

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE INFORMAÇÃO

IGOR DE OLIVEIRA PEREIRA

PROJETO DE UMA ESTAÇÃO RECEPTORA BASEADA EM SDR
PARA ESTIMATIVA DA VELOCIDADE RADIAL DE SATÉLITES
EM ÓRBITAS BAIXAS

Santo André - SP
2019

IGOR DE OLIVEIRA PEREIRA

PROJETO DE UMA ESTAÇÃO RECEPTORA BASEADA EM SDR
PARA ESTIMATIVA DA VELOCIDADE RADIAL DE SATÉLITES
EM ÓRBITAS BAIXAS

Trabalho apresentado ao Curso de Graduação da Universidade Federal do ABC, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro de Informação.

Orientador: Prof. Dr. Ivan Roberto Santana Casella

Santo André - SP
2019

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do ABC
Elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da UFABC
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

de Oliveira Pereira, Igor
PROJETO DE UMA ESTAÇÃO RECEPTORA BASEADA EM SDR PARA
ESTIMATIVA DA VELOCIDADE RADIAL DE SATÉLITES EM ÓRBITAS BAIXAS / Igor
de Oliveira Pereira. — 2019.

55 fls. : il.

Orientador: Ivan Roberto Santana Casella

Trabalho de Conclusão de Curso — Universidade Federal do ABC, Bacharelado em
Engenharia de Informação, Santo André, 2019.

1. Velocidade Radial. 2. SDR. 3. Satélite. 4. VHF. 5. Efeito Doppler. I. Casella, Ivan
Roberto Santana. II. Bacharelado em Engenharia de Informação, 2019. III. Título.

Resumo

Esse trabalho de graduação tem como objetivo apresentar um projeto simplificado baseado em SDR para uma estação terrena capaz de estimar a velocidade radial de satélites em órbitas baixas, através do Efeito Doppler associado ao sinal transmitido na banda VHF. Para tal, será feita a modelagem de uma antena capaz de receber o sinal durante a passagem do satélite, especificado um circuito de amplificação e desenvolvido um *Software* capaz de extrair o desvio em frequência. Com isso, será possível monitorar a velocidade real do satélite em órbita.

Palavras-Chave: Velocidade Radial, SDR, Satélite, VHF, Efeito Doppler.

Abstract

This graduation work has the objective to show a simplified project for a SDR based ground station which estimates the radial velocity of satellites in Low Earth Orbit through the Doppler Effect associated with the signal being transmitted in the VHF band. In order to do that, it will be modeled an antenna to receive the signal during the pass of the satellite, especified an amplification circuit and developed a software to extract the frequency deviation. With this solution, it will be possible to keep track of the real radial velocity of a satellite in orbit.

Keywords: Radial Velocity, SDR, Satellite, VHF, Doppler Effect.

Lista de Figuras

| | | |
|----|---|----|
| 1 | Orbitas terrestres (fora de escala). | 2 |
| 2 | Constelação de satélites do sistema GPS. | 3 |
| 3 | Elementos orbitais. | 5 |
| 4 | Antena da GS instalada na UFSM e utilizada no contexto do projeto NanosatC-BR. | 7 |
| 5 | Janela principal GPredict. | 10 |
| 6 | Principais componentes na placa LimeSDR Mini. | 13 |
| 7 | Diagrama de blocos da placa LimeSDR Mini. | 13 |
| 8 | Arquitetura da solução para estimar desvio Doppler. | 16 |
| 9 | Disposição dos dipolos no espaço. | 19 |
| 10 | Diagrama de radiação no espaço livre para 145MHz. | 19 |
| 11 | Ganho da antena na faixa de 100 à 200MHz. | 20 |
| 12 | Plano vertical do diagrama de radiação. | 20 |
| 13 | Relações geométricas entre satélite, estação e Terra. | 22 |
| 14 | Distância em função da altitude para LEO. | 23 |
| 15 | Diagrama de radiação para um dipolo quarto de onda para $\lambda = 52cm$ (145MHz). | 25 |
| 16 | Diagrama de blocos da DPLL a ser implementada. | 25 |
| 17 | Resposta em magnitude e fase para ω_n de 618 à 31416 rad/s. | 28 |
| 18 | Resposta em magnitude e fase do filtro média-móvel. | 29 |
| 19 | LNA HiLetGo de 30dB de ganho. | 30 |
| 20 | Curva de potência de transmissão do LimeSDR Mini. | 31 |
| 21 | Medida obtida no analisador de espectro em 145,025kHz e magnitude igual a 0,7. | 31 |
| 22 | Tempo de estabilização e estimativa de frequência. | 32 |
| 23 | Distância dos satélites para as passagens selecionadas. | 34 |
| 24 | Velocidade dos satélites para as passagens selecionadas. | 34 |
| 25 | Desvio <i>Doppler</i> considerando um sinal transmitido pelo satélite de 145MHz. | 35 |

| | | |
|----|--|----|
| 26 | Potência recebida durante as passagens. | 36 |
| 27 | Magnitude das amostras IQ durante as passagens, aproximadas para a curva de potência de transmissão do LimeSDR Mini. | 37 |
| 28 | Mudança na frequência devido ao desvio Doppler durante a passagem de cada satélite selecionado. | 37 |
| 29 | Magnitude com codificação <i>Morse</i> | 38 |
| 30 | Conexões entre computador, placa LimeSDR e LNA. | 39 |
| 31 | Representação do <i>Software</i> no GNURadio para os testes realizados com a placa LimeSDR. | 40 |
| 32 | Resultado dos testes realizados para a passagem do satélite CAS-4A transmitindo sinal CW. | 42 |
| 33 | Resultado dos testes realizados para a passagem do satélite Velox-2 transmitindo sinal CW. | 43 |
| 34 | Resultado dos testes realizados para a passagem do satélite CAS-4A transmitido sinal CW/Morse. | 44 |
| 35 | Resultado dos testes realizados para a passagem do satélite Velox-2 transmitido sinal CW/Morse. | 44 |
| 36 | Representação do <i>Software</i> utilizado no GNURadio para teste com receptor RTLSDR. | 46 |
| 37 | Conexões físicas entre computador, LimeSDR, LNA e RTLSDR. | 47 |
| 38 | Resultado dos testes realizados para a passagem do satélite CAS-4A transmitido sinal CW. | 47 |
| 39 | Resultado dos testes realizados para a passagem do satélite Velox-2 transmitido sinal CW. | 48 |
| 40 | Resultado dos testes realizados para a passagem do satélite CAS-4A transmitido sinal CW/Morse. | 49 |
| 41 | Resultado dos testes realizados para a passagem do satélite Velox-2 transmitido sinal CW/Morse. | 49 |
| 42 | Configuração de <i>Hardware</i> utilizada para aquisição real dos <i>Beacons</i> | 50 |

Lista de Tabelas

| | | |
|----|---|----|
| 1 | Exemplos de serviços de comunicação via satélites por faixa de frequência. | 6 |
| 2 | Principais características das placas LimeSDR USB e LimeSDR Mini . | 12 |
| 3 | Características comuns aos <i>Dongles</i> RTLSDR | 14 |
| 4 | Lista de satélites com <i>Beacons</i> na banda VHF e com sinal CW/Morse. | 17 |
| 5 | Parâmetros usados nas simulações da antena. | 18 |
| 6 | Potência recebida esperada para satélites listados na Tabela 3. | 24 |
| 7 | Início das passagens selecionadas para teste. | 33 |
| 8 | Parâmetros de recepção e transmissão considerados para os testes. . . . | 35 |
| 9 | Parâmetros utilizados nos testes com o LimeSDR Mini. | 41 |
| 10 | Erros máximos das estimativas de velocidade para sinal CW (LimeSDR Mini). | 42 |
| 11 | Erros máximos das estimativas de velocidade para sinal CW/Morse (LimeSDR Mini). | 43 |
| 12 | Parâmetros utilizados nos testes com o RTLSDR. | 45 |
| 13 | Erros máximos das estimativas de velocidade para sinal CW (RTLSDR). | 48 |
| 14 | Erros máximos das estimativas de velocidade para sinal CW/Morse (RTLSDR). | 48 |

Glossário

API Application Program Interface.

AWGN Additive White Gaussian Noise.

BOM Bill of Materials.

CW Continuous Wave.

DC Direct Current.

DCO Digitally Controlled Oscillator.

DPLL Digital Phase Locked Loop.

DSP Digital Signal Processor.

FPGA Field Gate Programmable Array.

GEO Geosynchronous Equatorial Orbit.

GPS Global Positioning System.

GS Ground Station.

HEO Highly Elliptical Orbit.

INPE Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

IQ In-phase and Quadrature.

ISS International Space Station.

LEO Low Earth Orbit.

LF Loop Filter.

LS Least Squares.

MEO Medium Earth Orbit.

PLL Phase Locked Loop.

PPM Partes por Milhão.

SDR Software Defined Radio.

SNR Signal to Noise Ratio.

TLE Two-Line Element.

TT&C Telemetry, Tracking and Command.

UFMS Universidade Federal de Santa Maria.

UHF Ultra-High Frequency.

USB Universal Serial Bus.

VHDL Very High Description Language.

VHF Very-High Frequency.

Sumário

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introdução e contextualização | 1 |
| 1.0.1 | Tipos de órbitas | 1 |
| 1.0.2 | Elementos orbitais | 3 |
| 1.0.3 | Frequências de operação | 6 |
| 1.1 | Cubesats | 7 |
| 1.2 | Subsistema de telemetria, rastreamento e comando | 7 |
| 1.2.1 | Principais técnicas para extração da velocidade radial de satélites em órbita | 8 |
| 1.3 | GPredict | 9 |
| 1.4 | Software Defined Radio | 10 |
| 1.4.1 | LimeSDR Mini | 11 |
| 1.4.2 | Realtek SDR - RTLSDR | 14 |
| 1.5 | GNURadio | 14 |
| 1.6 | <i>Beacons</i> em satélites | 15 |
| 2 | Projeto do receptor baseado em SDR | 16 |
| 2.1 | Arquitetura do sistema proposto | 16 |
| 2.1.1 | Antena Dipolo Cruzado Duplo | 17 |
| 2.2 | Atenuação do sinal no espaço livre | 20 |
| 2.3 | Digital Phase Locked Loop | 25 |
| 2.4 | Filtro média-móvel | 28 |
| 3 | Análise de resultados | 30 |
| 3.1 | Caracterização do canal de transmissão do LimeSDR Mini | 30 |
| 3.2 | Performance da PLL | 32 |
| 3.3 | Interpolação da curva preditiva de distância, velocidade e desvio Doppler | 33 |
| 3.4 | Modulação em frequência e amplitude sobre o sinal dos <i>Beacons</i> | 35 |
| 3.4.1 | Codificação <i>Morse</i> sobre o sinal dos <i>Beacons</i> | 38 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.5 | Teste prático da recepção dos <i>Beacons</i> utilizando LimeSDR Mini como receptor | 39 |
| 3.6 | Teste prático da recepção dos <i>Beacons</i> utilizando RTLSDR como receptor | 45 |
| 3.7 | Teste prático com antena Dipolo Cruzado Duplo | 49 |
| 4 | Conclusões | 51 |
| 5 | Referências | 52 |

1 Introdução e contextualização

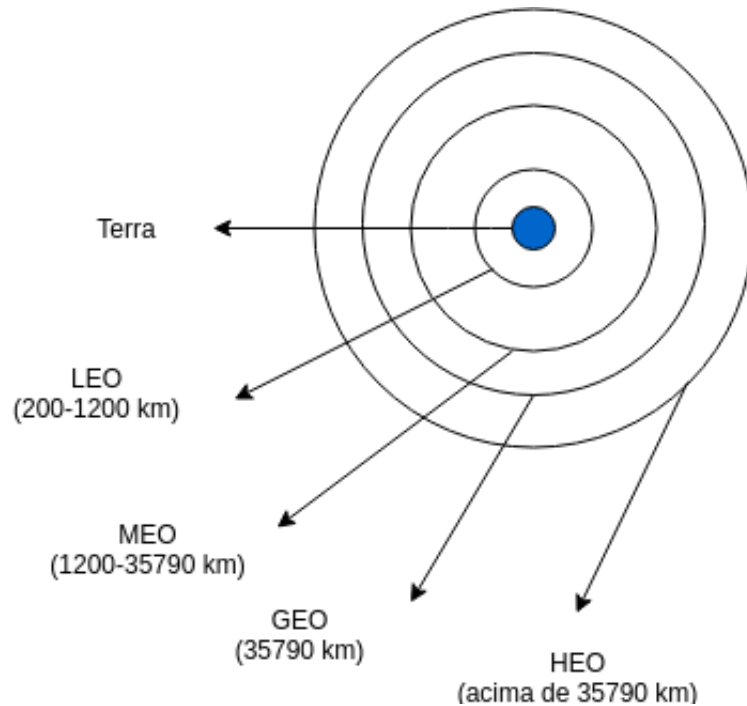
Satélites artificiais são dispositivos colocados em órbita que podem oferecer serviços de comunicação, sensoriamento e geolocalização. São geralmente posicionados em órbita por foguetes lançadores de satélites.

De forma a manter o satélite operacional e em órbita, há subsistemas embarcados no satélite que permitem a realização de controle remoto, monitoramento e localização espacial. Com a difusão do lançamento de Cubesats (satélites de pequeno porte e baixo custo) e devido as restrições de espaço e massa nos mesmos, a utilização de um mesmo subsistema para diferentes funções tem um papel importante nesse tipo de tecnologia. Nesse sentido, esse trabalho propõem descrever um sistema de baixo custo capaz de realizar uma das atividades de monitoramento do estado do satélite, que é a obtenção real da velocidade radial do satélite em órbita. A velocidade radial pode ser estimada através do efeito *Doppler* associado ao sinal transmitido pelo satélite.

1.0.1 Tipos de órbitas

As órbitas utilizadas por satélites são divididas em quatro grupos (tipos), com base em intervalos de distância em relação à superfície terrestre. A Figura 1 mostra como é feita a organização dessas divisões.

Figura 1: Orbitas terrestres (fora de escala).

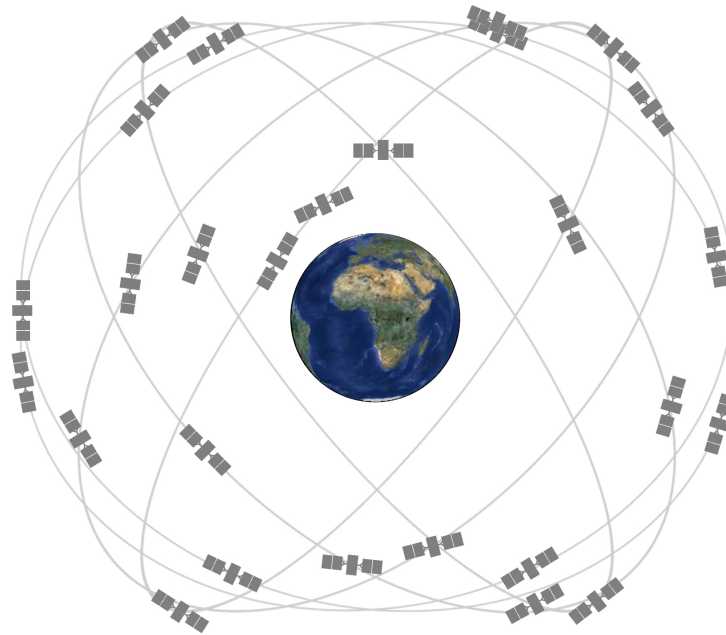


Cada tipo de órbita possui características distintas que as tornam adequadas para determinadas aplicações.

Por exemplo, *Highly Elliptical Orbit* (HEO) são utilizadas em missões de observação do espaço através de telescópios espaciais [1]. *Geosynchronous Earth Orbit* (GEO) são órbitas que possuem período orbital (tempo que leva para fazer uma revolução sobre a terra) igual ao da terra. Dessa forma, é possível manter o satélite em uma localização estática sobre uma região. Essa característica é importante para serviços de comunicação que buscam obter uma cobertura ininterrupta sobre uma região.

O *Global Positioning System* (GPS) possui 24 satélites em 6 planos orbitais posicionados a uma distância de aproximadamente 20200 km (MEO). Os satélites levam aproximadamente 12 horas para completar um círculo orbital (metade do período de rotação da terra em torno do próprio eixo) [2]. A Figura 2 ilustra como a constelação do GPS está arranjada. Com essa configuração, é sempre possível ter 3 ou mais satélites visíveis em qualquer ponto da terra, o que implica na capacidade do sistema de realizar triangulação.

Figura 2: Constelação de satélites do sistema GPS.



Fonte: National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing (2019).

Low Earth Orbit (LEO) são órbitas utilizadas para diversas aplicações. Inclusive, é nesse tipo de órbita que a International Space Station (ISS) está localizada. Pelo fato de serem órbitas mais próximas da superfície, o custo do lançamento também é minimizado em vista do uso de menos combustível pelo veículo lançador [3].

1.0.2 Elementos orbitais

A órbita de um satélite pode ser caracterizada por 7 ou 8 valores denominados elementos orbitais ou elementos keplerianos [4] (o 8º elemento é opcional). Os elementos orbitais obrigatórios para a determinação da órbita, são:

- *Epoch*,
- *Orbital Inclination*,
- *Right Ascension of the Ascending Node*,
- *Argument of Perigee*,
- *Eccentricity*,

- *Mean Motion* e
- *Mean Anomaly*.

