

Eremita: Desenvolvimento de um CubeSat para Monitoramento de Florestas usando LoRa

Arielli A. Conceição, Lívia C. G. Silva, Gustavo P. Ambrósio, Lucca R. S. Lopes, Diego A. Coutinho, Guilherme P. Aquino, Evandro C. Vilas Boas

Resumo—Esse trabalho apresenta o desenvolvimento de um CubeSat para prover comunicação fim-a-fim via protocolo LoRa para monitoramento de florestas. O CubeSat opera como unidade repetidora para conectar módulos sensoriais ao servidor de processamento/armazenamento de dados. Os módulos se comunicam com o CubeSat por meio de uma estação terrena que opera como um gateway para envio de parâmetros como temperatura, umidade relativa do ar, luminosidade e concentração de dióxido de carbono relacionados à sua posição geográfica. O CubeSat recebe e adequa esses dados para retransmissão ao servidor usando o protocolo LoRa e requisição HTTP, conforme validação do sistema em solo.

Palavras-Chave—CubeSats, pequenos satélites, protocolo LoRa, monitoramento IoT.

Abstract—This work presents the implementation of a CubeSat to provide end-to-end communication via the LoRa protocol for forest monitoring. The CubeSat is a relay unit connecting sensory modules to the data processing and storage server. The CubeSats communicate with the earth station through a gateway to send geographic-specific parameters such as temperature, humidity, luminosity, and carbon dioxide concentration. The CubeSat receives and processes data for retransmission to the server using the LoRa protocol and HTTP request, as validated on a ground test.

Keywords—CubeSats, small satellites, LoRa protocol, IoT monitoring.

I. INTRODUÇÃO

O monitoramento de florestas coleta dados em tempo real para avaliar a saúde dos ecossistemas e supervisionar remotamente ameaças (humanas ou naturais) para a conservação ambiental [1]–[6]. Diversas técnicas são implementadas para esse fim, incluindo sensoriamento remoto, monitoramento em campo, uso de soluções em Internet das Coisas (IoT, *Internet of Things*) e veículos não tripulados. O sensoriamento remoto utiliza imagens de satélite para monitorar parâmetros como a cobertura florestal, avanço do desmatamento, focos de incêndio e alterações no padrão de manejo do solo em áreas agrícolas [1]–[4]. O uso de drones proporciona imagens de melhor resolução e permite o monitoramento de áreas específicas,

Arielli A. Conceição, Lívia C. G. Silva, Gustavo P. Ambrósio, Lucca R. S. Lopes, Diego A. Coutinho, Guilherme P. Aquino, Evandro C. Vilas Boas, Laboratório de Segurança Cibernética e Internet das Coisas (CS&I Lab.) e Centro de Segurança Cibernética do Inatel (CxSC Telecom), Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel, Santa Rita do Sapucaí - MG, e-mail: arielli.a@get.inatel.br, livia.cecilia@gec.inatel.br, pivoto.gustavo@gec.inatel.br, lucca.ribeiro@gec.inatel.br, diego.coutinho@inatel.br, guilhermeaquino@inatel.br, evandro.cesar@inatel.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Laboratório CS&I e Centro de Segurança Cibernética do Inatel (CxSC Telecom).

com análise feita por algoritmos de inteligência artificial (IA). No entanto, existem limitações como a resolução espacial, condições climáticas e custos em tecnologias de alta resolução.

Para obter resultados precisos, o sensoriamento remoto, o monitoramento em campo e o uso de soluções IoT se complementam, fornecendo dados para algoritmos de IA que garantem alta precisão no monitoramento de florestas [6]–[8]. Informações provenientes de satélites e drones com tecnologia para imageamento terrestre oferecem uma visão ampla do estado da cobertura vegetal, enquanto a coleta de dados ambientais em tempo real proporciona maior acurácia na identificação de alterações ambientais e ameaças específicas. O monitoramento em campo envolve o uso de equipes para coletar parâmetros ambientais (umidade do solo, temperatura, qualidade do ar, etc.) em áreas específicas, com mapeamento dos pontos de coleta por meio de dispositivos de geolocalização. Essa metodologia é limitada em área de cobertura devido ao custo elevado e aos recursos humanos necessários, resultando em coleta de dados escassa que afeta a qualidade final da análise da saúde florestal.

