

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
DEPARTAMENTO DE ÁREAS ACADÊMICAS IV - CAMPUS GOIÂNIA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

KLEIBE JACINTO DE ARAUJO

ANÁLISE DA VIABILIDADE DE USO DO RECEPTOR RTL-SDR PARA
RECEPÇÃO DE SINAIS L_1 DA CONSTELAÇÃO GPS

GOIÂNIA-GO
DEZEMBRO DE 2022



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: KLEIBE JACINTO DE ARAUJO

Matrícula: 20181011060117

Título do Trabalho: Análise da viabilidade de uso do receptor RTLSDR para recepção de sinais L1 da constelação GPS

Autorização - Marque uma das opções

1. (X) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
() Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

GOIÂNIA, 04/05/2026.

Data



Documento assinado digitalmente

KLEIBE JACINTO DE ARAUJO

Data: 04/05/2026 23:03:17-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Local

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

KLEIBE JACINTO DE ARAUJO

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DE USO DO RECEPTOR RTL-SDR PARA
RECEPÇÃO DE SINAIS L_1 DA CONSTELAÇÃO GPS**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado à Banca Examinadora, como
exigência parcial para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto
Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de
Goiás (IFG) – Campus Goiânia.

Orientador: Prof. Dr. Kelias de Oliveira

**GOIÂNIA-GO
DEZEMBRO DE 2022**

A663a Araújo, Kleibe Jacinto de.

Análise da viabilidade de uso do receptor RTL-SDR para recepção de sinais L1 da constelação GPS / Kleibe Jacinto de Araújo. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2022.
46f.

Orientação: Prof. Dr. Kelias de Oliveira.

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, Departamento de Áreas Acadêmicas IV – Campus Goiânia, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

1. Sistema de Posicionamento Global. 2. Receptores. 3. Estudos de viabilidade. I. Oliveira, Kelias de (orientação). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. III. Título.

CDD 623.893

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Lana Cristina Dias Oliveira CRB1/2.631
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS GOIÂNIA

KLEIBE JACINTO DE ARAUJO

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DE USO DO RECEPTOR RTL-SDR
PARA RECEPÇÃO DE SINAIS L1 DA CONSTELAÇÃO GPS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, como parte das exigências para obtenção do Título de Engenheiro Eletricista.

Goiânia, 07 de dezembro de 2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Kelias de Oliveira

Orientador - IFG/Câmpus Goiânia

Prof. Dr. João Batista José Pereira

Membro da Banca Examinadora - IFG/Câmpus Goiânia

Prof. Me. Eliézer Alves Teixeira

Membro da Banca Examinadora - IFG/Câmpus Goiânia

Documento assinado eletronicamente por:

- Joao Batista Jose Pereira, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 04/01/2023 08:46:23.
- Eliezer Alves Teixeira, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 08/12/2022 10:29:43.
- Kelias de Oliveira, COORDENADOR - SUB-CHEFIA - GYN-CETPI, em 07/12/2022 22:20:59.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 07/12/2022. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 353948

Código de Autenticação: 6e2e82811d



Dedico este trabalho ao meu pai Raul (*In Memoriam*), à minha mãe Terezinha, meu irmão Wender e aos meus filhos Kleibe Filho, Isabella e Sophie.

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo agradeço a Deus por ter me concedido dentre outros o dom da vida e, além disso, sempre está do meu lado dando-me os subsídios necessários para vivenciar mais uma etapa de minha jornada acadêmica.

Agradeço aos meus pais e familiares pela ajuda, apoio e compreensão durante a realização do curso de Engenharia Elétrica.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Kelias de Oliveira pelo apoio, suporte e ajuda para começar o presente trabalho final de curso.

Agradeço aos professores Dr. João Batista José Pereira e Me. Eliezer Alves Teixeira, membros da banca avaliadora.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG) e indiretamente ao Centro Federal de Educação, Ciência e Tecnologia(CEFETGO) e à Escola Técnica Federal de Goiás(ETFGO) que me proporcionaram concluir os cursos de Engenharia Elétrica, Tecnólogo e Técnico de Nível Médio.

Agradeço ao professor Jean-Michel Friedt pela disponibilidade do código *Octave*, publicado na *internet* para uso com as amostras captadas de sinais GPS e outras orientações sobre a funcionalidade do *script* rodando no *Octave*.

“Deixem que o futuro diga a verdade e avalie cada um de acordo com o seu trabalho e realizações. O presente pertence a eles, mas o futuro pelo qual eu sempre trabalhei pertence a mim.”

NIKOLA TESLA (1856-1943)

RESUMO

O trabalho se propõe a analisar a viabilidade de implantação um receptor de baixo custo baseado em Rádio Definido por *Software* utilizando um *receptor* RTL-SDR (Receptor customizado para uso geral) na banda L1 (1,57542 GHz) que é utilizada pela constelação GPS (*Global Positioning System* – Sistema de Posicionamento Global). Utilizando o *Octave*, será abordado como é feita a captação do sinal GPS, o formato de saída dos dados amostrados e apresentação do sinal de interesse. Também será analisado a viabilidade do receptor utilizando o *receptor* RTL-SDR para medida em tempo real da cintilação ionosférica.

Palavras-chave: Rádio Definido por *software*. *Octave*. Cintilação Ionosférica. Receptor RTL-SDR, NanoVNA, GPS.

ABSTRACT

The work presented here proposes to analyze the feasibility of implementing a low cost receiver based on Radio Defined by *Software* using a *dongle* RTL-SDR in the L1 band (1,57542 GHz) which is used by the GPS constellation. Using the *Octave*, it will be discussed how the GPS signal is captured, the output format of the sampled data and the presentation of the signal of interest. The work will analyze the feasibility of a receiver using the *dongle* RTL-SDR for real-time measurement of ionospheric scintillation.

Keywords: Software Defined Radio. *Octave*. Ionospheric Scintillation. receiver RTLSDR, NanoVNA, GPS

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 — Os três segmentos do Sistema GPS	04
Figura 2.2 — Geração do sinal GPS	06
Figura 2.3 — Ortogonalidade entre o código C/A e P(Y).	07
Figura 2.4 — Estrutura do Sinal L1.	08
Figura 2.5 — Estrutura do Registrador de Deslocamento.	09
Figura 2.6 — Efeito <i>Doppler</i>	11
Figura 2.7 — Estrutura básica do <i>Tracking Code</i>	13
Figura 3.1 — Ruído Térmico x Sinal GPS (L1).	15
Figura 3.2 — Receptor GPS (L1).	16
Figura 3.3 — Amostrador para uso com o <i>Software GPS</i>	16
Figura 3.4 — <i>Software GPS</i> - Arquivo <i>setSettings.m</i>	17
Figura 3.5 — <i>Software GPS</i> - Arquivo <i>postprocessing.m</i>	17
Figura 3.6 — <i>Software GPS</i> - Gráfico.	18
Figura 3.7 — <i>Software GPS</i> - PRN 03 detectado.	18
Figura 3.8 — <i>Software GPS</i> - PRN não detectado.	19
Figura 3.9 — <i>Dongle</i> para DVB-T - Conector F.	20
Figura 3.10 — <i>Dongle</i> RTL-SDR.	21
Figura 3.11 — Configurando o <i>Dongle</i> RTL-SDR.	21
Figura 3.12 — O <i>Bias-T</i>	22
Figura 3.13 — O filtro passa-faixa.	22
Figura 3.14 — Antena genérica para GPS.	23
Figura 3.15 — Analisando o filtro passa-faixa e <i>Bias-T</i>	24
Figura 3.16 — Analisando o filtro passa-faixa.	24
Figura 3.17 — Resultados das medidas do filtro passa-faixa.	25
Figura 3.18 — Analisando o <i>Bias-T</i>	26
Figura 3.19 — Resultados das medidas do <i>Bias-T</i>	26
Figura 3.20 — Inicializando o amostrador.	27
Figura 3.21 — Inicializando o amostrador.	27
Figura 3.22 — Arquivo Salvo.	28
Figura 3.23 — Leitura de dados no <i>Octave</i>	29
Figura 3.24 — <i>Script</i> para Leitura de dados no <i>Octave</i>	31

Figura 4.1 — Arquivo Salvo.	34
Figura 4.2 — <i>Script</i> rodando no <i>Octave</i>	34
Figura 4.3 — Resultado processado.	36
Figura 4.4 — Mapa de Constelação.	36
Figura 4.5 — Mapa de Constelação detalhado.	37
Figura 4.6 — Constelação na data de 24/11/2022 - 14h 16m.	38
Figura 4.7 — Resultados das medidas na data de 24/11/2022 - 14h 16m. .	38
Figura 4.8 — Constelação na data de 03/10/2022 as 17h08m.	39
Figura 4.9 — Resultados das medidas na data de 03/10/2022 as 17h08m. .	39
Figura 4.10 — Constelação na data de 24/11/2022 - 14h 16m.	40
Figura 4.11 — Resultados das medidas na data de 24/11/2022 - 14h 16m. .	40
Figura 4.12 — Constelação na data de 24/11/2022 - 21h 25m.	41
Figura 4.13 — Resultados das medidas na data de 24/11/2022 - 21h 25m.	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACARS – *Aircraft Communications Addressing and Reporting System* – Sistema de Endereçamento e Relatório de Comunicação de Aeronaves.

ADSB – *Automatic Dependent Surveillance Broadcast* – Difusão Dependente e Automática de Vigilância.

AIS – *Automatic Identification System* – Sistema de Identificação Automática.

AM – *Amplitude Modulation* – Modulação em amplitude.

APRS – *Automatic Position Reporting System* – Sistema Automático de Posicionamento. Sistema Automático de Relatório de Posição.

BPSK – *Binary Phase Shifting Keying Modulation* – Modulação por Chaveamento Binário de Fase.

CDMA – *Code Division Multiple Access* – Acesso Múltiplo por Divisão de Código.

C/A – *Coarse Acquisition* – Aquisição sem precisão.

CW – *Continous Wave* – Código Morse.

DAB – *Digital Audio Broadcast* – Radiodifusão Sonora Digital.

DVB-T – *Digital Video Broadcasting - Terrestrial* – Transmissão Terrestre de Vídeo Digital.

EMS – *Emergency Services Response Codes* – Códigos de Resposta de Serviços de Emergência.

FPGA – *Field Programmable Gate Array* – Matriz de Portas Programáveis.

FM – *Frequency Modulation* – Modulação em Frequência.

FT8 – *Franke Taylor 8* – Modo digital criado por Joe Taylor, Nobel em Física e Steve Franke.

GOES – *Geostationary Operation Environmental Satellite* – Satélite Ambiental de Operação Geoestacionária.

GPS – *Global Positioning System* – Sistema de Posicionamento Global.

HF – *High Frequency* – Frequência Alta.

ISS – *International Space Station* – Estação Espacial Internacional.

L1 – Sinal utilizado pelo Sistema GPS correspondente à frequência de 1,57542 GHz.

L2 – Sinal utilizado pelo Sistema GPS correspondente à frequência de 1,2276 GHz.

LSB – *Lower Side Band* – Banda Lateral Inferior.

NanoVNA – *Vector Network Analyzer* – Analisador de Rede Vetorial não profissional.

NOAA-APT – *National Oceanic and Atmospheric Administration - Automatic Picture Transmission* – Administração Nacional Oceânica e Atmosférica - Transmissão Automática de Imagens.

PRN – *PseudoRandom Noise* – Ruído Pseudo Aleatório.

PSK – *Phase Shift Keying* – Modulação por Chaveamento de fase.

P(Y) – *Encrypted Code* – Código criptografado

RTL-SDR – Receptor customizado para uso geral

RTTY – *Radio TeleType* – Rádio TeleTipo

S11 – Perda de Retorno conforme matriz de espalhamento.

S21 – Medida de Ganho conforme matriz de espalhamento.

SDR – *Software Defined Radio* – Rádio Definido por Software.

SSB – *Single Side Band* – Banda Lateral Única.

SSTV – *Slow Scan Television* – Televisão em Varredura Lenta.

UHF – *Ultra High Frequency* – Frequência Ultra Alta.

USB – *Upper Side Band* – Banda Lateral Superior.

VHF – *Very High Frequency* – Frequência muito Alta.

VNA – *Vector Network Analyzer* – Analisador de Rede Vetorial.

VSWR – *Voltage Standing Wave Ratio* – Relação de onda estacionária de tensão.

XOR – Operação OU Exclusivo.

SUMÁRIO

FICHA CATALOGRÁFICA.....	II
FOLHA DE APROVAÇÃO.....	III
CESSÃO DE DIREITOS.....	IV
DEDICATÓRIA.....	V
AGRADECIMENTOS.....	VI
EPÍGRAFE.....	VII
RESUMO.....	VIII
ABSTRACT.....	IX
LISTA DE FIGURAS.....	X
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	XII

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO ····· 1

1.1	Contextualização ·····	1
1.2	Hipóteses ·····	1
1.3	Justificativa ·····	2
1.4	Objetivo geral ·····	2
1.5	Objetivo específico ·····	2
1.6	Organização do trabalho ·····	2

CAPÍTULO 2. O SISTEMA GPS ····· 4

2.1	Introdução. ·····	4
2.2	Sinal e dados do Sistema GPS. ·····	5
2.3	Formação do Sinal. ·····	6
2.4	O código C/A ·····	8
2.4.1	A sequência de Gold para o sinal GPS ·····	8
2.5	Propriedades da Correlação ·····	9
2.6	Variação da frequência em função do efeito Doppler. ·····	10
2.7	Sobre o Tracking Code. ·····	13
2.8	Conclusão. ·····	13

CAPÍTULO 3. O RECEPTOR RTL-SDR ····· 14

3.1	Introdução · · · · ·	14
3.2	O espectro do sinal GPS · · · · ·	14
3.2.1	Um receptor GPS via software. · · · · ·	15
3.3	O receptor RTL-SDR · · · · ·	19
3.3.1	Características técnicas do receptor RTL-SDR · · · · ·	20
3.3.2	Configuração de uso do Dongle. · · · · ·	21
3.4	Realizando a amostragem do sinal L1. · · · · ·	27
3.5	Processando a amostra no Octave. · · · · ·	28
3.5.1	Sobre o Octave. · · · · ·	28
3.5.2	Análise da amostra. · · · · ·	28
3.5.3	O script no Octave · · · · ·	29
3.6	Conclusão. ·····	31

CAPÍTULO 4. RESULTADOS ALCANÇADOS ····· 33

4.1	Introdução. · · · · ·	33
4.2	Coleta das amostras. · · · · ·	33
4.2.1	Funcionamento do Script. · · · · ·	34
4.2.2	Mapa de Constelação GPS. · · · · ·	35
4.3	Resultados processados das amostras. · · · · ·	37
4.3.1	Analisando uma amostra fora da frequência padrão GPS. · · · · ·	37
4.3.2	Amostra coletada em 03/10/2022. · · · · ·	39
4.3.3	Amostra coletada em 24/11/2022. · · · · ·	40
4.3.4	Amostra coletada em 24/11/2022 - Período Noturno. · · · · ·	41
4.4	Conclusão ·····	42

CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES ····· 43

5.1	Considerações Finais · · · · ·	43
5.2	Sugestões para pesquisas futuras ·····	44

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 45

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Uma série de fatores ambientais pode afetar o desempenho do sistema GPS (*Global Positioning System* – Sistema de Posicionamento Global), tais como, as interferências eletromagnéticas, a propagação multi-percurso, os atrasos em função da propagação pela atmosfera e as cintilações ionosféricas, TSUI (2000).

As cintilações da ionosfera são responsáveis por parte significativa da diminuição de precisão do GPS e, em casos extremos o funcionamento do receptor pode ser interrompido em função desse fenômeno, MORAES (2009). As cintilações resultam de variações rápidas na fase e na amplitude do sinal de rádio que atravessa a ionosfera do satélite para qualquer receptor GPS localizado na Terra. Esse fenômeno é mais comum na região equatorial (baixas latitudes), onde ocorre diariamente após o pôr do sol, OLIVEIRA (2017).

