# SISTEMA EMBARCADO E ESTAÇÃO DE SOLO PARA RECEPÇÃO DE IMAGENS E ANÁLISE DE ROTAÇÃO E ESTABILIDADE DE FOGUETES

**Autores: Isabella Oliveira Assis, Pedro Filipp Batista de Moraes, Priscila Freitas Lemes Lourenço.**

Universidade do Vale do Paraíba/Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento, Avenida Shishima Hifumi, 2911, Urbanova - 12244-000 - São José dos Campos-SP, Brasil, isabellaassis950@gmail.com, pedrofilipp1154@gmail.com, priscila@univap.br

**Resumo**

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema embarcado e de uma estação de solo para transmissão, recepção e visualização de imagens aplicadas ao monitoramento da dinâmica de foguetes experimentais. O sistema integra ESP32-CAM com sensor OV2640, ESP32 DevKit V1 e módulo NRF24L01+ para captura, armazenamento e transmissão de frames. Em razão das restrições de largura de banda da conexão de radiofrequência, o vídeo completo é armazenado em cartão microSD, enquanto frames selecionados são destinados à transmissão. A estação de solo utiliza *Python* e *Streamlit* para recepção e visualização dos dados. Foram realizados testes preliminares, em ambiente controlado e com dados simulados, que verificaram de forma geral o fluxo de comunicação, processamento e apresentação das informações. O protótipo possui custo estimado de R$ 387,95. Os resultados demonstram a viabilidade funcional inicial da arquitetura, mas não permitem, nesta etapa, quantificar a precisão da estimativa de rotação e estabilidade. A validação da conexão e dos algoritmos em condições reais de voo está prevista para a *Latin American Space Challenge* (LASC), em 2026.

**Palavras-chave:** Sistemas embarcados. Radiofrequência. Visão computacional. Foguetes experimentais. Processamento de imagens.

**Área do Conhecimento:** Área: Engenharias e Subárea: Engenharia da Computação

## Introdução

Sistemas embarcados de aquisição de imagens ampliam o monitoramento de veículos aeroespaciais por meio da visão computacional. Em aplicações de determinação de atitude, imagens podem auxiliar na estimativa da orientação de foguetes e espaçonaves (CHRISTIAN, 2021; BRAUN; BARF, 2023). Em sistemas com restrições de massa, energia e processamento, é necessário integrar aquisição, armazenamento e comunicação de dados. Nesse contexto, o projeto *SkyWalker* 3 km, desenvolvido pela Equipe Bravo, propõe uma solução de baixo custo para registrar imagens durante o voo. As imagens são posteriormente disponibilizadas à estação de solo para visualização e análise da dinâmica do foguete.

Durante a missão, o sistema embarcado deve capturar e armazenar o vídeo localmente, enquanto frames selecionados são transmitidos por radiofrequência. Essa estratégia é necessária porque a transmissão de imagens impõe demanda elevada de comunicação, especialmente quando se utilizam transmissores com *payload* reduzido. O nRF24L01+ opera na faixa ISM de 2,4 GHz e foi escolhido para comunicação de dados em pacotes, característica que exige reconstrução quando a informação transmitida excede o tamanho de um pacote (NORDIC SEMICONDUCTOR, 2026). Na estação de solo, os frames recebidos são reconstruídos e apresentados em um dashboard desenvolvido em Python e Streamlit.

A arquitetura proposta é composta por módulos de armazenamento, processamento, transmissão e recepção. O ESP32-CAM realiza a captura das imagens por meio do sensor OV2640, suportado pela plataforma ESP32 e compatível com aquisição em formatos comprimidos, como JPEG (ESPRESSIF SYSTEMS, 2026). Um ESP32 DevKit V1 gerencia a comunicação com o módulo NRF24L01+, enquanto a estação de solo utiliza outro conjunto de microcontrolador e rádio conectado ao computador. Essa organização permite separar as funções do sistema, reduzindo a sobrecarga de processamento em cada componente e favorecendo a transmissão dos dados durante o voo. Além disso, a comunicação via rádio possibilita o envio das informações para a estação de solo sem depender de uma conexão *Wi-Fi*.