O uso de soluções em sensoriamento IoT permite inspecionar um amplo conjunto de parâmetros ambientais em tempo real e coletar dados massivamente por longos períodos [6]–[8]. No entanto, a implementação enfrenta desafios de infraestrutura em telecomunicações, pois regiões florestais geralmente não possuem redes terrestres, dificultando a conectividade das soluções IoT, cujos protocolos de comunicação dedicados apresentam limitações de cobertura. Além disso, redes terrestres de longo alcance, como a telefonia móvel, são inexistentes em regiões remotas e escassas em regiões rurais. Portanto, a conectividade via satélite torna-se essencial para viabilizar o monitoramento de florestas utilizando soluções IoT e colaborar com a conservação desses ecossistemas [9].

Satélites dedicados à comunicação permitem conectar áreas remotas e regiões rurais aos grandes centros urbanos, operando como repetidores entre o transmissor e o receptor. Portanto, propõe-se a missão Eremita, como prova de conceito para demonstrar a viabilidade de utilizar pequenos satélites em padrão 1U, denominados cubo satélites (CubeSats), para prover conectividade por meio do protocolo de comunicação LoRa aos módulos sensoriais de monitoramento de parâmetros ambientais em cenários de florestas. Projeta-se e implementa-se uma solução em comunicação fim-a-fim como prova de conceito para a conexão de módulos sensoriais remotos a uma central de processamento/armazenamento.

Esse trabalho está estruturado em cinco seções. Na Seção II, definem-se os requisitos de projeto para os subsistemas do

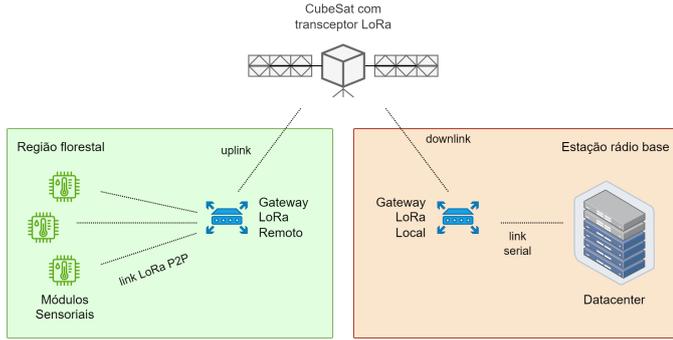


Fig. 1. Diagrama operacional da missão Eremita.

CubeSat e detalham-se os módulos sensoriais e estação terrena. A implementação e integração dos subsistemas é descrita na Seção III. Na Seção IV, apresenta-se a validação experimental da missão em solo. Conclusões e comentários finais encontram-se na Seção V.

II. REQUISITOS DE PROJETO

Os requisitos do projeto foram estabelecidos com base no objetivo da missão e no edital da 2ª Olimpíada Brasileira de Satélites do MCTI (2ª OBSAT). A missão Eremita deve prover a comunicação de módulos sensoriais remotos com redes de telecomunicações para monitoramento de florestas por meio da coleta de dados ambientais. Logo, o CubeSat deve atuar como um sistema repetidor para estabelecer um enlace de comunicação entre a estação terrena e redes terrestres para envio de dados ao servidor. A estação terrena deve operar como um *gateway* IoT para os módulos sensoriais. Os módulos sensoriais serão distribuídos dentro de uma área geográfica e programados para capturar dados em intervalos de tempo específicos, enviando-os para a estação terrena *gateway* IoT. A estação terrena recebe os dados provenientes dos diversos sensores e os transmite aos CubeSats, cujo papel é receber e retransmiti-los para uma estação terrena geograficamente distante da região florestal e próxima ao centro de processamento ou a uma rede de telecomunicações terrestre que auxilie no roteamento dos dados até essa central. Na Fig. 1, apresenta-se um diagrama dispondo os elementos necessários para a implementação da proposta.

