of concept in providing IoT connectivity for remote applications. The communication system was implemented and has been tested on the ground for LoRa communication, while WiFi connectivity was used during practical experimentation at launch via the stratospheric balloon. Data sent to the competition ground station were also stored on a memory card for evaluation by the team, demonstrating that CubeSat reached an altitude of approximately 22.6 km and operated under low-temperature conditions.

Index Terms—CubeSat, LoRa, nanosatellites, satellites, university competition.

Resumo—Este trabalho discute a implementação de um módulo de telemetria e telecomando para prover conectividade a um CubeSat aplicado a 1^ª Olimpíada Brasileira de Satélites do MCTI. Utilizou-se da tecnologia LoRa, complementando o sistema com conectividade WiFi para atender aos requisitos da competição. O módulo de comunicação foi integrado a um CubeSat universitário para prova de conceito em prover conectividade IoT para aplicações remotas. O sistema de comunicação foi implementado e testado em solo para a comunicação LoRa, enquanto a conectividade WiFi foi utilizada durante experimentação prática em lançamento via sonda estratosférica. Os dados enviados para a estação terrena da competição também foram armazenados em cartão de memória para avaliação por parte da equipe, demonstrando que o CubeSat atingiu altitude de aproximadamente 22,6 km e operou sob condições de baixa temperatura.

Palavras chave—CubeSat, LoRa, nanosatélites, satélites, competições universitárias.

I. INTRODUÇÃO

Os satélites artificiais desempenham um papel essencial nas telecomunicações modernas, fornecendo uma variedade de serviços por meio dos sistemas de comunicação via satélite. Dentre as diversas aplicações, os satélites são majoritariamente utilizados para comunicação de voz e dados, transmissão de sinais de televisão e rádio, navegação e geoposicionamento, monitoramento do clima, observação terrestre, serviços de conexão à Internet, bem como realização de experimentos para fins científicos. Portanto, constituem uma tecnologia fundamental para as telecomunicações e outros serviços com relevância para a vida cotidiana das pessoas e para a economia global [1].

As comunicações via satélite continuam a evoluir em soluções tecnológicas que viabilizam baixo investimento em lançamentos e construção de satélites ao longo dos anos,

potencializando a oferta de serviços de baixo custo e atraindo atenção do mercado de telecomunicações. Por exemplo, a pesquisa e desenvolvimento de satélites de menor massa, conhecidos como pequenos satélites e nanosatélites, permite o lançamento de várias unidades por meio de um único veículo para constituição de constelações em órbitas baixas, tornando-os acessíveis para uma variedade de usuários, incluindo governos, empresas e até mesmo universidades e grupos de pesquisa [2].

Os principais módulos de um pequeno satélite ou nanosatélite incluem o módulo de telemetria, telecomando e rastreamento, responsável por transmitir e receber sinais de rádio, o módulo de determinação de atitude e controle, que fornece informações precisas de posicionamento e orientação e meios para corrigi-los, o módulo de suprimento de energia, que fornece energia elétrica para o satélite, o módulo de carga útil, que comporta os componentes eletrônicos necessários para a realização da missão (atividade específica a ser desenvolvida pelo satélite em órbita, ex.: imageamento terrestre), e o módulo de estrutura, que armazena e protege os demais módulos [2].

Particularmente, o módulo de telemetria, telecomando e rastreamento permite a comunicação do satélite com a base de controle e viabiliza o controle remoto do satélite ou transmissão de dados. Além disso, o módulo permite que os dados coletados sejam transmitidos de volta para a base terrena para serem analisados e utilizados para a finalidade desejada [3]. Esses módulos apresentam limitações atreladas a sua utilização em pequenos satélites, como restrições de potência pela capacidade limitada de recursos, que pode afetar a eficiência das comunicações. Outro ponto importante é a restrição da janela de transmissão devido à limitação de conectividade entre a estação terrena e o satélite decorrente do período orbital entre 90 min e 2 h. Por outro lado, a restrição de espectro infere em uma banda de frequência limitada disponível para suas comunicações, o que pode dificultar a transmissão de grandes volumes de dados [4].

