

Satélites CubeSats em Órbita Baixa como Protótipo Educacional de um Sistema de Georreferenciamento Nacional: Uma Abordagem com recursos STEM no Ensino Médio

**Kislan de Lima Souza¹, Letícia Cerbaro Barbosa¹, Arthur Alves Tavares¹,
Gabriel Gonçalves Moreira¹, Credson Isaac Lopes dos Santos¹**

¹ Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN)

RESUMO

Introdução: A educação científica no Brasil carece de experiências práticas que aproximem estudantes de desafios reais de engenharia. Abordagens STEM ativas demonstram potencial para despertar o interesse jovem por ciência e inovação quando associadas a projetos concretos. **Objetivo:** Desenvolver um protótipo funcional de CubeSat 1U denominado RPS (Regional Position System), em Ensino Médio técnico, simulando princípios de georreferenciamento nacional e promovendo aprendizado prático de conceitos STEM. **Metodologia:** O hardware integra sensores BMP280, DHT22 e MPU6050, microcontrolador ESP32 e módulo LoRa E32-433T20D, em topologia Cluster Tree com LoRaWAN, em órbita heliossíncrona a 600 km com sincronização via oscilador OCXO. **Resultados:** Testes em bancada validaram aquisição, armazenamento e transmissão de dados de temperatura, pressão, umidade, aceleração e rotação. **Conclusão:** O protótipo consolidou-se como ferramenta pedagógica eficaz para o ensino prático de sensoriamento, comunicação sem fio e geolocalização.

Palavras-chave: CubeSat; Educação STEM; Georreferenciamento; LoRa; Ensino Médio.

I. INTRODUÇÃO

A soberania tecnológica do Brasil enfrenta desafios significativos decorrentes da dependência de infraestruturas estrangeiras, o que gera uma vulnerabilidade estratégica em setores essenciais da sociedade. No cenário atual, a integração de serviços externos às atividades econômicas e militares submete o país a riscos geopolíticos e restrições comerciais. Nakagawa ¹ exemplifica essa problemática ao citar o uso de redes de satélites internacionais, como a Starlink, cujos dados e controle operacional permanecem sob jurisdição estrangeira, evidenciando uma assimetria de poder e segurança informacional.

Essa dependência é estrutural no que tange aos Sistemas Globais de Navegação por Satélite (GNSS), como o NAVSTAR-GPS (EUA) e o Galileo (União Europeia), fundamentais para a aviação, logística e agricultura. Embora iniciativas nacionais como o projeto GeoLocal tenham buscado alternativas (MACHO, 2018 ²; FRIOLANI; PAMBOUKIAN, 2020 ³), as limitações técnicas e de infraestrutura encontradas reforçam que a busca por autonomia não deve se restringir ao desenvolvimento de hardware isolado, mas deve ser alicerçada em uma base educacional sólida e transformadora.

Nesse sentido, a educação aeroespacial surge como um eixo estratégico, especialmente no Ensino Médio, etapa em que a iniciação científica pode despertar vocações e consolidar o pensamento crítico-tecnológico. A superação da defasagem tecnológica nacional depende do letramento científico de jovens

¹ NAKAGAWA, F. Starlink é 16ª em internet no Brasil, mas líder em satélite. CNN Brasil. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br>.

² MACHO, Eduardo Perez. Implantação de um sistema brasileiro de georreferenciamento independente de outros sistemas de navegação por satélite: o Geolocal. 2018. Dissertação (Mestrado) – Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2018.

³ FRIOLANI, Leticia Gatti; PAMBOUKIAN, Sergio Vicente Denser. Estudo da topologia do sistema Geolocal: um sistema de navegação brasileiro independente de GNSS. Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2020.

estudantes, capacitando-os a compreender e propor soluções de baixo custo e arquitetura aberta. Este movimento de democratização do saber espacial é impulsionado por ações como o Dia Espacial Docente, promovido pelo Centro Vocacional Tecnológico Espacial (CVT-Espacial) ⁴. O evento atua como um fórum de capacitação pedagógica, incentivando educadores a transpor conceitos complexos da astronáutica para a realidade da sala de aula através de metodologias ativas e prototipagem prática.

Sob essa ótica, este artigo apresenta o desenvolvimento de um protótipo de sistema de posicionamento regional concebido como uma ferramenta de apoio ao ensino de ciências e engenharia. O projeto não visa apenas a prospecção técnica, mas utiliza o contexto do CVT-Espacial para validar uma proposta pedagógica voltada ao Ensino Médio, demonstrando que a construção de soluções tecnológicas soberanas começa, impreterivelmente, pelo fortalecimento da educação básica e pelo incentivo à inovação dentro do ambiente escolar.

II. OBJETIVO

O presente projeto tem como objetivo central promover o ensino e a aprendizagem prática de engenharia aeroespacial, por meio do desenvolvimento e documentação, em contexto educacional de Ensino Médio, de um protótipo funcional de *CubeSat*.

O dispositivo visa simular os princípios operacionais de um sistema nacional de georreferenciamento — o RPS (*Regional Position System*) —, servindo como ferramenta pedagógica para o domínio de conceitos STEM (*Science, Technology, Engineering, and Mathematics*). O foco reside em capacitar os estudantes na compreensão teórica e aplicação técnica de eletrônica embarcada, protocolos de comunicação sem fio, sensoriamento e mecânica espacial, fomentando a formação de competências voltadas à soberania tecnológica nacional.

