

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CÂMPUS DE SÃO JOSÉ

MATHEUS PIRES SALAZAR

**ESTAÇÃO TERRESTRE SEMI-AUTOMATIZADA COM SATNOGS
E TINYGS PARA RECEPÇÃO DE DADOS DE CUBESATS EM
BAIXA ÓRBITA TERRESTRE**

SÃO JOSÉ
2025

MATHEUS PIRES SALAZAR

ESTAÇÃO TERRESTRE SEMI-AUTOMATIZADA COM SATNOGS
E TINYGS PARA RECEPÇÃO DE DADOS DE CUBESATS EM
BAIXA ÓRBITA TERRESTRE

Projeto de Trabalho de conclusão de curso para o Curso de Engenharia de Telecomunicações do campus São José do Instituto Federal de Santa Catarina para a obtenção do diploma de Engenheiro de Telecomunicações.

Área de concentração: Telecomunicações

Orientador: Prof. Ramon Mayor Martins, Dr.

Co-orientador: Prof. Diego da Silva de Medeiros, Dr.

SÃO JOSÉ

2025

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo desenvolver uma estação terrestre de baixo custo e semi-automatizada para capturar e processar dados que são transmitidos por satélites em baixa órbita terrestre (LEO), com foco nos de pequeno porte CubeSats. A proposta se baseia nas redes de monitoramento SatNOGS e TinyGS utilizando como infraestrutura hardware de prototipagem Raspberry, Rádio Definido por Software (SDR) e antenas turnstiles VHF e UHF. A infraestrutura será acomodada no Instituto Federal de Santa Catarina campus São José (IFSC-SJ), buscando um fluxo entre estação e softwares dedicados para processamento dos sinais. A proposta prevê um sistema capaz de capturar dados enviados por satélites previamente selecionados, processando estes dados. Onde as informações serão tratadas e analisadas, permitindo assim a visualização e interpretação dos dados recebidos.

Palavras-chave: Estação Terrestre; Rádio Definido por Software; CubeSat; SatNOGS; TinyGS.

ABSTRACT

This work aims to develop a low-cost, semi-automated ground station for capturing and processing data transmitted by Low Earth Orbit (LEO) satellites, with a focus on small CubeSats. The proposal is based on the SatNOGS and TinyGS monitoring networks, utilizing prototyping hardware such as Raspberry Pi, Software-Defined Radio (SDR), and VHF/UHF turnstile antennas as infrastructure. The system will be installed at the São José campus of the Federal Institute of Santa Catarina (IFSC-SJ), seeking to establish a workflow between the station and dedicated signal processing software. The proposed system is designed to capture data sent by pre-selected satellites and process this information. The data will then be handled and analyzed, allowing for visualization and interpretation of the received information..

Keywords: Ground station; Software-defined Radio; CubeSat; SatNOGS; TinyGS.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Categorias das órbitas terrestres.....	15
Figura 2 – Figura 2 - Comparação do footprint e spot size de satélites em órbitas LEO, GEO e HEO.....	17
Figura 3 – Comparação entre os tamanhos estruturais dos CubeSats modulares...21	
Figura 4 – Sistema de lançamento P-POD para integração e liberação de CubeSats.....	22
Figura 5 – Estrutura do SDR.....	25
Figura 6 – Satélite NOAA-15.....	34
Figura 7 – Satélite FossaSat-1.....	35
Figura 8 – Antenas Turnstile.....	39
Figura 9 – Diagrama de funcionamento estação SatNOGS.....	43
Figura 10 – Diagrama de funcionamento estação TinyGS.....	44

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Cronograma de atividades.....	47
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LEO	Órbita Terrestre Baixa
SDR	Rádio Definido por Software
IFSC-SJ	Instituto Federal de Santa Catarina campus São José
VHF	Frequência Muito Alta
UHF	Frequência Ultra Alta
RF	Rádio Frequência
SNR	Relação Sinal Ruído
CCSDS	Comitê Consultivo para Sistemas de Dados Espaciais
ASM	Marcador de Sincronização Anexado
LoRa	Longo Alcance
MEO	Órbita Terrestre Média
HEO	Órbita Terrestre Alta
GEO	Órbita Terrestre Geoestacionária
FSK	Chaveamento por Deslocamento de Frequência
GFSK	Chaveamento por Deslocamento de Frequência Gaussiano
P-POD	Poly-Picosatellite Orbital Deployer
AMSAT	Corporação de Satélites para Rádioamadores
LoRaWAN	Rede de Longo Alcance e Grande Área
AFSK de Áudio	Chaveamento por Deslocamento de Frequência em Frequência
GMSK	Chaveamento por Deslocamento Mínimo Gaussiano
ADC	Conversor Analógico-Digital
DAC	Conversor Digital-Analógico
DSP	Unidade de Processamento Digital
TLE	Conjunto de Elementos em duas Linhas
BPSK	Modulação de Deslocamento de Fase Binária
RTL	Nível de Transferência de Registradores
RTL-SDR	Rádio Definido por Software com Chip Realtek
ISM	Industrial, Científico e Médico
LNA	Amplificador de Baixo Ruído
WEFAX	Fac-símile Meteorológico

NASA	Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço
NASA NSSDC	Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço - Centro Nacional de Dados de Ciências Espaciais
NSSDC	Centro Nacional de Dados de Ciências Espaciais
VSWR	Taxa de Onda Estacionária de Tensão
SWR	Taxa de Onda Estacionária
RSSI	Indicador de Força de Sinal Recebido
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
VNA	Analisador de Redes Vetoriais

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 OBJETIVOS.....	13
1.1.1 Objetivo geral.....	13
1.1.2 Objetivos específicos.....	13
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	13
2 METODOLOGIA.....	14
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
3.1 CUBESATS.....	15
3.1.1 Principais características das órbitas terrestres e definição da LEO.....	15
3.1.2 Aspectos físicos e operacionais dos satélites em LEO.....	16
3.1.3 Impactos da LEO no enlace de comunicação com estações terrestres.....	18
3.1.4 Utilização da LEO em projetos educacionais e experimentais de recepção.....	20
3.1.5 Estrutura e padronização dos CubeSats.....	21
3.1.6 Padrões de sistemas embarcados e protocolos de enlace em missões CubeSat.....	22
3.1.7 Relevância dos CubeSats em iniciativas educacionais e comunitárias.....	24
3.2 SDR.....	25
3.2.1 Fundamentos e estrutura do SDR.....	25
3.2.2. Efeito Doppler em Comunicações com Satélites em LEO.....	26
3.2.3. Impactos do Doppler no Desempenho da Recepção.....	26
3.2.4. Técnicas de Compensação do Doppler com SDR.....	27
3.2.5 Requisitos funcionais dos SDRs aplicados à comunicação via satélite.....	28
3.2.6 RTL-SDR como solução econômica para recepção de sinais provenientes do espaço.....	29
3.2.7 Integração de SDRs com plataformas automatizadas de rastreamento e recepção.....	30
3.3 ESTAÇÕES TERRESTRES.....	31
3.3.1 Princípios das redes colaborativas aplicadas a estações terrestres.....	31
3.3.2 Cadeia de Recepção de Sinais em Estações Terrestres com SDR e Plataformas Colaborativas.....	32
3.3.3 Exemplos de missões integradas às redes colaborativas SatNOGS e TinyGS.....	33
3.3.4 Arquitetura e funcionamento do SatNOGS.....	36
3.3.5 Organização e operação da rede TinyGS.....	36
3.3.6 Análise comparativa entre SatNOGS e TinyGS sob a perspectiva técnica.....	37
3.4 ANTENAS.....	38
3.4.1 Características técnicas das antenas turnstile.....	38
3.4.2 Integração da antena à infraestrutura da estação terrestre.....	40
3.4.3 Procedimentos básicos de verificação e calibração.....	41
4 - PROPOSTA.....	42
4.1 METODOLOGIA.....	42
4.2 ESTRUTURA DA ESTAÇÃO TERRESTRE.....	43
4.2.1 SatNOGS.....	43
4.2.2 TinyGS.....	44

4.3 SELEÇÃO DE SATÉLITES E PLANEJAMENTO DAS PASSAGENS.....	44
4.4 COLETA E ANÁLISE DE DADOS.....	45
4.5 RESULTADOS ESPERADOS.....	46
4.6 CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO.....	46
REFERÊNCIAS.....	47

1 INTRODUÇÃO

Os satélites em órbita baixa LEO (*Low Earth Orbit*), como os CubeSats tem sido uma alternativa mais econômica de acesso ao espaço, pois utilizam componentes comerciais de baixo custo de desenvolvimento quando comparados com satélites convencionais (Khouane et al., 2023).

Ao mesmo tempo, a tecnologia SDR (*Software Defined Radio*) oferece uma solução para a diminuição de custos, substituindo funções de *hardware* presentes na infraestrutura. Projetos como SatNOGS e TinyGS aproveitam a reconfigurabilidade do SDR para oferecer clientes com decodificação embutida e fluxos de recepção prontos para uso, eliminando a necessidade inicial de desenvolver cadeias de processamento.

A recepção e tratamento de dados em estações terrestres que recebem sinais de satélites que atuam em LEO envolve uma cadeia de etapas. Onde primeiro captura o sinal de Rádio Frequência (RF) via SDR que passa por demodulação, encaminha para sincronização de quadros, etapa na qual se utiliza de um marcador de sincronização anexado (ASM) e posteriormente passa para decodificação dos protocolos (Boettcher et al., 2016; Løfaldli 2016).

A integridade dos dados é feita pela correção de erros e pela compensação de Doppler, seguido da des-randomização que restabelece a ordem original dos pacotes (Boettcher et al., 2016). Há o fato de se ter desafio em automatizar o rastreamento orbital, devido às curtas janelas de comunicação em LEO para captura de sinal (Peralta, 2018).

Os principais desafios são, curta janela de visibilidade, variações na relação sinal ruído (SNR) e Doppler, e sincronização de ferramentas. Satélites em LEO exigem agendamento automático, alinhando sua passagem com a estação de recepção (Peralta, et al. 2018). As flutuações de SNR e o deslocamento Doppler requerem blocos de sincronização e correção para conseguirem manter a demodulação correta (Boettcher et al., 2016). Integrar ferramentas para rastreamento orbital como Gpredict aos clientes SatNOGS e TinyGS exige uma orquestração ordenada para sincronizar a frequência de transmissão do satélite e início da captura do sinal no momento da passagem do satélite (Aleshko et al. 2024).

As estações terrestres com SDR para LEO vem evoluindo, mas ainda tem carência de informações para uma integração completa. Plataformas como a USRP e BladeRF viabilizam a utilização de protocolos abertos como AX.25 e os padrões espaciais definidos pelo comitê consultivo para sistemas de dados espaciais (CCSDS) (Khouane et al., 2023). Soluções como o SatNOGS executam internamente o processo de demodulação e decodificação, enquanto o TinyGS tem o foco na recepção de pacotes LoRa. Ambos os clientes aplicam correção de Doppler antes da decodificação em cenários de baixo SNR (Boettcher et al., 2016). A ferramenta de rastreamento orbital como Gpredict automatiza o agendamento da passagem dos satélites (Aleshko et al., 2024), mas ainda requer intervenção manual, limitando assim a escalabilidade (Peralta et al., 2018).

O crescimento acelerado dos CubeSats em LEO, aumentou a demanda por estações terrestres semi-automatizadas e de baixo custo. No entanto, as soluções atuais exigem processos manuais entre etapas como o rastreamento orbital e acionamento da recepção, o que pode causar perda de dados e principalmente demora no processo (Aleshko et al., 2024; Peralta et al., 2018). Este projeto visa resolver esta limitação por meio de uma infraestrutura que integra os clientes SatNOGS e TinyGS a previsão da passagem dos satélites em LEO, permitindo agendamento e o início da recepção do sinal de forma semi-automatizada.

