

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

KÉLITON SILVA DE SOUZA

VALIDAÇÃO DE UM MONITOR GPS DE BAIXO CUSTO PARA
MONITORAMENTO DE SINAIS DE SATÉLITES NA BANDA L₁

GOIÂNIA-GO
DEZEMBRO DE 2022



**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: Kéilton Silva de Souza.

Matrícula: 20171011060187.

Título do Trabalho: Validação de um monitor GPS de baixo custo para monitoramento de sinais de satélites na Banda L1.

Autorização - Marque uma das opções

1. ☒ 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, 23/12/2022.

Kéilton Silva de Souza

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

KÉLITON SILVA DE SOUZA

**VALIDAÇÃO DE UM MONITOR GPS DE BAIXO CUSTO PARA
MONITORAMENTO DE SINAIS DE SATÉLITES NA BANDA L₁**

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**

FICHA CATALOGRÁFICA

S729v Souza, Kéilton Silva de.

Validação de um monitor GPS de baixo custo para monitoramento de sinais de satélites na Banda L1/ Kéilton Silva de Souza. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2022.

49f. ; il.

Orientação: Prof. Dr. Kelias de Oliveira.

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

1. GPS. 2. Cintilação ionosférica. 3. Raspberry Pi. I. Oliveira, Kelias de (orientação). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. III. Título.

CDD 005.43

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

KÉLITON SILVA DE SOUZA

**VALIDAÇÃO DE UM MONITOR GPS DE BAIXO CUSTO
PARA MONITORAMENTO DE SINAIS DE SATÉLITE NA BANDA L1**

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 08:46:49.
- Eliezer Alves Teixeira, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 08/12/2022 10:28:28.
- Kelias de Oliveira, COORDENADOR - SUB-CHEFIA - GYN-CETPI, em 07/12/2022 22:20:05.

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: 353952
Código de Autenticação: 97b278fcaa



CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR:

Kéilton Silva de Souza

TÍTULO DO TCC:

VALIDAÇÃO DE UM MONITOR GPS DE BAIXO CUSTO PARA MONITORAMENTO
DE SINAIS DE SATÉLITES NA BANDA L₁

GRAU/ANO:

Bacharel/2022

É concedida ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás permissão para reproduzir cópias deste Trabalho de Conclusão de Curso, emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos ou científicos. Ao autor reservam-se outros direitos de publicação e nenhuma parte deste Trabalho de Conclusão de Curso pode ser reproduzida sem a autorização por escrita do mesmo.

Kéilton Silva de Souza

Av. Dom José Newton de Almeida Batista, Qd. 15 Lt.10 – B. Sto. Hilário

CEP: 74780-170 – Goiânia – GO – Brasil

Dedico este trabalho a Deus, que me concedeu muito mais do que pedi ou esperava ter e a minha família, pelo incentivo e apoio constantes.

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 ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, que com sua estrutura física, direção, administração e corpo docente tão preparado e comprometido com o processo de ensino/aprendizagem, me oportunizou uma imensa atualização pessoal e ajudou na construção do meu perfil profissional.

Sou muito grato ao meu orientador Prof. Dr. Kelias de Oliveira, pelo suporte, zelo, dedicação, paciência, correções e incentivos que sem os quais seria impossível a realização deste trabalho.

Manifesto também minha gratidão ao Prof. Me. Eliézer Alves Teixeira e ao Prof. Dr. João Batista José Pereira pela participação como membros da banca examinadora.

Quero agradecer ainda aos meus pais e irmãos pelo amor, incentivo e apoio incondicional, que sempre me mantiveram motivado, principalmente nos momentos de maiores dificuldades.

A todos os colegas e amigos de turma e de curso, em especial a Vitalino Victor Vargas Borges, pela ajuda nos conceitos sobre a linguagem de programação *Python*, necessária para alcançar resultados neste trabalho.

Agradeço também ao pesquisador Moisés José dos Santos Freitas, pelas sugestões e explicações que foram de grande valia para a escrita deste Trabalho de Conclusão de Curso.

Enfim, a todos que contribuíram direta ou indiretamente para o desenvolvimento deste, o meu muito obrigado!

“Se você quiser descobrir os segredos do Universo, pense em termos de energia, frequência e vibração.”

(Nikola Tesla)

RESUMO

Muitos são os fatores ambientais que podem afetar o desempenho do GPS (*Global Positioning System* - Sistema de Posicionamento Global), mas a cintilação ionosférica é um dos fenômenos mais expressivos. Elas resultam em modificações rápidas na amplitude e fase do sinal GPS que atravessa a ionosfera, o que pode em casos extremos, chegar a interromper a comunicação do receptor com o satélite e vice-versa. Diante desse problema, a cintilação ionosférica tornou-se alvo frequente de estudo e investigação nas últimas décadas. No Brasil, por exemplo, há quatro centros ou laboratórios de pesquisa que realizam o monitoramento dos eventos da cintilação ionosférica por intermédio dos sinais de rádio emitidos pelos próprios satélites da constelação GPS. Uma vez que o monitor de cintilação ionosférica utilizado pelas estações de monitoramento é um equipamento com custo bastante elevado, chegando a custar US\$20 mil, diversas pesquisas têm sido realizadas para desenvolver equipamentos de baixo custo a fim de monitorar as irregularidades ionosféricas. Esses receptores de baixo custo devem atender requisitos técnicos mínimos e possuir um custo total de até US\$100,00. Destarte, o propósito deste trabalho é propor e validar o funcionamento de um monitor de sinais de satélites GPS de baixo custo, utilizando para isso o *GPS Breakout Adafruit Ultimate v3* em conjunto com a plataforma *Raspberry Pi 4 Model B*.

Palavras-chave: Cintilação ionosférica. *Breakout*. GPS. *Raspberry Pi*.

ABSTRACT

There are many environmental factors that can affect GPS (Global Positioning System) performance, but ionospheric scintillation is one of the most significant phenomena. They result in rapid changes in the amplitude and phase of the GPS signal that crosses the ionosphere, which can, in extreme cases, even interrupt the receiver's communication with the satellite and vice versa. Faced with this problem, ionospheric scintillation has become a frequent target of study and investigation in recent decades. In Brazil, for example, there are four centers or research laboratories that carry out the monitoring of ionospheric scintillation events through the radio signals emitted by the satellites of the GPS constellation. Since the ionospheric scintillation monitor used by monitoring stations is a very expensive piece of equipment, costing up to US\$20,000, several studies have been carried out to develop low-cost equipment to monitor ionospheric irregularities. These low-cost receivers must meet minimal technical requirements and have a total cost of up to US\$100.00. Thus, the purpose of this work is to propose and validate the operation of a low-cost GPS satellite signal monitor, using the GPS Breakout Adafruit Ultimate v3 in conjunction with the Raspberry Pi 4 Model B platform.

Keywords: *Ionospheric scintillation. Breakout. GPS. Raspberry Pi.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Segmentos do GPS.....	05
Figura 2.2 – Estações de monitoramento ao redor do mundo.....	06
Figura 2.3 – Ilustração da constelação dos satélites GPS.....	07
Figura 2.4 – Exemplos de receptores GPS.....	07
Figura 2.5 – Modulação do código sobre a onda portadora.....	08
Figura 2.6 – Posicionamento (a) dimensional e (b) tridimensional do usuário.....	10
Figura 2.7 – Diagrama em blocos de um receptor GPS.....	11
Figura 2.8 – Perfis verticais típicos de densidade eletrônica da ionosfera.....	13
Figura 3.1 – Localização das estações de monitoramento da ionosfera de diferentes redes....	16
Figura 3.2 – Receptores Novatel GSV4004B (a) e Septentrio PolaRxS Pro® (b).....	17
Figura 3.3 – Diagrama de blocos de um monitor ionosférico utilizando Arduino.....	19
Figura 3.4 – Diagrama de blocos de um monitor ionosférico utilizando <i>Raspberry Pi</i>	20
Figura 3.5 – Receptor GPS <i>Breakout Adafruit Ultimate v3</i> : detalhes frontais (a) e detalhes posteriores (b).....	21
Figura 3.6 – Esquema eletrônico receptor GPS <i>Breakout Adafruit Ultimate v3</i>	22
Figura 3.7 – Antena GPS externa 3-5V, 28dB, conectada ao receptor.....	24
Figura 3.8 – <i>Raspberry Pi 4</i> : características gerais da placa.....	25
Figura 3.9 – Assistente de instalação <i>Raspberry Pi Imager</i> , com a função de cada campo.....	27
Figura 3.10 – Arquivos gravados no cartão SD após a instalação do SO; em destaque, o arquivo config.txt.....	28
Figura 3.11 – Elementos utilizados para montagem do <i>Raspberry Pi 4 Model B</i>	29
Figura 3.12 – Tela inicial do <i>Raspberry Pi OS</i>	30
Figura 3.13 – Esquema do protótipo do monitor de sinais de satélites.....	30
Figura 3.14 – Arranjo físico da montagem do protótipo de monitor de sinais de satélites.....	31
Figura 4.1 – Receptor instalado e pronto para operação.....	34
Figura 4.2 – <i>Status</i> de uso das USB do <i>Raspberry Py</i>	35
Figura 4.3 – Identificação da porta USB utilizada pelo conversor CH340G.....	35
Figura 4.4 – Sentenças NMEA recebidas pelo receptor GPS.....	36
Figura 4.5 – Exemplo de mensagem do tipo GSV.....	37
Figura 4.6 – Exemplo de mensagem do tipo RMC.....	38
Figura 4.7 – Local de operação do receptor com as coordenadas em destaque.....	39

Figura 4.8 – Editor <i>Thonny Python IDE</i> , com o código do programa escrito.....	40
Figura 4.9 – Dados identificados após o uso da biblioteca <i>pynmea2</i>	41
Figura 4.10 – Comandos para salvar os dados após rodar o <i>script</i>	42
Figura 4.11 – Diretório “Documentos” do <i>Raspberry Pi OS</i>	42
Figura 4.12 – Recorte de arquivo de dados armazenados, do receptor.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Requisitos para um receptor de baixo custo.....	18
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D	– Analógico/Digital
ACG	– <i>Automatic Control Gain</i> (Controle Automático de Ganho)
AGPS	– <i>Global Positioning System Assisted</i> (Sistema de Posicionamento Global Auxiliado)
ANATEL	– Agência Nacional de Telecomunicações
AS	– <i>Anti-Spoofing</i> (Anti-Fraude)
BIOS	– <i>Basic Input/Output System</i> (Sistema Integrado de Entrada e Saída)
BPSK	– <i>Binary Phase ShiftKeying</i> (Chaveamento de Fase Binário)
C/A	– <i>Coarse Acquisition</i> (Aquisição Grosseira)
CALIBRA	– <i>Countering GNSS high Accuracy applications Limitations due to Ionospheric disturbances in Brazil</i> (Aplicações de Alta Precisão GNSS para as Limitações Devido às Perturbações Ionosféricas no Brasil)
CDMA	– <i>Code Division Multiple Access</i> (Acesso Múltiplo por Divisão de Códigos)
CIGALA	– <i>Concept for Ionospheric Scintillation Mitigation for Professional GNSS in Latin America</i> (Projeto para Mitigação da Cintilação Ionosférica no GNSS Profissional na América Latina)
DGPS	– <i>Global Positioning System Differential</i> (Sistema de Posicionamento Global Diferencial)
DoD	– <i>Department of Defense</i> (Departamento de Defesa)
DOP	– <i>Dilution Of Precision</i> (Diluições de Precisão)
ECEF	– <i>Earth Centere, Earth Fixed</i> (Terra Centrado, Terra Fixado)
EGNOS	– <i>European Geostationary Navigation Overlay Service</i> (Sistema Europeu Complementar Geoestacionário)
EPO	– <i>Extended Prediction Orbit</i> (Órbita de Previsão Estendida)
EUA	– Estados Unidos da América
FAT	– <i>File Allocation Table</i> (Tabela de Alocação de Arquivos)
FCC	– <i>Federal Communications Commission</i> (Comissão Federal de Comunicações)
FI	– Frequência Intermediária
GPIO	– <i>General Purpose Input/Output</i> (Entrada/Saída de Uso Geral)
GPS	– <i>Global Positioning System</i> (Sistema de Posicionamento Global)
GPS-SDR	– <i>Software Defined Receptor</i> (Receptor Definido por Software)

GNSS	– <i>Global Navigation Satellite System</i> (Sistema de Navegação Global por Satélite)
HDMI	– <i>High-Definition Multimedia Interface</i> (Interface Multimídia de Alta-Definição)
ICEA	– Instituto de Controle Aero-Espacial
INPE	– Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
L₁	– <i>link 1</i>
L₂	– <i>link 2</i>
LED	– <i>Light Emitting Diode</i> (Diodo Emissor de Luz)
LISN	– <i>Low-latitude Ionosphere Sensor Network</i> (Rede de Sensores Ionosférico de Baixa Latitude)
LNA	– <i>Low Noise Amplifier</i> (Amplificador de Baixo Ruído)
MSC	– <i>Master Control Station</i> (Estação Mestre de Controle)
NMEA	– <i>National Marine Electronics Association</i> (Associação Nacional de Eletrônica Marítima)
OCS	– <i>Operative Control System</i> (Sistema de Controle Operativo)
P	– <i>Precision</i> (Precisão)
PoE	– <i>Power over Ethernet</i> (Alimentação pela Ethernet)
PPS	– <i>Precise Positioning Service</i> (Serviço de Posicionamento Preciso)
PRN	– <i>Pseudo-Random Noise</i> (Ruído Pseudo-Aleatório)
PVT	– Posição, Velocidade e Tempo
RF	– <i>Radio Frequency</i> (Rádio Frequência)
RAM	– <i>Random Access Memory</i> (Memória de Acesso Aleatório)
RTC	– <i>Real Time Clock</i> (Relógio de Tempo Real)
SA	– <i>Selective Availability</i> (Disponibilidade Seletiva)
SD	– <i>Secure Digital</i> (Digital Seguro)
SO	– Sistema Operacional
SRN	– <i>Signal-to-Noise Ratio</i> (Relação Sinal Ruído)
SPS	– <i>Standard Positioning Service</i> (Serviço de Posicionamento Padrão)
USB	– <i>Universal Serial Bus</i> (Porta Serial Universal)
UHF	– <i>Ultra High Frequency</i> (Frequência Ultra Alta)
UNESP	– Universidade Estadual Paulista
UTC	– <i>Coordinated Universal Time</i> (Tempo Universal Coordenado)
VANT	– Veículo Aéreo Não Tripulado
VGA	– <i>Video Graphics Array</i> (Matriz Gráfica para Vídeo)
WAAS	– <i>Wide Area Augmentation System</i> (Sistema de Aumento de Área Ampla)

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 TABELAS.....	XII
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	XIII
 CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO.....	 01
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	01
1.2 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.....	02
 CAPÍTULO 2. CONSIDERAÇÕES SOBRE O GPS	 05
2.1 INTRODUÇÃO.....	04
2.2 AS CARACTERÍSTICAS DO GPS.....	04
2.3 AS CARACTERÍSTICAS DO SINAL.....	08
2.4 O POSICIONAMENTO NO GPS.....	10
2.5 O RECEPTOR GPS.....	11
2.6 A IONOSFERA E AS CINTILAÇÕES IONOSFÉRICAS.....	12
2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	14
 CAPÍTULO 3. MONITORAMENTO DE SINAIS GPS COM EQUIPAMENTOS DE BAIXO CUSTO.....	 15
3.1 INTRODUÇÃO.....	15
3.2 REDES DE MONITORAMENTO DA IONOSFERA NA AMÉRICA DO SUL.....	15

3.3 O USO DE EQUIPAMENTOS DE BAIXO CUSTO PARA MONITORAR A IONOSFERA.....	17
3.4 PROPOSTA DE UM RECEPTOR DE BAIXO CUSTO.....	19
3.4.1 O Receptor GPS <i>Breakout Adafruit Ultimate v3</i>	21
3.4.2 O <i>Raspberry Pi 4 Computer</i>	25
3.4.3 A montagem do protótipo.....	28
3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	32
 CAPÍTULO 4. OPERAÇÕES COM O PROTÓTIPO.....	 33
4.1 INTRODUÇÃO.....	33
4.2 OPERANDO O <i>RASPBERRY PI</i> COM O <i>GPS BREAKOUT ADAFRUIT ULTIMATE</i> ..	33
4.3 O PADRÃO NMEA E A INTERPRETAÇÃO DOS DADOS RECEBIDOS.....	37
4.4 UTILIZANDO A BIBLIOTECA <i>PYNMEA2</i> E GRAVANDO OS DADOS RECEBIDOS.....	40
4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	43
 CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES.....	 44
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	44
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	45
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	 47

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.

A localização e orientação espacial sempre foi uma preocupação da humanidade. Inicialmente, nos primórdios da civilização, as referências de posição mais elementares estavam relacionadas à marcação de rastros e ao uso de pontos significativos de referências, como montanhas, rochas, curvas de rio etc. Posteriormente, muito antes das grandes navegações dos séculos XV e XVI, surgiram os primeiros mapas, que ainda de forma rudimentar, ilustravam os pontos geográficos e suas distâncias. Na Grécia antiga se desenvolveu o primeiro conceito do que hoje é conhecido como Norte ou Sul em relação à linha do Equador e Leste ou Oeste em relação ao Meridiano de *Greenwich*.

Mais adiante, o artifício de se orientar usando as estrelas como referência foi desenvolvido para auxílio na navegação marítima. Os antigos fenícios navegavam se orientando pela Estrela do Norte, saindo do Egito até a ilha de Creta. Por volta do século XIII, após a descoberta do campo magnético, quando começaram a surgir observações e trabalhos mais acurados a respeito da eletricidade e do magnetismo, destaca-se a presença de uma ferramenta composta de uma agulha magnetizada que permite encontrar ou determinar posições: a bússola. E com o passar do tempo, foram surgindo instrumentos para mensurar distância angular (a exemplo do astrolábio e do sextante), até chegar à concepção do famoso GPS (*Global Positioning System* – Sistema de Posicionamento Global), desenvolvido na década de 60, que em forma altamente evoluída, trabalha com precisão em relação ao posicionamento, à velocidade e ao tempo [BORGES, 2013].

