

Article

CUBESAT ALDEBARAN TELEMETRY AND TELECOMMAND SUBSYSTEM BASED ON LORA TECHNOLOGY: DEVELOPMENT, IMPLEMENTATION, VALIDATION AND CHALLENGES

Santos, J.L.¹, Marques, J.G.², Silva, L.C.³, Júnior, C.A.⁴, Júnior, J.R.⁵ and Lopes, M.^{6*}

¹ Aerospace Engineering, Federal University of Maranhão, Maranhão, Brazil

² Aerospace Engineering, Federal University of Maranhão, Maranhão, Brazil

³ Aerospace Engineering, Federal University of Maranhão, Maranhão, Brazil

⁴ Aerospace Engineering, Federal University of Maranhão, Maranhão, Brazil

⁵ Electrical Engineering, Federal University of Maranhão, Maranhão, Brazil

⁶ Aerospace Engineering, Federal University of Maranhão, Maranhão, Brazil

* Correspondence: joao.lcs@discente.ufma.br (J.L.); jgb.marques@discente.ufma.br (J.G.); claudio.luis@ufma.br (L.C.); carlos.brito@ufma.br (C.A.); jrpb.junior@ufma.br (J.R.); lopes.marcus@ufma.br (M.)

Received: Outubro/2025; Accepted: Novembro/2025; Published: Novembro/2025

Abstract: This article presents the development and validation of the Telemetry and Telecommand (TTC) subsystem for Aldebaran 1, a 1U CubeSat from the Federal University of Maranhão (UFMA) designed to assist in rescuing fishing vessels. Emphasizing a parallel programming approach and low-cost solutions, the hardware adapts a flight-proven architecture using an MSP430 microcontroller and a LoRa (Long Range) radio for primary communication in the UHF band. The software utilizes FreeRTOS for real-time task scheduling, managing separate uplink and downlink channels. Key features include a telecommand interpreter for autonomous execution with the On-Board Data Handling (OBDH) subsystem and reconfiguration mechanisms to adjust transmission power and telemetry intervals, optimizing energy consumption. For operational safety, an emergency telecommand can interrupt radio operations, while a hibernation system prevents transmission until antenna deployment is confirmed. The subsystem was validated through extensive ground tests and simulations, which confirmed its reliability and communication integrity. Final validation will be conducted in orbit based on data collected after the launch of Aldebaran 1 to enable further performance improvements. This project represents a significant milestone for UFMA's Aerospace Engineering course and the regional aerospace sector, contributing to the academic development of its students.

Keywords: Cubesat, TTC, FreeRTOS, LoRa, Aldebaran

Resumo: Este artigo apresenta o desenvolvimento e a validação do subsistema de Telemetria e Telecomando (TTC) para o Aldebaran 1, um CubeSat 1U da Universidade Federal do Maranhão (UFMA) projetado para auxiliar no resgate de embarcações pesqueiras. Enfatizando uma abordagem de programação paralela e soluções de baixo custo, o hardware adapta uma arquitetura com histórico de voo comprovado, utilizando um microcontrolador MSP430 e um rádio LoRa (Longo Alcance) para a comunicação primária na banda UHF. O software utiliza o FreeRTOS para o escalonamento de tarefas em tempo real, gerenciando canais de uplink e downlink separados. As características principais incluem um interpretador de telecomandos para execução autônoma com o subsistema de Gerenciamento de Dados a Bordo (OBDH) e mecanismos de reconfiguração para ajustar a potência de transmissão e os intervalos de telemetria, otimizando o consumo de energia. Para segurança operacional, um telecomando de emergência pode interromper as operações de rádio, enquanto um sistema de hibernação impede a transmissão até que a implantação da antena seja confirmada. O subsistema foi validado através de extensos testes em solo e simulações, que confirmaram sua confiabilidade e integridade de comunicação. A validação final será conduzida em órbita com base nos dados coletados após o lançamento do Aldebaran 1 para permitir futuras melhorias de desempenho. Este projeto

representa um marco significativo para o curso de Engenharia Aeroespacial da UFMA e para o setor aeroespacial regional, contribuindo para o desenvolvimento acadêmico de seus estudantes.

Palavras-chave: Cubesat, TTC, FreeRTOS, LoRa, Aldebaran

1. Introdução

A popularização dos nanossatélites, particularmente aqueles que seguem o padrão CubeSat, democratizou o acesso ao espaço, NASA (2024), permitindo que instituições acadêmicas e centros de pesquisa desenvolvessem missões espaciais com custos e cronogramas reduzidos. Dentro dessas missões, um componente indispensável para o sucesso de qualquer missão de satélite é o subsistema de Telemetria e Telecomando (TTC), que funciona como o elo de comunicação vital entre o satélite em órbita e as estações de controle em solo, Modenini e Ripani (2023). A robustez e a confiabilidade deste subsistema são determinantes para a operação da missão, o monitoramento da saúde do satélite e a recuperação de dados.

Este artigo detalha o desenvolvimento e a análise da arquitetura de software do subsistema TTC projetado para o Aldebaran-1, Júnior et al. (2022), um CubeSat de formato 1U desenvolvido pelo Laboratório de Eletrônica e Sistemas Embarcados Espaciais (LABESEE) na Universidade Federal do Maranhão (UFMA). A missão primária do Aldebaran-1 é de caráter social e tecnológico: auxiliar no resgate de pequenas embarcações de pesca na costa do Maranhão. Para isso, o satélite atuará como um retransmissor de dados, recebendo sinais de localização de transmissores de baixo custo instalados nos barcos e enviando essa informação para a estação de solo. Adicionalmente, o satélite também atuará como um sistema de coleta de dados ambientais, recebendo e armazenando dados de Plataformas de Coleta de Dados (PCDs).