Este estudo propõe o desenvolvimento de uma estação terrestre semi-automatizada de baixo custo, utilizando cliente SatNOGS com Raspberry e SDR, cliente TinyGS, antenas turnstile VHF/UHF já instaladas no IFSC câmpus São José para satélites em LEO.

Primeiramente as antenas turnstile serão atualizadas. Em seguida será feito a configuração e registro do cliente SatNOGS na sua rede colaborativa, assim como cliente TinyGS. A seleção de satélites será limitada com prioridade aos que possuem transmissões compatíveis com a infraestrutura do IFSC-SJ, onde será testada a recepção de 3 a 5 satélites, coletando e documentando logs de sinal captados para cada passagem. O projeto não foca no controle ativo de antena ou transmissão para os satélites, mas sim na recepção, decodificação e análise de dados de telemetria.

Ao automatizar o agendamento e início da recepção, elimina-se assim a intervenção manual. Há um cenário de crescimento acelerado de satélites de

pequeno porte, onde a solução oferece uma alternativa acessível com software gratuitos, com o intuito de ser reprodutível e com objetivo de facilitar o acesso e tratamento dos dados de satélites em LEO em instituições de ensino como o próprio IFSC-SJ ou a infraestruturas limitadas, com foco econômico no desenvolvimento.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver uma infraestrutura de baixo custo para satélites em LEO, integrando clientes SatNOGS e TinyGS, no IFSC-SJ.

1.1.2 Objetivos específicos

- Revisar e atualizar as antenas turnstile VHF/UHF já instaladas no IFSC-SJ;
- Configurar e registrar o SatNOGS Client com a Raspberry com SDR, cadastrando na rede SatNOGS;
- Configurar e registrar o TinyGS Client com LoRa, cadastrando na rede TinyGS;
- Realizar a análise e interpretação dos dados recebidos, através de métricas de telemetria.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho está organizado em quatro capítulos. O Capítulo 1 apresenta a introdução, com a contextualização do tema e os objetivos do projeto.

O Capítulo 2 descreve a metodologia adotada para o desenvolvimento da estação terrestre.

O Capítulo 3 reúne os fundamentos teóricos que sustentam a proposta.

Por fim, o Capítulo 4 detalha a implementação da solução, com base nas plataformas SatNOGS e TinyGS.

2 METODOLOGIA

Este projeto adotará uma abordagem qualitativa e quantitativa (Gil, 2002), sendo aplicada e experimental (Yin, 2018), focando no desenvolvimento e validação de um protótipo funcional de estação terrestre. O projeto seguirá as seguintes etapas.

- Inspeção e atualização das antenas turnstile VHF/UHF instaladas no IFS-SJ;
- Revisão bibliográfica sobre SDR, TinyGS, SatNOGS e Gpredict;
- Configuração dos clientes SatNOGS client com Raspberry e SDR, e o TinyGS cliente, registrando cada estação em sua rede colaborativa;
- Seleção de 3 a 5 satélites LEO compatíveis com a infraestrutura disponível, agendando suas passagem para coleta de dados;
- Análise dos dados recebidos para validação da integridade e utilização das informações que foram coletadas.

A validação será realizada através de métricas, onde inicialmente será selecionado de 3 a 5 CubeSats para fazer as análises de testes.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

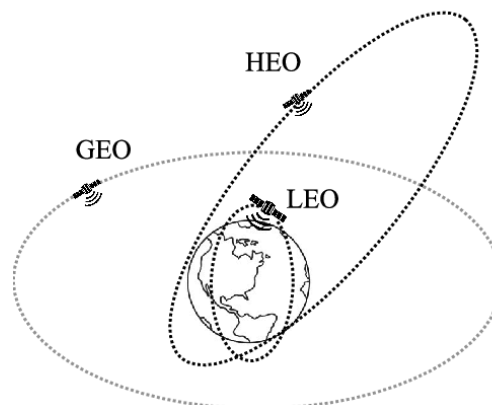
3.1 CUBESATS

3.1.1 Principais características das órbitas terrestres e definição da LEO

O planeta Terra possibilita algumas órbitas para satélites, como a órbita baixa terrestre (LEO), órbita terrestre média (MEO) e órbita terrestre alta (HEO), sendo essas classificadas com base em sua altitude em relação à Terra. A LEO encontra-se em torno de 180 e 2.000 km de altitude, e é frequentemente utilizada por missões espaciais com foco em comunicações de baixa latência, lançamentos com menor custo e menor uso de potência para transmissão devido a sua proximidade com a Terra, sendo considerada uma das melhores opções para satélites de pequeno porte (Nasa Cubesat Launch Initiative, 2017; Nieto Yll, 2018).

Para manter-se em LEO, o satélite necessita apresentar uma velocidade superior a 7,8 km/s, a fim de garantir estabilidade. Por conta dessa velocidade, são realizadas diversas voltas ao redor do planeta em pequenos intervalos de tempo, um período orbital comum é de 90 minutos, a depender da altitude específica que se encontra o satélite. Isso ajuda a entender a razão pela qual acontecem diversas passagens diárias em uma mesma região da superfície terrestre, favorecendo aplicações que exigem comunicações com maior frequência com estação terrestre (Nieto Yll, 2018).

Figura 1 - Categorias das órbitas terrestres



Fonte: Melo et al., 2017.

Dado que a interação entre satélites e estações ocorre em altitudes mais baixas, a intensidade do sinal e a duração da transmissão são reduzidas. Porém, essas características apresenta alguns desafios, pois como a duração de visada entre satélite e estação tem curta duração, geralmente de 5 a 15 minutos por passagem, isso requer da estação terrestre procedimentos para monitorar os percursos dos satélites, e ajustar o impacto do efeito Doppler, garantindo assim, a consistência na frequência de recepção. Principalmente por estações que usam SDR e funcionam nas faixas VHF e UHF, por possuírem maior tendência a sofrer com estes impactos, isso aliado ao fato de serem bastante utilizados na comunicação por CubeSats (Nieto Yll, 2018; Peralta et al., 2018).

Além disso, a LEO é considerada a opção mais econômica quando comparada às características de satélites com os convencionais utilizados na MEO e HEO, já que a arquitetura é mais simples, pois não tem necessidade de possuir um sistema de propulsão complexo e antena de grande capacidade. Essas características permitem assim, uma operação dentro de requisitos energéticos mais baixos e auxiliam no lançamento de diversas cargas de uma só vez, visto que a dimensão do satélite é reduzido. Redes colaborativas, como SatNOGS, exemplificam a potencialidade da LEO para projetos mais acessíveis financeiramente, ao integrar uma rede global de estações terrestres que recebem e processam estes dados provenientes de CubeSats em órbita (Nasa Cubesat Launch Initiative, 2017; Sá Gomes; Ferreira Da Silva, 2024).

3.1.2 Aspectos físicos e operacionais dos satélites em LEO

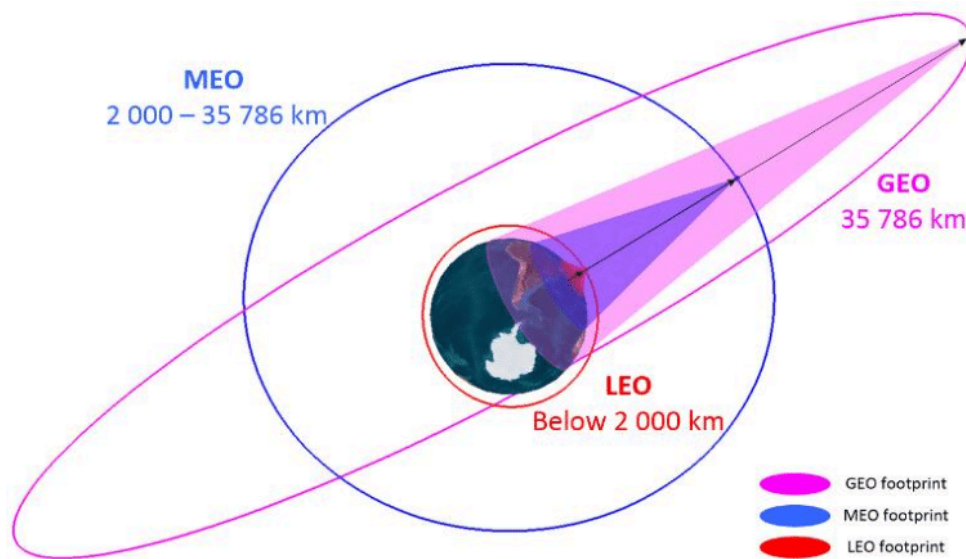
A maioria dos satélites que operam em LEO são desenvolvidos para ser de pequeno porte e maximizar a eficiência energética. A utilização de arquiteturas modulares para missões em LEO é viável devido à proximidade com a superfície. Nesse contexto, os CubeSats são frequentemente utilizados em projetos de natureza educacional, científica e tecnológica, isso devido à sua viabilidade financeira e à facilidade de acesso às tecnologias que os integram (Nasa Cubesat Launch Initiative, 2017).

A adoção por componentes disponíveis no mercado é uma estratégia para redução de custos e aceleração do processo de desenvolvimento de satélites CubeSats. Contudo, isso impõe desafios, no que se refere à limitação energética e

necessidade de garantir resistência aos sistemas embarcados, com ênfase os subsistemas responsáveis pela comunicação e o controle térmico, considerados sensíveis a limitação imposta pelo ambiente (Nasa Cubesat Launch Initiative, 2017).

A operação em LEO possui uma comunicação distinta, pois a alta velocidade alcançada resulta em períodos de visibilidade com estações terrestres breves, variando entre 5 a 15 minutos por passagem. Essa limitação precisa ser suprida com sistemas de rastreamento e alinhamento que entreguem precisão, garantindo estabilidade para a conexão durante toda a passagem. Além disso, a geometria do link por de comunicação ser variável, demanda sincronização com eficiência temporal e espacial entre os pontos de comunicação envolvidos (Nieto Yll, 2018).

Figura 2 - Comparação do footprint e spot size de satélites em órbitas LEO, GEO e HEO



Fonte: Höyhty et al., 2022.

Outro ponto a considerar é o arrasto atmosférico, que ocorre em altitudes inferiores a 600 km, levando à perda gradual da altitude do satélite. Como não conta com sistema ativo para propulsão e mecanismo de correção orbital, quando necessário, o ajuste é feito por propulsão leve para manter a órbita (utilizando geralmente magnetorque ou pequenos propulsores), limitando a capacidade de manobra, reduzindo assim a vida útil de missão (Nasa Cubesat Launch Initiative, 2017).

A região da órbita LEO apresenta níveis baixos de radiação, permitindo a utilização de circuitos eletrônicos não projetados especificamente para resistir a radiações intensas. No entanto, é importante considerar os efeitos dos ciclos térmicos, exposição ao vácuo e eventuais falhas em componentes eletrônicos, com a robustez dos sistemas embarcados sendo um requisito essencial para assegurar que a missão produza dados confiáveis (Nasa Cubesat Launch Initiative, 2017).

Em suma, os satélites em LEO possuem características que favorecem a viabilidade econômica e simplicidade estrutural, mas impõem desafios, que precisam ser considerados para um projeto que equilibre robustez, eficiência e funcionalidade.