Para a implementação do CubeSat, são definidos os seguintes subsistemas: carga útil, que corresponde ao próprio subsistema de telemetria e telecomando (STT&R), subsistema de computador de bordo (SCB), subsistema de determinação de atitude (SDA), subsistema de suprimento de energia (SSE), subsistema de controle térmico (CT) e estrutura mecânica. O desenvolvimento dos subsistemas deve atender aos requisitos e às limitações do projeto especificados no edital da 2ª OBSAT, como restrição de massa de 450 g, uso de materiais isolantes para controle interno de temperatura e a construção da estrutura mecânica com material termoplástico. O controle ativo de atitude não foi implementado por completo, devido ao fato de o CubeSat ser instalado em uma sonda estratosférica. Nesse contexto, incluíram-se apenas um giroscópio e um acelerômetro para realizar a coleta de informações nos três eixos.

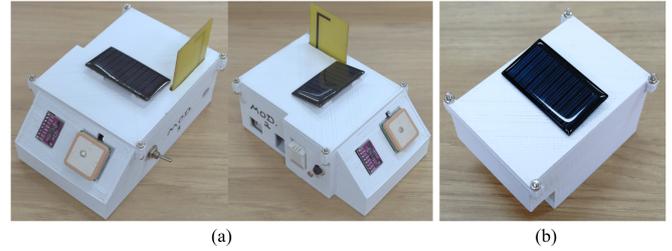


Fig. 2. (a) Protótipo dos módulos sensoriais e (b) protótipo do *gateway* IoT (estação terrena).

O projeto dos módulos sensoriais envolve um conjunto de sensores para a coleta de temperatura e umidade relativa do ar (sensor DHT22), luminosidade (sensor LDR) e concentração de dióxido de carbono (módulo sensor CCS811). A unidade microcontrolada Atmega328p processa os sinais elétricos provenientes dos sensores para transmissão através de um módulo de transmissão LoRa com o circuito integrado RFM95W. A posição geográfica em que os dados são capturados é fornecida pelo módulo GPS modelo NEO-6M, viabilizando o monitoramento geográfico de uma área florestal. O *gateway* ou estação terrena é composto por um microcontrolador ESP-32, um módulo LoRa RFM95W de transmissão e recepção e um cartão de memória micro SD. Os módulos sensoriais e o *gateway* são energizados por meio de baterias de Li-ion recarregáveis e equipados com painéis solares para sustentabilidade operacional contínua. Na Fig. 2, apresentam-se os protótipos dos módulos sensoriais e *gateway*.

III. PROTOTIPAGEM DO CUBESAT, MÓDULOS SENSORIAIS E *gateway*

Nessa seção, discute-se a implementação dos subsistemas do CubeSat, descrevendo-os em função dos componentes eletrônicos e projeto eletrônico, assim como incluem-se as rotinas de software.

O subsistema de carga útil ou STT&R deve receber dados por meio do protocolo LoRa e transmitir informações utilizando o protocolo Wi-Fi (lançamento em balão estratosférico) ou o protocolo LoRa (lançamento suborbital). Portanto, equipou-se o CubeSat com um módulo de transmissão/recepção LoRa (modelo RFM95W 915[MHz]) e um microcontrolador ESP-32 que oferece conectividade Wi-Fi nativa. Os dados recebidos pelo CubeSat são aqueles capturados pelos módulos sensoriais. No processo de transmissão, o CubeSat deve enviar esses dados juntamente com as informações de estado do satélite, sendo todos os dados armazenados em um cartão micro SD.

Projetou-se uma antena impressa para operar em conjunto com o módulo LoRa na faixa de frequência de 915[MHz], utilizando como base o modelo em [10]. Inicialmente, utilizou-se o programa de simulação eletromagnética ANSYS HFSS para definir as dimensões da antena de acordo com as dimensões das placas de circuito impresso (PCIs) do CubeSat. Posteriormente, o modelo inicial foi adaptado para implementar os transceptores LoRa dos módulos sensoriais e *gateway* IoT.