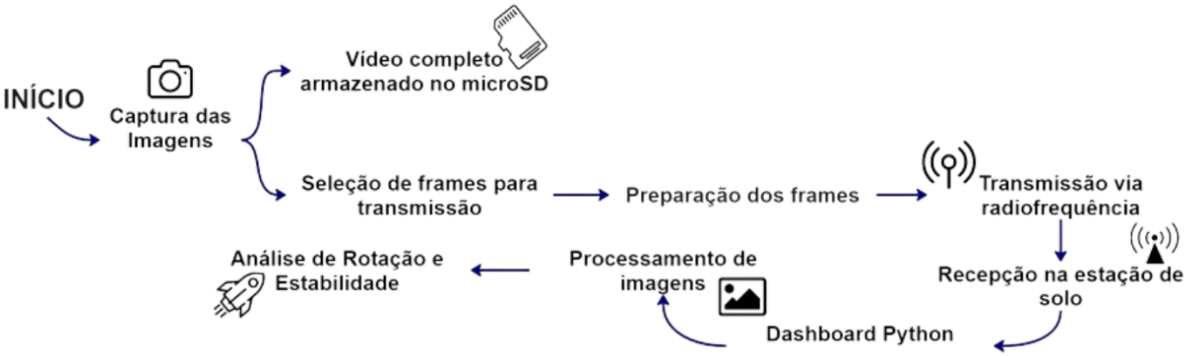
Diante disso, o objetivo deste trabalho é desenvolver e verificar, em ambiente controlado, a arquitetura de um sistema embarcado e de uma estação de solo capazes de capturar, armazenar, transmitir, receber, reconstruir e visualizar imagens de um foguete experimental. Como objetivo específico, propõe-se estruturar o fluxo de processamento de imagens que, após validação em voo, será empregado na estimativa da rotação e da estabilidade do veículo. Busca-se, assim, avaliar a viabilidade funcional inicial da integração entre sistemas embarcados, comunicação por radiofrequência e processamento de imagens em uma solução de baixo custo.

**Metodologia**

O desenvolvimento foi organizado em duas partes: sistema embarcado e estação de solo. O primeiro é responsável pela captura, pelo armazenamento local e pela preparação dos frames para transmissão; o segundo realiza a recepção, a reconstrução e a visualização dos dados. A arquitetura foi definida considerando as restrições do protótipo e a capacidade do enlace de radiofrequência. Nesta etapa, adotou-se uma abordagem de prova de conceito, com verificação funcional em bancada e dados simulados, sem ensaios de alcance, taxa efetiva de transferência, perda de pacotes ou precisão da estimativa de atitude.

No sistema embarcado, foi utilizado um ESP32-CAM com sensor OV2640 para captura das imagens e armazenamento do vídeo em cartão microSD. O gerenciamento da transmissão é realizado por um ESP32 DevKit V1 integrado ao módulo NRF24L01+ PA+LNA. O enlace opera na faixa de 2,4 GHz, e a alimentação é composta por duas baterias 18650, módulo TP4056 e conversor step-up. A integração entre os componentes e o fluxo previsto de captura, armazenamento, seleção, transmissão, recepção e processamento são apresentados na Figura 1.

**Figura 1 – Arquitetura geral do sistema de câmera embarcado.**




**Fonte: Autores (2026).**

Durante a operação, a câmera realiza a captura contínua das imagens e mantém o vídeo completo armazenado localmente. Para adequação, apenas frames selecionados são preparados para transmissão, com possibilidade de redução de resolução e divisão em pacotes. Os dados são enviados à estação de solo e reorganizados no receptor para reconstrução da imagem. Essa estratégia preserva o registro da missão no cartão microSD e reduz a quantidade de dados que precisa ser transmitida.

A estação de solo utiliza um ESP32 DevKit V1 conectado ao módulo NRF24L01+ para receber os pacotes transmitidos pelo sistema embarcado. Após a recepção, os dados são encaminhados ao computador por interface *USB*. O *software* foi desenvolvido em *Python*, com *Streamlit* para construção do *dashboard*, responsável pela visualização dos frames reconstruídos e das variáveis derivadas do processamento.