3.1.3 Impactos da LEO no enlace de comunicação com estações terrestres

Satélites na órbita LEO enfrentam condições que impactam o enlace de comunicação, devido à sua alta velocidade de movimento e proximidade com a superfície terrestre. Cada passagem possui tempo médio de 5 a 15 minutos, sendo assim, os sistemas de recepção terrestre têm que ser capazes de rastrear e receber o sinal durante a curta janela de passagem (Nieto Yll, 2018).

Para garantir uma comunicação consistente com o satélite em movimento, é necessário que as estações implementem sistemas que possam monitorar a órbita dos satélites e corrigir o efeito Doppler, que altera a frequência do sinal durante o percurso. A utilização de SDR, aliado a algoritmos de correção, se mostrou eficiente para essa adaptação (Nieto Yll, 2018; Peralta et al., 2018).

As bandas VHF e UHF são amplamente utilizadas em comunicações via satélite, particularmente em iniciativas que envolvem CubeSats e satélites focados na área da educação. Isso devido à sua eficiência em atravessar a atmosfera, à facilidade de instalação das antenas e à vasta disponibilidade em bandas reservadas para usos amador e experimental (Peralta et al., 2018; Sá Gomes; Ferreira Da Silva, 2024).

As bandas de frequência de 144 a 146 MHz (VHF) e de 435 a 438 MHz (UHF) são frequentemente utilizadas para comunicações de satélites amadores, sendo reservadas para a transmissão dos dados de telemetria, os sinais de sinalização e as informações operacionais das missões (Peralta et al., 2018; Sá Gomes; Ferreira

Da Silva, 2024). Nos espectros mencionados, as abordagens de modulação FSK e GFSK são comumente utilizadas para assegurar uma comunicação que seja tanto confiável quanto eficiente (Sá Gomes; Ferreira Da Silva, 2024).

A adequada exploração das bandas VHF e UHF demanda antenas que consigam ter capacidade para manter o desempenho consistente ao todo o espectro, apresentam características de frequência e ganho que atendem as exigências da estação, especialmente quando a mesma está instalada em um local fixo. As antenas turnstile são amplamente empregadas devido à sua faixa de frequência apropriada e habilidade para funcionar com polarização circular (Kiriş, 2025).

Durante o percurso, a posição do satélite em relação à estação muda conforme o movimento do satélite em relação à superfície do planeta. No início e final de cada passagem, o sinal tende a sofrer a maior atenuação, devido ao satélite estar mais próximo da linha do horizonte, sendo assim a maior distância e também, da presença de partículas atmosféricas. Contudo, quando chega ao ponto mais alto, segue um trajeto mais direto, o que resulta em uma qualidade de recepção superior, com menores perdas de propagação.

A superação desses obstáculos operacionais tem sido notada por meio de iniciativas como o SatNOGS. Após automação para fazer o rastreamento e da integração com as plataformas colaborativas, as redes de estações monitoram eficientemente as passagens dos satélites, utilizando de recurso computacional até o instante em que o satélite chega em sua altitude máxima em relação à estação terrestre (Sá Gomes; Ferreira Da Silva, 2024).

Por fim, ainda que os aspectos ambientais locais, como construções e obstáculos que gerem barreiras ao redor da antena, possam afetar negativamente a recepção, o posicionamento adequado das estações, aliado ao uso de ferramentas para simulação e planejamento, contribui para diminuição de perdas e garante uma maior confiabilidade (Peralta et al., 2018).

3.1.4 Utilização da LEO em projetos educacionais e experimentais de recepção

O desenvolvimento de satélites de pequeno porte, com foco nos CubeSats, desempenhou um papel crucial na afirmação da LEO como ambiente favorável para experimentação científica e na promoção de projetos educacionais. Sua baixa altitude permite operações com infraestrutura mínima e demandas energéticas moderadas, possibilitando que universidades e instituições de ensino participem de missões reais e de forma acessível (Nasa Cubesat Launch Initiative 2017; Peralta et al., 2018).

Tecnicamente, a operação em LEO permite o uso de estações terrestres de baixa complexidade, SDR e antenas omnidirecionais fixas e sistemas de rastreamento básicos são comumente utilizados, por atenderem as demandas para a recepção eficiente dos sinais. A potência de transmissão usual para CubeSats nessa faixa orbital — varia geralmente entre 1 e 5 W — possibilitando recepção até mesmo por estações simples que funcionam através das faixas VHF e UHF, frequentemente utilizadas em comunicações educacionais e experimentais (Peralta et al., 2018; Sá Gomes; Ferreira Da Silva, 2024).

A disponibilidade dessas tecnologias possibilitou o surgimento de redes colaborativas para a recepção de sinais, como o caso do SatNOGS e o TinyGS, que conectam voluntários e instituições acadêmicas para monitoramento de satélites. Essas plataformas abertas permitem agendar passagens, recepção automatizada de telemetria e compartilhamento de dados em tempo real, democratizando o acesso às tecnologias espaciais e integrando comunidades de aprendizado (Sá Gomes; Ferreira Da Silva, 2024; Peralta et al., 2018).

Além da viabilidade econômica, a participação em projetos em LEO proporciona aos estudantes a oportunidade de lidar com desafios técnicos reais, como planejamento de órbita, rastreamento em tempo real, correção de efeito Doppler e decodificação de protocolo de comunicação (Nasa Cubesat Launch Initiative, 2017; Nieto Yll, 2018).

Assim, a utilização da LEO em aplicações educacionais não se limita à diminuição de custos, mas estabelece como uma abordagem eficiente para unir

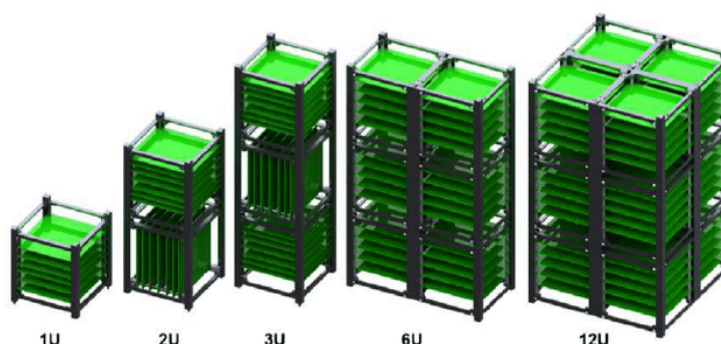
teoria e prática através de interação com sistemas espaciais autênticos, em um contexto seguro, acessível e instrutivo (Nasa Cubesat Launch Initiative, 2017).

3.1.5 Estrutura e padronização dos CubeSats

No ano de 1999, foi feita uma colaboração entre as universidades de Stanford e California Polytechnic para a criação do satélite padrão CubeSat, com o objetivo de fornecer uma plataforma padronizada, que fosse compacta e econômica, para fomentar missões educacionais e científicas (Heidt et al., 2000; Nasa Cubesat Launch Initiative, 2017).

Os CubeSats são satélites com pequenos tamanhos que orbitam ao redor da Terra. São projetados para abrigar, em um limitado espaço, os subsistemas essenciais necessários para a realização de suas missões, funcionando de forma autônoma em ambientes espaciais. Módulos de gerenciamento energético, controle térmico e de atitude, unidade de processamento a bordo e sistema de comunicação, são alguns dos componentes embarcados, todos adaptados para operar nas exigências de volume e potência dessas plataformas (Nasa Cubesat Launch Initiative, 2017; The Cubesat Program, 2022). A unidade tem medidas de $10 \times 10 \times 10$ cm que caracteriza o padrão de unidade "U" e uma massa de 1,33 kg. Podendo ser ampliada para configurações como 2U, 3U, 6U ou 12U, dependendo da missão (The Cubesat Program, 2022).

Figura 3 - Comparação entre os tamanhos estruturais dos CubeSats modulares



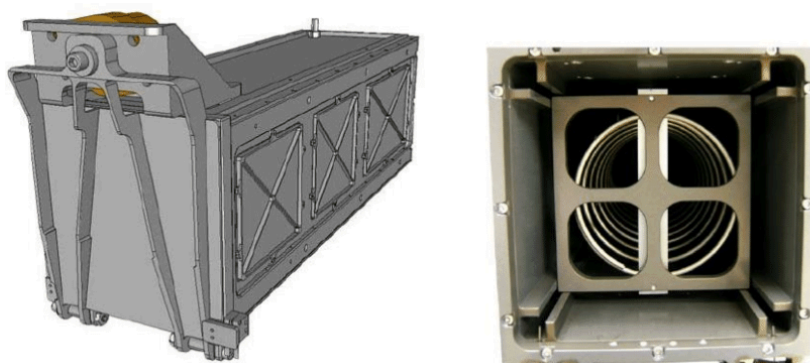
Fonte: Ruiz-Sarrio et al., 2018.

A padronização desse formato para satélites em miniatura, possibilitou o desenvolvimento de soluções específicas que melhoram o processo de inserção

orbital. Entre as opções disponíveis, destaca-se o P-POD, um sistema concebido para facilitar o lançamento conjunto de diversas unidades CubeSats com um único lançamento compartilhado. Esse sistema foi projetado para acomodar múltiplas unidades em um único compartimento de carga útil, facilitando o processo de inserção orbital do ponto de vista logístico e econômico (Puig-Suari et al., 2001).

Em relação ao processo de fabricação, os CubeSats são geralmente confeccionados com a utilização de alumínio anodizado, um tipo de material que consegue oferecer leveza, durabilidade, além de exibir características térmicas apropriadas para sua utilização (The Cubesat Program, 2022). A integração interna dos subsistemas ocorre pela utilização de barramentos PC/104, padrão que contribui para eficiência nos processos de montagem e verificação (Nasa Cubesat Launch Initiative, 2017).

Figura 4 - Sistema de lançamento P-POD para integração e liberação de CubeSats



Fonte: Burger et al., 2013.

3.1.6 Padrões de sistemas embarcados e protocolos de enlace em missões CubeSat

Na área da comunicação, os CubeSats geralmente funcionam nas bandas de frequência VHF e UHF, com destaque nas bandas AMSAT de de faixa 144 MHz e 430 MHz, sendo as mais utilizadas. Devido ao congestionamento pelas fontes terrestres e até outros CubeSats, as frequências estão propensas, nesse sentido, a banda L (1260-1270 MHz) é uma opção para uplinks. A escolha dessas bandas se deve à boa penetração atmosférica, menor complexidade de antenas e viabilidade de operação com baixa potência (Lyerly; Pachowicz, 2020). Essas características incentivam o uso por antenas com tamanhos menores, como monopolos e turnstiles,

além de reduzir os requisitos de ganho, facilitando a recepção por estações terrestres de instituições educacionais ou amadoras (Peralta et al., 2018).

Para as comunicações, as bandas VHF e UHF, são utilizadas via SDR, as quais são preferencialmente escolhidas devido à sua versatilidade e custo reduzido (Peralta et al., 2018). A padronização facilita o uso de redes colaborativas como o SatNOGS (baseado no AX.25) e o TinyGS (compatível com LoRaWAN), que automatizam o monitoramento e a recepção de sinais vindo de satélites em LEO (Sá Gomes; Ferreira Da Silva, 2024).

Os esquemas de modulação utilizado nas comunicações são flexíveis, se ajustando conforme as exigências de cada missão. Os métodos mais comuns utilizados é AFSK e GMSK, uma forma variante do GFSK (Tsuruda, 2021). As missões mais recentes começaram a utilizar modulação LoRa, valorizada pela sua resistência contra ruídos e interferências, o que é vantajoso em ambientes com baixa SNR (Sá Gomes; Ferreira Da Silva, 2024).

