

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

NELSON ESPINDOLA ALVES

**Implantação de um segmento terrestre no IFSC campus São José
para monitoramento de CubeSats e nanossatélites em órbita
terrestre baixa**

São José - SC

agosto/2017

**IMPLANTAÇÃO DE UM SEGMENTO TERRESTRE NO IFSC CAMPUS SÃO
JOSÉ PARA MONITORAMENTO DE CUBESATS E NANOSSATÉLITES EM
ÓRBITA TERRESTRE BAIXA**

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

Orientador: Ramon Mayor Martins

Coorientador: Fabio Alexandre de Souza

São José - SC

agosto/2017

Nelson Espindola Alves

Implantação de um segmento terrestre no IFSC campus São José para monitoramento de CubeSats e nanossatélites em órbita terrestre baixa/ Nelson Espindola Alves. – São José - SC, agosto/2017-41 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Ramon Mayor Martins

Monografia (Graduação) – Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC

Campus São José

Engenharia de Telecomunicações, agosto/2017.

1. Palavra-chave1. 2. Palavra-chave2. 2. Palavra-chave3. I. Orientador. II. Instituto Federal de Santa Catarina. III. Campus São José. IV. Título

NELSON ESPINDOLA ALVES

IMPLANTAÇÃO DE UM SEGMENTO TERRESTRE NO IFSC CAMPUS SÃO JOSÉ PARA MONITORAMENTO DE CUBESATS E NANOSSATÉLITES EM ÓRBITA TERRESTRE BAIXA

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro de Telecomunicações, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

São José - SC, 15 de outubro de 2015:

Ramon Mayor Martins, Dr.
Orientador
Instituto Federal de Santa Catarina

Professor, Dr.
Instituto X

Professor
Instituto Y

Professor
Instituto Z

*Este trabalho é dedicado às crianças adultas que,
quando pequenas, sonharam em se tornar cientistas.*

RESUMO

O segmento terrestre é parte essencial no projeto de um satélite. Responsável pela aquisição, processamento e armazenamento dos dados de um satélite, fornece ao operador o enlace com o segmento espacial para recepção de dados de telemetria, rastreamento e carga útil bem como transmissão de comandos. Além disso, com a disponibilidade de sistemas de rádio definido por software, surgem novas possibilidades, reduzindo significativamente o custo de um sistema sem sacrificar o desempenho final, tornando-os mais flexível, uma vez que oferecem uma maneira simples de testar, desenvolver e empregar variados protocolos, permitindo que o segmento terrestre possa ser constantemente atualizado e melhorado. Sendo assim, este trabalho trata do projeto e implementação de um segmento terrestre capaz de realizar a aquisição, demodulação, sincronização e decodificação dos sinais de recepção dos principais CubeSats presentes em órbita terrestre baixa através de um sistema baseado em rádio definido por software.

Palavras-chave: segmento terrestre. CubeSat. LEO. SDR. protocolo de comunicação

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Tipos de CubeSats e relação percentual da quantidade para cada respectivo tamanho. Fonte: (Villela et al., 2019)	20
Figura 2 – P-POD e sua estrutura interna. (UNIVERSITY, 2014)	21
Figura 3 – Categorias de órbitas terrestres(a) e quantidade de segmentos espacial em cada uma dessas órbitas(b). Fonte: UNOOSA (United Nations Office for Outer Space Affairs)	21
Figura 4 – Relação de vida útil de CubeSat e sua altitude em órbita. Fonte: https://www.nanosats.eu/	22
Figura 5 – Desvio Doppler relativo ao deslocamento do satélite(a) e desvio Doppler relativo à diferentes faixas de frequência(b). Fonte: (Latachi et al., 2017)	23
Figura 6 – Subsistemas de um CubeSat. Fonte: (EOPORTAL, 2016)	24
Figura 7 – Espectro radioelétrico segundo convenções da ITU e IEEE. Fonte: (NASA, 2015)	25
Figura 8 – Frequências utilizadas em CubeSats. Fonte: https://www.nanosats.eu/	25
Figura 9 – Diferentes modulações utilizadas em satélites. Fonte: db.satnogs.org/statistics	26
Figura 10 – Estrutura do quadro (U) Não numerado e (S) Supervisão(a) e estrutura quadro de (I) Informação(b)	27
Figura 11 – Nanossatélites brasileiros e tecnologias utilizadas. Fonte: (ORDUY et al., 2016)	28
Figura 12 – Estrutura de um bloco NGHAM. Fonte: (SKAGMO, 2015)	28
Figura 13 – Diagrama de radiação de antenas omnidirecionais(a) e direcional(b)	29
Figura 14 – Antena Turnstile(a) e seu diagrama de radiação(b)	30
Figura 15 – Antena Quadrifilar Helicoidal(a) e seu diagrama de radiação(b)	31
Figura 16 – Antena Yagi-uda(a) e seu respectivo diagrama de radiação(b)	31
Figura 17 – Rotor da marca Yaesu(a) e antena Yagi-Uda com dipolo cruzado acoplado em um rotor(b) Fonte: Autor desconhecido	32
Figura 18 – Diagrama de bloco representam a função do RTL-SDR na recepção de pacotes	32
Figura 19 – Estrutura básica do SDR Fonte: (Garcia Reis et al., 2012)	33
Figura 20 – Diagrama de bloco dos módulos necessário para conclusão da proposta	35
Figura 21 – Diagrama de bloco do funcionamento de um <i>diplexer</i> . Fonte: Próprio autor	36
Figura 22 – Raspberry. Fonte: https://www.raspberrypi.org/	36
Figura 23 – Diagrama das diferentes formas de construção do segmento terrestre. Fonte: wiki.satnogs.org	37
Figura 24 – Diagrama das diferentes formas de construção do segmento terrestre	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos satélite conforme sua massa. Fonte: Autor Próprio	19
--	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Motivação	16
1.2	Organização do texto	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	CubeSats e Nanossatélites	19
2.1.1	Órbita terrestre baixa	21
2.1.1.1	Efeito Doppler	22
2.1.1.2	Efeitos ionosféricos	23
2.1.2	Subsistemas de comunicação em CubeSats	24
2.1.3	Protocolos de comunicação	26
2.1.3.1	AX.25	27
2.1.3.2	NGHam	27
2.2	Segmento terrestre	28
2.2.1	Antena	29
2.2.1.1	Turnstile	30
2.2.1.2	Quadrifilar Helicoidal	31
2.2.1.3	Yagi-Uda	31
2.2.2	RTL-SDR	32
2.3	Software Defined Radio (SDR)	32
3	PROPOSTA	35
3.1	Metodologia	35
3.1.1	Antenas elencadas	35
3.1.1.1	Receptor e auxiliares	35
3.1.2	SatNOGS	36
3.1.3	Ambiente GNU Radio	37
3.2	Cronograma	38
	REFERÊNCIAS	39

1 INTRODUÇÃO

Segundo a (NASA, 2017a), em 1957, o Sputnik 1, idealizado pela antiga União Soviética (URSS), foi o primeiro satélite artificial a entrar em órbita com a Terra, dando início à era espacial e propulsionando os investimentos em pesquisas espaciais. Quatro anos após, um grupo de operadores de rádio amadores do Projeto OSCAR, construíram e lançaram em órbita o primeiro satélite amador, o OSCAR I. Pesando por volta de 4,5 kg e carregando um pequeno transmissor que permitia que estações terrestres medissem a propagação através da ionosfera e sua temperatura interna, a missão foi considerada um sucesso, durando 22 dias em órbita baixa antes de se desintegrar ao entrar em contato com a atmosfera terrestre (BAKER, 1994).

Os satélites recebem nomenclaturas diferentes em relação ao seu peso. Um dos padrões de baixo custo mais populares é o padrão CubeSat. Um CubeSat é um projeto que fornece uma padronização nas características de forma, tamanho e peso de uma satélite com o intuito de reduzir custos, tempo de desenvolvimento e aumentar a flexibilidade da produção em massa de componentes oferecendo peças prontas para uso (NASA, 2017b), além de serem de extrema importância para o desenvolvimento da ciência tecnológica espacial, podendo ser utilizados em diversas categorias de missões espaciais. "O uso de CubeSats tem sido muito popular entre as universidades e fundações científicas, atraindo os alunos para a ciência espacial e lançando novas experiências em órbita" (NUGENT et al., 2008).

Os primeiros CubeSats continham transmissores simples de *beacon*¹ ou podiam fazer downlink apenas de uma quantidade limitada de dados. Com passar dos anos o cenário segue em forte crescente, com inúmeras missões científicas e vários sistemas comerciais sendo projetados. Agências espaciais como a NASA² e Jaxa³ bem como a empresa estadunidense de sistemas espaciais, a SpaceX⁴, financiam e incentivam os esforços relacionados à pesquisas de tecnologias na área. A NASA possui uma iniciativa, nomeada de *CubeSat Launch Initiative* (CSLI) que prevê a oportunidade de lançamento de CubeSats como carga comum, em futuros lançamentos, sendo levados para a Estação Espacial Internacional (ISS) e inseridos em órbita de lá. Todos os custos da operação de lançamento é custeado pela própria agência em troca de relatórios dos resultados da missão na qual o CubeSat é enviado ao espaço (NASA, 2017). Além disso, em (CGEE., 2018), um levantamento do Observatório de Tecnologias Espaciais do Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), organização não governamental brasileira supervisionada pelo Ministério de Ciência e Tecnologia, estima que, até 2021, serão lançados mil CubeSats por ano, mundialmente.

Com o envolvimento de grandes empresas privadas e agências espaciais, nota-se a valorização da utilização dos CubeSats. CubeSats confiáveis e de alto desempenho são exequíveis e podem ser usado em diversas aplicações, atendendo demandas para sensoriamento remoto, educação, ciências, desenvolvimento de tecnologias e comunicação. Entretanto, para estabelecer a comunicação com o segmento espacial durante seu ciclo de vida no espaço, é fundamental a construção de um segmento terrestre eficiente já que o sinal recebido está sujeito a muitas condições degradantes, como atenuação devido à ruído, fenômenos atmosféricos e efeitos de deslocamento Doppler. O segmento terrestre é usado para recepção de telemetria, rastreamento, aquisição de dados e transmissão de comandos para o segmento espacial.

Um dos segmentos terrestres mais relevantes é a NASA Deep Space Network (DSN). Se trata de uma rede mundial de segmentos terrestres poderoso para comandar, rastrear e monitorar a saúde

¹ disparos de informação transmitido periodicamente

² <http://www.nasa.gov>

³ <http://global.jaxa.jp/>

⁴ <http://www.spacex.com>

e a segurança de espaçonaves distantes, localizada nos Estados Unidos (Califórnia), Espanha (Madri) e Austrália (Canberra). O motivo da localização dessas instalações é totalmente estratégico, mantendo monitoramento constante com seus satélites, podendo ser considerado o maior centro de telecomunicações do mundo (NASA-JET, 2016). Outro exemplo que demonstra a relevância de um segmento terrestre para as comunicações espaciais é visto em (BORINI, 2018). A Amazon Web Services (AWS) anunciou o lançamento de uma nova ferramenta que disponibiliza *downloads* de dados satelitais por estações terrestres espalhadas por todo o mundo. O serviço está sendo usado para uma grande variedade de aplicações como previsão do tempo, imagens de superfície e comunicações, permitindo o acesso à informação de uma forma fácil e econômica além de já permitir a integração da aplicação com os demais serviços em nuvem, disponibilizados pela AWS.