Apesar do sistema GPS ser altamente confiável, alguns fatores podem afetar sua precisão, dentre os quais pode-se citar: as interferências eletromagnéticas, a propagação multipercursos, os atrasos em função da propagação e as cintilações ionosféricas. A cintilação ionosférica tem um alto potencial de causar problemas, como a perda de dados, perda de sincronismo e até mesmo a perda de sinal, em alguns sistemas que são considerados mais sensíveis. Esses problemas são gerados pela passagem do sinal em uma região cheia de irregularidades na sua densidade eletrônica, afetando o índice de refração e provocando variações na amplitude e/ou na fase [MOURA, 2012; TSUI, 2000].

O monitoramento contínuo das cintilações ionosféricas é fundamental para o planejamento, operação e gerenciamento de atividades que dependem de comunicação via satélite, sobretudo em aplicações onde o posicionamento e a navegação são fatores críticos, como é o caso da navegação aérea, agricultura de precisão, prospecção de petróleo e futuramente o uso de Drones, VANTs (Veículo Aéreo Não Tripulado) e Veículos Autônomos Elétricos [PETROPOULOS, 2021].

O monitor de cintilação ionosférica é um aparelho essencial para tarefas dedicadas a aplicações de monitoramento da ionosfera e do clima espacial. Os modelos comerciais atuais são equipamentos com custo elevado. Dessa forma, é salutar o desenvolvimento de soluções de baixo custo para o monitoramento das irregularidades ionosféricas [PETROPOULOS, 2021].

1.2 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.

O objetivo geral deste trabalho consiste na proposta de instalação, sincronização e armazenagem de dados do sinal na frequência da banda L_1 (*link 1*), por intermédio de um receptor GPS de baixo custo.

Para isso, foi efetuada a montagem de um protótipo que possui o GPS *Breakout Adafruit Ultimate v3* e a plataforma *Raspberry Pi* como elementos integrantes. A esse receptor foi conectado uma antena externa, e em seguida realizada a sintonia com os satélites visíveis.

Em [TSUI, 2000] foi abordado um receptor GPS totalmente via *software*. Esse estudo abriu caminho para uma infinidade de outras pesquisas relacionadas a receptores GPS com *softwares* ajustáveis, mas não propôs um *hardware* que executasse essas rotinas.

Em [BORRE *et al.*, 2007], é apresentado, desenvolvido, explicado e executado um receptor GPS-SDR (*Software Defined Receptor* – Receptor Definido por *Software*) em que é possível alterar os parâmetros dos circuitos de rastreamento do sinal GPS sob forte cintilação ionosférica, contudo, também não é apresentado nenhum *hardware* que execute tais funções.

Mais recentemente, em [PETROPOULOS, 2021], foi realizada a medição de sinais de GPS utilizando receptores de baixo custo, com o auxílio de um *kit* Arduino.

Isto posto, a finalidade principal deste trabalho é utilizar as técnicas e conceitos adotados em [PETROPOULOS, 2021], e a partir disso propor um modelo de monitor de sinais de satélites da constelação GPS, que receba e armazene dados, tais como de posicionamento, SNR, azimuth, elevação etc. Será caracterizado com detalhes os itens utilizados para a montagem do protótipo, bem como os procedimentos de montagem, instalação, aquisição e armazenamento dos dados.

Para que as intenções de pesquisas propostas sejam alcançadas com satisfação, o trabalho foi estruturado da seguinte forma:

No capítulo 2 é feito um estudo sobre a visão geral do GPS, da ionosfera e das cintilações ionosféricas, expondo conceitos, características e equacionamentos que irão ajudar a localizar o tema.

No capítulo 3 será explanado sobre as redes de monitoramento da ionosfera, e apresentado pesquisas que têm abordado o problema da cintilação ionosférica com o auxílio de receptores GPS de baixo custo. Ainda será apresentado o modelo de monitor de sinais de satélites proposto, detalhado o receptor GPS *Breakout Adafruit Ultimate v3*, o computador de placa única *Raspberry Pi 4 Model B* e o processo de montagem do protótipo.

No capítulo 4 são exibidos os procedimentos para recepção, interpretação e armazenamento dos dados recebidos pelo receptor, apresentando paralelamente os resultados obtidos com a operação do protótipo.

No capítulo 5 são expostas as conclusões e recomendações para trabalhos futuros, com fito em incentivar a continuidade da pesquisa. E logo após este capítulo, são apresentadas ainda as referências bibliográficas.

CAPÍTULO 2

CONSIDERAÇÕES SOBRE O GPS

2.1 INTRODUÇÃO.

Conhecido popularmente por GPS, o Sistema de Posicionamento Global é um sistema que começou a ser desenvolvido pelo DoD (*Department of Defense* – Departamento de Defesa) dos EUA (Estados Unidos da América) no ano de 1960 e é composto por uma rede de satélites artificiais que orbitam o globo terrestre a distâncias de milhares de quilômetros de sua superfície. Estes satélites disponibilizam sinais que são interpretados pelo receptor GPS e assim é possível obter informações referentes ao posicionamento do usuário (receptor) [BORGES, 2013].

Assim como diversas outras descobertas tecnológicas, o GPS surgiu com o intuito de auxiliar atividades militares, porém com o passar do tempo começou a atender também os interesses civis, e cada vez mais vem se popularizando, tanto que atualmente é considerado essencial em áreas como agronomia, biologia, engenharia, turismo e geografia [OLIVEIRA, 2015].

Os sinais do GPS propagam-se obrigatoriamente pela ionosfera e esta camada pode influir negativamente sobre os mesmos. Dessa forma, é importante o estudo do sinal e do sistema GPS como um todo, a fim de melhor compreender os possíveis efeitos que a referida camada pode ocasionar.

Neste capítulo será abordado as características do sinal GPS, apresentando um levantamento dos dados de navegação e os tipos de serviços que são oferecidos por esse sistema. Ainda será exposta uma análise dos códigos PRN (*Pseudo-Random Noise* – Ruído Pseudo-Aleatório) ressaltando suas propriedades bem como suas portadoras L_1 (*link 1*) e L_2 (*link 2*) com suas equações equivalentes, e percorrendo também sobre o conceito de ionosfera e cintilações ionosféricas.

2.2 AS CARACTERÍSTICAS DO GPS.

Com o próprio nome sugere, o GPS é um sistema de escala global, que faz uso de satélites para prover navegação e localização geográfica, permitindo que um usuário tenha a seu dispor no mínimo quatro satélites que podem ser localizados. Esse sistema usa uma política

de coordenadas ortogonais ECEF (*Earth-Centere, Earth-Fixed* – Terra-Centrado, Terra-Fixos) com início no centro da Terra [BORGES, 2013; OFFICIAL U.S. GOVERNMENT, 2022].

Para limitar a precisão oferecida ao usuário final, existem dois tipos de serviços ofertados pelo GPS, quais sejam, o SPS (*Standard Positioning Service* – Serviço de Posicionamento Padrão) e o PPS (*Precise Positioning Service* – Serviço de Posicionamento Preciso).

O SPS é um serviço fornecido com uma precisão aceitável aos diversos usuários distribuídos no planeta, pois ele é de livre acesso. Após meados do ano 2000, a técnica conhecida por SA (*Selective Availability* – Disponibilidade Seletiva) deixou de ser aplicada no sinal público de GPS. Por meio da manipulação das mensagens de navegação (técnica *epsilon*: ϵ) e da frequência dos relógios dos satélites (técnica *dither-d*), o AS não permitia ao usuário obter a exatidão proporcionada pelo sistema [BORRE *et al.*, 2007].

Por outro lado, o PPS é outro serviço fornecido somente aos usuários autorizados, proporcionando a máxima exatidão atingida pelo sistema GPS. Por meio de um processo denominado AS (*Anti-Spoofing* – Anti-Fraude), é realizada a restrição do acesso ao PPS, utilizando técnicas de criptografia do código P, sendo que para desbloquear o código P criptografado, é necessário um dispositivo apropriado de decodificação [OLIVEIRA, 2015].

O sistema GPS é dividido em três segmentos: Controle, Espacial e de Usuário, conforme ilustrado na Figura 2.1.

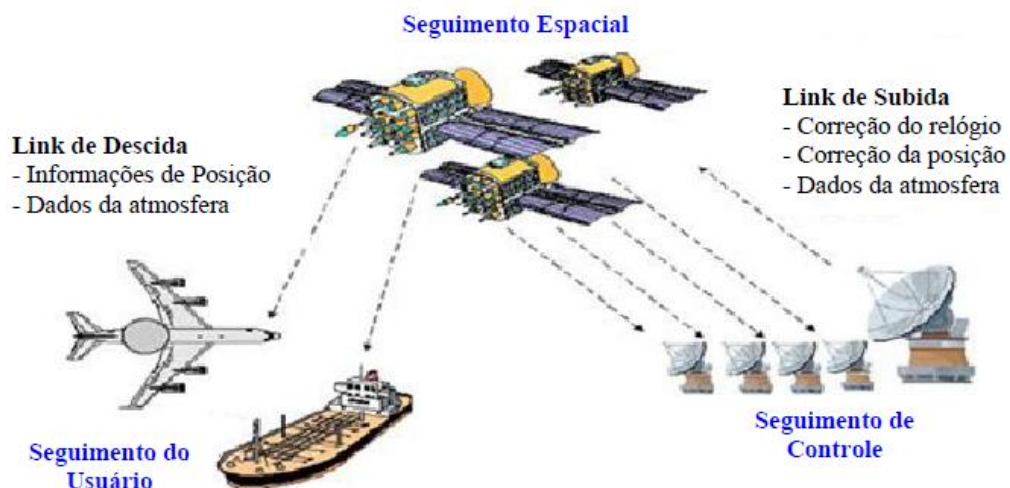


Figura 2.1 – Segmentos do GPS [MOURA, 2012].

O OCS (*Operative Control System* – Sistema de Controle Operacional) é composto por 5 estações terrestres, mais precisamente em: Ilha de Ascensão no Atlântico Sul, Diego Garcia no Oceano Índico, *Kwajalein* no Oceano Pacífico, Colorado Springs nos EUA e Havaí, que rastreiam passivamente todos os satélites e capturam as informações sobre as distâncias a partir dos seus sinais.

A MSC (*Master Control Station* – Estação de Controle Mestre) que está localizada na base da força aérea dos EUA no Colorado adquire as informações reunidas pelas estações, e após isso, analisa as mesmas e designa a situação de atividade dos relógios e parâmetros orbitais de cada satélite, gerando sempre novas mensagens de navegação, retornando a todos os satélites por entre as demais estações. A Figura 2.2 mostra a localização das estações pelo mundo [MOURA, 2012].



Figura 2.2 – Estações de monitoramento ao redor do mundo [MOURA, 2012].

O fragmento ou segmento espacial do sistema GPS pode suportar até 32 satélites operacionais na constelação. São destinados em 6 planos orbitais divididos por 60° ($6 \times 60^\circ = 360^\circ$), com inclinação de 55° em relação ao plano equatorial e transmitem sinais em radiofrequências de UHF (*Ultra High Frequency* – Frequências Ultra Altas).

O período que as órbitas têm são aproximadamente 11h e 58 min (12 horas siderais) e possuem também aproximadamente 20.200 km. Essa configuração garante que no mínimo 4 satélites GPS sejam visíveis em qualquer hora e em qualquer parte do globo [MOURA, 2012].

Em 26 de junho de 2022, excluindo-se os satélites sobressalentes (desativados) em órbita, havia um total de 31 satélites operacionais na constelação GPS, mas, de acordo com o

tempo de vida útil dos mesmos, esse número está sujeito à alterações [OFFICIAL U.S. GOVERNMENT, 2022].

A Figura 2.3 ilustra a constelação dos satélites GPS.

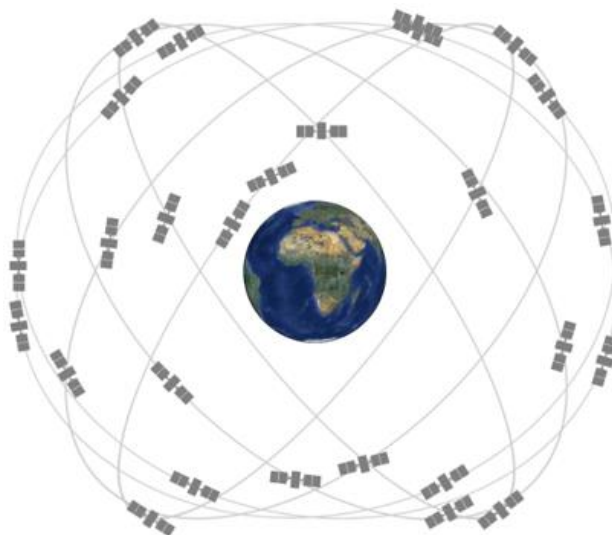


Figura 2.3 – Ilustração da constelação dos satélites GPS [OFFICIAL U.S. GOVERNMENT, 2022].

O Segmento do Usuário é constituído por configurações, protocolos de comunicação e arquiteturas de integração que unem uma antena a um sensor-processador que recebe o sinal, processa-o e realiza os cálculos de navegação necessários para informar posição, velocidade e tempo de chegada ao usuário; em outras palavras é no Segmento do Usuário, que todo o Sistema GPS se torna utilizável.

A Figura 2.4 ilustra modelos de receptores GPS, que podem chegar a custar milhares de reais [MOURA, 2012].



Figura 2.4– Exemplos de receptores GPS [MOURA, 2012].

2.3 AS CARACTERÍSTICAS DO SINAL.

O conjunto de satélites do sistema GPS transmite em duas frequências de portadoras sendo elas L_1 e L_2 , ou seja, com frequências 1575,42 MHz e 1227,6 MHz, respectivamente. Essas portadoras são geradas simultaneamente a partir de uma frequência (f_0) de 10,23 MHz, sendo $L_1 = 154 \cdot f_0$ e $L_2 = 120 \cdot f_0$ [VAN DIERENDOCK, 1996].

Existe um código PRN enviado para cada satélite GPS. Esses códigos são sequências pseudo-aleatórias, agregado a cada satélite, originando uma mensagem de navegação. As portadoras L_1 e L_2 são moduladas por esses códigos, e de acordo com a aproximação do tempo de propagação da modulação, possibilita que medidas de distâncias sejam realizadas.

Através da correlação cruzada entre o código do sinal que foi recebido e uma imitação do código gerada no receptor GPS, o tempo de propagação pode ser estimado. Isso torna possível a detecção através do uso do CDMA (*Code Division Multiple Access* – Acesso Múltiplo por Divisão de Código). Os códigos PRN são estabelecidos em uma sequência de estados de +1 e -1 (valores binários referidos a 1 e 0), cuja modulação é feita por um deslocamento de 180° na fase da portadora quando houver alteração do estado do *bit*, ou seja, modulação BPSK (*Binary Phase Shift Keying* – Chaveamento de Fase Binário) [RODRIGUES, 2003].

Esse processo é ilustrado na Figura 2.5.

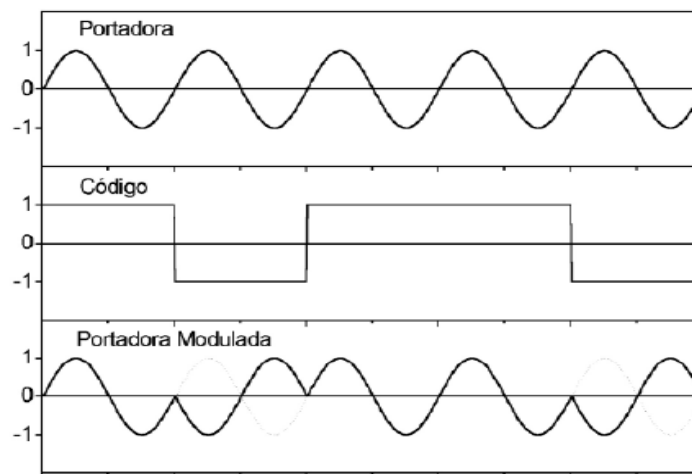


Figura 2.5 – Modulação do código sobre a onda portadora [RODRIGUES, 2003].

A sequência PRN é formada pelos códigos, C/A (*Coarse Aquisição* – Aquisição Grosseira) que possui a frequência de 1,023MHz e P (*Precision* - Precisão) com frequência de 10,23 MHz.

Existe ainda o código W que é utilizado para criptografar o código P, transformando-se logo depois no código Y. A criptografia do código P só se torna útil quando o procedimento AS é acionado.

O principal objetivo do AS é evitar que o código P seja fraudado, mediante a geração de uma réplica que já existe, sendo ela representada por P(Y). Este procedimento pertence ao serviço PPS, que está disponível apenas aos usuários autorizados pelo DoD dos Estados Unidos da América [MOURA, 2012].

A mensagem de navegação consiste de 1500 *bits* transmitidos em 30 segundos. Estes *bits* contêm as informações sobre a órbita do satélite, suas condições operacionais, seu relógio e outras informações.

Pode se observar que existem três tipos de sinais que estão envolvidos no GPS sendo eles: as portadoras (L_1 e L_2), a mensagem de navegação (D), e os códigos C/A e P(Y). Por meio desta estrutura, é possível medir a fase da portadora e sua variação e o tempo de propagação da modulação [RODRIGUES, 2003].

A representação das portadoras moduladas é dada pelas equações 2.1 e 2.2.

$$L_1(t) = a_1 P(t) D(t) \cos[\omega_1 + \phi(t)] + a_1 C/A(t) D(t) \sin[\omega_1 + \phi(t)] \quad (2.1)$$

$$L_2(t) = a_2 P(t) D(t) \cos[\omega_2 + \phi(t)] \quad (2.1)$$

Onde:

$a_i \cos[\omega_i + \phi(t)]$ é a portadora não modulada;

$D(t)$ contém a mensagem de navegação;

$P(t)$ e $C/A(t)$ representam as sequências de pulsos dos códigos P e C/A, respectivamente;

ω_i é a frequência angular da portadora;

$\phi(t)$ é a fase da portadora.

O termo $a_1 C/A(t) D(t) \sin[\omega_1 + \phi(t)]$ mostra que o código C/A é modulado em quadratura de fase (deslocamento de 90°) com o código P(t). As portadoras L_1 ou L_2 são representadas pelo índice $i = 1, 2$.