O elemento *Epoch* indica a data em que os parâmetros foram determinados. Toda órbita de um satélite artificial é elíptica e o plano formado por essa trajetória elíptica sempre passa pelo centro da Terra. Desse modo, há inúmeras variações possíveis de ângulo de inclinação do plano orbital em relação ao centro da Terra (Linha do Equador). Por isso, é definido o elemento *Orbital Inclination*, que determina um ângulo de 0 à 180° entre o plano orbital e a Linha do Equador.

Após definir a inclinação do satélite em relação à Linha do Equador, ainda não há informação suficiente para definir completamente o plano orbital, pois não se sabe onde esse plano está localizado longitudinalmente no globo terrestre. Para resolver essa indeterminação, o elemento *Right Ascension of the Ascending Node* (RAAN) determina o ângulo no plano equatorial entre o ponto de referência *Vernal Equinox* e o ponto onde a órbita do satélite encontra o plano equatorial.

O ponto onde o satélite está mais próximo da Terra é chamado de Perigeu enquanto o ponto mais distante é denominado de Apogeu. Para orientar então a órbita elíptica dentro do plano orbital, é definido o *Argument of Perigee*, que é o ângulo dentro da curva elíptica da órbita do RAAN ao Perigeu.

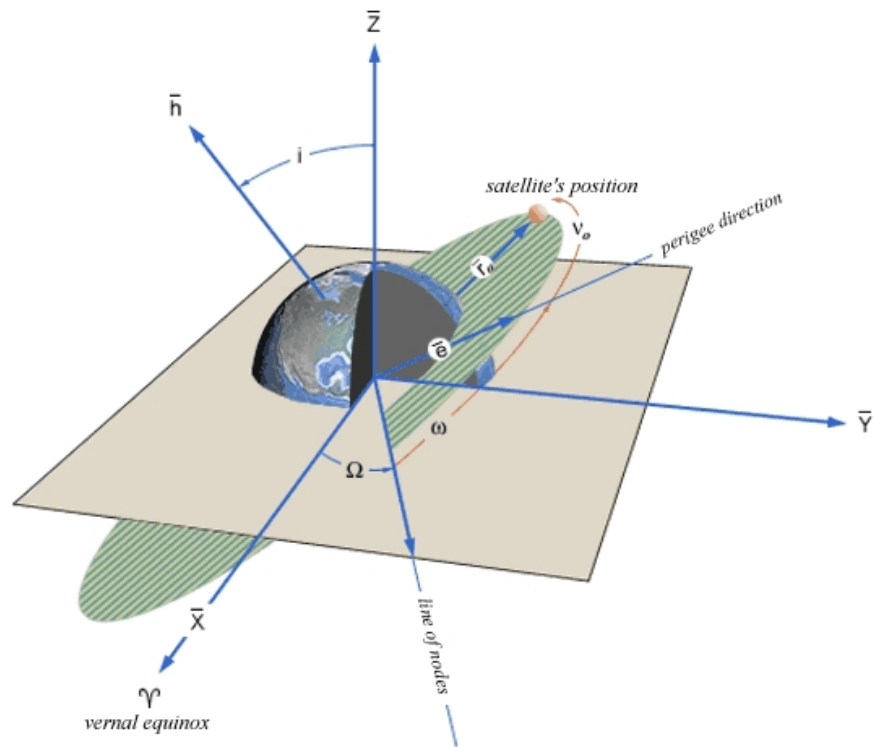
O elemento *Eccentricity* define o formato da órbita e varia de 0 à 1 . Esse elemento nada mais é do que a excentricidade da elipse. Quando mais próximo de 0 , mais o formato da órbita se aproxima de uma circunferência e, quanto mais próximo de 1 , mais achatada.

Mean Motion representa a média de revoluções por dia que o satélite faz sobre a Terra.

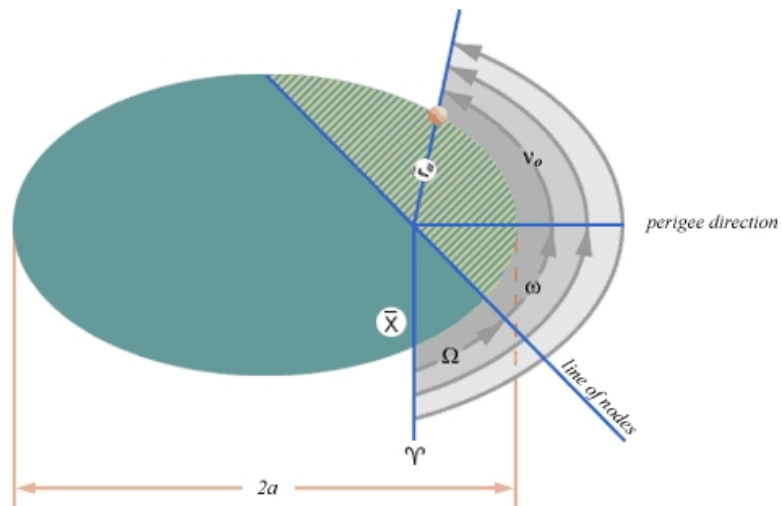
O último elemento necessário para localizar o satélite no espaço, é o *Mean Anomaly*. Esse elemento representa um ângulo que varia uniformemente de 0 à 360° durante uma revolução do satélite. A referência utilizada (ponto onde é 0°) é o Perigeu.

A Figura 3 [17] ilustra todos os elementos orbitais (exceto *Epoch*, elemento temporal).

Figura 3: Elementos orbitais.



- a - defines the size of the orbit
- e - defines the shape of the orbit
- i - defines the orientation of the orbit with respect to the Earth's equator.
- ω - defines where the low point, perigee, of the orbit is with respect to the Earth's surface.
- Ω - defines the location of the ascending and descending orbit locations with respect to the Earth's equatorial plane.
- ν - defines where the satellite is within the orbit with respect to perigee.



Fonte: National Aeronautics and Space Administration (2012).

1.0.3 Frequências de operação

Dentro do espectro eletromagnético há algumas bandas que são comuns em *Links* de comunicação via satélite.

A Tabela 1 abaixo sumariza algumas faixas de frequência utilizadas por satélites em suas respectivas bandas e alguns exemplos de aplicações mais comuns atualmente [18].

Tabela 1: Exemplos de serviços de comunicação via satélites por faixa de frequência.

| Banda | Faixa [MHz] | Exemplos de aplicações |
|----------|-------------|---|
| VHF | 136-138 | comunicações móveis e meteorologia |
| | 144-146 | satélites amadores |
| | 240-270 | comunicações militares |
| UHF | 399.9-403 | sistemas de navegação, posicionamento, tempo, comunicações móveis e meteorologia |
| | 432-438 | satélites amadores |
| | 460-470 | meteorologia e meio-ambiente |
| Band L | 1200-1800 | navegação, posicionamento, meteorologia e comunicações móveis |
| | 1670-1710 | meteorologia |
| Banda S | 2025-2030 | exploração espacial e comunicações militares |
| | 2500-2670 | comunicação ponto-a-ponto e <i>Broadcasting</i> |
| Banda C | 3400-4200 | <i>Broadcasting</i> de vídeo (Televisão) |
| Banda X | 8000-9000 | exploração espacial, pesquisa espacial, meio-ambiente e comunicações militares |
| Banda Ku | 10700-18100 | <i>Broadcasting</i> de vídeo (Televisão) e serviços ponto-a-ponto (ligações telefônicas, por exemplo) |
| Banda Ka | 23000-27000 | <i>Broadcasting</i> , meio-ambiente e exploração espacial |

1.1 Cubesats

Cubesats são satélites de pequeno porte com dimensões e massa padronizadas. É um meio viável para muitas entidades como governos, universidades e empresas para empreender alguma atividade no espaço [6].

É comum em Cubesats o emprego de sistemas de comunicação que funcionam nas bandas *Very-High Frequency* (VHF) e *Ultra-High Frequency* UHF. Isso se deve à complexidade reduzida de implementação de tais sistemas em comparação com sistemas desenvolvidos para bandas de mais alta frequência. Além disso, há módulos comerciais desenvolvidos para essas bandas e destinados especificamente para *Cubesats* [7]. Por exemplo, o primeiro nanosatélite brasileiro, NanosatC-BR, desenvolvido em uma parceria entre o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), possui um *Beacon* na banda VHF instalado [8]. A Figura 4 mostra a antena utilizada na *Ground Station* (GS) de controle do NanosatC-BR, instalada na cidade de Santa Maria-RS [9].

Figura 4: Antena da GS instalada na UFSM e utilizada no contexto do projeto NanosatC-BR.



Fonte: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2018).

1.2 Subsistema de telemetria, rastreamento e comando

Os subsistemas destinados à manutenção das funções de um satélite estão agrupados no conjunto *Telemetry, Tracking and Command* (TT&C). O subsistema de

telemetria (*Telemetry*) é responsável por transmitir os dados coletados dos sensores espalhados pelo satélite para o link de comunicação em direção à Terra. A determinação da localização do satélite no espaço é realizado pelo subsistema de rastreamento (*Tracking*). Se houver a necessidade de modificar algum parâmetro do satélite, o sistema responsável por tal tarefa é o subsistema de comando (*Command*).

1.2.1 Principais técnicas para extração da velocidade radial de satélites em órbita

Ao se distanciar ou se aproximar da Terra, o sinal propagado pelo satélite ou pela estação terrena sofre um atraso variável. Essa taxa de variação na distância, traduz-se como a velocidade radial do satélite. A razão entre a velocidade radial do satélite e a velocidade de propagação da luz é proporcional ao quanto a frequência nominal utilizada no link variou. Esse efeito é conhecido como efeito Doppler e para um sinal com frequência nominal f_n , a Equação 1 dá a velocidade radial:

$$v_r = -\frac{cf_d}{f_n} \quad (1)$$

No qual:

- f_d : desvio doppler;
- f_n : frequência nominal;
- v_r : velocidade radial;
- c : velocidade de propagação da luz.

O sistema mais simples empregado para extração da velocidade radial de um satélite é denominado *Two-Way Doppler Ranging* [10]. Esse sistema envia um sinal *Continuous Wave* (CW) para o satélite a partir da GS e o satélite o retransmite de volta para a mesma GS. O sistema é projetado dessa forma pois permite também a extração da distância, através do tempo de propagação entre a transmissão do sinal e a sua recepção.

A Equação 2 e a Equação 3 mostram simplificadaamente como os sinais de *Uplink* (da GS para o satélite) e *Downlink* (do satélite para a GS), no contexto de TT&C são comumente modulados [11].

$$s_{up}(t) = A_{up} \cos(2\pi f_{up}t + m_{TC}d_{TC}(t) \cos(2\pi f_{TC}t) + m_{RG}[\cos(2\pi f_{RG}t)]) \quad (2)$$

$$s_{down}(t) = A_{down} \cos(2\pi f_{down}t + m_{TM}d_{TM}(t) \cos(2\pi f_{TM}t) + m_{RG}[\cos(2\pi f_{RG}t)]) \quad (3)$$

Na qual:

- A_{up} e A_{down} : amplitude da portadora de *Up* e *Downlink*, respectivamente;
- f_{up} e f_{down} : frequência da portadora de *Up* e *Downlink*, respectivamente;
- m_{TC} , m_{RG} e m_{TM} : índices de modulação dos sinais de TT&C;
- d_{TC} e d_{TM} : sinais banda-base de comando e telemetria;
- f_{TC} , f_{RG} , f_{TM} : frequência das portadoras de TT&C.

Para extrair a velocidade radial, a GS extrai o desvio *Doppler* a partir do sinal de *Ranging* retransmitido pelo satélite (frequência nominal f_n igual a f_{RG}).

1.3 GPredict

GPredict é um *Software* de código livre utilizado para estimar variáveis como distância, velocidade e altitude para satélites orbitando a Terra. O *Software* faz a predição a partir da entrada dos elementos orbitais no formato *Two-Line Elements* (TLE).

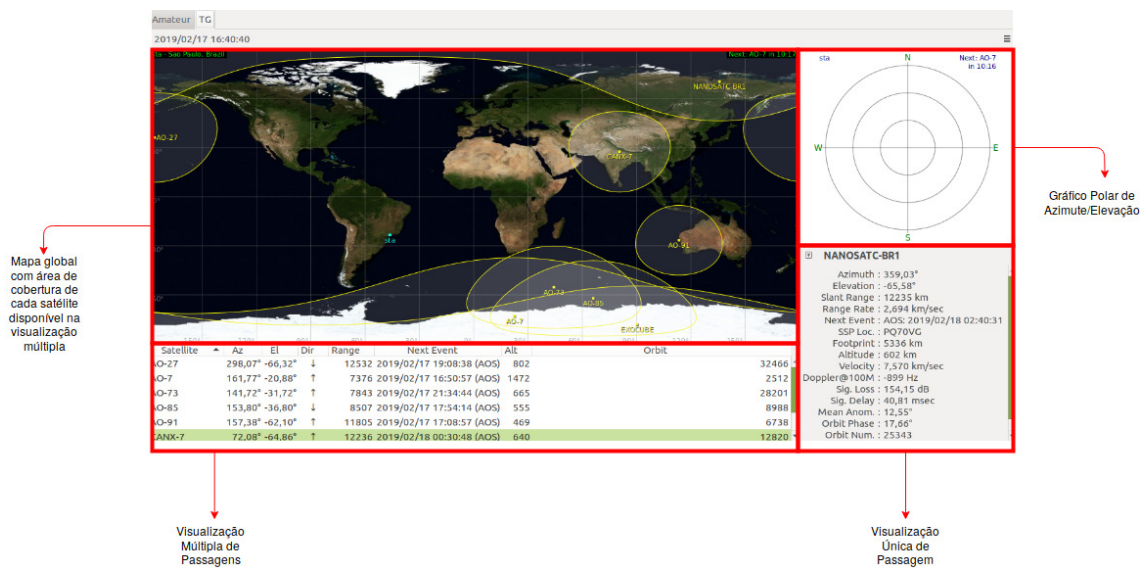
Os arquivos TLE representam de maneira conveniente dados sobre o satélite, como identificação e principalmente elementos orbitais [12].

O GPredict possui a funcionalidade de exportação dos dados da passagem do satélite sobre uma coordenada especificada, porém o arquivo gerado possui limitação de

resolução, sendo possível obter um intervalo mínimo de 1s entre cada ponto. Portanto, para usar esses dados como entrada em uma simulação, faz-se necessário interpolá-los.

A interface do *Software* é intuitiva e possui diferentes módulos que auxiliam no acompanhamento das passagens dos satélites selecionados. Na Figura 5, são indicadas as 4 áreas da janela principal e suas funções.

Figura 5: Janela principal GPredict.



1.4 Software Defined Radio

Os sistemas SDR tem por objetivo diminuir a complexidade envolvida no desenvolvimento de sistemas de comunicação, levando partes que anteriormente eram implementadas fisicamente no *Hardware*, para o domínio do *Software*. Podemos enumerar as seguintes vantagens relacionadas ao emprego de SDR em projetos de sistemas de comunicação [13]:

1. **Facilidade de desenvolvimento:** o desenvolvimento de sistemas tradicionais de rádio comunicação geralmente demandam muita experiência e um conhecimento aprofundado da interação dos componentes eletrônicos a serem utilizados pelos engenheiros. O uso de SDR diminui o ciclo de desenvolvimento de um equipamento e diminui a interação do engenheiro com o *Design* do *Hardware* analógico.

2. **Facilidade de fabricação:** como dificilmente dois componentes eletrônicos apresentam as mesmas características de funcionamento, há sempre um custo associado a sua fabricação devido a fase de testes. Contudo *Digital Signal Processors* (DSP), por exemplo, rodando um mesmo *Software*, produz sempre uma mesma saída (mesmas condições de funcionamento), diminuindo assim o custo associado aos testes.
3. **Operação multimodo:** com o desenvolvimento frequente de novos padrões de comunicação e com a necessidade de um mesmo equipamento funcionar para diferentes deles, a possibilidade de adaptar o sistema via *Software* torna-se mais vantajosa em relação a custos e praticidade do que adaptar o sistema através de modificações no *Hardware*.
4. **Uso de técnicas avançadas de processamento de sinais:** a disponibilidade de ter um processador digital de sinais em um sistema de comunicação permite a implementação de técnicas avançadas e abre espaço para o emprego de técnicas como por exemplo *Cognitive Radio* [14], que consiste em alterar parâmetros de funcionamento do sistema durante seu funcionamento a partir de dados obtidos do ambiente ou de modelos preditivos.

1.4.1 LimeSDR Mini

A Lime Microsystems é uma empresa que desenvolve plataformas e transceptores SDR. Foi fundada em 2005 e atualmente é sediada no Reino Unido.

Em 2006 a empresa conseguiu financiar o projeto da plataforma LimeSDR USB via *Crowdfunding*. Essa plataforma carrega consigo o *Chip* LMS7002M, que possui dois canais de transmissão e recepção que podem ser configurados de 100kHz à 3,8GHz e com banda máxima de aproximadamente 61MHz.

A partir do projeto LimeSDR USB, foi desenvolvido um modelo mais limitado e de menor custo, denominado LimeSDR Mini. Esse modelo, em relação ao LimeSDR USB, possui apenas um canal de transmissão e recepção.