⁴ CENTRO VOCACIONAL TECNOLÓGICO ESPACIAL (CVT-E).

III. METODOLOGIA

A. ESCOPO

O projeto compreende o desenvolvimento de um protótipo de sistema nacional de georreferenciamento fundamentado em uma constelação de CubeSats em órbita heliossíncrona (SSO). Esta configuração orbital, caracterizada pela sincronia com a iluminação solar, é estrategicamente selecionada para missões de observação e navegação devido à sua regularidade temporal e ampla cobertura global (AEROENGENHARIA, s.d. ⁵; SANCHEZ, 2009 ⁶, PISONI et al., 2025 ⁷). Com altitude prevista de 600 km e inclinação entre 97° e 98°, os parâmetros garantem a previsibilidade operacional necessária para o território brasileiro. Sob a perspectiva pedagógica, a definição desta arquitetura orbital objetiva introduzir aos estudantes do Ensino Médio conceitos de mecânica orbital, trigonometria esférica e física clássica, transformando a complexidade do espaço em um laboratório aplicável de astronomia e matemática.

A arquitetura do protótipo baseia-se na utilização de componentes comerciais de prateleira (Commercial Off-The-Shelf — COTS). Cada unidade é equipada com o microcontrolador ESP32 e sensores de baixo custo, como o BMP280 (pressão e altitude), MPU6050 (inerciais) e DHT22 (umidade). O uso desses dispositivos visa atingir objetivos de aprendizagem voltados à cultura maker e à engenharia de sistemas, permitindo que o aluno compreenda o ciclo de vida de um projeto tecnológico: da programação lógica ao processamento de

⁵ AEROENGENHARIA. O que é órbita heliossíncrona?. Disponível em: <https://aeroengenharia.com/glossario/o-que-e-heliosynchronous-orbit/>.

⁶ SANCHEZ, Diogo Merguizo. Dinâmica ressonante de alguns satélites artificiais terrestres no sistema Terra-Lua-Sol. 2009. Dissertação (Mestrado) – UNESP, Rio Claro, 2009.

⁷ PISONI, Fabio et al. *Combined Navigation and Tracking with Applications to Low Earth Orbit Satellites*. Eng. Proc., Basel, v. 88, n. 22, 2025.

dados auxiliares essenciais para a trilateração. Essa abordagem desmitifica a tecnologia aeroespacial, demonstrando que a inovação pode ser prospectada com ferramentas acessíveis.

Um dos pilares técnicos e educativos deste escopo reside na problemática da referência temporal. Visto que o georreferenciamento depende do tempo de propagação do sinal, a estabilidade do relógio é determinante para a precisão métrica. Embora sistemas de alto desempenho utilizem relógios atômicos de Césio-133 ou o Chip-Scale Atomic Clock (CSAC) (NIST, s.d.⁸; MICROCHIP, s.d.⁹), o elevado custo desses dispositivos torna sua aplicação inviável em projetos escolares. Como solução técnica e pedagógica, optou-se pelo Oscilador de Cristal Controlado por Forno (OCXO). Essa escolha permite explorar com os estudantes a relação entre termodinâmica e estabilidade de frequência, demonstrando como limitações orçamentárias podem ser mitigadas por meio da aplicação de conceitos físicos, mantendo a estabilidade na ordem de 10^8 a 10^9 e assegurando a viabilidade econômica do protótipo.

B. DETALHES OPERACIONAIS

O sistema fundamenta-se em uma constelação de CubeSats em órbita heliosíncrona, situada entre 500 e 800 km de altitude. Nesta configuração, cada satélite provê uma cobertura aproximada de 3,5 milhões de km² por passagem, com um raio de visada terrestre de cerca de 1.050 km. Dado que o território nacional abrange mais de 8,5 milhões de km² e que a solução de geolocalização

⁸ NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY – NIST. Como funcionam os relógios atômicos. Disponível em: https://www-nist-gov.translate.goog/atomic-clocks/how-do-atomic-clocks-work?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=pt&_x_tr_hl=pt&_x_tr_pto=tc.

⁹ MICROCHIP. CSAC SA65 – Chip Scale Atomic Clock. Disponível em: <https://www.microchip.com/en-us/product/csac-sa65>.

requer a visibilidade simultânea de, no mínimo, quatro satélites por ponto, projeta-se uma constelação composta por 24 a 48 unidades. A definição desta malha orbital mobiliza competências de Matemática e Ciência, exigindo dos estudantes o cálculo de planos orbitais, geometria de cobertura e o uso de trigonometria esférica para garantir a redundância espacial necessária sobre o Brasil.

A implementação do sistema prevê uma transição escalonada para o ambiente orbital, utilizando balões estratosféricos para emular o cenário operacional. Essa etapa constitui um laboratório prático de Engenharia e Tecnologia, permitindo o teste de subsistemas críticos em condições de quase-vácuo e temperaturas extremas. Nela, os alunos validam protocolos de comunicação LoRa, telemetria e algoritmos de posicionamento, ajustando o desempenho dos sensores em um ambiente de voo real antes da integração final no satélite.