A arquitetura de hardware do TTC do Aldebaran adota uma abordagem estratégica, baseando-se na plataforma TTC 2.0 do projeto FloripaSat-2, que é uma melhoria do TTC 1.0 do projeto FloripaSat-1, Marcelino et al. (2021), Marcelino et al. (2020), que possui herança de voo, desenvolvida pelo Laboratório de Pesquisa em Sistemas Espaciais (SpaceLab) na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Essa decisão mitiga os riscos de desenvolvimento ao utilizar um projeto já validado no ambiente espacial. A principal modificação para a missão Aldebaran foi a substituição dos rádios originais da primeira missão por dois módulos de rádio dedicados que utilizam a tecnologia LoRa (Longo Alcance). Essa tecnologia foi selecionada por sua alta sensibilidade de recepção e eficiência energética em comunicações de longa distância, características ideais para o conceito da missão, bem como por seu uso em outras missões espaciais, Parada et al. (2023), como as missões FossaSat, que demonstraram a eficiência da comunicação LoRa, Fernandez et al. (2022). O modelo de engenharia utilizado, com as modificações feitas, pode ser visto na Figura 1, possuindo dois rádios LoRa, com um microcontrolador MSP430 exclusivo para cada rádio. Adicionalmente, o nanossatélite completo em sua versão final pode ser visto na Figura 2.

Dessa forma, o presente artigo se foca na análise detalhada das principais tarefas que governam o fluxo de dados e a lógica operacional da placa TTC, demonstrando como a arquitetura de software foi projetada para garantir a confiabilidade e o sucesso da missão Aldebaran-1.

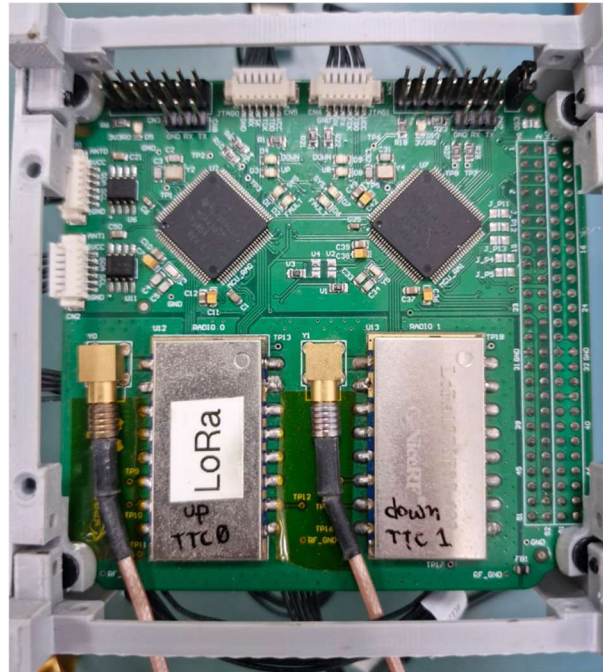


Figura 1. Modelo de Engenharia da Placa TTC do Cubesat Aldebaran.

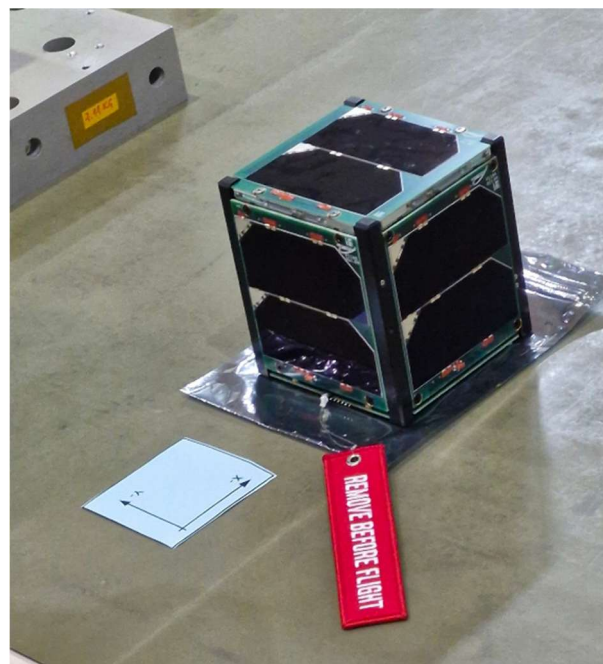


Figura 2. Modelo de Voo do Cubesat Aldebaran 1.

2. Materiais e Métodos

A metodologia de desenvolvimento do software embarcado para o subsistema TTC do Aldebaran-1 foi baseada na estrutura do código-fonte da placa TTC do FloripaSat-2, com suas tarefas principais completamente alteradas para se adaptarem aos requisitos do Aldebaran-1. Com base em uma arquitetura em tempo real e orientada a tarefas, o código foi modificado para atender aos requisitos operacionais e de segurança da missão. A implementação foi realizada utilizando o sistema FreeRTOS, Ibrahim (2021), permitindo assim a criação de um sistema modular, determinístico e concorrente, onde múltiplas tarefas são gerenciadas com base em prioridades. A abordagem metodológica focou na definição de parâmetros de comunicação, no desenvolvimento de tarefas de suporte essenciais para a estabilidade e segurança do sistema, na implementação dos principais fluxos de execução e na validação do rádio LoRa.