Além disso, com o surgimento da tecnologia denominada SDR (Software Defined Radio), elevou-se o poder de se construir um segmento terrestre de recepção utilizando equipamentos de baixo custo, contendo circuitos mínimos para o funcionamento do rádio, deixando a parte complexa a cargo do software. Portanto, o SDR é uma área chave para realizar várias implementações de software, permitindo um sistema de comunicação adaptável e reconfigurável sem alterar nenhum dispositivo ou recurso de hardware oferecendo flexibilidade e autonomia (Maheshwarappa; Bridges, 2014).

Enquanto isso no Brasil, o desenvolvimento de CubeSats toma proporção gradativa, recebendo participações diretas de instituições universitárias espalhadas pelo país, como INPE(Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), ITA(Instituto Tecnológico de Aeronáutica), UFSC(Universidade Federal de Santa Catarina), entre outros. Embora seja um número pequeno e o Brasil não possuir patentes referentes a CubeSats e nem empresas dedicadas ao desenvolvimento na área, o cenário nacional é promissor. Desde 2014, o Brasil lançou quatro nanossatélites, O primeiro deles em 2014, o Nanosat Br1 é um CubeSat de 1U do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe) enviado para teste de circuitos integrados projetados no Brasil e estudo da Anomalia Magnética do Atlântico Sul. Em 2015, o AESP-14 foi o segundo CubeSat brasileiro a ser lançado. No entanto, apresentou uma falha no sistema que impediu o seu funcionamento. O terceiro da lista foi o CubeSat Serpens do tipo 3U, operando até início de 2016 (Vilela; Brandão; Leonardi, 2016). O último é o ITASAT-1, um CubeSat experimental de 6U, lançado em órbita com cinco funções, com o intuito de testar equipamentos de produção brasileira (ITASAT-1, 2015). O ITASAT-1 junto com o Nanosat Br1 são os dois CubeSats brasileiros ainda ativos em órbita. Outros CubeSats brasileiros estão em desenvolvimento e deverão ser colocados em órbita em breve.

Com base nessa introdução e visto a grande evolução e interesse de universidades, da comunidade radioamadora, organizações governamentais e empresas privadas na utilização de CubeSats, o objetivo deste projeto é realizar a construção de um segmento terrestre no Instituto Federal de Santa Catarina, campus São José para aquisição, demodulação e decodificação de dados de telemetria e rastreamento dos principais nanossatélites e CubeSats ativos em órbita, podendo contribuir com os resultados que serão obtidos para a área de comunicação espacial.

1.1 Motivação

O mercado espacial global evoluiu e cresceu na última década. De uma avaliação de US \$ 176 bilhões em 2006, o mercado espacial global se expandiu para uma estimativa superior a US \$ 345 bilhões em 2018. Além disso, cerca de 50 nações têm orçamentos espaciais governamentais, nove acima de US \$ 1 bilhão e quase 20 abaixo de US \$ 100 milhões (BRYCE, 2016) Em 2018, com uma estimativa receita anual de US \$ 64,4 milhões e valor superior US \$ 1 bilhão, a Planet opera atualmente uma frota de mais de 175 satélites e emprega mais de 470 pessoas. (ROBINSON et al., 2015).

Dos módulos necessários para estabelecer a comunicação formar a missão espaciais, um dos mais

notáveis é o segmento terrestre. Com uma receita de US \$ 119,8 bilhões, os serviços terrestres representam uma significativa fatia de 34% da indústria espacial (JEAN-MARIE, 2018). O Desenvolvimento Econômico do Espaço destaca os estudos de caso de parcerias público-privadas que estão levando a uma nova economia na órbita baixa da Terra (LEO). CubeSats, nanoSats e Microsats são uma área de tecnologia disruptiva emergente com uma ampla gama de aplicações em comunicações RF. (ROBINSON et al., 2015). No entanto, conforme (ORDUY et al., 2016), não há um esforço significativo em projetos e pesquisas no segmento terrestre para nanossatélites na América Latina visto a grande necessidade da inclusão de tecnologias de comunicação emergentes nesses equipamentos.

Portanto, a principal motivação para a realização deste projeto é contribuir para a educação de estudantes em tecnologias e engenharia de sistemas espaciais realizando um caso de estudo das tecnologias de comunicações atuais utilizadas em nanossatélites e CubeSats apresentando uma infraestrutura de baixo para recepção desses sinais através do uso de Rádio Definido por Software(SDR). Essa motivação impacta na capacitação técnica dos estudantes e também na estimulação do programa de estudos espaciais na busca do estado da arte para a comunicação RF.

1.2 Organização do texto

O texto está organizado da seguinte forma: Primeiramente é apresentada uma abordagem conceitual sobre os principais módulos presentes em uma missão envolvendo nanossatélites e CubeSats. Esses módulos são separados em segmento espacial e terrestre. No segmento espacial é demonstrado um panorama da atual situação da órbita explorada por essa tecnologia, um estudo das tecnologias utilizadas por nanossatélites e CubeSats, suas funções e contribuições. Em seguida, no segmento terrestre apresenta os principais componentes para estabelecer a comunicação com o segmento espacial.

Na metodologia é demonstrado quais as aplicações e equipamentos são utilizados para formar o sistema, relacionando-as com os conceitos utilizados na fundamentação.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CubeSats e Nanossatélites

Os satélites artificiais possuem características e aplicações diversas, porém sua classificação é dada conforme sua massa. Os satélites com mais de 1000 kg são classificados como grandes, entre 500 e 1000 kg como médios e abaixo de 500 kg como pequenos, este dividindo-se em sub-grupos que se enquadram nessa categoria (Tabela 1). (Segundo Academia Internacional de Astronáutica (IAA)), O sub-grupo nanossatélite é o termo designado aos satélites pequenos com massa entre 1 e 10 kg e são geralmente encontrados em órbita terrestre baixa. Os nanossatélites revolucionaram uma nova era para a engenharia aeroespacial, oferecendo muitas vantagens sobre os satélites grandes e convencionais, incluindo desenvolvimento simplificado, facilidade de construção e testes, além não exigir o custo de um lançamento dedicado que é necessário para um satélite maior, podendo ser facilmente levado como carga adicional de um veículo espacial devido ao seu pouco volume, portanto, colocá-los em órbita é mais fácil e menos arriscado.

Seu baixo custo não implica que sejam menos confiáveis. Com o uso de metodologias apropriadas nas fases de desenvolvimento, o sucesso na missão pode ser alcançado. Com a revolução da microeletrônica, os nanossatélites estão se tornando tão capazes quanto aos satélites maiores para certas aplicações. Outra grande vantagem, é a criação de constelações, empregando inúmeros nanossatélites que passam a atuar como nós da rede, permitindo a interconexão no espaço e a aquisição de dados em múltiplos pontos do globo terrestre. As constelações de nanossatélites, além de oferecerem redundância e robustez, aumentam a vida útil da missão, já que os mesmos podem ser renovados em caso de queda ou perda de comunicação, não comprometendo totalmente a missão.

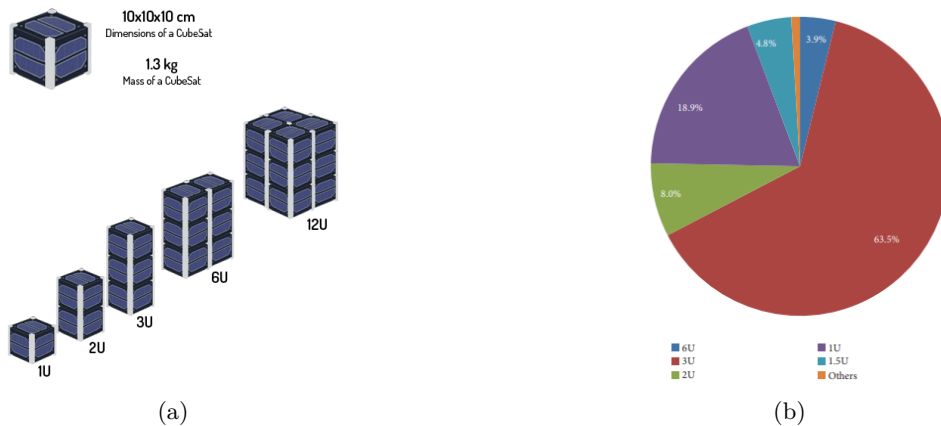
Tabela 1 – Classificação dos satélite conforme sua massa. Fonte: Autor Próprio

Categoria	Massa [kg]
Grande	≥ 1000
Médios	500-1000
Pequeno	≤ 500
Mini	100-500
Micro	10-100
Nano	1-10
Pico	0,1-1
Femto	0,01-0,1

O CubeSat faz parte da categoria de nanossatélites, porém, projetados para padrões específicos de dimensão, formato e peso. A motivação inicial do projeto CubeSat era facilitar o acesso às tecnologias espaciais para universidades, dando oportunidades à alunos de participar de todo ciclo de um projeto espacial, passando pelas fases de estudos, projeção, construção e testes finais. No entanto, o custo e o tempo de implementação atraiu empresas e agências espaciais, reaquecendo o mercado espacial, promovendo o desenvolvimento tecnológico da área espacial e tornando o projeto uma solução altamente competitiva, representando 87% de todos os pequenos satélites lançados até 2017 conforme (NASA, 2019). Baseados no padrão de unidade, referente a 1U, o que equivale a um cubo de 10cm, podem ser colocadas em conjunto para formar configurações maiores, como 2U, 3U, 6U e assim por diante, conforme ??, apresentando uma predominância de CubeSats com configuração 3U. A padronização diminui a complexidade do projeto e possibilita a produção em massa de componentes eletrônicos e de estrutura, conhecidos por COTS (cheap

off-the-shelf components) ou componentes de prateleira, reduzindo custos e tempo de desenvolvimento, estimando que o processo para projetar, construir, testar e lançar um CubeSat em órbita possa levar entre 9 a 18 meses (NASA, 2017).

Figura 1 – Tipos de CubeSats e relação percentual da quantidade para cada respectivo tamanho. Fonte: (Villela et al., 2019)

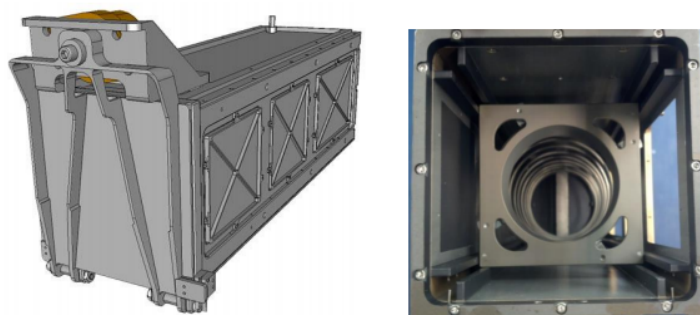


A normatização e padronização para lançamento segue um conjunto de especificações nomeado de CubeSat Design Specification (CDS), estabelecendo requisitos mínimos de projeto e de testes realizados para que o projeto esteja em conformidade e possa garantir operação segura. Além disso, foram instituídas normas ISO entre organizações governamentais e não-governamentais espalhadas pelo mundo com o intuito de avaliar, qualificar e distinguir os diversos tipos de pequenos satélites, incluindo os CubeSats. O documento impõe requisitos de sistemas com o propósito de melhorar a confiabilidade bem como motivar o comércio mundial de componentes para pequenos satélites servindo como uma diretriz de testes para futuros fabricantes do segmento (??). A padronização diminui a complexidade, aumentando a confiabilidade do projeto, e possibilita a produção em massa de componentes eletrônicos e de estrutura, reduzindo custos e tempo de desenvolvimento, estimando que o processo para projetar, construir, testar e lançar um CubeSat em órbita possa levar entre 9 à 18 meses (NASA, 2017).