Todos os *Softwares*, esquemáticos e *Bill of Materials* (BOMs) do projeto estão disponíveis na *Internet* e estão licenciados sob licenças de código livre como a Apache 2.0 [15] e GNU Public License (GPL) [16].

Os *Softwares* relacionados com a plataforma, incluem:

- **Limesuite:** ferramenta gráfica utilizada para parametrizar, calibrar e testar as placas. Incluí também a *Application Program Interface* (API) escrita em C++ para acessar o *Hardware* via interface *Universal Serial Bus* (USB);
- **LimeSDR Gateway:** código fonte em *Very High Description Language* (VHDL) da lógica instanciada no *Field Gate Programmable Array* (FPGA) da placa, bem como código escrito na linguagem C do processador instanciado na FPGA;
- **GR-Limesdr:** blocos funcionais instanciáveis na plataforma GNURadio.

Todos os *Softwares* elencados podem ser utilizados com o modelo USB e Mini.

A Tabela 2 coloca lado a lado as características obtidas em [18] e [19] para os dois modelos vendidos pela Lime Microsystems.

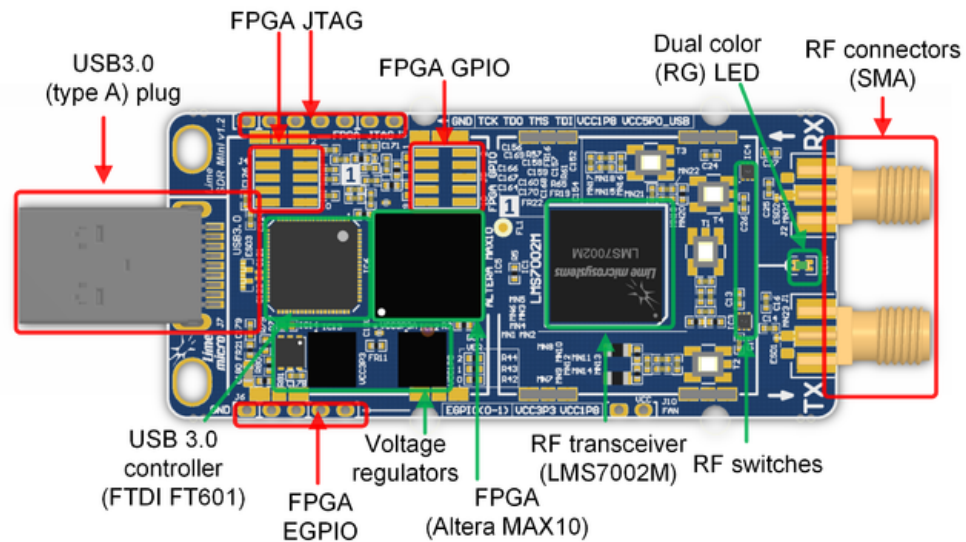
Tabela 2: Principais características das placas LimeSDR USB e LimeSDR Mini

| | LimeSDR USB | LimeSDR Mini |
|---------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Tranceptor SDR | LMS7002M | LMS7002M |
| Canais de TX | 2 | 1 |
| Canais de RX | 2 | 1 |
| FPGA | Altera Cyclone IV | Intel Max 10 |
| Interface | USB 3.0 | USB 3.0 |
| Oscilador | Rakon RPT7050A @30.72MHz | Rakon RTX5032A @40.00MHz |
| Estabilidade do Oscilador | Até ± 4 ppm | Até ± 4 ppm |
| Frequências | 100kHz à 3,8GHz | 10MHz à 3,5GHz |
| Banda | 61,44MHz | 30,72MHz |
| Potência TX | até 10dBm (depende da frequência) | até 10dBm (depende da frequência) |
| Resolução ADC | 12 bits | 12 bits |
| Preço | US\$299 | US\$159 |

Devido às características similares e o custo reduzido, foi escolhido para esse projeto o modelo LimeSDR Mini.

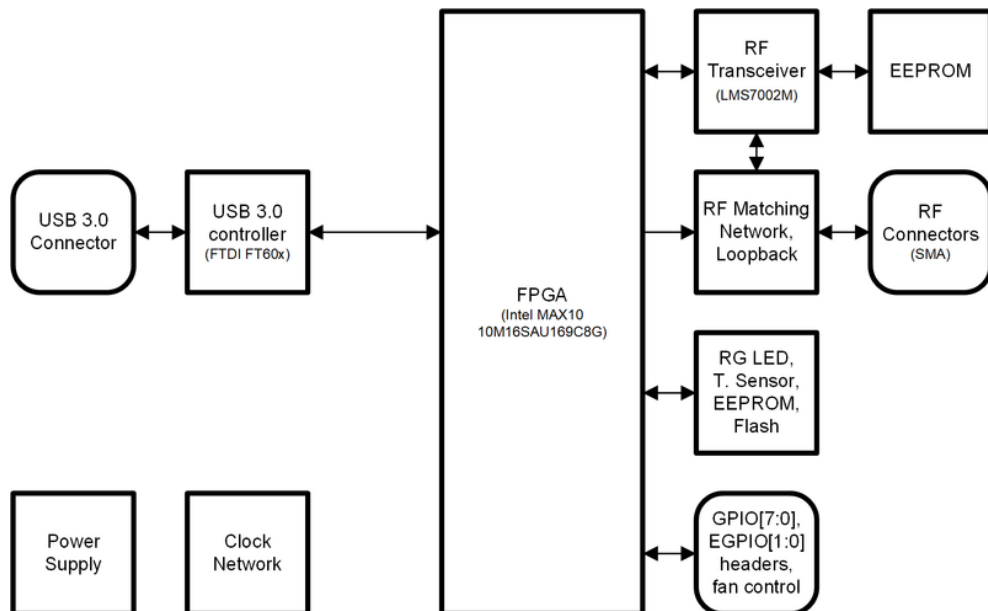
A Figura 6 [19] mostra graficamente o *Design* da placa LimeSDR Mini, bem como indica os seus principais componentes. Na Figura 7 é apresentado o diagrama de blocos da placa.

Figura 6: Principais componentes na placa LimeSDR Mini.



Fonte: MyriadRF (2019)

Figura 7: Diagrama de blocos da placa LimeSDR Mini.



Fonte: MyriadRF (2019)

1.4.2 Realtek SDR - RTLSDR

Os *Dongles* RTLSDR (como são normalmente chamados) são sistemas SDR que surgiram a partir da análise do *Chip* desenvolvido pela Realtek e cujo propósito inicial era receber sinais de TV Digital [20].

Esses *Dongles* são comumente formados pelo conjunto de dois *Chips*:

- R802T: responsável pela transformação do sinal de RF recebido para banda base.
- RTL2832U: transforma o sinal banda base gerado pelo R802T, em amostras para serem enviadas pela interface USB.

A Tabela 3 sumariza as características comuns encontradas nos *Dongles* RTLSDR.

Tabela 3: Características comuns aos *Dongles* RTLSDR

| | RTL2832U + R802T |
|------------|-------------------------|
| Frequência | de 500kHz à 1,75GHz |
| Banda | 3,2MHz |
| Oscilador | 28,8MHz |
| Preço | US\$25 |

Devido ao projeto ter surgido a partir da modificação da aplicação de um *Chip* destinado a uma outra função, por pessoas não relacionadas a empresa que o desenvolveu, não há informações oficiais disponíveis. O *Blog* RTL-SDR reúne uma significativa parte das informações sobre o *Hardware* e o *Software* dos *Dongles*.

Para o projeto, foi selecionado o modelo NooElec NESDR Smart Bundle que possui um oscilador com estabilidade de 0,5 partes por milhão (PPM) (mais estável do que o do LimeSDR Mini).

1.5 GNURadio

GNURadio é um *Software* que permite a criação, modelagem e implementação de sistemas de comunicação através de uma representação gráfica por diagramação [11].

O ambiente de desenvolvimento apresenta uma estrutura modular e possui várias bibliotecas nativas para auxiliar na implementação de diferentes sistemas de

comunicação. Podemos citar como exemplo: moduladores, demoduladores, filtros e circuitos de sincronismo.

A distribuição do GNURadio acompanha a interface gráfica *GNURadio Companion* (GRC) que permite a estruturação de um sistema de comunicação de forma rápida e prática. Essa interface permite que sejam organizados blocos que implementam determinadas funções e definir as suas respectivas conexões.

Toda a parte de processamento desse projeto será feita através do GNURadio.

1.6 *Beacons* em satélites

Beacon é um subsistema a bordo de muitos satélites e é utilizado principalmente para transmitir dados simples do estado do satélite ou sua identificação [22].

A transmissão dos dados geralmente é codificada em *Morse* e a modulação do sinal é feita em amplitude. O alfabeto *Morse* é composto por palavras formadas por sequências de pontos e traços. Esses símbolos são codificados no sinal CW na forma da ausência ou presença do sinal. Apesar do termo CW indicar um sinal de frequência e amplitude contínua ao longo do tempo, é comum designar os *Beacons* como CW mesmo havendo modulação em amplitude.

Apesar do sinal ser modulado em amplitude, é possível obter o desvio Doppler para o período em que o sinal está sendo transmitido, sendo necessário portanto lidar com a ausência do sinal. Esse projeto pretende explorar a capacidade de conseguir estimar a velocidade radial de satélites na banda VHF através da extração do desvio Doppler nos sinais dos *Beacons*.

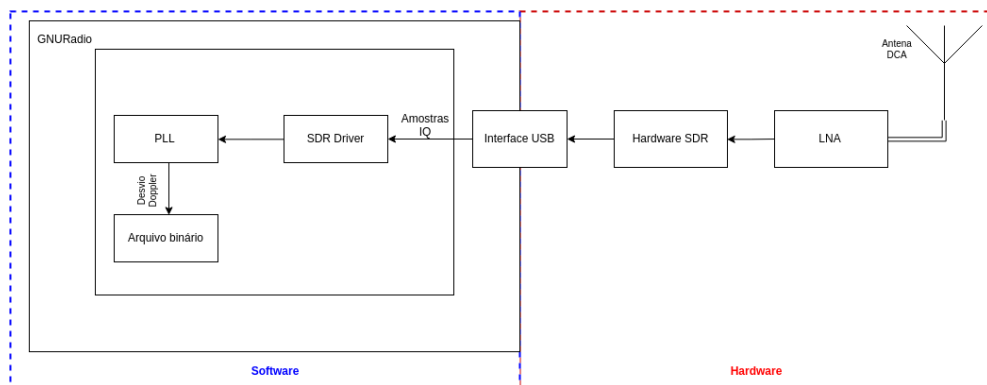
2 Projeto do receptor baseado em SDR

O objetivo desse projeto é o desenvolvimento de um sistema simplificado em SDR para estimar a velocidade radial de satélites através de seu *Beacon CW/Morse*, na banda VHF. Será feita a modelagem e a implementação de uma *Phase Locked Loop* (PLL) em *Software* dentro da plataforma GNURadio para extrair o desvio em frequência. Também será necessário simular o sinal transmitido pelo satélite e, para tal, será desenvolvido um bloco para GNURadio que receba dados de um arquivo de teste e gere o desvio Doppler em banda base.

2.1 Arquitetura do sistema proposto

A Figura 8 mostra esquematicamente a arquitetura do sistema proposto.

Figura 8: Arquitetura da solução para estimar desvio Doppler.



Nessa arquitetura, o sinal do satélite será recebido por uma antena cujas características permitam o recebimento do sinal sem o auxílio de servomecanismo (a introdução de um servomecanismo na antena para acompanhar a passagem do satélite aumenta significativamente a complexidade do sistema) e será amplificado por um LNA. Após ser amplificado, o sinal será inserido na placa SDR, que fará a conversão do sinal para banda base. As amostras do sinal em banda base capturadas pelo SDR serão enviadas via interface USB para o computador. No computador estará sendo executada uma aplicação sobre o GNURadio que controla o fluxo das amostras do *Hardware SDR* para o aplicação (função desempenhada pelo *Driver* do dispositivo),

as processa (PLL implementada em *Software*) e por fim armazena a estimativa da frequência do desvio Doppler em arquivo.

As seções seguintes descrevem com mais detalhes os elementos ilustrados na Figura 8.

2.1.1 Antena Dipolo Cruzado Duplo

A antena a ser projetada deve possuir diagrama de radiação próximo do isotrópico para que não seja necessário utilizar servomecanismo para seguir o satélite e manter o sinal dentro da abertura da antena. Além disso, é importante que haja um ganho ligeiramente maior nas extremidades do diagrama de radiação para evitar a perda do sinal no início e término da passagem, pois nesses instantes a distância do satélite em relação à estação será maior.

Uma antena que possui tais características é a Antena Dipolo Cruzado Duplo, simulada e implementada em [24]. Essa antena é composta por um conjunto de quatro dipolos. Cada dipolo está posicionado a uma distância de um quarto do comprimento de onda em relação à origem do plano X/Y. Os mesmos dipolos são inclinados 30° em relação ao eixo Z e cada par presente no mesmo eixo no plano X/Y é alimentado com uma diferença de fase de 90° .

Projetando uma antena em 145MHz, espera que seja possível receber todos os *Beacons* listados na Tabela 4. Essa Tabela foi obtida através de uma lista compilada pelo rádio amador JE9PEL. Dessa lista, foram selecionados todos os satélites com *Beacon* VHF e sinal CW/Morse.

Tabela 4: Lista de satélites com *Beacons* na banda VHF e com sinal CW/Morse.

| Satélite | Frequência Beacon CW |
|-----------------------|----------------------|
| TIsat-1 | 145,980 |
| First-MOVE | 145,970 |
| DUCHIFAT | 145,980 |
| NanosatC-Br1 (NCBR-1) | 145,865 |

| | |
|--------------------------|---------|
| UKube-1 | 145,840 |
| CAS-3A (XW-2A) | 145,640 |
| CAS-3A (XW-2A) | 145,660 |
| CAS-3B (XW-2B) | 145,705 |
| CAS-3B (XW-2B) | 145,725 |
| CAS-3C (XW-2C) | 145,770 |
| CAS-3C (XW-2C) | 145,790 |
| CAS-3D (XW-2D) | 145,835 |
| CAS-3D (XW-2D) | 145,855 |
| CAS-3E (XW-2E) | 145,890 |
| CAS-3E (XW-2E) | 145,910 |
| CAS-3F (XW-2F) | 145,955 |
| CAS-3F (XW-2F) | 145,975 |
| VELOX-2 | 145,930 |
| CAS-4A (ZHUHAI-1 01) | 145,855 |
| CAS-4B (ZHUHAI-1 02) | 145,910 |
| Max Valier Sat | 145,960 |
| MOVE-2 | 145,950 |
| JY1SAT (FUNcube-6 JO-97) | 145,840 |

Para validar as informações apresentados em [23] a cerca da antena, foi realizada uma simulação eletromagnética no *Software* 4NEC2, com os seguintes parâmetros:

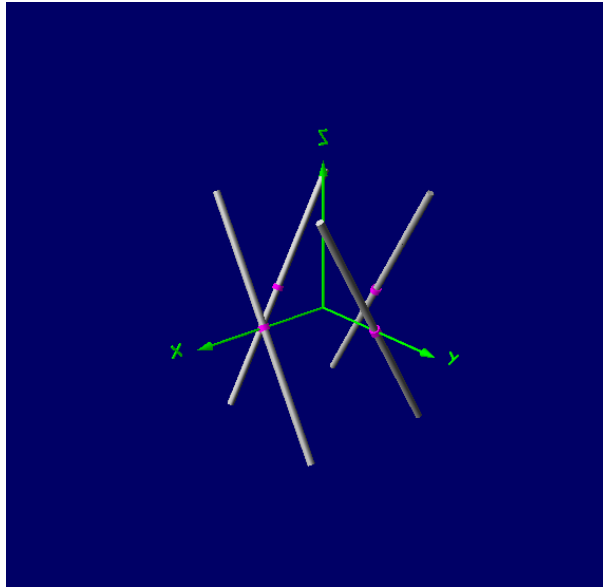
Tabela 5: Parâmetros usados nas simulações da antena.

| | |
|--|-------|
| Ângulo dos dipolos em relação ao eixo Z | 30° |
| Espaçamento entre dipolos no mesmo eixo | 50 cm |
| Comprimento de cada dipolo | 92 cm |

Na Figura 9 é apresentada a disposição espacial dos dipolos. Os ganhos na

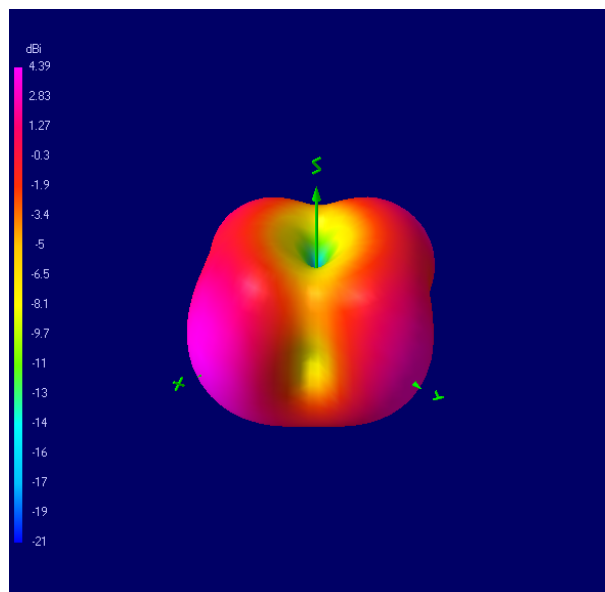
Figura 10, Figura 11 e Figura 12 estão todos em dBi (ganho em relação a um padrão de radiação isotrópico).