A rede opera sob uma lógica hierárquica de clusters, onde cada grupo é gerido por um nó coordenador incumbido da organização da rede local, controle de tráfego e sincronização temporal. A resiliência da constelação é reforçada pela presença de um vice-coordenador; em caso de degradação do líder, ocorre uma transição automática baseada em critérios de disponibilidade energética. Essa arquitetura introduz conceitos avançados de Tecnologia (Lógica de Programação e Redes), incentivando o desenvolvimento de pensamento computacional ao estruturar sistemas autônomos que tomam decisões em tempo real para preservar a carga computacional.

Para a mitigação de detritos espaciais, o projeto integra um protocolo de descarte seguro via vela de arrasto (drag sail). O mecanismo amplia a área de contato com o arrasto atmosférico, acelerando a reentrada abaixo de 200 km (ORBITAL TRANSPORTS, s.d. ¹⁰). Sob a ótica STEM, este tópico fomenta a discussão sobre Ética e Sustentabilidade Espacial (Ciência e Engenharia

¹⁰ ORBITAL TRANSPORTS. The Science Behind Drag Sails: A Solution for Satellite Deorbiting. Disponível em: <https://www.orbitaltransports.com/the-science-behind-drag-sails-a-solution-for-satellite-deorbiting/>.

Ambiental), utilizando modelos físicos de aerodinâmica orbital para prever o tempo de decaimento do satélite e mitigar o impacto no ecossistema espacial.

Complementarmente, a eficiência é otimizada por um modo automatizado de hibernação energética. Ao transitar fora da zona de interesse, sensores e transmissores são desativados para recarga das baterias via painéis solares. Essa gestão de energia permite aos estudantes explorar conceitos de Física (Termodinâmica e Eletricidade), monitorando o ciclo de vida da bateria e a eficiência da conversão fotovoltaica sob radiação solar direta.

Como requisito final de validação, o sistema monitora a precisão do relógio de oscilação, fator determinante para o cálculo da distância via tempo de propagação do sinal. Este processo consolida o aprendizado em Matemática e Física de Ondas, onde os alunos aplicam correções para o desvio temporal (drift), garantindo que a referência do segmento espacial permaneça fidedigna para a execução de uma geolocalização precisa.

C. ARQUITETURA DE COMUNICAÇÃO

A arquitetura de rede adota o protocolo Cluster Tree (Figura 1), uma topologia hierárquica ideal para o ensino de redes complexas. Nela, um nó coordenador atua como raiz, enquanto dispositivos de função completa (FFD) gerenciam aglomerados (clusters) de nós de função reduzida (RFD) (SANTOS, 2017 ¹¹). A comunicação entre os CubeSats e os segmentos terrestres utiliza o protocolo LoRaWAN, selecionado por sua eficiência em longo alcance e baixo consumo, servindo como plataforma para o estudo prático de telecomunicações no Ensino Médio. O tráfego é organizado via sinais ADV (anúncio) e pacotes ACK (confirmação). Como exemplo da organização hierárquica dos dispositivos em rede, a Figura 2 apresenta a associação entre os nós e seus respectivos clusters,

¹¹ SANTOS, Credson Isaac Lopes dos. Dependabilidade Aplicada a Protocolo Hierárquico Baseado no LEACH. 2017. Dissertação (Mestrado) – UERN/UFERSA, Natal, 2017.

bem como o posicionamento dos Virtual Cluster Heads (VCH) em uma topologia baseada no algoritmo FTE-LEACH.

Figura 1 - Esquema do Protocolo de Hierarquia Cluster Tree

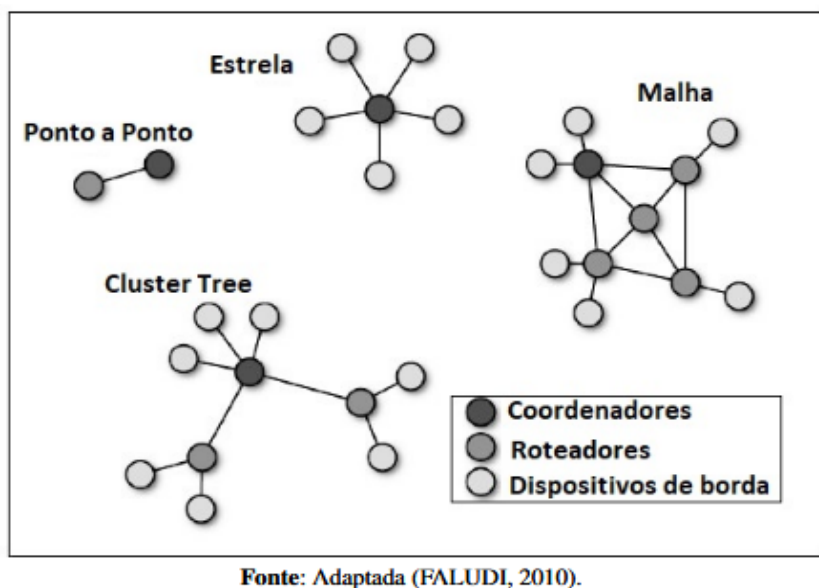


Imagem de **SANTOS, C. I. L.** *Dependabilidade aplicada a protocolo hierárquico baseado no LEACH*. UFERSA, 2013. Dissertação de Mestrado.