Finalizado os testes e recebida as devidas licenças, o CubeSat está preparado para ser lançado. Como citado anteriormente, por terem volume reduzido, os CubeSats possibilitam ser lançados como carga secundária. Como exemplo, a NASA a iniciativa CSLI oferecendo oportunidade para que os CubeSats qualificados sejam levados à órbita em lançamentos futuros que tenham excesso de capacidade ou como implantações da Estação Espacial Internacional (ISS) (NASA, 2017). A iniciativa cobre todos os custos de lançamento em troca dos dados adquiridos pelo CubeSat durante a missão. Ainda assim, em (WEITERING, 2018), a missão intitulada "SSO-A: Smallsat Express" da SpaceX lançou em dezembro de 2018 o equivalente à 64 pequenos satélites em órbita terrestre baixa, sendo que 49 eram CubeSats. A missão lançou em órbita CubeSats desenvolvidos por organizações governamentais e comerciais em volta do mundo.

A CDS também possui especificações para confecção e regulamentação do Poly-PicoSatellite Orbital Deployer (P-POD), um dispositivo mecânico acoplado ao veículo de lançamento responsável por liberar os CubeSat em órbita. Um P-POD é capaz de levar de uma vez só até três CubeSats de 1U ou um de 3U. Para garantir o correto funcionamento, compatibilidade com o P-POD e o sucesso na missão, o CubeSat deve estar de acordo com as configurações informadas pelo documento de especificação (UNIVERSITY, 2014).

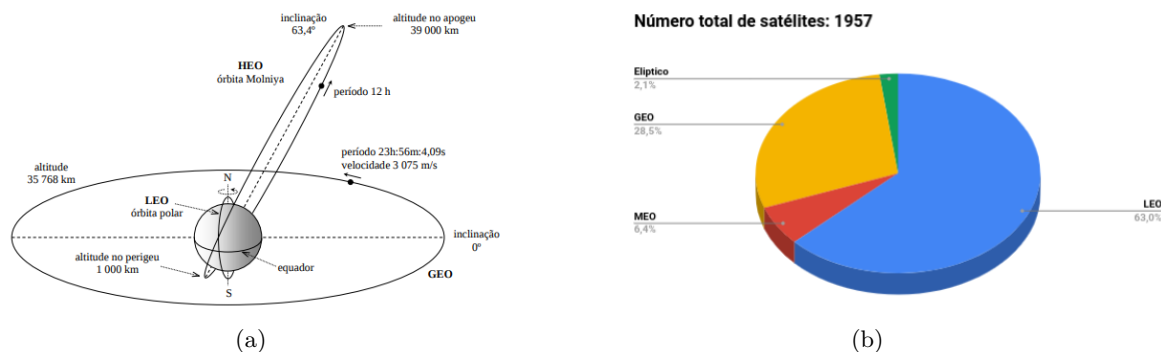
Figura 2 – P-POD e sua estrutura interna. (UNIVERSITY, 2014)



2.1.1 Órbita terrestre baixa

Uma das maneiras para classificar as órbitas que são mais favoráveis para determinados satélites, é em relação à altitude. Estas afetam o uso e aplicação nas quais os satélites operam. Sendo assim é denominado três categorias de órbitas: órbita terrestre baixa (LEO), órbita terrestre média (MEO) e órbita terrestre alta (HEO). Cada órbita pode ser usadas por satélites para diferentes tipos de cobertura e aplicação, contando com 4857 satélites em 2018 de acordo com a UNOOSA (United Nations Office for Outer Space Affairs), dividindo-se entre as órbitas como apresenta Figura 3b. Em órbita terrestre alta (cerca de 36 mil quilômetros de altitude em relação à superfície) podemos encontrar satélites meteorológicos e para comunicação, conhecidos como satélites geoestacionários. Geralmente utilizados para observar uma determinada região, possuem período orbital igual ao da Terra em órbita conhecida como geossíncrona. A órbita geoestacionária é útil para aplicações de comunicações, já que as antenas terrestres precisam ser direcionadas apenas uma vez para o satélite, sem a necessidade de equipamentos para acompanhar a trajetória do satélite. A economia em equipamentos terrestres fazem valer a pena o custo de desenvolvimento e a complexidade de lançar um satélite na órbita geoestacionária, especialmente para aplicações que requerem um grande número de antenas terrestres, como a transmissão de televisão (Majumder; Farah; PRIYANKARoy, 2009). A órbita terrestre média é a segunda mais próxima da Terra e seus satélites levam menos de 24 horas para completar seus períodos orbitais, como é o caso dos satélites de GPS (acrônimo GPS), encontrados à 26.000 km de altitude do centro da Terra. Uma órbita terrestre baixa é encontrada entre 180 km e 2000 km de altitude.

Figura 3 – Categorias de órbitas terrestres (a) e quantidade de segmentos espacial em cada uma dessas órbitas (b). Fonte: UNOOSA (United Nations Office for Outer Space Affairs)



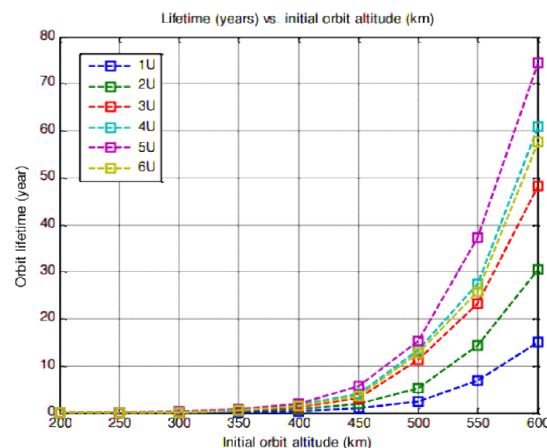
No entanto, os sistemas de satélite de órbita terrestre baixa (LEO) apresentam várias vantagens em relação aos das demais órbitas, como: menores custos de lançamento, menores atrasos de transmissão, menor potência de transmissão e utilização eficiente do espectro, usando pequenas áreas de cobertura levando as comunicações por satélite a se tornarem complementos de serviços baseados em comunicações

sem fio terrestres, podendo fornecer conectividade em áreas isoladas que não possuem viabilidade econômica para implementação e distribuição de tecnologias de ponta. Estes motivos pelos quais os satélites em órbita terrestre baixa são fortes candidatos para integração ao ecossistema da tecnologia 5G, prestando serviço através de constelações formadas por centenas de satélites provendo cobertura para tecnologias de redes de comunicação terrestre em localidades isoladas e de baixo desenvolvimento econômico, fortalecendo a infra-estrutura da tecnologia 5g e aumentando o nível de confiabilidade do sistema graças à baixa latência, permitindo uma sociedade digital totalmente conectada (CORICI et al., 2016). Outra aplicação é divulgada em (CHANG, 2019). A SpaceX lançou em órbita terrestre baixa 60 satélites para integrarem ao projeto Starlink. O Starlink é um projeto da SpaceX que desenvolve satélites de baixo custo e alto desempenho, com proposta de formar uma constelação de até 12 mil satélites com oferta de serviço de internet com alta velocidade para partes do mundo que atualmente estão praticamente isoladas do mundo digital moderno, com baixa latência com desempenho comparável às redes de cabo e fibra ótica que transportam a maior parte do tráfego de internet hoje. O custo total estimado para para projetar, construir e implantar essa rede é estimado em quase US\$ 10 bilhões. Com a relevância dessas informações podemos ter uma noção do quanto os benefícios desta órbita criou uma movimentação em massa de empresas governamentais e não-governamentais, com a promessa de criar uma revolução no mercado e nas tecnologias espaciais.

2.1.1.1 Efeito Doppler

Devido à baixa altitude os satélites nesta órbita tem que lidar com o arrasto atmosférico, geralmente apresentando um tempo de vida mais curto do que os das demais órbitas. A Figura 4 apresenta a relação do tempo de vida de um CubeSat para diferentes formatos e altitudes, indicando que à medida que a altitude aumenta, o tempo de vida também aumenta. Para compensar esse efeito, estes podem alcançar velocidade orbital de 27.000 km/h o que resulta em um período orbital próximo a 90 minutos e ciclos de 20 a 30 ciclos pela Terra em um único dia.

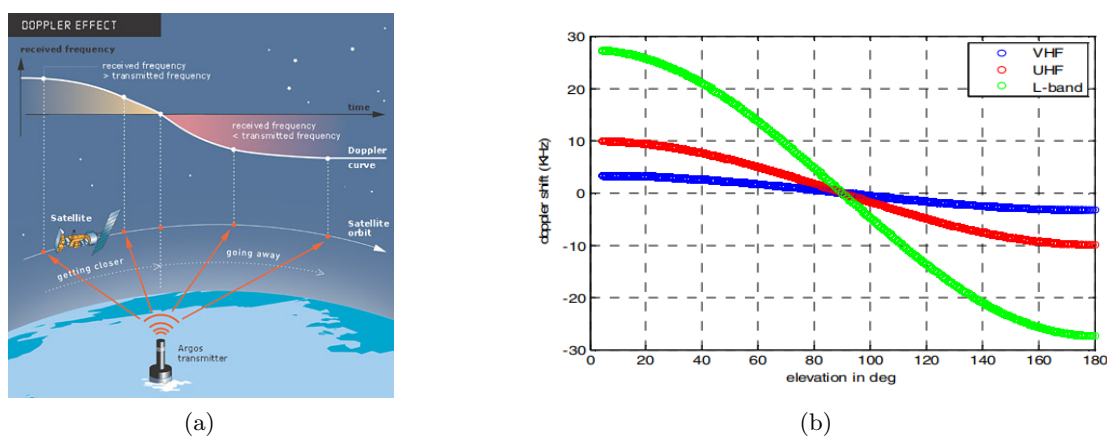
Figura 4 – Relação de vida útil de CubeSat e sua altitude em órbita. Fonte: <https://www.nanosats.eu/>



Em consequência disso, os sinais recebidos são afetados por deslocamentos de frequência causados pelo efeito Doppler. Conforme (RESNICK; HALLIDAY; KRANE, 1996) o efeito Doppler é um fenômeno físico presente na variação de velocidade entre dois objetos quando um destes está emitindo alguma forma de onda. Como resultado, temos a percepção de um desvio de frequência no sinal produzindo um deslocamento de frequência positivo na aproximação ou deslocamento negativo caso haja o afastamento do satélite com o segmento terrestre, como pode ser observado na Figura 5a. Este efeito pode ser observado em ondas mecânicas e eletromagnéticas, como as micro-ondas, luz visível e as ondas de rádio, como é o caso dos nanossatélites que, particularmente, varia continuamente com o tempo e com a localização do usuário,

o que dificulta qualquer correção de frequência off-line. Além disso, o desvio Doppler é proporcional não só na presença de velocidade relativa como também é mais prejudicial para frequências altas. Em (Latachi et al., 2017) o cálculo teórico da relação do desvio de frequência causado pelo efeito Doppler é realizado para as faixas VHF, UHF e Banda L e apresentando na Figura 5b. Valores estes que podem ser comprovados na prática. Em (BOIARDT; RODRIGUEZ, 2010), é feita a análise baseada em cálculos para a estimação do efeito Doppler na comunicação entre segmento terrestre e um satélite da constelação Iridium. Operando com frequência de 1,6 GHz e 700 km de altitude foi estimado desvio de frequência de 40 kHz enquanto em (HEATH, 2007) para o nanossatélite SO-50(ou Saudisat) operando na faixa UHF e 650 km de altitude o desvio Doppler máximo é de 10 kHz.