Visando contribuir com a construção de um CubeSat para participação na Primeira Olimpíada Brasileira de Satélites (1^ª OBSAT), esse trabalho apresenta o desenvolvimento de um módulo de telemetria e telecomando para comunicação do nanosatélite com uma estação terrena utilizando a tecnologia LoRa e WiFi. A comunicação WiFi é integrada ao módulo para cumprir os requisitos impostos pela competição, enquanto o transmissor via LoRa integra o sistema de telecomando e telemetria como forma de prover comunicação sem fio de baixo

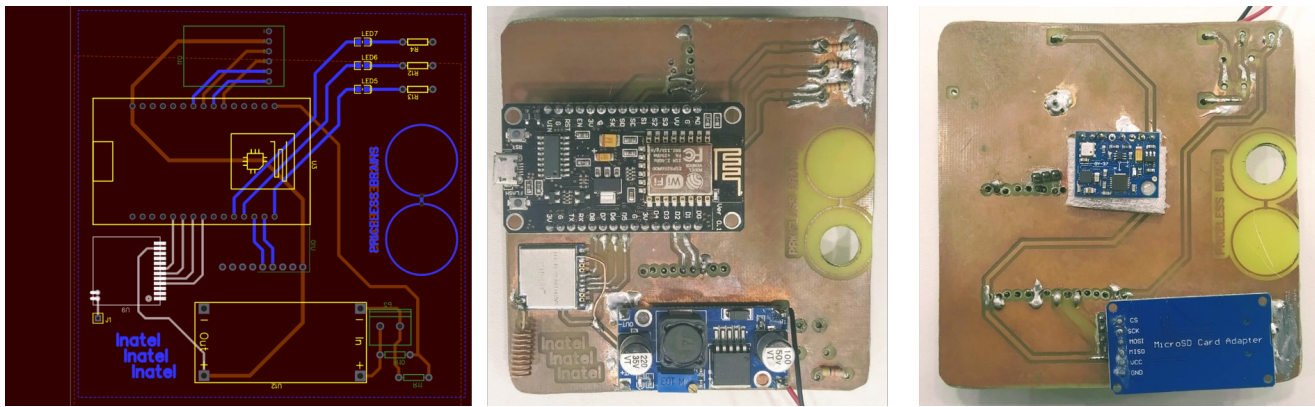


Fig. 1. Projeto eletrônico da PCI para integração dos subsistemas do CubeSat e PCI implementada em visão superior e inferior.

consumo de energia e longo alcance [5, 6]. Esse trabalho está organizado em cinco seções. Na Seção II, apresenta-se a missão e discutem-se os requisitos de projeto, incluindo as restrições propostas via edital pela 1ª OBSAT. Posteriormente, aborda-se o desenvolvimento do módulo de comunicação e sua integração ao CubeSat na Seção III. Testes relacionados ao lançamento do CubeSat em sonda estratosférica são apresentados na Seção IV. Na Seção V, apresentam-se os comentários finais e conclusões a respeito desse trabalho.

II. MISSÃO E REQUISITOS

O módulo de telemetria e telecomando implementado nesse trabalho faz parte dos subsistemas inclusos em um CubeSat de padrão 1U (10cm x 10cm x 10cm) [7]. Esse CubeSat foi projetado como prova de conceito para operar como um repetidor e prover conectividade IoT para aplicações remotas e inclui outros subsistemas, cujo projeto e discussão estão fora do escopo desse trabalho. A missão proposta foi desenvolvida visando a participação na 1ª OBSAT. Conseqüentemente, o projeto do módulo de telemetria e telecomando sofreu influência de restrições impostas pela organização para prover conformidade com os editais dentro de cada fase.

O módulo de comunicação é responsável por transmitir dados de telemetria dos subsistemas do CubeSat, como temperatura, pressão, giroscópio e acelerômetro, níveis de bateria, entre outros. Além disso, o módulo de comunicação também é responsável por transmitir os dados coletados pelo *payload* do CubeSat e dados de estado de envio e transmissão de pacotes da missão. O módulo de comunicação precisa realizar o envio de poucos bytes, contendo os dados de telemetria e *payload*, porém esse transmissor ainda precisa cumprir com alguns requisitos operacionais, provendo os dados com mínima latência, baixo custo de implementação, alta confiabilidade e baixo consumo dos recursos elétricos limitados. A missão, por sua natureza, precisa realizar o envio dos dados de missão e *payload* através do seu próprio transmissor.