2.1. Configuração do Enlace de Rádio LoRa

A comunicação do subsistema TTC é realizada por dois módulos de rádio idênticos que utilizam a tecnologia LoRa, cada um operando com parâmetros específicos para otimizar sua função de uplink (recebimento de comandos) ou downlink (envio de telemetria). As configurações de rádio, detalhadas na Tabela 1, foram cuidadosamente selecionadas para encontrar um equilíbrio ideal entre robustez, alcance e taxa de transferência de dados, atendendo às necessidades operacionais da missão.

O Rádio 0, dedicado exclusivamente ao Uplink (recebimento de telecomandos), foi configurado com um Fator de Espalhamento (SF) de 11. A escolha de um SF alto é uma decisão estratégica para maximizar a sensibilidade de recepção, Semtech Corporation (2017). Um SF mais alto aumenta o tempo no ar do sinal, tornando-o mais distinguível do ruído de fundo e permitindo que o receptor capture sinais de baixa potência de transmissores em solo. Essa característica é crucial para o sucesso da missão, pois garante que os comandos enviados do solo possam ser recebidos de forma confiável pelo satélite, mesmo em condições de sinal não ideais. A contrapartida de um SF alto é uma taxa de dados mais baixa, o que é perfeitamente aceitável para o uplink, que normalmente envolve o envio de telecomandos curtos e concisos.

Em contraste, o Rádio 1, responsável exclusivamente pelo Downlink (envio de telemetria), utiliza um Fator de Espalhamento (SF) de 9. A seleção de um SF mais baixo visa otimizar a taxa de transferência de dados. Durante uma passagem sobre a estação de solo, que dura apenas alguns minutos, o satélite precisa transmitir uma quantidade significativa de dados de telemetria e de carga útil. Um SF mais baixo reduz o tempo de transmissão de cada pacote, permitindo que mais informações sejam enviadas no curto período de visibilidade. Embora isso resulte em uma sensibilidade de recepção ligeiramente menor, a estação de solo compensa essa característica com antenas de alto ganho e receptores mais sensíveis, tornando essa configuração mais eficiente para o downlink de dados. Essa configuração, portanto, otimiza o enlace de comunicação para as demandas distintas de cada direção do fluxo de dados.

Tabela 1. Parametros de Configuração dos Rádios LoRa.

Parametros	Radio 0 (Uplink)	Radio 1 (Downlink)
Frequência	401.5 MHz	468.5 MHz
Largura de Banda (BW)	250 kHz	250 kHz
Potência do Rádio	27 dBm	27 dBm
Fator de Espalhamento (SF)	11	9
Coding Rate (CR)	5	5

2.2. Arquitetura de Software e Fluxos de Execução de Código

A lógica operacional foi dividida em tarefas fundamentais de suporte e segurança, que estruturam os três principais fluxos de execução que representam os cenários operacionais do satélite, sendo elas: Tarefas de Suporte e Segurança do Sistema; Fluxo de Execução do Beacon de Telemetria e Fluxo de Execução de Telecomando de Emergência.

2.2.1. Tarefas de Suporte e Segurança do Sistema

Para garantir a configuração inicial correta dos sistemas do satélite, sua estabilidade contínua e a sequência correta de operações críticas, várias tarefas de suporte e segurança foram implementadas. Essas tarefas formam a base da arquitetura de software, garantindo que o satélite possa operar de forma autônoma e se recuperar de condições anômalas sem a necessidade de intervenção imediata do solo. Entre elas, destacam-se as seguintes:

- **Startup:** Esta é a tarefa de inicialização, executada apenas uma vez, imediatamente após o processador iniciar. Sua função é configurar todos os periféricos essenciais, como as interfaces de comunicação (SPI, UART e I2C), os pinos de entrada/saída (GPIOs) e os temporizadores internos. Além disso, ela carrega as variáveis iniciais do sistema a partir da memória não volátil, estabelecendo um estado operacional conhecido e seguro. Esse processo garante que, independentemente do motivo de um reinício, o satélite sempre comece sua operação a partir de uma base de configuração padronizada e segura, prevenindo comportamentos indefinidos.
- **System Reset:** Implementada como um mecanismo de resiliência, esta é uma tarefa de segurança que força um reinício do processador a cada 2 horas. O ambiente espacial é hostil, com radiação que pode causar *Single Event Upsets* (SEUs), os quais podem corromper a memória ou levar o software a um estado congelado. Um reinício periódico é uma estratégia robusta e amplamente utilizada em sistemas embarcados críticos para mitigar esses riscos. Ao forçar um reinício, o sistema limpa quaisquer erros acumulados na RAM e reinicia a execução do código a partir do estado definido pela tarefa de Startup, garantindo a continuidade e a confiabilidade da missão a longo prazo.
- **Timer Control:** Esta tarefa atua como a memória do subsistema TTC. A cada 20 minutos, ela gerencia e salva dados críticos na memória não volátil do processador. Os dados salvos incluem as últimas

configurações de rádio (potência de transmissão, intervalo de beacon) que podem ter sido atualizadas por telecomando, bem como o estado de importantes flags operacionais, como a flag de hibernação. A persistência desses dados é fundamental, pois garante que, após um reinício (seja comandado pela tarefa de Reset do Sistema ou causado por uma falha de energia), o satélite retome suas operações com as últimas configurações válidas enviadas do solo, em vez de reverter para os padrões definidos inicialmente.

