



Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia de Software

Análise de dados de geolocalização providos por receptores GNSS de baixo custo

Autor: Rafael Ribeiro de Oliveira
Orientador: Prof. Dr. Giovanni Almeida Santos

Brasília, DF
2022



Rafael Ribeiro de Oliveira

Análise de dados de geolocalização providos por receptores GNSS de baixo custo

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Software da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Software.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof. Dr. Giovanni Almeida Santos

Brasília, DF

2022

Rafael Ribeiro de Oliveira

Análise de dados de geolocalização providos por receptores GNSS de baixo custo/ Rafael Ribeiro de Oliveira. – Brasília, DF, 2022-

83 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Giovanni Almeida Santos

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2022.

1. GNSS. 2. GPS. I. Prof. Dr. Giovanni Almeida Santos. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Análise de dados de geolocalização providos por receptores GNSS de baixo custo

CDU 02:141:005.6

Rafael Ribeiro de Oliveira

Análise de dados de geolocalização providos por receptores GNSS de baixo custo

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Software da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Software.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 04 de Outubro de 2022:

Prof. Dr. Giovanni Almeida Santos
Orientador

Prof. Dr. Rudi Henri van Els
Convidado 1

**Prof. Dr. Sébastien R. M. J.
Rondineau**
Convidado 2

Brasília, DF
2022

Resumo

O uso de sistemas de satélites que fornecem dados de geolocalização se mostrou algo cotidiano da humanidade. Pessoas com um telefone celular conseguem informações não somente de posicionamento, como também de navegação. Carros autônomos traçam rotas e chegam ao ponto de destino com base nas informações fornecidas pelo sistema de posicionamento global, sem nenhuma interferência humana. Uma grande varejista entrega produtos aos clientes utilizando drones com base na posição informada pelo cliente. Há uma infinidade de possibilidades para o uso dessa tecnologia. A utilização dos sistemas de navegação por satélite se tornou uma nova facilidade da sociedade moderna. Este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento dos dados de posicionamento recebidos por dois sistemas receptores em três cenários, analisando como os ambientes afetam o cálculo do posicionamento dos equipamentos. Nessa investigação, foi realizado uma pesquisa exploratória afim de aprender mais sobre os sistemas de posicionamento global. Também foi utilizado um procedimento observacional para a coleta de dados fornecidos pelos receptores. Os dados coletados foram plotados em um mapa para uma melhor visualização do comportamento dos equipamentos. Visivelmente é menor a diferença entre o posicionamento fornecido pelos receptores em um ambiente onde não há obstrução do céu se comparado com um ambiente bastante obstruído, onde a diferença facilmente ultrapassa a casa das dezenas de metros.

Palavras-chaves: Sistema de Posicionamento Global; Geolocalização; Receptores de Baixo Custo.

Abstract

The use of satellite systems that provide geolocation data has proved to be something present in our lives. People with a cell phone get not only positioning but also navigation information. Autonomous cars calculate routes and arrive at the destination based on the information provided by the global position system, without any human interference. A large retailer delivers products to customers using drones based on the position provided by the customer. There are infinite possibilities for using this technology with robust equipment, but there are low-cost systems with limited components to receiver data. The use of satellite navigation systems has become a something easy to use in modern society. This work aims to analyze the behavior of the positioning data received by two receiving systems in three scenarios, analyzing how the environments affect the calculation of the positioning of the equipment. In this analysis, an exploratory research was carried out in order to learn more about global positioning systems. An observational procedure was also used to collect data provided by the receivers. The collected data were plotted on a map for a better visualization of the equipment's behavior. The difference between the positioning provided by the receivers in an environment where there is no sky obstruction is visibly smaller compared to a very obstructed environment, where the difference easily exceeds tens of meters.