Figura 5 – Desvio Doppler relativo ao deslocamento do satélite(a) e desvio Doppler relativo à diferentes faixas de frequência(b). Fonte: (Latachi et al., 2017)



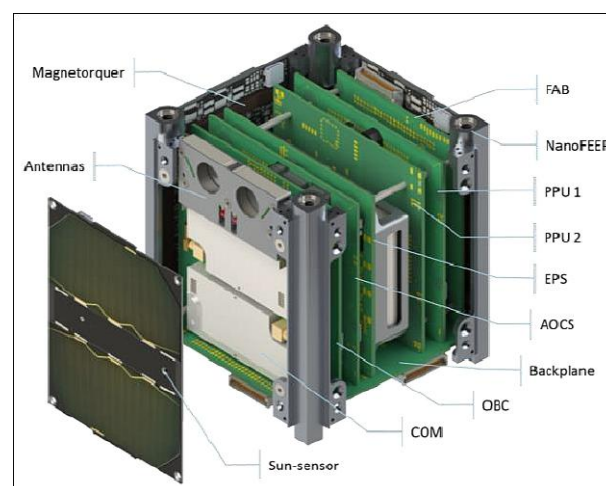
2.1.1.2 Efeitos ionosféricos

Ao mesmo tempo, a comunicação satelital como um todo é afetada por partículas carregadas eletricamente (íons) na superfície ionosférica proveniente da alta radiação solar que variam de raios X até ultra-violeta, causando distorções no sinal de origem. A ionosfera é uma das camadas da atmosfera que estende-se desde cerca de 50km até aproximadamente 600km de altura da Terra. Devido à alta condutividade desta região, o comportamento do campo eletromagnético pode sofrer influências consideráveis nas suas características. Esses efeitos são predominantes durante o dia, horário de maior incidência de radiação solar, e também na ocorrência de explosões ou manchas solares, afetando, na maioria dos casos, ondas na faixa de HF. No entanto, em época de maiores atividades solares e em determinadas regiões da Terra, como na região do equador geomagnético e nas regiões polares, a atuação da ionosfera pode ocorrer em frequências maiores, na faixa de VHF, UHF e superiores, causando no sinal atenuação, difração, refração, reflexão e efeitos conhecidos por bolha ionosférica e rotação de Faraday, efeito este que, de acordo com (Latachi et al., 2017), é mais crítico em frequências mais baixas, causa alteração no ângulo de polarização de onda eletromagnética, causando perda na potência recebida e alterando a relação sinal-ruído, podendo comprometer a comunicação (??).

2.1.2 Subsistemas de comunicação em CubeSats

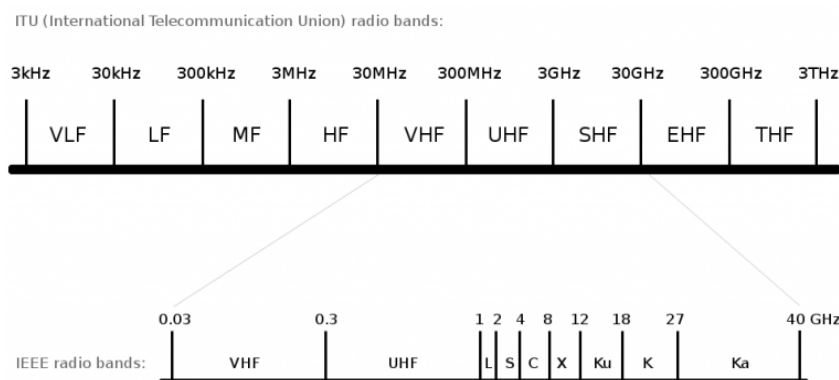
Independente da missão, todo segmento espacial a ser lançado em órbita possui seu conjunto de subsistemas, e com o CubeSat não é diferente. Os subsistemas são módulos que constituem o corpo do segmento espacial, possuindo papel importante para o funcionamento e sucesso da missão. Destas, podemos citar unidades concentradas na geração, armazenamento e distribuição de potência para suprir a necessidade de energia para todos os subsistemas do segmento espacial (EPS - *Electronic Power Supply*), gestão de bordo para processamento de dados captados pelo *Payload* e de comunicação entre os subsistemas (CDHS - *Communication and Handling Subsystem*), controle térmico e de altitude e órbita (AOCS - *Attitude and Orbit Control Subsystem*), sistema de comunicação (TT&C - *Telemetry, Tracking and Comand*), subsistema foco deste trabalho, entre outros.

Figura 6 – Subsistemas de um CubeSat. Fonte: (EOPORTAL, 2016)

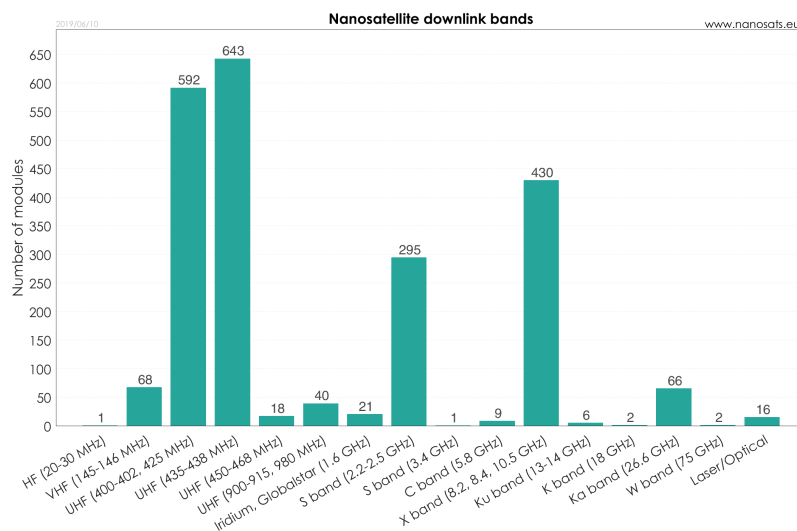


O subsistema de comunicação é umas das partes cruciais do segmento espacial que, caso mal projetado, pode levar ao fracasso da missão, sendo o responsável por formar o enlace com o segmento terrestre, através de recursos radioelétricos, fornecendo informações da posição orbital, monitoramento de saúde e estado atual do segmento espacial e seus subsistemas e também a recepção de comandos enviados pelo segmento terrestre (Challa; McNair, 2012). A comunicação com o segmento espacial é baseada no espectro eletromagnético sendo que duas frequências diferentes necessitam ser alocadas: uma usada para *uplink*, ou seja, sinais enviados da Terra para o espaço e *downlink*, sinais enviados do espaço para a Terra (VOLAKIS, 2007). O espectro eletromagnético é uma escala que representa todas as distribuições das possíveis frequências da radiação eletromagnética. Desses valores, estão incluídos frequências muito altas como raio-X, as frequências de luz visível, e frequências muito baixa como as ondas de rádio. O espectro de rádio é a parte do espectro eletromagnético com frequências de 30 Hertz a 300 GHz. Com o aumento da demanda de serviços e aplicações e, para evitar interferências entre os usuários, criaram-se 12 faixas, dividindo o espectro de rádio e garantindo seu uso por todos os serviços de radiocomunicação. O uso do espectro é estritamente regulada por leis nacionais, coordenadas por um órgão internacional, a União Internacional de Telecomunicações (ITU) (ITU, 2015). Uma segunda convenção na faixa de micro-ondas, e mantido pelo IEEE (Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos), divide as faixas de 3 MHz a 300 Ghz, mais utilizadas nas radiocomunicações, usando designações de letras para cada banda de frequência (IEEE..., 2003). Ambas convenções são representadas em Figura 7.

Figura 7 – Espectro radioelétrico segundo convenções da ITU e IEEE. Fonte: (NASA, 2015)



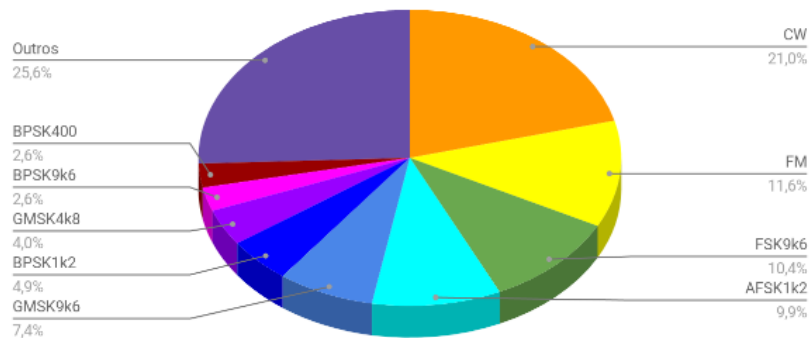
Entretanto, o espectro de rádio passou a ser altamente explorado pelas radiocomunicações e parte dele são vendidas ou licenciadas a operadores de serviços privados de radiodifusão (por exemplo, operadores de telefones celulares ou emissoras de televisão aberta). A maioria das frequências alocadas para comunicação espacial de CubeSats correspondem à faixa de frequência de satélites amadoras (Figura 8). As frequências de radio amador são de 145,8 MHz - 146,0 MHz na banda VHF, 435,0 MHz - 438,0 MHz na banda UHF e 2,400 GHz - 2,450 GHz na banda S. As faixas VHF e UHF geralmente são utilizadas para que pequenos conjuntos de dados sejam transmitidos, como por exemplo dados de telemetria, telecomando e até mesmo informações de carga útil (Samsuzzaman et al., 2018).

Figura 8 – Frequências utilizadas em CubeSats. Fonte: <https://www.nanosats.eu/>

As restrições de tamanho trazem uma série de desafios no desenvolvimento dos CubeSats. Outra restrição fica por conta da potência transmitida, que é limitada em 1W. Dessa forma, uma modulação com alta eficiência espectral e de potência é essencial para garantir a comunicação com o segmento espacial. A modulação é uma técnica utilizada para adicionar a informação, em banda base, para a frequência especificada. O transporte do sinal atravessa o canal até a recepção, sendo recuperado através da demodulação. O sinal em banda base é modulado baseado em parâmetros que podem variar entre amplitude, frequência e fase. Dentre as técnicas, temos a analógica e digital. O objetivo da modulação analógica é transferir um sinal analógico de banda de base para sinal modulado em técnicas conhecidas como: amplitude modulation (AM), frequency modulation (FM) e phase modulation (PM). O mais encontrado em comunicação de CubeSats amadores é a modulação FM, em segmentos que replicam o sinal de voz

recebidos. Para sinais de telemetria e rastreamento é comumente encontradas técnicas de modulação digital baseadas em chaveamento. Conforme informação da base de dados do SatNOGS¹ as modulações mais utilizadas em CubeSats e nanossatélites são apresentadas na Figura 9.

Figura 9 – Diferentes modulações utilizadas em satélites. Fonte: db.satnogs.org/statistics



2.1.3 Protocolos de comunicação

Um protocolo de comunicação pode ser caracterizado como o mecanismo utilizado por duas ou mais entidades para se comunicarem através de mensagens seguindo um conjunto pré-estabelecido de regras, definido a forma e a ordem com que a mesma se procede. Tomamos como exemplo a comunicação humana, ação que utiliza um protocolo de comunicação no qual os dois comunicantes devem falar a mesma língua para se entenderem. A analogia utilizada com humanos é a mesma para software e hardware. Toda comunicação entre dois ou mais sistemas é conduzido graças ao uso de um protocolo, utilizando recursos para realizar diversas ações como iniciar e finalizar uma conexão, receber a confirmação de um pedido, requisitar um arquivo, e assim por diante.