- **Antenna Deployment:** Esta é uma das tarefas de segurança mais críticas e redundantes da fase inicial da missão. A liberação das antenas é primariamente responsabilidade do subsistema de gerenciamento de dados a bordo (OBDH), que deve comandá-la após 45 minutos em órbita. A tarefa do TTC atua como um backup: ela é executada 15 minutos depois, aos 60 minutos de voo, e primeiro verifica o status da antena. Se o OBDH falhou em sua tarefa, o TTC assume o controle e comanda diretamente a ativação do mecanismo de liberação. Para proteger o hardware de rádio, uma trava de segurança de software foi implementada: a tarefa impede qualquer tipo de transmissão de rádio até que a implantação bem-sucedida das antenas seja confirmada. Essa trava é crucial porque tentar transmitir com as antenas ainda recolhidas pode fazer com que a potência seja refletida de volta para o amplificador do rádio, resultando em danos permanentes ao hardware de comunicação.

2.2.2. Fluxo de Execução do Beacon de Telemetria

Entre os principais fluxos de execução do código, temos a montagem e a transmissão do beacon. O beacon é um pacote de dados curto e periódico que funciona como o "batimento cardíaco" do satélite, permitindo que as estações de solo rastreiem e monitorem passivamente sua saúde. Uma tarefa no processador do Rádio 1 é dedicada a essa função e é executada a cada 2 minutos. O processo começa com a agregação de dados: a tarefa solicita informações essenciais do subsistema de energia (EPS), como tensões e correntes dos painéis solares e da bateria, e coleta dados dos sensores locais do próprio subsistema TTC, como a temperatura da placa.

Com todos os dados em mãos, a tarefa os organiza em um pacote de beacon primário, seguindo um formato predefinido. No entanto, para aumentar a resiliência do sistema, um mecanismo de fail-safe foi implementado. Se a comunicação com o EPS falhar e os dados de energia não forem recebidos dentro do tempo esperado, a tarefa não cessa sua operação. Em vez disso, ela monta e transmite um beacon secundário. Este pacote de contingência contém apenas a telemetria local do TTC. Essa lógica garante a continuidade do monitoramento do satélite mesmo em cenários de falha parcial, permitindo que a equipe de solo saiba que o subsistema de comunicação ainda está operacional e possa diagnosticar o problema com o EPS. Em ambos os cenários, o pacote de beacon montado é então enviado para o Rádio para transmissão, utilizando os parâmetros de downlink configurados.

2.2.3. Fluxo de Execução de Telecomando Padrão

Este fluxo descreve o ciclo de comando-resposta, envolvendo ambos os rádios e o OBDH. Uma tarefa de alta prioridade no Rádio 0 recebe pacotes de telecomando a cada 40 milissegundos e os encaminha via comunicação SPI para o OBDH. Após o processamento pelo OBDH, a resposta é enviada para o Rádio 1, que executa ações secundárias dependendo do telecomando processado antes de transmitir a resposta para as estações de solo. Duas lógicas de ação específicas foram implementadas:

- **Telecomando de Configuração de Rádio:** Se a resposta recebida pelo TTC for detectada como um resposta do telecomando de modificação das configurações do rádio, a tarefa primeiro atualiza os novos valores em um buffer local, configurando especificamente a nova potência do rádio e o novo tempo de transmissão do beacon, e então transmite a resposta pelo Rádio 1.
- **Telecomando de hibernação:** Se a resposta recebida pelo TTC for detectada como uma resposta do telecomando de hibernação, a tarefa transmite a resposta pelo Rádio 1 e então ativa uma flag de hibernação. Esta flag impede qualquer transmissão subsequente do Rádio, desligando completamente o envio de pacotes. O rádio só é religado novamente quando for recebido um outro telecomando para a saída da hibernação.

Vale ressaltar que a tarefa Timer Control salva os novos valores configurados da potência do rádio e do tempo de transmissão do beacon, juntamente com a flag de hibernação na memória não volátil do processador, para que, em caso de reset do sistema, as novas configurações sejam salvas e usadas como padrão. Para todos os outros telecomandos, a resposta do OBDH é diretamente transmitida pelo Rádio 1 sem ações secundárias.

2.2.4. Fluxo de Execução de Telecomando de Emergência

Como medida de segurança crítica, uma tarefa de contingência foi implementada no microcontrolador do Rádio 1. Esta tarefa monitora o canal de downlink (468.5 MHz) para um telecomando de hibernação específico. Sua função é fornecer um caminho de comando redundante que ignora completamente o Rádio 0 e o OBDH. Ao receber este comando, a tarefa ativa imediatamente a flag de hibernação, desligando todas as transmissões. Este fluxo foi projetado para garantir que o satélite pudesse ser silenciado mesmo em um cenário de falha do OBDH e do Rádio 0, o que é indispensável em casos de interferência severa no espaço com outros dispositivos, tornando o desligamento completo do rádio obrigatório.

2.3. Validação Preliminar da Tecnologia LoRa em um Ambiente Relevante

Antes da integração final da tecnologia LoRa na plataforma de hardware com herança de voo e do desenvolvimento aprofundado do software TTC, foi necessário validar a robustez e a capacidade de comunicação de longo alcance do LoRa em um cenário que simulasse da melhor forma as longas distâncias e as condições de um enlace espaço-solo. A validação inicial dessa tecnologia foi um passo importante para mitigar os riscos do projeto, garantindo o desempenho deste enlace de comunicação e o sucesso da missão Aldebaran-1.