A verificação teste foi realizada em *protoboard,* em ambiente controlado, utilizando dados simulados para representar o fluxo previsto de uma missão. Foram verificados a comunicação entre os módulos, o encaminhamento dos dados ao computador, o processamento e a apresentação das informações no *dashboard*. Também foram elaborados os esquemas elétricos e a placa de circuito impresso (PCB), considerando compatibilidade entre componentes, alimentação, organização física e custo. A análise de rotação e estabilidade foi estruturada no *software*, porém sua acurácia ainda não foi validada com dados reais de voo; portanto, nesta etapa, a avaliação é exclusivamente funcional e qualitativa.

**Resultados**

O desenvolvimento resultou na definição e integração da arquitetura do sistema embarcado e da estação de solo. O protótipo embarcado foi estruturado com ESP32-CAM, ESP32 DevKit V1, módulo NRF24L01+ PA+LNA, antena de 2,4 GHz e circuito de alimentação. A estação de solo foi configurada para receber os pacotes, encaminhá-los ao computador e disponibilizar os dados ao software de visualização.

Também foram elaborados os esquemas elétricos, as representações tridimensionais dos componentes e a PCB do sistema. Após a verificação preliminar em protoboard, os componentes foram organizados na placa, tornando a montagem mais compacta e reduzindo a dependência de conexões provisórias.

Nos testes de bancada com dados simulados, foi verificado o fluxo completo entre recepção, encaminhamento ao computador, processamento e apresentação das informações. A comunicação entre os módulos e a atualização do dashboard ocorreram de forma funcional durante as verificações realizadas. Esses ensaios, entretanto, não incluíram medição de alcance, latência, taxa de transferência, perda de pacotes ou erro de reconstrução de imagens; por esse motivo, os resultados devem ser interpretados como evidência qualitativa de funcionamento da arquitetura, e não como validação de desempenho do enlace.

O dashboard desenvolvido em *Python* e *Streamlit* foi utilizado para apresentar os dados simulados e a estrutura prevista para acompanhamento da dinâmica do foguete, conforme a Figura 2. A interface contempla a visualização de informações associadas à atitude do veículo. Como os dados utilizados nesta etapa foram simulados, não foi calculado erro de estimativa de rotação ou estabilidade em relação a uma referência experimental.

**Figura 2 – Dashboard da estação de solo com apresentação dos dados utilizados nos testes simulados.**

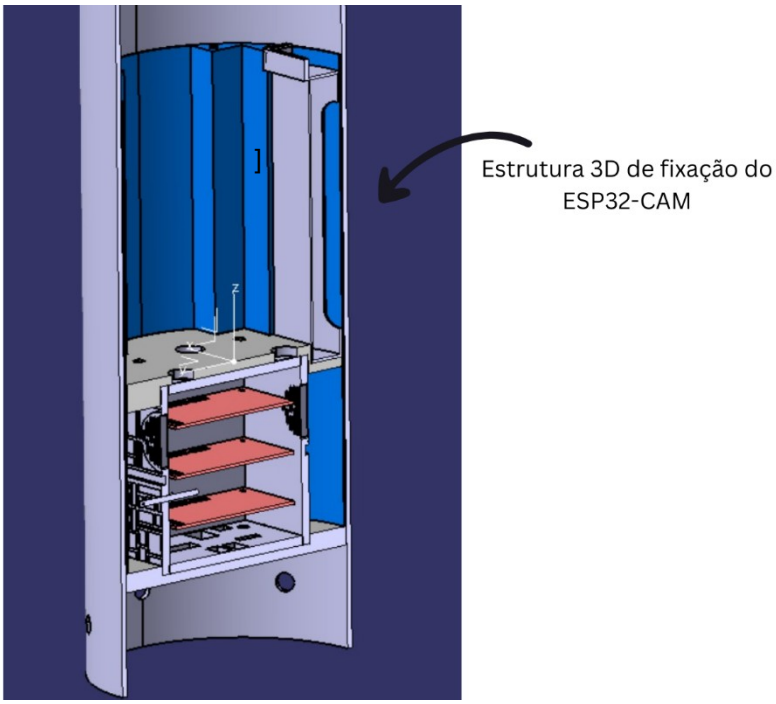



**Fonte: Autores (2026).**

A estratégia de transmissão foi definida de modo a manter o vídeo completo no cartão microSD e destinar ao enlace apenas frames selecionados. Essa decisão é coerente com as limitações práticas de transmissão de imagens em um rádio orientado a pacotes. O custo estimado do protótipo é de R$ 387,95. Assim, os resultados obtidos até esta etapa sustentam a viabilidade funcional e econômica inicial da proposta, permanecendo necessária a caracterização quantitativa do sistema em ensaios de bancada e em voo.