Figura 2 - Organização dos clusters e VCHs no algoritmo FTE-LEACH

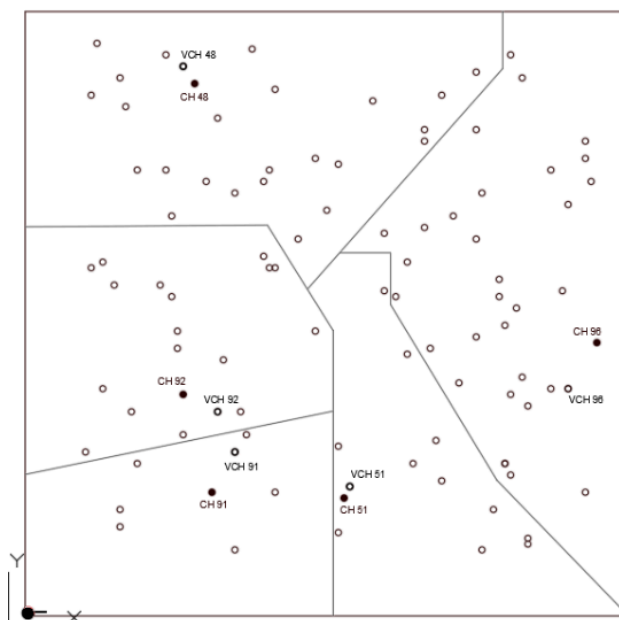


Imagem de **SANTOS, C. I. L.** *Dependabilidade aplicada a protocolo hierárquico baseado no LEACH*. UFERSA, 2013. Dissertação de Mestrado.

O projeto equilibra precisão técnica e viabilidade econômica, premissa fundamental de recursos STEM de baixo custo. Devido a restrições orçamentárias, substituiu-se o uso de relógios atômicos CSAC por osciladores de cristal controlados por forno (OCXO). Essa escolha oferece a estabilidade térmica necessária para a sincronização temporal do sistema a um custo reduzido, permitindo a exploração pedagógica da eletrônica de precisão.

A integração do transceptor LoRa SX127x à topologia *Cluster Tree* garante resiliência a interferências e alta sensibilidade. Visto que o consumo de pico do rádio atinge 140 mA, o dimensionamento energético foi rigorosamente calculado, proporcionando aos alunos um exercício real de balanço de potência. Para otimizar a largura de banda, implementa-se o protocolo 6LoWPAN para compressão de pacotes IPv6. Por fim, a eficácia da geolocalização é validada pelo coeficiente PDOP (Position Dilution of Precision), correlacionando a geometria da constelação à acurácia do sistema.

D. SUBSISTEMAS

Os subsistemas do CubeSat foram projetados para serem modulares, permitindo que estudantes do Ensino Médio compreendam a interdependência das partes de um sistema aeroespacial.

- 1) **Energia e Térmico:** Utiliza-se uma configuração 1S2P de íon-lítio com recarga fotovoltaica. O balanço energético é otimizado por estratégias de duty cycle e hibernação, enquanto o controle térmico é passivo (fita Kapton e isolantes). Esse conjunto introduz conceitos de termodinâmica e eficiência elétrica de forma prática.
- 2) **Carga Útil (Payload) e Sincronismo:** Dividida entre Plano de Controle (sensores BMP280, DHT22 e MPU6050 para caracterização ambiental e

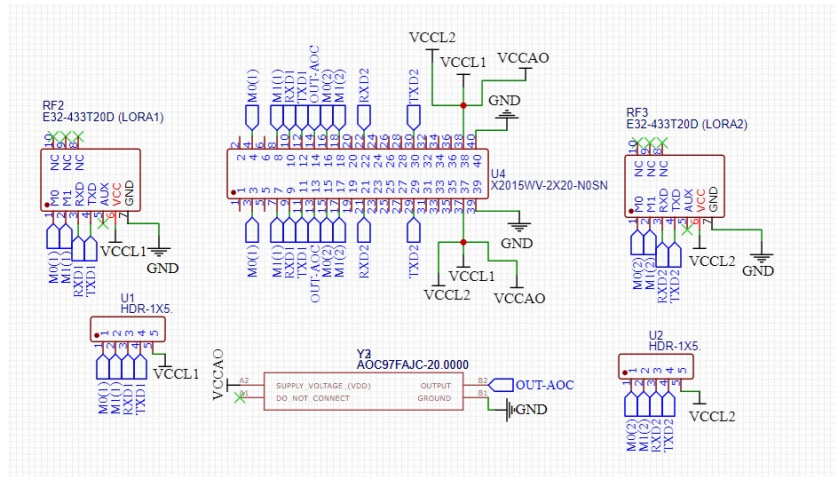
inercial) e Plano de Dados (georreferenciamento). O uso do oscilador OCXO permite a validação de algoritmos de posicionamento, com arquitetura pronta para a futura integração de um relógio atômico (CSAC), ensinando sobre escalabilidade tecnológica.