2.4 O POSICIONAMENTO NO GPS.

Para a localização de um ponto desejado em um plano são necessários três referenciais conhecidos (S_1 , S_2 e S_3) no espaço com suas respectivas distâncias (ρ_1 , ρ_2 e ρ_3) até esse ponto. Levando em consideração a posição do satélite S_i e a sua distância ρ_i até o usuário, é possível estabelecer as prováveis posições do usuário, que serão definidas pelo traço da circunferência de raio ρ_i ao redor da posição do satélite S_i .

Dois satélites e duas distâncias podem fornecer apenas duas possíveis soluções de posição, porém, para determinar a posição exata do usuário, é necessária ainda a presença de uma terceira circunferência, como ilustra a Figura 2.6 (a). No Sistema de Posicionamento Global por sua vez, precisa-se no mínimo de quatro satélites e quatro distâncias para o posicionamento tridimensional; tal requisito não é somente para distinguir os dois pontos gerados pela intersecção entre as três esferas, como ilustra a Figura 2.6 (b), mas para minimizar o erro do relógio do receptor, melhorando a precisão e exatidão das informações fornecidas a respeito de posicionamento [RODRIGUES, 2003].

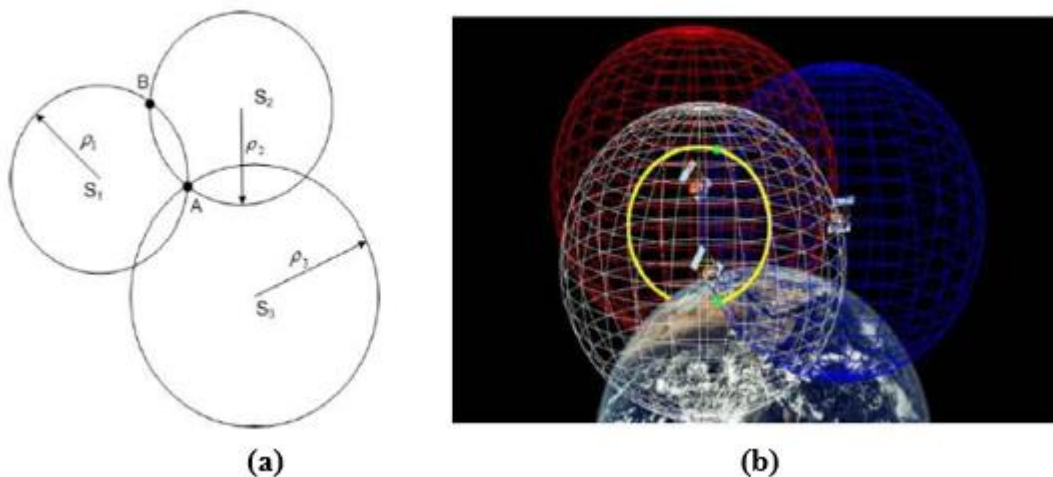


Figura 2.6 – Posicionamento (a) bidimensional e (b) tridimensional do usuário [MOURA, 2012].

Uma distância (próxima da geometria) entre o satélite e o receptor é possível de ser obtida através dos dados de navegação e do atraso sofrido pelo sinal durante a propagação; a operação utilizada para isso é conhecida como ‘Trilateração’. A Trilateração é um fundamento matemático que faz uso do princípio de intersecção de linhas de distâncias conhecidas a partir de pontos fixos de posição para determinar a localização do receptor. A melhoria desta localização é diretamente proporcional com a quantidade de satélites empregados, haja vista

que um maior número de satélites aprimora a disposição geométrica das esferas e reduz significativamente o volume da provável posição do usuário, gerando maior precisão. As informações de interesse do usuário são visualizadas por ele por meio de uma interface presente nos receptores GPS [RODRIGUES, 2003].

2.5 O RECEPTOR GPS.

Um receptor GPS possui a estrutura básica indicada na Figura 2.7. Tal arquitetura é representada por meio de quatro seções essenciais [SEEBER, 2003]:

- Estágio de entrada, sendo a etapa de RF (*Radio Frequency* – Rádio Frequência), representado pelos blocos azuis;
- Conversor A/D (Analógico/Digital) com o ACG (*Automatic Control Gain* – Controle Automático de Ganho), representado pelos blocos verdes;
- Etapa de correlação com N canais operando paralelamente (blocos amarelos);
- Processamento dos dados de navegação PVT (Posição, Velocidade e Tempo) juntamente com a interface do usuário (blocos laranja).

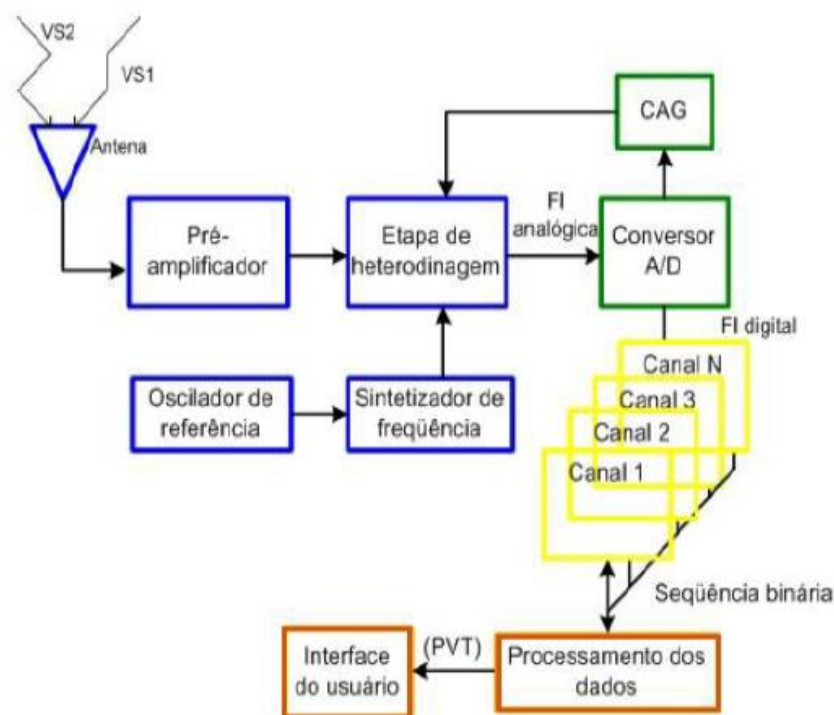


Figura 2.7 – Diagrama em blocos de um receptor GPS [MOURA, 2012].

Analisando a Figura 2.7, nota-se que os sinais GPS proveniente dos satélites são captados por uma antena circularmente polarizada e logo após são amplificados em um LNA (*Low Noise Amplifier* – Amplificador de Baixo Ruído) de alto ganho. Depois de serem condicionados e amplificados, o procedimento seguinte pelo qual os sinais passam é o da heterodinagem, etapa em que ocorre um deslocamento da frequência da portadora para um valor de FI (Frequência Intermediária) através de um oscilador local. O processo de batimento com o oscilador local gera duas bandas de frequência, uma superior e outra inferior; a banda inferior é selecionada e a superior é rejeitada por intermédio um filtro passa-faixas na saída do misturador. As variações de *Doppler* e os códigos PRN são preservados após esta etapa. Tradicionalmente, a heterodinagem é feita em dois ou até três estágios [RODRIGUES, 2003].

Um conversor A/D amostra e codifica o sinal da FI convertendo-a de analógica para digital. Neste ponto, o sinal digitalizado já pode ser processado nos canais disponíveis no correlator, onde cada elemento da matriz de estruturas corresponde a um canal do receptor em que as informações provenientes das etapas de processamento são armazenadas. Para a identificação dos satélites visíveis e a obtenção dos dados de navegação, quatro etapas de processamento são realizadas pelo correlator, são elas: Aquisição, Confirmação, Sincronismo e Rastreamento. Em seguida, por meio de uma interface, a mensagem que contém os dados processados informa a posição ao usuário [RODRIGUES, 2003].

2.6 A IONOSFERA E AS CINTILAÇÕES IONOSFÉRICAS.

O sinal de RF que se propaga do satélite até o receptor GPS, passa obrigatoriamente por uma região da alta atmosfera conhecido por ionosfera. Localizada aproximadamente entre 60 km e 1.000 km de altitude da superfície terrestre, a ionosfera é uma camada caracterizada principalmente por possuir alta densidade de íons e elétrons livres, gerados sobretudo por fotoionização solar. A ionosfera também pode ser referida como o plasma natural no qual se desenvolvem instabilidades e irregularidades ionosféricas em uma ampla faixa de tamanhos de escalas [OLIVEIRA, 2015; VANI, *et al.* 2021].

Conforme mostra a Figura 2.8, a ionosfera é dividida em 3 camadas ou regiões principais, sendo: D, E e F. Dependendo do tipo de camada e da altitude, a densidade eletrônica da ionosfera pode assumir diferentes valores.

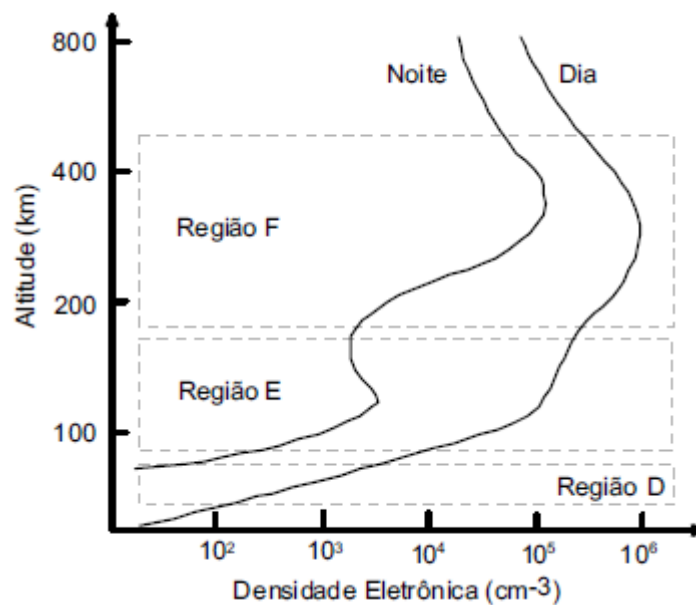


Figura 2.8 – Perfis verticais típicos de densidade eletrônica da ionosfera [RODRIGUES, 2003].

Pode-se dizer que a altura da ionosfera em si varia de tamanho, dependendo da quantidade de energia que é absorvida. A região D, por exemplo, só existe durante o dia e localiza-se a aproximadamente abaixo de 90km de altitude; por ser fracamente ionizada, essa região não pode ser considerada um plasma. A região E está localizada na faixa de 90 a 150 km, com um pico de ionização em torno de 110 km. Já a região F, fica acima de 110 km e atinge o pico de densidade eletrônica ao redor de 350 km [OLIVEIRA, 2015].

Tendo em vista o alto nível de ionização das camadas E e F, a densidade da ionosfera atinge picos da ordem de 10^5 e 10^6 elétrons/cm⁻³ durante o dia, que é período em que existe ionização em toda a extensão vertical da ionosfera.

A ionosfera tem grande importância nas telecomunicações visto que possibilita a reflexão de ondas de rádio para locais distantes. Contudo, as irregularidades da densidade de ionização da ionosfera podem ocasionar um efeito negativo no clima espacial, conhecido como cintilação ionosférica, que por sua vez resulta em interferências nas ondas de rádio, afetando inclusive os sinais de satélites GPS [FREITAS, 2019].

A cintilação ionosférica é um fenômeno que provoca modificações rápidas na amplitude (cintilação em amplitude) e na fase (cintilação em fase) dos sinais eletromagnéticos que atravessam a ionosfera. Esse efeito é muito expressivo em regiões de baixas latitudes e costuma ocorrer diariamente após o pôr do sol, provocando o desvanecimento dos sinais de fase em quadratura do GPS, o que pode comprometer a operação do receptor GPS, resultando

negativamente na acurácia do sistema ou ainda, em alguns casos, completa interrupção do receptor [OLIVEIRA, 2015].

2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.

Neste capítulo foi apresentada uma breve revisão sobre o panorama do Sistema de Posicionamento Global, expondo as características do sistema, localização mundial, segmentos, aplicações e outras definições pertinentes, para localizar o tema do trabalho.

Também foi mostrado o processo de geração, equacionamentos e formas de onda dos sinais que compõem o sistema, sendo ainda comentado sobre o diagrama em blocos de um receptor GPS.

No final do capítulo, foram apresentados ainda alguns conceitos relativos à ionosfera e cintilação ionosférica, com a finalidade de introduzir a problemática que pode afetar o sistema GPS, contudo, sem o objetivo de extrapolar a teoria que há por traz do assunto ou mesmo trazer revisões matemáticas.

No próximo capítulo, será abordado sobre o uso de equipamentos de baixo custo para monitoramento de sinais de satélites, o que abrirá o caminho para apresentar o detalhamento do protótipo utilizado para a mesma finalidade.

CAPÍTULO 3

MONITORAMENTO DE SINAIS GPS COM EQUIPAMENTOS DE BAIXO CUSTO

3.1 INTRODUÇÃO.

A Propagação multicaminho, as interferências eletromagnéticas, os atrasos em função da propagação pela atmosfera e as cintilações ionosféricas, são alguns dos vários fatores ambientais que podem prejudicar o desempenho do GPS. Como já mencionado no capítulo 2, as cintilações ionosféricas representam a principal fonte de erro que contribui para a alteração da amplitude e fase do sinal GPS, interrompendo ou degradando a operação do receptor, o que afeta a estimativa das coordenadas e dificulta o rastreamento dos satélites observados. Logo, o estudo desse fenômeno é de suma importância para previsão do clima espacial e desenvolvimento de melhorias nas aplicações tecnológicas que necessitam de comunicação via satélite [FREITAS, 2019; GANG, 2004; VANI, *et al.* 2021].

Este capítulo está organizado da seguinte forma: primeiro será feita uma abordagem a respeito do monitoramento da ionosfera, discorrendo também sobre o estado da arte dos equipamentos de monitoramento utilizados pelas grandes estações de monitoramento. Nesse contexto, será apresentado o também o conceito de equipamentos de baixo custo no monitoramento de irregularidades ionosféricas. E em seguida, será detalhado o protótipo de baixo custo montado para monitorar sinais de satélites GPS.

3.2 REDES DE MONITORAMENTO DA IONOSFERA NA AMÉRICA DO SUL.

O estudo das irregularidades da ionosfera é possível de ser realizado através de alguns meios, dentre os quais pode-se citar: radares, foguetes de sondagem, ionossondas ou ainda por meio das cintilações que essas irregularidades causam na amplitude e fase de ondas de rádio em comunicações via satélite. Esta última prática passou a ser utilizada a partir do ano de 1957, com o lançamento dos primeiros satélites. A ideia era estudar a ionosfera utilizando os sinais de rádio emitidos pelos próprios satélites. Assim, podia-se realizar medidas de cintilação ionosférica e analisar os princípios físicos e dinâmicos que regem as irregularidades ionosféricas, com o objetivo de reduzir os problemas nas comunicações via satélite [FREITAS, 2019; OLIVEIRA, 2015; YEH e LIU, 1982].

A cintilação ionosférica tornou-se alvo frequente de estudo nas últimas quatro décadas. Contudo, esse fenômeno ainda representa um importante desafio para as pesquisas. No Brasil, quatro projetos realizam o monitoramento dos eventos da cintilação ionosférica por intermédio de dados do GNSS (*Global Navigation Satellite System* – Sistema de Navegação Global por Satélite) [OLIVEIRA, 2015]:

- Projeto LISN (*Low-latitude Ionosphere Sensor Network* – Rede de Sensores Ionosférico de Baixa Latitude), coordenado pelo Instituto Geofísico do Peru;
- Projeto Scintec, gerenciado pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais);
- Projeto CIGALA (*Concept for Ionospheric Scintillation Mitigation for Professional GNSS in Latin America* – Projeto para Mitigação da Cintilação Ionosférica no GNSS Profissional na América Latina); e
- Projeto CALIBRA (*Countering GNSS high Accuracy applications Limitations due to Ionospheric disturbances in Brazil* – Aplicações de Alta Precisão GNSS para as Limitações Devido às Perturbações Ionosféricas no Brasil), gerenciados por uma cooperação internacional entre vários institutos de pesquisa e desenvolvimento, inclusive a UNESP (Universidade Estadual Paulista).

A Figura 3.1 mostra a localização das estações de monitoramento da ionosfera, situadas na América do Sul.



Figura 3.1 – Localização das estações de monitoramento da ionosfera de diferentes redes [PETROPOULOS e PRASHANT, 2021].

A rede ICEA (Instituto de Controle Aero-Espacial), instalada em território brasileiro, realiza o monitoramento da ionosfera utilizando sobretudo receptores GPS *Novatel* modelo *GSV4004B*. Já a rede UNESP, presente também no Brasil, utiliza receptores *Septentrio* modelo *PolarxS Pro*®, que é um equipamento de notável precisão, contudo com custo muito elevado: cerca de US\$ 20 mil [FREITAS, 2019].

A Figura 3.2 mostra os receptores GPS mencionados, que são modelos de receptores dedicados a monitoramento da ionosfera e do clima espacial.



Figura 3.2 – Receptores Novatel GSV4004B (a) e Septentrio PolarxS Pro® (b) [NAVTECHGPS, 2018; VAN DIERENDONCK, 2009].

Outra rede de pesquisa presente no Brasil, é a rede LISN, que contempla a instalação de diferentes equipamentos para monitorar a ionosfera na América do sul, tais como: monitores GNSS, magnetômetros e ionosondas. O projeto LISN realiza pesquisas sobre a ionosfera equatorial e oferece serviços como a previsão das condições em tempo real [OLIVEIRA, 2015].

Se por um lado no Brasil, existem várias estações de monitoramento da ionosfera, por outro, a quantidade de instrumentos dedicados ao estudo da ionosfera é consideravelmente reduzida, devido ao custo elevado dos receptores de GPS utilizados [FREITAS, 2019].

Sendo assim, é de suma importância o desenvolvimento de arranjos de baixo custo, que consigam monitorar sinais GPS, com objetivos similares aos dos receptores utilizados nas grandes redes de monitoramento. É sobre esse assunto que será abordado no tópico seguinte.