No nível de camada de enlace, o protocolo AX.25 é adotado em missões amadoras para envio de telemetria (Tsuruda, 2021), o que garante que seja compatível com infraestruturas de estações terrestres colaborativas, como no caso do SatNOGS (Sá Gomes; Ferreira Da Silva, 2024). A seleção do protocolo de comunicação exige uma análise das técnicas de correção de erros para garantir a integridade das informações que estão sendo transmitidas e recebidas (Tsuruda, 2021). No contexto da rede TinyGS, experimentos foram realizados utilizando protocolos como o LoRaWAN, com uma ênfase especial por projetos destinados à transmissão de telemetria, que apresentem sobrecarga reduzida e alta capacidade de resistir a perdas (Sá Gomes; Ferreira Da Silva, 2024).

A escolha final dos protocolos e arquitetura de comunicação depende de fatores como a complexidade da carga útil, autonomia desejada para a missão, janela de comunicação disponível e a capacidade computacional da estação de recepção em operação. A integração com receptores SDR aumenta a versatilidade das missões, visto que possibilita configuração de parâmetros de recepção em tempo real, adaptando-se a diferentes satélites e cenários.

3.1.7 Relevância dos CubeSats em iniciativas educacionais e comunitárias

A padronização da estrutura do CubeSat possibilitou que instituições acadêmicas, centros de pesquisa e grupos independentes conseguissem desenvolver, integrar e administrar satélites com um investimento reduzido, contribuindo para uma vivência prática (Nasa Cubesat Launch Initiative, 2017; The Cubesat Program, 2022).

No âmbito acadêmico, essas iniciativas incentivam uma perspectiva em que os estudantes gerenciem as fases do projeto de uma missão, desde a concepção do design até a execução em órbita, o que aprimora habilidades técnicas na resolução de problemas reais (Nasa Cubesat Launch Initiative, 2017).

Os CubeSats são fundamentais para promover o desenvolvimento de projetos comunitários para recepção de sinais. Iniciativas colaborativas como a SatNOGS e a TinyGS, se baseiam em SDR e na adoção de protocolos abertos, favorecendo a parceria entre instituições de ensino e voluntários interessados no monitoramento e recepção de sinais provenientes de satélites, fortalecendo uma conexão entre a educação, a ciência e a tecnologia espacial. Esta medida possibilita a monitorização e a análise dos sinais emitidos pelos satélites, promovendo a difusão de experimentos práticos e o fortalecimento de iniciativas de inovação coletiva (Sá Gomes; Ferreira Da Silva, 2024; Peralta et al., 2018).

Em regiões com infraestrutura escassa, a estrutura simples e modularidade dos CubeSats têm sido utilizadas como instrumento de capacitação tecnológica, demonstrando que conhecimentos locais e recursos limitados podem permitir missões e gerar impactos tanto científicos como sociais (Nasa Cubesat Launch Initiative, 2017).

Nesse contexto, os CubeSats exercem uma função que ultrapassa a capacitação prática, atuando também como um impulsionador da inovação em grande escala. Ao tornar o acesso às tecnologias espaciais mais acessíveis, essas plataformas contribuem na formação das próximas gerações de profissionais voltados para as necessidades do setor aeroespacial.

3.2 SDR

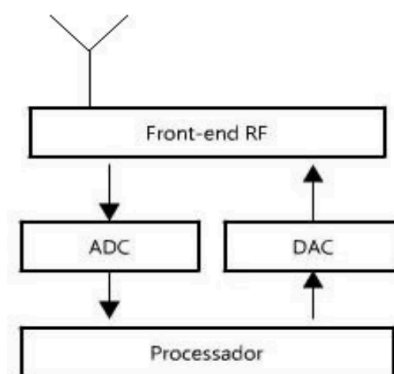
3.2.1 Fundamentos e estrutura do SDR

O SDR representa uma arquitetura de radiocomunicação que muda funções tradicionalmente exercidas por circuitos analógicos, incluindo a modulação, demodulação e filtragem, para o formato digital. Esse procedimento permite a reconfiguração através de software, proporcionando assim adaptabilidade necessária para se ajustar a diferentes protocolos, como também a diversas faixas de frequência (Peralta et al., 2018).

A configuração essencial consiste em uma antena, um módulo front-end de RF, conversores analógico-digital (ADC) e digital-analógico (DAC), além de uma unidade de processamento digital (DSP), na qual é encarregada pela implementação de algoritmos destinados para à recepção e posterior análise do sinal (Chen et al., 2010).

Essa característica modular diminui a demanda por hardware específico, o que favorece aplicações educacionais e espaciais, como nas missões CubeSat, em que existe variedade de modulações e demanda por plataformas adaptáveis (Peralta et al., 2018; Nasa Cubesat Launch Initiative, 2017). A importância da tecnologia entre as instituições foi promovida por meio da adoção de softwares livres, como o GNU Radio, e da implementação de receptores de baixo custo (Peralta et al, 2018; Sá Gomes; Ferreira Da Silva, 2024).

Figura 5 - Estrutura do SDR



Fonte: Cabral, Lins Júnior e Rocha, 2019.

3.2.2. Efeito Doppler em Comunicações com Satélites em LEO

O fenômeno Doppler é a variação na frequência recebida, isso acontece em função da velocidade entre o satélite e estação. Nas comunicações no espaço, esse fenômeno se torna evidente, em satélites em LEO, com velocidades orbitais superiores a 7,8 km/s (Peralta et al., 2018; Nieto Yll, 2018).

À medida que a distância do satélite e a estação diminui, a frequência atinge valores superiores aos iniciais. Por outro lado, à medida que o satélite se afasta, essa frequência sofre um deslocamento para valores inferiores. Esse desvio, que pode ultrapassar dezenas de kilohertz nas bandas VHF e UHF, varia ao longo da passagem orbital e tende a ser mais acentuado nas extremidades da visada, em que a projeção da velocidade é superior em relação à estação (Nieto Yll, 2018).

A variação do desvio torna essencial a adaptação da frequência em tempo real, que é viabilizado pelo uso de SDRs com previsões que se baseiam em elementos orbitais do tipo TLE (Flores et al., 2017).

A amplitude e a taxa de modificação do efeito Doppler dependem fatores orbitais, como a altitude, a inclinação, o ângulo de passagem e a frequência de operação. Ter o conhecimento desses parâmetros permite um planejamento adequado da largura de banda do receptor, assim como das técnicas de rastreamento e correção (Nieto Yll, 2018).

Assim, o fenômeno Doppler ocorre como uma limitação crítica em sistemas de recepção com satélites em LEO, sendo sua compensação essencial no planejamento de estações terrestres (Peralta et al., 2018; Nieto Yll, 2018).

3.2.3. Impactos do Doppler no Desempenho da Recepção

As variações na frequência do sinal, provocadas pelo efeito Doppler, ao passar por satélites em LEO, representam um desafio para garantir a estabilidade na recepção dos dados. Essas mudanças afetam a sintonia dos receptores e a integridade das informações com alta eficiência espectral (Nieto Yll, 2018).

Em situações envolvendo receptores analógicos ou transceptores de sintonia fixa, a correção de desvios de frequência demanda intervenção manual, o que limita

a precisão e a capacidade de rastreamento. Em contraste, os sistemas baseados em SDR possibilitam a sintonia automatizada em tempo real, ajustando-se às curvas de deslocamento previstas com base em elementos orbitais TLE (Peralta et al., 2018).

O efeito Doppler impacta significativamente modulações que dependem da estabilidade precisa da frequência, como BPSK e GFSK. As variações contínuas na frequência do sinal provocadas por esse fenômeno elevam a taxa de erros na transmissão, comprometendo a decodificação correta das informações. Já esquemas de modulação como LoRa, com espectro espalhado, oferecem maior tolerância a desvios frequenciais moderados, sendo vantajosos em enlaces de baixa potência e curta duração (Sá Gomes; Ferreira Da Silva, 2024; Nieto Yll, 2018).

Outro ponto é à largura de banda dos filtros para a recepção. Filtros com largura de banda reduzida podem remover sinais que estão fora de sintonia. SDRs oferecem a vantagem de ajustar dinamicamente essa largura, garantindo que o sinal permaneça na faixa útil do receptor durante toda a passagem orbital (Peralta et al., 2018; Nieto Yll, 2018).

Além disso, variações não previstas no perfil Doppler, causadas por incertezas orbitais, flutuações atmosféricas ou instabilidade do oscilador local, podem interferir nas rotinas de rastreamento e sincronização de protocolos, levando à falha de detecção ou decodificação. A compreensão desses impactos é essencial para o projeto de estações terrestres robustas, adaptáveis e compatíveis com os perfis típicos de operação em LEO (Peralta et al., 2018; Nieto Yll, 2018).

3.2.4. Técnicas de Compensação do Doppler com SDR

Um desafio para a estabilidade da comunicação em sistemas de recepção com satélites em LEO é a compensação do efeito Doppler. Devido ao desvio de frequência gerado pelo movimento relativo dos satélites, que pode atingir valores da ordem de dezenas de kilohertz nas faixas de VHF e UHF, torna-se imprescindível a implementação de métodos para correção ao longo do processo de recepção do sinal (Nieto Yll, 2018).

A implementação da correção por Doppler se tornou automatizada, precisa e mais adaptável com a utilização dos SDRs. Uma das abordagens mais comuns é o uso de scripts integrados a softwares de rastreamento orbital, como Gpredict ou módulos específicos do GNU Radio, que utilizam os elementos orbitais TLE serve para prever a frequência do deslocamento Doppler em cada instante da trajetória orbital (Flores et al., 2017; Peralta et al., 2018).

Os scripts possibilitam modificações em tempo real da frequência central do SDR, garantindo que o sinal permaneça na faixa de recepção, mesmo ocorrendo mudanças. O processo de ajuste dinâmico de frequência para compensar o desvio Doppler é crucial para a recepção eficaz de sinais de LEO (Peralta, 2018).

Outra estratégia utilizada é a aplicação de algoritmos de correção em tempo real no domínio digital, onde o espectro obtido é utilizado para avaliar o deslocamento de frequência e realinhá-lo internamente por meio de ajustes digitais adaptativos (Nieto Yll, 2018).

Em sistemas com modulações de espectro espalhado, como no caso do LoRa, os firmwares costumam ter recursos para ajustar a recepção do sinal, para compensar os desvios de frequência. Essas modificações direcionam os sinais captados para se ajustarem às expectativas, permitindo a análise das informações, mesmo quando há oscilações resultantes do efeito Doppler (Sá Gomes; Ferreira Da Silva, 2024).

3.2.5 Requisitos funcionais dos SDRs aplicados à comunicação via satélite

As comunicações via satélites em LEO apresentam desafios específicos como rápida variação da frequência do sinal devido ao efeito Doppler e a diversidade de modulações e protocolos utilizados (Peralta et al., 2018). Nesse contexto, os SDRs se destacam pela flexibilidade, eficiência técnica e como uma solução econômica para estações terrestres (Peralta et al., 2018; Sá Gomes; Ferreira Da Silva, 2024).

Uma das principais atribuições do SDR nas aplicações satelitais é a sintonia dinâmica, permitindo assim o acompanhamento em tempo real da frequência do satélite durante sua trajetória, fundamental para modificar o desvio Doppler que

corre. Com o suporte de bibliotecas e algoritmos direcionados ao rastreamento orbital, o SDR tem capacidade de automatizar essa alteração de frequência, garantindo a qualidade da recepção (Peralta et al., 2018).