A análise do sinal GPS que chega aos receptores é razão de inúmeras pesquisas tanto no Brasil quanto no exterior. Existem vários equipamentos profissionais no mercado que realizam a tarefa de medição da cintilação ionosférica e o pesquisador PETROPOULOS (2021) propôs alternativas aos caríssimos equipamentos. Também apareceram alternativas aos equipamentos comerciais conforme MORRISON (2018), CURRAN (2015) e KIRKPATRICK (2015) dentre outros.

1.2 Hipóteses

Em BORRE (2007), foi proposto um receptor GPS totalmente via *software*. Essa pesquisa abriu uma infinidade de outras pesquisas relacionadas com os receptores GPS com *software* ajustáveis, propondo um *hardware* amostrador (esgotado) que executasse essas rotinas.

Em OLIVEIRA (2017), foi realizado uma pesquisa e uma análise estatística de sinais GPS, onde foi comprovada a deterioração dos sinais GPS nas frequências L1 e L2 e conseqüentemente a perda do sincronismo dos receptores GPS em regiões próximas à linha do equador geomagnético. Mais recentemente, em PETROPOULOS (2021), foi instalado e medido sinais de receptores GPS de baixo custo utilizando um *kit* Arduino

com uma placa GPS já instalada com a antena.

1.3 Justificativa

Mesmo diante dos estudos desenvolvidos, não foi encontrado um sistema de medição de sinais GPS que utilizasse um receptor SDR (*Software Defined Radio* - Rádio Definido por Software) como apresentado. Diferentemente das placas com GPS embarcado e com vários sinais disponíveis em sua saída, no receptor RTL-SDR tem-se que extrair o sinal GPS do sinal de radiofrequência, em que o mesmo é sintonizado, sendo necessário fazer todo o processamento do sinal.

O pesquisador francês Jean-Michel Friedt, FRIEDT (2015) apresentou a ideia de usar um dispositivo RTL-SDR para a realização de amostragem dos sinais de GPS obtendo excelentes resultados na detecção dos sinais PRN (*PseudoRandom Noise* - Ruído Pseudo Aleatório) em relação ao efeito *Doppler* sofrido pela propagação do sinal do satélite até o receptor final.

1.4 Objetivo geral

O trabalho apresentado tem como objetivo analisar a viabilidade de um receptor de baixo custo baseado em Rádio definido por *Software* que possa ser utilizado para realizar medições da cintilação ionosférica na banda L1 (1,57542 GHz).

1.5 Objetivo específico

Como objetivo específico, analisar se um receptor de baixo custo, chamado popularmente de RTL-SDR poderia ser utilizado para a detecção dos sinais extremamente fracos emitidos pela constelação GPS, em quais condições e possíveis limitações de *hardware* e *software*.

Será utilizado o software *Octave* para análise dos sinais recebidos na frequência L1, em 1,57542 GHz e utilizado o receptor como amostrador através do seu próprio *software*, que o acompanha.

Será analisado como é feita a amostragem dos sinais de radiofrequência, análise da saída e formato de dados do receptor e como poderá o sinal de interesse ser apresentado ao usuário final.

1.6 Organização do trabalho

O trabalho está organizado em cinco capítulos descritos a seguir:

O Capítulo 1 apresenta o referencial teórico utilizado para desenvolvimento deste estudo, objetivos gerais e específicos e a metodologia utilizada.

O Capítulo 2 apresenta a descrição do sistema GPS, seu funcionamento teórico, as características técnicas do sinal GPS, comportamento e composição da sua constelação.

O Capítulo 3 apresenta o funcionamento do receptor RTL-SDR, exemplifica a saída de dados em razão do sinal recebido e suas características técnicas e funcionais bem como aborda como é feita a captação, tratamento e apresentação do sinal de interesse em formato apropriado. Também será discutido sobre as limitações do uso de tais receptores para uma análise em tempo real dos sinais de interesse.

O Capítulo 4 apresenta os resultados gerais do trabalho, contemplando a possível viabilidade e operação do receptor RTL-SDR.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões resultantes do trabalho desenvolvido e sugestões para trabalhos futuros.

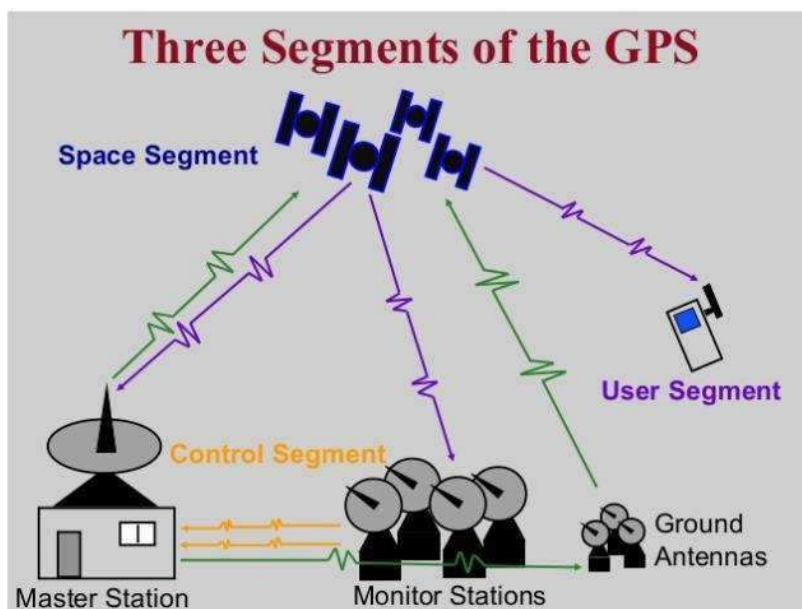
2 O SISTEMA GPS

2.1 Introdução.

Neste capítulo será abordado sobre a Constelação de Satélites GPS, notadamente quanto aos aspectos técnicos e característicos dos sinais de radiofrequência emitidos pelos satélites. Será visto aspectos referentes à modulação do sinal, técnicas de espalhamento espectral e codificação dos sinais.

O sistema GPS é composto de três segmentos, conforme Figura 2.1: constelação de satélites, rede de monitoramento/controlê em terra e o equipamento de recepção do usuário final. A constelação é um conjunto de 24 satélites em órbita que envia sinais e dados para o equipamento do usuário. O período orbital de cada satélite é definido em 11 horas e 58 minutos, sendo que suas órbitas são quase circulares e provê uma cobertura de 24 horas de dados de navegação e determinação do tempo, KAPLAN (2006).

Figura 2.1 — Os três segmentos do Sistema GPS



Fonte: Daryau (2018).

A rede de monitoramento, também chamada de Segmento de Controle é responsável pelo rastreamento e manutenção dos satélites no espaço orbital monitorando

a saúde dos mesmos além de fazer as correções nos relógios internos e nos dados de efemérides bem como vários outros parâmetros que são essenciais para a resolução da posição pelo usuário final.

O Segmento de Usuário é composto pelo equipamento final do usuário que realiza a navegação, correção de tempo e outras funções disponibilizadas pelos fabricantes para atender os usuários finais.

2.2 Sinal e dados do Sistema GPS.

Os sinais emitidos pela constelação de satélites GPS são transmitidos na faixa de UHF (*Ultra High Frequency* - Frequência Ultra Alta, entre 300MHz e 3 GHz), BORRE (2007). As frequências utilizadas pelo GPS são conhecidas como L1 e L2 e são derivadas de uma frequência em comum, f_0 :

$$f_0 = 10,23MHz$$

$$f_{L1} = 154f_0 = 1,57542GHz$$

$$f_{L2} = 120f_0 = 1,2276GHz$$

O sinal GPS é composto, basicamente de três partes: Portadora, Dados de Navegação e Espalhamento espectral.

A portadora determina o ponto central onde o sinal deve ser referenciado para todos os fins, sendo o referencial para sua sintonia pelos dispositivos receptores em solo ou embarcados.

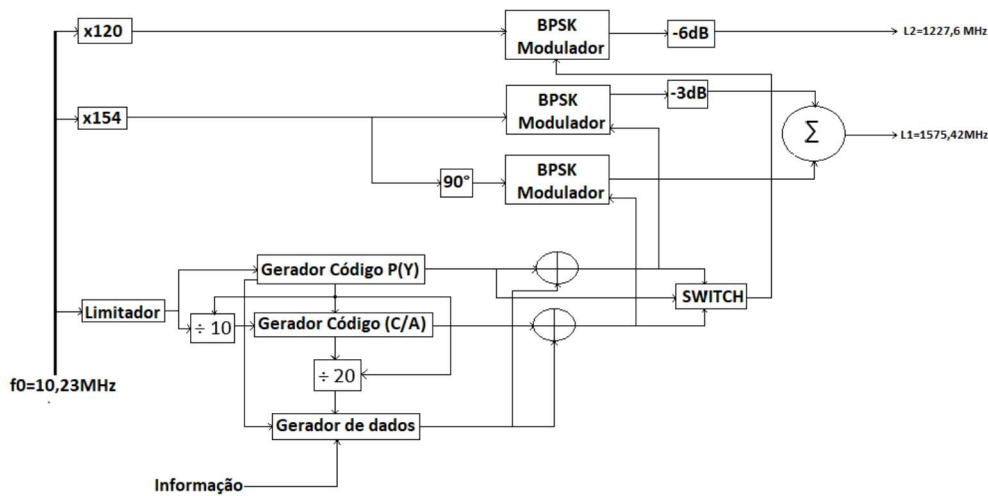
Os dados de navegação contêm as informações de navegação de cada órbita satelital possuindo uma taxa de dados de 50 bps.

Como mostrado na Figura 2.2, cada satélite têm dois códigos de espalhamento conhecidos como (C/A) (*Coarse Acquisition* - Aquisição sem precisão) e (P(Y)) (*Encrypted Code* - Código criptografado), sendo este último criptografado e sem acesso para a os usuários em geral, sendo destinado à fins militares dos Estados Unidos, detentores e operadores da constelação GPS. Os dois códigos são transmitidos simultaneamente nas frequências de f_{L1} , sendo que somente o código P(Y) é transmitido na frequência f_{L2} .

Neste trabalho não será abordado o código(P(Y)). O código (C/A) é uma sequência de 1023 bits e são conhecidos como *chips* que indica o intervalo mínimo entre transições na forma de onda do código PRN, KAPLAN (2006). O código C/A é repetido a

cada 1ms, BORRE (2007).

Figura 2.2 – Geração do sinal GPS



Fonte: BORRE (2007).

2.3 Formação do Sinal.

Conforme BORRE (2007), é apresentada a formação básica do sinal GPS e como é feita sua geração no satélite. A base de referência de precisão é o sistema de geração do sinal de portadora, com frequência de 10,23 MHz que multiplicada por 120 e 154, geram os sinais das portadoras L1 e L2, respectivamente. O sinal L1 é composto dos códigos C/A e P(Y), defasados 90° graus entre si, e o sinal L2 é composto somente do sinal P(Y) conforme já citado na seção anterior e KAPLAN (2006). Vide Figura 2.3.

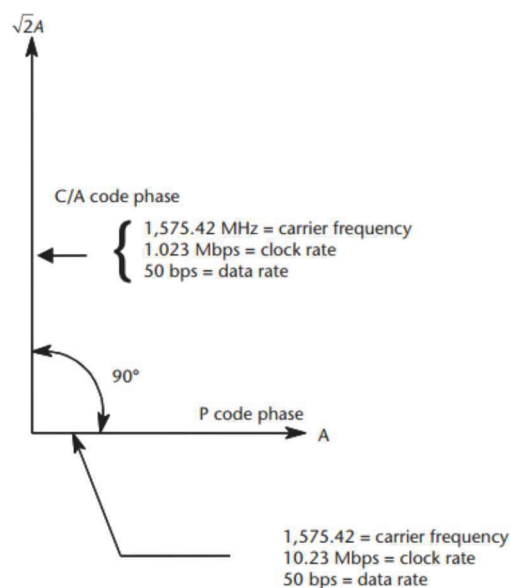
Sobre o sinal fundamental em $f_0 = 10,23\text{MHz}$ é necessário que exista uma compensação pelos efeitos relativísticos. A Teoria da Relatividade Restrita ensina que, um relógio com velocidade de deslocamento de aproximadamente 4 km/s, que é a velocidade final do satélite em órbita, marcará o tempo mais lentamente que um relógio estacionário. Conforme CARARO (2009), ainda em solo, os relógios dos satélites deverão ser ajustados com um valor menor que a frequência esperada conforme as seguintes equações:

$$f = f_0 \left(1 - \frac{\mu}{c^2} * \left(\frac{1}{R_0} - \frac{3}{2a} \right) \right) \quad (2.1)$$

Onde

μ = Constante Gravitacional da Terra, $3,9860044 \times 10^{14} \text{m}^3/\text{s}^2$

Figura 2.3 – Ortogonalidade entre o código C/A e P(Y).



Fonte: KAPLAN (2006).

c = velocidade da luz

R_0 = é a razão entre μ e o potencial gravitacional ao nível médio dos mares, e vale 6363672,56 m

a = Maior semi-eixo da órbita do satélite, 26561400 m.

De modo que calculado o termo apresenta o seguinte resultado:

$$\frac{\mu}{c^2} * \left(\frac{1}{R_0} - \frac{3}{2a} \right) = 4,4647 \times 10^{-10} \quad (2.2)$$

$$f = 10,23 \left(1 - 4,4647 \times 10^{-10} \right) = 10,22999999543 \text{ MHz} \quad (2.3)$$

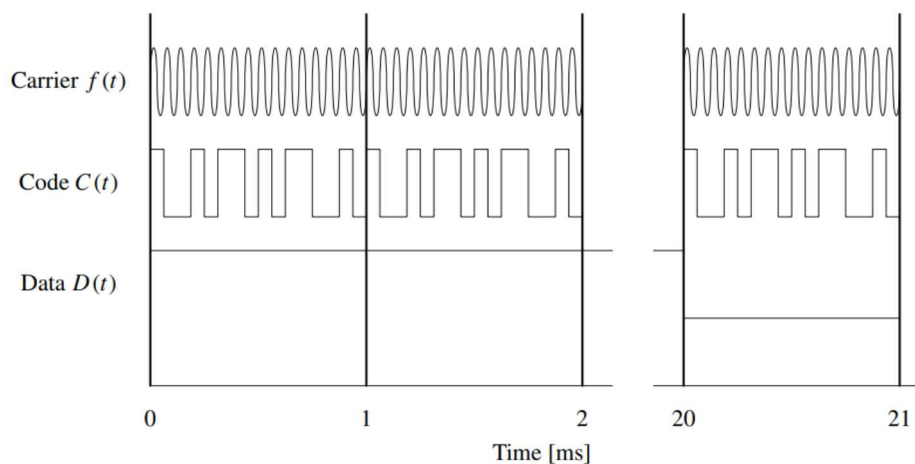
O que garante que o sinal de portadora tenha o valor de $f_{L1} = 1575,42 \text{ MHz}$ para o usuário final do sistema, conforme USAF (1995). Não confundir com o efeito *Doppler*, que será visto com no item 2.6.

Os códigos C/A e P(Y) e os dados de navegação são sincronizados através do gerador de código P(Y). Uma vez gerados, os códigos são combinados com os dados de navegação através de uma operação lógica XOR. Os dados resultantes são modulados entre si utilizando a portadora L1, através de um modulador BPSK (*Binary Phase Shifting Keying Modulation* - Modulação por Chaveamento Binário de Fase). Convém notar que existe uma defasagem de 90° na portadora que alimenta o modulador do código C/A. O sinal resultante P(Y) é atenuado 3dB antes de ser somado com o sinal C/A,

resultando então no sinal final que será transmitido na frequência L1.

Considerando que os dados de navegação têm uma *clock* de 50 Hz, e que cada *bit* dura 20 ms, então para cada *bit* de dados de navegação, será transmitido 20 conjuntos completos do código C/A, conforme mostrado na Figura 2.4.

Figura 2.4 — Estrutura do Sinal L1.