3.3 O USO DE EQUIPAMENTOS DE BAIXO CUSTO PARA MONITORAR A IONOSFERA.

Estudos mostram que entre as estratégias mais utilizadas para realizar a mitigação dos efeitos da cintilação ionosférica, destacam-se a modelagem estatística dos dados, apresentada

em CONKER et al. (2003) e também, as melhorias no *hardware* dos receptores, abordado por VAN DIERENDONCK (1993). Todavia, nenhuma dessas técnicas mostrou-se totalmente eficaz contra os efeitos da cintilação ionosférica e muita pesquisa ainda está em fase de desenvolvimento neste campo [OLIVEIRA, 2015].

As pesquisas voltadas para o desenvolvimento de equipamentos e protótipos de baixo custo com capacidade de monitorar as irregularidades ionosféricas, têm sido o propósito de estudantes de graduação e pós-graduação de várias instituições que integram os campos da Geociência, Engenharia Eletrônica e Engenharia da Computação no Brasil. O desenvolvimento de tais equipamentos atende o objetivo de estudar a recepção GPS, a interface do *hardware*, a programação do *firmware* e as aplicações da análise geofísica da ionosfera [OLIVEIRA, 2015].

Para alcançar objetivos práticos na aprendizagem e desenvolvimento de receptores de baixo custo, em PETROPOULOS e PRASHANT [2021] foram reunidos alguns parâmetros necessários para caracterizar um receptor GPS de custo acessível, conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1 – Requisitos para um receptor de baixo custo [PETROPOULOS e PRASHANT, 2021].

Requisitos #	Descrição
1	Rastreamento simultâneo de no mínimo 12 canais de satélites GPS independente.
2	Taxa de amostragem mínima de 10Hz para as medidas do sinal de amplitude em cada canal.
3	Informações da identificação do satélite, azimuth e elevação.
4	Estimativa do índice S_4 comparável com um monitor de cintilação profissional.
5	Custo total abaixo de \$100.00.
6	Plataformas de <i>Software</i> e <i>Hardware</i> abertas.
7	Habilidade para gravar dados recebidos em memórias não volátil.
8	Capacidade de enviar os dados gravados para uma rede de pesquisa.
9	Capacidade de operar de forma autônoma e expansível quando desejável.
10	Baixo consumo de energia e alimentado por baterias.

Em PETROPOULOS e PRASHANT [2021] é desenvolvido também um protótipo de monitor de sinais de satélites utilizando a plataforma Arduino Uno Rev3 para comunicar com um receptor GPS da Adafruit, nos moldes de montagem representados no diagrama de blocos da Figura 3.3.

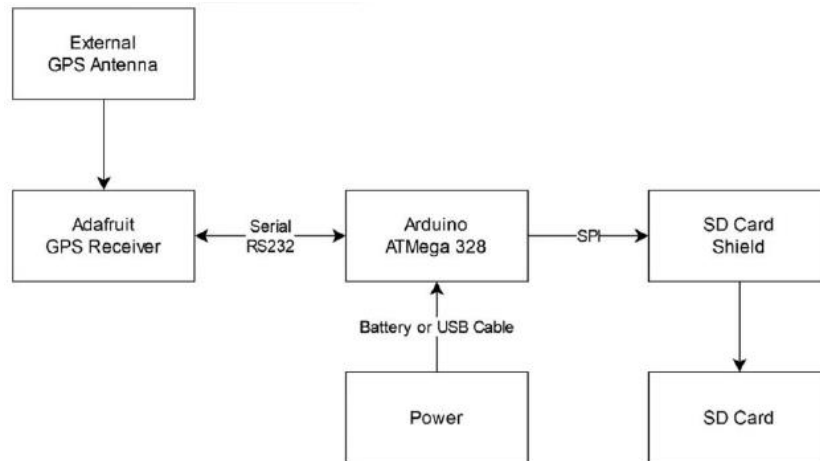


Figura 3.3 – Diagrama de blocos de um monitor ionosférico utilizando Arduino [PETROPOULOS e PRASHANT, 2021].

O objetivo da implementação do protótipo era chegar a um modelo de monitor de sinais de satélites GPS na banda L_1 , que conseguisse cumprir todos os requisitos descritos na Tabela 1 e fosse capaz de adquirir, dentre outras medidas, a posição do receptor e dados de satélites GPS, como SRN (*Signal-to-Noise Ratio* – Relação Sinal Ruído), azimuth e elevação.

Apesar do protótipo ter conseguido adquirir dados de GPS, constatou-se que o Arduino possuía pouco poder de processamento, visto que trabalha com uma frequência de 16 MHz, e por isso acabava perdendo alguns dados recebidos, tornando-o incapaz de realizar as operações de forma confiável e inclusive de atender ao requisito 8 descrito na Tabela 1 [PETROPOULOS e PRASHANT, 2021].

3.4 PROPOSTA DE UM RECEPTOR DE BAIXO CUSTO.

Conforme observado no tópico anterior, os resultados do protótipo utilizando a plataforma Arduino, não mostrou-se satisfatório, principalmente do ponto de vista relacionado ao processamento do Arduino.

Dessa forma, será discorrido a seguir, sobre as características e detalhes do protótipo de monitoramento de baixo custo proposto para este trabalho. O diagrama de blocos desse protótipo é mostrado na Figura 3.4, ele é bem mais abreviado que o da Figura 3.3.

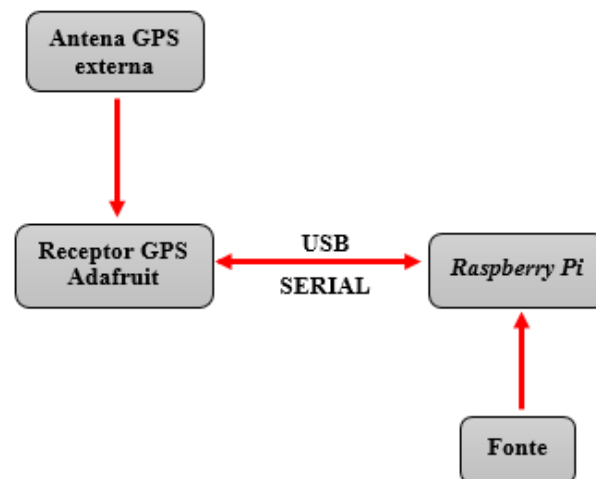


Figura 3.4 – Diagrama de blocos de um monitor ionosférico utilizando *Raspberry Pi* [Elaboração Própria].

Basicamente, a ideia desse monitor de sinais de satélites na banda L_1 proposto na Figura 3.4, é similar a do trabalho mostrado em PETROPOULOS e PRASHANT [2021], contudo será utilizado outra plataforma computacional para interagir com o receptor GPS: a *Raspberry Pi*. Essa plataforma possui processamento superior ao Arduino, e além de não necessitar de *shields* para se conectar à *internet* (ou mesmo fazer leitor de cartão de memória), permite executar múltiplos programas simultaneamente, e pode ser programada em outras linguagens, como o *Python*, por exemplo.

O enfoque então, será na especificação e processo de montagem de todos os elementos compreendidos pelo protótipo, cuja função principal, inicialmente, será a de ser utilizado como um monitor de sinais GPS que receba e armazene os dados brutos emitidos pelos satélites, inclusive dados que posteriormente podem ser utilizados para descobrir o nível de cintilação ionosférica que afetou os sinais até a sua chegada no receptor.

Dessa forma, será apresentado o receptor GPS utilizado na montagem, qual seja, o GPS *Breakout Adafruit Ultimate v3*, descrevendo também sobre a plataforma *Raspberry Pi* utilizada, (neste caso, o *Raspberry Pi 4 Model B*), e mostrando os procedimentos de montagem do protótipo.

3.4.1 O Receptor GPS *Breakout Adafruit Ultimate v3*.

A Adafruit Industries é uma empresa da área de eletrônicos e sistemas embarcados, que projeta, fabrica e vende ferramentas, equipamentos e *hardwares*. Fundada em 2005, pela engenheira Limor Fried, em Manhattan na cidade de Nova Iorque, a Adafruit tem como principal objetivo incentivar a aprendizagem e a criatividade no ramo da eletrônica, não só para profissionais com alto nível de habilidade, como também para estudantes, amadores e pessoas de todas as idades [ADAFRUIT INDUSTRIES, S.I.].

Dentre os produtos de código aberto e de baixo custo produzidos pela Adafruit, destaca-se o receptor GPS *Breakout Ultimate v3*. Trata-se de um receptor GPS construído em torno do *chipset* MTK3339, sendo este disposto em uma minúscula *Breakout Board* com medidas de 25.5mm x 35mm x 6.5mm. A Figura 3.5 mostra os detalhes do receptor, que possui os nomes dos pinos perfeitamente identificados e acessíveis, o que facilita o desenvolvimento/avaliação de projetos e realização de ensaios e testes.

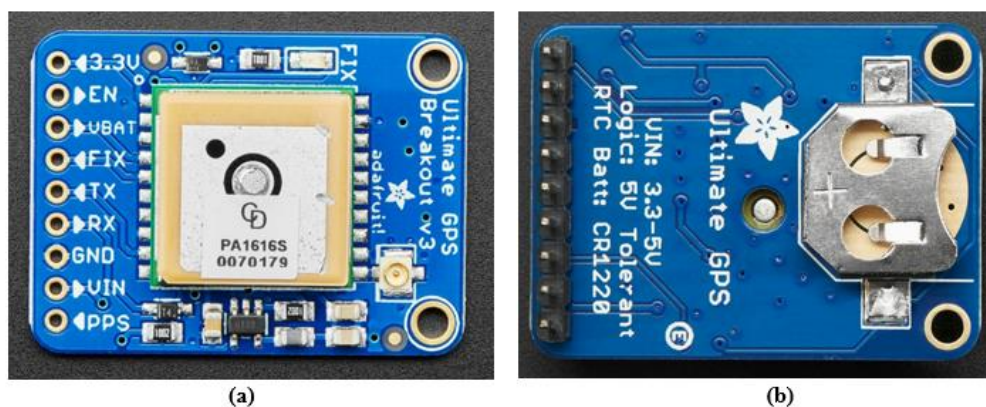


Figura 3.5 – Receptor GPS *Breakout Adafruit Ultimate v3*: detalhes frontais (a) e detalhes posteriores (b) [ADAFRUIT INDUSTRIES, 2022].

Nessa mesma esteira, a Figura 3.6 mostra o esquema eletrônico do referido receptor, especificando as linhas de ligações dos pinos do *chipset* MTK3339 na *Breakout Bord* e apresentando ainda os demais componentes que integram o circuito da placa.

Conforme pode ser observado na Figura 3.5 (a), o receptor possui nove pinos, podendo ser agrupados da seguintes forma [ADA, 2022]:

- **Pinos de energia:** são pinos envolvidos na alimentação do GPS. Os indispensáveis são o pino **VIN** (que é onde entra a alimentação do GPS, podendo ser de 3-5VDC) e o pino **GND** (terra da alimentação). Há também pinos opcionais de alimentação, neste caso o pino **VBAT** (conectado à bateria de reserva do relógio de tempo real do GPS), o pino **EN** (que possui conexão com um resistor de 10 k ohm e pode ser conectado a um interruptor externo para desligar o receptor) e o pino **3.3V** (que é a saída do regulador de tensão integrado de 3,3 V, útil quando deseja-se obter uma saída limpa de 3,3 V).
- **Pinos de dados seriais:** são pinos envolvidos na troca de dados do receptor. O pino **TX** transmite os dados do módulo GPS para o microcontrolador ou computador a qual o módulo está conectado (é de nível lógico 3,3 V, e os dados por padrão são transmitidos na taxa de 9600 *bauds*). O pino **RX** é utilizado para enviar dados para o GPS.

- **Pinos de status:** o pino **FIX** é um pino de saída, que funciona como uma extensão do LED (*Light Emitting Diode* – Diodo Emissor de Luz) **FIX** vermelho presente no receptor; dessa forma é possível realizar a conexão de um LED externo. Quando o receptor está em processo de rastreamento de satélites, o pino **FIX** irá pulsar para cima e para baixo uma vez por segundo, por outro lado, assim que o receptor consegue visualizar os satélites, o pino **FIX** passará a pulsar alto uma vez a cada 15 segundos, para fins de correção do posicionamento. O pino **PPS** é uma saída de "pulso por segundo", que pulsa alto (3,3 V) uma vez por segundo.

O receptor *GPS Breakout Adafruit Ultimate v3* possui as seguintes características técnicas [ADA, 2022]:

- Consegue rastrear até 22 satélites em 66 canais;
- Taxa de atualização: 1 a 10 Hz;
- Precisão da posição: <3 metros;
- Precisão de velocidade: 0,1 metros/s;
- Inicialização quente/frio: 34 segundos;
- Sensibilidade de aquisição: -145 dBm;
- Sensibilidade de rastreamento: -165 dBm;
- Velocidade Máxima: 515m/s;
- Faixa de Vin: 3,0-5,5VDC;
- Corrente operacional do *chipset* MTK3339: consumo de 25 mA durante o rastreamento; consumo de 20 mA durante a navegação;
- Saída: NMEA (*National Marine Electronics Association* – Associação Nacional de Eletrônica Marítima) 0183, padrão de 9600 *bauds*; saída de nível lógico de 3 V;
- Suporta DGPS (*Global Positioning System Differential* – Sistema de Posicionamento Global Diferencial) / WAAS (*Wide Area Augmentation System* – Sistema de Aumento de Área Ampla) / EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service* – Sistema Europeu Complementar Geoestacionário);
- Conformidade FCC (*Federal Communications Commission* – Comissão Federal de Comunicações) E911 e suporte AGPS (*Global Positioning System Assisted* – Sistema de Posicionamento Global Auxiliado) no modo *offline*: EPO (*Extended Prediction Orbit* – Órbita de Previsão Estendida) válido até 14 dias;
- Até 210 canais PRN;
- Detecção e redução de *Jammer*; e

- Detecção e compensação de múltiplos caminhos.

Observa-se algumas características do receptor que evidenciam sua qualidade e praticidade. Dentre elas, destaca-se a capacidade de conseguir rastrear até 22 satélites em 66 canais, além de atingir alta sensibilidade de rastreamento (-165 dB) e conseguir fazer até 10 atualizações de localização por segundo, com um consumo de energia consideravelmente baixo: apenas 20 mA durante a navegação. O receptor GPS *Breakout Adafruit Ultimate v3* está sendo vendido por menos de US\$ 30,00 no site da fabricante [ADAFRUIT INDUSTRIES, 2022].

A *Breakout Board* ainda vem equipada com um suporte para bateria de tamanho CR1220, que mantém o RTC (*Real Time Clock* – Relógio de Tempo Real) do receptor funcionando mesmo quando houver falta de energia na alimentação principal do pino VIN. O referido RTC embutido no receptor, ajuda a manter o controle preciso do tempo, e o fato de possuir a bateria como fonte alternativa de energia, diminui o tempo de inicialização do receptor. Se o receptor GPS perde energia, as taxas de transmissão e configuração serão revertidas para o padrão de fábrica; uma bateria reserva ajuda a prevenir a perda desses padrões (ADA, 2022).

Outro recurso relevante no receptor, é a capacidade de suportar a instalação de uma antena externa, tal qual a da Figura 3.7. Originalmente, o receptor possui um antena *patch* de cerâmica integrada à *Breakout Board*, que oferece sensibilidade de -165 dB. Entretanto, havendo necessidade de obter uma melhor recepção do sinal, é possível encaixar qualquer antena GPS ativa externa de 3V por meio do conector uFL presente no módulo, que detectará automaticamente a antena ativa e passará a utilizá-la.



Figura 3.7 – Antena GPS externa 3-5V, 28dB, conectada ao receptor [ADAFRUIT INDUSTRIES, 2022].

3.4.2 O Raspberry Pi 4 Computer.

O *Raspberry Pi* é um computador de placa única com medidas similares a de um cartão de crédito e é comercializado por preços acessíveis, sendo considerado um computador de baixo custo. Essa plataforma de computadores foi idealizada pela Fundação *Raspberry Pi*, que é um tipo de instituição sem fins lucrativos cujo objetivo principal é estimular a aproximação, sobretudo do público jovem, ao ambiente das tecnologias digitais e da programação [GUSE, 2020; RASPBERRY PI FOUNDATION, c2012-2022].

Desde 2012, ano de lançamento do primeiro *Raspberry Pi*, foram introduzidos diversos modelos e versões da placa, inserindo funcionalidades e *upgrades* envolvendo processamento, memória e conectividade. Um dos modelos mais atuais, lançado em 2019, é o *Raspberry Pi 4 Model B*. Com versões a partir de US\$ 35,00 no site da fabricante, o *Raspberry Pi 4* é considerado um salto de evolução em relação às gerações anteriores; essa minúscula placa possui todos os recursos de um computador, como por exemplo: portas USB (*Universal Serial Bus* – Porta Serial Universal), saídas de áudio e vídeo, conexão *ethernet* e demais elementos integrantes mostrados na Figura 3.8 [GUSE, 2020].

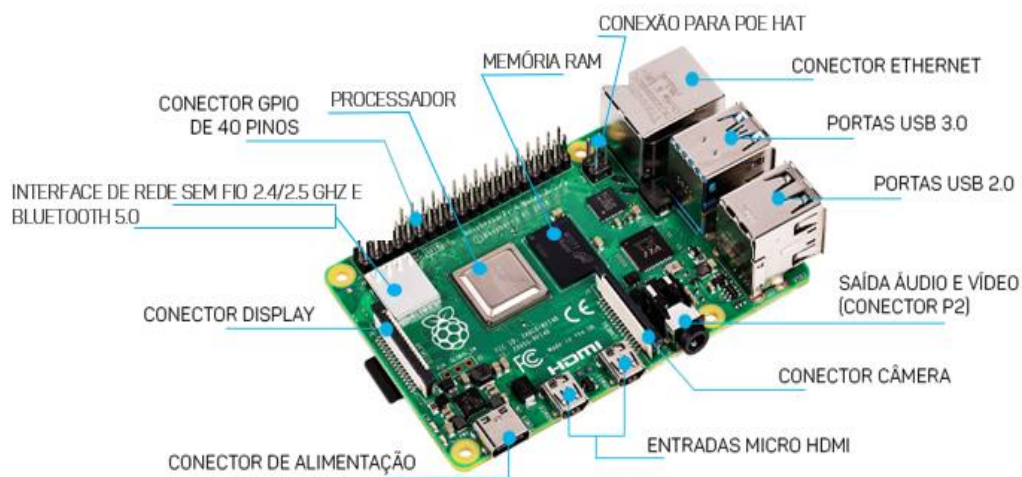


Figura 3.8 – *Raspberry Pi 4*: características gerais da placa [Adaptado de GUSE, 2020].