Figura 9: Disposição dos dipolos no espaço.



A Figura 10 mostra o diagrama de radiação em uma representação tridimensional. É possível notar as regiões de maior ganho nas extremidades do plano X/Y. O eixo X ou Y deve estar alinhado com a direção da ascensão do satélite para que durante o início e fim de sua passagem o ganho seja maior.

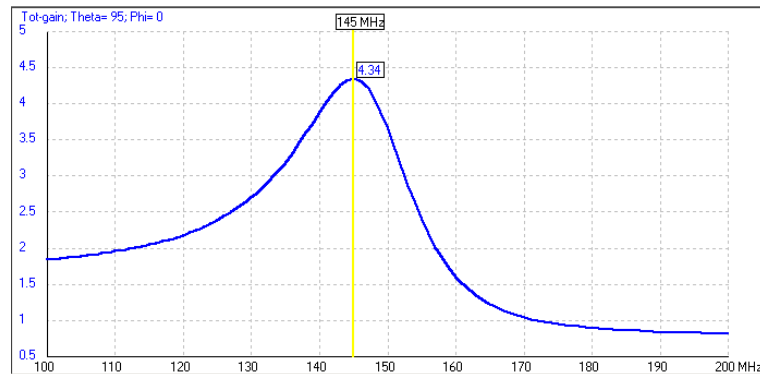
Figura 10: Diagrama de radiação no espaço livre para 145MHz.



Na Figura 11 é possível notar que o ganho máximo da antena não fica menor

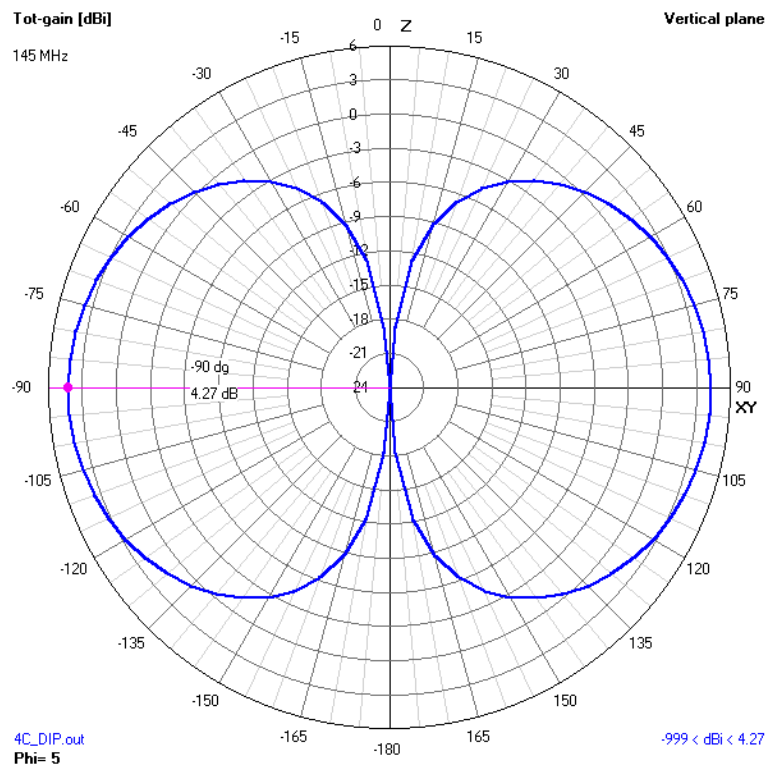
do que 3,5dBi em uma faixa de ± 5 MHz em torno da frequência central (145MHz).

Figura 11: Ganho da antenna na faixa de 100 à 200MHz.



No plano vertical do diagrama de radiação da antenna (Figura 12), observa-se a variação do ganho ao longo dos ângulos de elevação, com os máximos localizados nas extremidades ($\pm 90^\circ$).

Figura 12: Plano vertical do diagrama de radiação.



2.2 Atenuação do sinal no espaço livre

Para validar a capacidade do sistema de receber os sinais dos Beacons listados na Tabela 4, foi realizado o cálculo da potência recebida após a antenna utilizando a

Equação da Propagação no Espaço Livre (Equação 4).

$$P_{rx} = P_{tx} G_{tx} G_{rx} \left(\frac{c}{4\pi D f_n} \right)^2 \quad (4)$$

Na qual:

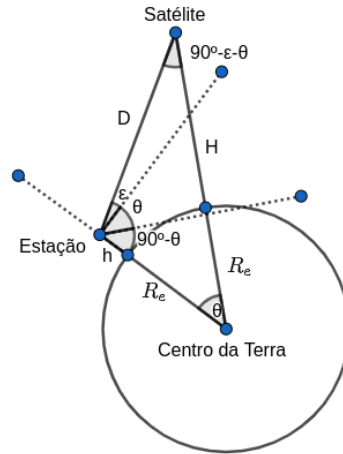
- P_{rx} : potência recebida;
- P_{tx} : potência de transmissão;
- G_{tx} : ganho da antena usada na transmissão;
- G_{rx} : ganho da antena de recepção;
- c : velocidade da luz no vácuo;
- D : distância entre transmissor e receptor;
- f_n : frequência nominal do sinal.

Faz-se necessário calcular a potência recebida, pois ela deve ser maior do que o limiar de recepção dos SDRs, que podem ser ajustados via *Software*.

A partir da Figura 13, é possível deduzir a Equação 5, que relaciona as seguintes variáveis e constantes:

- R_e : raio médio da Terra;
- H : altitude do satélite em relação ao nível do mar;
- h : altitude da estação acima do nível do mar;
- ϵ : ângulo entre a estação e o satélite, com relação à superfície.

Figura 13: Relações geométricas entre satélite, estação e Terra.



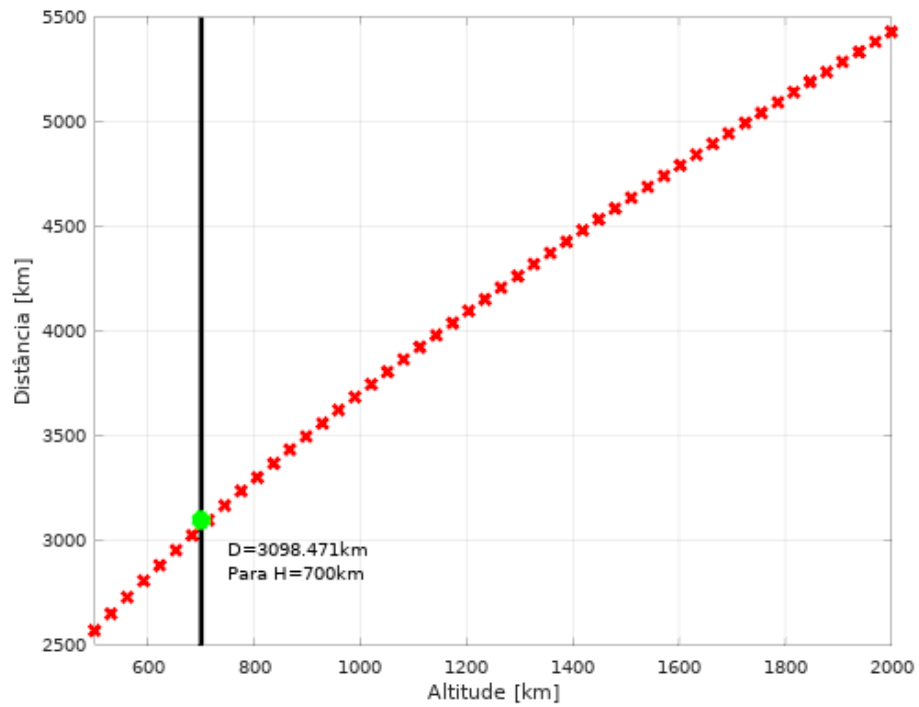
$$(R_e + H)^2 = D^2 + (R_e + h)^2 - 2D(R_e + h)\cos(90^\circ + \epsilon) \quad (5)$$

A partir da Equação 5, se for considerado um ângulo $\epsilon = 0^\circ$ ou $\epsilon = 180^\circ$, teremos o momento em que a distância será a maior durante a passagem do satélite em relação à GS. Como a potência do sinal é inversamente proporcional ao quadrado da distância, esses serão os pontos críticos do sistema, onde a potência recebida será mínima. Para $\epsilon = 0^\circ$ ou $\epsilon = 180^\circ$, é obtida a Equação 6.

$$D = \sqrt{(R_e + H)^2 - (R_e + h)^2} \quad (6)$$

Para os testes a serem realizados, será considerada a altitude $h = 760\text{m}$ para a estação, que é a altitude média da cidade de Santo André-SP [24] e $R_e = 6370\text{km}$ como o raio médio da Terra. A curva na Figura 14 mostra a máxima distância para a máxima altitude dentro da LEO. O sistema será projetado para receber no máximo sinais transmitidos a uma distância de 3098.5km .

Figura 14: Distância em função da altitude para LEO.



A partir da Equação 6, do ganho obtido para a antena projetada e dos dados de potência transmitida dos satélites obtidos de [26] à [34], podemos calcular a potência recebida esperada para a lista de satélites (Tabela 6):

Tabela 6: Potência recebida esperada para satélites listados na Tabela 3.

| Satélite | Frequência Beacon CW [MHz] | P_{tx} [dBm] | ${}^1G_{tx}$ [dB] | G_{rx} [dB] | R [km] | P_{rx} [dBm] |
|--------------------------|-------------------------------------|-------------------|----------------------|------------------|-------------|-------------------|
| TI sat-1 | 145,98 | 26 | 1,87 | 4,34 | 3098,5 | -113,38 |
| First-MOVE | 145,97 | 26 | | | | -113,38 |
| DUCHIFAT | 145,98 | 23 | | | | -116,38 |
| NanosatC-Br1 (NCBR-1) | 145,865 | 50 | | | | -89,37 |
| UKube-1 | 145,84 | ² 26 | | | | -113,37 |
| CAS-3A (XW-2A) | 145,64 | 17 | | | | -122,36 |
| CAS-3A (XW-2A) | 145,66 | 17 | | | | -122,36 |
| CAS-3B (XW-2B) | 145,705 | 17 | | | | -122,36 |
| CAS-3B (XW-2B) | 145,725 | 17 | | | | -122,37 |
| CAS-3C (XW-2C) | 145,77 | 17 | | | | -122,37 |
| CAS-3C (XW-2C) | 145,79 | 17 | | | | -122,37 |
| CAS-3D (XW-2D) | 145,835 | 17 | | | | -122,37 |
| CAS-3D (XW-2D) | 145,855 | 17 | | | | -122,37 |
| CAS-3E (XW-2E) | 145,89 | 17 | | | | -122,38 |
| CAS-3E (XW-2E) | 145,91 | 17 | | | | -122,38 |
| CAS-3F (XW-2F) | 145,955 | 17 | | | | -122,38 |
| CAS-3F (XW-2F) | 145,975 | 17 | | | | -122,38 |
| VELOX-2 | 145,93 | ³ 20 | | | | -119,38 |
| CAS-4A (ZHUHAI-1 01) | 145,855 | 17 | | | | -122,37 |
| CAS-4B (ZHUHAI-1 02) | 145,91 | 17 | | | | -122,38 |
| Max Valier Sat | 145,96 | 37 | -102,38 | | | |
| MOVE-2 | 145,95 | 26 | -113,38 | | | |
| JY1SAT (FUNcube-6 JO-97) | 145,84 | 27 | -112,37 | | | |

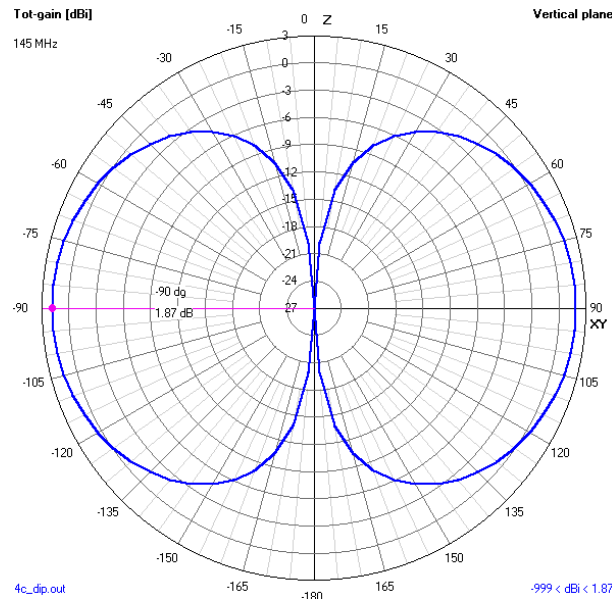
Para facilitar os cálculos, foi considerado o uso de uma antena dipolo quarto de onda para todos os satélites. A simulação eletromagnética dessa antena no *Software* 4NEC2, para a frequência de 145MHz, resulta no padrão de radiação da Figura 15, com um ganho de 1,87 dBi nos extremos horizontais.

¹Ganho de um dipolo $\frac{\lambda}{4}$ em $\pm 90^\circ$ para $\lambda = \frac{310^8}{14510^6} = 52cm$ (Figura 15). Essa antena é comum entre os satélites listados na Tabela 3.

²Potência transmitida não encontrada. Considerando 26dBm, apenas como estimativa.

³Potência transmitida não disponível. Considerando 20dBm, apenas como estimativa.

Figura 15: Diagrama de radiação para um dipolo quarto de onda para $\lambda = 52\text{cm}$ (145MHz).

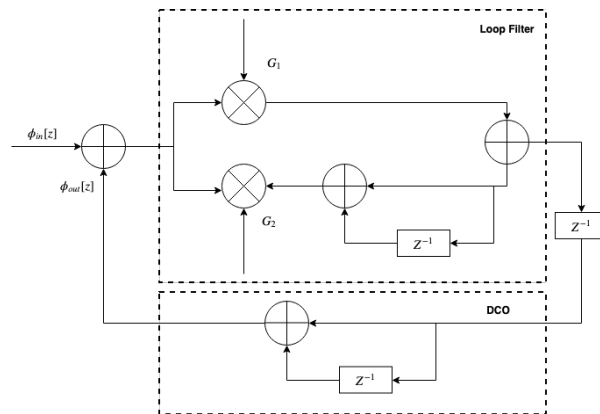


2.3 Digital Phase Locked Loop

A frequência de um sinal pode ser estimada através de um sistema de controle que tenta minimizar a diferença de fase de um sinal de entrada em relação à uma referência. A PLL é o dispositivo que desempenha essa função e pode ser desenvolvida com componentes analógicos ou digitais.

Dentre os modelos de *Digital Phase Locked Loop* DPLL descritos em [35], será utilizado o modelo mais empregado, que é o de segunda ordem. A Figura 16 a seguir descreve o diagrama de blocos da DPLL a ser implementada.

Figura 16: Diagrama de blocos da DPLL a ser implementada.



Há dois componentes principais na DPLL descrita na Figura 16:

- *Loop Filter* (LF): efetivamente o circuito responsável pela minimização do erro em fase entre a referência e o sinal de entrada. É constituído por um integrador e derivador.
- *Digitally Controlled Oscillator* (DCO): responsável por gerar a referência de fase.

A Equação 7 e a Equação 8 descrevem as funções de transferência no domínio Z do LF e do DCO, respectivamente.

$$H_{LF}[z] = G_1 + \frac{G_2}{1 - Z^{-1}} \quad (7)$$

$$H_{DCO}[z] = \frac{1}{1 - Z^{-1}} \quad (8)$$

A partir da Equação 7 e da Equação 8, a função de transferência do sistema pode ser obtida:

$$H[z]_{DPLL} = \frac{\phi_{out}[z]}{\phi_{in}[z]} = \frac{(G_1 + G_2)Z - G_1}{Z^2 + (G_1 + G_2 - 2)Z + (1 - G_1)} \quad (9)$$

Os coeficientes G_1 e G_2 do derivador e do integrador, respectivamente, podem ser aproximados (função de transferência do sistema no domínio s não possui zero) através do mapeamento dos polos da função de transferência de um sistema de segunda ordem no domínio s (laplaciano) para o domínio Z [36]. Seja a função de transferência de um sistema de segunda ordem no domínio s :

$$H_s(s) = \frac{\bar{\omega}^2}{s^2 + 2\zeta\bar{\omega}_n s + \bar{\omega}_n^2} \quad (10)$$

Na qual:

- $\bar{\omega}_n$: frequência natural de oscilação do sistema;
- ζ (*Damping Factor*): fator de amortecimento.