Para atender às limitações impostas pela organização do evento, algumas precauções em relação ao módulo de comunicação foram tomadas. O módulo de comunicação da missão evita transmissões na faixa de 433 MHz, para conter interferências com o módulo de rastreamento e transmissão de dados utilizado na 3ª Fase da competição. Sendo assim, optou-se pela utilização da tecnologia LoRa para a transmissão de

dados com baixo consumo de energia e longa alcance, que permite transmitir à 915 MHz, na faixa de livre uso [8]. O módulo LoRa 2AD66-1276C1, é uma solução de comunicação sem fio que utiliza a tecnologia LoRa, e foi escolhido para prover conectividade durante a missão. O módulo possui uma taxa de transmissão de até 300 kbps, o que é suficiente para a transmissão de dados de telemetria e *payload*. Também possui baixa potência de transmissão, o que é importante para evitar interferência com outros sistemas e prolongar a vida útil da bateria do CubeSat [9]. Contudo, o sistema de telecomando e telemetria proposto foi complementado com conectividade WiFi para atender as restrições de comunicação e envio de dados por meio do sistema de comunicação disponibilizado na sonda estratosférica.

III. IMPLEMENTAÇÃO E TESTE DO SISTEMA DE TELEMETRIA E TELECOMANDO

Para implementação do subsistema de telemetria e telecomando, utilizou-se um módulo LoRa para prover o envio e recepção de dados em conjunto com um NodeMCU. Segundo os requisitos de missão, o microcontrolador fornece os meios para implementar o subsistema de computação de bordo e a conectividade WiFi, complementando o subsistema de telemetria e telecomando. Inicialmente, esses componentes foram dispostos em uma *protoboard* para programação das rotinas de controle e integração com outros subsistemas. Posteriormente, elaborou-se o projeto elétrico da placa de circuito impresso (PCI) para posicionamento na estrutura mecânica do CubeSat, conforme visto na Figura 1. O microcontrolador foi programado para controlar as configurações de transmissão do módulo LoRa, como a frequência e a potência de transmissão, bem como para gerenciar a comunicação com o CubeSat. Além disso, toda a sequência de leitura, filtragem, serialização e transmissão dos dados foram incluídas no *firmware* do sistema, para que os pacotes contendo os dados de missão e *payload* possam ser transmitidos para a base terrena.

A PCI foi introduzida em uma estrutura mecânica em *form factor* 1U desenvolvida em material plástico acrilonitrila butadieno estireno (ABS) por meio de impressão 3D, sendo utilizadas hastes metálicas para fixação das faces. Devido à limitação de massa de 450g, os componentes foram integrados em uma única PCI e integrada a estrutura mecânica por meio de correções adicionados ao desenho mecânico das