Key-words: Global Positioning System. Geolocation. low cost receivers.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Intersecção dos satélites.	27
Figura 2 – Modelo Elipsoidal.	32
Figura 3 – Estrutura da mensagem NMEA.	45
Figura 4 – Sinais mais fortes dos satélites	46
Figura 5 – Densidade do ruído	47
Figura 6 – Posições dos satélites no céu	47
Figura 7 – Pseudodistâncias pelo tempo	48
Figura 8 – Diferença da frequência do relógio do receptor	48
Figura 9 – Deslocamento do relógio em espera	49
Figura 10 – Posição obtidos através de dados brutos	49
Figura 11 – Posição obtidos através de dados brutos aplicado filtro Kalman.	50
Figura 12 – Erros de cada pseudodistância.	50
Figura 13 – Erros de cada pseudodistância suavizados.	51
Figura 14 – Informações sobre os satélites	52
Figura 15 – Força dos sinais dos satélites	52
Figura 16 – Posição do usuário e dos satélites	53
Figura 17 – Posição do usuário e dos satélites	53
Figura 18 – Plotagem de dados obtidos pelo celular	54
Figura 19 – Plotagem de dados com filtro Kalman obtidos pelo celular	54
Figura 20 – Plotagem de dados obtidos pelo <i>U-Blox</i>	55
Figura 21 – Conexões entre Arduino e <i>U-Blox</i>	60
Figura 22 – Configuração do GNSS <i>Logger</i>	61
Figura 23 – Menu para configurar a frequência de medição	62
Figura 24 – Configuração para apresentar mensagens no protocolo NMEA	62
Figura 25 – Parado no Estacionamento da FGA	65
Figura 26 – Andando no Estacionamento da FGA	65
Figura 27 – Avenida das Araucárias - Águas Claras	66
Figura 28 – Parado no Estacionamento da FGA, sensores a céu aberto	67
Figura 29 – Andando no estacionamento da FGA, sensores dentro do carro	68
Figura 30 – Gráfico da diferença entre as medições	69
Figura 31 – Andando no estacionamento da FGA, sensores fora do carro	69
Figura 32 – Gráfico da diferença entre as medições	70
Figura 33 – Força do sinal das coletas do segundo cenário	70
Figura 34 – Avenida das Araucárias - Águas Claras, sensores dentro do carro	71
Figura 35 – Gráfico da diferença entre as medições	72
Figura 36 – Avenida das Araucárias - Águas Claras, sensores fora do carro	72

Figura 37 – Gráfico da diferença entre as medições	73
Figura 38 – Força do sinal das coletas do terceiro cenário	73

Lista de tabelas

Tabela 1 – Principais características dos GNSS.	24
Tabela 2 – Cronograma de atividades TCC 1	59
Tabela 3 – Cronograma de atividades TCC 2	59

Lista de abreviaturas e siglas

BDS	<i>BeiDou Navigation Satellite System</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CS	<i>Commercial Service</i>
CI	Circuitos Integrados
CTP	<i>Conventional Terrestrial Pole</i>
DD	Duplas Diferenças
DGNSS	<i>Differential GNSS</i>
DoD	<i>Department of Defense</i>
ECEF	<i>Earth-centered, Earth-fixed coordinate system</i>
FGA	Faculdade do Gama
FOC	Fase Operacional Completa
GNSS	<i>Global Navigation Satellite Systems</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GLONASS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGSO	<i>Inclined Geosynchronous Orbit</i>
IRNSS	<i>Indian Regional Navigation Satellite System</i>
LOS	<i>Line Of Sight</i>
MCS	<i>Master Control Station</i>
MEO	<i>Medium Earth Orbit</i>
NLOS	<i>Non Line Of Sight</i>
NMEA	<i>National Marine Electronics Association</i>
OS	<i>Open Service</i>