Os polos S_0 e S_1 da Equação 10, são:

$$S_0 = -\zeta\bar{\omega}_n + j\bar{\omega}_n\sqrt{1-\zeta^2} \quad (11)$$

$$S_1 = -\zeta\bar{\omega}_n - j\bar{\omega}_n\sqrt{1-\zeta^2} \quad (12)$$

Levando a Equação 11 e a Equação 12 para o domínio Z (Equação 13 e Equação 14) é possível obter G_1 e G_2 igualando os polos da função de transferência no domínio Z aos polos mapeados a partir da função no domínio s . A solução é dada na Equação 15 e na Equação 16, onde T_s é o período de amostragem.

$$Z_0 = e^{S_0 T_s} = e^{T_s[-\zeta\bar{\omega}_n + j\bar{\omega}_n\sqrt{1-\zeta^2}]} \quad (13)$$

$$Z_1 = e^{S_1 T_s} = e^{T_s[-\zeta\bar{\omega}_n - j\bar{\omega}_n\sqrt{1-\zeta^2}]} \quad (14)$$

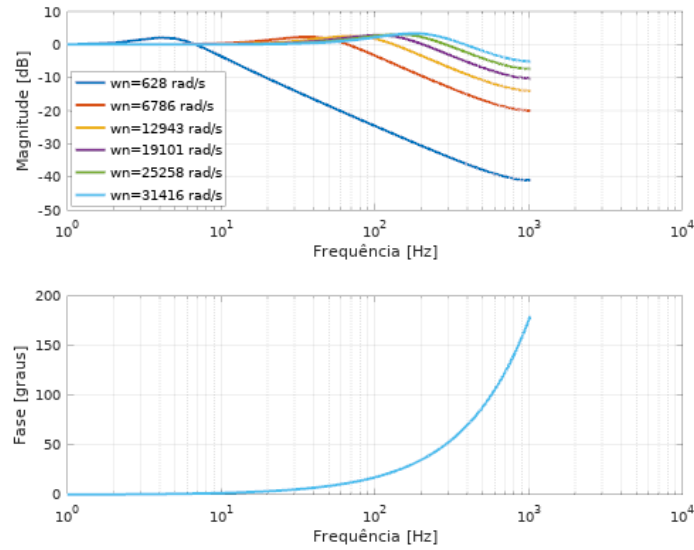
$$G_1 = 1 - e^{-2\zeta\bar{\omega}_n T_s} \quad (15)$$

$$G_2 = 1 + e^{-2\zeta\bar{\omega}_n T_s} - 2e^{-\zeta\bar{\omega}_n T_s} \cos(\bar{\omega}_n T_s \sqrt{1-\zeta^2}) \quad (16)$$

O sistema a ser implementado em *Software* não conta com um DCO. A fase utilizada como referência será a fase anterior estimada pelo *Loop* ($\phi_{out}[n-1]$) (PLL similar a proposta é implementada no GNURadio, porém com equacionamento diferente para os parâmetros do *Loop*). A fase do sinal será obtida através da aplicação da função $\arctan(\cdot)$ entre as amostras do sinal moduladas em *In-phase and Quadrature* (IQ) obtidas pelo *Hardware* SDR.

Na Figura 17 é apresentada a resposta em frequência do sistema para diferentes valores de w_n e $\zeta = 0.707$. É possível notar o caráter passa-baixa do LF com resposta plana até aproximadamente 100Hz a partir de $\bar{\omega}_n = 12943$ rad/s. Foi utilizada uma taxa de amostragem $f_s = \frac{1}{T_s} = 50\text{kHz}$.

Figura 17: Resposta em magnitude e fase para ω_n de 618 à 31416 rad/s.



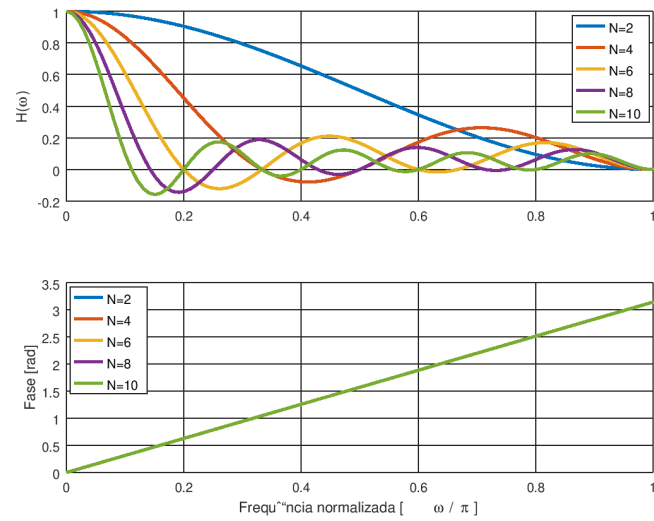
2.4 Filtro média-móvel

Devido ao ruído presente na estimativa do desvio em frequência pela PLL espera-se que seja necessário o emprego de algum método de filtragem para diminuir a imprecisão na estimativa da velocidade.

Um filtro simples de implementar que pode ser utilizado para tal finalidade é o filtro média-móvel. Esse filtro consiste basicamente da média de uma *Delay Line* a cada iteração. A Equação 17 de transferência do filtro é descrita abaixo. A Figura 18 apresenta a resposta em magnitude e fase para diferentes ordens.

$$M(z) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} z^{-k} \quad (17)$$

Figura 18: Resposta em magnitude e fase do filtro média-móvel.



Será feita uma análise nos testes para validar o ganho de se usar um filtro média-móvel.

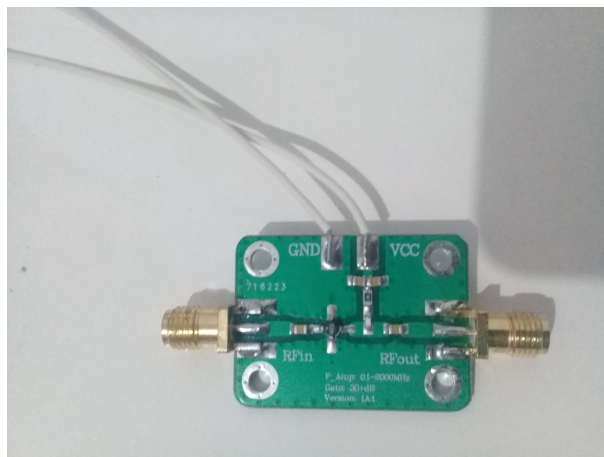
3 Análise de resultados

Nesta seção, serão discutidos os resultados obtidos através dos testes realizados para o sistema proposto.

Será utilizada a placa LimeSDR mini para gerar o sinal transmitido pelo Beacon, levando em conta a atenuação do sinal devido a variação de distância durante a passagem do satélite e seu respectivo desvio Doppler. Será feita a estimativa da frequência utilizando o canal de recepção do LimeSDR mini e do RTLSDR.

Em todos os testes práticos será utilizado um LNA comercial banda larga de 30dB de ganho. A Figura 19 mostra o LNA utilizado.

Figura 19: LNA HiLetGo de 30dB de ganho.



3.1 Caracterização do canal de transmissão do LimeSDR Mini

Para atestar a potência de transmissão da placa LimeSDR Mini em função da magnitude das amostras geradas via GNURadio, foram realizadas medições de potência com o auxílio de um analisador de espectro. O sinal banda base gerado foi configurado para 25kHz, via GNURadio, para evitar a componente *Direct Current* (DC) comum em SDRs que usam arquitetura Zero-IF [37]. A curva na Figura 20 mostra a relação entre a magnitude das amostras IQ e a potência efetiva que está sendo transmitida. A Figura 21 mostra uma das medidas realizadas para uma magnitude de 0,7. Os dados foram interpolados usando o método *Least Squares* LS, taxa de amostragem de $1kHz$ e polinômio de ordem 10. A ordem do polinômio interpolador foi ajustada para que

houvesse uma aproximação coerente com os dados empíricos (polinômios de mais baixa ordem geraram discrepâncias nos intervalos onde há variações mais acentuadas).

Figura 20: Curva de potência de transmissão do LimeSDR Mini.

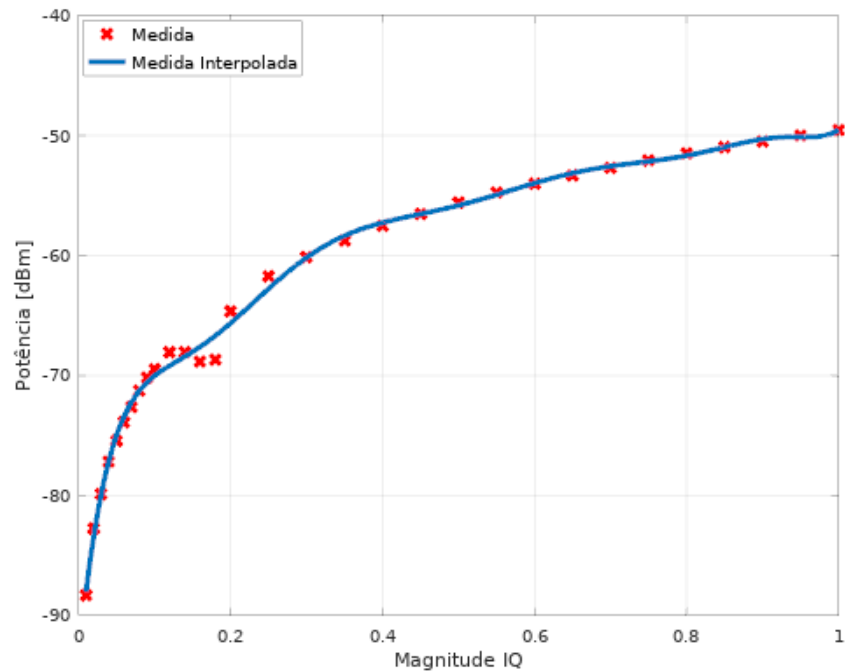
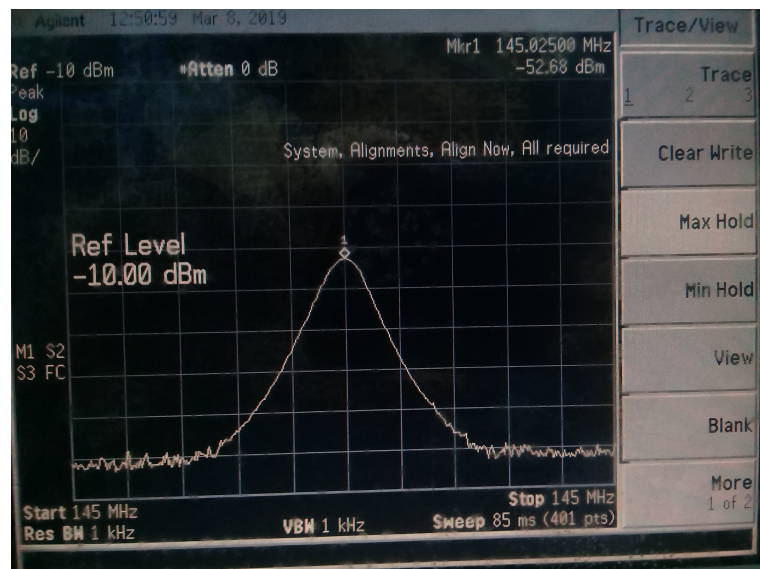


Figura 21: Medida obtida no analisador de espectro em 145,025kHz e magnitude igual a 0,7.



A caracterização da potência transmitida é importante para os testes que serão realizados, uma vez que será feita uma aproximação à potência efetivamente recebida pelo *Hardware*.

3.2 Performance da PLL

Para validar a capacidade da PLL de estimar a frequência na presença de *Additive White Gaussian Noise* AWGN, foram feitas simulações a partir da parametrização da PLL e da mudança da *Signal to Noise Ratio* (SNR).

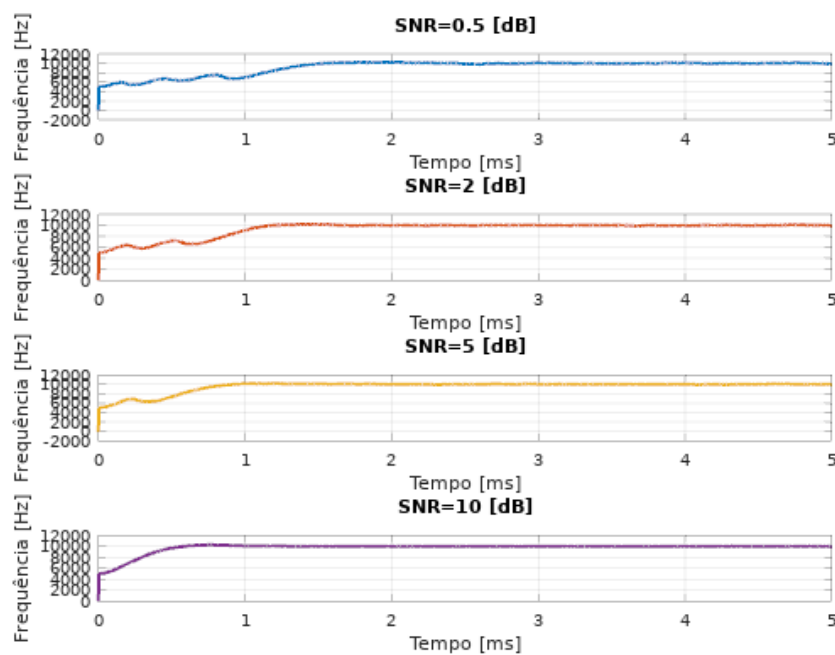
O tempo até a estabilização do *Loop* pode ser estimado através da seguinte relação [38]:

$$t_{lock} \approx \frac{4}{\zeta \omega_n} \quad (18)$$

Na qual t_{lock} é o tempo até estabilização (*Lock*). Será considerado inicialmente $t_{lock} = 1\text{ms}$. Nesse caso, $\omega_n \approx 5657.7 \text{ rad/s}$. Foi utilizada uma taxa de amostragem $f_s = 300\text{kHz}$.

A Figura 22 a seguir mostra a estimativa de frequência e tempo de estabilização (próximo de 1ms) para um sinal de 10kHz, para alguns valores de SNR. É possível notar que mesmo com uma SNR baixa (0.5 dB) é possível obter *Lock*.

Figura 22: Tempo de estabilização e estimativa de frequência.



Os parâmetros estimados acima serão utilizados inicialmente nos testes.

3.3 Interpolação da curva preditiva de distância, velocidade e desvio Doppler

Devido à baixa resolução das curvas de distância obtidas pelo GPredict (foi utilizado um intervalo fixo de 5s entre cada amostra), faz-se necessário o emprego de interpolação para gerar os arquivos necessários para os testes.

Os dados das passagens dos satélites foram interpolados usando *Splines*, que permite manter uma boa aproximação aos pontos presentes na curva original [40].

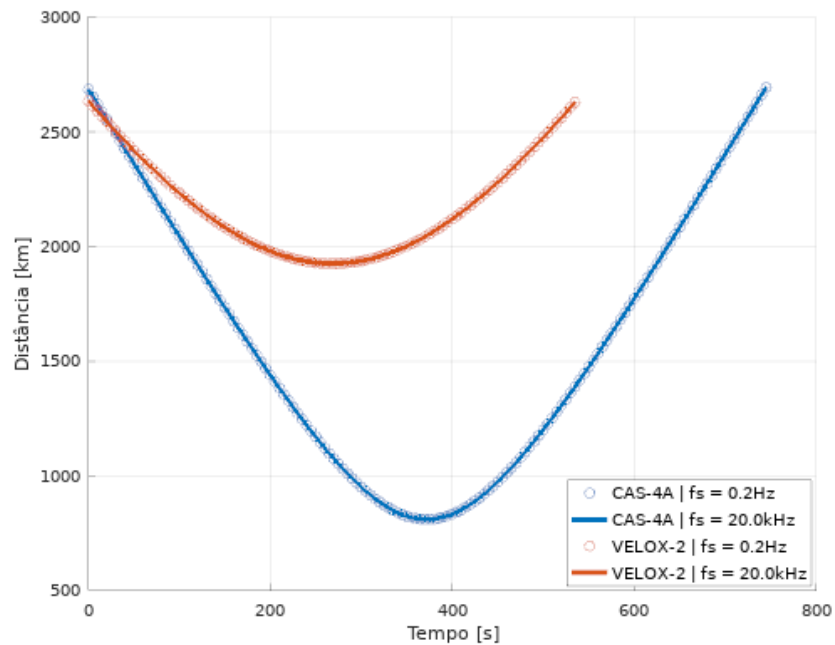
Os dados das passagens utilizadas nos testes foram obtidos para as coordenadas 23,3797S/46,3100W, com horários iniciais (horário local GMT-3) listados na Tabela 7. A seleção das passagens foi feita de forma a ter duas curvas com variações distintas de distância e, conseqüentemente, variações distintas de frequência e potência.

Tabela 7: Início das passagens selecionadas para teste.

| Satélite | Início da passagem |
|----------|---------------------|
| Velox-2 | 2019/03/20 16:49:18 |
| CAS-4A | 2019/03/20 04:52:34 |

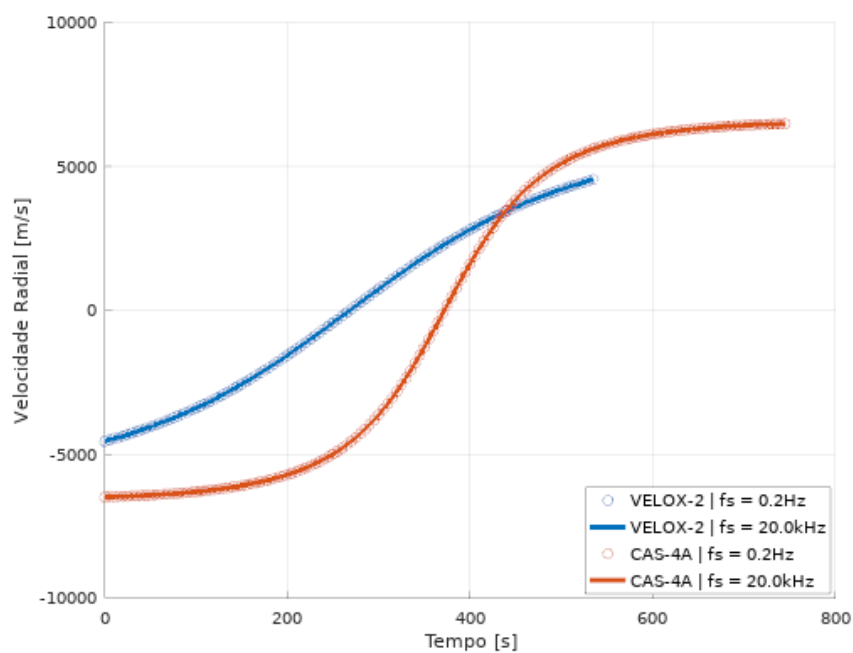
A distância interpolada apresentada na Figura 23 será utilizada para modular a amplitude das amostras IQ, de modo a simular a potência do sinal variando ao longo da passagem.