Para este fim, em uma parceria com o Centro de Lançamento de Alcântara (CLA), um experimento de validação foi conduzido utilizando balões estratosféricos de sondagem, Silva et al. (2022). O objetivo era claro: testar a capacidade do rádio LoRa de transmitir dados, especificamente uma imagem, de uma alta altitude para uma estação receptora no solo. Para o experimento, um dispositivo de teste simples e compacto foi desenvolvido, consistindo em um microcontrolador ESP32 equipado com um módulo de câmera (ESP32-CAM) e integrado com um transceptor LoRa. Este conjunto foi transportado a bordo de dois balões estratosféricos de sondagem lançados do CLA.

A lógica do experimento foi a seguinte: o dispositivo foi programado para capturar uma imagem fotográfica assim que o balão de sondagem atingisse uma altitude pré determinada, onde a curvatura da Terra e marcos geográficos distintos seriam visíveis. Imediatamente após a captura, o software embarcado no ESP32 segmentaria a imagem em pacotes de dados menores e iniciaria a transmissão sequencial desses pacotes usando o rádio LoRa. No solo, uma estação receptora, também equipada com um rádio LoRa e simulando uma estação de solo, foi configurada para receber os pacotes e reconstruir a imagem original.

O experimento foi concluído com sucesso. A imagem foi capturada e transmitida com sucesso para o solo, sendo completamente recebida e reconstruída, como pode ser visto na Figura 3, onde a imagem à esquerda, capturada pelo ESP32-CAM e transmitida via LoRa, mostra uma visão aérea clara da Ilha de São Luís, da Praia da Ponta D'areia e da região de Alcântara. A comparação direta com a imagem à direita, uma imagem de satélite do Google Earth, não apenas confirma o sucesso da captura e transmissão de dados, mas também valida a capacidade do enlace LoRa de manter a integridade dos dados a longas distâncias.



Figure 3. Comparação da imagem obtida no experimento da sonda com uma imagem obtida no Google Earth.

Este teste preliminar foi fundamental para o projeto Aldebaran-1. Ele forneceu dados práticos e uma validação inicial da capacidade da tecnologia LoRa para comunicação de longa distância, mitigando um dos principais riscos tecnológicos da missão e proporcionando maior confiança para prosseguir com sua integração no subsistema TTC do satélite.

3. Resultados

A validação funcional das tarefas de suporte e dos fluxos de execução foi realizada através de exaustivos testes de bancada. A metodologia de teste empregou inicialmente um rádio LoRa externo conectado a uma placa ESP32 para simular uma estação de solo improvisada, como pode ser visto na Figura 4. Essa abordagem permitiu um ciclo rápido de desenvolvimento e depuração. Posteriormente, os testes foram confirmados com o equipamento oficial da Estação de Radiofrequência da UFMA, operada pela Empresa Júnior de Engenharia Aeroespacial (GUARA Space), validando a

compatibilidade do subsistema com a infraestrutura de solo final. Na Figura 5, pode ser vista uma imagem do centro de controle desta estação.

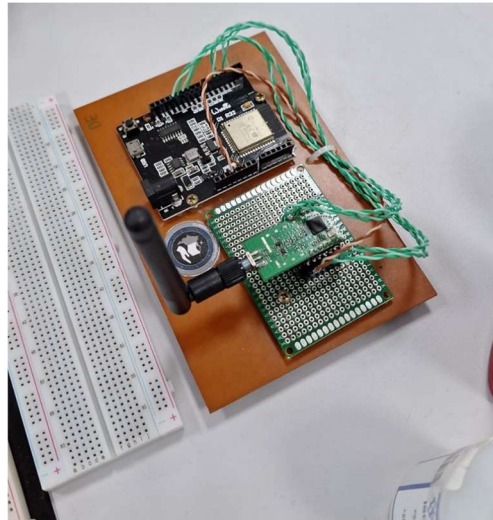


Figura 4. Estação terrestre Simulada.

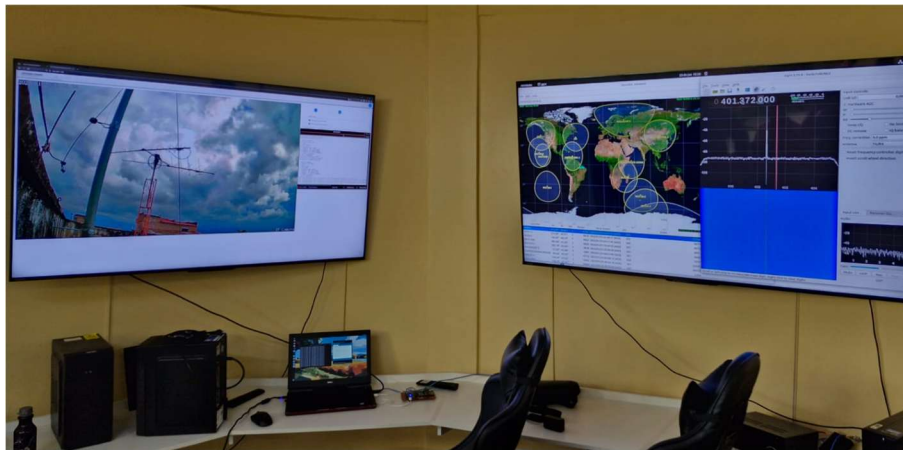


Figura 5. Centro de Controle da Estação de Radiofrequência da UFMA.