Fonte: BORRE (2007).

2.4 O código C/A

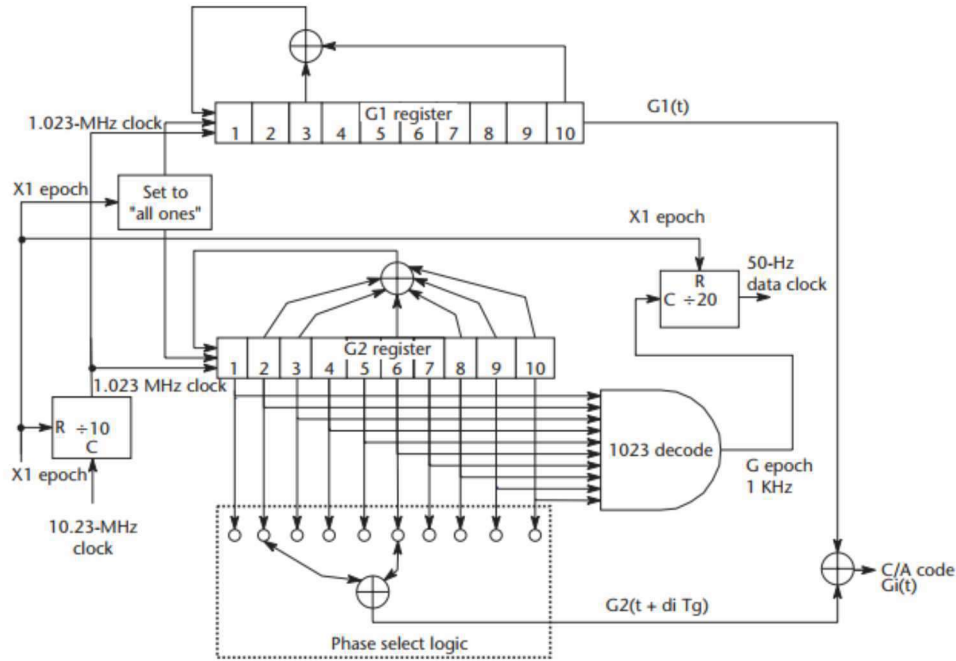
Na implementação do sistema GPS, foi usada uma sequência de espalhamento USAF (1995), especificamente a sequência conhecida como *Gold Codes*, descritas por Robert Gold, GOLD (1967). Tais sequências também são conhecidas como ruído pseudo-randômico ou simplesmente sequências PRN em razão de suas características.

2.4.1 A sequência de Gold para o sinal GPS

Os códigos PRN transmitidos pela constelação de satélites são sequências determinísticas com características de ruído GOLD (1967). Para geração do código C/A, que é uma sequência escolhida pelos desenvolvedores do sistema GPS USAF (1995), é utilizado um tipo especial de registrador de deslocamento, vide Figura 2.5, que gera uma sequência máxima de $N = 2^n - 1$ elementos, onde $n = 10$, resultando num valor de 1023 bits. E a cada final do bit 1023, o registrador de deslocamento é reiniciado, fazendo com que o código comece novamente, KAPLAN (2006).

A sequência gerada é composta então de 512 bits com valor 1 e 511 bits com valor igual a zero e aparentam que estão distribuídos de modo aleatório mas a sequência gerada é determinística, sendo considerada pseudo-aleatória (*pseudorandom* do original em inglês), BORRE (2007).

Figura 2.5 — Estrutura do Registrador de Deslocamento.



Fonte: KAPLAN (2006).

O código *Gold* é composto da soma de polinômios de sequência máxima conhecidos como G1 e G2, assim sendo, o registro G1 têm uma configuração:

$$f(x) = 1 + x^3 + x^{10} \quad (2.4)$$

e o registro G2 têm uma configuração:

$$f(x) = 1 + x^2 + x^3 + x^6 + x^8 + x^9 + x^{10} \quad (2.5)$$

E a combinação adequada dos dois registradores de deslocamento, simplificada, geram um conjunto único de códigos C/A ou PRN e qualquer par destes códigos têm uma correlação extremamente baixa, ou seja, são ortogonais entre si, BORRE (2007).

Atualmente existem 37 códigos PRN C/A e os primeiros 32 códigos são designados para os 24 satélites em órbita. Os códigos 34 e 37 são idênticos sendo que os códigos 33 a 37 são reservados para outros usos, BORRE (2007).

2.5 Propriedades da Correlação

Conforme BORRE (2007), as características principais dos sinais utilizados pela constelação GPS são as propriedades de correlação, o que permite transmitir dois

ou mais sinais espalhados espectralmente sem problemas para recuperar o sinal posteriormente.

Na correlação cruzada, os códigos C/A não possuem uma correlação entre si. Definido matematicamente como, BORRE (2007) e PROAKIS (1996) e considerando C_i e C_k como os códigos C/A dos satélites i e k , e ainda o índice m representando eventual deslocamento de tempo a nova sequência $r_{ik}(m)$ é dada como resultante das operações de correlação cruzada:

Correlação cruzada:

$$r_{ik}(m) = \sum_{l=0}^{1022} C_i(l)C_k(l-m) \cong 0 \quad (2.6)$$

Já na auto-correlação, onde é feita a correlação entre a mesma sequência, existe uma baixa correlação exceto quando não há deslocamento de tempo entre as sequências.

Auto-Correlação :

$$r_{kk}(m) = \sum_{l=0}^{1022} C_k(l)C_k(l-m) \cong 0 \quad (2.7)$$

2.6 Variação da frequência em função do efeito *Doppler*.

Outro ponto de análise do sinal GPS é o efeito *Doppler*, Figura 2.6, que é a mudança de frequência causada pelo deslocamento do transmissor (satélite) em relação ao receptor GPS, afetando aquisição e a procura do sinal. Para um receptor fixo na terra, o deslocamento máximo de frequência da frequência L1 fica em torno de 5KHz.

Para o cálculo do efeito *Doppler* será feito algumas considerações iniciais. A órbita dos satélites é de 12 horas, altitude de órbita de 20000 km e raio médio da terra de 6400 km, e para o cálculo da velocidade utiliza-se a equação:

$$C_0 = \frac{2\pi(R+r)}{12} \quad (2.8)$$

Onde

C_0 = velocidade do satélite

r = altitude da órbita

R = raio médio da terra

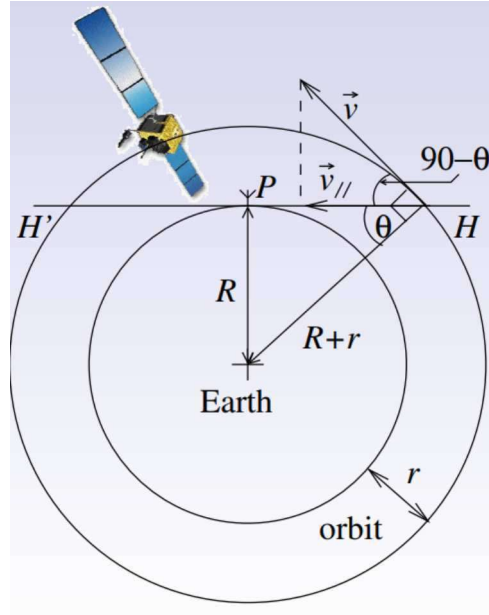
Substituindo os valores:

$$C_0 = \frac{2\pi(6400 + 20000)}{12}$$

$$C_0 \cong 13800 \text{ km/h}$$

Conforme mostrado na Figura 2.6, um receptor na posição P vê o deslocamento do satélite da posição H para H'. Na posição H, o vetor velocidade $\vec{v}$ é projetado na direção de P, que chamaremos de $\vec{v}_2$, e para seu cálculo fazemos $\text{sen}(90 - \theta) = \vec{v}_2 / \vec{v}$, logo temos que $\vec{v}_2 = \text{sen}(90 - \theta) \cdot \vec{v}$ e considerando que:

Figura 2.6 – Efeito Doppler.



Fonte: FRIEDT (2015).

$$\text{sen}(a - b) = ((\text{sen}(a) \cdot \cos(b)) - (\text{sen}(b) \cdot \cos(a))) \quad (2.9)$$

Substituindo:

$$\text{sen}(90 - \theta) = ((\text{sen}(90) \cdot \cos(\theta)) - (\text{sen}(\theta) \cdot \cos(90))) \quad (2.10)$$

Tem-se que:

$$\text{sen}(90 - \theta) = \cos(\theta) \quad (2.11)$$

Então $\vec{v}_2 = \cos(\theta) \cdot \vec{v}$, Por outro lado o $\cos(\theta) = \frac{R}{R+r}$ de modo que:

$$\vec{v}_2 = \vec{v} \cdot \frac{R}{R+r} \quad (2.12)$$

Logo, substituindo os valores

$$\vec{v}_2 = 13800 \cdot \frac{6400}{6400 + 20000}$$

$$\vec{v}_2 \cong 3,350 km/h$$

ou

$$\vec{v}_2 \cong 930 m/s$$

Enfim, calculando o efeito *Doppler*

$$\Delta f = \frac{f_0 \cdot \vec{v}_2}{C}$$

$$\Delta f = \frac{1,57542 \times 10^9 \cdot 930}{3 \times 10^8}$$

$$\Delta f = \pm 4900 Hz$$

Assim, em um dado momento e para um receptor estacionário, o efeito *Doppler* máximo será de $\pm 4900 Hz$. Para um veículo em torno de $100 km/h$ tem-se uma variação de:

$$\Delta f = \frac{1,57542 \times 10^9 \cdot (930 \pm 30)}{3 \times 10^8}$$

$$\Delta f = \pm 5050 Hz$$

Para um avião em viagem de cruzeiro, em torno de $900 km/h$ tem-se uma variação de:

$$\Delta f = \frac{1,57542 \times 10^9 \cdot (930 \pm 250)}{3 \times 10^8}$$

$$\Delta f = \pm 6200 Hz$$

Já o efeito *Doppler* no código C/A, no modo estacionário é em torno de:

$$\Delta f = \frac{1,023 \times 10^6 \cdot 930}{3 \times 10^8}$$

$$\Delta f = \pm 3,1 \text{ Hz}$$

e para um receptor em máxima velocidade:

$$\Delta f = \frac{1,023 \times 10^6 \cdot 930 \pm 30}{3 \times 10^8}$$

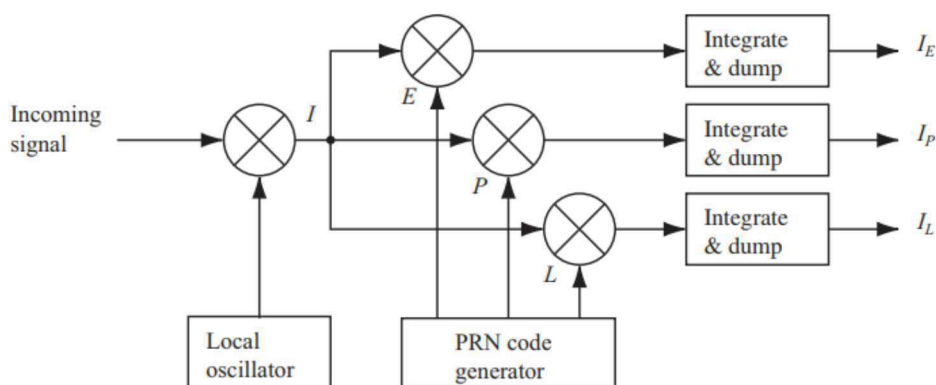
$$\Delta f = \pm 6,2 \text{ Hz}$$

A questão do efeito *Doppler* no sinal de portadora L1 e no código C/A desempenha um papel importante para sua efetiva localização no espectro de radiofrequência e no processamento subsequente do sinal.

2.7 Sobre o *Tracking Code*.

O objetivo do *Tracking Code* (rastreamento de código), Figura 2.7, é manter a fase do código recebido perfeitamente alinhada com a réplica do código C/A e/ou P(Y) usada para a decodificação do sinal. Maiores detalhes serão mostrados no capítulo 3.

Figura 2.7 – Estrutura básica do *Tracking Code*.



Fonte: BORRE (2007).

2.8 Conclusão.

Neste capítulo foi abordado sobre a Constelação de Satélites GPS, notadamente quanto aos aspectos técnicos e característicos dos sinais de radiofrequência emitido pelos satélites da constelação, tempo e frequência e como os fundamentos do uso da técnica de acesso ao meio, chamada de Acesso Múltiplo por Divisão de Código, possibilita que todos os satélites transmitam na mesma frequência e sem interferência, garantido a recepção adequada ao usuário final do sistema GPS.

3 O RECEPTOR RTL-SDR

3.1 Introdução

Neste capítulo será apresentado, sinteticamente, o espectro de radiofrequência do sinal GPS emitido pela constelação de satélites e sua recepção com um receptor RTL-SDR.

Também será apresentada as características técnicas do receptor RTL-SDR, histórico do desenvolvimento do receptor DVB-T (*Digital Video Broadcasting - Terrestrial* - Transmissão Terrestre de Vídeo Digital) para uso como receptor de banda larga bem como faixa de operação, formato dos dados de saída e demais parâmetros.

Utilizando o *Octave* foi possível identificar que a saída capturada da amostra apresenta um formato chamado *unsigned int8*, que será detalhado ao final do capítulo.

3.2 O espectro do sinal GPS

O sinal da constelação incidente na antena do receptor propagado pelo espaço, produz uma potência na antena de -160 dBW, Figura 3.1, com uma frequência de portadora de $1,57542$ GHz e aproximadamente 2 MHz de largura de banda, BORRE (2007) e USAF (1995).

A potência de ruído é definida por:

$$P_t = ktB \quad (3.1)$$

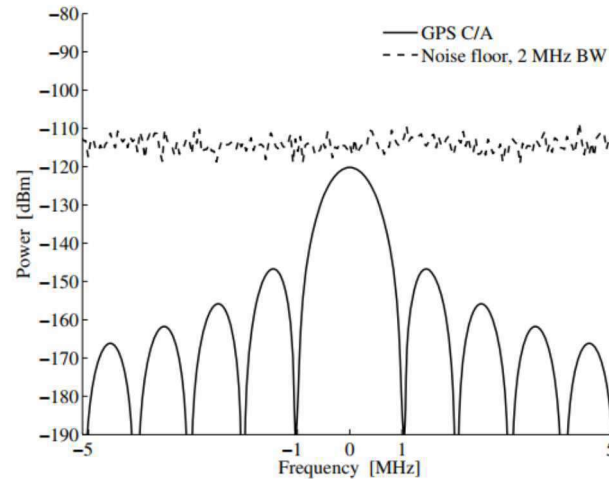
Onde $k = 1,38 \times 10^{-23}$ J/K - Constante de Boltzmann

t = temperatura em Kelvin

B = Largura de banda ocupada pelo sinal

$$P_t = 1,38 \times 10^{-23} \times 2 \times 10^6 \times 298 \quad (3.2)$$

$$P_t = 1,38 \times 10^{-23} \times 2 \times 10^6 \times 298 = 8,224 \times 10^{-15} W \quad (3.3)$$

Figura 3.1 — Ruído Térmico x Sinal GPS (L1).

Fonte: BORRE (2007).

Em dBW

$$P_t = 10 \times \log(8,224 \times 10^{-15}) = -140,08 \text{ dBW} \quad (3.4)$$

e finalmente expresso em dBm

$$P_t = -110,08 \text{ dBm} \quad (3.5)$$

O sinal observado na banda de frequência de interesse, no caso, 2 MHz , é dominado puramente pelo ruído térmico. De fato, esta é uma característica deste tipo de acesso ao meio utilizado pelo sistema GPS, qual seja, CDMA (*Code Division Multiple Access* - Acesso Múltiplo por Divisão de Código) na sigla em inglês.