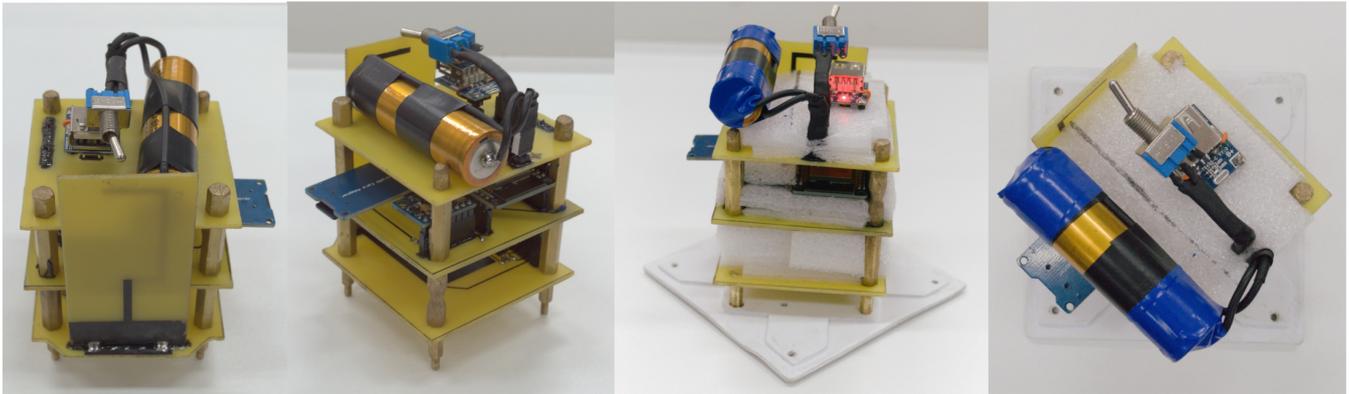


Fig. 3. Protótipo do CubeSat para a missão Eremita.

O SCB monitora e gerencia os demais subsistemas, garantindo que o CubeSat cumpra com sua missão. Esse subsistema foi implementado por meio do microcontrolador ESP-32 integrado à placa de desenvolvimento Node-MCU. Já o subsistema de controle térmico tem como objetivo monitorar e equilibrar a temperatura interna do CubeSat durante os ciclos de aquecimento e resfriamento, garantindo que os componentes elétricos e eletrônicos operem dentro da faixa de temperatura requerida sem sofrer danos. Para o projeto, o controle térmico utilizou material isolante conhecido como espuma de polietileno expandido (EPE). O EPE permite retardar a perda ou o ganho de temperatura em processos de resfriamento e aquecimento, atendendo aos propósitos da missão [10], [11].

O SDA é o sistema responsável por determinar a orientação do CubeSat por meio de uma solução que envolve sensores inerciais e não inerciais [12]. Desvios de atitude são corrigidos por meio de sistemas de atuação para gerar torque interno ou externo. Devido às restrições impostas pelo edital, o SDA foi desenvolvido utilizando apenas sensores inerciais, como o acelerômetro (modelo MPU6050) e o giroscópio (HMCL5883L). Esses componentes são integrados ao módulo GY-87, que também oferece a possibilidade de mensurar temperatura, pressão e altitude por meio do BMP180. O SSE tem como função fornecer a correta alimentação dos demais subsistemas para a execução da missão. As reservas de energia foram implementadas por meio de baterias de lítio. Por fim, alguns módulos e componentes foram adicionados ao SSE para habilitar o gerenciamento e monitoramento do processo de suprimento de energia em conjunto com o SCB, conforme a demanda de cada subsistema.