Com o passar dos anos, a invenção e a necessidade de aplicações mais robustas trouxeram novos algoritmos, protocolos, técnicas e fabricantes, com aplicações de hardwares e softwares muito mais complexas. Desta forma, necessitou-se a criação de uma arquitetura padrão para facilitar o processo de interconectividade entre máquinas de diferentes fabricantes. Criou-se então o modelo OSI (adicionar acrônimo), baseado em arquitetura de camadas, sendo que cada camada é responsável por uma tarefa, fornecendo um conjunto de serviços para o protocolo da camada superior. O sistema de camadas de protocolos possui vantagens conceituais e estruturais. A modularização proporciona a discussão de componentes de sistemas de modo estruturado, facilitando a atualização dos mesmos, já que a atualização do protocolo de uma camada não irá interferir na compatibilidade com protocolos de outras camadas, apenas aumentar o número de funcionalidade das camadas inferiores (KUROSE; ROSS, 2007).

Os dois protocolos abordados neste trabalho implementam a camada de enlace de dados, estabelecendo o formato dos quadros de informação trocados entre segmento espacial e terrestres, principalmente para a transmissão de pacotes de telemetria e rastreamento. A camada de enlace é dividida em duas subcamadas, as camadas Media Access Control (MAC) e Logical Link Control (LLC). A camada MAC controla o acesso às diferentes partes da rede e a camada LLC atua na detecção de erros, retransmissão e controle de fluxo aumentando a robustez e fornecendo serviço de entrega confiável. Na comunicação de CubeSats amadores, o AX.25 é o protocolo da camada de enlace mais encontrado. O AX.25 herda características do antigo X.25, muito utilizado em comunicações ponto-a-ponto, oferecendo mecanismos cruciais da camada de enlace. Em contrapartida, o NGHam (Next-Generation Ham Radio) aparece como

¹ <https://db.satnogs.org>

uma nova alternativa apresentando características não encontradas no AX.25. Portanto, nas próximas duas seções, será realizado um estudo sobre ambos os protocolos, apresentando conceitos básicos, diferenças, vantagens, desvantagens, seus benefícios para a comunicação espacial.

2.1.3.1 AX.25

O AX.25 é um protocolo de comunicação orientado à bit implementado na camada de enlace e física, sendo muito utilizado pela comunidade radio amadora e encontrado na maioria dos CubeSats ativos em órbita. Baseado no protocolo HDLC (High-Level Data Link Control), o AX.25 utiliza máquinas de estados na camada de enlace de dados, fornecendo mecanismos para estabelecer e realizar conexões ponto-a-ponto na forma orientada e não orientada a conexão. Conforme (BEECH et al., 1997), o AX.25 apresenta três tipos de quadros diferentes: quadro de informação (quadro I), quadro de controle (quadro S) e quadro não numerado (quadro U). Esses quadros são trocados formando ciclos de transmissão, podendo operar em modo half-duplex ou full-duplex. Caso uma unidade de dados ultrapasse o tamanho máximo de um quadro AX.25, a unidade é quebrada em segmentos menores antes de transmitir.

Figura 10 – Estrutura do quadro (U) Não numerado e (S) Supervisão(a) e estrutura quadro de (I) Informação(b)

(a)

Flag	Address	Control	Info	FCS	Flag
01111110	112/224 Bits	8/16 Bits	N*8 Bits	16 Bits	01111110

(b)

Flag	Address	Control	PID	Info	FCS	Flag
01111110	112/224 Bits	8/16 Bits	8 Bits	N*8 Bits	16 Bits	01111110

Cada campo é composto de um número inteiro de octetos (byte de 8 bits de dados binários) e as três estruturas possuem os mesmos campos: flag de início, endereço, controle, informação, FCS e flag de término, com exceção do quadro de informação (I) que acompanha um campo nomeado de PID. O PID identifica o tipo de protocolo de camada de enlace que está sendo usado. As flags de início e término delimitam o início e fim do quadro, sendo acionada na presença da sequência "01111110 ou (7E hex), sequência na qual não pode ocorrer em nenhum outro local dentro do quadro. O campo de controle identifica o tipo de quadro que está sendo passado, podendo ter tamanho equivalente a um ou dois octetos. O campo de informações transmite dados do usuário entre o enlace. O Frame-Check Sequence (FCS) são 16 bits utilizados para a detecção de erro no quadro, ordenando o primeiro bit como o mais significativo. O FCS garante a detecção de erros de bit na entrega do quadro (BEECH et al., 1997)(KLEINSCHRODT et al., 2017). De acordo com (David; Storvik, 2014), além de possuir um cabeçalho extenso, por possui apenas técnica de detecção de erro, o AX.25 não é adequado para uso em canais com ruído, pois pode arremeter o sistema à grandes números de retransmissões.

2.1.3.2 NGHAm

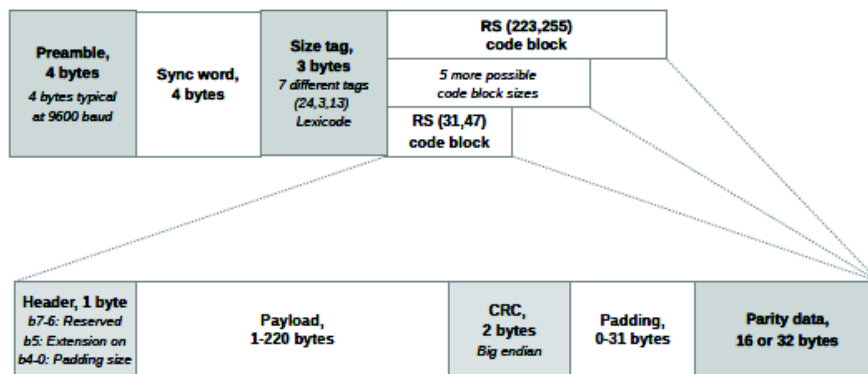
O NGHAm é um protocolo de comunicação da camada enlace utilizado em rádio amador. A informação em NGHAm é embaralhada e protegida por FEC (Forward Error Correction) diretamente na camada de enlace (KLEINSCHRODT et al., 2017), resolvendo um grande problema encontrado no protocolo AX.25. A estrutura de um quadro NGHAm é apresentada na Figura 12, indicando cabeçalho de 11 bytes e *payload* de tamanho variável, codificado em FEC.

O preâmbulo indica o início do quadro e é composto por 4 bytes. O *sync word* (ou palavra de sincronismo) indica o tamanho da palavra código, portanto, o transmissor escolhe bloco de código mais

Figura 11 – Nanossatélites brasileiros e tecnologias utilizadas. Fonte: (ORDUY et al., 2016)

Satellite	Nanosat-CBRI	AESP-14	SERPENS-SA	SERPENS-SB	TANGREDDOT	ITASAT
Units	1U	1U	1.5U	1.5U	1	6
Frequency Up (Mhz)	435.131	145.800	145.980	145.980	437.500	145.800
Frequency Down (Mhz)	145.686	437.500	437.365	437.365	437.500	437.500
Power out (Watt)	0,2	1	0,5	0,5	0,5	0,2
Comm. Protocol	AX.25	AX.25	PUS/CSP	AX.25	AX.25	AX.25
Modulation	BPSK-AFSK	G3RUH-FSK	MSK	FSK	AFSKIF-M	AFSKIF-M
Rate (bps)	1k2/9k6 1k	9k6	1k2/9k6	9k6	1k2	1k2

Figura 12 – Estrutura de um bloco NGHAM. Fonte: (SKAGMO, 2015)



adequado para o *payload*, proporcionando robustez ao quadro e mantendo 13 bits de distância mínima entre todas as possíveis palavras códigos. A distância mínima, ou distância de Hamming, é uma métrica utilizada na codificação que indica a efetividade da codificação, correspondendo ao menor número de substituições necessárias para transformar uma palavra código em outra (WIKIPEDIA, 2019). Quanto maior o valor, melhor o código, pois é necessária uma quantidade maior de erros de bits para acontecer um engano pelo decisor na decodificação.

O NGHAm usa o codificação de bloco Reed Solomon (SKAGMO, 2015). Esta se trata de uma técnica poderosa para correção de mensagem, altamente recomendada para transmissões em canais com ruído. Segundo (MATEER, 2013) esses códigos são utilizados em satélites da NASA na exploração de espaço profundo.

2.2 Segmento terrestre

Após o lançamento, é de necessidade estabelecer a comunicação para aquisição dos dados referentes à finalidade da missão espacial. Para isso, é imprescindível a construção de um segmento terrestre para condução de todo processo pós-operacional, controlando o satélite durante seu ciclo de vida no espaço, o planejamento e execução da missão. O segmento terrestre é usado para recepção de telemetria, rastreamento e aquisição de dados. Para o desenvolvimento do sistema, é de extrema importância a formação de uma equipe capacitada para realizar o dimensionamento e implementação de um segmento terrestre bem consolidado, pois este possui muitos componentes operando independentemente que, se não estiverem funcionando corretamente, podem causar problemas de comunicação, atrasando a finalização desta etapa. Portanto, é recomendado iniciar esse processo antes mesmo do desenvolvimento do segmento espacial, pois o lançamento deste com um segmento terrestre instável pode frustrar totalmente a missão. Além

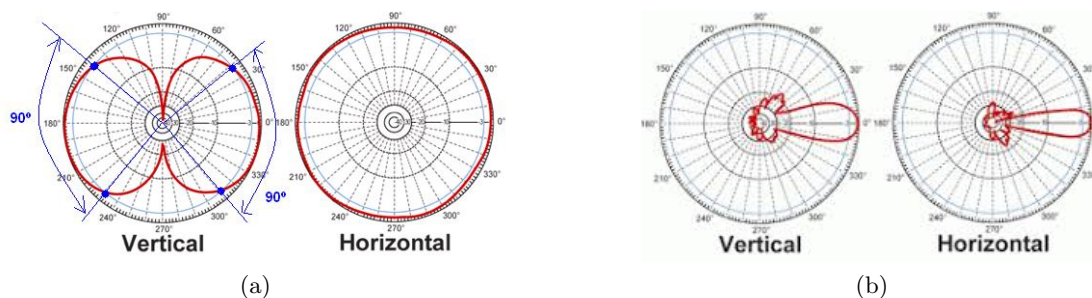
disso, é recomendado testar o segmento terrestre com satélites já existentes para devidos ajustes finais. Sendo assim, o teste completo da estação terrestre é fundamental para o sucesso da missão (NASA, 2017).

2.2.1 Antena

A antena é um elemento que irradia ou capta energia eletromagnética, servindo como a interface entre meio eletromagnético guiado e irradiado para os dispositivos de radiocomunicação. A escolha do seu modelo exige conhecimentos dos princípios físicos da teoria eletromagnética aplicadas à engenharia de antenas, sendo esses, indispensáveis para uma boa comunicação, permitindo caracterizar seu desempenho e a melhor solução para o cenário utilizado. Dos modelos disponíveis, podemos encontrar antenas com configurações de monopolo, dipolo curto, dipolo dobrado, dipolo de meia-onda, entre outras. A polarização é uma característica importante da onda eletromagnética e refere-se à orientação da sua componente elétrica, tendo influência direta com o formato da antena projetada. Para comunicações espaciais, o eixo polar da Terra é utilizado como referência. Em paralelo polarização vertical, e em perpendicular, horizontal. Essa característica é sempre encontrada em cenários que a direção do campo não possui variação na sua direção, denominando uma polarização linear. Em contrapartida, em determinados cenários o campo elétrico pode modificar sua orientação conforme a onda se propaga no meio, tomando formas circulares. "A polarização circular é formada por duas componentes de campo elétrico perpendiculares entre si, de mesma amplitude e defasadas angularmente de 90° " (RIBEIRO, 2014). Antenas com polarização circular são muito encontradas na comunicação espacial, aumentando a robustez e flexibilidade na recepção, amenizando a perda de intensidade do sinal causada pelo desalinhamento de polaridade da orientação relativa das antenas e da rotação de Faraday (subseção 2.1.1).