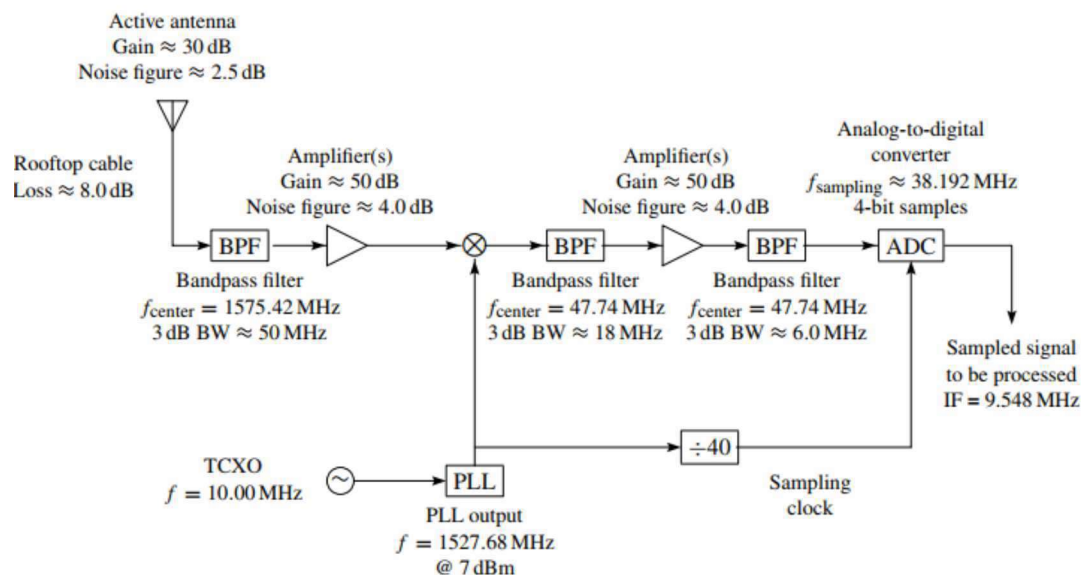
3.2.1 Um receptor GPS via software.

O autor, BORRE (2007), implementa um receptor-*software* em código para ser usado no *Matlab* e também no *Octave* conforme publicado em seu livro, fato este que poderia alavancar em muito o trabalho de pesquisa sobre sistema GPS.

Durante o trabalho de levantamento de dados do presente trabalho, foi encontrada uma cópia do *software*, relativo ao livro *A Software-Defined GPS and Galileo Receiver: A Single-Frequency Approach* compatível com o *Octave*, produzido e disponibilizado por Paul Kristiann em seu repositório, KRISTIAN (2022), de modo que foi possível explorar o princípio de funcionamento do programa e, utilizando um arquivo de dados GPS capturado também disponibilizado por Paul Kristiann, foi possível sua análise.

Um receptor poderia utilizar a seguinte arquitetura, Figura 3.2, para a recepção do sinal GPS, conforme sugerido e implementado por BORRE (2007).

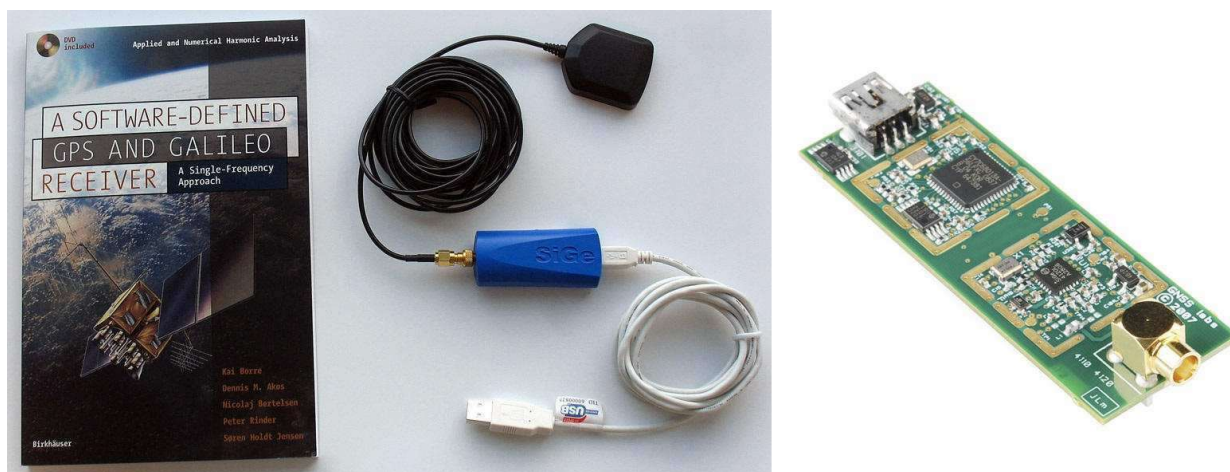
Figura 3.2 – Receptor GPS (L1).



Fonte: BORRE (2007).

Entretanto o *hardware* amostrador, mostrado na Figura 3.3, foi descontinuado possivelmente em 2014, SPARKFUN (2022).

Figura 3.3 – Amostrador para uso com o *Software GPS*.



Fonte: PLAUSINAITIS (2022).

O primeiro passo para execução do programa no *Octave* é rodar o arquivo *setSettings.m*, Figura 3.4, que apresenta um formulário oferecendo várias opções, onde destaca-se a entrada do arquivo de amostras e seu formato.

Figura 3.4 – Software GPS - Arquivo *setSettings.m*

Receiver settings

Signal processing parameters

Data file:

Sampling freq. (Hz): N of bytes to skip: Data type:

IF (Hz): N of ms to process:

Acquisition settings

Satellites (PRN) to be acquired:

☒ 1	☒ 4	☒ 7	☒ 10	☒ 13	☒ 16	☒ 19	☒ 22	☒ 25	☒ 28	☒ 31
☒ 2	☒ 5	☒ 8	☒ 11	☒ 14	☒ 17	☒ 20	☒ 23	☒ 26	☒ 29	☒ 32
☒ 3	☒ 6	☒ 9	☒ 12	☒ 15	☒ 18	☒ 21	☒ 24	☒ 27	☒ 30	

Acq. band (kHz): Det. threshold: ☐ Skip acquisition

Tracking settings

Number of channels: ☒ Plot tracking

PLL settings

Bandwidth: Damping ratio:

DDL settings

Bandwidth: Damping ratio: Corr. spacing:

Positioning settings

Nav. sol. period (ms): Elevation mask: ☒ Troposphere correction

True receiver coordinates (UTM):

E: N: U:

Fonte: O autor.

Uma vez selecionado o arquivo, submete-se o conjunto de informações e segue-se para o próximo passo, que é rodar o arquivo *postprocessing.m*, onde serão analisados as informações contidas no arquivo submetido. O *Octave* apresenta, inicialmente, se detectou algum sinal PRN ou não. Se sim, irá apresentar todos os satélites detectados, conforme mostrado na Figura 3.5.

Figura 3.5 – Software GPS - Arquivo *postprocessing.m*

```
>> postProcessing
Starting processing...
Acquiring satellites...
(. . 03 . . . . . 15 16 . 18 19 . . 22 . . . . . )

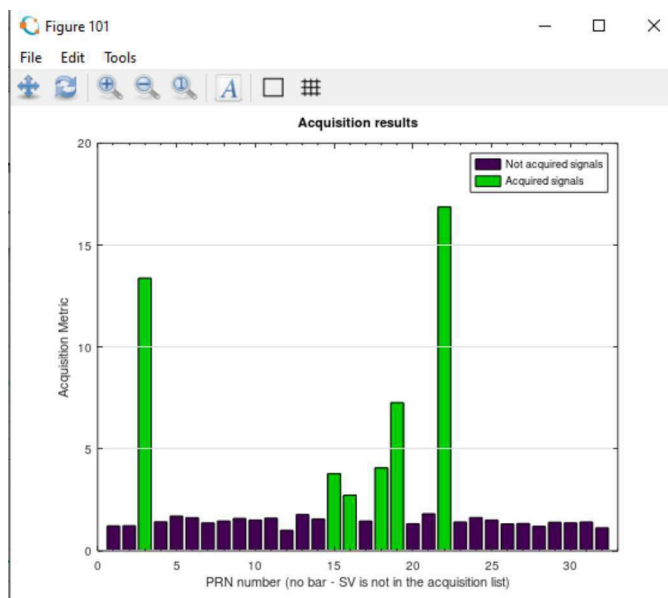
=====
| Channel | PRN | Frequency | Doppler | Code Offset | Status |
=====
| 1 | 22 | 4.13468e+06 | 4277 | 8475 | T |
| 2 | 3 | 4.13440e+06 | 4004 | 1764 | T |
| 3 | 19 | 4.13694e+06 | 6541 | 740 | T |
| 4 | 18 | 4.13247e+06 | 2069 | 12297 | T |
| 5 | 15 | 4.13209e+06 | 1686 | 12260 | T |
| 6 | 16 | 4.13125e+06 | 851 | 12838 | T |
| 7 | --- | --- | --- | --- | Off |
| 8 | --- | --- | --- | --- | Off |
=====

Tracking started at 10-Nov-2022 21:46:28
Not able to read the specified number of samples for tracking, exiting!
Tracking is over (elapsed time 00:00:02)
Saving Acq & Tracking results to file "trackingResults.mat"
Calculating navigation solutions...
Record is too short or too few satellites tracked. Exiting!
Processing is complete for this data block
Plotting results...
```

Fonte: O autor.

No caso apresentado, temos a detecção dos satélites 03, 15, 16, 18, 19 e 22 da constelação GPS. Complementando o resultado do processamento é apresentado o gráfico dos satélites detectados, Figura 3.6:

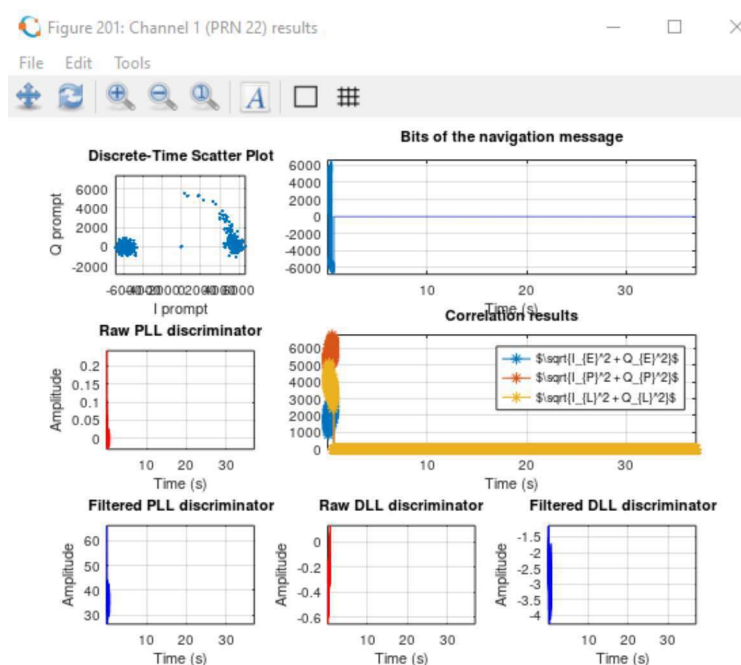
Figura 3.6 – Software GPS - Gráfico.



Fonte: O autor.

Sinal do satélite 03 detectado, Figura 3.7:

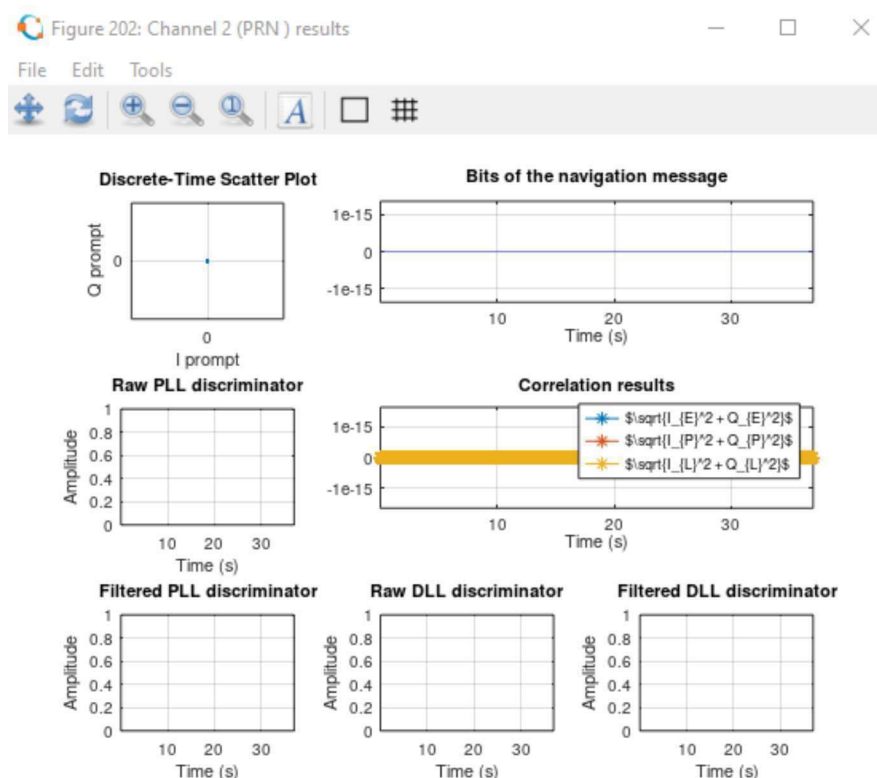
Figura 3.7 – Software GPS - PRN 03 detectado.



Fonte: O autor.

E por fim, nenhum sinal detectado na amostra, não é retornado maiores informações nos gráficos, Figura 3.8:

Figura 3.8 – Software GPS - PRN não detectado.



Fonte: O autor.

Entretanto o código apresentado não tem muita utilidade pois como seu amos-
trador foi descontinuado, não sendo encontrado um substituto que faça a mesma função.

3.3 O receptor RTL-SDR

Como alternativa aos receptores comerciais para fins didáticos, Eric Fry, em 2012, acabou descobrindo que receptores USB (*Dongles*) usados para recepção de Televisão Digital, Figura 3.9, que utilizavam o circuito integrado RTL2832U, podendo sintonizar sinais entre 24 MHz e 1776 MHz, poderiam ser utilizados como um receptor de baixo custo pois permitiam a transferência de dados brutos I/Q para processamento via porta USB, conforme OSMOCOM (2022).

As primeiras versões do *Dongle* apresentavam um oscilador não muito estável e algumas inconveniências pois o mesmo não foi projetado para operar com uma impedância de 50 ohms, apresentava um conector tipo F para conexão à antena dentre outros pontos negativos.

Figura 3.9 – Dongle para DVB-T - Conector F.



Fonte: OSMOCOM (2022)

3.3.1 Características técnicas do receptor RTL-SDR

O receptor que será testado na recepção do sinal L 1 do sistema GPS é definido por *Software* e possui como características na sintonia ou recepção de sinais do tipo:

- Banda de radioamador: VHF, UHF, HF, CW, SSB, modos digitais (PSK, CW, RTTY, SSTV, FT8, satélites de radioamador (exemplo ISS – Estação Espacial Internacional que está em órbita da terra) e muitos outros;
- Faixa do cidadão, AM-SSB, bandas USB, LSB e FM;
- Varredura de rádio em geral, sistema *Trunking*.
- Rádio de segurança, EMS e outros;
- ADSB (radar do tráfego aéreo), comunicação do tráfego aéreo commercial (avião x aeroporto), monitoramento de tráfego aéreo, AIS (acompanhamento da posição de barcos marítimos), decodificar ACARS, DAB;
- Balões meteorológicos, APRS, satélites meteorológicos NOAA-APT, imagens satélite meteorológico GOES (em conjunto com outros hardware);
- Receber sensores de temperatura sem fio, sensores sem fio de medição de energia e outros;
- GPS.

Esse receptor pode sintonizar sinais entre 500 KHz e 1,7 GHz e tem até 3,2 MHz de largura de banda instantânea. Na recepção de HF abaixo de 24 MHz funciona no modo de amostragem direta.