PPP	<i>Precise Point Positioning</i>
PRN	<i>Pseudo Random Noise</i>
PRS	<i>Public Regulated Service</i>
QZSS	<i>Japanese Quasi-Zenith Satellite System</i>
RNSS	<i>Regional Navigation Satellite Systems</i>
RTK	<i>Real Time Kinematic</i>
SBAS	<i>Satellite-based Augmentation Systems</i>
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver / Transmitter</i>
UnB	Universidade de Brasília
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
WGS	<i>World Geodetic System</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	19
	Introdução	19
1.1	Problema de Pesquisa	20
1.2	Questão de Pesquisa	20
1.3	Justificativa	20
1.4	Objetivo	21
1.4.1	Objetivo Geral	21
1.4.2	Objetivo Específicos	21
1.4.3	Organização do Trabalho	21
2	CONCEITOS E FUNDAMENTOS	23
2.1	Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS)	23
2.1.1	Sistemas de Posicionamento Global (GPS)	23
2.1.2	Sistema de Navegação Global por Satélite (GLONASS)	24
2.1.3	Galileo	25
2.1.4	BeiDou	25
2.1.5	Estrutura do GNSS	26
2.2	Funcionamento do GPS	26
2.2.1	Segmento Espacial	28
2.2.2	Segmento de Controle	28
2.2.3	Segmento de Usuário	29
2.2.4	Estrutura do Sinal	29
2.2.5	Sistemas Utilizados no GPS	30
2.2.5.1	Latitude e Longitude	31
2.2.5.2	Conversão entre a Geodésica e Coordenadas Cartesianas	32
2.2.5.3	Dados observados pelo GPS	33
2.2.5.3.1	Pseudodistância	33
2.2.5.3.2	Fase da Onda Portadora	35
2.2.6	Erros e Interferências	35
2.2.6.1	Erros relacionados aos satélites	35
2.2.6.1.1	Erros orbitais	36
2.2.6.1.2	Erros no relógio do satélite	36
2.2.6.2	Erros relacionados a propagação	37
2.2.6.2.1	Refração Ionosférica	37
2.2.6.2.2	Refração Troposférica	38

2.2.6.2.3	Multicaminhamento	39
2.2.6.3	Erro relacionado ao receptor	39
2.2.7	Principais formas de correção	40
2.2.7.1	<i>Satellite-based Augmentation Systems</i> (SBAS)	40
2.2.7.2	<i>Differential GNSS</i> (DGNSS)	40
2.2.7.3	<i>Real Time Kinematic</i> (RTK)	41
2.2.7.4	<i>Precise Point Positioning</i> (PPP)	42
3	SUPORTE TECNOLÓGICO	43
3.1	Hardware	43
3.1.1	Smartphones	43
3.1.2	Notebook	43
3.1.3	U-Blox NEO-6M	43
3.1.4	Arduino Uno R3	43
3.2	Softwares	44
3.2.1	<i>GNSS Logger e GNSS Analysis</i>	44
3.2.2	<i>U-Center</i>	44
3.3	Protocolos	44
3.3.1	NMEA-0138	44
3.3.2	<i>GNSS Logger Raw Message</i>	46
3.4	Informações Fornecidas Pelas Ferramentas	46
3.4.1	Informações do <i>GNSS Logger</i>	46
3.4.2	Informações do <i>U-Center</i>	51
3.4.3	Visualização dos dados do arquivo NMEA	54
4	METODOLOGIA	57
4.1	Escolhas Metodológicas	57
4.1.1	Abordagem da pesquisa	57
4.1.2	Natureza da Pesquisa	57
4.1.3	Objetivos da Pesquisa	58
4.1.4	Procedimentos	58
4.1.5	Cronograma	58
4.2	Coleta de Dados	59
4.2.1	Preparação	60
4.2.2	Configuração dos equipamentos	61
4.2.2.1	Celular	61
4.2.2.2	<i>U-Blox</i>	62
4.2.3	Problema de Sincronização	63
4.2.3.1	Interpolação por <i>Splines</i> Cúbicas	63
4.2.4	Distância das Posições Medidas	63

4.2.5	Arquivo Gerado Pelos Equipamentos	64
4.2.6	Cenários da coleta	64
5	EXPERIMENTOS E RESULTADOS	67
5.1	Primeiro Cenário	67
5.2	Segundo Cenário	68
5.3	Terceiro Cenário	71
5.4	Comparação das Medições	74
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	75
6.1	Conclusões	75
6.2	Recomendações para Trabalhos Futuros	76
	REFERÊNCIAS	77
	APÊNDICES	81
	APÊNDICE A – DADOS E CÓDIGO	83

1 Introdução

A necessidade de se localizar ao redor do globo terrestre em tempo real utilizando satélites só foi possível através de tecnologias como o Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS), que se tornou parte das nossas vidas, mas poucos pararam para entender como funciona. Este trabalho aborda sobre as tecnologias envolvidas e como o posicionamento é calculado, utilizando um exemplo onde dados brutos serão processados utilizando um equipamento receptor de baixo custo, pois se tratando de custo-benefício, esse tipo de tecnologia é dominante.