A velocidade e desempenho do *Raspberry Pi 4* são as características mais expressivas nessa nova versão. Além disso, funciona silenciosamente e usa menos energia que outros computadores, possuindo inclusive conexão para rede *Gigabit Ethernet*, juntamente com rede sem fio integrada e *Bluetooth*. A versão 4 do *Raspberry* oferece ainda quatro opções de memória

RAM (*Random Access Memory* – Memória de Acesso Aleatório). Para o protótipo que será apresentado no subtópico 3.4.2, optou-se por adquirir o modelo de 2 GB de RAM, com as seguintes especificações técnicas [RASPBERRY PI FOUNDATION, c2012-2022]:

- Processador: Broadcom BCM2711, quad-core Cortex-A72 (ARM v8) de 64 bits, 1.5GHz;
- Memória: LPDDR4 de 2 GB de RAM;
- Conectividade: Porta *Gigabit Ethernet*; IEEE 802.11b/g/n/ac de 2.4 GHz e 5.0 GHz, *Bluetooth* 5.0; 2 × portas USB 3.0; 2 × portas USB 2.0;
- GPIO (*General Purpose Input/Output* – Entrada/Saída de Uso Geral): Conector GPIO padrão de 40 pinos;
- Vídeo e som: 2 portas micro HDMI (*High-Definition Multimedia Interface* – Interface Multimídia de Alta-Definição) com suporte à monitores de 4K; porta de exibição MIPI DSI de 2 vias; porta de câmera MIPI CSI de 2 vias; porta de áudio estéreo de 4 polos;
- Suporte a cartão SD (*Secure Digital* – Digital Seguro): *Slot* para cartão micro SD para carregar o sistema operacional e armazenamento de dados;
- Potência de entrada: 5V/3A DC via conector USB-C; 5V/3A DC via conector GPIO; PoE (*Power over Ethernet* – Alimentação pela Ethernet) habilitado (requer HAT PoE separado);
- Ambiente: Temperatura de funcionamento 0–50°C;
- Conformidade: Homologado pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL);
- Vida útil da produção: O *Raspberry Pi 4 Model B* permanecerá em produção até pelo menos janeiro de 2026.

Assim como qualquer outro computador, o *Raspberry Pi* também precisa de um Sistema Operacional (SO) que permita a interação com seu *hardware*. Nesse sentido, o *Raspberry Pi OS* (anteriormente conhecido por *Raspbian*) é o SO oficial compatível com a placa. Esse SO é gratuito, baseado na distribuição Linux Debian, e está em constante desenvolvimento pela comunidade de *software* livre, com ênfase em melhorar a estabilidade e o desempenho do sistema. Ademais, por ser uma distribuição Linux, existem diversos canais de suporte e uma extensa produção de tutoriais, guias, e conteúdos a respeito do *Raspberry Pi OS* [RASPBERRY PI FOUNDATION, c2012-2022].

Instalar o SO no *Raspberry Pi* é uma tarefa simples e prática quando se utiliza o *Raspberry Pi Imager*, que é um assistente de instalação que contém várias versões do SO, e possui uma interface sugestiva. O primeiro passo é fazer o *download* desse assistente de instalação no site da Fundação *Raspberry Pi* e instalá-lo em algum computador. Em seguida, deve-se inserir o cartão micro SD nesse computador, por meio de algum leitor de cartão adequado (se preciso). É nesse cartão SD que será instalado o SO do *Raspberry Pi*; recomenda-se que o cartão tenha pelo menos 8 GB de armazenamento e que seja formatado no sistema de arquivo FAT (*File Allocation Table* – Tabela de Alocação de Arquivos) ou FAT32 [GUSE, 2020].

Ao executar o assistente de instalação *Raspberry Pi Imager* irá aparecer a tela mostrada na Figura 3.9. Após escolher as opções adequadas, indicadas na Figura 3.9, basta clicar no campo “WRITE” que a instalação será realizada e o assistente indicará quando finalizar.

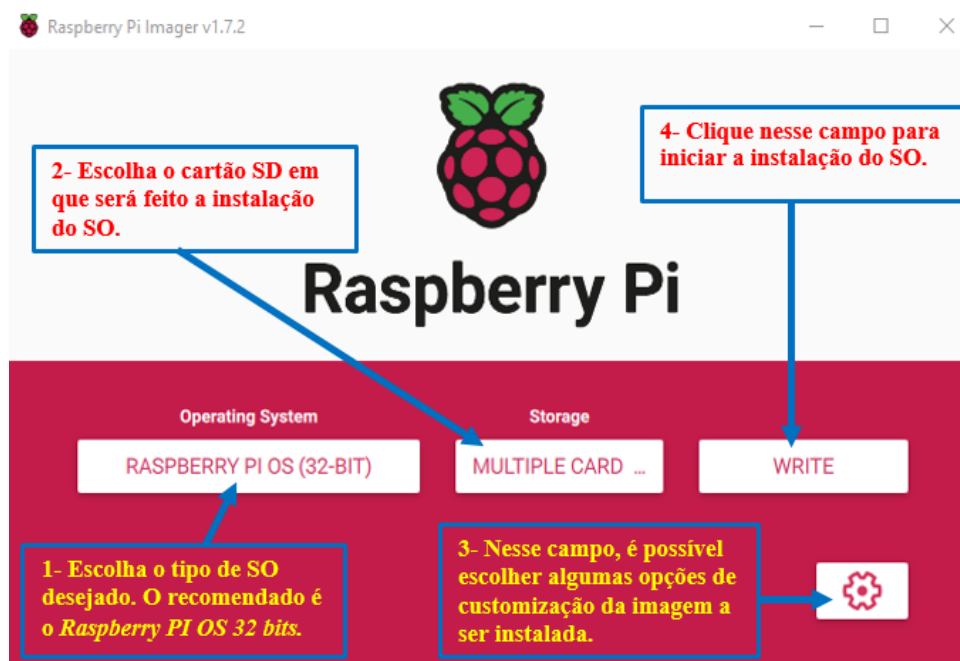


Figura 3.9 – Assistente de instalação *Raspberry Pi Imager*, com a função de cada campo [Elaboração Própria].

Depois de instalado o SO, é possível visualizar os arquivos que foram gravados no cartão SD. Um dos arquivos mais importantes é o *config.txt*, em destaque na Figura 3.10. Esse arquivo faz o papel da tradicional BIOS (*Basic Input/Output System* – Sistema Integrado de Entrada e Saída), por isso, contém todos os parâmetros de configuração do SO, e por meio da edição de alguns desses parâmetros, é possível resolver problemas de compatibilidade de

periféricos, que às vezes impedem a correta inicialização do SO no *Raspberry Pi* [RASPBERRY PI FOUNDATION, c2012-2022].

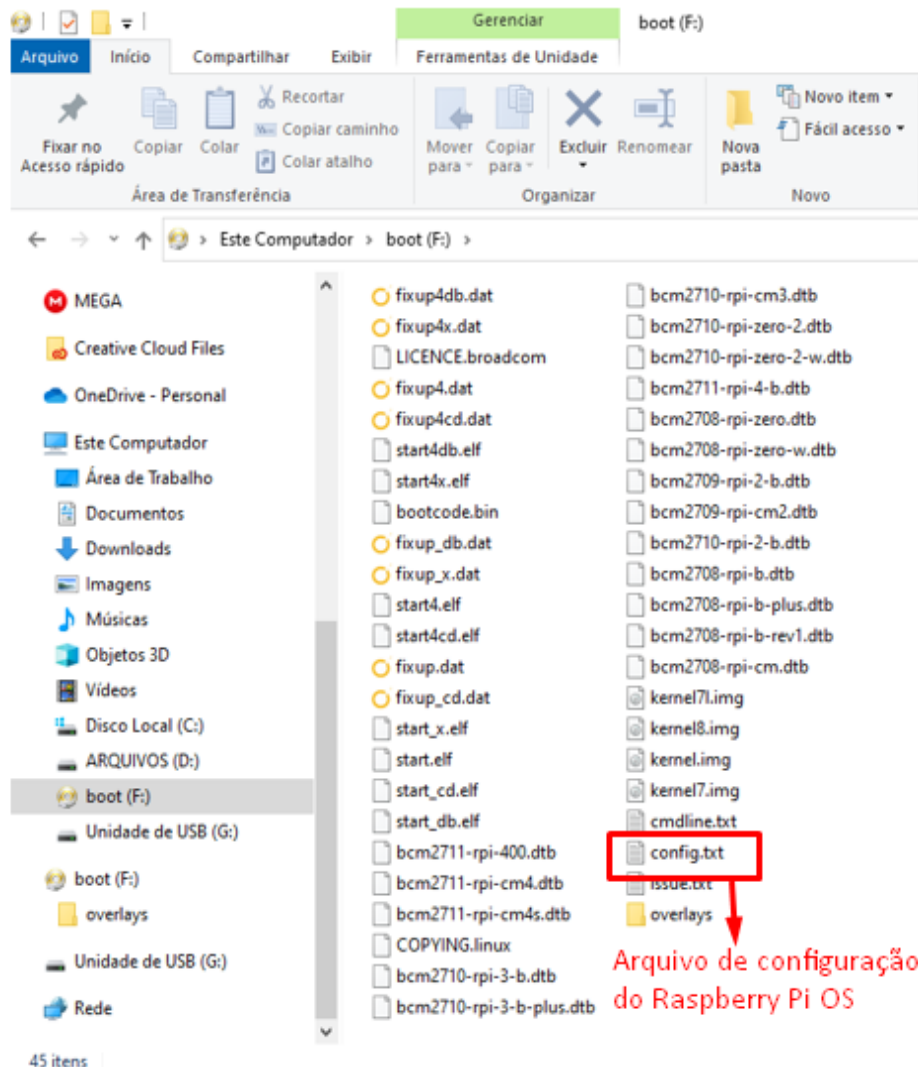


Figura 3.10 – Arquivos gravados no cartão SD após a instalação do SO; em destaque, o arquivo config.txt [Elaboração Própria].

Ao transferir o cartão SD para o *slot* da placa *Raspberry Pi*, é possível inicializar e acessar o SO. Essa etapa será melhor abordada no tópico 3.4.3.

3.4.3 A montagem do protótipo.

Para a instalação do protótipo de monitoramento de sinais de satélites GPS, primeiramente é necessário realizar a montagem dos elementos do *Raspberry Pi 4 Model B*, mostrados na Figura 3.11. É salutar que a placa do *Raspberry* (Figura 3.11-d) seja inserida em

uma *case* (Figura 3.11-e) para melhor acomodação e proteção contra impactos ou eletricidade estática. Para auxiliar na refrigeração do *Raspberry* é importante também fixar dissipadores de calor (Figura 3.11-c) nos *chips* do processador e memória RAM e além disso, fixar o *cooler* na case por meio dos parafusos de fixação (Figura 3.11-f). O cartão de memória (Figura 3.11-b) com o SO gravado deve ser inserido no *slot* da placa e após isso, a mesma já pode ser alimentada, neste caso, por meio de uma fonte de alimentação adequada, que possua saída de 5V/3A DC via conector USB tipo C (Figura 3.11-a).

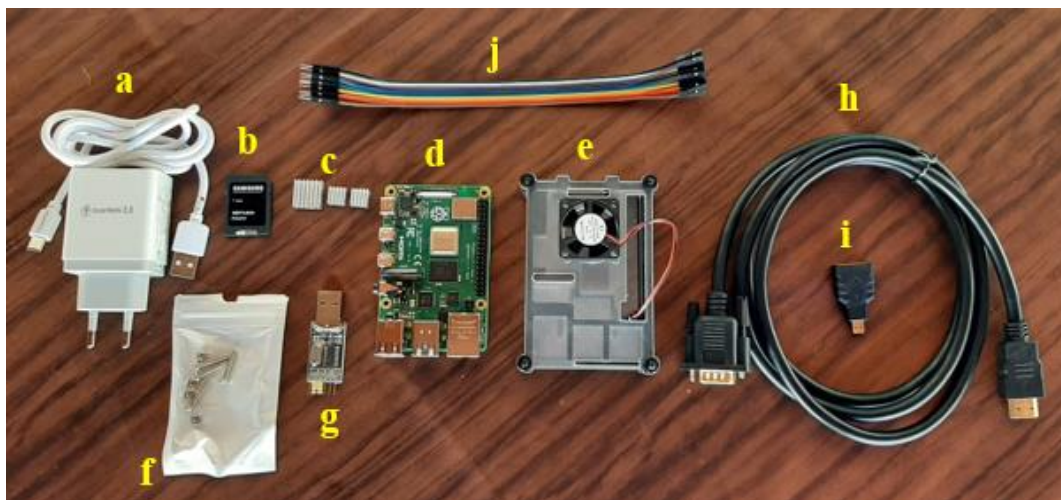


Figura 3.11 – Elementos utilizados para montagem do *Raspberry Pi 4 Model B* [Elaboração Própria].

Ao energizar o *Raspberry*, para visualizar a imagem do SO em um monitor, deve-se utilizar um cabo vídeo compatível com a saída micro HDMI da placa do *Raspberry* ou mesmo fazer uso de um adaptador HDMI para micro HDMI.

A Figura 3.11-h mostra o cabo de vídeo utilizado, sendo uma extremidade com conector VGA (*Video Graphics Array* – Matriz Gráfica para Vídeo) para ligar em algum monitor e outra extremidade com conector HDMI que será conectado ao adaptador HDMI fêmea/micro HDMI macho (Figura 3.11-i), que por sua vez será conectado a saída micro HDMI fêmea da placa. A tela inicial do *Raspberry Pi OS* é mostrada na Figura 3.12, com a indicação de dois principais ícones do SO.



Figura 3.12 – Tela inicial do *Raspberry Pi OS* [Elaboração Própria].

Após finalizar a montagem do *Raspberry*, pode-se dar continuidade à instalação do protótipo de monitoramento de sinais de satélites. A Figura 3.13 mostra o esquema montagem do protótipo, onde a ligação do receptor GPS com a placa *Raspberry* se dá por intermédio do cabo GPIO e do módulo conversor USB para serial (mostrados anteriormente, respectivamente nas Figuras 3.11-j e 3.11-g).

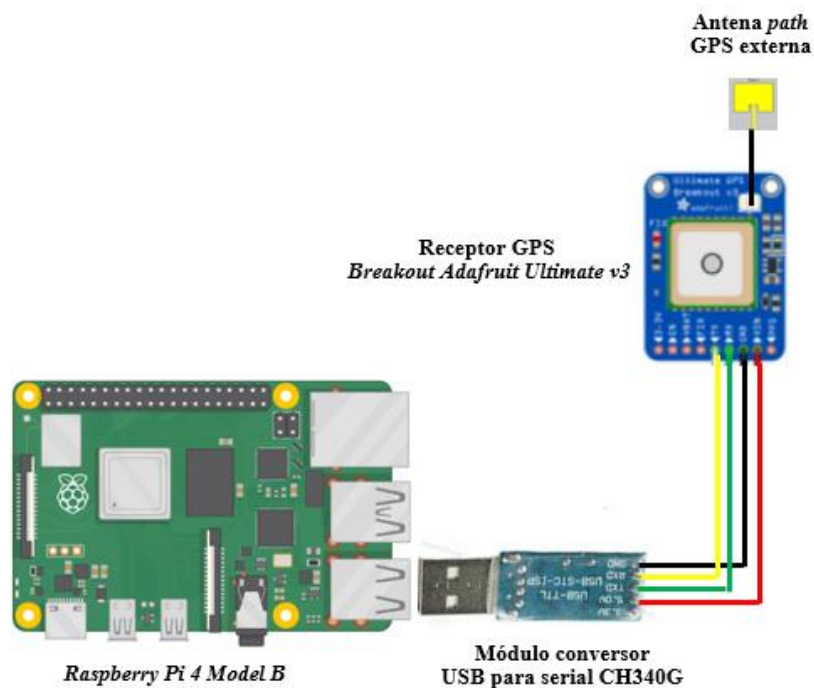


Figura 3.13 – Esquema do protótipo de monitor de sinais de satélites [Elaboração Própria].

O módulo conversor USB para Serial, de chipset CH340G, é conectado a uma porta USB do Raspberry, sendo as conexões com o receptor GPS feitas por meio do cabo GPIO, obedecendo a seguinte ordem:

- Pino VIN do receptor GPS para pino 5V do módulo
- Pino GND do receptor GPS para pino GND do módulo
- Pino RX do receptor GPS para pino TXD do módulo
- Pino TX do receptor GPS para pino RXD do módulo

O referido módulo USB Serial possui também LEDs de status para os pinos TXD, RXD e um terceiro LED para indicar que está ligado. O LED TXD acende e apaga conforme a taxa de atualização do receptor GPS. O preço desse módulo é de cerca de US\$ 2 nos EUA.

A Figura 3.14 mostra o arranjo físico realizado no protótipo, seguindo o esquema de ligação descrito na Figura 3.13. Nesse arranjo, a antena de GPS externa mostrada na figura 3.7 ainda não está conectada, apenas o cabo adaptador dessa antena (cabo Pigtail uFL para SMA), visto que a conexão dela não é feita diretamente no receptor GPS.

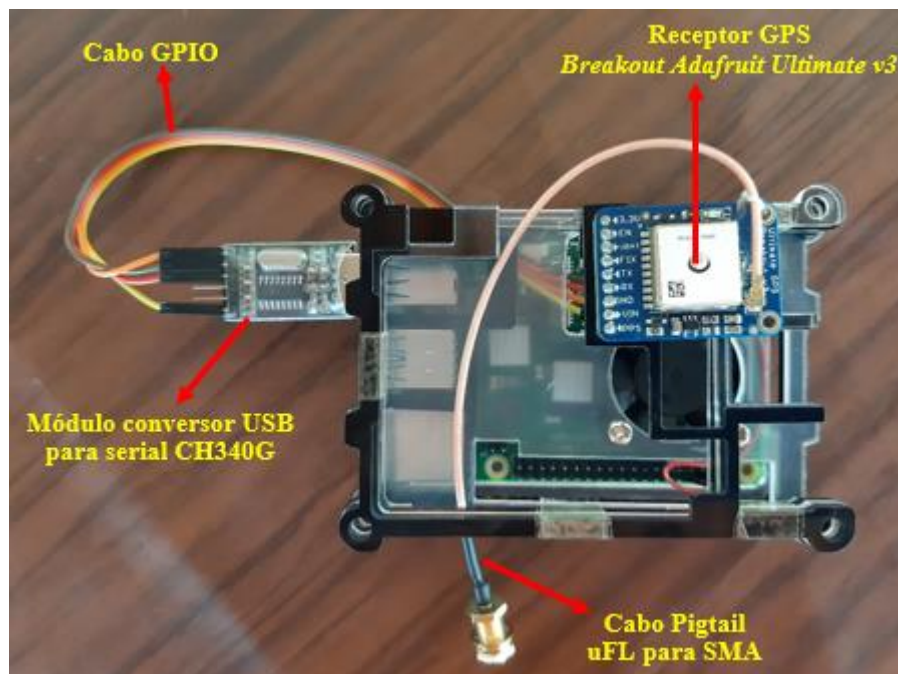


Figura 3.14 – Arranjo físico da montagem do protótipo de monitor de sinais de satélites [Elaboração Própria].