- 3) **Controle de Bordo e Armazenamento:** Centralizado no microcontrolador ESP32, que coordena a lógica global e o salvamento de dados em memória de classe industrial (redundância local). Essa unidade é o cerne do aprendizado em programação e sistemas embarcados.
- 4) **Telecomunicações (Segmentos Espacial e Terrestre):** Utiliza o módulo LoRa E32-433T20D via barramento UART. A estação terrestre, composta por quatro ESP32 integrados, permite o monitoramento em tempo real e a decodificação dos pacotes, consolidando o conhecimento em redes e protocolos de comunicação.
- 5) **Estrutura e Mecânica:** Fabricada via impressão 3D (filamento ABS), a estrutura organiza os componentes e integra a vela de arrasto para descarte orbital. Este subsistema aborda desde a manufatura aditiva até a ética na sustentabilidade espacial.

1. DETALHAMENTO DO PROJETO (PCB E MECÂNICA)

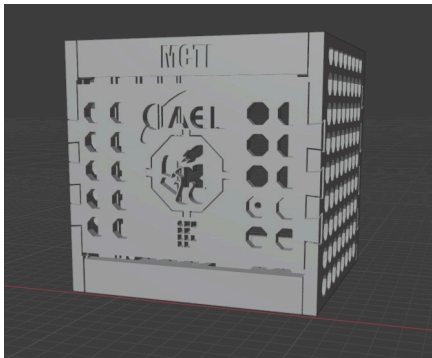
A transição do protótipo para a fase experimental envolve a integração dos componentes em uma Placa de Circuito Impresso (PCB) — visualize o esquema da placa na Figura 2 —, garantindo a robustez necessária para testes de voo e eliminando falhas de conexões manuais. O barramento I²C padroniza a comunicação dos sensores, enquanto o projeto mecânico (Figura 3 e 4) modular em ABS assegura o alinhamento dos subsistemas. Essa abordagem prática permite que o aluno visualize o fluxo completo da informação: da captura do fenômeno físico (sensor) ao processamento (ESP32) e à transmissão via rádio.

Figura 3 - Diagrama Elétrico do Cubesat



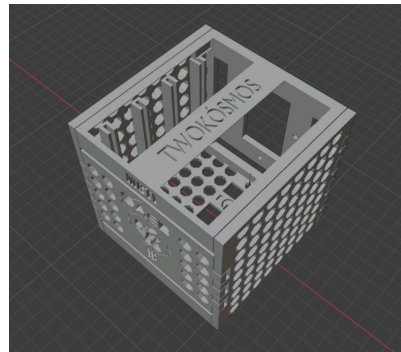
Fonte: autoria própria.

Figura 4 - Vista frontal da estrutura mecânica do CubeSat



Fonte: autoria própria.

Figura 5 - Vista isométrica da estrutura mecânica do CubeSat



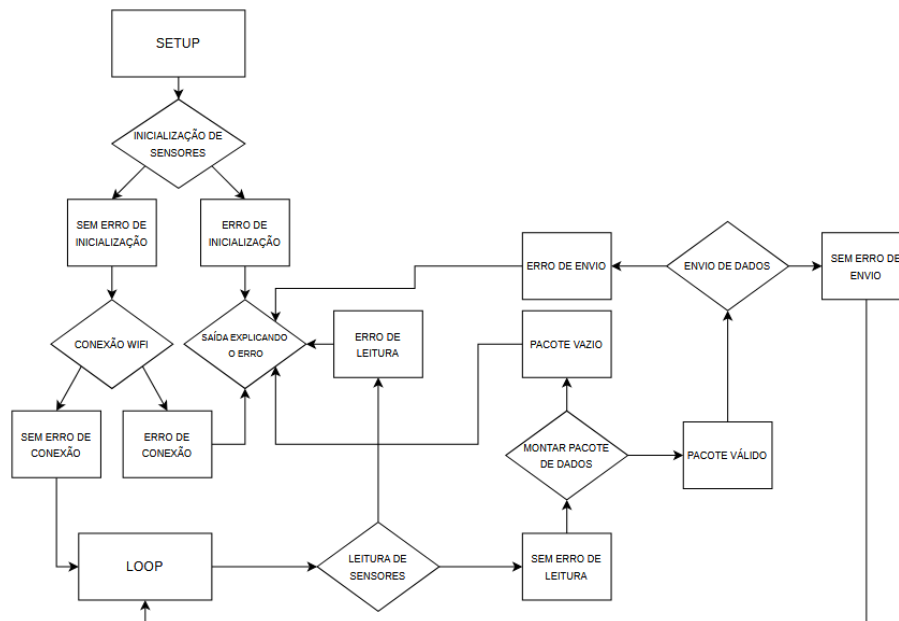
Fonte: autoria própria.