O acrônimo GNSS é um termo genérico atribuído aos sistemas de satélite com cobertura global, estruturados para disponibilizar informações de posicionamento sobre a superfície terrestre. O sistema GNSS oferece uma solução de posicionamento tridimensional a partir de uma constelação de satélites que transmite dados posicionais a uma antena receptora, a qual recebe os sinais de um mínimo de quatro satélites, e calcula as coordenadas através de trilateração (MONICO, 2008). O exemplo mais conhecido de GNSS é o Sistema de Posicionamento Global (GPS). Os satélites GPS funcionam como pontos de referência no espaço, tendo a sua posição conhecida com precisão. Há uma comunicação entre o satélite e o receptor GPS, e com base na medição do intervalo de tempo decorrido entre a transmissão dos sinais, é possível calcular a distância em relação a quatro satélites no espaço, usando tais distâncias como raios de quatro esferas, cada uma tendo um satélite como centro. A posição do receptor é o ponto comum de interseção dessas quatro esferas.

Diferentes sistemas de satélites como o GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou estão disponíveis para o uso no processo de localização. Todos os sistemas globais são capazes de uma rápida localização em tempo real quando em céu aberto. Contudo, a navegação por satélite é baseada em transmissão por ondas eletromagnéticas com todas as suas características e desvantagens. Isso é, se temos uma visão limitada do céu, o processo de localização é falho (REISDORF; PFEIFER; BREBLER, 2016).

O maior desafio dos sistemas baseados em GNSS nos ambientes urbanos são medidas *Non-line-of-sight* (NLOS). Essas medidas resultam de reflexos nos sinais recebidos, o que podem ocorrer especialmente em ruas estreitas cercadas de edifícios altos (REISDORF; PFEIFER; BREBLER, 2016).

Projetos que possuem orçamento limitado e que necessitam de sistemas de navegação podem ser beneficiar de sensores GNSS. O seu baixo custo acompanha alguns cenários no qual o receptor não trabalha de forma acurada.

Ao longo deste trabalho, o principal foco de interesse é a análise de dados providos

pelo sistema GPS e obtidos por dois equipamentos: um telefone celular e um receptor dedicado. Estes equipamentos são de fácil acesso, simples de manusear e de baixo custo.

1.1 Problema de Pesquisa

Os avanços tecnológicos trouxeram novos desafios para os sistemas de navegação, com o ritmo frenético das novas tecnologias surge a necessidade de se adaptar as demandas do mercado atual. Criar equipamentos que atendem as necessidades dos usuários e ainda assim possuir um preço atrativo é um dos desafios das empresas de tecnologias. A tecnologia GNSS é um exemplo do quanto esses avanços impactam não apenas um mercado específico, como também toda a sociedade.

Apesar dos avanços das tecnologias dos sistemas GNSS, é comumente reconhecido que o problema de multicaminhamento e a falta de uma visão direta com o satélite ainda permanecem um desafio, sendo ainda mais perceptível em ambientes urbanos compostos de grandes edificações. O multicaminhamento é quando o receptor recebe, além do sinal que chega diretamente à antena, sinais refletidos em objetos ao seu redor. Já a falta de uma visão direta se deve a qualquer elemento do ambiente que bloqueie a propagação do sinal do satélite, impedindo a visada direta.

Desse modo, vê-se a necessidade da verificação do comportamento de receptores de baixo custo em cenários urbanos que afetem a sua precisão, analisando e comparando os resultados obtidos pelos equipamentos e discutindo a viabilidade da sua utilização em aplicações e sistemas embarcados.