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.

Neste capítulo foi apresentada uma visão geral a respeito do monitoramento da ionosfera, citando as estações de monitoramento no Brasil, os modelos de receptores utilizados pelas estações e frisando ainda a importância do desenvolvimento de protótipos de baixo custo para receber sinais de GPS na banda L_1 , para dessa forma auxiliar o estudo do clima espacial.

Também foram detalhados os elementos integrantes do modelo de monitor de baixo custo proposto, descrevendo o passo a passo da montagem desses elementos bem como detalhando suas características técnicas.

No próximo capítulo, será apresentado alguns detalhes de funcionamento do protótipo proposto e os resultados obtidos com a operação do mesmo.

CAPÍTULO 4

OPERAÇÕES COM O PROTÓTIPO

4.1 INTRODUÇÃO.

Como visto no Capítulo 3, o protótipo de monitoramento de sinais GPS proposto, basicamente é constituído pelo receptor GPS conectado ao *Raspberry Pi 4*, e este serve para realizar a interação com o receptor, funcionando como uma espécie de microcontrolador. Por meio do *Raspberry Pi* é possível visualizar e armazenar os dados recebidos pelo receptor GPS. Para isso é necessário utilizar alguns comandos Linux, já que o *Raspberry Pi OS* é uma distribuição Linux, ou seja, um *software* gratuito de código aberto.

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos com a operação do protótipo proposto, instruindo como proceder para ter acesso aos dados recebidos pelo receptor, e mostrando os passos para visualizar e coletar esses dados. Ainda será feita uma breve abordagem de como interpretar o significado dos dados, já que inicialmente eles são disponibilizados em formato bruto (sequências de caracteres sem identificação) com valores que representam os dados dos satélites GPS, tais como posicionamento, SNR, azimuth, elevação etc.

O interesse principal então, é nortear quanto à operação do protótipo, colocando-o de fato para funcionar, sem no entanto, avançar no sentido de analisar e manipular os dados recebidos, apesar desses servirem como subsídio para realizar outros estudos, como por exemplo, obtenção de índice de cintilação ionosférica propriamente dito.

4.2 OPERANDO O RASPBERRY PI COM O GPS BREAKOUT ADAFRUIT ULTIMATE.

Ao realizar a montagem dos elementos do protótipo conforme esquema mostrado na Figura 3.13 do capítulo 3, e seguindo as instruções apresentadas no subtópico 3.4.3, pode-se conectar alguns periféricos de entrada e saída na placa *Raspberry Pi*, como por exemplo, teclado, *mouse* e monitor de vídeo. A Figura 4.1 mostra essa configuração, com o protótipo já ligado e pronto para funcionar.



Figura 4.1 – Receptor instalado e pronto para operação [Elaboração Própria].

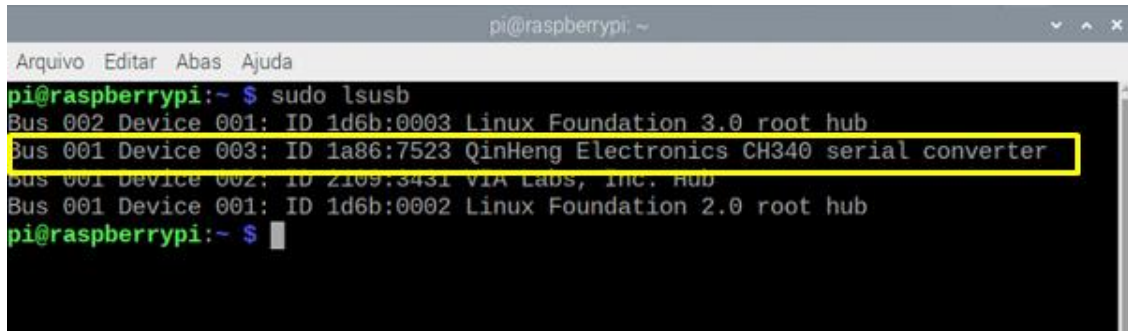
O *Raspberry Pi* pode conectar-se à *internet*, tanto por conexão via *ethernet*, quanto via rede sem fio, e por esse motivo, é possível acessá-lo remotamente de outro computador. Dessa forma, não há a necessidade do teclado, *mouse* e monitor permanecerem conectados no *Raspberry Pi*, com a vantagem e praticidade de ter acesso ao seu sistema mesmo sem precisar estar próximo do protótipo.

O interessante de se trabalhar com um receptor GPS *Breakout*, reside no fato de ter-se a liberdade de manipular as conexões de seus pinos, da forma que seja conveniente para executar alguma finalidade específica. Nesse aspecto, podemos obter por meio do *Raspberry Pi*, os dados que estão sendo recebidos pelo receptor GPS *Adafruit Ultimate v3*. Como os sinais que chegam no receptor são enviados para o conversor USB Serial, e este por sua vez está conectado à porta USB da placa *Raspberry Pi*, é possível por meio de alguns comandos Linux, visualizar os dados que passam pela porta USB.

A maioria das tarefas realizadas em Linux são feitas usando linhas de comando pelo terminal, também chamado de *shell*. Esse terminal é uma ferramenta que recebe os comandos digitados pelo teclado e envia para as camadas de nível baixo do SO. Para abrir o terminal, basta clicar no ícone dele, assinalado na Figura 3.12. Para fins de objetividade, a não ser que seja especificado de outra forma, admite-se que os comandos a serem mencionados nesse capítulo serão todos digitados nesse terminal.

Antes de digitar os comandos que permitem a visualização dos sinais GPS recebidos pelo receptor, é importante e recomendado verificar se o *Raspberry Pi OS* está atualizado, para evitar falhas no sistema e mantê-lo livre de vulnerabilidades. Para isso, utiliza-se o comando ***sudo apt update***, mas antes é necessário garantir a conexão do RP à *internet*, para que a busca a instalação das atualizações seja bem sucedida.

O próximo passo é ter certeza que o conversor USB para Serial CH340G realmente foi reconhecido pelo *Raspberry Pi*, utilizando-se o comando ***sudo lsusb*** para listar os dispositivos conectados às portas USB. O resultado do comando é mostrado na Figura 4.2, que indica em destaque o conversor identificado pelo SO do *Raspberry Pi*.



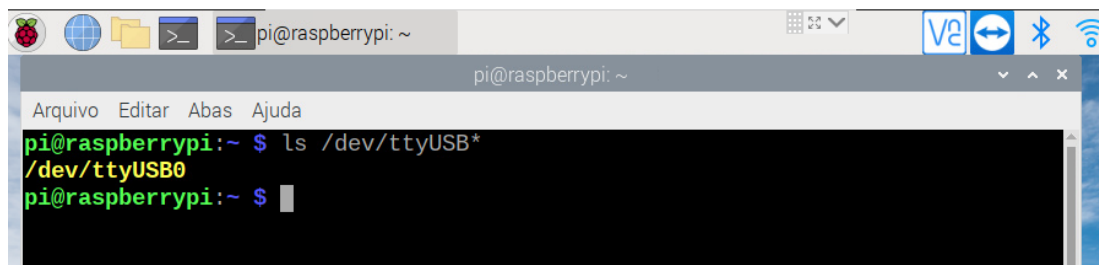
```

pi@raspberrypi: ~
Arquivo Editar Abas Ajuda
pi@raspberrypi:~ $ sudo lsusb
Bus 002 Device 001: ID 1d6b:0003 Linux Foundation 3.0 root hub
Bus 001 Device 003: ID 1a86:7523 QinHeng Electronics CH340 serial converter
Bus 001 Device 002: ID 2109:3431 VIA Labs, Inc. Hub
Bus 001 Device 001: ID 1d6b:0002 Linux Foundation 2.0 root hub
pi@raspberrypi:~ $

```

Figura 4.2 – Status de uso das USB do *Raspberry Py* [Elaboração Própria].

Logo após é necessário ainda utilizar o comando ***ls /dev/ttyUSB****, para verificar qual a porta USB está sendo utilizada no *Raspberry Pi* pelo módulo conversor CH340G. Ao digitar esse comando, aparecerá a informação mostrada na Figura 4.3, indicando que o módulo está usando a porta USB zero.



```

pi@raspberrypi: ~
Arquivo Editar Abas Ajuda
pi@raspberrypi:~ $ ls /dev/ttyUSB*
/dev/ttyUSB0
pi@raspberrypi:~ $

```

Figura 4.3 – Identificação da porta USB utilizada pelo conversor CH340G [Elaboração Própria].

Sabendo-se qual porta USB está sendo utilizada pelo conversor CH340G, pode-se utilizar o comando ***sudo cat /dev/ttyUSB0***, para visualizar no terminal os dados brutos que estão sendo recebidos pelo receptor GPS *Breakout Adafruit Ultimate v3*. A Figura 4.4 apresenta os resultados obtidos com o uso desse comando. Esses dados estão disponibilizados na forma de sentenças no formato NMEA, que é um padrão de comunicação dos receptores GPS.

```

pi@raspberrypi:~$ sudo lsusb
Bus 002 Device 001: ID 1d6b:0003 Linux Foundation 3.0 root hub
Bus 001 Device 003: ID 1a86:7523 QinHeng Electronics CH340 serial converter
Bus 001 Device 002: ID 2109:3431 VIA Labs, Inc. Hub
Bus 001 Device 001: ID 1d6b:0002 Linux Foundation 2.0 root hub
pi@raspberrypi:~$ sudo cat /dev/ttyUSB0
x00x000000ff0000`0`ff`f`$GPGGA,150110.000,1638.8125,S,04$GPGGA,150432.000,1638.8140,S,04911
.5848,W,2,12,0.74,759.1,M,-8.4,M,0000,0000*77

$GPGSA,A,3,31,23,02,25,12,05,18,29,20,24,11,15,1.24,0.74,0.99*04

$GPRMC,150432.000,A,1638.8140,S,04911.5848,W,0.01,118.63,131122,,D*66

$GPVTG,118.63,T,,M,0.01,N,0.03,K,D*37

$GPGSA,A,3,31,23,02,25,12,05,18,29,20,24,11,15,1.24,0.74,0.99*04
11.5848,W,2,12,0.74,759.1,M,-8.4,M,0000,0000*77
$GPRMC,150432.000,A,1638.8140,S,04911.5848,W,0.01,118.63,131122,,D*66
8,W,2,12,0.74,759.1,M,-8.4,M,0000,0000*77
$GPVTG,118.63,T,,M,0.01,N,0.03,K,D*37
5848,W,0.01,118.63,131122,,D*66
8,W,2,12,0.74,759.1,M,-8.4,M,0000,0000*77
$GPGSA,A,3,31,23,02,25,12,05,18,29,20,24,11,15,1.24,0.74,0.99*04
,D*66
8,W,2,12,0.74,759.1,M,-8.4,M,0000,0000*77
$GPRMC,150432.000,A,1638.8140,S,04911.5848,W,0.01,118.63,131122,,D*66
8,W,2,12,0.74,759.1,M,-8.4,M,0000,0000*77
$GPGGA,150433.000,1638.8140,S,04911.5848,W,2,12,0.74,759.1,M,-8.4,M,0000,0000*76

$GPGSA,A,3,31,23,02,25,12,05,18,29,20,24,11,15,1.24,0.74,0.99*04

```

Figura 4.4 – Sentenças NMEA recebidas pelo receptor GPS [Elaboração Própria].

Até esse ponto, constata-se que o receptor está operando normalmente, visto que foi possível realizar o recebimento e visualização dos dados que estão chegando até ele. Essas sequências de dados que aparecem na Figura 4.4, já começam a ser “descarregadas” automaticamente a partir do momento em que o protótipo é ligado à energia e o receptor consegue rastrear os satélites e realizar as correções de posicionamento (sem a necessidade de ativar qualquer comando no receptor). Se o LED FIX vermelho do receptor está piscando a cada 15 segundos, é sinal de que os dados já estão sendo recebidos pelo receptor e portanto já é possível visualizá-los por meio do comando referido no parágrafo anterior. Ressalta-se que para abortar o comando, e os dados pararem de serem impressos no terminal, deve digitar *ctrl+c*.

Como mencionado, os sinais medidos pelo receptor GPS são mostrados em sentenças no formato NMEA, por isso é necessário conhecer um pouco a respeito desse protocolo para conseguir decifrar o significado dos dados que aparecem na Figura 4.4, mas basicamente, contêm as informações para cada satélite rastreado, como por exemplo: hora universal, identificador de satélite, ângulo de azimuth do satélite, elevação do satélite, parâmetro SNR, latitude, longitude e coordenadas de altitude calculadas pelo receptor.

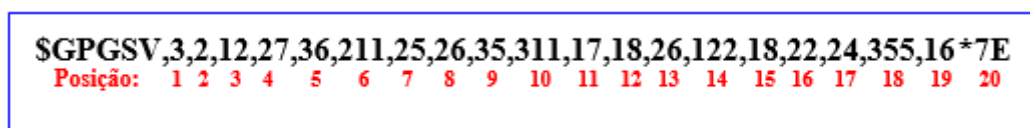
4.3 O PADRÃO NMEA E A INTERPRETAÇÃO DOS DADOS RECEBIDOS.

Quando o receptor GPS recebe os sinais, o mesmo executa cálculos que determinam sua posição, velocidade e tempo e os disponibiliza nesse no formato NMEA, além de disponibilizar também outras informações de navegação dos satélites. O NMEA é um padrão de comunicação entre dispositivos eletrônicos de navegação.

O protocolo NMEA possui algumas regras. As sentenças sempre iniciam-se com o símbolo cifrão (\$), e para os receptores GPS, o '\$' é sempre seguido da sigla 'GP'. Logo após, há uma sequência de três letras que definem conteúdo da sentença, que deve ser apresentada em uma única linha, sendo que cada um dos demais elementos (dados) da sentença são separados por vírgulas. Cada linha não pode ultrapassar 80 caracteres e um asterisco (*) é utilizado no final da sentença para indicar o fim da mesma; esse '*' é seguido de dois dígitos hexadecimais, resultante do *checksum* realizado de todos os caracteres compreendidos entre o '\$' e o '*' [FREITAS, 2019].

Os sinais recebidos pelo receptor GPS *Breakout Adafruit Ultimate v3* possuem os seguintes conteúdos: **GSV, RMC, VTG, GGA e GSA**.

O GSV informa o número de satélites GPS à vista (SV), que seriam os satélites rastreados pelo receptor. Informa também o número de identificação do satélite, a elevação, azimute e valores de SNR. Um exemplo de mensagem do tipo GSV coletada pelo receptor é mostrado na Figura 4.5, com a demarcação da posição sequencial em que cada valor se encontra (para fins de facilitar a identificação dos mesmos):



\$GPGSV,3,2,12,27,36,211,25,26,35,311,17,18,26,122,18,22,24,355,16*7E
 Posição: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20

Figura 4.5 – Exemplo de mensagem do tipo GSV [Elaboração Própria].

Onde, cada posição separada por vírgula possui os seguintes significados [BADDELEY, 2001; SIRF TECHNOLOGY, 2005]:

- 1 = Número total de mensagens deste tipo neste ciclo
- 2 = número da mensagem
- 3 = Número total de SVs em exibição

- 4 = número SV PRN
- 5 = Elevação em graus (90 no máximo)
- 6 = Azimute, graus do norte verdadeiro, 000 a 359
- 7 = SNR, 00-99 dB (nulo quando não estiver rastreando)
- 8-11 = Informação sobre o segundo SV, igual ao campo 4-7
- 12-15 = Informação sobre o terceiro SV, igual ao campo 4-7
- 16-19 = Informação sobre o quarto SV, igual ao campo 4-7
- 20 = *Checksum*

A mensagem de conteúdo RMC informa dados de hora, data, posição, direção e velocidade. Um exemplo de mensagem do tipo GSV coletada pelo receptor é mostrado na Figura 4.6, com a demarcação da posição sequencial em que cada valor se encontra:

\$GPRMC,215737.000,A,1638.8041,S,04911.5866,W,0.44,249.11,121022, ,A*68
 Posição: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12

Figura 4.6 – Exemplo de mensagem do tipo RMC [Elaboração Própria].

Onde, cada posição separada por vírgula possui os seguintes significados [BADDELEY, 2001; SIRF TECHNOLOGY, 2005]:

- 1 = Horário UTC (*Coordinated Universal Time* – Tempo Universal Coordenado) da correção de posição, dado no formato hhmmss.sss
- 2 = Status dos dados (A = dados válidos ou V = dados inválidos)
- 3 = Latitude fixa (formato decimal minuto: ddm.dddmm)
- 4 = N (*North* – Norte) ou S (*South* – Sul)
- 5 = Longitude fixa (formato decimal minuto: dddmm.mmmmm)
- 6 = E (*East* – Leste) ou W (*West* – Oeste)
- 7 = Velocidade sobre o solo (dada em knots)
- 8 = Direção sobre a terra (dada em graus)
- 9 = Data, no formato ddmmaa
- 10 = Graus de variação magnética
- 11 = Modo de operação (A = autônomo; D = DGPS)
- 12 = *Checksum*

As mensagens de tipo VTG transmitem informações de direção e velocidade no solo; as do tipo GGA, informam dados fixos do GPS, e as mensagens GSA, indicam o modo de operação do receptor GPS, satélites ativos e valores DOP (*Dilution OF Precision* – Diluições de Precisão). Não será detalhado a estrutura dessas mensagens, visto que as do tipo GSV e RMC (mencionadas anteriormente) já são suficientes para ilustrar as funcionalidades do receptor e ainda detém de informações úteis que podem subsidiar o estudo das ionosfera, como por exemplo, informações a respeito da SRN, data, horário e PRN dos satélites.