Existe uma versão mais recente do *Dongle* com um oscilador mais estável e disponível para venda, como mostrado na Figura 3.10. O mesmo foi adquirido para ser utilizado no presente trabalho. Detalhe para o oscilador de frequência intermediária de 28,8 MHz, conector SMA e um melhor desenho do *Bias-T*, Conforme mostrado na figura 3.10.

Figura 3.10 – Dongle RTL-SDR.



Fonte: Autor.

3.3.2 Configuração de uso do Dongle.

Para o uso do *Dongle* para recepção dos sinais fracos, com nível dos sinais em torno de -110 dbm (ver Figura 3.1 e equações 3.4 e 3.5), foi montada uma configuração conforme mostrado na Figura 3.11.

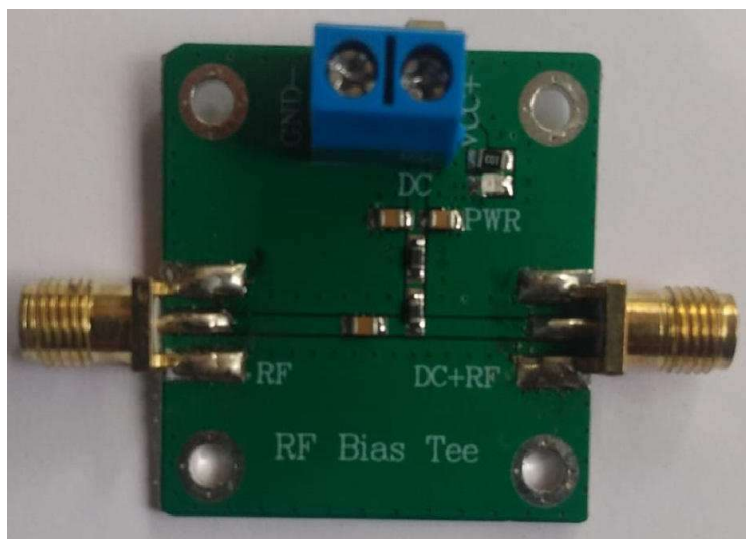
Figura 3.11 – Configurando o Dongle RTL-SDR.



Fonte: Autor.

O *Bias T* mostrado na Figura 3.12, utilizado, fornece +5V para a antena ativa e permite que o sinal de RF passe para o filtro passa-faixa sem acoplamento DC entre antena e o filtro.

Figura 3.12 – O *Bias T*.



Fonte: Autor.

Após o sinal passar pelo *Bias-T*, o mesmo passa pelo filtro passa-faixa, Figura 3.13, centrado em 1,57542 GHz que visa eliminar eventuais interferências existentes. A montagem foi feita interligando a antena ativa ao *Bias T*, que é interligado ao filtro passa-faixa e na sua saída, na entrada do receptor RTL-SDR.

Figura 3.13 – O filtro passa-faixa.



Fonte: Autor.

Foi utilizada uma antena genérica ativa para GPS que pode ser encontrada em vários *sites* chineses e aparentemente não há informação uniforme sobre a mesma, e conforme Figura 3.14 destacam-se os seguintes parâmetros:

Tensão de alimentação = 5V;

Ganho = 28 db.

Figura 3.14 – Antena genérica para GPS.

High Quality External 1575.42MHz GPS Active Antenna

Reference FOB Price: **US \$2.9** /pieces (100 pieces (Min. Order))

Usage:	Communication Antenna
Operating Wavelength:	Microwave
Directionality:	Omnidirectional Antenna
VSWR:	<1.5
Item:	External 1575.42MHz GPS Active Antenna
Feature:	High Quality/High Gain
Customization:	Available Customized Request

Model	TQC-GPS- 010
Frequency Range(MHz) Center Freq	1575.42±3
Band Width(MHz)	±10
DC voltage	3~5V
DC current	5~15mA (maximum)
V.S.W.R	≤ 1.5
Gain(dBi)	28
Noise Figure	≤ 1.5
Input Impedance(Ω)	50
Polarization	Vertical
Weight (g)	57
Size(mm)	46x36x14
Max-power(W)	50
Connector Type	Sma/ Smb/Mcx
Cable Length	RG174 2M/3M

Fonte: *Internet*.

Foi feita uma avaliação dos *Bias T* e do filtro passa-faixa utilizando um Analisador de Rede Vetorial, chamado de NanoVNA (*Vector Network Analyzer* - Analisador de Rede Vetorial não profissional), conforme mostrado na Figura 3.15. O instrumento abrange uma faixa de 50 KHz a 6 GHz e consegue fazer uma análise das características da impedância dos dispositivos na faixa de frequência de interesse. IYER (2021) apresenta seu uso nas aulas remotas da disciplina *Microwave Circuits Course*, na Universidade de Alberta, Canadá.

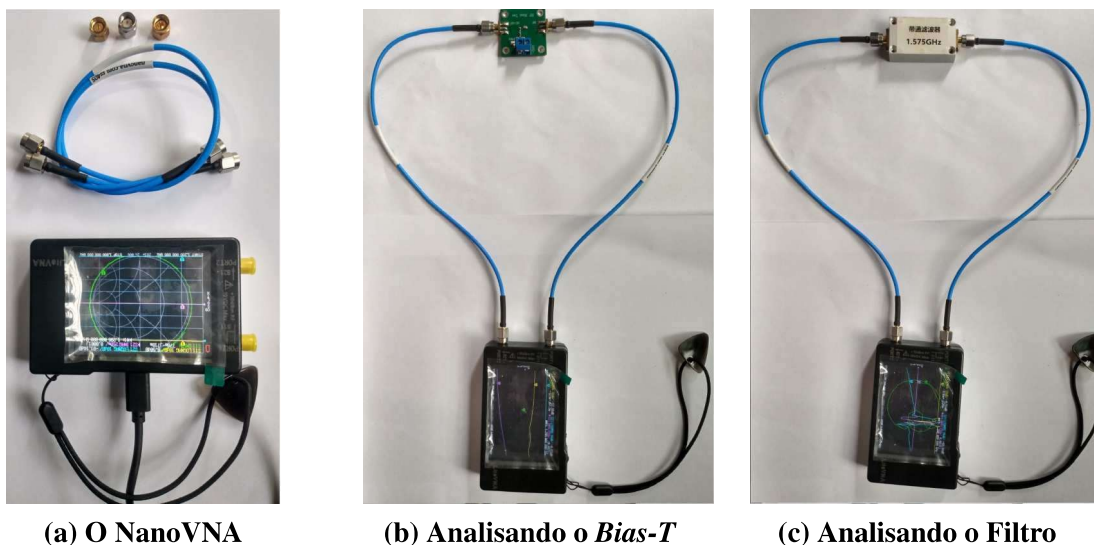
Na Figura 3.15a, é apresentado o analisador de rede vetorial ligado, seu conjunto de cabos e suas cargas para calibração do mesmo antes do uso.

Na Figura 3.15b é apresentado o Bias-T conectado no NanoVna para que se possa medir seus parâmetros técnicos e impedância característica. Já na Figura 3.15c, o NanoVNA está conectado ao filtro passa-faixa para medir suas características e parâmetros técnicos, em especial sua largura de banda e perdas por inserção.

O filtro passa-faixa adquirido se mostra satisfatório para ser utilizado visto que conforme os resultados obtidos do analisador de rede vetorial, apresentam os seguintes valores, Figura 3.16.

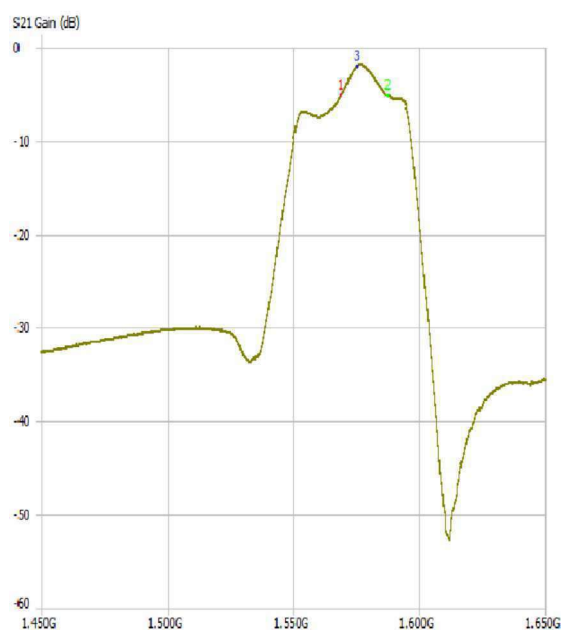
Conforme mostrado, cada marcador aponta as características técnicas para cada ponto da frequência analisada, tais como frequência, impedância, indutância e capacitância série, resistência e indutância paralela, VSWR (Voltage Standing Wave Ratio - Razão de Onda Estacionária para Tensão), perda de retorno, fator de qualidade e os

Figura 3.15 – Analisando o filtro passa-faixa e *Bias T*.



Fonte: Autor.

Figura 3.16 – Analisando o filtro passa-faixa.



Fonte: Autor.

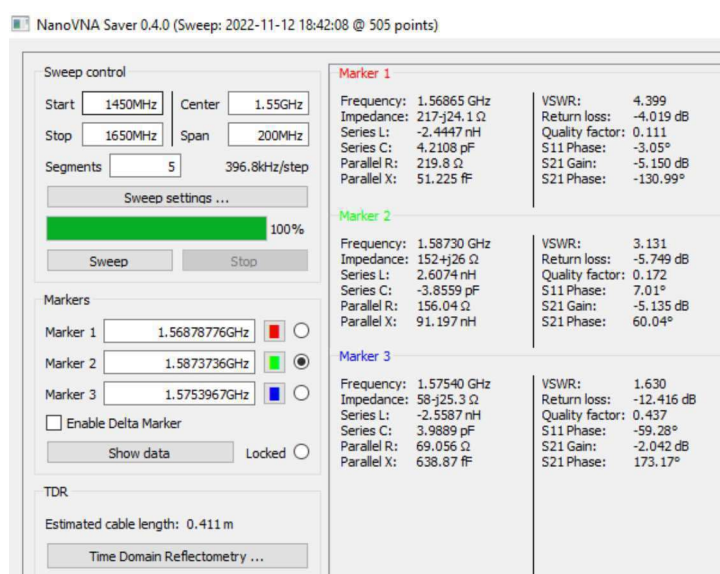
elementos proveniente da matriz de espalhamento S_{11} e S_{21} , que representa perda de retorno e ganho, respectivamente, POZAR (2011).

O ponto 3 foi escolhido como ponto central da medida e ajustado o mais próximo possível da frequência central do filtro passa-faixa. os demais pontos foram escolhidos de modo tal que representassem a largura de banda de 3 dB do filtro. O equipamento foi devidamente calibrado com o conjunto de calibração, que consiste em um

conector SMA aberto, um conector SMA em curto e por último, um conector SMA com impedância de 50 Ohms.

Para a execução da medida, o NanoVna foi ajustado para medir de 1450 MHz a 1650 MHz. Se porventura desejasse medir outra faixa de frequência seria necessário calibrar novamente o equipamento. O resultado resumido é apresentado na Figura 3.17:

Figura 3.17 — Resultados das medidas do filtro passa-faixa.



Fonte: Autor.

Resultados das medidas:

Impedância na frequência de operação: $\cong 58\Omega$;

Perda de inserção: $\cong 2.04$ dB;

Largura de banda aproximada (3 dB): 19 MHz.

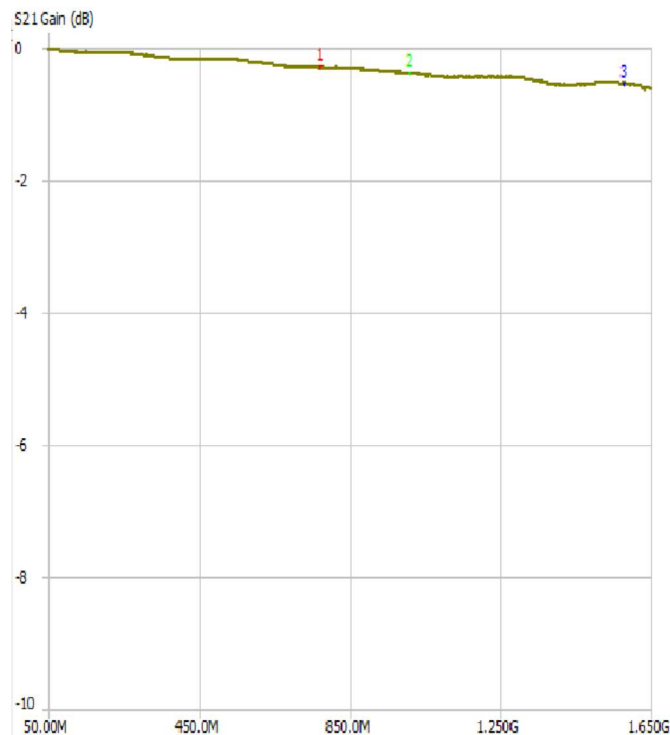
Já o *Bias-T* apresenta uma impedância linear na faixa de análise conforme mostrado na Figura 3.18. Aqui novamente, para a execução da medida, o NanoVna foi ajustado e calibrado para medir de 50 MHz a 1650 MHz. O ponto 3 foi escolhido na frequência mais próxima possível de 1,5754200 GHz. Complementando as medidas, o ponto 1 foi ajustado para aproximadamente 770 MHz e o ponto 2 para 1 GHz.

Os pontos foram escolhidos, conforme mostrado na Figura 3.19, de modo que pudesse ter uma visão macro da impedância ao longo de uma ampla faixa de frequências e seu comportamento.

Resultados das medidas:

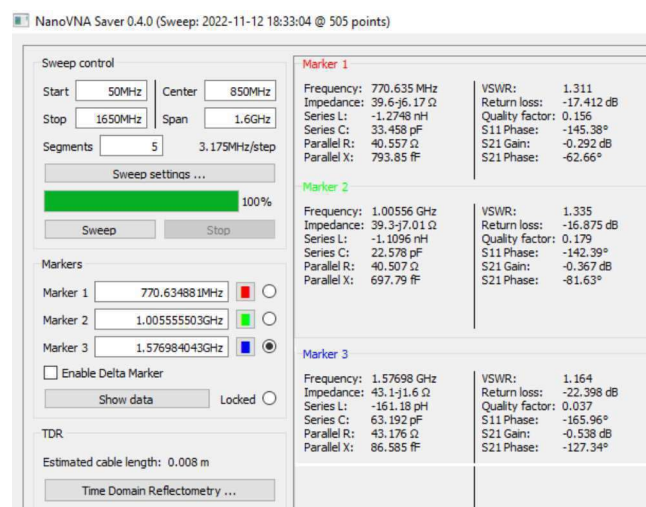
Impedância na frequência de operação: $\cong 43\Omega$ – Perda de inserção: $\cong 0.53$ dB.

Figura 3.18 – Analisando o *Bias-T*.



Fonte: Autor.

Figura 3.19 – Resultados das medidas do *Bias-T*.



Fonte: Autor.

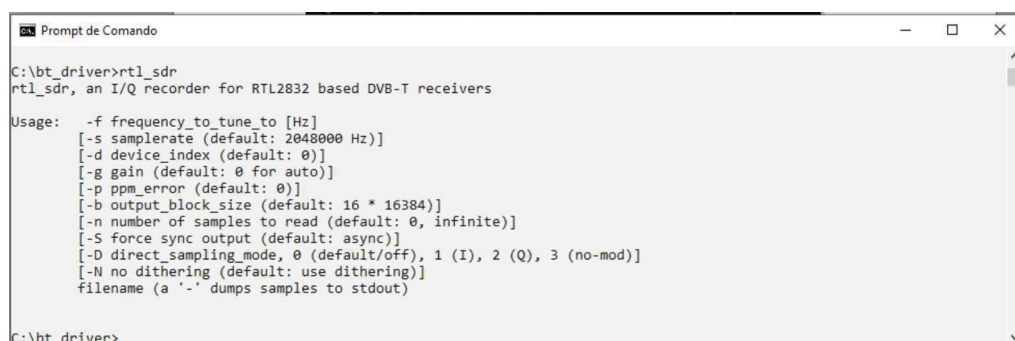
Após a análise, conclui-se que os equipamentos auxiliares são adequados para o experimento e eventuais variações nos valores medidos devem-se ao fato que o equipamento NanoVna não é um instrumento profissional mas que apresenta um excelente custo/benefício quando se compara com um equipamento profissional e também em

relação ao custo do mesmo, aproximadamente cem dólares.