A geometria e o comprimento efetivo de uma antena inclui fatores como frequência de operação e ganho, afetando a distribuição espacial e o alcance do sinal. A direção de deslocamento da onda e a densidade da potência produzida pela antena pode ser representada graficamente, conhecido como diagrama de radiação. Neste diagrama pode-se identificar a região na qual a antena terá sua maior concentração de energia irradiada em um determinado plano, de forma a facilitar a visualização de como as ondas se propagam. Portanto, encontram-se antenas com características especiais em relação à direção em que concentra sua energia, ou melhor dizendo, a sua diretividade. Um exemplo de antena que possui alta diretividade é a direcional. Ao contrário das omnidirecionais, ou seja, antenas que irradiam ou captam energia em todas as direções igualmente, as antenas direcionais proporcionam alta diretividade e ganho na comunicação, feixe de meia potência estreito e alta relação frente-costas, de forma a concentrar as ondas em uma faixa angular, sendo aplicadas em cenários que necessitam de maior eficiência em uma determinada direção, resultando em um maior ganho.

Figura 13 – Diagrama de radiação de antenas omnidirecionais(a) e direcional(b)



Para comunicação espacial, utilizam-se antenas omnidirecionais de forma fixa, tendo melhor aproveitamento na recepção quanto maior for a elevação da trajetória de passagem do nanossatélite. Para melhorar o rendimento da recepção, o uso de um rotor pode permitir um correto apontamento

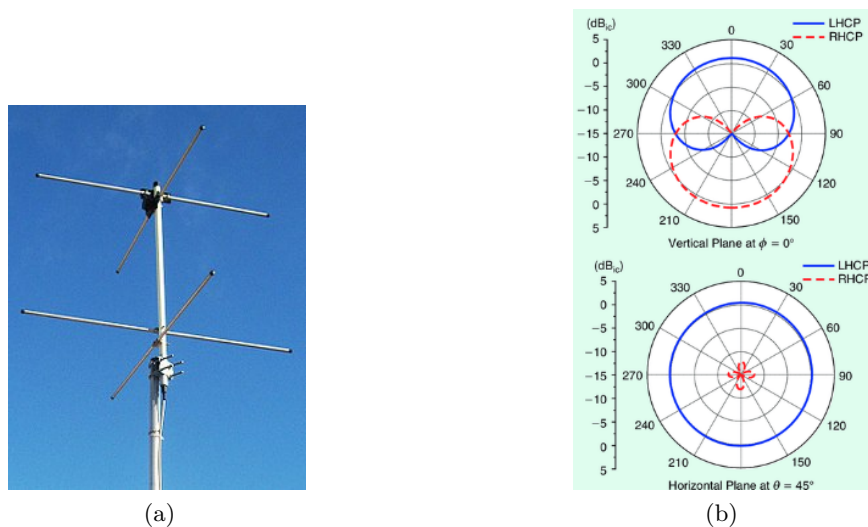
permitindo o uso de uma antena direcional no rastreamento do nanossatélite, aumentando a qualidade do sinal e compensando o desalinhamento já que, como visto em [subseção 2.1.1](#), a velocidade orbital de um segmento espacial em órbita terrestre baixa é maior que o da Terra. Portanto, esperam-se resultados mais satisfatórios nesse cenário comparado ao da recepção com antena fixa. Com base nisso, alguns modelos de antenas foram elencados e podem ser utilizados para estabelecer um enlace de comunicação com nanossatélites .

Além disso, o comprimento efetivo e a geometria da antena influenciam diretamente também na relação das impedâncias de entrada e nos terminais da linha de transmissão. Quando esses valores são diferentes, acontece o que conhecemos de descasamento de impedância, que nada mais é que uma reflexão da energia no circuito da antena, aumentando a relação de ondas estacionárias (VOLAKIS, 2007). A relação de ondas estacionárias (ROE em português e SWR em inglês) é relação entre o ponto de amplitude máxima e mínima de uma onda estacionária em uma linha de transmissão. Quanto mais alto esse valor, menor a energia transferida da antena para o cabo ou vice-versa, diminuindo sua eficiência (WIKIPEDIA, 2013). Portanto as ondas estacionárias presentes nas linhas de transmissão devem ser mantidas num nível baixo para que o rendimento das emissões e dos próprios equipamentos não sejam comprometidos. Para isso, ajustes devem ser realizados para que ambas impedâncias sejam equivalentes, resultando no casamento de impedância. Um circuito casamento garante a máxima transferência de energia do cabo para antena, ou seja, toda a potência emitida pelo rádio será irradiado pela antena (RIBEIRO, 2014).

2.2.1.1 Turnstile

A Turnstile é uma antena que consiste de dois dipolos em ângulos de 90 graus entre si ([Figura ??](#)) (kaushik; kumar; Yadav, 2013). A Turnstile é categorizada como uma antena omnidirecional e possui um bom desempenho em modo axial, sendo muito utilizada em segmentos terrestre para comunicação com satélite nas bandas VHF e UHF devido ao seu largo feixe de abertura ([Figura 15b](#)), não necessitando de um rotor e por possuir polarização circular, sofrendo baixa queda de rendimento por desalinhamento.

Figura 14 – Antena Turnstile(a) e seu diagrama de radiação(b)

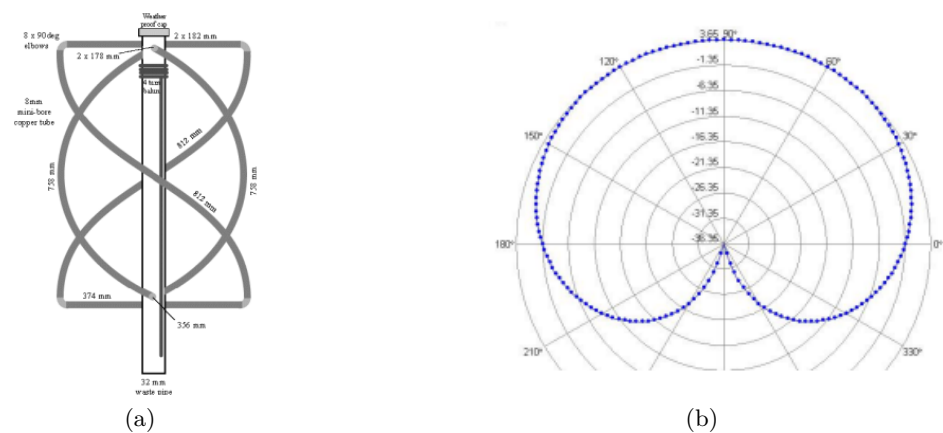


Em contrapartida, leva-se em consideração efeitos degradantes para a recepção do sinal, sendo que alguns estão de forma intrínseca e toda comunicação.

2.2.1.2 Quadrifilar Helicoidal

A antena Quadrifilar Helicoidal é composta de quatro elementos em ângulos de 90 graus entre si e complementados por filamentos que ligam dois elementos dando o formato de uma hélice, sendo categorizada como uma antena omnidirecional. Apesar do formato diferente comparado às antenas convencionais, a antena Quadrifilar Helicoidal possui um desempenho ligeiramente melhor na prática comparado à antena Turnstile (Kumar et al., 2011). A antena Quadrifilar é uma variação da antena helicoidal, desenvolvida com o objetivo de adquirir maior ganho, controle sobre a polarização da onda utilizando um elemento compacto e de fácil implementação (RIBEIRO, 2014)

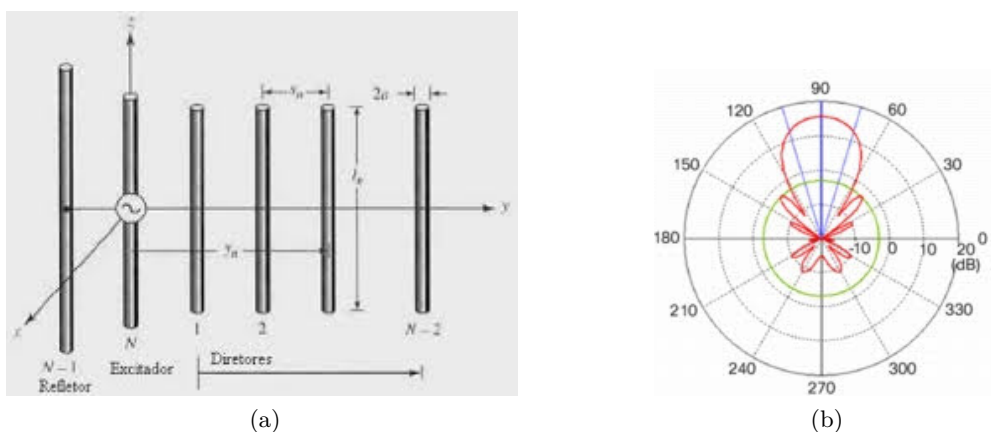
Figura 15 – Antena Quadrifilar Helicoidal(a) e seu diagrama de radiação(b)



2.2.1.3 Yagi-Uda

A Yagi-Uda é uma antena direcional (Figura 16b) e consiste em dipolos lineares paralelos (Figura ??), sendo uma das antenas mais populares, principalmente no radioamadorismo. Dentre esses dipolos, o primeiro é nomeado de refletor e possui tamanho maior que o demais, o dipolo ligado a fonte é o dipolo ativo ou excitado e os demais são elementos parasitas. Apesar de ter uma construção relativamente simples, o projeto desse dispositivo não é uma tarefa fácil, principalmente por que uma pequena variação no comprimento ou no espaçamento entre os elementos da antena podem alterar significativamente valores relacionados aos parâmetros da antena.

Figura 16 – Antena Yagi-uda(a) e seu respectivo diagrama de radiação(b)



Antenas direcionais, para uso em segmentos espaciais, geralmente são acompanhadas de rotores. O rotores (Figura 17) possuem a função de deslocar a posição da antena e manter o apontamento, compensando

as perdas causadas pela falta de diretividade já que, como visto em [subseção 2.1.1](#) a velocidade orbital de um segmento espacial em órbita terrestre baixa é maior que a velocidade de rotação da Terra.

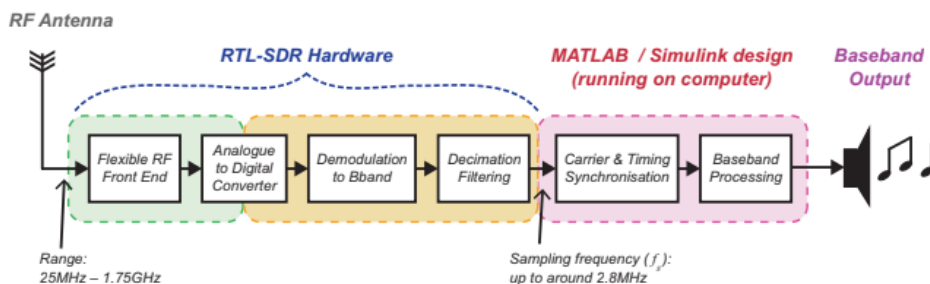
Figura 17 – Rotor da marca Yaesu(a) e antena Yagi-Uda com dipolo cruzado acoplado em um rotor(b)
Fonte: Autor desconhecido



2.2.2 RTL-SDR

O RTL-SDR é composto de um dispositivo USB e uma antena, sendo responsável por receber o sinal eletromagnético pela antena, realizar a conversão analógica-digital e enviando para o computador a informação em amostras em fase e quadratura, conforme diagrama de blocos da [Figura 18](#). Inicialmente, o RTL-SDR era comercializado como receptor DVB-T (Digital Video Broadcast - Terrestrial), entretanto notou-se uma possível adaptação deste dispositivo para atuar como um SDR genérico para recepção de radiofrequência.