Fig. 2. CubeSat implementado para a OBSAT, evidenciando a PCI instalada internamente com o subsistema de telemetria e telecomando proposto.

```

1 [{"equipe": 1, "bateria": 1, "temperatura": 26.50, "pressao": 92182.00, "giroscopio": [-0.05, -0.03, 0.01], "acelerometro": [-1.05, 0.54, -0.01], "magnetometro": [2.00, 42.91, -88.78], "payload": {"millis": 2000, "sts_tx": 0, "sts_rx": 0, "sts_cs": 0}}
2 [{"equipe": 1, "bateria": 1, "temperatura": 26.40, "pressao": 92184.00, "giroscopio": [-0.05, -0.03, 0.01], "acelerometro": [-2.34, 1.16, 10.93], "magnetometro": [2.34, 42.91, -88.78], "payload": {"millis": 1272, "sts_tx": 0, "sts_rx": 0, "sts_cs": 1}}
3 [{"equipe": 1, "bateria": 1, "temperatura": 26.50, "pressao": 92186.00, "giroscopio": [-0.05, -0.03, 0.01], "acelerometro": [-2.33, 1.19, 10.95], "magnetometro": [2.27, 43.09, -88.67], "payload": {"millis": 1893, "sts_tx": 0, "sts_rx": 0, "sts_cs": 1}}
4 [{"equipe": 1, "bateria": 1, "temperatura": 26.40, "pressao": 92186.00, "giroscopio": [-0.05, -0.03, 0.01], "acelerometro": [-2.34, 1.16, 10.90], "magnetometro": [2.27, 43.09, -88.47], "payload": {"millis": 2418, "sts_tx": 0, "sts_rx": 0, "sts_cs": 1}}
5 [{"equipe": 1, "bateria": 1, "temperatura": 26.40, "pressao": 92185.00, "giroscopio": [-0.05, -0.03, 0.01], "acelerometro": [-2.32, 1.17, 10.92], "magnetometro": [2.09, 43.09, -88.78], "payload": {"millis": 2951, "sts_tx": 0, "sts_rx": 0, "sts_cs": 1}}
6 [{"equipe": 1, "bateria": 1, "temperatura": 26.40, "pressao": 92185.00, "giroscopio": [-0.05, -0.03, 0.01], "acelerometro": [-2.36, 1.16, 10.88], "magnetometro": [2.00, 43.09, -88.57], "payload": {"millis": 3480, "sts_tx": 0, "sts_rx": 0, "sts_cs": 1}}
7 [{"equipe": 1, "bateria": 1, "temperatura": 26.40, "pressao": 92180.00, "giroscopio": [-0.05, -0.03, 0.01], "acelerometro": [-2.35, 1.16, 10.90], "magnetometro": [2.00, 43.09, -88.67], "payload": {"millis": 4010, "sts_tx": 0, "sts_rx": 0, "sts_cs": 1}}
8 [{"equipe": 1, "bateria": 1, "temperatura": 26.40, "pressao": 92180.00, "giroscopio": [-0.05, -0.03, 0.01], "acelerometro": [-2.35, 1.17, 10.91], "magnetometro": [2.09, 42.73, -88.52], "payload": {"millis": 4540, "sts_tx": 0, "sts_rx": 0, "sts_cs": 1}}
9 [{"equipe": 1, "bateria": 1, "temperatura": 26.40, "pressao": 92185.00, "giroscopio": [-0.05, -0.03, 0.01], "acelerometro": [-2.34, 1.16, 10.93], "magnetometro": [1.91, 43.00, -88.78], "payload": {"millis": 5080, "sts_tx": 0, "sts_rx": 0, "sts_cs": 1}}
10 [{"equipe": 1, "bateria": 1, "temperatura": 26.40, "pressao": 92177.00, "giroscopio": [-0.20, 0.19, 0.04], "acelerometro": [-7.54, 4.99, 1.40], "magnetometro": [4.45, 47.27, -88.57], "payload": {"millis": 5610, "sts_tx": 0, "sts_rx": 0, "sts_cs": 1}}
11 [{"equipe": 1, "bateria": 1, "temperatura": 26.40, "pressao": 92183.00, "giroscopio": [-0.13, -0.04, 0.06], "acelerometro": [4.93, -7.29, -0.36], "magnetometro": [31.09, 23.64, -88.57], "payload": {"millis": 6140, "sts_tx": 0, "sts_rx": 0, "sts_cs": 1}}
12 [{"equipe": 1, "bateria": 1, "temperatura": 26.40, "pressao": 92179.00, "giroscopio": [-1.18, -0.39, 0.70], "acelerometro": [-5.47, -0.06, -0.01], "magnetometro": [2.64, 37.27, -88.67], "payload": {"millis": 6680, "sts_tx": 0, "sts_rx": 0, "sts_cs": 1}}
13 [{"equipe": 1, "bateria": 1, "temperatura": 27.10, "pressao": 92170.00, "giroscopio": [-0.05, -0.03, 0.01], "acelerometro": [-2.64, 0.43, -0.13], "magnetometro": [19.18, 35.80, -88.50], "payload": {"millis": 7220, "sts_tx": 0, "sts_rx": 0, "sts_cs": 1}}
14 [{"equipe": 1, "bateria": 1, "temperatura": 27.00, "pressao": 92167.00, "giroscopio": [-0.00, 0.17, 0.12], "acelerometro": [-6.56, -0.36, -0.01], "magnetometro": [33.69, 39.82, -88.47], "payload": {"millis": 7760, "sts_tx": 0, "sts_rx": 0, "sts_cs": 1}}
15 [{"equipe": 1, "bateria": 1, "temperatura": 27.00, "pressao": 92165.00, "giroscopio": [-0.14, -0.02, -0.06], "acelerometro": [-1.32, 1.30, -0.20], "magnetometro": [13.91, 35.82, -88.57], "payload": {"millis": 8300, "sts_tx": 0, "sts_rx": 0, "sts_cs": 1}}
16 [{"equipe": 1, "bateria": 1, "temperatura": 27.10, "pressao": 92191.00, "giroscopio": [-0.05, 0.04, 0.07], "acelerometro": [-2.60, 1.92, -0.03], "magnetometro": [10.91, 36.36, -88.67], "payload": {"millis": 8840, "sts_tx": 0, "sts_rx": 0, "sts_cs": 1}}
17 [{"equipe": 1, "bateria": 1, "temperatura": 27.10, "pressao": 92191.00, "giroscopio": [-0.02, 0.07, 0.04], "acelerometro": [-3.60, 3.18, -0.01], "magnetometro": [12.27, 38.36, -88.78], "payload": {"millis": 9380, "sts_tx": 0, "sts_rx": 0, "sts_cs": 1}}
18 [{"equipe": 1, "bateria": 1, "temperatura": 27.00, "pressao": 92184.00, "giroscopio": [-0.10, -0.19, 0.14], "acelerometro": [-1.59, 3.35, -0.11], "magnetometro": [12.55, 37.36, -88.57], "payload": {"millis": 9920, "sts_tx": 0, "sts_rx": 0, "sts_cs": 1}}
19 [{"equipe": 1, "bateria": 1, "temperatura": 27.20, "pressao": 92180.00, "giroscopio": [-0.12, -0.03, 0.03], "acelerometro": [0.01, -4.95, -0.01], "magnetometro": [18.82, 60.27, -88.67], "payload": {"millis": 10460, "sts_tx": 0, "sts_rx": 0, "sts_cs": 1}}
20