Figura 23: Distância dos satélites para as passagens selecionadas.



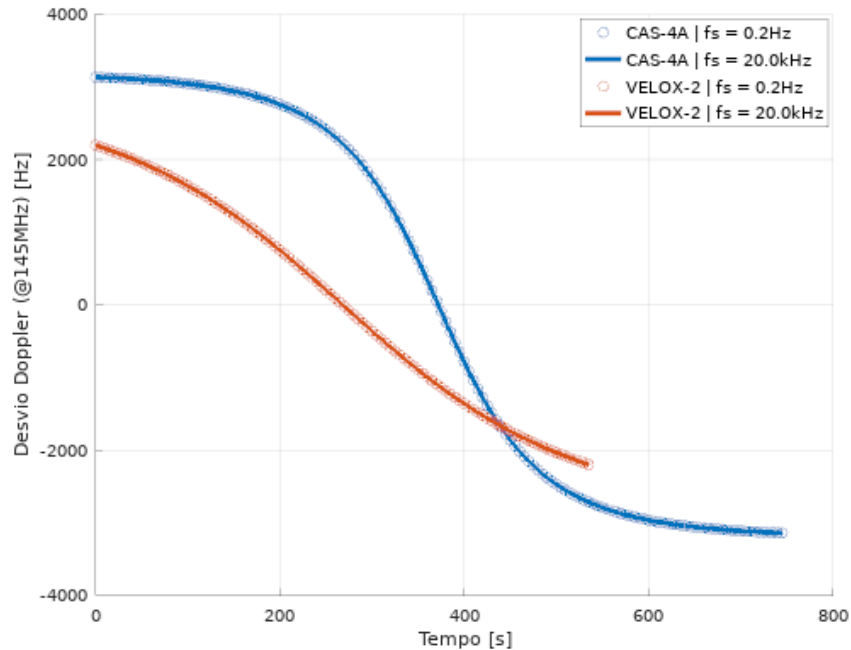
As curvas de velocidade mostradas na Figura 24 abaixo serão utilizadas para calcular o erro da estimativa de velocidade pelo sistema.

Figura 24: Velocidade dos satélites para as passagens selecionadas.



As curvas na Figura 25 serão utilizadas para modular o sinal em frequência (simulação do efeito *Doppler* durante a passagem do satélite).

Figura 25: Desvio *Doppler* considerando um sinal transmitido pelo satélite de 145MHz.



3.4 Modulação em frequência e amplitude sobre o sinal dos *Beacons*

A partir dos dados dos satélites listados na Tabela 3, da curva de potência de transmissão do LimeSDR obtida na seção 3.1 e das curvas de desvio Doppler e distância obtidas na seção 3.3, foram gerados arquivos de teste, que em conjunto com um bloco desenvolvido para o GNURadio, permitiram avaliar a capacidade do sistema de estimar a frequência do sinal transmitido pelos satélites das passagens selecionadas.

A Tabela 8 sintetiza os dados dos satélites escolhidos, com base na Tabela 6.

Tabela 8: Parâmetros de recepção e transmissão considerados para os testes.

| Satélite | Frequência do <i>Beacon</i> [MHz] | P_{tx} [dBm] | G_{tx} [dB] | G_{rx} [dB] |
|----------|-----------------------------------|----------------|---------------|---------------|
| Velox-2 | 145,93 | 20 | 1,83 | 34,34 |
| CAS-4A | 145,855 | 17 | | |

A Figura 26 foi obtida através do cálculo da Equação 6 sobre os valores listados na Tabela 8 (considerando 2 LNAs de 30dB de ganho em série). Foi mantido o ganho

máximo da antena para a toda a passagem por motivo de simplificação. A Figura 27 mostra a mesma curva, aproximada para os valores da curva de potência do LimeSDR Mini, apresentados na Figura 20.

A potência de transmissão do LimeSDR Mini permite gerar a potência recebida na estação considerando um LNA externo na cadeia de recepção. Dessa forma, para simular a recepção dos Beacons, não será necessário o uso dos dois LNAs externos e sim de apenas um.

Figura 26: Potência recebida durante as passagens.

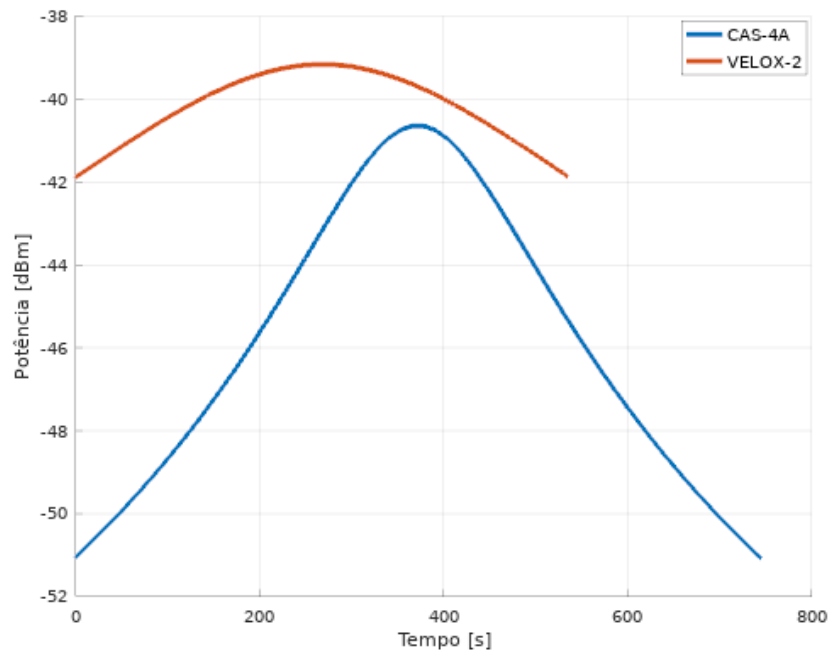
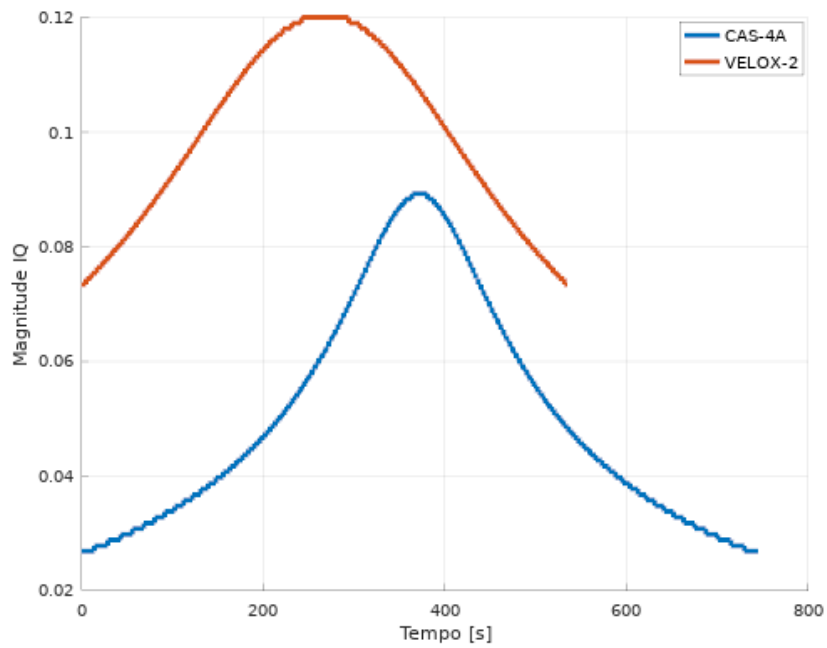
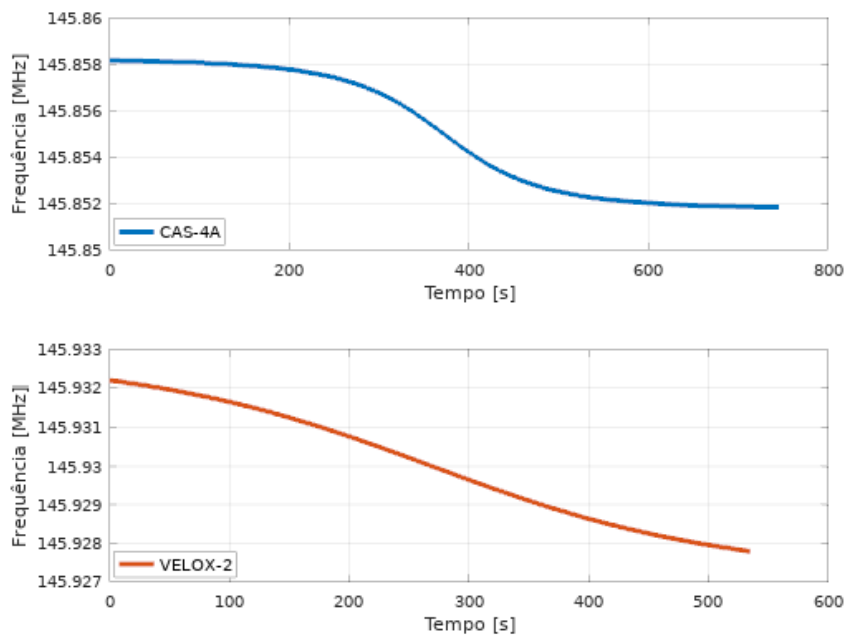


Figura 27: Magnitude das amostras IQ durante as passagens, aproximadas para a curva de potência de transmissão do LimeSDR Mini.



Apenas para fins de visualização, as curvas preditivas da frequência em função do tempo durante a passagem dos satélites são apresentadas na Figura 28.

Figura 28: Mudança na frequência devido ao desvio Doppler durante a passagem de cada satélite selecionado.

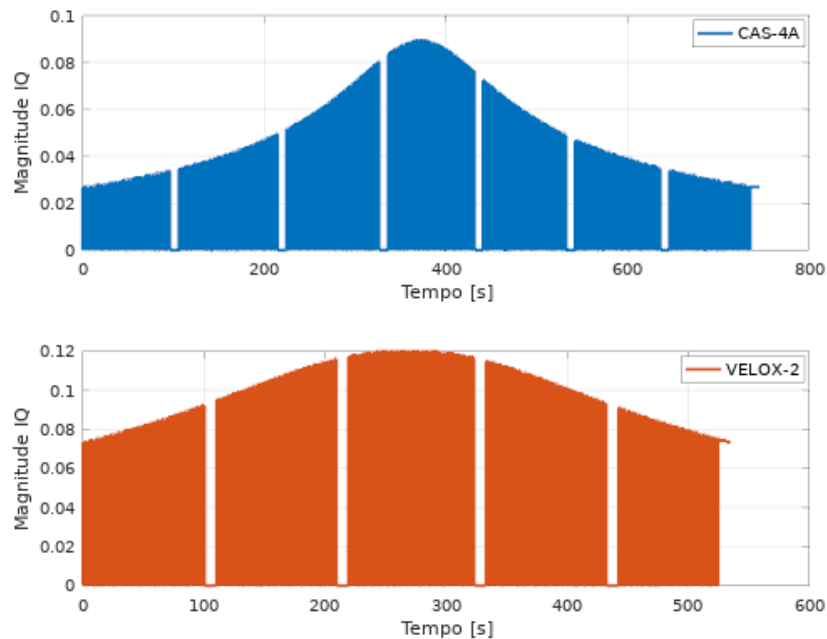


3.4.1 Codificação *Morse* sobre o sinal dos *Beacons*

Os *Beacons* geralmente são utilizados para transmitir informações de estado do satélite ou a sua identificação. Para isso, o sinal é modulado ligando e desligando a transmissão, sendo muito comum o emprego do alfabeto Morse para codificar a mensagem [37]. O período de transmissão do símbolo traço é três vezes o do símbolo ponto.

Representando o traço pela transmissão do sinal CW e o ponto pela sua ausência, foram gerados arquivos para as passagens modulando a magnitude das amostras por sequências aleatórias de ponto e traço. Foram adicionadas também paradas na transmissão de 10 segundos, simulando períodos de não transmissão do *Beacon*. A Figura 29 mostra a magnitude do sinal para um período de traço de 40ms.

Figura 29: Magnitude com codificação *Morse*.



3.5 Teste prático da recepção dos *Beacons* utilizando LimeSDR Mini como receptor

A conexão do *Hardware* é apresentada esquematicamente na Figura 30 e a representação dos componentes em *Software* utilizados no GNURadio na Figura 31.

Figura 30: Conexões entre computador, placa LimeSDR e LNA.

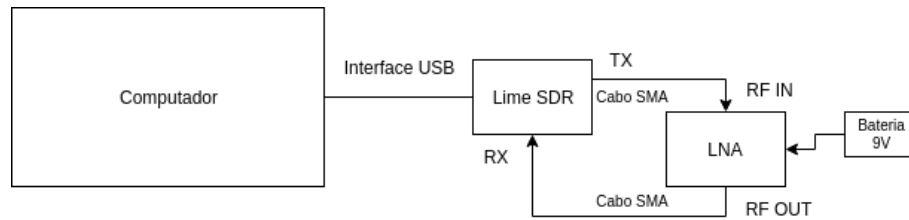
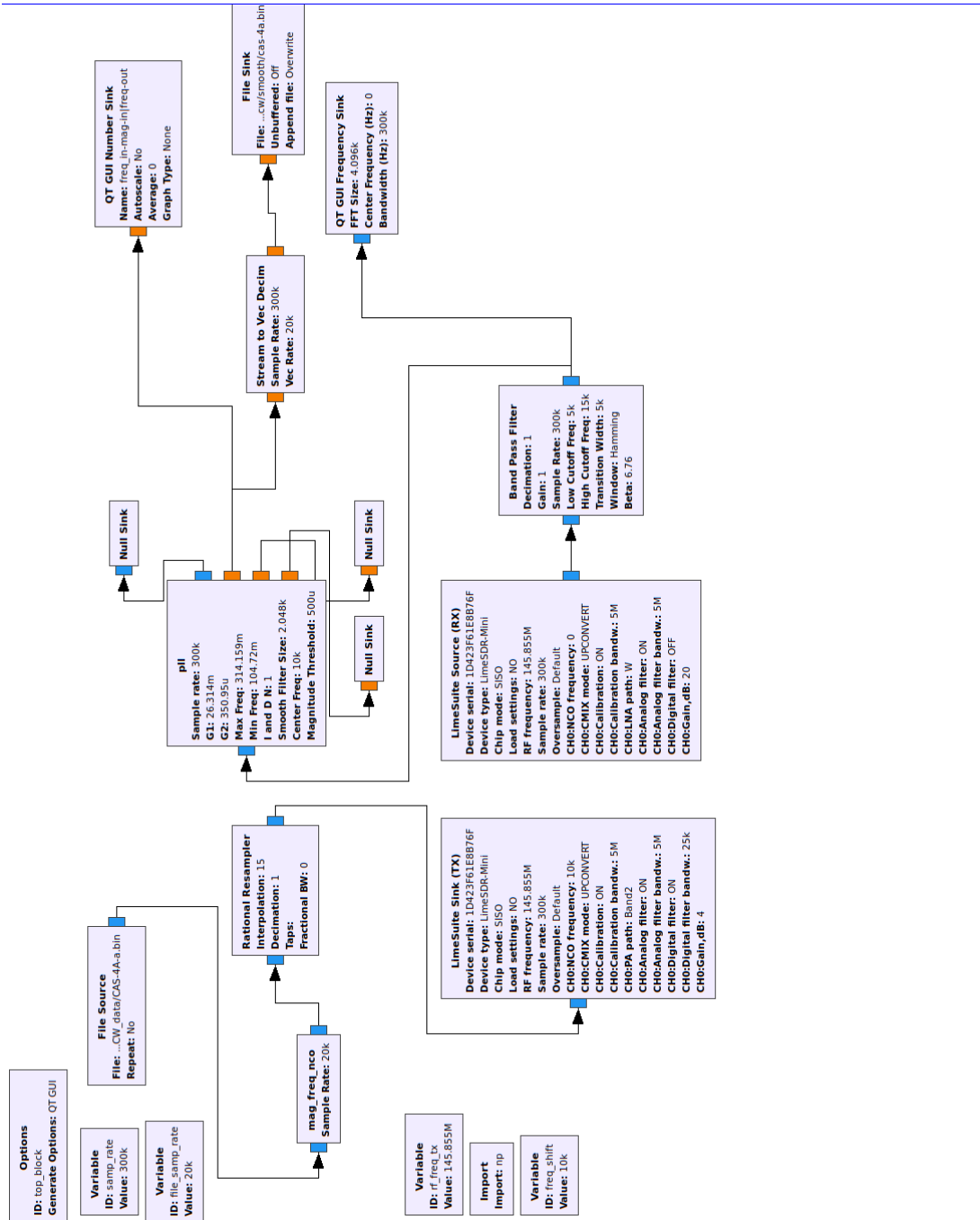


Figura 31: Representação do *Software* no GNURadio para os testes realizados com a placa LimeSDR.