Outro aspecto relevante é a compatibilidade com múltiplos esquemas de modulação e protocolos de comunicação, como AFSK, GFSK e LoRa, amplamente utilizados por CubeSats e nanossatélites. Com a utilização do SDR, ficou possível modificar e atualizar esses esquemas com o uso de software, sem a necessidade de troca do hardware fisicamente, como era realizado antigamente. Essa propriedade se transforma em uma vantagem em ambientes acadêmicos e iniciativas experimentais, onde existem limitações de orçamento e a demanda por soluções acessíveis (Peralta et al., 2018; Chen et al., 2010; Sá Gomes; Ferreira Da Silva, 2024).

A habilidade de modificar a sensibilidade e de controlar fatores como ganho, largura de banda e filtros digitais constitui um diferencial técnico do SDR quando comparado a rádios tradicionais. Tal funcionalidade otimiza a resistência da recepção, frequentemente em conexões de baixa potência, comuns em satélites com arquitetura de energia limitada e antenas de baixo ganho (Peralta et al., 2018; Chen et al., 2010).

Ademais, o SDR se sobressai pela facilidade de integração com sistemas de automação e controle, como GNU Radio e SatNOGS Client. Essa habilidade de integração possibilita desenvolver estações terrestres econômicas, capazes de executar tarefas como rastreamento, recepção e transmitir dados para bancos colaborativos (Peralta et al., 2018; Sá Gomes; Ferreira Da Silva, 2024).

3.2.6 RTL-SDR como solução econômica para recepção de sinais provenientes do espaço

O RTL-SDR é um aparelho receptor de sinais que adota a metodologia de rádio definido por software, sendo comumente utilizado em ambientes acadêmicos e experimentais. A sua utilização tornou-se popular em razão do custo mais baixo, da flexibilidade na captação de várias faixas de frequência e da compatibilidade com diversos sistemas e ferramentas de análise. Inicialmente o aparelho foi criado para captar transmissões de televisão digital, no entanto, esse dispositivo foi

posteriormente aprimorado para funcionar como um receptor multifuncional de sinais em radiofrequência (Peralta et al., 2018).

Sua aplicação em projetos para recepção de satélites em LEO, se consolidou devido à compatibilidade com bandas VHF e UHF, comumente utilizadas por CubeSats. O RTL-SDR, quando comparado a receptores dedicados, possui limitações, contudo, se mostram adequadas para seu emprego, no entanto, tais características são apropriadas para sua utilização em aplicações de telemetria em contextos educacionais ou em âmbito de entusiastas (Peralta et al., 2018).

Sua ampla aceitação na comunidade técnica e educacional deve-se principalmente à sua capacidade de se integrar facilmente a softwares de código aberto, como GNU Radio e o cliente da plataforma SatNOGS. Essa capacidade de interoperabilidade facilita sua integração em redes colaborativas de estações terrestres com custo baixo, tornando o RTL-SDR como uma alternativa viável para projetos com baixo orçamento e promovendo a democratização do acesso à tecnologia (Peralta et al., 2018; Sá Gomes; Ferreira Da Silva, 2024).

3.2.7 Integração de SDRs com plataformas automatizadas de rastreamento e recepção

A operação eficiente de estações terrestres voltadas à recepção de sinais provenientes de satélites em LEO depende de ferramentas para possibilitar automação em tempo real, especialmente no rastreamento, ajuste de frequência e na coleta dos dados transmitidos. Quando ligada a softwares especializados, a tecnologia SDR pode ser ajustada para operar de maneira integrada e eficaz ao longo do período de visibilidade dos satélites com a estação terrestre (Peralta, 2018; Sá Gomes; Ferreira Da Silva, 2024).

Entre as soluções mais utilizadas, está o GPredict, um software livre que realiza o cálculo da posição orbital de satélites com base em elementos TLE. Sua estrutura possibilita a interação com sistemas externos de controle, como interfaces de rádio e de movimentação de antenas, o que aumenta o desempenho da recepção em condições de curta visibilidade, típicas características das passagens de satélites na órbita baixa (Flores et al., 2017).

O GNU funciona como um sistema, onde permite que usuários façam o desenvolvimento personalizado por módulos integrados, conforme as suas necessidades, onde isso é feito a partir criar fluxos de processamento para os sinais digitais. Sua compatibilidade com bibliotecas voltadas à recepção de satélites, é uma opção relevante para projetos que envolvem a demodulação e análise de sinais transmitidos por CubeSats, especialmente nos contextos educacionais e experimentais (Peralta et al., 2018; Chen et al., 2010).

3.3 ESTAÇÕES TERRESTRES

3.3.1 Princípios das redes colaborativas aplicadas a estações terrestres

A implementação de redes colaborativas nas estações terrestres representa uma transformação significativa no modo de como os dados originados de satélites, em particular aqueles em LEO são recebidos. Diferente do sistema tradicional centralizado, que conta com uma única estação responsável pela captação dos sinais, essas redes operam de forma descentralizada, aproveitando a contribuição simultânea de múltiplos pontos de recepção distribuídos geograficamente. Esse arranjo possibilita o aumento da cobertura temporal e espacial, otimizando a coleta de dados mesmo em missões com janelas de visibilidade reduzidas (Sá Gomes; Ferreira Da Silva, 2024).

O princípio operacional dessas redes baseia-se na descentralização da infraestrutura, onde usuários voluntários instalam estações locais. Essas estações integram SDR ou microcontroladores embarcados, antenas específicas para recepção em bandas VHF e UHF ou ISM, e sistemas de rastreamento automático baseados em elementos orbitais TLE. Os dados obtidos são recebidos, decodificados e enviados para servidores centrais, onde passam por armazenamento e organização, tornando-se acessíveis ao público (Sá Gomes; Ferreira Da Silva, 2024; Flores et al., 2017; Peralta et al., 2018).

A arquitetura colaborativa possibilita que missões educacionais, científicas ou experimentais aproveitem uma infraestrutura global sem custo operacional extra, enquanto alimenta o envolvimento técnico de comunidades acadêmicas e amadoras. Esse sistema é baseado nos conceitos da ciência aberta, incentivando a disseminação ampla das informações, possibilitando a replicação dos estudos e o

desenvolvimento compartilhado de ferramentas abertas (Sá Gomes; Ferreira Da Silva, 2024; Peralta, 2018).

Além de promover um acesso contínuo a dados, essas redes colaborativas também aumentam a resiliência do sistema de recepção, tornando-o mais capaz de ser tolerante a falhas. Por não dependerem de uma única estação central, eles se tornam menos suscetíveis a falhas específicas e mais eficazes na coleta de dados em eventos de curta duração ou em órbitas de difícil previsão. A disponibilização de dados abertos promove a utilização das observações em várias áreas, abrangendo uma confirmação das missões, a mensuração da eficácia das comunicações e o acompanhamento sistemático das condições dos CubeSats (Sá Gomes; Ferreira Da Silva, 2024).

Esse modelo descentralizado tem sido cada vez mais implementado por projetos como o SatNOGS e o TinyGS, demonstrando ser possível, mesmo com uma infraestrutura simples e econômica, garantir a recepção de sinais espaciais, garantindo acesso igualitário à exploração e ao monitoramento orbital (Sá Gomes; Ferreira Da Silva, 2024; Peralta et al., 2018).

3.3.2 Cadeia de Recepção de Sinais em Estações Terrestres com SDR e Plataformas Colaborativas

A recepção de sinais transmitidos por satélites em LEO exige uma cadeia de processamento estruturada para mitigar os efeitos de baixa potência, deslocamentos frequenciais dinâmicos e janelas de visibilidade temporárias. Essa cadeia é formada por uma série de elementos técnicos que operam em conjunto para assegurar a integridade e a qualidade dos dados recebidos (Peralta et al., 2018; Sá Gomes; Ferreira Da Silva, 2024; Nieto Yll, 2018).

O recebimento do sinal de satélite se inicia na antena, na qual é projetada para operar nas faixas VHF ou UHF. Essa antena, tipicamente com polarização circular, desempenha função de reduzir as variações na orientação do transmissor em órbita. O sinal é então transmitido através de cabos coaxiais até um LNA, cuja função é elevar a intensidade do sinal sem afetar de maneira significativa a SNR. Esse fator é fundamental para a comunicação espacial, quando se trabalha com baixos níveis de energia (Kiriş, 2025; Saravanakumar et al., 2018).

Em sequência, filtros passa-faixa são empregados para eliminar interferências externas que podem vir de fontes como emissoras de rádio FM, sinais de telefonia celular e redes Wi-Fi. A filtragem seletiva mantém a integridade espectral do sinal útil antes que seja direcionado a um sistema de conversão analógico-digital, frequentemente realizado por meio de um SDR. Isso permite a conversão do sinal em formato digital, o que viabiliza seu processamento em sistemas computacionais e torna mais simples a realização de tarefas como demodulação, decodificação e ajuste dinâmico (Peralta et al., 2018; Flores et al., 2017).

A automação de processos, como vigilância da órbitas, administração de antenas e coleta de dados, é otimizado pela incorporação de estações de recepção em redes colaborativas como o SatNOGS e o TinyGS, reduzindo intervenções manuais. Para o rastreamento orbital, essas plataformas empregam elementos TLE e bibliotecas preditivas, possibilitando o ajuste de frequência em tempo real e o registro de dados da transmissão. A configuração dessas redes possui diferenças, o SatNOGS é projetado para computadores e receptores de SDRs, proporcionando flexibilidade, enquanto o TinyGS faz uso de microcontroladores com transceptores LoRa, direcionado a sinais de menor complexidade (Peralta, 2018; Sá Gomes; Ferreira Da Silva, 2024).

Entender a configuração da cadeia de recepção possibilita o dimensionamento correto dos componentes, além de auxiliar na seleção de tecnologias que se adequem ao perfil da missão. Essa estratégia é particularmente importante em projetos educacionais e experimentais, onde facilita, a eficiência e a diminuição de custos são fatores essenciais para a viabilidade da estação terrestre (Peralta et al., 2018; Saravanakumar et al., 2018).

3.3.3 Exemplos de missões integradas às redes colaborativas SatNOGS e TinyGS

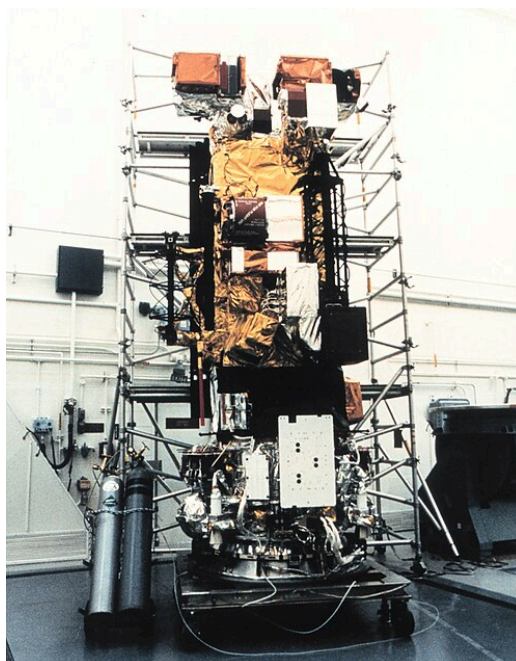
Além das ferramentas que executam tarefas que automatizam operações em determinados ambientes, redes colaborativas como a SatNOGS e a TinyGS proporcionam plataformas descentralizadas que possibilitam a organização antecipada das sessões de recepção e da coleta de sinais de satélites. O cliente SatNOGS, permite desenvolver a criação de processos que fazem tanto o ajuste em tempo real na frequência de recepção, como também registrar os sinais recebidos

durante as passagens. Essas operações são coordenadas com os servidores da rede, possibilitando o envio das informações coletadas por estações colaborativas distribuídas globalmente (Sá Gomes; Ferreira Da Silva, 2024).