A estrutura 3D desenvolvida para acomodação do ESP32-CAM foi projetada para garantir a fixação e o posicionamento adequado do sistema de aquisição de imagens, conforme apresentado na Figura 3. O suporte permite manter o módulo protegido e alinhado durante o voo, contribuindo para a estabilidade da captura das imagens. A disposição dos componentes também considera as limitações de espaço e massa presentes no veículo.

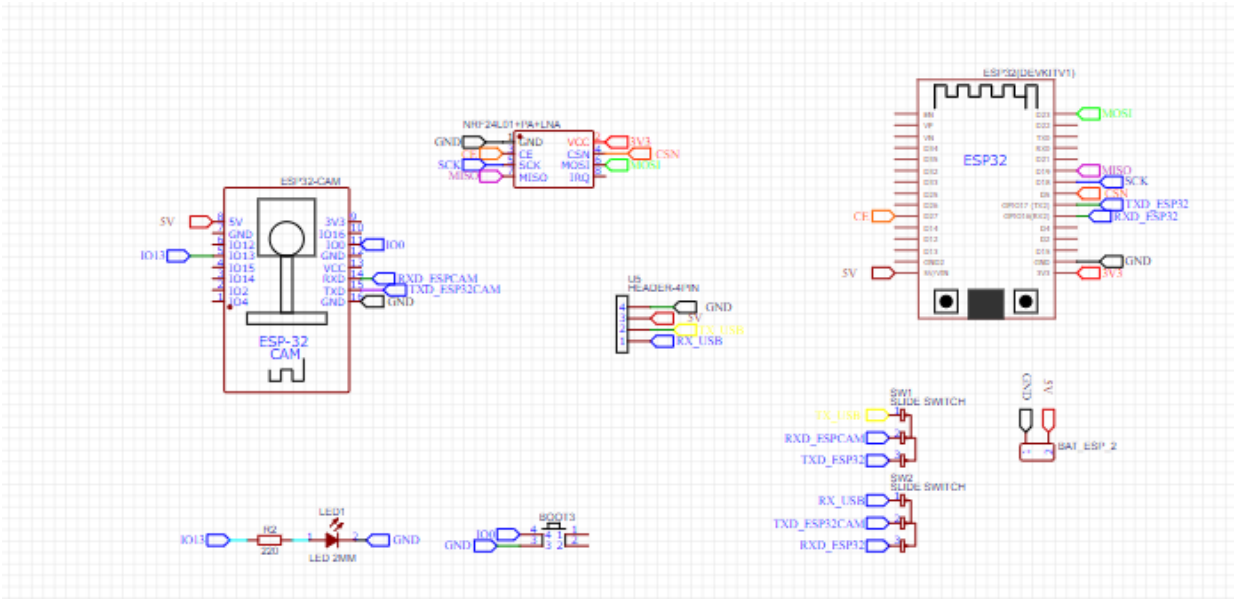
**Figura 3: Estrutura 3D para acomodação e fixação do ESP32-CAM no sistema embarcado.**




**Fonte: Autores (2026)**

A Figura 4 apresenta o esquema elétrico do circuito utilizado no sistema de aquisição de imagens. O diagrama representa as conexões entre o ESP32-CAM, o ESP32 *DevKit* V1, o módulo de comunicação NRF24L01+ e a alimentação do circuito. Essa representação permite visualizar a interligação dos componentes e auxilia na montagem e verificação do sistema embarcado.

**Figura 4 – Esquema elétrico do circuito de aquisição e transmissão de imagens.**




**Fonte: Autores (2026)**

**Discussão**

Os testes preliminares confirmaram qualitativamente a integração entre os principais blocos da arquitetura: recepção dos dados, encaminhamento ao computador, processamento e apresentação no *dashboard*. Esse resultado é compatível com o caráter de prova de conceito desta etapa. Entretanto, a ausência de métricas de comunicação e de uma referência experimental para atitude impede afirmar, neste momento, que o sistema esteja validado para medir rotação e estabilidade. A principal contribuição dos ensaios foi demonstrar que o fluxo de dados pode ser executado em ambiente controlado e identificar os parâmetros que deverão ser quantificados nas próximas etapas.