2. ARQUITETURA DE SOFTWARE E LÓGICA DE PROGRAMAÇÃO

O código, desenvolvido em C++ para o ESP32, funciona como uma ferramenta de alfabetização algorítmica. Conforme ilustrado no fluxograma (Figura 5), A estrutura baseia-se em um fluxo de decisão que ensina ao estudante a

importância do tratamento de erros em sistemas críticos: no setup, falhas de sensores ou conexão Wi-Fi acionam diagnósticos imediatos, impedindo a progressão do sistema. No loop operacional, a leitura sensorial e a montagem de pacotes seguem uma lógica condicional rigorosa, onde apenas dados íntegros avançam para o envio. Esse design pedagógico reforça o conceito de resiliência de software, demonstrando na prática como a programação protege o hardware em missões aeroespaciais.

Figura 6 - Fluxograma do Código executado pelo ESP32



Fonte: autoria própria.

IV. RESULTADOS

O desenvolvimento prático resultou em um protótipo de CubeSat 1U funcional, com massa final de 350 gramas e estrutura em ABS produzida via manufatura aditiva (Figura 6 e 7). Para os estudantes, este resultado validou a aplicação de conceitos de engenharia de sistemas e mecânica, permitindo a

transição da modelagem tridimensional para a integração física de componentes em placas de fenolite perfuradas, o que minimizou falhas de conexão manual.

Figura 7 - Estrutura Final do Cubesat



Fonte: autoria própria

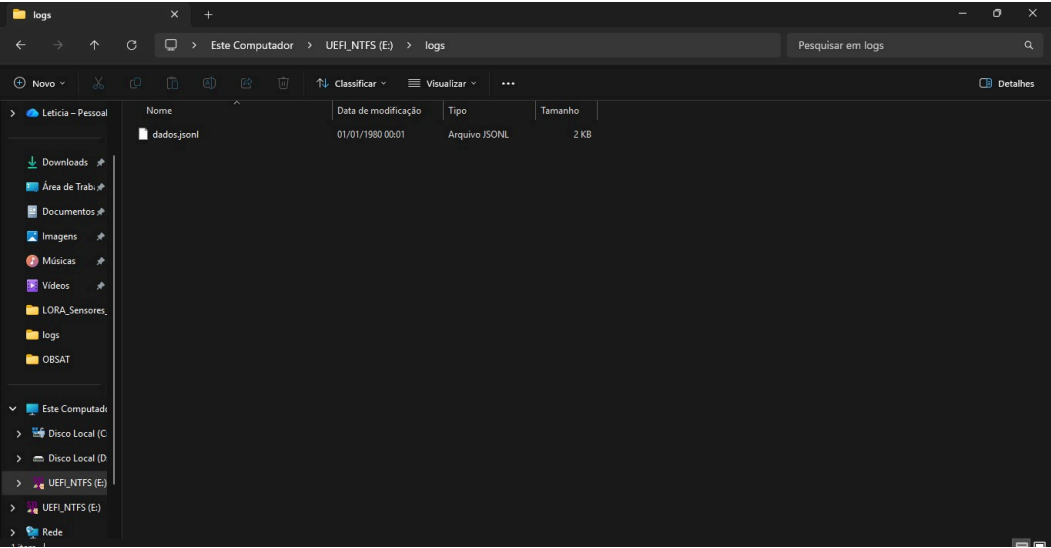
Figura 8 - Estrutura Final do Cubesat



Fonte: autoria própria.

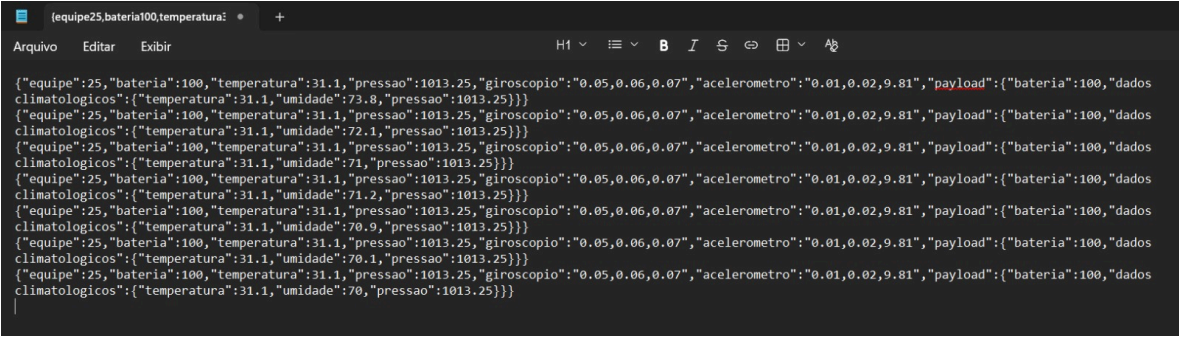
Os testes de bancada confirmaram a precisão dos sensores BMP280, DHT22 e MPU6050, cujas leituras de pressão, temperatura, umidade e dados inerciais foram registradas com sucesso em formato JSONL no armazenamento local (microSD) (Figura 8 e 9). A visualização desses dados permitiu aos alunos correlacionar grandezas físicas teóricas com fenômenos reais medidos pelo dispositivo embarcado.

Figura 9 - Diretório “logs” do armazenamento interno do ESP32 contendo os dados de telemetria captados



Fonte: autoria própria.

Figura 10 - Visualização dos dados de telemetria captados



Fonte: autoria própria.