Foi utilizada uma taxa de amostragem de 300kHz na configuração do SDR. Como os dados gerados pelo GNURadio devem estar na mesma taxa de amostragem do *Hardware*, foi feita a interpolação do sinal do desvio Doppler em banda base de 20 para 300kHz através do bloco *Fractional Resampler*. O sinal transmitido pelo SDR foi configurado para a frequência do satélite com uma FI de 10kHz (para evitar o centro do espectro). O ganho configurado na cadeia de recepção do LimeSDR foi de 20dB (nível máximo que não causou distorções no sinal).

Na recepção, o sinal é filtrado em torno da FI de 10kHz com uma banda também de 10kHz (o desvio Doppler para as passagens não é superior a 5kHz). As amostras filtradas são então enviadas ao bloco da PLL e a saída da estimativa da frequência é decimada para 20kHz (para não serem gerados arquivos grandes).

Foi adicionado à PLL um limiar de magnitude que tem por finalidade processar somente as amostras quando o sinal estiver presente. Esse limiar foi definido empiricamente analisando o valor da magnitude quando não há sinal presente na entrada do receptor e para esse configuração o limiar encontrado foi de 0,0005.

Por fim, a estimativa da frequência é gravada em um arquivo para posterior análise. A Tabela 9 a seguir sumariza os parâmetros utilizados nos testes.

Tabela 9: Parâmetros utilizados nos testes com o LimeSDR Mini.

| Parâmetro | Valor |
|--|--------------|
| Taxa de amostragem SDR | 300 kHz |
| Taxa de amostragem arquivo de entrada | 20 kHz |
| Ganho de transmissão | 4 dB |
| Frequência da FI | 10 kHz |
| Ganho de recepção | 20 dB |
| Banda do filtro passa-faixa | 10 kHz |
| Frequência central do filtro passa-faixa | 10 kHz |
| Taxa de amostragem do arquivo de saída | 20 kHz |
| Ganho do derivador da PLL (G_1) | 0,026314 |
| Ganho do integrador da PLL (G_2) | 0,00035095 |
| Limiar de magnitude das amostras IQ | 0,0005 |

Foram realizados testes com e sem codificação Morse e em cada teste foi feita um novo teste para avaliar o ganho proporcionado pelo filtro média-móvel. A Figura 32 e a Figura 33 apresentam os resultados obtidos para as passagens, com (ordem do

filtro média-móvel igual a 2048) e sem (ordem unitária) filtro média-móvel. A Tabela 10 abaixo lista os erros máximos da estimativa de velocidade para as duas passagens (desconsiderando os transientes devido à inicialização e término do arquivo de entrada). Foi possível diminuir o erro máximo em aproximadamente 92% com o emprego do filtro média-móvel.

Tabela 10: Erros máximos das estimativas de velocidade para sinal CW (LimeSDR Mini).

| Satélite | Erro (N=1) [m/s] | Erro (N=2048) [m/s] |
|----------|------------------|---------------------|
| CAS-4A | 77,414 | 6,3984 |
| Velox-2 | 31,861 | 2,6686 |

Figura 32: Resultado dos testes realizados para a passagem do satélite CAS-4A transmitindo sinal CW.

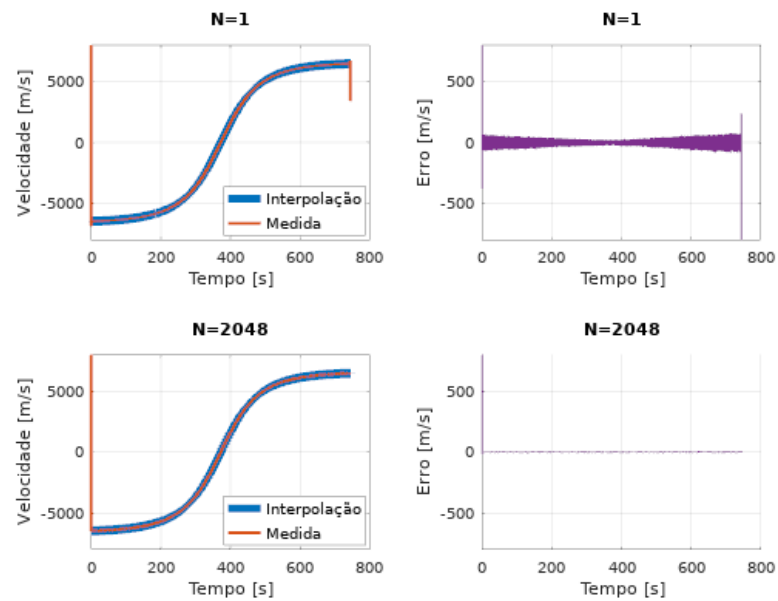
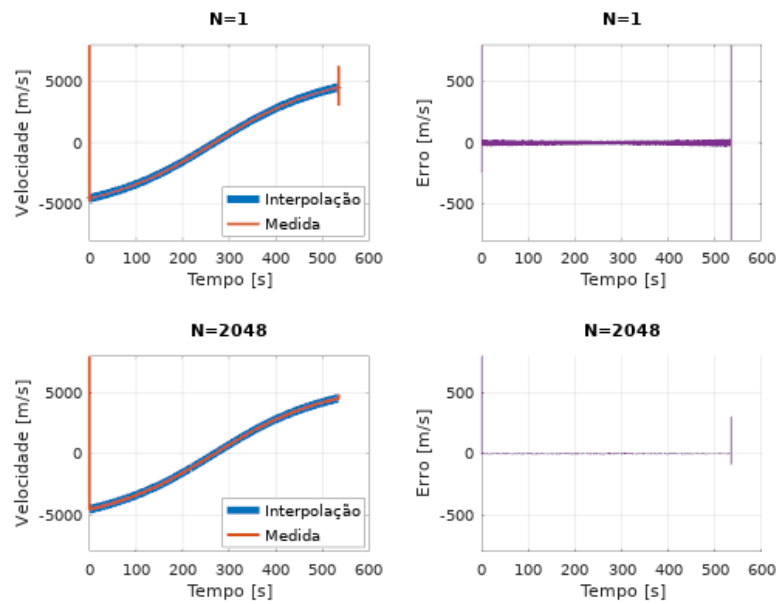


Figura 33: Resultado dos testes realizados para a passagem do satélite Velox-2 transmitindo sinal CW.



A Figura 34 e a Figura 35 mostram o desempenho do sistema com codificação *Morse*. Na Tabela 12 é listado os erros obtidos. Foi possível diminuir o erro máximo em aproximadamente 61% nessa configuração com o emprego do filtro média-móvel.

Tabela 11: Erros máximos das estimativas de velocidade para sinal CW/Morse (LimeSDR Mini).

| Satélite | Erro (N=1) [m/s] | Erro (N=2048) [m/s] |
|----------|------------------|---------------------|
| CAS-4A | 3820,5 | 237,55 |
| Velox-2 | 4053,0 | 244,82 |

Figura 34: Resultado dos testes realizados para a passagem do satélite CAS-4A transmitido sinal CW/Morse.

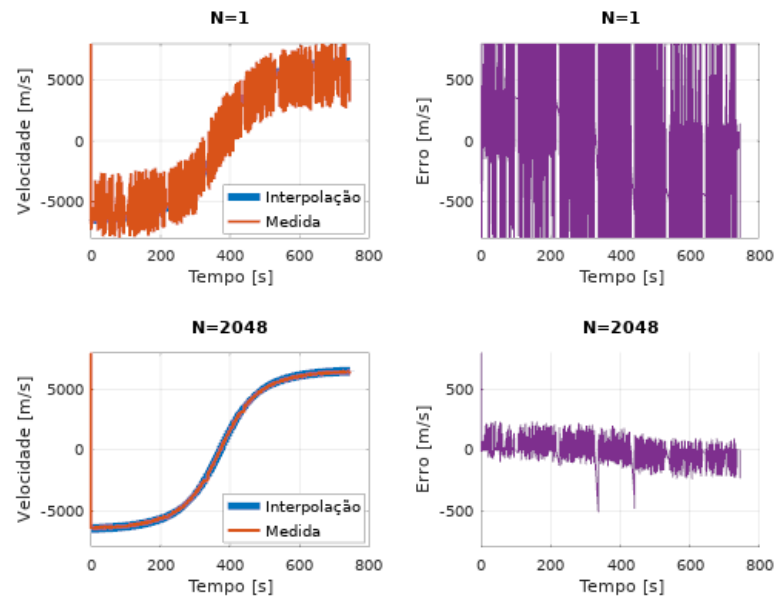
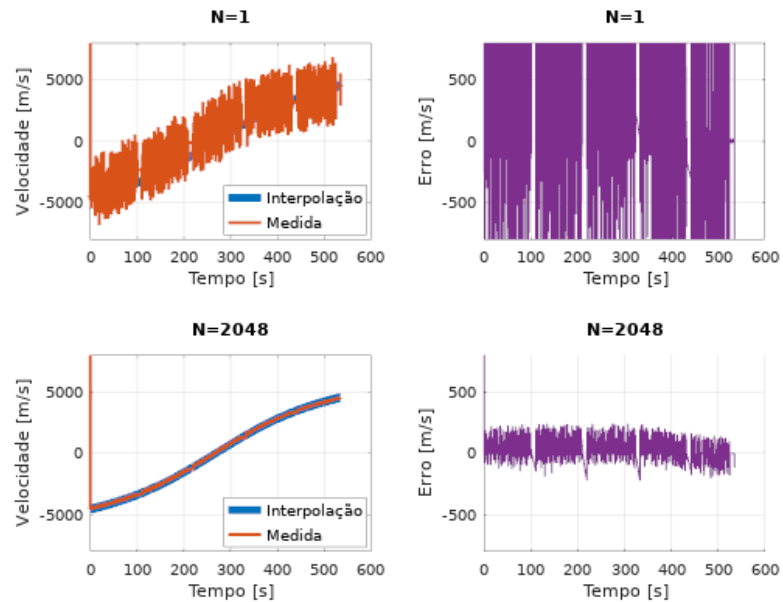


Figura 35: Resultado dos testes realizados para a passagem do satélite Velox-2 transmitido sinal CW/Morse.



3.6 Teste prático da recepção dos *Beacons* utilizando RTLSDR como receptor

Os mesmos testes realizados na seção 3.5 para o LimeSDR Mini como receptor, foram feitos para o RTLSDR. A representação do *Software* utilizado no GNURadio bem como as conexões do *Hardware* são apresentadas na Figura 36 e na Figura 37, respectivamente. Abaixo a Tabela 12 com os parâmetros utilizados durante os testes:

Tabela 12: Parâmetros utilizados nos testes com o RTLSDR.

| Parâmetro | Valor |
|--|------------|
| Taxa de amostragem SDR | 300 kHz |
| Taxa de amostragem arquivo de entrada | 20 kHz |
| Ganho de transmissão | 4 dB |
| Frequência da FI | 10 kHz |
| Ganho de recepção | 20 dB |
| Ganho de RF | 10 dB |
| Ganho de IF | 20 dB |
| Ganho em banda base | 20 dB |
| Banda do filtro passa-faixa | 10 kHz |
| Frequência central do filtro passa-faixa | 10 kHz |
| Taxa de amostragem do arquivo de saída | 20 kHz |
| Ganho do derivador da PLL (G_1) | 0,026314 |
| Ganho do integrador da PLL (G_2) | 0,00035095 |
| Limiar de magnitude das amostras IQ | 0,002 |

Figura 36: Representação do *Software* utilizado no GNURadio para teste com receptor RTLSDR.

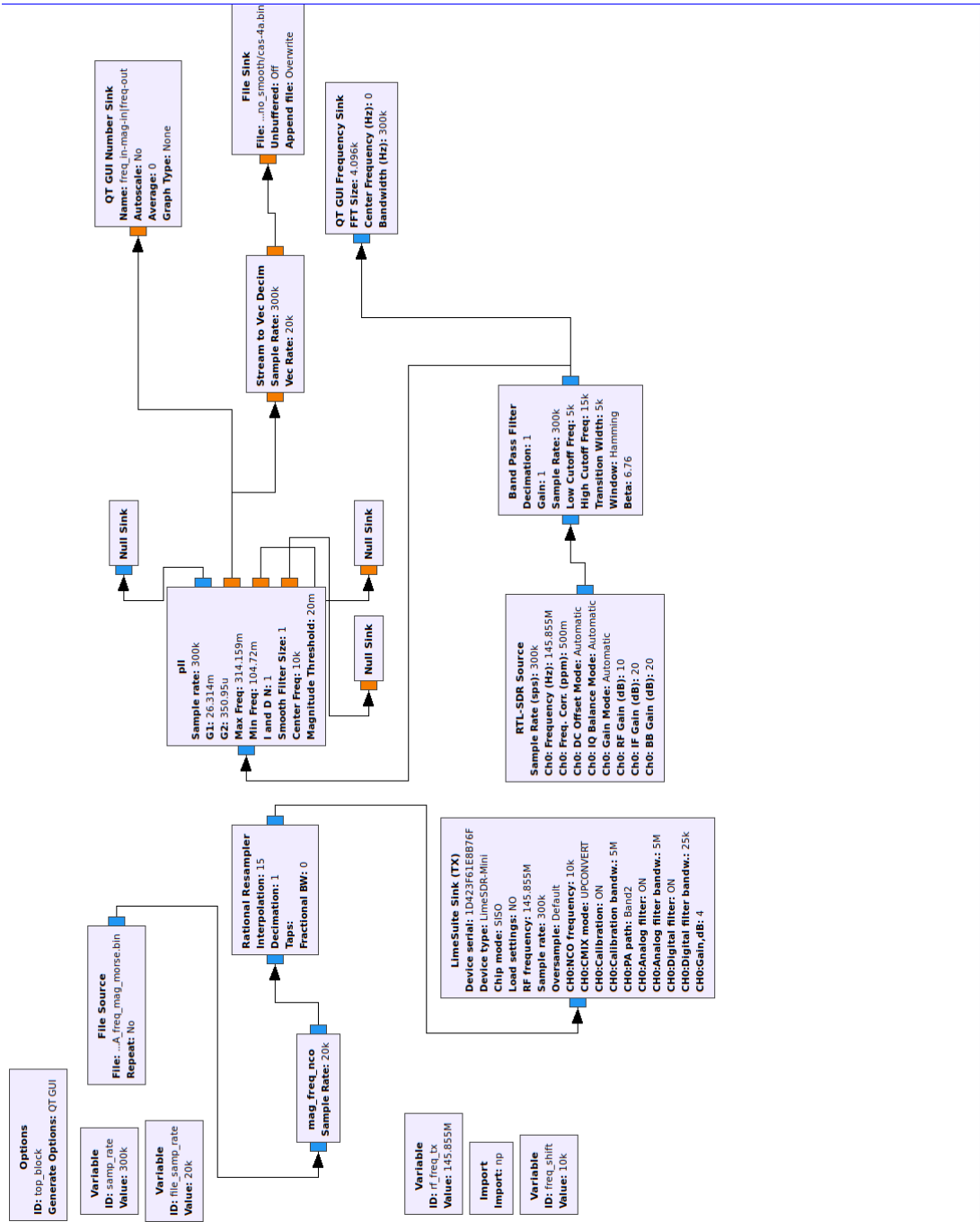
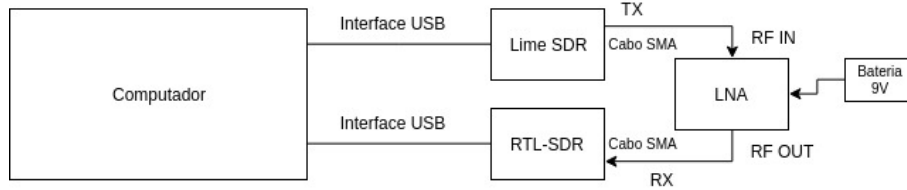


Figura 37: Conexões físicas entre computador, LimeSDR, LNA e RTLSDR.



A Figura 38 e a Figura 39 mostram os resultados obtidos para um sinal CW. É possível notar que houve uma imprecisão na frequência configurada no *Hardware* na passagem do Velox-2. Nessa mesma passagem houve um transiente que não deveria existir (entre 400 e 450 segundos do teste sem filtragem). A Tabela 13 sumariza os erros obtidos. Considerando a passagem em que não houve erros inesperados, a diminuição do erro foi de aproximadamente 72%.

Figura 38: Resultado dos testes realizados para a passagem do satélite CAS-4A transmitido sinal CW.