1.2 Questão de Pesquisa

Com o objetivo de guiar o desenvolvimento deste trabalho, foi proposta a seguinte questão:

Diante das limitações dos equipamentos e cenários estabelecidos para a coleta de dados deste trabalho, qual é o comportamento dos equipamentos que possuem receptores GNSS de baixo custo?

1.3 Justificativa

A utilização dos sistemas GNSS estão cada vez mais presentes nas sociedades, sendo bastante presente no meio civil como forma de auxiliar na navegação em ambientes urbanos. Por meio das informações espaciais e temporais, é possível determinar a velocidade, aceleração e direção de deslocamento do usuário. Entretanto, quando se é utilizado

um aparelho de baixo custo em determinados ambientes, sua precisão ou até mesmo a sua funcionalidade ficam comprometidas.

Este trabalho tem como foco analisar o comportamento desses equipamentos no meio urbano, visualizando o quanto os efeitos descritos na literatura afetam esses equipamentos que acessíveis ao usuário comum e sua viabilidade de utilização em sistemas que demandam um posicionamento preciso.

1.4 Objetivo

1.4.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar o comportamento dos dados de posicionamento recebidos por dois receptores de GPS em cenários distintos, verificando como as medições são afetadas pelo ambiente e qual é a diferença entre o posicionamento calculado pelos equipamentos.

1.4.2 Objetivo Específicos

- Entender o funcionamento dos sistemas GNSS, em específico do GPS;
- coletar dados oriundos do sistema GPS através de receptores distintos;
- processar esses dados através de um algoritmo para melhorar a precisão do equipamento;
- analisar como as variáveis afetam a precisão dos dados, assim como é descrito por outros autores;
- analisar a diferença das medições através de plotes e gráficos gerados pelos dados de posicionamento.

1.4.3 Organização do Trabalho

Este documento está organizado da seguinte forma:

- Introdução: o primeiro capítulo é referente à contextualização, levantamento da questão de pesquisa, justificativa e definição dos objetivos deste trabalho;
- Conceitos e fundamentos: este capítulo aborda as definições sobre o sistema GNSS, fornecendo o conhecimento necessário para compreender este trabalho. Também é abordado as diferentes constelações e suas principais características. A segunda parte deste capítulo se aprofunda no objeto de estudo que é o sistema GPS, definindo como é o seu funcionamento, estrutura, sistemas e erros;

- Suporte tecnológico: o quarto capítulo apresenta as ferramentas e tecnologias empregadas para auxiliar o desenvolvimento deste trabalho, assim como as informações fornecidas por cada equipamento e suas configurações;
- Metodologia: apresenta as técnicas utilizadas para a realização da pesquisa, definindo as atividades a serem realizadas para atingir o objetivo do trabalho;
- Experimento e resultados: este capítulo expõe como foi realizado a preparação e a coleta dos dados e também os resultados obtidos desta coleta;
- Conclusões e trabalhos futuros: este capítulo é destinado a retomar os principais pontos deste trabalho, mostrando até onde a pesquisa foi e quais são os seus achados. Por fim, há a recomendação para trabalhos futuros.

2 Conceitos e Fundamentos

2.1 Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS)

O *Global Navigation Satellite System* (GNSS) refere-se à constelação de satélites que possibilita o posicionamento em tempo real de objetos, fornecendo navegação em todo globo terrestre. Esses sistemas são utilizados em diversas áreas, como mapeamento topográficos e geodésicos, aviação, navegação marítima e terrestre, monitoramento de frotas, demarcação de fronteiras, agricultura de precisão, entre outros usos (IBGE, 2021).

Os sistemas de navegação por satélites podem ser divididos em duas categorias: globais e regionais. Os globais são o Sistema de Navegação Global por Satélite (GNSS), desenvolvidos pela Rússia e o Sistema de Posicionamento Global (GPS) que foi desenvolvido e pelos Estados Unidos, inicialmente com fins militares e aberto ao uso civil posteriormente. A Comunidade Europeia desenvolveu o Galileo. A China desenvolveu o BeiDou, ou BDS, para se tornar independente das tecnologias estrangeiras. Os Sistemas Regionais de Navegação por Satélite (RNSS) são o japonês QZSS, o indiano IRNSS/NavIC e pela componente regional chinesa do BDS. O presente trabalho abordará apenas os sistemas globais. A Tabela 1 apresenta as principais características dos sistemas globais.