O subsistema de telemetria validou o enlace via rádio LoRa (E32-433T20D), atingindo o status de "Sucesso!" nas requisições enviadas ao servidor de testes (Figura 10). Pedagogicamente, a implementação de um contador interno no ESP32 para simular a marcação temporal permitiu que os estudantes compreendessem a lógica de funcionamento dos sistemas GNSS e a importância da precisão cronológica para o georreferenciamento.

Figura 11 - Resultado de teste de envio de dados

Servidor de teste - OBSAT 										
Essa página irá mostrar todas as requisições enviadas para o endereço https://obsat.org.br/servidor_testes/envio_bipes.php . Ou https://obsat.org.br/servidor_testes/envio.php (envio sem o bipes). Caso essa requisição apresentar algum erro, ele será exibido. Os dados dessa página serão apagados a cada 1 hora. Caso você encontre algum erro, relate-o no servidor.										
Equipe	Bateria	Temperatura	Pressao	Giroscopio	Acelerometro	Payload	Datetime	Tamanho	Status	
25	3.901978	31.1	1013.25	0.05,0.06,0.07	0.01,0.02,9.81	[3.901978,31.1,76.1,1013.25]	2026-04-03 17:31:52	16	Sucesso!	
25	3.901978	31.1	1013.25	0.05,0.06,0.07	0.01,0.02,9.81	[3.901978,31.1,76.8,1013.25]	2026-04-03 17:31:42	16	Sucesso!	
25	3.872967	31.1	1013.25	0.05,0.06,0.07	0.01,0.02,9.81	[3.872967,31.1,75.7,1013.25]	2026-04-03 17:31:32	16	Sucesso!	
25	3.905201	31.1	1013.25	0.05,0.06,0.07	0.01,0.02,9.81	[3.905201,31.1,75.3,1013.25]	2026-04-03 17:31:23	16	Sucesso!	
25	3.871355	31.2	1013.25	0.05,0.06,0.07	0.01,0.02,9.81	[3.871355,31.2,75.7,1013.25]	2026-04-03 17:31:12	16	Sucesso!	
25	3.868132	31.2	1013.25	0.05,0.06,0.07	0.01,0.02,9.81	[3.868132,31.2,76.2,1013.25]	2026-04-03 17:31:02	16	Sucesso!	
25	3.905201	31.2	1013.25	0.05,0.06,0.07	0.01,0.02,9.81	[3.905201,31.2,76,1013.25]	2026-04-03 17:30:52	14	Sucesso!	
25	3.906813	31.2	1013.25	0.05,0.06,0.07	0.01,0.02,9.81	[3.906813,31.2,75.5,1013.25]	2026-04-03 17:30:42	16	Sucesso!	
25	3.877802	31.2	1013.25	0.05,0.06,0.07	0.01,0.02,9.81	[3.877802,31.2,75.3,1013.25]	2026-04-03 17:30:31	16	Sucesso!	
25	3.869744	31.2	1013.25	0.05,0.06,0.07	0.01,0.02,9.81	[3.869744,31.2,75.4,1013.25]	2026-04-03 17:30:21	16	Sucesso!	
25	3.877802	31.3	1013.25	0.05,0.06,0.07	0.01,0.02,9.81	[3.877802,31.3,75.2,1013.25]	2026-04-03 17:30:11	16	Sucesso!	

Fonte: autoria própria.

V. DISCUSSÃO

O projeto demonstrou ser uma plataforma eficaz para o ensino interdisciplinar. A definição da órbita heliossíncrona e da malha de cobertura exigiu a aplicação de Matemática (trigonometria esférica) e Física (mecânica orbital), transformando conceitos abstratos em requisitos técnicos de engenharia. A construção do algoritmo de trilateração tridimensional incentivou o pensamento computacional e a resolução de problemas complexos através da programação em C++.

A discussão sobre a substituição de relógios atômicos de alto custo (CSAC) pelo oscilador OCXO serviu como um laboratório de economia de engenharia. Essa escolha permitiu explorar com os alunos a relação entre termodinâmica e estabilidade de frequência, provando que limitações orçamentárias podem ser contornadas com conhecimento físico, tornando o ensino aeroespacial acessível em escolas públicas.

Para além dos ganhos técnicos, o desenvolvimento do RPS (Regional Position System) fomentou o pensamento crítico sobre a dependência brasileira de infraestruturas estrangeiras, como o GPS e a Starlink. A inclusão da vela de arrasto (drag sail) no projeto permitiu abordar a sustentabilidade espacial e a responsabilidade ética na mitigação de detritos, conectando a ciência à cidadania planetária.

VI. RESTRIÇÕES E REQUISITOS

As condições do ambiente orbital impõem desafios que funcionam como limites práticos para o aprendizado de engenharia. O sistema deve suportar ciclos térmicos extremos, exigindo dos estudantes o estudo de estabilidade de frequência e tolerância de materiais. Devido à matriz energética limitada, o projeto define como requisito a automação do consumo via sleep mode, incentivando o desenvolvimento de lógica de programação voltada à eficiência de recursos.