3.1. Validação das Tarefas de Suporte e Segurança

As tarefas de suporte foram validadas para garantir a robustez geral do sistema. A funcionalidade da tarefa de Startup foi verificada pela configuração adequada dos sistemas iniciais, observando através de logs de depuração que todos os periféricos foram inicializados com os parâmetros esperados. A validação do System Reset foi realizada monitorando o tempo de atividade do sistema, que foi reiniciado corretamente a cada 2 horas, confirmando a eficácia do mecanismo contra travamentos de software. A gestão e o salvamento adequados dos dados na memória não volátil do processador pela tarefa de Timer Control a cada 20 minutos também foram observados. Para isso, parâmetros operacionais foram alterados via comando e salvos na memória não volátil e, após forçar um reinício, foi verificado que os novos valores foram recarregados com sucesso na memória, em vez dos valores padrão. A validação da tarefa de Implantação da Antena, devido à sua criticidade, foi realizada em dois cenários distintos e controlados:

- **Cenário de Sucesso do OBDH:** Foi simulado que o OBDH liberou as antenas no tempo correto (aos 45 minutos) alterando manualmente a flag de status correspondente na memória. Quando executada aos 60 minutos, a tarefa do TTC leu corretamente o status "liberada" e, consequentemente, removeu a trava de transmissão de rádio. Imediatamente depois, a transmissão do primeiro beacon foi observada, confirmando que o sistema se tornou operacional para comunicação.
- **Cenário de Falha do OBDH:** Neste teste, a flag de status da antena foi mantida como "não liberada". A tarefa do TTC, ao ser executada, detectou corretamente que as antenas não haviam sido liberadas. Em seguida, comandou com sucesso sua implantação (verificada por um LED de diagnóstico no

modelo de engenharia) e, somente após confirmar a execução, removeu a trava de transmissão. O primeiro beacon foi enviado somente após a conclusão de todo este ciclo de segurança.

- **Teste Final:** Após esses testes simulados, um teste real foi conduzido com a abertura preliminar das antenas no modelo de engenharia, como pode ser visto na Figura 6. Neste teste, a transmissão e a recepção bem-sucedidas do beacon de telemetria do satélite também foram verificadas. Na Figura 7, podemos ver o espectro de frequência do sinal de telemetria dos testes na frequência de downlink do satélite, confirmando sua transmissão e recepção.

Em ambos os cenários, foi confirmado que a transmissão de rádio permaneceu bloqueada até que a implantação da antena fosse confirmada, validando a trava de segurança, bem como a capacidade de transmissão do satélite, que é crucial para a integridade do hardware durante a fase inicial da missão.

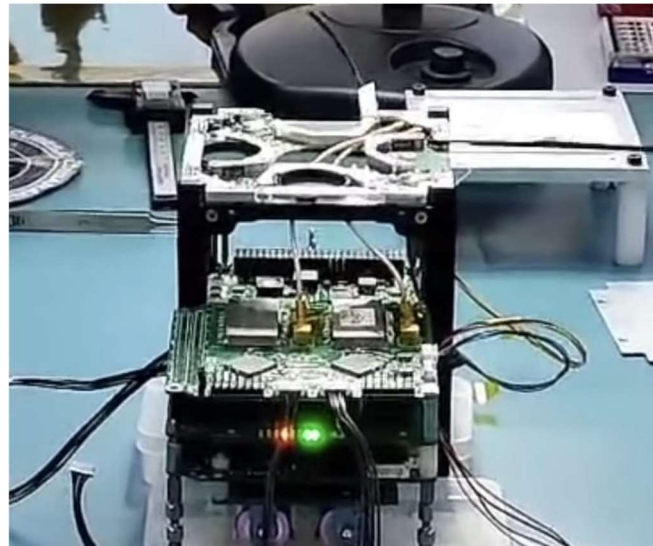


Figura 6. Teste de liberação das antenas utilizando o modelo de engenharia.

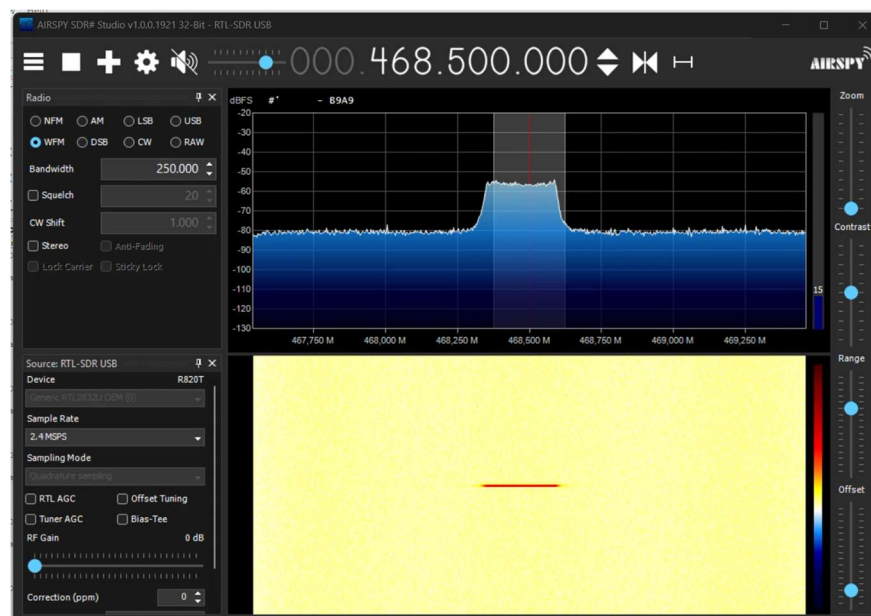


Figura 7. Espectro de frequência do sinal de transmissão do satélite registrado durante os testes de envio e liberação das antenas.