2.1.1 Sistemas de Posicionamento Global (GPS)

O desenvolvimento do GPS começou em meados dos anos setenta como um programa do Departamento de Defesa dos Estados Unidos (DoD). Foi declarado operacional no ano de 1995. Possui uma constelação nominal de 24 satélites em órbita terrestre média (MEO) e por estações terrestres distribuídas pelo globo. Atualmente 31 satélites estão operacionais (GPS, 2021). O GPS utiliza a tecnologia *Code Division Multiple Access* (CDMA) para o envio de sinais, que segue o mesmo princípio que utilizado nos telefones celulares. Todos os sistemas transmitem os seus sinais na mesma frequência, mas com uma diferente identificação que é dada por um código *Pseudo Random Noise* (PRN). Esse código permite ao equipamento a receber o sinal e distinguir entre os vários satélites emissores. Esse sistema está passando por um processo de modernização para implementar novos sinais para beneficiar o uso civil e aplicações aeronáuticas (PETROVSKI; TSUJII, 2012).

O GPS é primariamente um sistema de navegação. O princípio da navegação fundamental é baseado no que é chamado de *pseudorange* (pseudodistância) entre o receptor e os satélites. Começando a partir das coordenadas de satélite conhecidas em um quadro de referência, as coordenadas da antena do usuário podem ser determinada. Do ponto de vista geométrico, três fontes seriam suficientes. Uma quarta fonte é necessária pois o GPS

Tabela 1 – Principais características dos GNSS.

Parâmetro	GPS	GLONASS	Galileo	BDS
Desenvolvido por	EUA	Rússia	União Europeia	China
Constelação nominal	24	24+3	24+6	27
Planos orbitais	6	3	3	3
Inclinação (°)	55	64,8	56	55
Altitude (km)	20200	19100	23222	21500
Frequência (MHz)	L1: 1575,45 L2: 1227,60 L5: 1176,45	L1: 1597-1617 L2: 1240-1260 L3: 1202,025	E1: 1575,42 E5a: 1176,45 E5b: 1207,14 E5: 1191,795	B1: 1561,098 B2: 1207,14 B3: 1268,52
Identificação dos satélites	CDMA	FDMA/CDMA	CDMA	CDMA
Efemérides	Elementos keplerianos	Posição, velocidade, tempo	Elementos keplerianos	Elementos keplerianos
Sistema de referência	WGS84 (World Geodetic System 1984)	PZ-90 (Parametry Zemli 1990)	GTRF (Galileo Terrestrial Reference Frame)	CGCS2000 (China Geodetic Coordinate System 2000)
Sistema de tempo	GPST (GPS Time)	UTC (SU) Universal Coordinated of Russia	GST (Galileo System Time)	BDT (BeiDou Time)

Fonte: Com base em [GPS \(2021\)](#), [GLONASS \(2020\)](#), [EUSPA \(2022\)](#) e [Junior et al. \(2020\)](#).

usa uma técnica em que os satélites enviam constantemente sinais e os receptores apenas o capturam. O relógio do receptor não está sincronizado com o relógio do satélite. Este erro de sincronização é o que dá o nome para o termo pseudodistância ([SEEBER, 2003](#)).

2.1.2 Sistema de Navegação Global por Satélite (GLONASS)

O sistema de navegação GLONASS foi iniciado pela antiga União das Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS) e continuado pela Rússia. Ele fornece a posição e a velocidade de dados de objetos em qualquer ponto da superfície da terra e do espaço próximo, por meio de medição e comparação da distância entre o objeto e pontos de coordenadas conhecidas. O satélite transmite um sinal que contém dados orbitais e o tempo preciso de que o sinal foi transmitido. O sistema usa um relógio atômico para manter a sincronia em relação aos demais satélites da constelação ([GLONASS, 2020](#)).