As redes colaborativas SatNOGS e TinyGS possibilitam que estações terrestres distribuídas, geridas por radioamadores e instituições de ensino, realizem o monitoramento de satélites em LEO utilizando protocolos abertos e SDR. A conexão com essas redes permite o rastreamento orbital automatizado, a correção de frequência Doppler e a decodificação de sinais de complexidade reduzida (Sá Gomes; Ferreira Da Silva, 2024; Peralta et al., 2018).

No âmbito da rede SatNOGS, o satélite NOAA-15 torna-se notório, uma vez que emite continuamente sinais analógicos que contém informações meteorológicas através do protocolo WEFAX, uma metodologia já consolidada para transmissão de dados por imagens ambientais. Essas informações englobam registros em tempo real e dados arquivados, nos quais podem ser consultados na página oficial. Uma ampla diversidade de registros públicos que fornecem detalhes e informações técnicas operacionais sobre esse satélite, está disponível na Organização Meteorológica Mundial (World Meteorological Organization, [s.d.]).

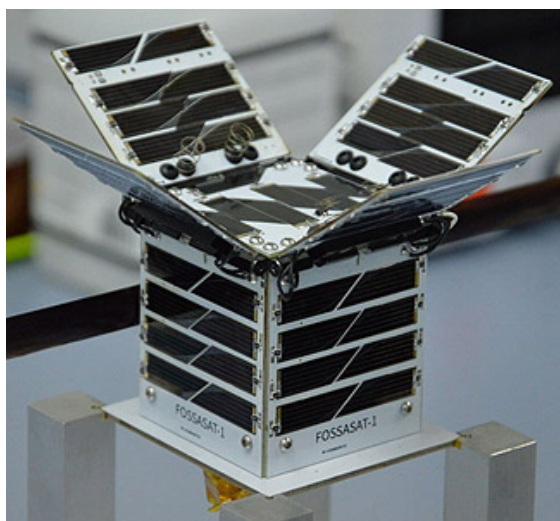
Figura 6 - Satélite NOAA-15



Fonte: NOAA, s.d.

Enquanto no sistema TinyGS, o satélite FossaSat-1 se destaca como um exemplo significativo de CubeSat que se comunica por modulação LoRa. Desenvolvido por uma iniciativa europeia de baixo custo com foco na democratização do acesso ao espaço, o satélite apresenta uma estrutura simplificada com o propósito de criar sistemas econômicos, utilizando componentes comerciais da NASA NSSDC.

Figura 7 - Satélite FossaSat-1



Fonte: Krebs, 2025.

Esses exemplos ilustram como as redes abertas se estabeleceram como ferramentas eficazes para a experimentação e validação de sistemas de recepção espacial, facilitando a conexão entre teoria e prática no âmbito dos satélites de pequeno porte.

A sinergia entre SDR e as ferramentas permite que estações de baixo custo consigam ser utilizadas em projetos educacionais e comunitários, viabilizando a recepção prática de sinais espaciais de forma acessível, confiável e sincronizada com parâmetros orbitais das missões (Peralta et al., 2018; Sá Gomes; Ferreira Da Silva, 2024).

3.3.4 Arquitetura e funcionamento do SatNOGS

O SatNOGS é um projeto de código aberto gerido pela Libre Space Foundation, que cria uma rede de estações em solo terrestres para receber sinais de

satélites de forma automática. Sua arquitetura foca em acessibilidade, automação e colaboração entre operadores voluntários (Sá Gomes; Ferreira Da Silva, 2024).

A operação do SatNOGS requer a colaboração sincronizada de quatro componentes principais. A administração local dos aparelhos da estação terrestre é realizada pelo componente SatNOGS Client, que assegura o desempenho apropriado durante a captação dos sinais. Paralelamente, a rede SatNOGS opera como sistema de controle descentralizado, coordenando a atuação das estações participantes e permitindo a sincronização de suas tarefas. Simultaneamente, o sistema de dados do SatNOGS funciona como um repositório central que faz o recebimento e então organiza e disponibiliza as informações para consultas e futuras análises. Para a estação terrestre conseguir estabelecer comunicação com satélites, é necessário um conjunto físico composto por antenas, rádios e sistemas de controle, responsável por transmitir e receber os sinais durante a janela de comunicação (Sá Gomes; Ferreira Da Silva, 2024).

A estrutura modular do sistema SatNOGS proporciona diversas alternativas de organização para as estações. A compatibilidade do sistema abrange diversos protocolos utilizados em satélites amadores e científicos, como AX.25, AFSK, BPSK e GFSK. A inclusão de decodificadores personalizados no ambiente GNU Radio aumenta significativamente a flexibilidade do sistema, tornando-o especialmente apropriado para pesquisas experimentais e projetos educacionais (Sá Gomes; Ferreira Da Silva, 2024; Croissant; White, 2023).

Essa estrutura colaborativa capacita a comunidade global na captação de sinais espaciais, incentivando a difusão do conhecimento técnico e a ciência aberta na indústria aeroespacial (Sá Gomes; Ferreira Da Silva, 2024).

3.3.5 Organização e operação da rede TinyGS

O TinyGS é uma rede aberta e descentralizada de estações terrestres focada na recepção de sinais de satélites de pequeno porte, principalmente utilizando modulação LoRa em frequências ISM (433 MHz, 868 MHz ou 915 MHz). O projeto proporciona infraestrutura de recepção acessível, utilizando microcontroladores de baixo custo e módulos de rádio com frequência compatíveis, o que simplifica a

instalação de estações locais com equipamentos mais básicos (Sá Gomes; Ferreira Da Silva, 2024).

A rede é composta por estações descentralizadas, que geralmente utilizam de microcontroladores ESP32. Essas estações se ligam aos transceptores LoRa da linha SX127x e usam um software de código aberto criado especificamente para essa finalidade. Este programa é responsável pela recepção e envio de pacotes aos servidores baseados em nuvem por meio de um módulo Wi-Fi, possibilitando a coleta dos dados telemétricos (Sá Gomes; Ferreira Da Silva, 2024).

A estrutura do TinyGS é baseada pela colaboração voluntária de pessoas que gerenciam estações independentes, isso permite a recepção coletiva de sinais e a organização descentralizada dos dados, sendo oferecidos abertamente através de uma interface na web. As transmissões captadas são armazenadas de forma distribuída e os dados ficam acessíveis ao público por meio de uma interface online. Além de monitorar mensagens LoRa, a plataforma suporta experimentações com equipamentos, sensores terrestres e dispositivos educacionais de baixo custo (Sá Gomes; Ferreira Da Silva, 2024).

A acessibilidade e o custo acessível do TinyGS promovem a inclusão e a participação de novos operadores, possibilitando que contribuam ativamente na captação de sinais originados de satélites. Sua descentralização fortalece a redundância e validação cruzada de observações, construindo uma comunidade global de monitoramento de satélites simplificado (Sá Gomes; Ferreira Da Silva, 2024).

3.3.6 Análise comparativa entre SatNOGS e TinyGS sob a perspectiva técnica

As redes SatNOGS e TinyGS são compostas por estações geridas por operadores independentes, cuja infraestrutura é sustentada por uma comunidade de voluntários. Ambas as propostas baseiam-se em tecnologias de código aberto e visam a coleta colaborativa de dados provenientes de satélites. Contudo, elas se diferenciam por aspectos técnicos fundamentais, como a estrutura dos sistemas, os tipos de sinal que são processados e as exigências de infraestrutura relacionadas (Sá Gomes; Ferreira Da Silva, 2024).

O SatNOGS é projetado para receptores SDR, sendo capaz de operar sinais de satélites nas bandas VHF e UHF. Sua compatibilidade com protocolos como AX.25, AFSK, BPSK e GFSK, em conjunto com a integração ao GNU Radio, possibilita a decodificação de telemetrias e transmissões contínuas de CubeSats e outros satélites. Este procedimento necessita de computador, antena e sistema de rastreamento orbital, que fundamentais para o sincronismo da estação com os satélites (Sá Gomes; Ferreira Da Silva, 2024; Croissant; White, 2023).

Já o TinyGS demonstra eficiência com microcontroladores, como o caso de um ESP32 em conjunto ao LoRa. A maioria das estações da rede opera sem a necessidade de computadores dedicados ou SDR, focando na recepção de transmissões baseadas em LoRa, geralmente alocadas nas faixas de frequência ISM. A arquitetura simplificada favorece seu uso em contextos educacionais e experimentais, especialmente para satélites com pacotes de dados de baixa taxa de transmissão e estrutura simples (Sá Gomes; Ferreira Da Silva, 2024).

No que diz respeito à sua funcionalidade, o SatNOGS disponibiliza de recursos para programar as sessões de recepção, assim como administrar os dados coletados e realizar a decodificação de sinais em um próprio sistema. Ambas as plataformas incentivam a ciência aberta e a aprendizagem prática, adaptando suas abordagens conforme os objetivos da missão e as características do sinal recebido e os recursos técnicos disponíveis em cada estação. (Sá Gomes; Ferreira Da Silva, 2024).

3.4 ANTENAS

3.4.1 Características técnicas das antenas turnstile

As antenas turnstile, também conhecidas como antenas cruzadas de dipolo, são comumente utilizadas em sistemas que recebem sinais de satélites em LEO, como CubeSats e os satélites destinados a estudos meteorológicos, especialmente em contextos amadores e experimentais. Sua configuração básica possui dois dipolos posicionados ortogonalmente e alimentados com defasagem de 90 graus, o que permite geração de polarização circular. Essa característica é benéfica para compensar variações na orientação do satélite durante a passagem orbital, ao reduzir perdas do sinal e atenuação atmosférica (Kiriş, 2025).

Figura 8 - Antenas Turnstile



Fonte: Chetvorno (Derivado De Krallis, K. Sv1xv), 2015.

Esse método por polarização demonstra eficiências para comunicações nas faixas VHF e UHF, visto que a falta de compatibilidade entre transmissor e receptor gera impactos na qualidade do sinal. A configuração simétrica das antenas proporciona uma cobertura hemisférica e de 360 graus, o que as torna adequadas para estações de recepção fixa (Kiriş, 2025).

Em estações terrestres de baixo custo, a utilização de antenas turnstile pode dispensar o uso de sistemas de rastreamento motorizado, uma vez que seu padrão de radiação hemisférico e omnidirecional apresentando um desempenho satisfatório quando utilizadas em diferentes ângulos de incidência. A simplicidade na estrutura e possibilidade de montagem com materiais mais acessíveis, aliadas à uma integração com receptores de baixo consumo, viabiliza sua adoção em projetos educacionais.

O desempenho da antena está condicionado a fatores construtivos, como ajuste adequado das dimensões dos dipolos às bandas desejadas, a adaptação de impedância da linha de transmissão, sendo geralmente padronizada em 50 ohms, a simetria da montagem. Esses fatores afetam diretamente a estabilidade e a eficácia da recepção de sinais, especialmente no que diz respeito a satélites de pequeno porte (Kiriş, 2025).

3.4.2 Integração da antena à infraestrutura da estação terrestre

Para assegurar o funcionamento eficiente dos sistemas que recebem sinais de satélites em LEO, é crucial que a antena seja corretamente integrada com os demais elementos da estação. A qualidade do enlace é fortemente afetada pela eficiência da cadeia de recepção, que inclui antenas, cabos, filtros e dispositivos receptores, especialmente para satélites que operam nas bandas VHF e UHF, como muitos CubeSats (Peralta, 2018; Sá Gomes; Ferreira Da Silva, 2024).