Analizando os dados Figura 4.6 e utilizando as especificações do padrão NMEA, pode-se chegar às coordenadas do local em que está instalado o protótipo, que neste caso é: **latitude de 1638.8041** (direção sul) e **longitude de 04911.5866** (direção oeste). Para conferir se essas coordenadas estão corretas, e verificar se realmente o receptor está informando dados de longitude e latitude válidos, pode-se convertê-las para o formato de coordenadas graus decimais aceito pelo *Google Maps*, que é diferente do formato utilizado pelo padrão NMEA. O resultado dessa conversão é: **-16.6467, -049.1931** (longitude e latitude do receptor).

Pesquisando por essas coordenadas no *Google Maps*, será mostrado no mapa o local de instalação do protótipo (Figura 4.7), que realmente confere com as coordenadas da residência em que ele foi instalado.

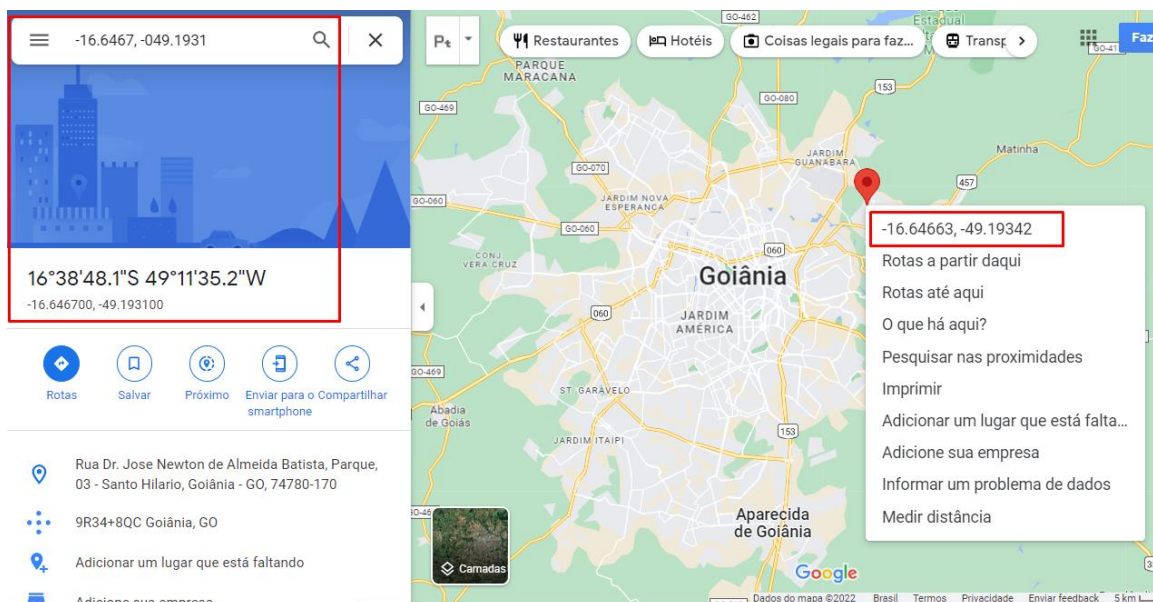


Figura 4.7 – Local de operação do receptor com as coordenadas em destaque [GOOLE MAPS, 2022].

4.4 UTILIZANDO A BIBLIOTECA PYNMEA2 E GRAVANDO OS DADOS RECEBIDOS.

No tópico anterior foi visto que para entender o significado de cada elemento presente nos dados disponibilizadas pelo receptor GPS *Adafruit Ultimate v3*, é necessário consultar o protocolo NMEA. Entretanto, como o *Raspberry Pi* possui o *Python* a sua principal linguagem de programação, é possível utilizar uma biblioteca do *Python* que realiza uma análise dos dados no padrão NMEA. Essa biblioteca é a *pynmea2*, que basicamente automatiza o processo de identificação das mensagens recebidas, de acordo com o padrão NMEA 0183.

O *Python* já faz parte dos pacotes de programas padrão no *Raspberry Pi OS*. Entretanto, a *pynmea2* não é uma biblioteca padrão do *Python* e por isso é preciso acessar o terminal do *Raspberry Pi OS* e digitar o comando ***pip install pynmea2*** para realizar a instalação. Em seguida, pode-se utilizar o *Thonny* para escrever um código que utilize a biblioteca *pynmea2*. O *Thonny* é um ambiente de desenvolvimento para programar em *Python*, ele também já vem instalado por padrão no *Raspberry Pi OS*. Ao abri-lo, primeiro é necessário criar um novo arquivo de edição onde o programa será escrito e salvo.

A Figura 4.8 mostra o arquivo de edição criado e mostra também o *script* utilizado.

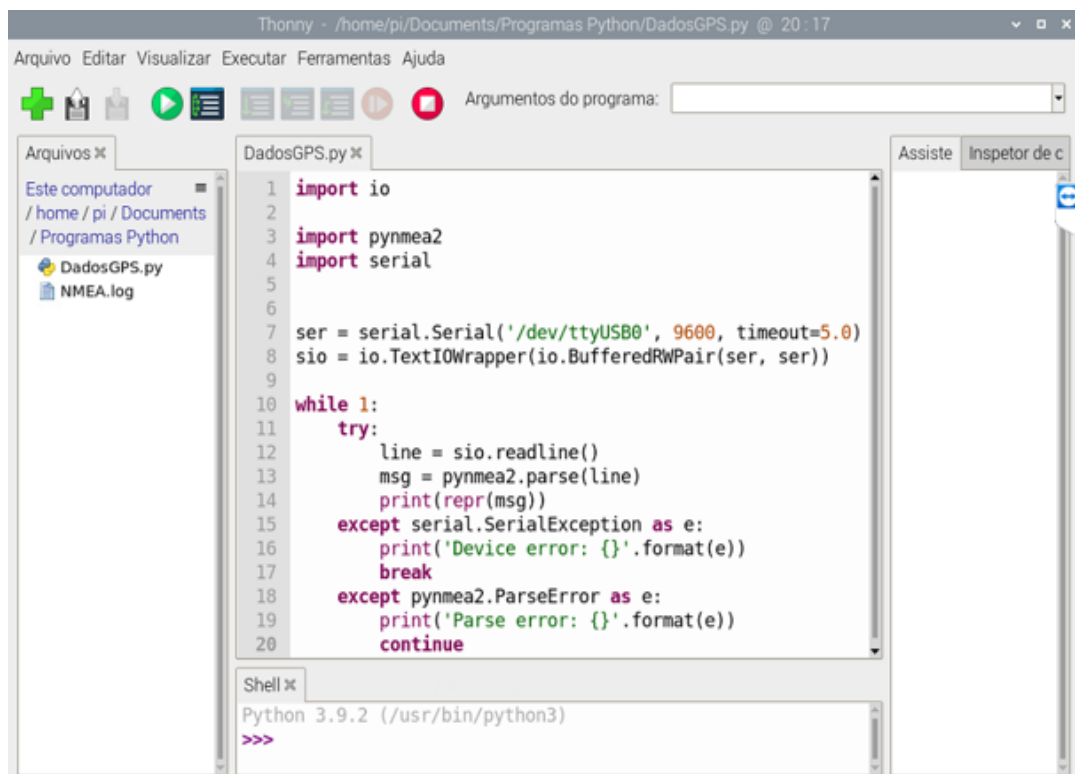
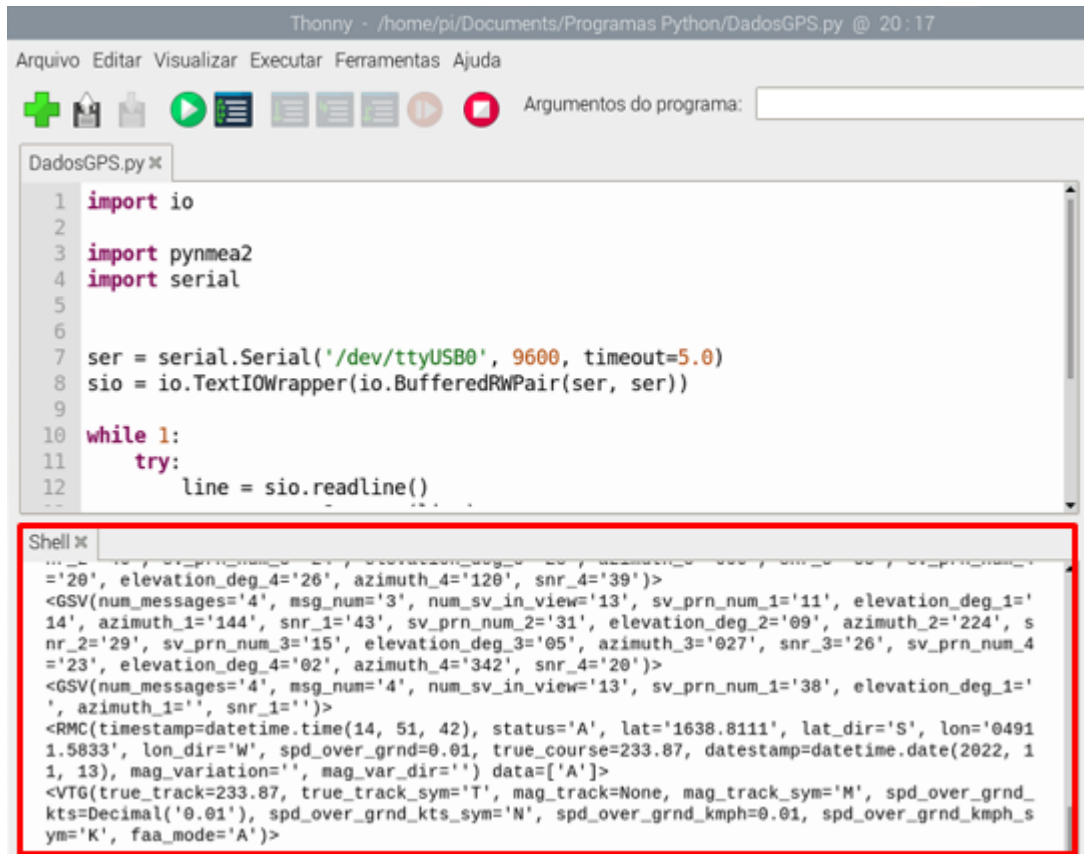


Figura 4.8 – Editor *Thonny Python IDE*, com o código do programa escrito [Elaboração Própria].

Ao executar o *script* DadosGPS mostrado na Figura 4.8, sua função é basicamente utilizar a biblioteca *pynmea2* para analisar os dados do receptor que entram na porta USB do *Raspberry Pi*. E após fazer a análise de cada linha de dados, o programa os imprime com as devidas identificações, na janela de visualização do *Thonny*, conforme mostra a figura 4.9.



The image shows a screenshot of the Thonny IDE interface. The top bar indicates the file path: `/home/pi/Documents/Programas Python/DadosGPS.py` at 20:17. The menu bar includes 'Arquivo', 'Editar', 'Visualizar', 'Executar', 'Ferramentas', and 'Ajuda'. Below the menu is a toolbar with icons for file operations and execution. The main editor window displays the `DadosGPS.py` script with the following code:

```

1 import io
2
3 import pynmea2
4 import serial
5
6
7 ser = serial.Serial('/dev/ttyUSB0', 9600, timeout=5.0)
8 sio = io.TextIOWrapper(io.BufferedRWPair(ser, ser))
9
10 while 1:
11     try:
12         line = sio.readline()

```

Below the editor is a 'Shell' window showing the output of the script. The output consists of several lines of NMEA data, including GSV (satellite status) and RMC (real-time clock) sentences, which are highlighted with a red border in the image.

```

='20', elevation_deg_4='26', azimuth_4='120', snr_4='39')>
<GSV(num_messages='4', msg_num='3', num_sv_in_view='13', sv_prn_num_1='11', elevation_deg_1='
14', azimuth_1='144', snr_1='43', sv_prn_num_2='31', elevation_deg_2='09', azimuth_2='224', s
nr_2='29', sv_prn_num_3='15', elevation_deg_3='05', azimuth_3='027', snr_3='26', sv_prn_num_4
='23', elevation_deg_4='02', azimuth_4='342', snr_4='20')>
<GSV(num_messages='4', msg_num='4', num_sv_in_view='13', sv_prn_num_1='38', elevation_deg_1='
', azimuth_1='', snr_1='')>
<RMC(timestamp=datetime.time(14, 51, 42), status='A', lat='1638.8111', lat_dir='S', lon='0491
1.5833', lon_dir='W', spd_over_grnd=0.01, true_course=233.87, datestamp=datetime.date(2022, 1
1, 13), mag_variation='', mag_var_dir='') data=['A']>
<VTG(true_track=233.87, true_track_sym='T', mag_track=None, mag_track_sym='M', spd_over_grnd_
kts=Decimal('0.01'), spd_over_grnd_kts_sym='N', spd_over_grnd_kmph=0.01, spd_over_grnd_kmph_s
ym='K', faa_mode='A')>

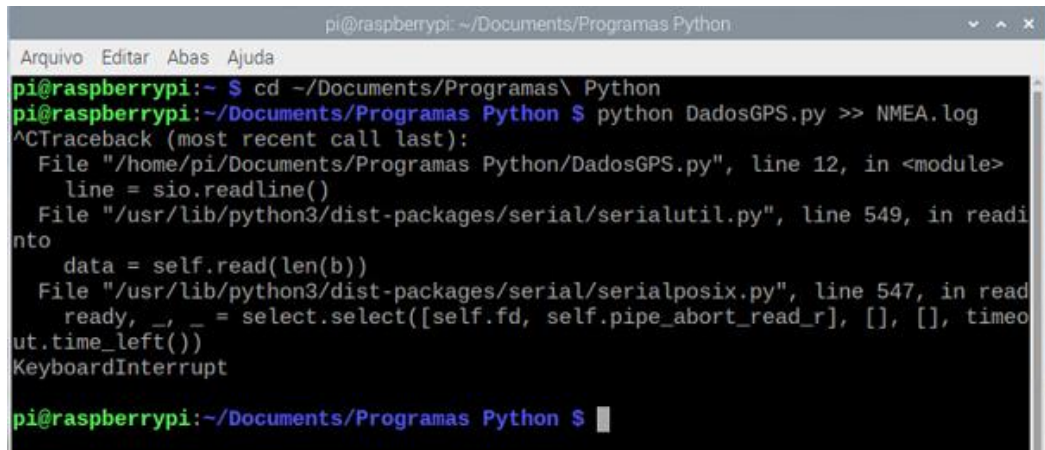
```

Figura 4.9 – Dados identificados após o uso da biblioteca *pynmea2* [Elaboração Própria].

Tanto os dados mostrados da Figura 4.9, quanto os da Figura 4.4 não ficam salvos na memória do *Raspberry Pi*, apenas são impressos no monitor, e não é possível copiá-los, pois com o passar do tempo vão se apagando à medida que dados atuais começam a aparecer.

Para salvar os dados, primeiro digita-se o comando `cd ~/Documents/Programas\Python` no terminal. Esse comando serve para localizar no diretório “Documentos”, o *script* “DadosGPS”. Após isso, usa-se o comando `python DadosGPS.py >> NMEA.log`, para executar o *script* “DadosGPS” e salvar os dados resultantes da execução, em um arquivo com o nome “NMEA.log”. Esse comando fica executando ininterruptamente a partir do momento em que é digitado. Enquanto isso, todos dados recebidos pelo receptor são simultaneamente salvos no arquivo “NMEA.log” na pasta Documentos. Para abortar o comando, digita-se `ctrl+c`.

A Figura 4.10 mostra os comandos descritos no terminal do *Raspberry Pi OS*, e a Figura 4.11 mostra o diretório “Documentos” com a pasta “Programas Python”, criada para salvar o código do script “DadosGPS” e o arquivo “NMEA.log”.



```

pi@raspberrypi: ~/Documents/Programas Python
Arquivo Editar Abas Ajuda
pi@raspberrypi:~ $ cd ~/Documents/Programas\ Python
pi@raspberrypi:~/Documents/Programas Python $ python DadosGPS.py >> NMEA.log
^CTraceback (most recent call last):
  File "/home/pi/Documents/Programas Python/DadosGPS.py", line 12, in <module>
    line = sio.readline()
  File "/usr/lib/python3/dist-packages/serial/serialutil.py", line 549, in readi
nto
    data = self.read(len(b))
  File "/usr/lib/python3/dist-packages/serial/serialposix.py", line 547, in read
    ready, _, _ = select.select([self.fd, self.pipe_abort_read_r], [], [], timeo
ut.time_left())
KeyboardInterrupt

pi@raspberrypi:~/Documents/Programas Python $

```

Figura 4.10 – Comandos para salvar os dados após rodar o script [Elaboração Própria].