```

Fig. 3. Formato do pacote JSON enviado pelo CubeSat durante os testes de comunicação

faces, utilizando de um conceito "slide in". Para questões de controle de temperatura interna, aplicou-se material em espuma de polietileno expandido (EPE) para retardar o resfriamento interno da estrutura. Na Figura 2, tem-se a estrutura final do CubeSat montada, evidenciando a PCI instalada internamente com o subsistema de telemetria e telecomando proposto.

Após a integração dos componentes, realizou-se testes para validação dos subsistemas quanto a caracterização física, robustez mecânica, robustez eletrônica e magnética, robustez térmica, e testes de comunicação e transmissão de dados. Devido ao escopo desse trabalho, discutem-se os testes de comunicação e transmissão de dados. Inicialmente, apresentam-se a identificação e descrição dos dados a serem coletados e transmitidos durante a missão. O *payload* do pacote JSON transmitido para o servidor compreende o envio de dados por meio de variáveis relacionadas ao estado de voo e também à execução da missão. Logo, o formato de *payload* compreende o envio de dados de identificação da equipe, estado de operação da bateria, temperatura, pressão, dados dos três eixos do giroscópio, acelerômetro e magnetômetro, e informações a serem retransmitidas.

Para o armazenamento dos dados lidos pelos sensores, equipou-se o CubeSat com um módulo micro SD para suporte ao cartão de memória. Dessa forma, implementam-se funcionalidades de *sample and hold*. Arquivam-se os dados coletados durante a missão em uma planilha em extensão .csv. Portanto, caso haja interrupção na comunicação dos sistemas de telemetria, os dados são salvos no cartão e podem ser recuperados para análise futura. Para fins de demonstração, operou-se o CubeSat para viabilizar o armazenamento de