Os subsistemas foram implementados em PCIs conectadas por barramentos em uma estrutura com três camadas, conforme visto na Fig. 3. Essas placas foram alojadas no interior de uma estrutura cúbica com arestas de 10[cm] correspondente ao *form factor* 1U, cujas faces foram prototipadas por meio de impressão 3D e fixadas usando hastes metálicas e parafusos para garantir a robustez mecânica. Os componentes de cada sistema foram integrados em PCIs para promover a modularidade do projeto. Inicialmente, para verificar o funcionamento conjunto e testar as rotinas de códigos desenvolvidas, utilizaram-se *protoboards* e *jumpers* para a conexão

dos subsistemas. Após a correta operação dos subsistemas, as conexões de cada componente com os pinos GPIO (*general purpose input/output*) do microcontrolador ESP-32 foram estabelecidas e os esquemáticos elétricos das PCIs foram projetados no programa EasyEDA. O plano terra das PCIs foi reduzido aquele disposto na placa que contém o módulo LoRa, sendo estendido aos demais componentes por trilhas. Fez-se necessária essa abordagem para minimizar interferências na operação da antena por interações em campo próximo reativo.

O microcontrolador estabelece comunicação com o módulo LoRa e o cartão micro SD através de uma interface serial. Essa comunicação permite o envio dos dados obtidos para a estação terrena e o armazenamento desses dados na memória do cartão micro SD, utilizando a interface SPI (*serial peripheral interface*). Além disso, o microcontrolador utiliza a interface I²C (*inter-integrated circuit*) para se comunicar com os componentes do módulo GY-87, adquirindo os dados sensoriais necessários para monitorar o estado do CubeSat durante o voo. Para garantir o correto fornecimento de energia a todos os componentes, é empregado um módulo conversor de tensão, que ajusta a tensão de 3,7[V] para 5[V], conforme os requisitos de suprimento de energia dos subsistemas. A fonte de energia é fornecida por uma célula de carga formada pela associação paralela de duas baterias de Lítio, cada uma com capacidade de 2,2[Ah].

Na Figura 4, são abordados os diagramas de fluxo relativos às sequências de código para a operação do CubeSat e a execução da missão Eremita. As linhas de código são estruturadas em funções chamadas a partir de uma rotina principal. Ao energizar o microcontrolador, desencadeia-se o processo de inicialização e validação dos subsistemas, seguido pela verificação desses eventos. Após a conclusão desta etapa inicial, a rotina *Handlers & Power Management* é executada, inicializando um temporizador para coordenar atividades como leituras, transmissões, ativação da carga útil e registro de dados.

A etapa de *Leitura* permite ao microcontrolador avaliar o estado operacional dos sensores, realizar calibrações e coletar dados relevantes, os quais são armazenados em um *buffer* para posterior transmissão, dentro do intervalo de tempo de quatro minutos. A etapa de *Transmissão* compreende a