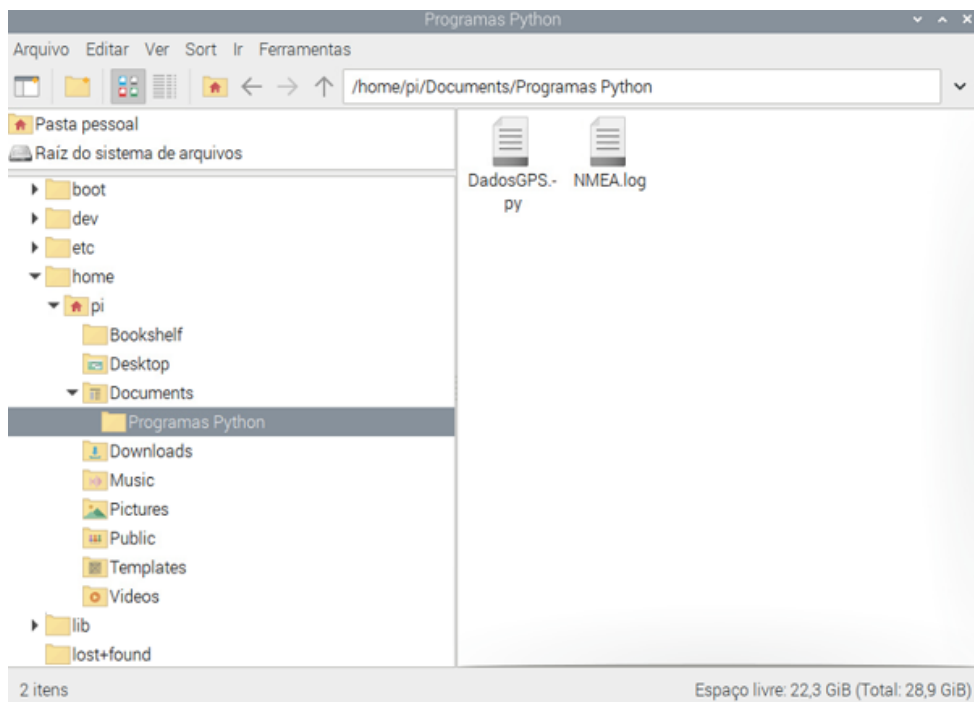
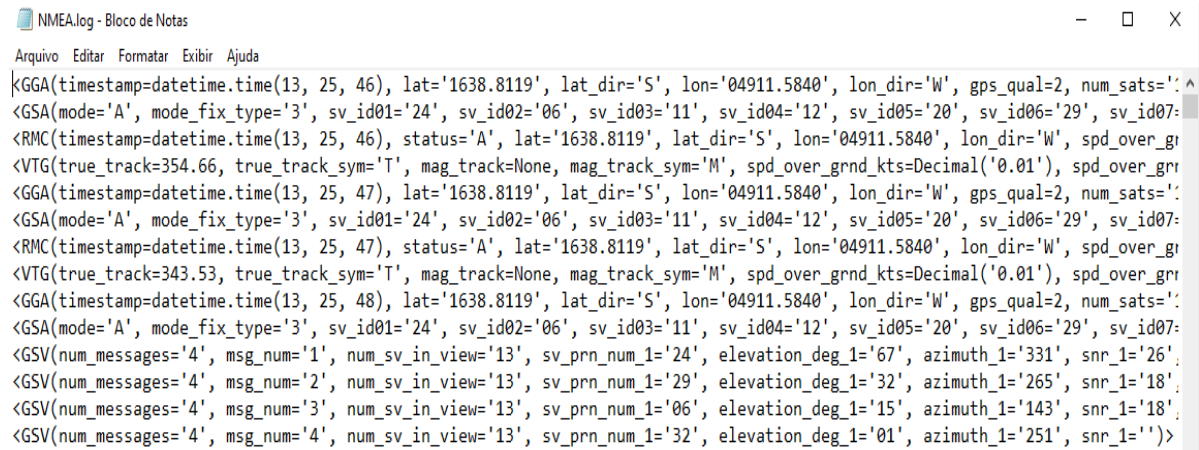


Figura 4.11 – Diretório “Documentos” do *Raspberry Pi OS* [Elaboração Própria].

O arquivo NMEA.log pode ser aberto pelo programa Bloco de Notas, conforme mostra a Figura 4.12.



```

NMEA.log - Bloco de Notas
Arquivo  Editar  Formatar  Exibir  Ajuda
<GGA(timestamp=datetime.time(13, 25, 46), lat='1638.8119', lat_dir='S', lon='04911.5840', lon_dir='W', gps_qual=2, num_sats='1',
<GSA(mode='A', mode_fix_type='3', sv_id01='24', sv_id02='06', sv_id03='11', sv_id04='12', sv_id05='20', sv_id06='29', sv_id07='29',
<RMC(timestamp=datetime.time(13, 25, 46), status='A', lat='1638.8119', lat_dir='S', lon='04911.5840', lon_dir='W', spd_over_grd=0.0,
<VTG(true_track=354.66, true_track_sym='T', mag_track=None, mag_track_sym='M', spd_over_grnd_kts=Decimal('0.01'), spd_over_grnd_kts_sym='M',
<GGA(timestamp=datetime.time(13, 25, 47), lat='1638.8119', lat_dir='S', lon='04911.5840', lon_dir='W', gps_qual=2, num_sats='1',
<GSA(mode='A', mode_fix_type='3', sv_id01='24', sv_id02='06', sv_id03='11', sv_id04='12', sv_id05='20', sv_id06='29', sv_id07='29',
<RMC(timestamp=datetime.time(13, 25, 47), status='A', lat='1638.8119', lat_dir='S', lon='04911.5840', lon_dir='W', spd_over_grd=0.0,
<VTG(true_track=343.53, true_track_sym='T', mag_track=None, mag_track_sym='M', spd_over_grnd_kts=Decimal('0.01'), spd_over_grnd_kts_sym='M',
<GGA(timestamp=datetime.time(13, 25, 48), lat='1638.8119', lat_dir='S', lon='04911.5840', lon_dir='W', gps_qual=2, num_sats='1',
<GSA(mode='A', mode_fix_type='3', sv_id01='24', sv_id02='06', sv_id03='11', sv_id04='12', sv_id05='20', sv_id06='29', sv_id07='29',
<GSV(num_messages='4', msg_num='1', num_sv_in_view='13', sv_prn_num_1='24', elevation_deg_1='67', azimuth_1='331', snr_1='26',
<GSV(num_messages='4', msg_num='2', num_sv_in_view='13', sv_prn_num_1='29', elevation_deg_1='32', azimuth_1='265', snr_1='18',
<GSV(num_messages='4', msg_num='3', num_sv_in_view='13', sv_prn_num_1='06', elevation_deg_1='15', azimuth_1='143', snr_1='18',
<GSV(num_messages='4', msg_num='4', num_sv_in_view='13', sv_prn_num_1='32', elevation_deg_1='01', azimuth_1='251', snr_1='')>

```

Figura 4.12 – Recorte de arquivo de dados armazenados, do receptor [Elaboração Própria].

De posse dos dados armazenados exibidos na Figura 4.12, posteriormente é possível trabalhar com eles e analisar seus valores. A partir dos valores de SNR dos satélites, por exemplo, é possível obter o índice S4, que é definido em termos da intensidade do sinal recebido, e é um parâmetro importante para medir a intensidade das cintilações causadas pela ionosfera na amplitude do sinal de rádio. Contudo, por ora, esse não é o foco deste trabalho [RODRIGUES, 2003].

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.

Este capítulo teve como objetivo apresentar os resultados obtidos com a operação do protótipo de monitoramento de sinais de satélites GPS. Simultaneamente, também foram explicados os procedimentos de operação do protótipo, desde a etapa de recepção até a de armazenagem dos dados recebidos pelo receptor. No próximo capítulo, serão apresentadas as conclusões deste trabalho.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS.

Este trabalho teve como objetivo propor e validar um modelo de monitor de sinais de satélites na banda L₁, que atendesse algumas premissas predefinidas nos quesitos técnico e financeiro. Para isso foi utilizado um receptor GPS *Breakout Adafruit Ultimate v3* em conjunto com a plataforma *Raspberry Pi Model B*, para recebimento e armazenamento de dados de satélites da constelação GPS, tentando manter também o enfoque no detalhamento dos processos de montagem e funcionamento do protótipo.

O monitoramento dos sinais de satélites GPS é notadamente importante pois contribui para o desencadear de pesquisas voltadas à análise dos dados obtidos, o que por sua vez, auxilia nos estudos das irregularidades ionosféricas que podem prejudicar aplicações onde o posicionamento e a navegação são fatores críticos, como é o caso da navegação aérea, agricultura de precisão, prospecção de petróleo etc.

O protótipo proposto conseguiu atender todos os requisitos indicados por PETROPOULOS e PRASHANT [2021] na Tabela 1, e por isso pode ser considerado um monitor de satélites GPS de baixo custo.

O *Raspberry Pi* mostrou-se completamente adequado para as funções de interação com o receptor GPS *Breakout Adafruit*, pois possui boas especificações técnicas de *hardware*. Mesmo ligado durante vários dias, em operação de armazenamento de dados do receptor, não foi observado aquecimento na placa, demonstrando que o protótipo possui boas características de refrigeração.

Quanto à alimentação da placa, a *Raspberry Pi 4 Model B* apresentou mensagem de falha de energia durante a operação, e foi necessário trocar o cabo da fonte para corrigir o problema. A placa não funciona corretamente com fontes de alimentação que possuem cabos com resistência alta, e o fato da conexão de entrada para fonte de alimentação ser do tipo USB-C, tira um pouco da acessibilidade da plataforma, visto que não é um tipo de conexão tão popular quanto a micro-USB.

Em relação ao armazenamento dos dados, um ponto observado é que os dados medidos pelo receptor GPS não ocupam espaços consideráveis de armazenamento. Apesar do receptor GPS *Breakout Adafruit* possuir uma taxa de amostragem de 10 Hz, constatou-se uma média de

96 MB de armazenamento diário de dados, o que é uma característica positiva, visto que o espaço disponível de armazenamento no cartão SD do *Raspberry Pi*, não será ocupado inesperadamente.

Durante o processo de montagem do protótipo, observou-se ainda a fragilidade do soquete U.FL da *Breakout Board*. As conexões/desconexões do cabo Pigtail U.FL/RP-SMA devem ser feitas delicadamente para não danificar o referido soquete, pois é ele que permite a conexão da antena externa, e esta é de suma importância para que o receptor obtenha maior precisão no posicionamento e mais agilidade no processo de rastreamento dos satélites. Para prevenir possíveis danos no soquete U.FL, é recomendado que se evite a movimentação do protótipo, de modo que o mesmo seja instalado em uma posição fixa.

Ficou evidente que o modelo proposto conseguiu adquirir e gravar dados de satélites da constelação GPS, de forma confiável e prática, dando abertura para o desenvolvimento de outros estudos voltados para a análise desses dados.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Há uma diversidade de estudos que podem ser realizados para dar continuidade a esse trabalho. Algumas recomendações são:

- Desenvolvimento de um *script Python* que use os valores de SNR obtidos pelo receptor, para por meio deles, calcular o índice de cintilação ionosférica em amplitude, (conhecido como índice S4) e em seguida, incrementar o *script* para que sejam gerados gráficos de S4 versus Tempo, resultando dessa forma em um monitor de cintilação ionosférica;
- Implementar um sistema de armazenamento *online* para gravar nas nuvens os dados recebidos pelo protótipo, pois no arranjo apresentado, isso é feito na memória do *Raspberry Pi*;
- Atualizar o *firmware* do *chipset* MTK3339 para a última versão disponível no site do fabricante. Essa versão possui como inovação o aumento da precisão do receptor no cálculo da SNR, que passará a informar valores com uma casa decimal, o que não ocorre com a versão atual. Ainda nessa mesma linha de pesquisa, recomenda-se que seja verificado a possibilidade de alterações do *firmware* para que o receptor meça somente alguns tipos de mensagens (as mais úteis), melhorando dessa forma o desempenho do receptor;
- Após obter valores do índice S4 por meio do protótipo, realizar a comparação com os valores obtidos pelos monitores de cintilação ionosférica comerciais;

- Realizar um estudo estatístico e matemático dos dados de cintilação ionosférica obtidos, e analisar o comportamento e a influência da cintilação ionosférica na região do Centro-Oeste Brasileiro; e
- Um outro objetivo (um pouco mais audacioso) é integrar o protótipo do monitor para fazer parte da rede de monitoramento do ICEA, e dessa forma, contribuir na investigação das irregularidades ionosférica na região central do Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAFRUIT INDUSTRIES. **About US**. [S. l.], S.I. Disponível em: <https://www.adafruit.com/about>. Acesso em: 14 nov. 2022.
- ADA, Lady [Limor Fried]. **Adafruit Ultimate GPS: Overview**. [S. l.], 16 jun. 2022. Disponível em: <https://learn.adafruit.com/adafruit-ultimate-gps/overview>. Acesso em: 14 nov. 2022.
- ADAFRUIT INDUSTRIES. **Adafruit Ultimate GPS Breakout - 66 channel w/10 Hz updates - PA1616S**. [S. l.], 14 nov. 2022. Disponível em: <https://www.adafruit.com/about>. Acesso em: 14 nov. 2022.
- ADAFRUIT INDUSTRIES. **Ultimate GPS v3 Schematic**. [S. l.], 12 mar. 2014. Disponível em: <https://learn.adafruit.com/adafruit-ultimate-gps/downloads>. Acesso em: 14 nov. 2022.
- BADDELEY, Glenn. **GPS - NMEA sentence information Contents**. [S. l.: s. n.], 07/ 2001. Disponível em: <http://aprs.gids.nl/nmea/>. Acesso em: 16 nov. 2022.
- BORGES, Lichard de França. **Análise e Simulação de Circuitos de Rastreamento de Frequência e Fase do Sinal da Portadora Utilizados nos PLLs de Primeira e Segunda Ordem em Receptores GPS**. 2013. 61p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Federal de Goiás (IFG), Campus Goiânia, 2013.
- BORRE, K.; AKOS, D. M.; BERTELSEN, P.; JENSEN, S. H.; *A Software-Defined GPS and Galileo Receiver. A Single-Frequency Approach*. Ed. Birkhauser. 2007.
- CONKER R. S.; EL-ARINI, M. B.; HEGARTY, C. J.; HSIAO, T. Modelling the effects of ionospheric scintillation on GPS/Satellite-based augmentation system availability. **Radio science**, v. 38, n. 1, p. 1-23. 2003.
- FREITAS, Moisés José dos Santos. **Contribuições no desenvolvimento e validação de monitores de cintilação GPS: uma abordagem alternativa de baixo custo para uso em larga escala**. 2019. 88f. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Computação e Sistemas – Universidade Estadual do Maranhão, São Luís.
- GANG, X., *Optimal On-Airport Monitoring of the Integrity of GPS-Based Landing Systems*. PhD. Dissertation. Stanford University. California, USA. 2004.
- GUSE, Rosana. **O que é Raspberry Pi?**. [S. l.], 12 ago. 2020. Disponível em: <https://www.filipeflop.com/blog/o-que-e-raspberry-pi/>. Acesso em: 14 nov. 2022.
- GOOLE MAPS. **16°38'48.1"S 49°11'35.2"W**. [S. l.: s. n.], 2022. Coordenadas Geográficas. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps/place/16%C2%B038'48.1%22S+49%C2%B011'35.2%22W/@-16.7027678,-49.3337286,11.25z/data=!4m5!3m4!1s0x0:0x6ecc8b6f03396548!8m2!3d-16.6467!4d-49.1931>. Acesso em: 16 nov. 2022.
- HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. **GPS theory and practice**. [S.1]: Springer Wien, 2001.

MORAES, A. O. **Análise do desempenho de um receptor GPS em canais com cintilação ionosférica**. 2008. 107 p. Tese de Mestrado em Engenharia Eletrônica e Computação. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. ITA. São José dos Campos, SP.

MOURA, Leidiane Carolina Martins de. **Estudo dos Efeitos da Cintilação Ionosférica na Propagação de Ondas Eletromagnéticas Aplicado em Sistemas GPS**. 2012. 42p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Federal de Goiás (IFG), Campus Goiânia, 2012.

OFFICIAL U.S. GOVERNMENT. **The Global Positioning System**: A global public service brought to you by the U.S. government. [S.l.], 2022. Disponível em: <https://www.gps.gov/systems/gps/>. Acesso em: 2 nov. 2022.

OLIVEIRA, Kelias. **Contribuições práticas sobre a variabilidade da cintilação ionosférica em baixas latitudes para usuários do GNSS**. 2015. 117f. Tese de Doutorado em Engenharia Eletrônica e da Computação – Telecomunicações – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

OLIVEIRA, K.; MORAES, A.O.; PERRELA, W. J. Variação da Cintilação Ionosférica em Baixas Latitudes no Sistema GNSS. Ed. Novas Edições Acadêmicas. 2017. ISBN: 978-3-330-75662-5.

PETROPOULOS, G. P.; PRASHANT, K. S. *GPS and GNSS Technology in Geoscience*. Ed Elsevier, 2021. ISBN: 978-0-12-818617-6. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-04209-8>.

RASPBERRY PI FOUNDATION (Reino Unido). **Raspberry Pi Documentation: The official documentation for Raspberry Pi computers and microcontrollers**. [S. l.], c2012-2022. Disponível em: <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/>. Acesso em: 14 nov. 2022.

RODRIGUES, Fabiano da Silveira. **Estudo das irregularidades ionosféricas equatoriais utilizando sinais GPS**. 2003. 175 p. Dissertação de Mestrado. INPE. São José dos Campos-SP.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy**. [S.1.]: Berlin-New York: Walter de Gruyter. 589p. 2003.
TSUI, Y; BAO, J. *Fundamentals of global positioning system receivers – A software approach*. John-Wiley. 2000.

Septentrio PolarRxS Packaged Receivers. In: NAVTECHGPS. Disponível em: <https://www.navtechgps.com/septentrio_polarxs_packaged_receivers/?keyword=Septentrio%20PolarXS%20Pro>. Acesso em: 16 nov. 2022.

SIRF TECHNOLOGY (San José, Califórnia, EUA). **NMEA Reference Manual**. California – U.S.A: [s. n.], 01/ 2005. Disponível em: <https://www.sparkfun.com/datasheets/GPS/NMEA%20Reference%20Manual1.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2022.

VANI, B. C., et all. **Monitoring ionospheric scintillation with GNSS in South America: scope, results and challenges**. GPS and GNSS Technology in Geosciences. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818617-6.00012-3>. 2021 Elsevier Inc. 2021, Páginas 255-280.

VAN DIERENDOCK, A. J. **GPS receivers, in Global Positioning System: Theory and Applications**. v. I, [S.l.]: B. Parkinson and J. Spilker Jr., Am. Inst. of Aeronaut. and Astronaut., Washington, D. C. 1996.

VAN DIERENDONCK, A. J.; HUA, Q.; KLOBUCHAR, J. **Ionospheric scintillation monitoring using commercial single frequency C/A code receivers**. In: PROCEEDINGS OF ION GPS 93, Salt Lake City, p. 1333-1342, 1993.

VAN DIERENDONCK, Albert. **Satellite Navigation Science and Technology for Africa: GPS Ionospheric Scintillation & Tec Monitor (User's Manual)**. California - U.S.A: [s. n.], 23/03/ 2009. Disponível em: <https://indico.ictp.it/event/a08148/session/90/contribution/56/material/0/0.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2022.

YEH, K. C.; LIU, C. H. **Radio wave scintillations in the ionosphere**. In: PROCEEDINGS OF THE IEEE 70, p. 324-360, 1982.