3.4 Realizando a amostragem do sinal L1.

Para salvar o sinal capturado pelo *Dongle* RTL-SDR é necessário utilizar um conjunto específico de *software*. Esse conjunto de *software* foi desenvolvido pela OS-MOCOM (*Open source mobile communications*) e roda nativamente em *Linux* embora o projeto mantenha *softwares* compatíveis com o *Windows*. A Figura 3.20 ilustra a saída retornada pelo programa quando não se usa nenhum parâmetro de entrada.

Figura 3.20 — Inicializando o amostrador.



```

C:\bt_driver>rtl_sdr
rtl_sdr, an I/Q recorder for RTL2832 based DVB-T receivers

Usage:  -f frequency_to_tune_to [Hz]
        [-s samplerate (default: 2048000 Hz)]
        [-d device_index (default: 0)]
        [-g gain (default: 0 for auto)]
        [-p ppm_error (default: 0)]
        [-b output_block_size (default: 16 * 16384)]
        [-n number of samples to read (default: 0, infinite)]
        [-S force sync output (default: async)]
        [-D direct_sampling_mode, 0 (default/off), 1 (I), 2 (Q), 3 (no-mod)]
        [-N no dithering (default: use dithering)]
        filename (a '-' dumps samples to stdout)

C:\bt_driver>

```

Fonte: Autor.

No caso são mostrados todos os parâmetros possíveis de utilização do receptor para realizar a captura, sendo necessário executar o arquivo "rtl-sdr.exe", seguido dos seguintes parâmetros de configuração que são detalhados na Figura 3.21 e explicados.

Figura 3.21 — Inicializando o amostrador.



```

C:\bt_driver>rtl_sdr -f1575420000 -s2000000 -n2000000 NOMEARQUIVO.BIN
Found 1 device(s):
 0: Realtek, RTL2838UHIDIR, SN: 00000001

Using device 0: Generic RTL2832U OEM
Found Rafael Micro R820T tuner
Exact sample rate is: 2000000.052982 Hz
Sampling at 2000000 S/s.
Tuned to 1575420000 Hz.
Tuner gain set to automatic.
Reading samples in async mode...

User cancel, exiting...

C:\bt_driver>

```

Fonte: Autor.

- f sintoniza o *dongle* na frequência de interesse, em Hz;
- s indica a taxa de amostragem utilizada;
- n indica o número de amostras que serão realizadas.
- *NOME DO ARQUIVO.BIN* indica o arquivo onde as amostras serão salvas.

O comando mostrado na Figura 3.21, sinaliza que serão tomadas 2×10^6 amostras, com uma taxa de amostragem de 2 MHz, onde a amostragem é aproximadamente duas vezes a largura de banda utilizado pelo sistema GPS, que é de 1,023 MHz conforme estudado no capítulo 2, na frequência de 1,57542 GHz sendo que o tempo médio para execução do programa é em torno de 4 segundos, onde é gerado um arquivo de aproximadamente 4 Mbytes de tamanho, como mostra a Figura 3.22.

Figura 3.22 — Arquivo Salvo.

Nome	Data de modificação	Tipo	Tamanho
 NOMEARQUIVO.BIN	14/11/2022 22:21	Arquivo BIN	3.907 KB

Fonte: Autor.

Utilizando o *Octave* é possível analisar o formato do arquivo salvo.

3.5 Processando a amostra no *Octave*.

3.5.1 Sobre o *Octave*.

O *Octave* é uma linguagem de alto nível para resolução de problemas numéricos, Octave (2022) e extremamente compatível com *MATLAB* e apresenta como grande vantagem, sua oferta gratuita à comunidade acadêmica e geral sem custo algum para o usuário final, tal como estudantes, instituições de ensino dentre outros.

3.5.2 Análise da amostra.

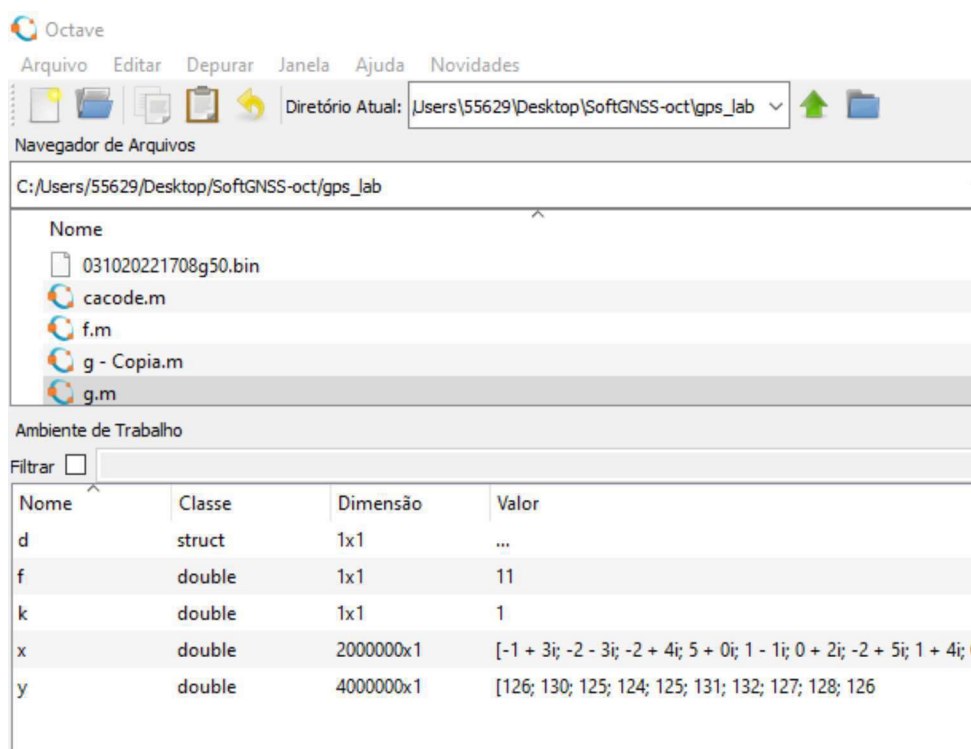
A saída de dados do *dongle* é no formato *unsigned int8*, que é um valor de 8 *bits*, variando de 0 a 255, sem cabeçalhos e sinalização, e cada amostra lida é composta de dois *bytes*. O primeiro *byte* refere-se à parte real (I) do sinal em quadratura I/Q e o último *byte* é a parte imaginária (Q), SUPERKUH (2022).

Foi criado um pequeno *script* para ler o arquivo de teste, que é oriundo do receptor RTL-SDR, para demonstrar como foi feita a conversão do formato *unsigned int8* para o formato I/Q.

O arquivo é aberto e lido pelo *Octave* e seu conteúdo é armazenado na variável "x". Considerando o primeiro par de dados lidos identifica-se os valores 126 e 130, conforme pode ser visto na Figura 3.23.

Para posterior processamento no formato em quadratura, é feita a conversão subtraindo o valor de 127 de cada membro do par e convertendo o último *byte* em um número complexo, resultando no valor final, que foi armazenado na mesma variável "x", $-1 + 3i$. O segundo par (125 e 124), por exemplo, é convertido em $-2 - 3i$. O processamento é feito para cada par subsequentemente.

Figura 3.23 — Leitura de dados no Octave.



Fonte: Autor.

3.5.3 O script no Octave

Visando buscar uma alternativa para implementar um receptor de baixo custo para sinais GPS foi feita pesquisas em livros, artigos e *sites* na *internet* para verificar o que já foi escrito e produzido especificamente para uso com o *Dongle* RTL-SDR e que pudesse apresentar baixo custo e viabilidade operacional em tempo real visando assim, realizar medições da cintilação ionosférica com baixo custo.

Como já citado no item 3.3, BORRE (2007) implementou um receptor via *software* mas que usa um amostrador já descontinuado SPARKFUN (2022), de modo que não é possível a utilização do mesmo como apresentado no livro, salvo se existir alguma possibilidade não vista ou que ainda não foi divulgada pelo autor.

Uma alternativa encontrada e que pode ser o ponto inicial de uso do *Dongle* é o trabalho do professor francês Jean-Michel Friedt, que publicou alguns estudos e *scripts* utilizando o *Octave* em sua página pessoal na *Internet*, FRIEDT (2015)

O *script* apresentado realiza uma busca pelo sinal PRN dentro de uma possível faixa (-7000 a 7000 Hz) que possa ser afetado pelo efeito *Doppler* em passos de 500 Hz. Neste ponto é importante observar que a estabilidade de frequência do conjunto receptor deve ser otimizada, garantindo que o sinal recebido esteja dentro da faixa passante de interesse, conforme a equação 3.6.

$$ppm = \frac{10^6 d_f}{f} \quad (3.6)$$

Onde:

ppm = Estabilidade de frequência, em partes por milhão;

f = Frequência de referência, no caso 1575420000 Hz;

d_f = Variação da frequência.

Assumindo 5000 Hz somente de um possível efeito *Doppler*, é necessária uma estabilidade melhor que:

$$ppm = \frac{10^6 * 5000}{1575420000} = 3.178 \quad (3.7)$$

Para a localização do sinal PRN corretamente, é utilizado uma biblioteca do MATLAB (2022), chamada *cacode.m*, que é chamada na linha 14 do código apresentado na Figura 3.24, que gera a tabela com os códigos C/A do sistema GPS localmente. Uma vez carregada a biblioteca, é feita uma busca de máxima correlação entre o sinal recebido pelo receptor RTL-SDR e cada PRN gerados localmente pelo *Octave*, respectivamente.

Para processamento do sinal deve-se atender dois requisitos: estabilidade da portadora central e a estimativa correta dos valores do possível efeito *Doppler* sobre o sinal de interesse. Conforme discutido no capítulo 2, os valores típicos do efeito *Doppler* para um receptor estacionário é de -4900 Hz a 4900 Hz, para um automóvel a 100Km/h tem-se valores de -5050 Hz a 5050 Hz e por fim, um avião a 900 Km/h tem-se o sinal variando de -6200 Hz a 6200 Hz. Logo pode-se assumir um valor de - 7000 Hz a 7000 Hz com boa margem de confiabilidade.

Na linha 9 do *script*, na Figura 3.24, tem-se o valor de 14000 Hz, dividido em passos de 500 Hz, resultando assim em 28 análises para cada um dos 31 PRN da tabela gerada pelo arquivo *cacode.m*. Este valor é importante pois a medida que se aumenta a faixa de valores do efeito *Doppler* para se calcular, também o tempo de processamento aumenta.

Após todas as análises, é realizada uma operação de correlação cruzada (linhas 13 a 23) do *script*, na Figura 3.24, com a tabela interna de códigos C/A gerada localmente e comparada com o sinal analisado, sendo então plotado, ao final da análise de todos PRNs, um gráfico PRN x *Doppler*, todos os sinais que apresentaram uma alta correlação cruzada, (linhas 28 a 44) do *script*, na Figura 3.24.

Figura 3.24 — Script para Leitura de dados no Octave.

```

2 tic
3 pkg load signal
4 d=dir('./2*.bin');
5
6 for k=1:l; w=0;
7     f=fopen(d(k).name);
8     x=fread(f,inf,'uchar'); x=x(1:2:end)-127+i*(x(2:2:end)-127); fs=2.0;
9     freq0=[-7000:500:7000];
10    x=x(1:2e5);
11    time=[0:1/fs/1e6:length(x)/fs/1e6]';time=time(1:end-1);
12    t=cputime;
13    for m=[1:31]
14        a=cacode(m,fs/1.023); a=a-mean(a);
15        l=1;
16        m
17        for freq=freq0
18            mysine=exp(j*2*pi*(-freq)*time);
19            xx=x.*mysine;
20            [u(l,m),v(l,m)]=max(abs(xcorr(a,xx))) ;
21            l=l+1;
22        end
23    end
24    w=w+1
25    printf('Total time: %f minutes\n', ((cputime-t)/60));
26    figure
27
28    for y=[1:31]
29        subplot(211)
30        plot(freq0,abs(u(:,y)))
31        hold on
32        xlabel('df (Hz)')
33        ylabel('xcorr (a.u.)')
34        y=y+1
35    end
36    subplot(212)
37    imagesc([1:31],freq0,abs(u))
38    xlabel('PRN')
39    ylabel('df (Hz)')
40
41
42    eval(['title(''',d(k).name, ''')'])
43    hold on
44    end

```

Fonte: FRIEDT (2015).

O tempo de análise varia com a amostra mas fica em torno 3 minutos para verificar todos os sinais dos 31 PRN de cada arquivo de amostra.

3.6 Conclusão.

Neste capítulo foi discutido sobre as opções disponíveis de receptores e *softwares* para uso na recepção e tratamento dos sinais L1 da constelação GPS tendo sido abordado, sucintamente, a parte de recepção dos sinais. Também foi abordado de maneira sucinta, uma verificação de compatibilidade com alguns equipamentos adquiridos pelo

autor, de modo que o sistema funcionasse de maneira correta.

Foi ainda testada a aplicação desenvolvida por BORRE (2007) bem como feita uma análise da viabilidade de uso do *software*, concluindo que não é possível seu aproveitamento no presente trabalho pela ausência de receptores disponíveis, SPARKFUN (2022).

Foi proposto uma alternativa que consiste no uso de um *script* no *Octave*, que foi desenvolvido pelo professor francês Jean-Michel Freidt, onde foi possível, então, vislumbrar os primeiros resultados práticos da recepção, detecção e mapeamento do sinal L1 da constelação GPS.

4 RESULTADOS ALCANÇADOS

4.1 Introdução.

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com a realização de amostragem dos sinais GPS referenciados à uma coordenada geográfica conhecida. Será analisado o tempo de processamento do sinal amostrado bem como o seu uso em relação ao espaço em disco.

Visando garantir que o sinal recebido é o mesmo emitido pela constelação GPS, será utilizado um *site* para comparação com os satélites que estão em órbita no momento da medição. O resultado esperado é a detecção dos satélites visíveis e quanto o mesmo está deslocado devido ao efeito *Doppler* em relação à frequência central do sinal L1, que é 1,57542 GHz.

4.2 Coleta das amostras.

Para salvar o sinal sintonizado pelo receptor RTL-SDR basta executar o arquivo "RTL-SDR.EXE", com os parâmetros possíveis de utilização do receptor para realizar o processamento, conforme descrito no capítulo 3.

- f sintoniza o *dongle* na frequência de interesse, 1,57542 GHz;

- s indica a taxa de amostragem utilizada, 2 MHz;

- n indica o número de amostras que serão realizadas, 2×10^6 amostras.

- 221120221840.BIN indica o arquivo onde as amostras serão salvas, no caso foi utilizado como padrão para o arquivo de saída o dia, mês, ano, hora e minutos com extensão de arquivo *.bin. O operador irá escolher o nome de arquivo de acordo com o dia e hora em que for tomada a amostra.

São tomadas 2×10^6 amostras, com uma taxa de amostragem de 2 MHz, onde a amostragem é aproximadamente duas vezes a largura de banda utilizado pelo sistema GPS, que é de 1,023 MHz, na frequência de 1,57542 GHz. O tempo médio para execução do programa é em torno de 4 segundos, onde é gerado um arquivo de aproximadamente 4 Mbytes de tamanho, como mostrado na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Arquivo Salvo.

Nome	Data de modificação	Tipo	Tamanho
 NOMEARQUIVO.BIN	14/11/2022 22:21	Arquivo BIN	3.907 KB

Fonte: Autor.