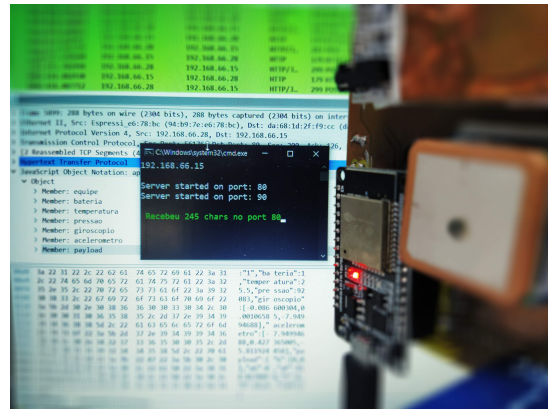


Fig. 4. Exemplo de recebimento de pacote de dados no servidor local.

dados no cartão de memória e acessou-se esses dados por um computador, sendo demonstrados na Figura 3. Implementou-se um servidor HTTP local para receber e verificar se a mensagem está de acordo com a formatação exigida pela organização da OBSAT, como disposto em edital da Fase 2. Para pacotes com formatação correta o servidor retorna respostas "200 ok". Caso contrário, alerta-se erro por meio de uma segunda mensagem. Na Figura 4, exemplifica-se a comunicação.

IV. LANÇAMENTO EM BALÃO ESTRATOSFÉRICO

Durante a Fase 03, o CubeSat foi lançado em uma plataforma de balão estratosférico com hélio fornecida pela organização da OBSAT, como visto na Figura 5. O evento ocorreu no dia 09 de outubro (2022) em São Carlos/SP – Brasil, realizado pela Equipe Zenith (grupo dedicado ao desenvolvimento e

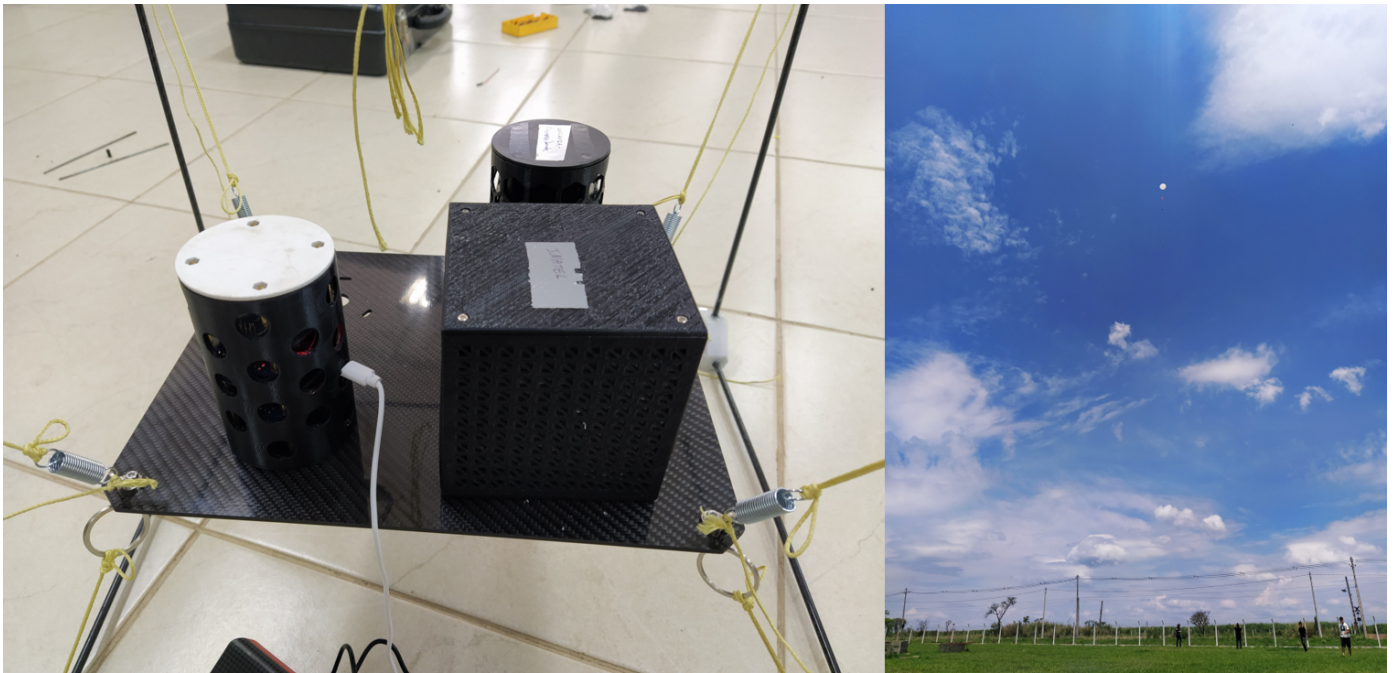


Fig. 5. Imagens de lançamento do CubeSat.