A adoção de componentes de baixo custo favoreceu uma arquitetura modular, na qual aquisição, armazenamento, comunicação e processamento são distribuídos entre diferentes elementos. O uso do ESP32-CAM com OV2640 é tecnicamente coerente com a aquisição de imagens comprimidas em plataformas ESP32 (ESPRESSIF SYSTEMS, 2026). Por sua vez, o nRF24L01+ é um transceptor de 2,4 GHz voltado à comunicação em pacotes (NORDIC SEMICONDUCTOR, 2026), o que reforça a necessidade de selecionar, comprimir e fragmentar os frames antes da transmissão.

A opção por transmitir apenas frames selecionados, mantendo o vídeo integral no microSD, reduz a demanda sobre o enlace e preserva um conjunto de dados mais completo para análise posterior. Essa escolha é particularmente relevante porque a estimativa de orientação por visão computacional depende da qualidade e da disponibilidade das imagens. Trabalhos com foguetes de sondagem demonstram que imagens podem ser empregadas na estimativa de orientação, mas a qualidade do resultado depende do método, da geometria observada e da existência de referências adequadas para validação (BRAUN; BARF, 2023).

A principal limitação deste estudo é o caráter preliminar dos ensaios: foram utilizados dados simulados e não foram determinados alcance do enlace, latência, taxa efetiva de transferência, perda de pacotes, taxa de frames reconstruídos nem erro angular da estimativa. A validação em condições reais de voo está prevista para a *Latin American Space Challenge* (LASC), em 2026. Para que essa etapa produza evidência quantitativa, recomenda-se registrar essas métricas e comparar a estimativa de rotação e estabilidade com uma referência independente, como dados de uma unidade de medição inercial ou outro sistema de atitude sincronizado.

**Conclusão**

O trabalho atingiu o objetivo de desenvolver e verificar funcionalmente, em ambiente controlado, uma arquitetura integrada de sistema embarcado e estação de solo para aquisição, armazenamento, transmissão, recepção, reconstrução e visualização de imagens. Os testes com dados simulados demonstraram o funcionamento qualitativo do fluxo de comunicação e processamento, e a montagem em PCB consolidou a integração física do protótipo. O custo estimado de R$ 387,95 indica potencial para uma solução de baixo custo em aplicações experimentais.

Os resultados ainda não permitem concluir sobre o desempenho do enlace em voo nem sobre a precisão da estimativa de rotação e estabilidade, pois essas grandezas não foram avaliadas quantitativamente. A próxima etapa consiste em realizar ensaios com métricas de comunicação e validar os algoritmos com uma referência independente de atitude. A campanha prevista para a LASC 2026 deverá permitir verificar o comportamento do sistema em condições operacionais e orientar ajustes de hardware, comunicação e processamento de imagens.

**Referências**

BRAUN, Benjamin; BARF, Jochen. Image processing based horizon sensor for estimating the orientation of sounding rockets, launch vehicles and spacecraft. CEAS Space Journal, v. 15, p. 509–533, 2023. DOI: 10.1007/s12567-022-00461-0.

CHRISTIAN, John A. A tutorial on horizon-based optical navigation and attitude determination with space imaging systems. IEEE Access, v. 9, p. 19819–19853, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3051914.

ESPRESSIF SYSTEMS. ESP32 Camera Driver: suporte a sensores de imagem, incluindo OV2640. 2026. Disponível em: https://components.espressif.com/components/espressif/esp32-camera. Acesso em: 26 ago. 2026.

NORDIC SEMICONDUCTOR. nRF24 Series: transceptores de 2,4 GHz, incluindo nRF24L01+. 2026. Disponível em: https://www.nordicsemi.com/Products/nRF24-series. Acesso em: 26 ago. 2026.

**Agradecimentos**

Agradeço, primeiramente, à professora Priscila, pela orientação, dedicação, apoio e pelos conhecimentos compartilhados durante o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também aos colegas Gabriel Duarte, João Krugner e Heitor Gimeniz, pela parceria, colaboração e auxílio ao longo do desenvolvimento do projeto. À equipe Bravo Aerospace, agradeço pelo apoio, pela troca de conhecimentos e pela contribuição para a realização deste projeto. Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para o desenvolvimento e a conclusão deste trabalho.