Figura 18 – Diagrama de bloco representam a função do RTL-SDR na recepção de pacotes

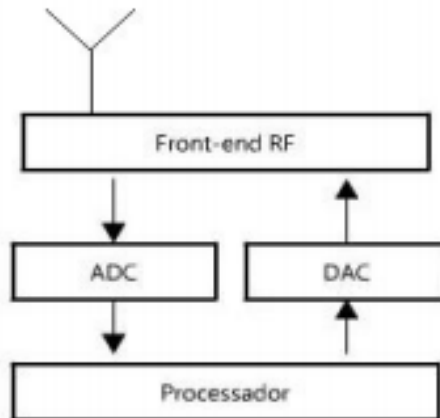


2.3 Software Defined Radio (SDR)

O Software Defined Radio (ou Rádio Definido por Software), é uma plataforma de rádio que substitui os sistemas da camada física, previamente desenvolvido em *hardware*, implementando-os em blocos de software com base em processamento digital de sinais ([STEWART et al., 2015](#)), embarcando-os em plataformas com microprocessadores, processadores digitais de sinais ou em circuitos lógicos programáveis. Os avanços da tecnologia trouxeram pro mercado dispositivos de alto processamento aumentando o interesse de comunidades científicas e empresariais pelo SDR, permitindo a implementação prática de vários algoritmos que até então não podiam ser executados em tempo real, devido às limitações de processamento dos circuitos presentes ([Garcia Reis et al., 2012](#)). A arquitetura do SDR é constituída basicamente do *front end* de RF realizando o deslocamento para a frequência desejada. Em seguida, os

conversores ADC e DAC conectados ao *front-end* os processos de conversão do sinal para . Para modulação, o sinal, previamente em banda base, passa por um filtro formatador de pulso e então convertido em um sinal analógico pelo DAC, multiplicando-o por um sinal cossenoidal. Na demodulação o sinal analógico recebido em banda passante é deslocado para banda base e digitalizado usando o ADC, gerando dados em fase e quadratura que posteriormente serão enviados até a unidade de processamento por comunicação serial onde recebe o processamento digital desejado. A [Figura 19](#) apresenta este conceito.

Figura 19 – Estrutura básica do SDR Fonte: (Garcia Reis et al., 2012)



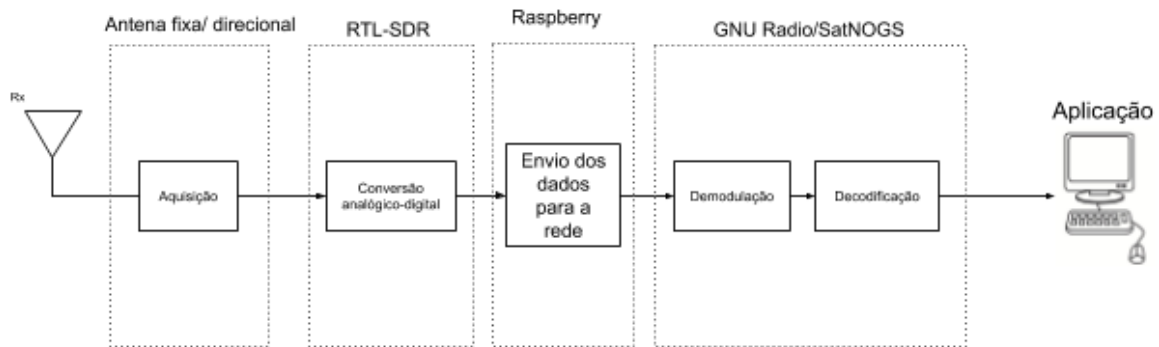
O SDR pode operar em diferentes frequências, bandas e modulações e suportar diferentes padrões de comunicação como: LTE(Long Term Evolution), Wi-Fi, GSM (Global System for Mobile), entre outros. A grande vantagem do uso da plataforma é a flexibilidade e reconfigurabilidade , permitindo ao usuário permite criar dispositivos sem fio e sistemas de comunicações que podem ser dinamicamente atualizados, sem precisar substituir todo equipamento de rádio, como era feito com os rádios analógicos convencionais.

3 PROPOSTA

3.1 Metodologia

Para o cumprimento dos objetivos propostos, este trabalho está dividido em duas etapas: estudo e implementação de uma infraestrutura minimamente viável para um segmento terrestre, desenvolvimento de um código no GNU para demodulação e decodificação de pacotes de CubeSats e nanossatélites que utilizem AX.25 e NGHAM como protocolos de comunicação. Uma representação da composição final da proposta, incluindo todos os tópicos citados, é apresentada na [Figura 20](#).

Figura 20 – Diagrama de bloco dos módulos necessário para conclusão da proposta



Fonte: Próprio autor

3.1.1 Antenas elencadas

Esta etapa consiste no estudo, construção e análise de antenas para aquisição de dados, considerando parâmetros tais como: estrutura, polaridade, ganho e diretividade de acordo com as missões dos nanossatélites. Sendo assim, foram levantadas duas categorias diferentes: fixas e direcionais, ambas projetadas para as faixas *Ultra High Frequency*(UHF) e *Very High Frequency*(VHF).

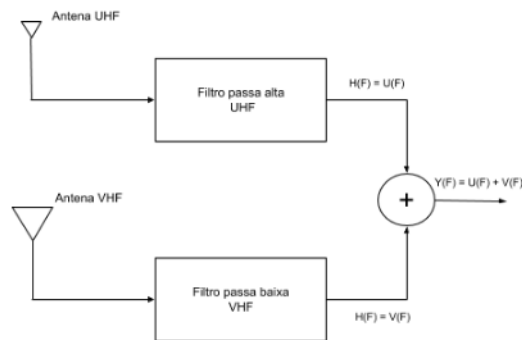
Por ser mais fácil de construir e por atender as necessidades do projeto, a antena Turnstile foi a escolhida para estabelecer a aquisição de dados dos nanossatélites. Além disso, o uso da antena Yagi-Uda com auxílio do rotor poderá incorporar o projeto, porém com prioridade mínima já que um sistema com antena fixa já satisfaz a proposta do projeto. A finalidade é analisar os ganhos procurando extrair a melhor resposta em cada antena. Acoplado à antena estará os demais módulos que compõem o sistema.

3.1.1.1 Receptor e auxiliares

Quando se trata de recepção na rádio comunicação, um sistema de comunicação simples é composto por uma antena e um conversor ADC. Entretanto, em meios práticos, é disposto de equipamentos auxiliares que ajudam na economia de hardware e na performance do sistema, tratando o sinal muitas vezes inadequado devido aos diversos fatores que degradam sua qualidade.

O equipamento inicial será um diplexer acoplado logo em seguida a antena. O *diplexer* é um dispositivo passivo responsável pela multiplexação em frequência de dois circuitos distintos, combinando as duas entradas para uma única saída. No sistema proposto, o *diplexer* economizará os custos de *hardware* adicionais, compartilhando o sinal de duas bandas diferentes (VHF e UHF) em um único canal.

Figura 21 – Diagrama de bloco do funcionamento de um *diplexer*. Fonte: Próprio autor



O uso de um Amplificador de Baixo Ruído (LNA) será utilizado, amplificando o sinal proveniente do satélite que é atenuado durante sua trajetória até a Terra, aumentando assim a sensibilidade aos sinais distantes e fracos.

O equipamento final será composto de um RTL-SDR e uma Raspberry (Figura 22). A Raspberry será a responsável por receber o sinal em fase e quadratura e enviá-la para o servidor do SatNOGS.

Figura 22 – Raspberry. Fonte: <https://www.raspberrypi.org/>



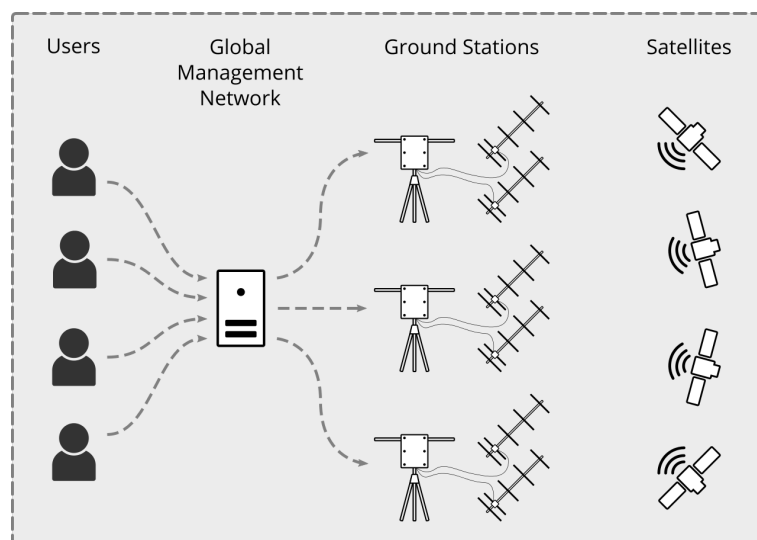
3.1.2 SatNOGS

O SatNOGS é uma plataforma de software e hardware livre para criação de uma rede de segmentos terrestres para captação, demodulação e apresentação de dados via satélite. O SatNOGS faz parte da fundação Libre Space¹ e dispõe de 4 diferentes subprojetos fornecendo uma rede distribuída de estações terrestres de satélite de órbita terrestre baixa, nomeados de: SatNOGS Network, DB, Client e Ground Station. O SatNOGS Network é um servidor para gerenciamento e operação de observações de múltiplos segmentos terrestres. A interface permite o agendamento de recepções de satélites com trajetória próxima ao segmento terrestre cadastrado. Após o tempo agendado, o observador recebe o resultado emitido pelo segmento espacial, podendo apresentar o *waterfall*, possíveis áudios, imagens, telemetria e informações de vida útil do equipamento. Além disso, qualquer observador pode agendar recepções de qualquer segmento terrestre disponível e todos os resultados de observações são públicos.

O SatNOGS DB é um banco de dados que reúne todos os transmissores de segmentos espaciais. A base de dados é totalmente aberta, podendo ser alimentada pelos próprios colaboradores do SatNOGS ou até mesmo usuário cadastrados na plataforma. É desta base que o SatNOGS Network se orienta sobre os satélites e segmentos terrestres disponíveis.