4.2.1 Funcionamento do Script.

Após os processamento e armazenamento da amostra, o *Octave* é inicializado e o arquivo copiado para a pasta de trabalho padrão. Uma vez inicializado é possível realizar a análise da amostra rodando o *script*, apresentado na Figura 4.2.

Figura 4.2 – Script rodando no Octave.

```

2 tic
3 pkg load signal
4 d=dir('./2*.bin');
5
6 for k=1:1; w=0;
7     f=fopen(d(k).name);
8     x=fread(f,inf,'uchar'); x=x(1:2:end)-127+i*(x(2:2:end)-127); fs=2.0;
9     freq0=[-7000:500:7000];
10    x=x(1:2e5);
11    time=[0:1/fs/1e6:length(x)/fs/1e6]';time=time(1:end-1);
12    t=cputime;
13    for m=[1:31]
14        a=cacode(m,fs/1.023); a=a-mean(a);
15        l=1;
16        m
17        for freq=freq0
18            mysine=exp(j*2*pi*(-freq)*time);
19            xx=x.*mysine;
20            [u(l,m),v(l,m)]=max(abs(xcorr(a,xx))) ;
21            l=l+1;
22        end
23    end
24    w=w+1
25    printf('Total time: %f minutes\n', ((cputime-t)/60));
26    figure
27
28    for y=[1:31]
29        subplot(211)
30        plot(freq0,abs(u(:,y)))
31        hold on
32        xlabel('df (Hz)')
33        ylabel('xcorr (a.u.)')
34        y=y+1
35    end
36    subplot(212)
37    imagesc([1:31],freq0,abs(u))
38    xlabel('PRN')
39    ylabel('df (Hz)')
40
41
42    eval(['title(''',d(k).name,'''')'])
43    hold on
44    end

```

Fonte: Autor.

Os valores são lidos e convertidos para o formato em quadratura I/Q, conforme discutido no capítulo 3. Notadamente a linha 9 do *script* da figura 4.2 desempenha o papel limitante para busca do sinal na amostra, sendo aqui criado 28 passos de 500Hz,

que serão utilizados para a busca do sinal PRN na análise do sinal. Como configurado, será realizada uma busca de máxima correlação na faixa de -7000 a 7000 Hz em relação ao ponto central, em 1575420000 Hz. Em caso de extensão da faixa de procura, o tempo de processamento irá aumentar.

As linhas 13 a 15 computam o código C/A através do *script* chamado "cacode.m", que é fornecido pelo *Matlab*, sendo o responsável por gerar a tabela com todos os códigos C/A disponíveis. As linhas 17 a 23 faz a procura sequencialmente, em passos de 500 Hz, e calcula a correlação cruzada para cada satélite. Conforme apontado na linha 9, têm-se 28 passos executados para cada satélite, conforme detalhado no item 3.5.3.

Uma vez terminada a execução do *script* são apresentados os resultados na forma gráfica, conforme pode ser mostrado nas Figuras 4.3a e 4.3b. Na Figura 4.3a, referente às linhas 28 a 35 do *script*, são apresentados os níveis de correlação cruzada entre cada satélite e seu correspondente efeito *Doppler*. Basicamente informa que, em relação aos demais sinais, alguns apresentam uma alta correlação cruzada. Notadamente três sinais se destacam apresentando valores bem acima dos demais.

E na Figura 4.3b, que é calculado pelas linhas 36 a 44 do *script*, tem-se a apresentação da localização de cada PRN (ou satélite) mapeado em relação ao efeito *Doppler*, o que complementa a informação da parte superior do gráfico. Também é apresentado a origem da amostra, no caso o arquivo "031020221708g50.bin".

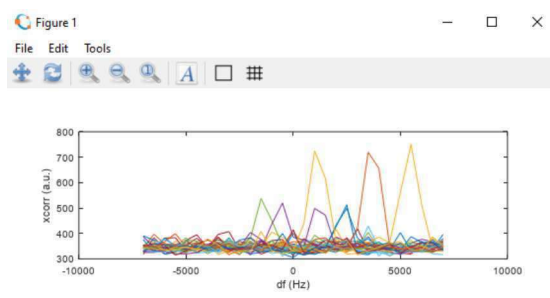
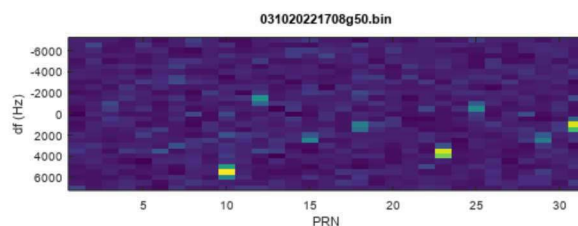
Devido às limitações do *Octave* não é possível atribuir uma paleta de cores para as situações apresentadas graficamente. Entretanto sinais que têm uma intensidade acima dos demais apresentam tonalidade azul-claro para verde, sendo o amarelo que representa o sinal mais intenso.

4.2.2 Mapa de Constelação GPS.

Para a referida análise, utilizou-se das seguintes coordenadas geográficas, em razão de ser a residência do autor e onde está instalada a antena e o receptor, como referência aproximada que serão utilizadas em todas as medidas que foram realizadas (em graus decimais):

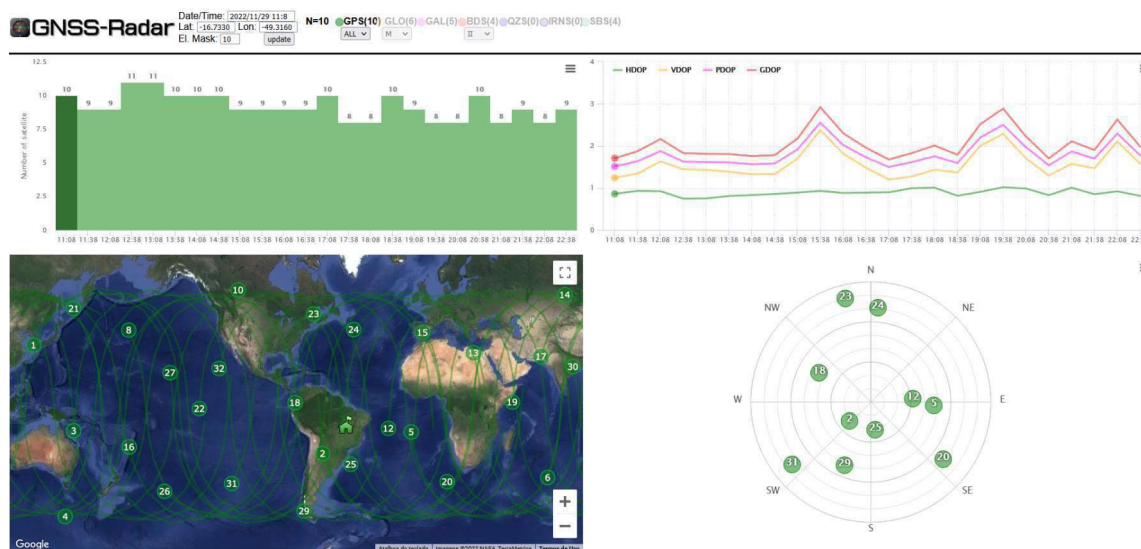
Latitude = -16.733° e Longitude: -49.316°

Para análise das amostras e comparação delas com a possível presença do(s) satélite(s) na visada de antena do receptor em relação a uma determinada coordenada geográfica, foi utilizado o *site*, "<http://www.taroz.net/GNSS-Radar.html>", mostrado na Figura 4.4, que aponta quais satélites estão visíveis em um dado tempo e hora e em

Figura 4.3 – Resultado processado.**(a) Correlação Cruzada Versus Doppler.****(b) PRN Versus Doppler.**

Fonte: Autor.

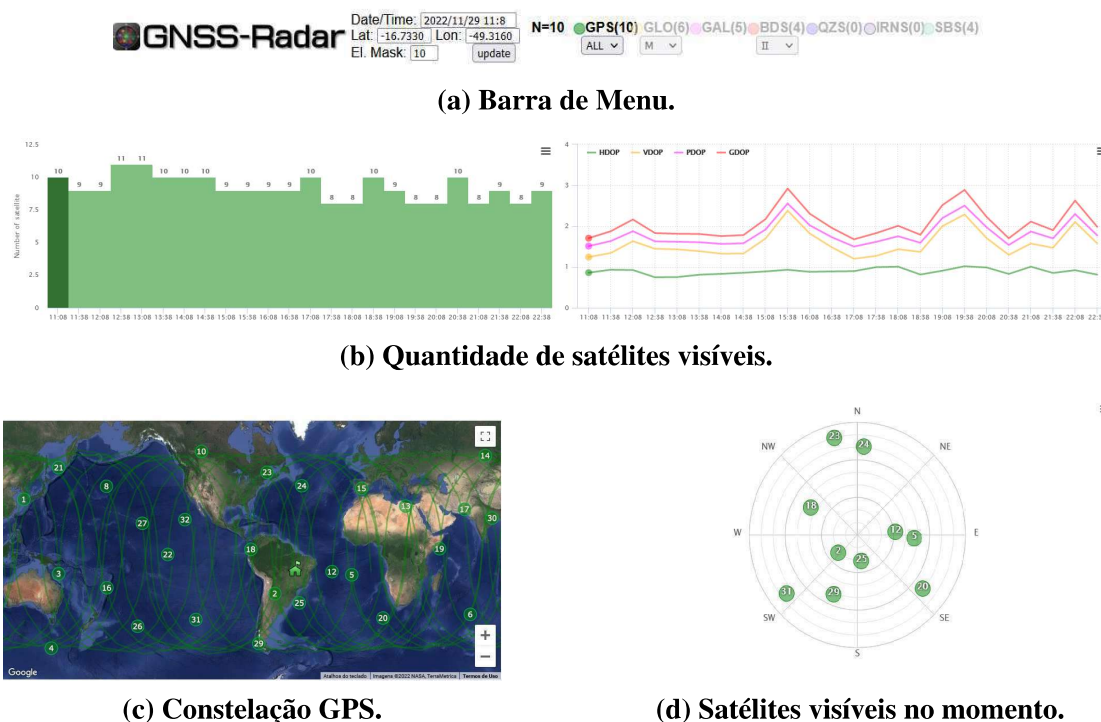
tal coordenada geográfica. O *site* permite uma comparação da constelação visível no momento com os satélites detectados nas amostras colhidas pelo receptor. O referido *site* ainda permite selecionar várias constelações GPS que estão em uso atualmente.

Figura 4.4 – Mapa de Constelação.

Fonte: "<http://www.taroz.net/GNSS-Radar.html>".

Uma facilidade é o posicionamento virtual do receptor, via *mouse*, em uma determinada posição no globo terrestre, simbolizado pelo ícone de uma casa mas que

Figura 4.5 — Mapa de Constelação detalhado.



Fonte: "<http://www.taroz.net/GNSS-Radar.html>".

também pode ser alterada no campo "Lat" e "Lon" apresentado na Figura 4.5a. O *site* também permite verificar a constelação em um momento pretérito, bastando ajustar os dados necessários tais como filtro de elevação, data, horário, coordenadas geográficas e outras constelações em uso. A máscara de elevação pode ser ajustada, permitindo que se escolha a partir de qual elevação se deseja visualizar os satélites.

Como mostrada na Figura 4.5b pode-se ver o número de satélites visíveis em um dado momento. A Figura 4.5c apresenta toda a constelação GPS e sua posição no espaço em relação ao globo terrestre em dado horário.

E por fim, na Figura 4.5d é apresentado quais satélites estão na visada de recepção, que são os PRN de número 2, 5, 12, 18, 20, 23, 24, 25, 29 e 31.

4.3 Resultados processados das amostras.

4.3.1 Analisando uma amostra fora da frequência padrão GPS.

Visando uma análise mais fidedigna possível, foi analisado uma amostra cuja frequência não é utilizada na constelação GPS, visível no momento.

Para tanto foi ajustado as coordenadas geográficas para latitude - 16,733° e longitude -49,316°, conforme detalhado no item 4.2.2. Vide Figura 4.6.

Figura 4.6 – Constelação na data de 24/11/2022 - 14h 16m.

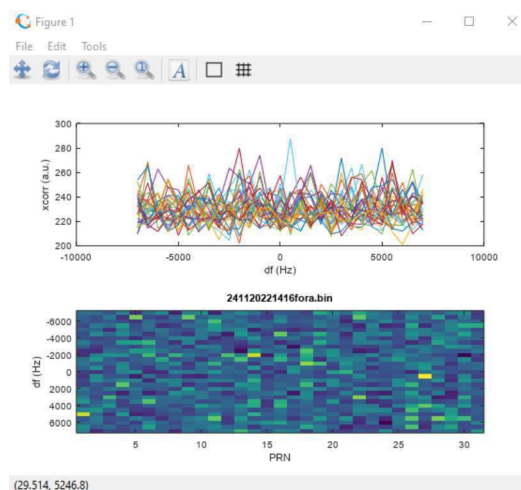


Fonte: "<http://www.taroz.net/GNSS-Radar.html>".

A medida foi realizada para servir de referência de sinal e comparação. O receptor *dongle* RTL-SDR foi ajustado para a frequência de 1,57242 GHz, portanto fora da frequência de operação do sinal L1 da constelação GPS. A amostra foi colhida no dia 24/11/2022 as 14h 16m. Foi possível perceber a total ausência de correlação cruzada dos sinais, conforme mostrado na Figura 4.7, indicando que, naquela amostra, não foram detectados sinais GPS.

A parte superior da Figura 4.7 indica os níveis de correlação cruzada entre cada satélite e seu correspondente efeito *Doppler*. É visível a inexistência de um sinal que se sobressaia aos demais, em termos gerais.

Figura 4.7 – Resultados das medidas na data de 24/11/2022 - 14h 16m.



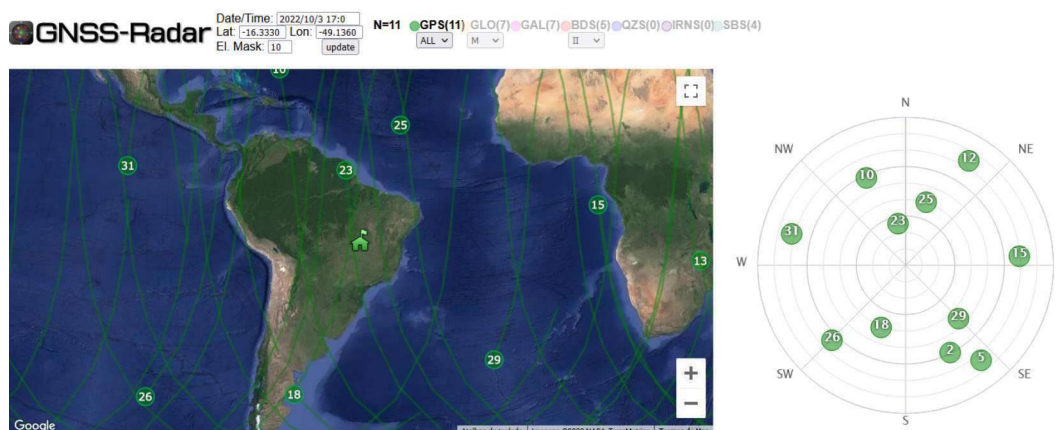
Fonte: Autor.

Já na parte inferior da mesma figura, temos a apresentação da localização de cada PRN (ou satélite) mapeado em relação ao efeito *Doppler*, que embora aparenta alguma detecção de sinais, nota-se que não há pontos que sobressaíam aos demais.

4.3.2 Amostra coletada em 03/10/2022.

A amostra a seguir foi colhida no dia 03/10/2022 as 17h 08m. O receptor *dongle* RTL-SDR foi ajustado para a frequência de 1,57542 GHz, portanto agora, dentro da frequência de operação do sinal L1 da constelação GPS. O mapa da constelação de satélites para a data e horário indicados são mostrados na Figura 4.8.