3.2. Validação do Beacon de Telemetria

O fluxo de execução do beacon foi testado sob condições nominais e de falha para verificar tanto sua operação padrão quanto seu mecanismo de contingência. Durante a operação nominal, os pacotes de beacon primários foram transmitidos e recebidos com sucesso tanto pela estação simulada quanto pela estação da UFMA. Os pacotes recebidos foram decodificados e os dados de telemetria foram validados, confirmando a integridade de toda a cadeia de transmissão.

Para testar o mecanismo de fail-safe, a comunicação entre o TTC e o EPS foi intencionalmente interrompida no modelo de engenharia, simulando uma falha no barramento de dados. Conforme projetado, o sistema mudou automaticamente para a transmissão do beacon secundário. Este beacon foi corretamente recebido e decodificado, e a análise do pacote confirmou que ele continha apenas a telemetria do TTC.

3.3. Validação do Ciclo de Telecomando

O ciclo de telecomando padrão foi exaustivamente testado. Comandos foram enviados para o Rádio 0 e as respostas, após processamento pelo OBDH, foram corretamente transmitidas pelo Rádio 1. Os testes se focaram nos dois fluxos de telecomando principais descritos na seção metodologia.

- O telecomando para alterar a potência e o tempo do beacon foi executado com sucesso. Após o envio do comando, foi observado que os valores de ambos foram modificados para os valores testados.
- O telecomando de hibernação também foi validado. Após a transmissão da confirmação, todas as atividades de transmissão do Rádio 1 cessaram. A verificação do status da flag interna confirmou que o modo de hibernação foi ativado.

Posteriormente a esses testes, o processador da placa foi reiniciado para verificar se os novos dados configurados no buffer interno e a flag de hibernação foram salvos corretamente na memória não volátil pelo Timer Control, o que foi observado com sucesso.

3.4. Validação do Telecomando de Emergência

O cenário de contingência mais crítico foi testado enviando o telecomando de hibernação de emergência diretamente ao Rádio 1 na frequência de downlink. O resultado foi positivo: o Rádio 1 processou o comando de forma autônoma e cessou imediatamente todas as transmissões, incluindo os beacons. O teste confirmou o funcionamento do mecanismo de segurança independente projetado para o sistema.

4. Discussão

Os resultados apresentados na seção anterior validam empiricamente a arquitetura de software desenvolvida para o subsistema TTC do Aldebaran-1. A execução bem-sucedida de todos os testes em bancada, tanto em cenários nominais quanto de falha, demonstram que o sistema está funcionalmente preparado para as operações em órbita, atendendo aos requisitos de comunicação, robustez e segurança da missão.

A validação da lógica de liberação da antena, que impede a transmissão de rádio antes da confirmação da abertura, ilustra um princípio crítico de segurança do projeto. Este mecanismo é fundamental para proteger o hardware do rádio contra danos por potência refletida, um risco real durante a fase inicial de funcionamento do satélite. Adicionalmente, o funcionamento correto do System Reset periódico e do Timer Control para persistência de dados confirma a implementação de estratégias para mitigar falhas de software, como travamentos, e garantir que o satélite retome a um estado operacional conhecido e atualizado após qualquer reinicialização, aumentando a confiabilidade a longo prazo.

A validação do beacon de telemetria e do ciclo de telecomandos confirma a adequação da tecnologia LoRa e das configurações de rádio escolhidas para a missão. A recepção bem-sucedida dos pacotes pela estação de solo da UFMA demonstra que o link de downlink (SF 9) é eficaz para a transmissão de dados, equilibrando taxa de transferência e sensibilidade. Da mesma forma, a execução sem falhas dos comandos recebidos valida a robustez do link de uplink (SF 11), cuja alta sensibilidade é crucial para garantir que os comandos da Terra sejam recebidos de forma confiável.

A resiliência do sistema é exemplificada pela transição autônoma para o beacon secundário durante a falha simulada de comunicação com o EPS. Este resultado não apenas valida um mecanismo de contingência, mas também destaca a capacidade do subsistema TTC de fornecer informações de diagnóstico vitais ao controle de solo, mesmo em um cenário de falha parcial de outro subsistema. Manter o envio da telemetria do satélite nessas condições é essencial para que a equipe da missão possa diagnosticar o problema para futuras missões.

Finalmente, a execução bem-sucedida do telecomando de emergência representa o alto nível de contingência implementado, fornecendo um caminho de controle independente e robusto que contorna o fluxo de comando principal (Rádio 0 e OBDH). Este resultado é a prova de um sistema com múltiplas camadas de segurança, garantindo

que o satélite possa ser silenciado em um cenário de falha crítica para evitar interferência com outros artefatos espaciais, um requisito fundamental para a operação responsável no ambiente espacial. Coletivamente, esses resultados confirmam que a arquitetura de software é funcional, segura e resiliente.