A eficácia da recepção é impactada pela posição e pela instalação da antena em relação ao ambiente que a cerca, afetando tanto a qualidade quanto a solidez do sinal. Para garantir uma linha de visada clara entre a antena e o satélite, é preciso evitar, sempre que possível, obstruções e interferências causadas por múltiplos caminhos. Para atenuar perdas associadas ao enlace, também é necessário manter a integridade elétrica do sistema, o que envolve a correta adaptação de impedância e o controle da relação sinal-ruído (Peralta et al., 2018).

Em cenários de recepção na qual os sinais são de baixa intensidade, como nas transmissões de satélites, é comum a utilização de equipamentos, como amplificadores de baixo ruído (LNAs) e filtros, visando aprimorar a qualidade do sinal. Esses amplificadores são utilizados para aprimorar a qualidade do sinal na fase inicial da recepção, reduzindo o impacto de possíveis perdas que podem ocorrer mais tarde. Além disso, os filtros tem uma função crucial ao eliminar interferências fora da faixa desejada, contribuindo para a preservação da integridade do sinal útil (Peralta et al., 2018).

Para otimizar o desempenho do sistema de receptor e detectar eventuais falhas que possam impactar sua eficiência, é recomendável a implementação de dispositivos de calibração, como os analisadores de VSWR, que verificam a compatibilidade de impedância entre os diversos componentes do sistema. Essa abordagem ajuda a maximizar a transferência de potência e a minimizar reflexões indesejadas na linha de transmissão.

Dessa forma, a integração dos componentes de recepção deve ser abordada de maneira sistêmica, considerando o posicionamento físico da antena, mas também a qualidade das interligações elétricas e a adoção de medidas de

preservação da integridade do sinal até a demodulação final (Peralta et al., 2018; Sá Gomes; Ferreira Da Silva, 2024).

3.4.3 Procedimentos básicos de verificação e calibração

A verificação e calibração das antenas utilizadas nas estações terrestres voltadas à recepção da LEO é uma etapa fundamental para garantir a eficiência do sistema. Essa prática visa garantir que a antena esteja funcionando de maneira esperada com a frequência desejada e com acoplamento apropriado à linha de transmissão, da mesma forma insignificante devido à desajuste (Peralta et al., 2018).

A avaliação da eficiência das antenas geralmente é realizada utilizando dispositivos de medição específicos, como analisadores de antena e analisadores de redes vetoriais (VNAs), que possibilitam a análise das características da antena, como correspondência de impedância entre os elementos do sistema - avaliada por meio da SWR, o nível de sinal refletido para a fonte e intervalo de frequências no qual a antena apresenta desempenho satisfatório. Essas medições permitem identificar variações que influenciem a transferência de energia entre a antena e o receptor (Kiriş, 2025).

Além disso, é fundamental avaliar o desempenho dos componentes como LNAs e filtros utilizados, assegurando que operem dentro dos parâmetros desejados e ideais, sem provocar o aumento do ruído de fundo ou distorções que comprometam a qualidade de sinal recebido (Peralta et al., 2018; Saravanakumar et al., 2018).

Para fins de manutenção e comparações futuras, recomenda-se a documentação sistemática das medições, incluindo registros gráficos e dados técnicos. Essa abordagem contribui para a estabilidade da operação da estação e para a identificação de degradações de desempenho ao longo do tempo (Saravanakumar et al., 2018).

4 - PROPOSTA

4.1 METODOLOGIA

Para cumprimento dos objetivos propostos, este trabalho é de natureza aplicada e experimental, com foco na implementação prática de duas estações terrestres semi-automatizadas para recepção de sinais transmitidos por CubeSats em órbita LEO. O projeto será conduzido por meio de duas frentes de desenvolvimento, cada uma voltada a uma rede colaborativa.

A primeira frente utilizará a rede SatNOGS, com recepção com RTL-SDR conectado a um Raspberry Pi, operando junto a antenas turnstile nas faixas VHF e UHF, onde será verificada a adequação das antenas existentes no IFSC-SJ. A segunda frente será voltada à rede TinyGS, utilizando o kit da placa Lilygo Q395-MESH T-BEAM AXP2101 433MHZ CH9102F, que integra junto o transceptor LoRa SX1278, assim como antena específica para operar na frequência 433 MHz, pertencente a faixa ISM.

A estrutura será montada com base em componentes de baixo custo já disponíveis no IFSC Câmpus São José. Cada frente será configurada com os softwares e firmwares recomendados por suas respectivas comunidades.

As etapas principais da metodologia incluem:

- Inspeção e atualização das antenas turnstile instaladas no IFSC-SJ;
- Configuração da recepção com uso do RTL-SDR e SatNOGS Client programado no Raspberry Pi;
- Instalação e configuração do firmware TinyGS na placa Lilygo Q395-MESH T-BEAM;
- Registro da estação nas plataformas SatNOGS e TinyGS;
- Seleção de satélites compatíveis com a infraestrutura disponível;
- Agendamento de passagens e recepção dos dados de telemetria;
- Análise comparativa dos dados coletados entre as duas frentes.

O projeto será conduzido com foco na simplicidade, reprodutibilidade e integração dos sistemas, buscando a viabilidade técnica e econômica com uso dessas plataformas em instituições de ensino.

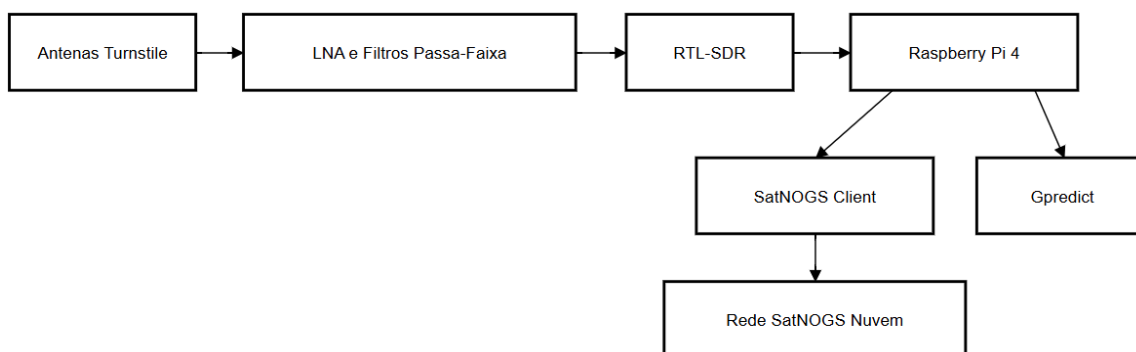
4.2 ESTRUTURA DA ESTAÇÃO TERRESTRE

4.2.1 SatNOGS

A primeira frente do projeto será baseada na rede SatNOGS, já apresentada na fundamentação teórica. Onde sua escolha se baseia na ~~automação~~ e ampla adoção por estações voltadas ao monitoramento de CubeSats. A estrutura será voltada à recepção semi-automatizada dos sinais nas faixas VHF e UHF, focando na utilização de componentes de baixo custo e *softwares open source*.

A arquitetura adotada contará com um receptor RTL-SDR, conectado ao Raspberry Pi, que será responsável pelo controle da estação e envio dos dados para rede SatNOGS. O conjunto será integrado nas antenas turnstile VHF/UHF já instaladas no IFSC - câmpus São José, que oferecem boa cobertura e compatibilidade com os modos de transmissão utilizados pelos satélites.

Figura 9 - Diagrama de funcionamento estação SatNOGS



Fonte: Elaborado pelo autor.

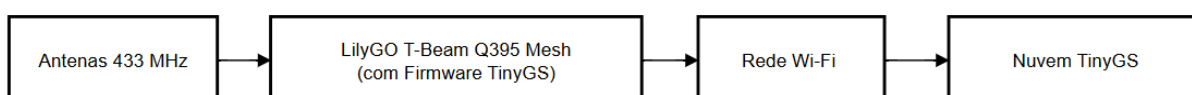
Durante os testes, a estação será registrada na plataforma SatNOGS e utilizada para a recepção de sinais de CubeSats compatíveis com as especificações da estação. Os dados coletados de telemetria serão utilizados na análise de desempenho da estação.

4.2.2 TinyGS

A segunda frente do projeto será dedicada à rede TinyGS, voltada para recepção de pacotes LoRa, transmitidos por satélites CubeSats. Essa rede se destaca pela simplicidade de operação, baixo custo dos equipamentos e integração.

A estação será baseada na placa LilyGO T-Beam Q395 Mesh 433 MHz, integrada por um microcontrolador ESP32, um transceptor LoRa SX1278 e gerenciador de energia AXP2101, oferecendo uma solução compacta de baixo consumo para recepção de dados das missões espaciais com modulação LoRa. A recepção será realizada na faixa ISM de 433 MHz, conforme os resultados obtidos, o envio dos dados decodificados será feito automaticamente via rede Wi-Fi para os servidores da plataforma TinyGS.

Figura 10 - Diagrama de funcionamento estação TinyGS



Fonte: Elaborado pelo autor.

Durante a fase experimental, a estação será registrada no TinyGS e configurada conforme os parâmetros recomendados. A recepção vai ser monitorada para coleta de pacotes válidos e de satélites previamente selecionados. As informações decodificadas vão incluir telemetria, identificadores de origem, metadados de recepção e demais dados úteis à análise comparativa com a frente SatNOGS, considerando qualidade e praticidade operacional.

4.3 SELEÇÃO DE SATÉLITES E PLANEJAMENTO DAS PASSAGENS

A seleção de três a cinco satélites a serem monitorados vai ser baseada em critérios técnicos, garantindo compatibilidade com a infraestrutura das duas estações do projeto. Serão priorizados satélites em LEO com telemetria aberta, que estejam ativos e transmitam nas faixas e protocolos compatíveis com os sistemas SatNOGS e TinyGS. Os requisitos específicos para a seleção final incluem:

- Frequência de transmissão compatível com os equipamentos disponíveis;
- Protocolo e modulação reconhecidos pelas plataformas SatNOGS ou TinyGS;

- Documentação pública ou comunitária disponível para se for preciso apoio técnico;
- Regularidade e previsão das passagens sobre a cobertura do IFSC - Câmpus São José;
- Existência de dados de telemetria ou pacotes úteis para análise de desempenho.

O planejamento das passagens será realizado com auxílio do Gpredict, que permite rastreamento e a previsão de janelas de visada com base nos TLE. Essas janelas vão ser utilizadas para programar a operação da estação SatNOGS e acompanhar a recepção dos pacotes por ambas as estações, garantindo sincronização com os períodos em que os satélites estiverem com visada.

4.4 COLETA E ANÁLISE DE DADOS

A coleta dos dados será realizada por meio das duas estações terrestres, durante as passagens com visibilidade aos satélites previamente selecionados. O objetivo principal será verificar a capacidade das estações em receber sinais válidos, com foco na obtenção da telemetria básica, pacotes LoRa decodificados ou registros espectrais.

No SatNOGS, os dados esperados incluem espectrogramas, registros de sinal, logs de decodificação e pacotes de telemetria recebidos durante as janelas previamente agendadas. Esses dados serão acessados pela interface web do SatNOGS ou se for o caso, extraídos via terminal a partir do cliente instalado no Raspberry Pi.

No TinyGS, a coleta ocorrerá de forma automática por meio do firmware oficial, que envia os pacotes LoRa recebidos direto para a nuvem da plataforma. Será feito o acompanhamento dos logs na interface online da rede TinyGS, incluindo identificação do satélite, intensidade do sinal, timestamp da recepção e conteúdo dos pacotes recebidos.