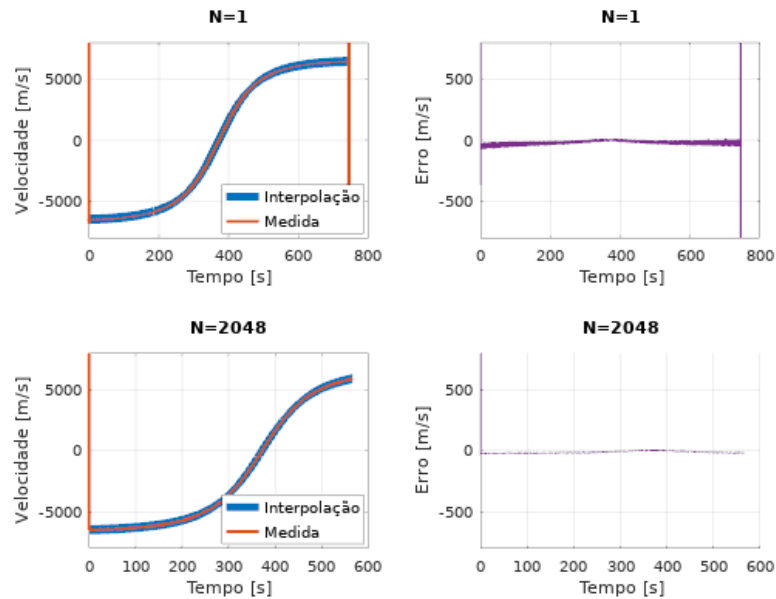


Figura 39: Resultado dos testes realizados para a passagem do satélite Velox-2 transmitido sinal CW.

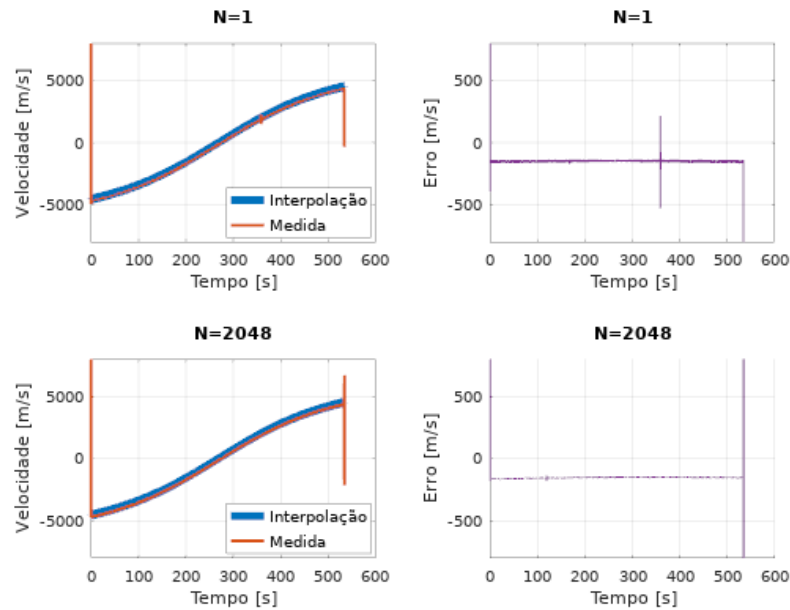


Tabela 13: Erros máximos das estimativas de velocidade para sinal CW (RTLSDR).

| Satélite | Erro (N=1) [m/s] | Erro (N=2048) [m/s] |
|----------|------------------|---------------------|
| CAS-4A | 16,853 | 4,6021 |
| Velox-2 | 215,37 | -135,72 |

Para um sinal CW/Morse, os erros máximos obtidos estão listados na Tabela 14. Foi possível obter resultado similar para a passagem do satélite CAS-4A em relação ao LimeSDR, porém para o Velox-2 houve perda de parte do sinal no final. Levando em conta a parte que foi capturada, os resultados estão consistentes também com o obtido pelo LimeSDR. A Figura 40 e a Figura 41 mostram os resultados para as duas passagens nas duas configurações (com e sem filtro média-móvel).

Tabela 14: Erros máximos das estimativas de velocidade para sinal CW/Morse (RTLSDR).

| Satélite | Erro (N=1) [m/s] | Erro (N=2048) [m/s] |
|----------|------------------|---------------------|
| CAS-4A | 3656,2 | 207,62 |
| Velox-2 | 3120,6 | 49,661 |

Figura 40: Resultado dos testes realizados para a passagem do satélite CAS-4A transmitido sinal CW/Morse.

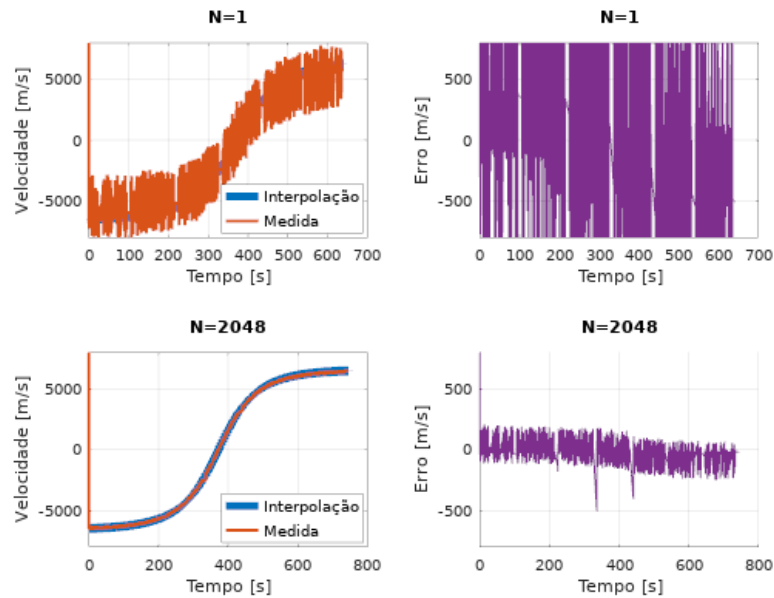
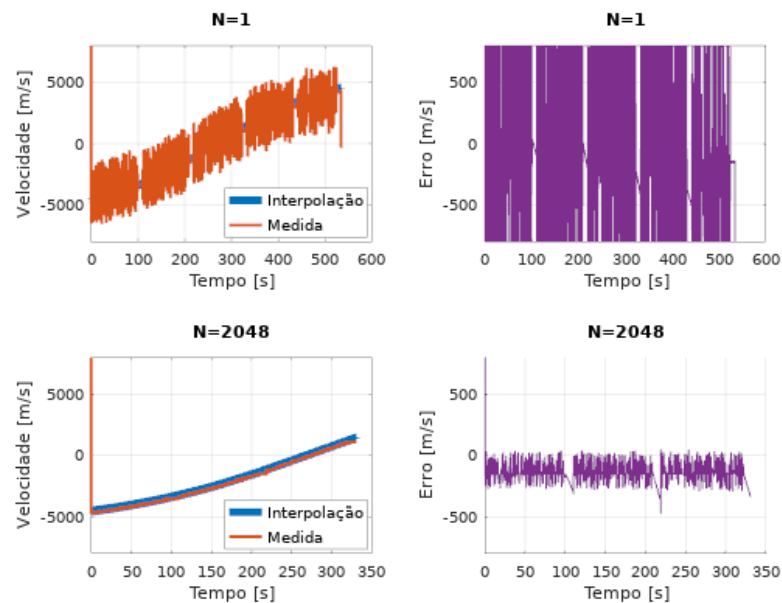


Figura 41: Resultado dos testes realizados para a passagem do satélite Velox-2 transmitido sinal CW/Morse.



3.7 Teste prático com antena Dipolo Cruzado Duplo

Foram realizadas tentativas de fazer aquisições reais dos satélites listados na Tabela 4, porém não foi possível visualizar o sinal específico dos *Beacons* no espectro.

A antena projetada na seção 2.1.1 foi confeccionada com peças de Policloreto de

Vinila (estrutura) e barras roscadas (dipolos) e montada em uma área urbana (Figura 42). Foi utilizado somente um LNA na cadeia de recepção e foi feito testes somente com o LimeSDR Mini.

Devido ao LNA utilizado ser banda larga, não foi possível usar dois estágios de amplificação, pois o segundo estágio saturou devido aos sinais fora de banda. Esse problema poderia ter sido corrigido com um filtro passa-faixa, porém não houve tempo hábil para projetá-lo e confeccioná-lo. A falta de pré-amplificação provavelmente foi a causa da não aquisição dos *Beacons*.

Figura 42: Configuração de *Hardware* utilizada para aquisição real dos *Beacons*.



4 Conclusões

Os resultados mostraram a partir do sistema testado de forma simplificada (sem aquisição do sinal real do satélite) que é possível obter uma estimativa com erro máximo de aproximadamente 2,67 m/s para o LimeSDR durante uma passagem com menor variação do desvio Doppler e 6,40 m/s para uma passagem com desvio em frequência mais acentuado (passagem do satélite CAS-4A).

Foi observado nos testes realizados com o RTLSDR erros maiores (207,62 m/s para a passagem do satélite CAS-4A e 49,66 m/s para a passagem do Velox-2). Além disso, o *Hardware* se mostrou não muito confiável com respeito aos parâmetros configurados, pois a frequência configurada via Software não foi a mesma observada na recepção para 145,93 MHz (frequência do *Beacon* do satélite Velox-2). Isso pode ser remediado através de pós-processamento, adicionando um valor fixo para corrigir a frequência.

O uso do filtro média-móvel de alta ordem melhorou significativamente a estimativa de velocidade, fazendo o erro máximo diminuir drasticamente, como mostram os resultados na Tabela 10, Tabela 11, Tabela 12 e Tabela 13.

Outra fonte de erro importante nesse sistema proposto é a estabilidade do oscilador do receptor sendo utilizado. Por exemplo, para o caso do LimeSDR (4 PPM no pior caso), pode haver um erro de até $\pm 1199,2$ m/s (valor obtido multiplicando o erro em frequência pela velocidade da luz no vácuo) para 145MHz (isso não foi observado nos testes pois o oscilador do transmissor e do receptor são os mesmos). No caso do RTLSDR (0,5 PPM) esse erro pode ser de $\pm 149,9$ m/s. Contudo, nos dois *Hardwares* podem ser utilizadas referências externas com maior estabilidade, o que poderia melhorar o desempenho no sistema implementado.

5 Referências

- [1] KOVALENKO, Irina D.; EISMONT, Natan A.. Final manouevre from highly elliptical orbit. In: SPACEOPS CONFERENCE, 15., 2018, Marseille. Proceedings. Marseille: CNES, 2018. p. 1 - 10.
- [2] National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing. Space Segment. Disponível em: <https://www.gps.gov/systems/gps/space/>. Acesso em: 31 mar. 2019.
- [3] Universe Today. What is Low Earth Orbit?. Disponível em: <https://www.universetoday.com/85322/what-is-low-earth-orbit/>. Acesso em: 31 mar. 2019.
- [4] AMSAT. Keplerian Elements in Detail. Disponível em: http://www.amsat.org/amsat-new/tools/keps_detail.php. Acesso em: 06 ago. 2017.
- [5] Australian Space Academy. Radio Frequencies for Space Communication. Disponível em: <https://www.spaceacademy.net.au/spacelink/radiospace.htm>. Acesso em: 31 mar. 2019.
- [6] ISIS Space. Cubesats. Disponível em: <https://www.isispace.nl/cubesats/>. Acesso em: 31 mar. 2019.
- [7] ISIS Space. Ground Stations. Disponível em: <https://www.isispace.nl/satellite-solutions/>. Acesso em: 31 mar. 2019.
- [8] Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Operação para Rádio Amadores. Disponível em: http://www.inpe.br/crs/nanosat/acompanhe/radio_amadores.php. Acesso em: 31 mar. 2019.
- [9] Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Estação de Santa Maria. Disponível em: http://www.inpe.br/crs/nanosat/estacoes/estacao_santa_maria.php. Acesso em: 31 mar. 2019.

-
- [10] LIU, Jiaying. Spacecraft TTC and Information Transmission Theory and Technologies. Chengdu: National Defense Industry Press, 2015.
- [11] GAUDENZI, R. de; LIJPHART, E.e.; VASSALLO, E.. A new high performance multipurpose satellite tracking system. Ieee Transactions On Aerospace And Electronic Systems, [s.l.], v. 29, n. 1, p.27-43, fev. 1993. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/7.249111>.
- [12] Kelso, T.S. NORAD Two-Line Element Set Format. Disponível em: <https://www.celestrak.com/NORAD/documentation/tle-fmt.php>. Acesso em: 31 mar. 2019.
- [13] REED, Jeffrey H.. Software Radio: A Modern Approach to Radio Engineering. New Jersey: Prentice Hall Ptr, 2002. 567 p.
- [14] LIANG, Ying-chang et al. Cognitive radio networking and communications: an overview. IEEE Trans. Veh. Technol., [s.l.], v. 60, n. 7, p.3386-3407, set. 2011. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE).
- [15] MyriadRF. Apache License 2.0. Disponível em: https://github.com/myriadrf/LimeSDR-USB_GW/blob/master/COPYING. Acesso em: 31 mar. 2019.
- [16] MyriadRF. GNU Public License. Disponível em: <https://github.com/myriadrf/gr-limesdr/blob/master/LICENSE>. Acesso em: 31 mar. 2019.
- [17] NATIOANAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. Orbital Elements. Disponível em: <https://spaceflight.nasa.gov/realdata/elements/>. Acesso em: 06 ago. 2017.
- [18] MyriadRF. LimeSDR USB Hardware Description. Disponível em: https://wiki.myriadrf.org/LimeSDR-USB_hardware_description. Acesso em: 31 mar. 2019.
- [19] MyriadRF. LimeSDR Mini v1.2 Hardware Description. Disponível em https://wiki.myriadrf.org/LimeSDR-Mini_v1.2_hardware_description. Acesso em: 31 mar. 2019.

-
- [20] RTL-SDR Blog. About RTL-SDR. Disponível em: <https://www.rtl-sdr.com/about-rtl-sdr/>. Acesso em: 31 mar. 2019.
- [21] GNU RADIO. What is GNU Radio and why I do want it?. Disponível em: <http://gnuradio.org/redmine/projects/gnuradio/wiki/WhatIsGR>. Acesso em: 08 abr. 2016.
- [22] Radio Amateur Satellite Corporation. Beacons. Disponível em: <https://www.amsat.org/articles/houston-net/beacons.html>. Acesso em: 31 mar. 2019.
- [23] MARTES, Gerald. Double Cross - A NOAA Satellite Downlink Antenna. QSL-Newington. Newington, fev. 2008. p. 30-32.
- [24] Prefeitura de Santo André. Geografia. Disponível em: <http://www2.santoandre.sp.gov.br/index.php/cidade-de-santo-andre/geografia>. Acesso em: 19 mar. 2019.
- [25] University of Applied Sciences of Southern Switzerland. Communication. <http://www.spacelab.dti.supsi.ch/tiSat1COM.html>. Acesso em: 19 mar. 2019.
- [26] ISIS. VHF/UHF Full Duplex Transceiver. Disponível em: <https://www.isispace.nl/product/isis-uhf-downlink-vhf-uplink-full-duplex-transceiver/>. Acesso em: 19 mar. 2019.
- [27] Heller, Ana & Ted Avraham, Oded. (2014). The First Israeli Cubesat – Duchifat-1: A Student Adventure to Outer Space.
- [28] Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Estação de São José dos Campos. Disponível em: http://www.inpe.br/crs/nanosat/estacoes/estacao_sjc.php. Acesso em: 19 mar. 2019.
- [29] European Space Agency. UKUBE-1. Disponível em: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/u/ukube-1>. Acesso em: 19 mar. 2019.
- [30] AMSAT. XW-2(CAS-3) Satellites Frequency Allocation. Disponível em: <https://www.amsat.org/wordpress/wp-content/uploads/2015/09/XW-2CAS-3-Sats.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2019.

- [31] AMSAT. CAS-4A and CAS-4B Linear Transponder Satellite Payloads. Disponível em: <https://amsat-uk.org/2017/03/13/cas-4a-cas-4b-transponder-sats-2/>. Acesso em: 02 fev. 2019.
- [32] Max Valier Satellite. Radio Beacon. Disponível em: <http://www.maxvaliersat.it/amateurradio>. Acesso em: 02 fev. 2019.
- [33] Move 2 Space. Radio Amateur. Disponível em: <https://www.move2space.de/MOVE-II/satellite/radio-amateurs/>. Acesso em: 02 fev. 2019.
- [34] IZ4WNP. JY1SAT Applies for Frequency Coordination. Disponível em: <http://www.iz4wnp.it/jy1sat-applies-for-frequency-coordination/>. Acesso em: 02 fev. 2019.
- [35] GARDNER, Floyd M.. Phaselock Techniques. New Jersey: Wiley Interscience, 2005.
- [36] XIU, L. et al. A Novel All-Digital PLL With Software Adaptive Filter. Ieee Journal Of Solid-state Circuits, [s.l.], v. 39, n. 3, p.476-483, mar. 2004. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- [37] LEE, C.d.. DC offset elimination analysis in zero-IF receiver. 9th Asia-pacific Conference On Communications (iee Cat. No.03ex732), [s.l.], p.675-679, jul. 2003. IEEE.
- [38] DORF, Richard C.; BISHOP, Robert H.. Modern Control Systems. 12. ed. New Jersey: Pearson, 2011.
- [39] Giangrandi. The Morse Code. Disponível em: <http://www.giangrandi.ch/electronics/radio/morse.shtml>. Acesso em: 02 fev. 2019.
- [40] Finlayson, Bruce A. Interpolation With Splines Functions. Disponível em: <http://faculty.washington.edu/finlayso/ebook/interp/spline.htm>. Acesso em: 02 fev. 2019.