No armazenamento de dados, a radiação ionizante e a amplitude térmica inviabilizam dispositivos convencionais. Define-se, portanto, o uso de memórias de classe industrial (ex: Swissbit ¹²) com suporte de -40°C a $+85^{\circ}\text{C}$ e mecanismos de correção de erros (ECC). Essa restrição permite abordar com os alunos conceitos de física moderna e confiabilidade de sistemas, demonstrando por que componentes de prateleira (COTS) exigem seleções rigorosas para operar com o microcontrolador ESP32.

A sustentabilidade energética é calculada sobre uma órbita heliossíncrona (58° min de insolação/ 35° min de eclipse), exigindo que a recarga total ocorra em $3,75^{\circ}$ horas. Para os estudantes, este cenário traduz o balanço energético

¹² SWISSBIT. *SFCA032GH2AD4TO-I-GS-246-STD – Compact Flash Card Industrial*. Mouser Electronics. Disponível em: <https://br.mouser.com/ProductDetail/Swissbit/SFCA032GH2AD4TO-I-GS-246-STD?qs=IKkN%2F947nfDjaGtDGuRhow%3D%3D>.

em um problema matemático real, resolvido através da implementação de duty cycle e hibernação parcial de subsistemas não críticos.

VII. CONCLUSÕES

O protótipo cumpriu satisfatoriamente os objetivos propostos, consolidando-se como uma ferramenta de apoio ao ensino de ciências e engenharia no Ensino Médio. A validação integrada dos subsistemas de energia, sensores e comunicação provou a viabilidade de se desenvolver tecnologia espacial de baixo custo em ambiente escolar.

A experiência prática no contexto do CVT-Espacial demonstrou que a engenharia aeroespacial pode despertar vocações científicas e reduzir a defasagem tecnológica nacional através do letramento científico. O projeto removeu a mística de inacessibilidade do setor espacial, capacitando jovens a serem protagonistas no desenvolvimento de soluções soberanas.

Como continuidade, propõe-se a integração física definitiva do oscilador OCXO para refinamento da precisão temporal. Além disso, planeja-se a realização de testes em balões estratosféricos, proporcionando aos estudantes um novo ciclo de aprendizado ao enfrentar condições ambientais de quase-vácuo e temperaturas extremas, preparando o sistema para o ambiente orbital real.

A soberania tecnológica nacional começa pelo fortalecimento da educação básica. O projeto reitera que o espaço não é apenas uma fronteira final, mas um laboratório acessível capaz de transformar a realidade educacional brasileira e fomentar o desenvolvimento de uma infraestrutura estratégica própria e sustentável.

REFERÊNCIAS

AEROENGENHARIA. *O que é órbita heliossíncrona?*. Disponível em: <https://aeroengenharia.com/glossario/o-que-e-heliosynchronous-orbit/>.

CENTRO VOCACIONAL TECNOLÓGICO ESPACIAL (CVT-E).

FRIOLANI, Leticia Gatti; PAMBOUKIAN, Sergio Vicente Denser. *Estudo da topologia do sistema Geolocal: um sistema de navegação brasileiro independente de GNSS*. Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2020.

LUTWAK, Robert. *The Chip-Scale Atomic Clock – Recent Developments*. In: IEEE INTERNATIONAL FREQUENCY CONTROL SYMPOSIUM, 2009, Besançon. Proceedings... IEEE, 2009. p. 573-577.

MACHO, Eduardo Perez. *Implantação de um sistema brasileiro de georreferenciamento independente de outros sistemas de navegação por satélite: o Geolocal*. 2018. Dissertação (Mestrado) – Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2018.

MICROCHIP. CSAC SA65 – *Chip Scale Atomic Clock*. Disponível em: <https://www.microchip.com/en-us/product/csac-sa65>.

NAKAGAWA, F. *Starlink é 16ª em internet no Brasil, mas líder em satélite*. CNN Brasil. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br>.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY – NIST. *Como funcionam os relógios atômicos*. Disponível em: https://www-nist-gov.translate.goog/atomic-clocks/how-do-atomic-clocks-work?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=pt&_x_tr_hl=pt&_x_tr_pto=tc.

ORBITAL TRANSPORTS. *The Science Behind Drag Sails: A Solution for Satellite Deorbiting*. Disponível em: <https://www.orbitaltransports.com/the-science-behind-drag-sails-a-solution-for-satellite-deorbiting/>.

PISONI, Fabio et al. *Combined Navigation and Tracking with Applications to Low Earth Orbit Satellites*. Eng. Proc., Basel, v. 88, n. 22, 2025.

SANCHEZ, Diogo Merguizo. *Dinâmica ressonante de alguns satélites artificiais terrestres no sistema Terra-Lua-Sol*. 2009. Dissertação (Mestrado) – UNESP, Rio Claro, 2009.

SANTOS, Credson Isaac Lopes dos. *Dependabilidade Aplicada a Protocolo Hierárquico Baseado no LEACH*. 2017. Dissertação (Mestrado) – UERN/UFERSA, Natal, 2017.

SWISSBIT. *SFCA032GH2AD4TO-I-GS-246-STD – Compact Flash Card Industrial*. Mouser Electronics. Disponível em: <https://br.mouser.com/ProductDetail/Swissbit/SFCA032GH2AD4TO-I-GS-246-STD?qs=IKkN%2F947nfDjaGtDGuRhow%3D%3D>.