¹ <https://libre.space/>

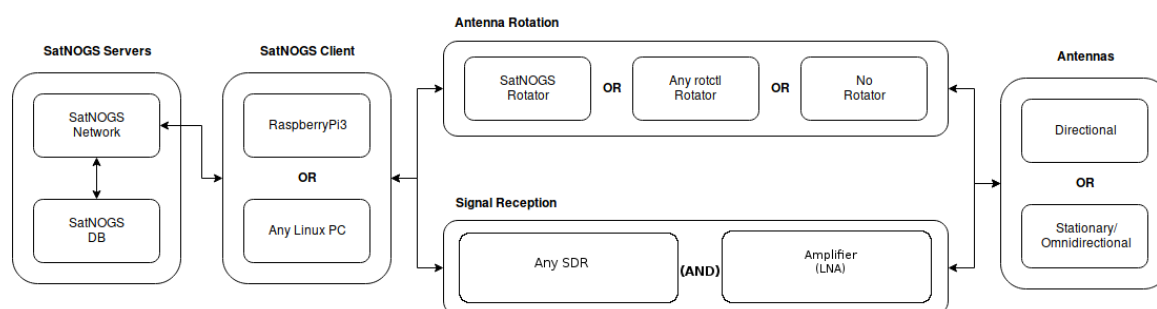
Figura 23 – Diagrama das diferentes formas de construção do segmento terrestre. Fonte: wiki.satnogs.org



O SatNOGS Client e Ground Station são os projetos que dependem da configuração de cada observador que inclui seu segmento terrestre na plataforma. O SatNOGS Client possui um sistema embarcado que opera conforme operações atribuídas pela SatNOGS Network, agendando as observações e enviando o resultado para o SatNOGS Network novamente. No site do SatNOGS dispõe de uma imagem preparada para instalação deste sistema em uma Raspberry ². Esta imagem dispõe de um *software* livre que acopla a tecnologia de Rádio Definido por Software (SDR) para a Raspberry. O software SDR é o responsável por sintonizar a frequência do RTL-SDR para a frequência do satélite que passará pela estação, captando o resultado obtido e enviando para o SatNOGS Network.

Já o SatNOGS Ground Station possui programas que possibilitam habilitar a função de rastreamento, podendo ser integrado à antena instalada, possuindo protocolo para comunicação com a controladora do rotor. A figura 24 apresenta algumas opções para construção do segmento terrestre junto ao Satnogs e dos projetos que compõem o sistema. Além de todo suporte já descrito, o serviço, bastando ao usuário apenas conectar sua antena em um periférico para iniciar operação.

Figura 24 – Diagrama das diferentes formas de construção do segmento terrestre



Fonte: wiki.satnogs.org

3.1.3 Ambiente GNU Radio

O GNU Radio é uma ferramenta de desenvolvimento de software livre que emprega a tecnologia de SDR (Software Defined Radio) permitindo ao usuário a implementação de um sistema de processamento de

² A Raspberry é um microcontrolador embarcado com alto poder de processamento. Mais informações do produto pode ser visto em <https://www.raspberrypi.org/>

sinais através do arranjo de blocos pré-programados, tendo eles uma unidade de processamento específica. A ferramenta dispõe de blocos já prontos porém permite o desenvolvimento de blocos próprios, aumentando a flexibilidade e autonomia do usuário. Nesse projeto, este ambiente será o responsável pelo processamento de sinais presentes em CubeSats e nanossatélites que não estão disponíveis no SatNogs. Processamentos estes que incluem: demodulação ASK, PSK, FSK, GMSK, GFSK, CW entre outros e a decodificação de pacotes AX.25 e NGHAM.

3.2 Cronograma

Etapas	Meses				
	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
1	√				
2		√			
3			√	√	
4				√	√

- Correções e ajustes na documentação.
- Construção do segmento terrestre: antenas, cabeamento, RTL-SDR e Raspberry.
- Implementação do código SDR.
- Ajustes finais em documentação e nos códigos.

REFERÊNCIAS

- BAKER, K. "Space Satellites from the World's Garage. The Story of AMSAT". 1994. Acessado em 12 de março de 2019. Disponível em: <https://web.archive.org/web/20061005160332/http://www.amsat.org/amsat-new/AboutAmsat/amsat_history.php>. Citado na página 15.
- BEECH, W. A. et al. Ax.25 link access protocol for amateur packet radio, version: 2.2 rev. In: *Tucson Amateur Packet Radio Corp.* [S.l.: s.n.], 1997. Citado na página 27.
- BOIARDT, H.; RODRIGUEZ, C. Low earth orbit nanosatellite communications using iridium's network. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, v. 25, n. 9, p. 35–39, Sep. 2010. ISSN 0885-8985. Citado na página 23.
- BORINI, G. Amazon distribui estações terrestres para gerenciar satélites em cloud. 2018. <<https://computerworld.com.br/2018/11/27/amazon-distribui-estacoes-terrestres-para-gerenciar-satelites-em-cloud>>. Acessado em 19-03-15. Citado na página 16.
- BRYCE. *Global Space Industry Dynamics*. 2016. Disponível em: <https://www.industry.gov.au/sites/default/files/2019-03/global_space_industry_dynamics_-_research_paper.pdf>. Citado na página 16.
- CGEE., C. D. G. E. E. E. *CubeSats*. 2018. Citado na página 15.
- Challa, O. N.; McNair, J. Cubesat torrent: Torrent like distributed communications for cubesat satellite clusters. In: *MILCOM 2012 - 2012 IEEE Military Communications Conference*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–6. ISSN 2155-7586. Citado na página 24.
- CHANG, K. 2019. Citado na página 22.
- CORICI, M. et al. Assessing satellite-terrestrial integration opportunities in the 5g environment. *On-line] Available: https://artes.esa.int/sites/default/files/Whitepaper*, 2016. Citado na página 22.
- David, K.; Storvik, P. Ground station based on software defined radio. *Norwegian University of Science and Technology Department of Electronics and Telecommunications*, dec 2014. Citado na página 27.
- EOPORTAL. *UWE-4 (University Würzburg Experimental satellite-4)*. 2016. Disponível em: <<https://directory.eoport.org/web/eoportal/satellite-missions/u/uwe-4>>. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 24.
- Garcia Reis, A. L. et al. Introduction to the software-defined radio approach. *IEEE Latin America Transactions*, v. 10, n. 1, p. 1156–1161, Jan 2012. ISSN 1548-0992. Citado 3 vezes nas páginas 9, 32 e 33.
- HEATH, J. Getting started on amateur radio satellites. *Radio Society of Great Britain*, mar 2007. Citado na página 23.
- IEEE Standard Letter Designations for Radar-Frequency Bands. *IEEE Std 521-2002 (Revision of IEEE Std 521-1984)*, p. 0₁ – –3, 2003. Citado na página 24.
- ITASAT-1, S. 2015. Citado na página 16.
- ITU. *Nomenclature of the frequency and wavelength bands used in telecommunications*. [S.l.], 2015. Citado na página 24.
- JEAN-MARIE, B. The future of the space industry. *ECONOMIC AND SECURITY COMMITTEE (ESC)*, nov 2018. Citado na página 17.
- kaushik, A. kumar; kumar, A.; Yadav, A. K. S. Antenna theory -a comparative study. *International Journal of Advances in Electrical and Electronics Engineering*, 2013. Citado na página 30.
- KLEINSCHRODT, A. et al. Advances in modulation and communication protocols for small satellite ground stations. In: . [S.l.: s.n.], 2017. Citado na página 27.

- Kumar, B. P. et al. Integrated quadrifilar helix at c-band for spacecraft omni antenna system. In: *2011 IEEE Applied Electromagnetics Conference (AEMC)*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–4. Citado na página 31.
- KUROSE, J.; ROSS, K. *Redes de computadores e a Internet: uma abordagem top-down*. ADDISON WESLEY BRA, 2007. ISBN 9788588639188. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=i5WwAAAACAAJ>>. Citado na página 26.
- Latachi, I. et al. Link budget analysis for a leo cubesat communication subsystem. In: *2017 International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 23.
- Maheshwarappa, M. R.; Bridges, C. P. Software defined radios for small satellites. In: *2014 NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems (AHS)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 172–179. Citado na página 16.
- Majumder, S.; Farah, T.; PRIYANKARoy. Performance analysis of low earth orbit (leo) satellite link in the presence of elevation angle, fading and shadowing. *BRAC University*, p. 69, 2009. Citado na página 21.
- MATEER, T. D. Simple algorithms for decoding systematic reed–solomon codes. *Designs, Codes and Cryptography*, v. 69, n. 1, p. 107–121, Oct 2013. ISSN 1573-7586. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10623-012-9626-1>>. Citado na página 28.
- NASA. *Small Spacecraft Technology State of the Art*. [S.l.], 2015. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 25.
- NASA. Cubesat101: Basic concepts and processes for first-time cubesat developers. *Radio Society of Great Britain*, p. 22–24, oct 2017. Citado 3 vezes nas páginas 15, 20 e 29.
- NASA. *International Space Station Benefits for Humanity, Third Edition*. 2019. Citado na página 19.
- NASA, C. A. *Sputnik 1*. 2017. <https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_924.html>. Acessado em 19-03-14. Citado na página 15.
- NASA, C. L. I. Basic concepts and processes for first-time cubesat developers. p. 86, 10 2017. Citado na página 15.
- NASA-JET. *DSN Functions*. 2016. Disponível em: <<https://deepspace.jpl.nasa.gov/about/functions/>>. Citado na página 16.
- NUGENT, R. et al. Cubesat: The pico-satellite standard for research and education. 09 2008. Citado na página 15.
- ORDUY, J. et al. Pico and nanosatellite ground station architecture development reference process. In: . [S.l.: s.n.], 2016. Citado 3 vezes nas páginas 9, 17 e 28.
- RESNICK, R.; HALLIDAY, D.; KRANE, K. *Física 2*. Livros técnicos e Científicos, 1996. ISBN 9788521610908. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=f4rlAAAACAAJ>>. Citado na página 22.
- RIBEIRO, J. *Engenharia De Antenas - Fundamentos, Projetos E: APLICAÇÕES*. [s.n.], 2014. ISBN 9788536504100. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=s057MAEACAAJ>>. Citado 3 vezes nas páginas 29, 30 e 31.
- ROBINSON, J. et al. *International Space Station Benefits for Humanity, Second Edition*. 2015. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.
- Samsuzzaman, M. et al. Birds-1 cubesat constellation using compact uhf patch antenna. *IEEE Access*, v. 6, p. 54282–54294, 2018. ISSN 2169-3536. Citado na página 25.
- SKAGMO. *NGHam Packet Radio Protocol*. 2015. Disponível em: <https://github.com/skagmo/ngham/blob/master/documentation/ngham_manual.pdf>. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 28.
- STEWART, R. W. et al. *Software Defined Radio Using MATLAB & Simulink and the RTL-SDR*. UK: Strathclyde Academic Media, 2015. ISBN 0992978726, 9780992978723. Citado na página 32.

UNIVERSITY, C. P. S. *CubeSat Design Specification*. 2014. Disponível em: <https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/56e9b62337013b6c063a655a/1458157095454/cds_rev13_final2.pdf>. Citado 3 vezes nas páginas 9, 20 e 21.

Villela, T.; Brandão, A.; Leonardi, R. *Cubesats e oportunidades para o setor espacial brasileiro*. 2016. Citado na página 16.

Villela, T. et al. “Towards the Thousandth CubeSat: A Statistical Overview,”. [S.l.]: International Journal of Aerospace Engineering, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 20.

VOLAKIS, J. *Antenna Engineering Handbook, Fourth Edition*. McGraw-Hill Companies, Incorporated, 2007. ISSN 1063-665X. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=bmdFAAAAYAAJ>>. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 30.

WEITERING, H. 2018. Citado na página 20.

WIKIPEDIA. *Relação de ondas estacionárias*. 2013. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Rela%C3%A7%C3%A3o_de_ondas_estacion%C3%A1rias>. Citado na página 30.

WIKIPEDIA. *Distância de Hamming*. 2019. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Dist%C3%A2ncia_de_Hamming>. Citado na página 28.