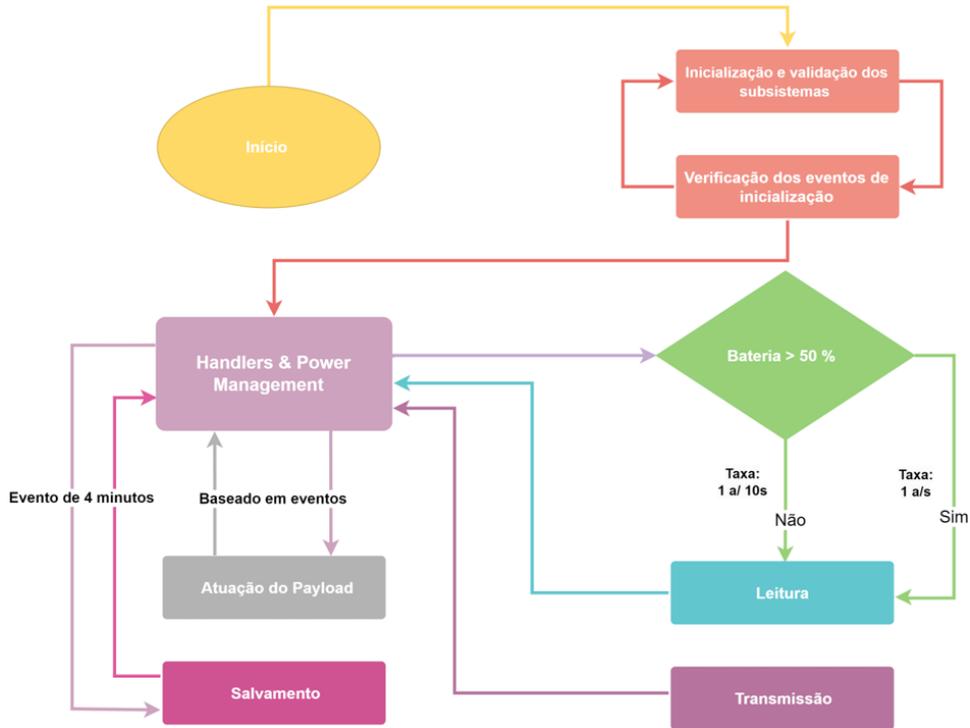


Fig. 4. Fluxograma da rotina implementada para viabilizar a operação do CubeSat.

inicialização da conexão Wi-Fi do microcontrolador com o ponto de acesso presente na sonda (lançamento em sonda estratosférica). Logo após, é estabelecida uma conexão com o servidor da organização via protocolo HTTP, possibilitando o envio dos dados de telemetria e missão. O êxito dessas conexões inicia o processo de preparação e validação dos pacotes de dados a serem transmitidos.

A Atuação do Payload é implementada por meio de uma abordagem baseada em eventos. Isto é, quando o CubeSat recebe um pacote LoRa endereçado pela estação terrena (*gateway* IoT), desencadeia-se o procedimento de retransmissão das informações ao servidor. Por fim, a etapa de registro de dados (*Salvamento*) verifica o correto funcionamento do módulo de leitura/escrita do cartão de memória. Em situação operacional, os dados são preparados e formatados para serem registrados na memória, proporcionando meios para a validação da missão.

IV. VALIDAÇÃO DA MISSÃO EM SOLO

Durante a missão, busca-se coletar e registrar os seguintes dados: estampa de tempo, quantidade de gás detectado, coordenadas geográficas, índice de iluminação, temperatura e umidade relativa do ar. Para facilitar a comunicação, a carga útil inclui informações sobre a potência, o erro de frequência e a relação sinal-ruído do sinal recebido referente ao uso do protocolo LoRa. Adicionalmente, é necessário transmitir informações sobre o estado do satélite durante o voo, como o nível da bateria, temperatura, pressão e dados do giroscópio e acelerômetro. Esses dados são formatados em um arquivo JSON e enviados para o servidor, sendo também armazenados em um cartão de memória inserido no módulo.



Fig. 5. Posição geográfica do módulo sensorial, da estação terrena/gateway IoT e do CubeSat para o teste prático em solo.

Para a captura de dados de telemetria e missão, foi implementado um servidor HTTP local durante a validação da missão em solo. Conduziu-se um teste prático em solo para avaliar a comunicação entre um módulo sensorial, a estação terrena/gateway IoT e o CubeSat, onde cada qual foi posicionado em um ponto distinto dentro do Campus do Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel), conforme visto na Fig 5. Em seguida, monitorou-se a troca de informações. Inicialmente o módulo sensorial com endereço $0 \times cccc$ envia dados para o *gateway*, cujo endereço é $0 \times bbbb$. O *gateway* retransmite o pacote recebido para o CubeSat, identificado pelo endereço $0 \times dddd$. Ao receber o pacote, o satélite retransmite para uma terceira estação terrena de endereço $0 \times aaaa$. Para utilizar das funcionalidades de transceptor do módulo LoRa implementado no *gateway*, reutilizou-se o elemento como sendo a estação terrena de endereço $0 \times aaaa$.



Fig. 6. Troca de mensagens através do protocolo LoRa durante o teste prático em solo.

O fluxo de informações entre as entidades está representado na Fig. 6.