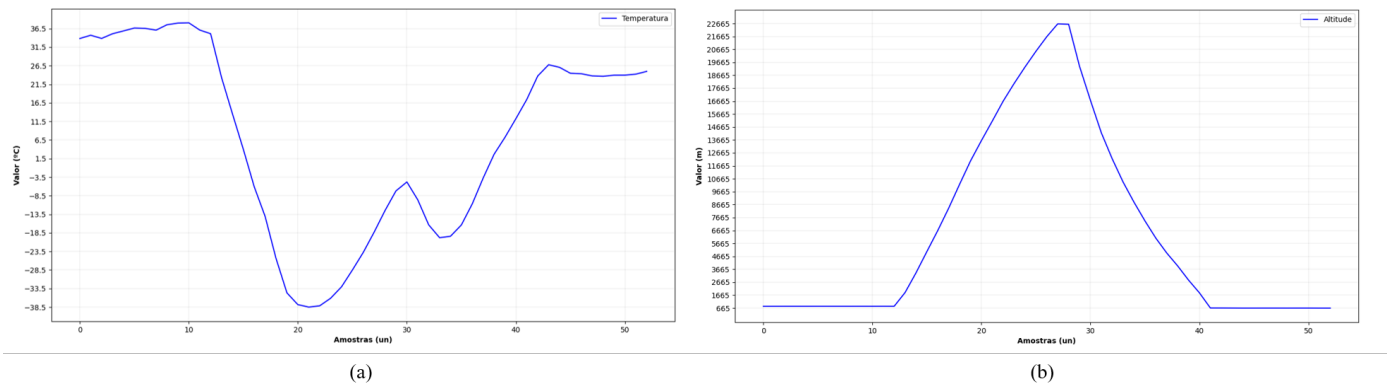


Fig. 6. Dados sensoriais coletados durante o voo, (a) temperatura e (b) altitude.

lançamento de plataforma estratosférica). O lançamento permitiu avaliar a operação do CubeSat nas condições de troposfera e estratosfera. Infelizmente, devido às restrições de transmissão, a conectividade do módulo LoRa não pôde ser avaliada. Portanto, os dados que a equipe possui são do voo armazenados pelo CubeSat durante os envios periódicos.

O processo de lançamento envolveu a montagem, energização e teste de comunicação do CubeSat para garantir os dados enviados. A equipe conduziu esta etapa enquanto a equipe Zenith realizou o enchimento e lançamento de balões. Além disso, a estrutura foi fixada na plataforma e lançada, recuperada intacta e funcionando. A duração do voo durou cerca de três horas e meia, enquanto a janela de tempo até a recuperação do protótipo foi de cerca de seis horas. Os dados de captura foram analisados em termos de altitude e temperatura, conforme exibidos na Figura 6. Embora a avaliação da comunicação LoRa não foi viável, validou-se o desempenho do CubeSat em ambiente experimental, contribuindo para o conhecimento da equipe e experiência. Os resultados mostram que o CubeSat alcançou uma altitude

de cerca de 22,6 km abaixo de $-23,5^{\circ}\text{C}$.