A análise será básica e descritiva, considerando os seguintes aspectos:

- Frequência e estabilidade das recepções;
- Quantidade e tipo de dados válidos recebidos por cada estação;
- Identificação dos satélites decodificados com sucesso;

- Qualidade do sinal (como RSSI ou presença de ruído);
- Eventuais falhas ou limitações observadas durante o processo.

Caso a recepção da telemetria seja bem sucedida em uma ou ambas as estações, será feito um levantamento preliminar da utilidade dos dados e da viabilidade de seu uso, assim como a reprodução da estação, sempre respeitando os limites do tempo disponível e da infraestrutura acessível no IFSC-SJ.

4.5 RESULTADOS ESPERADOS

Ao final do projeto, espera-se que a estação terrestre esteja parcialmente ou totalmente funcional em suas duas frentes, com capacidade de recepção dos sinais de satélites em operação na órbita LEO. Os principais resultados esperados são:

- Instalação e funcionamento básico da estação SatNOGS com RTL-SDR, Raspberry Pi e antenas turnstile;
- Funcionamento básico da estação TinyGS com a placa LilyGO T-Beam Q395 Mesh e envio automático de pacotes para a nuvem da plataforma;
- Registro válido das estações nas respectivas redes colaborativas e integração com interfaces web;
- Recepção de sinal dos satélites compatíveis, com obtenção dos registros de seu espectro, pacotes LoRa ou dados de telemetria básico;
- Análise descritiva dos dados recebidos e identificação de limitações ou desafios encontrados;
- Produção de documentação técnica e didática que possa servir de base para replicações do projeto em outras instituições de ensino.

Mesmo que nem todas as recepções ocorram conforme o previsto, o projeto pretende demonstrar na prática, a viabilidade de implementar estações com baixo custo para fins educativos e experimentais, reforçando o potencial pedagógico nas redes SatNOGS e TinyGS em ambientes acadêmicos.

4.6 CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO

O cronograma de execução do projeto será distribuído ao longo do segundo semestre letivo, abrangendo as fases de planejamento, implementação, testes, coleta e análise de dados, resultando na apresentação do trabalho ao final.

Quadro 1: Cronograma de atividades

Etapas	Mês				
	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
1	X				
2		X			
3			X		
4				X	
5				X	X

Etapas:

1. Revisão bibliográfica complementar do projeto; Inspeção e atualização das antenas; Início da montagem e configuração da Frente SatNOGS.
2. Finalização da configuração e testes iniciais da Frente SatNOGS; Montagem e configuração da Frente TinyGS; Validação da antena para TinyGS; Registro das estações nas plataformas.
3. Testes e ajustes de ambas as estações; Seleção final de satélites; Início da coleta de dados de telemetria; Início da redação das primeiras seções do TCC.
4. Coleta intensiva de dados; Análise comparativa dos dados coletados; Redação das seções de resultados e discussão do TCC; Elaboração da documentação técnica e didática.

Finalização da análise de dados e redação final do TCC; Revisão geral do documento e preparação da apresentação.

REFERÊNCIAS

ALESHKO, Roman; GORDEYCHIK, Alexander; BEREZOVSKY, Vladimir; SHOSHINA, Ksenia. *Development of automated system for receiving and analysing telemetry data from small spacecrafts*. E3S Web of Conferences, [S.l.], v. 583, p. 04010, 2024. DOI: [10.1051/e3sconf/202458304010](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202458304010).

BOETTCHER, M. A.; BUTT, B. M.; KLINKNER, S. *Low-cost approach for a software-defined radio based ground station receiver for CCSDS standard compliant S-band satellite communications*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, [S.l.], v. 152, n. 1, p. 012033, out. 2016. DOI: [10.1088/1757-899X/152/1/012033](https://doi.org/10.1088/1757-899X/152/1/012033).

BURGER, Eduardo; BOHRER, Rubens; COSTA, Lucas; HOFFMANN, Cleber; ZAMBRANO, Hernan. *Development and analysis of a Brazilian CubeSat structure*. In: Anais do Congresso, 2013.

CABRAL, Yngrid; LINS JÚNIOR, Paulo; ROCHA, Jerônimo. *Proposta de arcabouço experimental para rede de sensoriamento espectral usando rádio definido por software*. Revista Principia – Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB, v. 1, abr. 2019. DOI: 10.18265/1517-03062015v1n44p88-99.

CHEN, Chi-Yuan; TSENG, Fan-Hsun; CHANG, Kai-Di; CHAO, Han-Chieh; CHEN, Jiann-Liang. *Reconfigurable Software Defined Radio and its Applications*. **Journal of Applied Science and Engineering**, v. 13, n. 1, 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/265929567_Reconfigurable_Software_Defined_Radio_and_Its_Applications. Acesso em: 12 jul. 2025.

CHETVORNO. *Turnstile antenna*. Derivado de: KRALLIS, K. (SV1XV). Imagem. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SatelliteAntenna-137MHz_closeup.jpg. Acesso em: 12 jul. 2025.

CROISSANT, Kevin; WHITE, Dan. *An updated overview of the Satellite Networked Open Ground Stations (SatNOGS) project*. Valparaíso University; Libre Space Foundation, 2023. Disponível em: <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=5331&context=smallsat>. Acesso em: 12 jul. 2025.

FLORES, Rodrigo D.; SAATKAMP, Eno D.; MACHADO, R. *Protótipo de uma estação receptora de imagens meteorológicas utilizando GNU Radio e RTL-SDR*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS – SBrT, 35., 2017. Anais [...]. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/336003330_Prototipo_de_uma_estacao_receptora_de_imagens_meteorologicas_utilizando_GNU_Radio_e_RTL-SDR. Acesso em: 12 jul. 2025.

HEIDT, Hank; PUIG-SUARI, Jordi; MOORE, Augustus S.; NAKASUKA, Shinichi; TWIGGS, Robert J. *CubeSat: A new generation of picosatellite for education and industry low-cost space experimentation*. In: ANNUAL AIAA/USU CONFERENCE ON SMALL SATELLITES, 14., 2000, Logan, UT, USA. Anais [...]. Disponível em: <https://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2000/All2000/32/>. Acesso em: 12 jul. 2025.

KHOUEANE, Boulanouar; BELBEKRI, Nasreddine; BENMANSOUR, J. Eddine. *An overview of software-defined radio technology in CubeSat communications*. Algerian

Journal of Signals and Systems, Boumerdes, v. 8, n. 2, p. 55–58, dez. 2023. DOI: [10.51485/ajss.v8i2.189](https://doi.org/10.51485/ajss.v8i2.189).

KIRIŞ, Orçun. *An investigation on installed performances of VHF and UHF turnstile antennas on 3U CubeSat platforms*. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, v. 14, n. 3, 2025. Disponível em: <https://dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh/issue/91975/1659981>. Acesso em: 12 jul. 2025.

KREBS, Gunter D. *FossaSat 1, 1b*. Gunter's Space Page, 2025. Disponível em: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/fossasat-1.htm. Acesso em: 12 jul. 2025.

HÖYHTYÄ, Marko; BOUMARD, Sandrine; YASTREBOVA, Anastasia; JÄRVENSIVU, Pertti; KIVIRANTA, Markku; ANTTONEN, Antti. *Sustainable satellite communications in the 6G era: A European view for multi-layer systems and space safety*. IEEE Access, v. PP, p. 1, jan. 2022. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3206862.

LØFALDLI, André. *Design of ground station receiver for Kongsberg Satellite Services based on software defined radio*. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Telecomunicações) – Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2016. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11250/2433735>. Acesso em: 12 jul. 2025.

LYERLY, Albert E.; PACHOWICZ, Peter W. Antennas for academic CubeSats: VHF thru S-Band, what, how and why. In: SMALL SATELLITE CONFERENCE, 34., 2020, Logan, UT, USA. Anais [...]. Disponível em: <https://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2020/all2020/50/>. Acesso em: 12 jul. 2025.

MELO, Wheidima; VALENTE, Victor; JUNIOR, Waldir; FILHO, Eddie; FERREIRA, Adolpho; RODRIGUES, Rebeca; JESUS, Anderson. *Sistema automático de apontamento de antena para receptores satelitais nas bandas C e Ku*. In: Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT), 2017. DOI: 10.14209/sbrt.2017.34.

NASA CUBESAT LAUNCH INITIATIVE. *CubeSat 101: basic concepts and processes for first-time CubeSat developers*. California Polytechnic State University, CubeSat Systems Engineer Lab, 2017. Disponível em: https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2017/03/nasa_csli_cubesat_101_508.pdf. Acesso em: 12 jul. 2025.

NIETO YLL, Daniel. *Doppler shift compensation strategies for LEO satellite communication systems*. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia de Telecomunicações) – Universitat Politècnica de Catalunya, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Telecomunicació de Barcelona, Departament de Teoria del Senyal i Comunicacions, Barcelona, 2018. Disponível em: <http://hdl.handle.net/2117/123510>. Acesso em: 12 jul. 2025.

NOAA. *NOAA K (15) prior to launch*. Imagem. [s.d.]. Disponível em: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:NOAA_K_\(15\)_prior_to_launch.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:NOAA_K_(15)_prior_to_launch.jpg). Acesso em: 12 jul. 2025.

PERALTA, David Julian M.; SANTOS, Douglas S. dos; TIKAMI, Auro; SANTOS, Walter A. dos; PEREIRA, Edson W. R. *Satellite telemetry and image reception with software defined radio applied to space outreach projects in Brazil*. Anais da Academia Brasileira de Ciências, Rio de Janeiro, v. 90, n. 3, p. 3175–3184, jul./set. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/0001-3765201820170955>.

PUIG-SUARI, J.; TURNER, C.; AHLGREN, W. Development of the standard CubeSat deployer and a CubeSat class picosatellite. In: IEEE AEROSPACE CONFERENCE, 2001. Anais [...]. Piscataway, NJ: IEEE, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/AERO.2001.931726>. Acesso em: 12 jul. 2025.

RUIZ-SARRIO, Jose E.; MANI, Karthik V.; MORRIS, Brenna; TOPPUTO, Francesco. *Flexible electrical power system for interplanetary and lunar CubeSats*. 2018. Tese (Doutorado) 2018.

SÁ GOMES, João; FERREIRA DA SILVA, Alexandre. *TinyGS vs. SatNOGS: A comparative analysis of open-source satellite ground station networks*. Telecom, v. 5, n. 1, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2673-4001/5/1/12>. Acesso em: 12 jul. 2025.

SARAVANAKUMAR, A.; KAVIYARASU, A.; MANIKANDAN, U. *Design and development of low cost ground receiving station for LEO satellite operations*. International Journal of Pure and Applied Mathematics, v. 119, n. 12, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/325952364_Design_and_development_of_low_cost_ground_receiving_station_for_LEO_satellite_operations. Acesso em: 12 jul. 2025.

THE CUBESAT PROGRAM, California Polytechnic State University. *CubeSat Design Specification, Rev. 14.1*. San Luis Obispo: California Polytechnic State University, 2022. Disponível em: https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/62193b7fc9e72e0053f00910/1645820809779/CDS+REV14_1+2022-02-09.pdf. Acesso em: 12 jul. 2025.

TSURUDA, Yoshihiro. *Introduction to CubeSat Communication System*. Teikyo University, 2021. Disponível em: https://www.unoosa.org/documents/pdf/psa/access2space4all/KiboCUBE/AcademySession2/On-demand_Pre-recorded_Lectures/KiboCUBE_Academy_2021_OPL09.pdf. Acesso em: 12 jul. 2025.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. NOAA-15 – *Observation Satellite*. [s.d.]. Disponível em: https://space.oscar.wmo.int/satellites/view/noaa_15. Acesso em: 12 jul. 2025.