V. CONCLUSÃO

Este trabalho descreveu o desenvolvimento de um CubeSat no formato 1U, projetado para fornecer comunicação fim-a-fim utilizando o protocolo LoRa, visando o monitoramento de florestas e o auxílio na coleta de dados em tempo real para a avaliação da saúde dos ecossistemas florestais. O CubeSat funciona como uma unidade repetidora, conectando módulos sensoriais ao servidor de processamento e armazenamento de dados. Os módulos comunicam-se com o CubeSat através de uma estação terrena, que opera como um gateway para o envio de parâmetros como temperatura, umidade relativa do ar, luminosidade e concentração de dióxido de carbono, todos relacionados à sua posição geográfica. Foi realizado um teste em solo para validar a missão, demonstrando a comunicação adequada entre os nós do sistema. Futuros trabalhos incluem a realização de um voo em balão estratosférico para submeter o sistema a um cenário operacional mais próximo da realidade, proporcionando uma compreensão da viabilidade do uso do protocolo LoRa para este tipo de aplicação.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Marx and G. O. Tetteh, "A forest vitality and change monitoring tool based on rapideye imagery," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 14, no. 6, pp. 801–805, 2017.
- [2] E. Muñoz, A. Zozaya, and E. Lindquist, "Satellite remote sensing of forest degradation using ndfi and the bfast algorithm," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 18, no. 07, pp. 1288–1295, 2020.
- [3] M. Vollmar, R. Rasi, R. Beuchle, D. Simonetti, H.-J. Stibig, and F. Achard, "Combining landsat tm/etm+ and alos avnir-2 satellite data for tropical forest cover change detection," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 6, no. 1, pp. 102–109, 2013.
- [4] E. Muñoz, A. Zozaya, and E. Lindquist, "Satellite remote sensing of forest degradation using ndfi and the bfast algorithm," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 18, no. 07, pp. 1288–1295, 2020.
- [5] J. Franke, P. Navratil, V. Keuck, K. Peterson, and F. Siegert, "Monitoring fire and selective logging activities in tropical peat swamp forests," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 5, no. 6, pp. 1811–1820, 2012.
- [6] N. Ghosh, B. Kumar, T. Biswas, S. Patnaik, and R. Paul, "Iot fog based framework to predict forest fire," in *2021 Smart City Challenges & Outcomes for Urban Transformation (SCOUT)*, 2021, pp. 256–259.
- [7] S. Swaminathan, S. Sankaranarayanan, S. Kozlov, and J. J. Rodrigues, "Compression-aware aggregation and energy-aware routing in iot-fog-enabled forest environment," *Sensors*, vol. 21, no. 13, p. 4591, 2021.
- [8] F. Cui, "Deployment and integration of smart sensors with iot devices detecting fire disasters in huge forest environment," *Computer Communications*, vol. 150, pp. 818–827, 2020.
- [9] Z. Qu, G. Zhang, H. Cao, and J. Xie, "Leo satellite constellation for internet of things," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 18 391–18 401, 2017.
- [10] D. A. Coutinho, P. L. S. Paulino, A. A. d. Conceição, S. F. Vilela, G. P. Aquino, A. A. Ferreira Junior, and E. C. V. Boas, "Design, prototyping and stratospheric launch of cubesats for university competition," *Journal of Aerospace Technology and Management*, vol. 15, p. e0623, 2023.
- [11] D. A. Coutinho, S. F. Vilela, A. A. Conceição, P. L. Paulino, G. P. Aquino, A. A. Junior, and E. C. V. Boas, "Desenvolvimento de um cubesat para mapeamento de radiação gama em Órbita baixa," in *XL Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBt 2022)*, 2022, pp. 01–05.
- [12] D. A. Coutinho, A. A. da Conceição, A. A. F. Junior, and E. C. V. Boas, "A fast centroiding algorithm for digital sun sensors for nanosatellite applications," *IEEE Sensors Letters*, vol. 6, no. 4, pp. 1–4, 2022.