Os gráficos exibem todas as amostras de dados coletadas, com um período de 4 min entre cada uma. O período de ascensão da plataforma está entre as amostras 12 e 27, enquanto as amostras entre os valores 27 e 41 representam dados durante o período de queda da sonda estratosférica. Em relação à altitude e pressão, os valores amostrais invariáveis foram armazenados no início e no final. Em contraste, os dados de registro de temperatura variam em torno de 32°C antes do lançamento e 23°C após o pouso da plataforma. Esses comportamentos eram esperados uma vez que o CubeSat estava em solo aguardando o lançamento ou recuperação, exposto a condições ambientais que impõem variação de temperatura, como incidência solar (antes do lançamento) e chuva (após o pouso da plataforma). As amostras de altitude apresentam um perfil esperado durante a subida e descida da plataforma. O perfil de temperatura baixou seu valor à medida que a plataforma subia e aumentou na etapa descendente. No entanto, começou a aumentar entre as amostras 23 e 30. A hipótese de que a plataforma voou acima das nuvens e recebeu luz

solar direta incidente que aqueceu a estrutura, pois o tempo estava nublado após o lançamento. As amostras de temperatura levemente decrescentes suportam essa suposição conforme a plataforma descia, indicando que ela estava passando pelas nuvens novamente.

V. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, realizou-se o desenvolvimento e validação de um subsistema de telemetria e telecomando, empregando módulos LoRa para integrar um pequeno satélite em *form factor* 1U. Esse subsistema foi integrado em uma PCI com outros componentes necessários ao funcionamento do CubeSat para prover a execução da missão, relacionada a transmissão de dados de área remota para centros urbanos. Testes de comunicação e transmissão de dados foram feitos em solo. Posteriormente, o CubeSat foi lançado em voo estratosférico e os dados coletados avaliados para a validação da missão. Esse trabalho contribuiu para a formação e entendimento do conceito de telecomunicações em um sistema de comunicação, compreendendo as dificuldades na implementação frente aos requisitos restritos de projeto. Trabalhos futuros visam estudar a elaboração de uma solução completa compreendendo o projeto do segmento de solo para correta transmissão e recepção em lançamentos estratosféricos de forma a poder avaliar a missão com recursos da própria equipe.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Finatel pela concessão da bolsa e ao Centro de Segurança Cibernética do Inatel (CxSC Telecom) pelo apoio financeiro na execução das atividades propostas, ao Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel) e ao Laboratório de Segurança Cibernética e Internet das Coisas (CS&I Lab.) por todo o suporte técnico oferecido.

REFERÊNCIAS

- [1] Zhicheng Qu, Gengxin Zhang, Haotong Cao e Jidong Xie. “LEO Satellite Constellation for Internet of Things”. Em: *IEEE Access* 5 (2017), pp. 18391–18401. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2735988.
- [2] Joseph R. Kopacz, Roman Herschitz e Jason Roney. “Small satellites an overview and assessment”. Em: *Acta Astronautica* 170 (2020), pp. 93–105. ISSN: 0094-5765. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.01.034>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094576520300540>.
- [3] S. Gao et al. “Antennas for Modern Small Satellites”. Em: *IEEE Antennas and Propagation Magazine* 51.4 (2009), pp. 40–56. DOI: 10.1109/MAP.2009.5338683.
- [4] Scott E. Palo. “High rate communications systems for CubeSats”. Em: *2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium*. 2015, pp. 1–4. DOI: 10.1109/MWSYM.2015.7167152.
- [5] Shilpa Devalal e A. Karthikeyan. “LoRa Technology - An Overview”. Em: *2018 Second International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*. 2018, pp. 284–290. DOI: 10.1109/ICECA.2018.8474715.
- [6] Akshay Gadre, Swarun Kumar e Zachary Manchester. “Low-latency Imaging and Inference from LoRa-enabled CubeSats”. Em: arXiv, 2022. DOI: 10.48550/ARXIV.2206.10703. URL: <https://arxiv.org/abs/2206.10703>.
- [7] Armen Toorian, Ken Diaz e Simon Lee. “The CubeSat Approach to Space Access”. Em: *2008 IEEE Aerospace Conference*. 2008, pp. 1–14. DOI: 10.1109/AERO.2008.4526293.
- [8] Arrief Rahman e Muhammad Suryanegara. “The development of IoT LoRa: A performance evaluation on LoS and Non-LoS environment at 915 MHz ISM frequency”. Em: *2017 International Conference on Signals and Systems (ICSigSys)*. 2017, pp. 163–167. DOI: 10.1109/ICSIGSYS.2017.7967033.
- [9] *Module 2AD66-1276C1 Datasheet*. Ago. de 2020. URL: <https://fccid.io/2AD66-1276C1/Users-Manual/Users-Manual-3654457>.