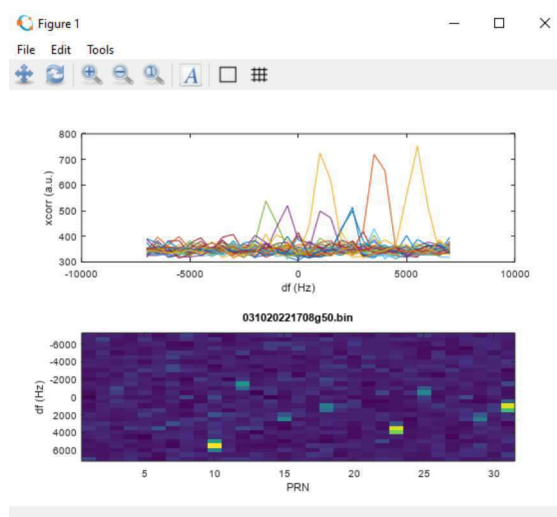
Figura 4.8 — Constelação na data de 03/10/2022 as 17h08m.



Fonte: "<http://www.taroz.net/GNSS-Radar.html>".

Para os sinais amostrados em 03/10/2022, foram detectados os seguintes satélites em relação ao efeito *Doppler*: 10, 12, 15, 18, 23, 25, 29 e 31 com alta correlação cruzada, como mostra a Figura 4.9. Nota-se que, que os PRN 2, 5 e 26 não aparecem nos resultados por motivo que o sinal não estava forte o suficiente para sua detecção ou ainda que o lóbulo da antena não esteja direcionado naquela direção.

Figura 4.9 — Resultados das medidas na data de 03/10/2022 as 17h08m.



Fonte: Autor.

4.3.3 Amostra coletada em 24/11/2022.

A amostra a seguir foi colhida no dia 24/11/2022 as 14h 16m. A presença dos satélites no espaço, localizado acima da antena, se confirma conforme mapa de constelação de satélites GPS para a coordenada de referência, vide a Figura 4.10 e o horário da medida.

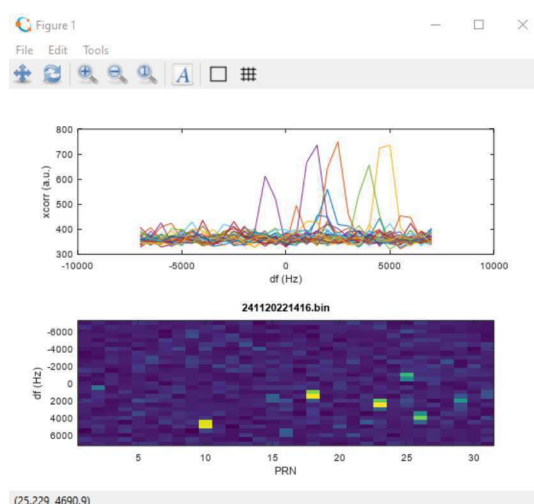
Figura 4.10 – Constelação na data de 24/11/2022 - 14h 16m.



Fonte: "<http://www.taroz.net/GNSS-Radar.html>".

Percebe-se, que os sinais detectados apresentam alta correlação cruzada, como pode ser visualizado na parte superior da Figura 4.11. Para os sinais amostrados no dia 24/11/2022 as 14h 16m, foram detectados os seguintes satélites em relação ao efeito *Doppler*: 10, 15, 18, 23, 25, 26, 29 sendo os pontos com tonalidade azul-claro para verde e o amarelo, se destacando entre os demais, representando o sinal mais forte. E com menor intensidade os satélites 02 e 16 também são mostrados.

Figura 4.11 – Resultados das medidas na data de 24/11/2022 - 14h 16m.

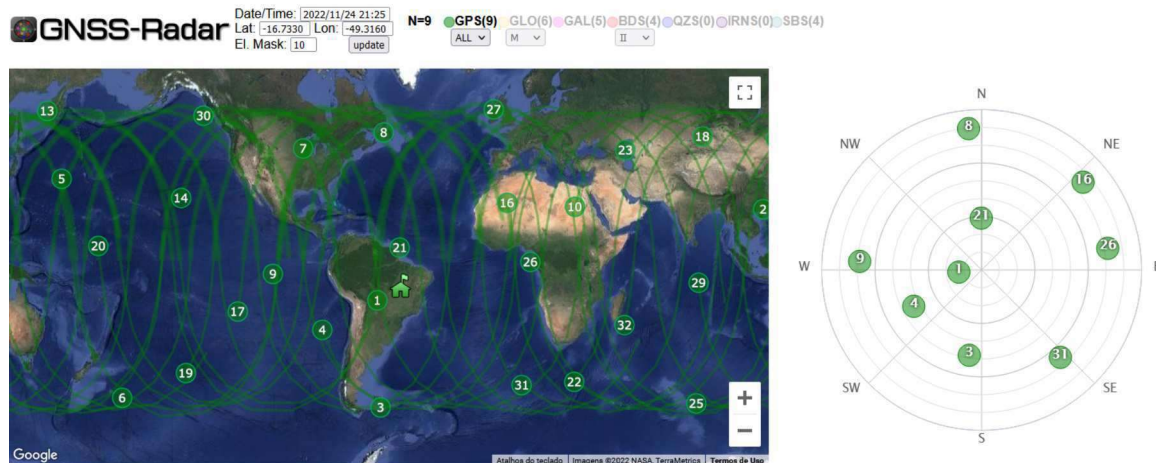


Fonte: Autor.

4.3.4 Amostra coletada em 24/11/2022 - Período Noturno.

Foi realizada uma amostra no período noturno do dia 24/11/2022, conforme mapa da constelação, mostrado pela Figura 4.12.

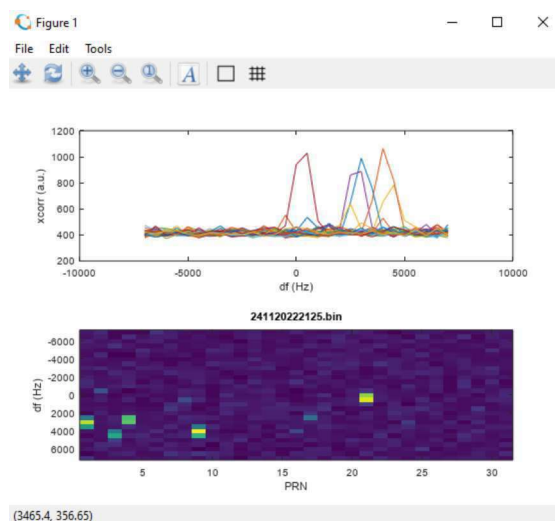
Figura 4.12 – Constelação na data de 24/11/2022 - 21h 25m.



Fonte: "<http://www.taroz.net/GNSS-Radar.html>".

É possível notar também a alta correlação cruzada, conforme pode ser visto na parte superior do gráfico, mostrado na Figura 4.13. Foram detectados os seguintes satélites, plotados na parte inferior do gráfico: 1, 3, 4, 9, 16, e 21. Aqui novamente sinais que têm uma intensidade acima dos demais apresentam tonalidade azul-claro para verde, sendo o amarelo que representa o sinal mais intenso.

Figura 4.13 – Resultados das medidas na data de 24/11/2022 - 21h 25m.



Fonte: Autor.

4.4 Conclusão

Foram analisados os elementos do *script* responsável pela detecção e medição do sinal L1 da constelação GPS e a forma que os resultados são apresentados. Foi levado em consideração as limitações do *Octave* na manipulação de gráficos e apresentação da informação de interesse.

Foi utilizado um *site* para comparação dos sinais detectados e os satélites que estariam em órbita no momento da medida do sinal de modo que pudessem ser comparados os resultados dos satélites recebidos com os que estão em órbita, sob a visada da antena de recepção.

Para armazenamento dos resultados, foi verificado que cada amostra ocupa um espaço de armazenamento de aproximadamente 4 Mb. Cada amostra requer um tempo de processamento de 4 segundos para ser processada com as configurações apresentadas de tal modo que é possível estimar uma quantidade de dados e o respectivo custo de armazenagem para várias amostras sucessivas e tempo de armazenamento que pode ser necessários para eventuais estudos de longo prazo.

Conclui-se que o *script* apresentado na Figura 4.2 consegue realizar as medidas do sinal L1 da constelação GPS plotando em um gráfico sua localização espectral *versus* efeito *Doppler*, sendo possível correlacionar os resultados obtidos com a realização de amostragem dos sinais GPS e com uma coordenada geográfica de referência.

5 CONCLUSÕES

5.1 Considerações Finais

O trabalho apresentou os desafios de realizar a coleta de sinais L1 do sistema GPS e realizar a sua análise, seja em tempo real ou diferido. Utilizando os *softwares* que foram desenvolvidos para utilização pelo receptor RTL-SDR e também pelo *Octave* em tempos distintos para a realização da tarefa, impõe sua inviabilidade para o tratamento em tempo real dos sinais de interesse, que pela tecnologia empregada, torna a tarefa extremamente difícil.

Outro ponto que merece citação, seria o custo para uma análise em tempo real. Como já feito por BORRE (2007), o seu projeto de *software* GPS realiza a análise a partir de uma amostra coletada, ou seja, em tempo diferido e permite um reduzido custo para implementação. Uma solução alternativa de baixo custo é o uso do chamado *Breakout Board*, que são placas de circuito pequenas que já embutem um GPS. Tais placas já fornecem uma saída de dados em alto nível se comparada com um receptor banda larga RTL-SDR, em que é necessário todo o tratamento complexo do sinal de radiofrequência para extrair alguma informação para posterior processamento.

Deste modo o custo geral para implementar uma decodificação em tempo real esbarra em um esforço computacional que não é de baixo custo para sua implementação, tal como o uso de FPGA (*Field Programmable Gate Array* - Matriz de Portas Programáveis) para o processamento paralelo e com velocidade adequada do sinal de radiofrequência, como os já citados trabalhos de MORRISON (2018), CURRAN (2015) e KIRKPATRICK (2015), dentre outros.

De tal forma que conclui-se que o uso de um *dongle* RTL-SDR para a medição de sinais da constelação GPS em tempo real é inviável em razão da limitação do *software* e *hardware* como utilizado hoje. Os pioneiros que se dedicaram ao assunto, como BORRE (2007), propôs esta ideia como foi discutido no capítulo 3, da existência de um amostrador (Receptor) e o *software* GPS que não trabalhavam em tempo real. Curiosamente, durante toda a pesquisa não foi possível encontrar nenhum sistema que operasse em tempo real utilizando o *dongle* RTL-SDR, talvez em virtude de suas limitações.

Outra limitação encontrada no presente trabalho foi a dificuldade de encontrar

estudos comparativos sobre a medição de amplitude e fase do sinal L1 da constelação GPS. Limitação que, por ora, impediu o progresso em extrair a informação e dados de navegação do sinal recebido pelo receptor. De modo que a medição da cintilação ionosférica ficou prejudicada em razão que não foi possível extrair, pelo menos por agora, os dados que poderiam servir de substrato para o cálculo dos valores necessários para estimar a cintilação e seus efeitos sobre a ionosfera.

O presente estudo conseguiu fazer a recepção do sinal L1 utilizando um *dongle* RTL-SDR e realizar sua plotagem em um gráfico de correlação cruzada *versus* PRN. Ou seja, conseguiu mostrar em qual deslocamento do sinal, em razão do efeito *Doppler*, em que cada sinal do satélite se encontrava. Tudo isto tendo como referência, a frequência central em 1,57542 GHz, o que significa que foi realizada com sucesso a recepção dos sinais e com resolução igual ou melhor que 3 partes por milhão. No caso, o trabalho do professor francês Jean-Michel Friedt foi fundamental para se obter os primeiros resultados no uso do *dongle* RTL-SDR.

Foi discutido também, de maneira superficial, o uso de pequenos instrumentos de medição, no caso um VNA (*Vector Network Analyzer* - Analisador de Rede Vetorial), conhecido por NanoVNA, que já estão difundidos na *Internet* e *YouTube*, com suas limitações intrínsecas. A ideia é poder auxiliar amadores e estudantes que não dispõem de elevado capital para comprar um instrumento profissional para análise de parâmetros de espalhamentos. Destaca-se, por fim, que IYER (2021) apresenta seu uso nas aulas remotas da disciplina *Microwave Circuits Course*, na Universidade de Alberta, Canadá.

5.2 Sugestões para pesquisas futuras

Visando explorar o tema sobre receptores e sistemas GPS, assuntos que foram abordados no presente trabalho propõem-se que novos trabalhos sejam realizados com o objetivo de:

- Realizar a decodificação do sinal L1 para obtenção dos dados de navegação e outras informações que levem à possibilidade de realizar medidas, com fins de análise da cintilação ionosférica.
- Implementar um receptor utilizado FPGA, como apontado no capítulo 1.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BORRE, K. e. a. A Software-Defined GPS and Galileo Receiver. A Single-Frequency Approach. Birkhauser Boston, 2007.

CARARO, A. C. e. a. Correções relativísticas sobre as medidas de tempo gps. UFPR, 2009.

CURRAN, J. T. e. a. Operating a network of multi-frequency software-defined ionosphere monitoring receivers. ION - Institute of Navigation, 2015.

DARYAU, M. Advanced unmanned aerial systems report. 12 2018.

FRIEDT, J.-M. Exploitation de signaux des satellites GPS reçus par récepteur de télévision numérique terrestre DVB-T]. European Frequency and Time Seminar, 2015.

GOLD, R. Optimal binary sequences for spread spectrum multiplexing. IEEE Transactions on Information Theory, 1967.

IYER, A. K. e. a. Going remote. IEEE MICROWAVE MAGAZINE, 2021.

KAPLAN, E. e. a. Understanding GPS: principles and applications. 2006.

KIRKPATRICK, D. E. Design of a Hardware Platform for GPS-Based Orientation Sensing. Dissertação (Mestrado) — Portland State University, 2015.

KRISTIAN, P. Octave Version. 2022. Disponível em: <<https://github.com/kristianpaul/SoftGNSS>>. Acesso em 08 novembro 2022.

MATLAB. CACODE. 2022. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/14670-gps-c-a-code-generator>>. Acesso em 08 novembro 2022.

MORAES, A. O. Análise do desempenho de um receptor GPS em canais de cintilação ionosférica. Dissertação (Mestrado), 2009.

MORRISON, A. e. a. Design of a multiband global navigation satellite system radio frequency interference monitoring front-end with synchronized secondary sensors. Sensors, 2018.

OCTAVE. Octave. 2022. Disponível em: <<https://octave.org/about>>. Acesso em 08 novembro 2022.

OLIVEIRA, K. e. a. Variação da Cintilação Ionosférica em Baixas Latitudes no Sistema GNSS. 2017.

OSMOCOM. RTL-SDR. 2022. Disponível em: <https://osmocom.org/projects/rtl-sdr/wiki/Rtl-sdr#history_and_discovery_of_rtlsdr>. Acesso em 08 novembro 2022.

PETROPOULOS, G. e. a. GPS and GNSS Technology in Geoscience. Ed Elsevier, 2021.

PLAUSINAITIS, D. Borre Book. 2022. Disponível em: <<http://gfix.dk/matlab-gnss-sdr-book/>>. Acesso em 08 novembro 2022.

POZAR, D. M. Microwave Engineering. 2011.

PROAKIS, J. G. Digital Signal Processing. 1996.

SPARKFUN. SiGe GN3S Sampler v3. 2022. Disponível em: <<https://www.sparkfun.com/products/retired/10981>>. Acesso em 08 novembro 2022.

SUPERKUH. SUPERKU. 2022. Disponível em: <<http://superkuh.com/rtlsdr.html>>. Acesso em 08 novembro 2022.

TSUI, Y. e. a. Fundamentals of global positioning system receivers – A software approach. [S.l.]: John-Wiley, 2000.

USAF. SPS signal specification. 1995. Disponível em: <<https://www.gps.gov/technical/ps/1995-SPS-signal-specification.pdf>>. Acesso em 08 novembro 2022.