5. Conclusões

Este trabalho detalhou o desenvolvimento e a validação bem-sucedidos do subsistema de Telemetria, Rastreamento e Comando (TTC) para o CubeSat 1U Aldebaran-1, demonstrando uma arquitetura de software robusta baseada em princípios de tempo real e múltiplos níveis de segurança. O projeto representa um passo significativo no desenvolvimento de capacidades espaciais na Universidade Federal do Maranhão, aproveitando uma plataforma de baixo custo para atender a uma relevante demanda social e tecnológica regional.

Os principais desafios superados durante o desenvolvimento incluíram, primeiramente, a integração da tecnologia LoRa em uma plataforma de hardware e software com herança de voo, o que exigiu uma adaptação meticulosa de drivers e a otimização dos parâmetros de rádio para as necessidades da missão. A validação preliminar em um ambiente relevante, através do lançamento de balões estratosféricos de sondagem, provou ser uma estratégia fundamental de mitigação de riscos, confirmando a viabilidade da tecnologia antes de sua integração final. Em segundo lugar, a implementação de uma lógica de segurança em camadas foi crucial. Essa lógica variou desde a redundância de beacon em caso de falha de comunicação com outros subsistemas até um comando de hibernação de emergência totalmente independente, criando uma arquitetura de defesa robusta contra falhas. Por fim, garantir o comportamento determinístico para tarefas críticas, como o bloqueio da transmissão de rádio até que a liberação das antenas seja confirmada, foi uma funcionalidade essencial para a integridade do hardware, implementada com sucesso graças à arquitetura baseada no FreeRTOS.

Os resultados dos testes de bancada, validados com equipamentos de uma estação de solo real, confirmaram a eficiência e a robustez das tarefas e dos fluxos de execução. O sistema demonstrou sua capacidade de gerenciar a comunicação nominal, responder a falhas parciais simuladas e executar comandos de contingência de forma autônoma e confiável. A arquitetura de software provou ser eficiente e também adequada aos requisitos da missão Aldebaran-1.

Conclui-se, portanto, que o subsistema TTC está operacionalmente pronto para integração e voo, não apenas atendendo às necessidades da missão Aldebaran-1, mas também se apresentando como um modelo validado e de baixo custo para futuras missões de nanossatélites que exijam soluções de comunicação robustas e seguras. A validação final em órbita fornecerá dados valiosos para a maturação contínua desta tecnologia no setor aeroespacial brasileiro.

Financiamento: Esta pesquisa foi financiada pela Agência Espacial Brasileira (AEB).

Agradecimentos: Os autores gostariam de expressar sua sincera gratidão à Agência Espacial Brasileira (AEB), cujo patrocínio foi fundamental para a realização do projeto Aldebaran. Agradecemos também à Universidade Federal do Maranhão (UFMA) por seu apoio institucional e, em particular, ao LABESEE, o ambiente onde este projeto foi concebido e desenvolvido. Por fim, agradecimentos especiais são estendidos a todos os membros e colaboradores do projeto Aldebaran, cuja dedicação e esforço coletivo foram essenciais para o sucesso dos desafios aqui apresentados.

Conflitos de Interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

1. NASA. State of The Art of Small Spacecraft Technology. 2024. Available online: <https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/> (accessed on 31 October 2025).
2. Modenini, A.; Ripani, B. A tutorial on the tracking, telemetry, and command (ttc) for space missions. IEEE Communications Surveys Tutorials 2023, 25.
3. Júnior, C.A.R.B.; Santos, J.L.; Marques, J.G.; Silva, L.C.; Júnior, J.R.; Lopes, M. The cubesat mission aldebaran 1. In IAA-LA CubeSat Workshop & IAA-LA Symposium on Small Satellites; Brasília, Brazil, 2022.
4. Marcelino, G.M.; Rodrigues, M.A.; Ribeiro, F.J.L.; Slongo, L.K.; Nicolau, V.P.; Schons, L.; Kröger, G.; Grillo, T.T.; Müller, L.G.; Borges, R.A.; Prol, F.S.; Martins, V.G.; Bezerra, E.A. In-orbit preliminary results from the open-source educational nanosatellite floripasat-i. Acta Astronautica 2021, 188, 78–96.
5. Marcelino, G.M.; Brinker, G.A.; Borges, R.A.; Kröger, G.; Nicolau, V.P.; Bezerra, E.A. Qualification and validation test methodology of the open-source cubesat floripasat-i. Journal of Systems Engineering and Electronics 2020, 31, 1230–1244.
6. Parada, R.; Carvajal, G.; Chavez, S.; Fuertes, W.; Toulkeridis, T. Lora-based low-cost nanosatellite for emerging communication networks in complex scenarios. Aerospace 2023, 10, 754.
7. Fernandez, J.; Negro, V.; Valle, S. Cuevas del. FOSSASat-2E Constellation: Unleashing Space-based SatIoT for Industrial Applications through Picosatellites. 2022.

8. Ibrahim, D. Introduction to freertos. In Effective STM32F4 Microcontroller Programming with FreeRTOS; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2021; pp. 109–116. ISBN 9780128212271.
9. Semtech Corporation. LoRaWAN Specification V1.1. 2017. Available online: <https://lora-alliance.org/> (accessed on 31 October 2025).
10. SILVA, L. C. O. et al. An Experimental Evaluation of Long-Range Technology in a Stratospheric Sonde for Educational CubeSat Mission Aldebaran-1. Presented in: IAA-LA CubeSat Workshop & IAA-LA Symposium on Small Satellites, Brasília, 2022.