Com planos de reestabelecer a cobertura global e modernização do sistema, a constelação conta com 24 satélites. Inicialmente a tecnologia *Frequency Division Multiple Access* (FDMA) seria utilizada, onde cada satélite transmite e é identificado por uma frequência diferente. Atualmente os satélites GLONASS-K também passaram a transmitir sinais CDMA. A nova geração GLONASS-K2, que entrou em desenvolvimento em 2017, contará com as tecnologias FDMA e CDMA, como é utilizado no sistema GPS (GLONASS, 2020).

2.1.3 Galileo

O sistema de navegação global Galileo iniciou em 2003 pela Agência Espacial Europeia (ESA), visando o uso completamente civil. A constelação Galileo vêm sendo continuamente incrementada visando atingir a fase operacional completa (FOC) do sistema prevista para 2023. Atualmente conta com 30 satélites em órbita, 26 dos quais estão operacionais (EUSPA, 2022). Cada satélite Galileo transmite sinais em três frequências utilizando a técnica CDMA. Os sinais são utilizados para oferecer três tipos de serviços de posicionamento: *Open Service* (OS), que se utiliza da banda E1 e das sub-bandas E5a e E5b para posicionamento civil; *Public Regulated Service* (PRS) nas frequências E1 e E6, um serviço restrito a usuários autorizados pelo governo; e *Commercial Service* (CS) também na frequência E6, mas criptografada e sendo um serviço pago (GNSS, 2020).

A constelação Galileo completa será composta por satélites distribuídos de forma uniforme em torno de três planos orbitais. Cada satélite levará cerca de 14 horas para orbitar a terra. Na maioria dos locais, de seis a oito satélites estarão visíveis, permitindo que as posições com altíssima precisão. A interoperabilidade com o sistema de satélites GPS incrementará a confiabilidade de seus serviços (EUSPA, 2022).

2.1.4 BeiDou

O sistema de navegação por satélite BeiDou (BDS) foi desenvolvido e operado pela China visando as necessidades de segurança e econômica do país. Nos anos 90, a China começou os estudos para o desenvolvimento de um sistema de navegação por satélite adequado para as condições do país, e formulou uma estratégia em três etapas (BEIDOU, 2020). A primeira fase concretizou-se com o lançamento de três satélites geoestacionários nos anos de 2000 a 2003 para demonstração do sistema. Esses três satélites foram substituídos por satélites da fase 2, que correspondeu à fase regional do sistema, iniciada no ano de 2004 e declarada operacional em 2012. Esta fase é composta por 14 satélites, sendo que 5 deles de órbita geoestacionária (GEO), 5 de órbita geossíncrona (IGSO), e 4 de órbita MEO, abrangendo todo o território chinês e outras partes da Ásia e do Pacífico. A terceira e última fase do sistema é composta por uma constelação global, que se completou em 2020 com 27 satélites MEO em órbita. São transmitidos sinais abertos e autorizados em

três frequências, denominadas de B1, B2, B3 pela técnica de sinais CDMA (BEIDOU, 2016).

2.1.5 Estrutura do GNSS

Todos esses sistemas citados podem ser vistos compostos por duas partes, um segmento espacial, que são as constelações, e um segmento de controle. Em alguns casos um segmento usuário pode ser incluso como parte do sistema. Um segmento de usuário compreende todos os usuários do serviço, incluindo aqueles que estão na superfície da terra e no espaço (PETROVSKI; TSUJII, 2012).

A principal tarefa do segmento de controle, no que diz respeito ao posicionamento é voltado para definir e prever as órbitas do satélite e enviar os parâmetros para os satélites, que transmitem seus parâmetros orbitais dentro da mensagem de navegação. O segmento de controle também serve como pilar do sistema de controle e manutenção. Um componente essencial da estruturas dos GNSS é a rede de estações, que medem distância aos satélites. A distância a um satélite pode ser medida usando um sinal de satélite, nesse caso a estação serve como um receptor de sinal. Outra forma pode ser medir utilizando outros meios, como, por exemplo, medindo um sinal de laser que é refletido por um satélite, que está carregando um espelho especial para esse propósito (PETROVSKI; TSUJII, 2012).

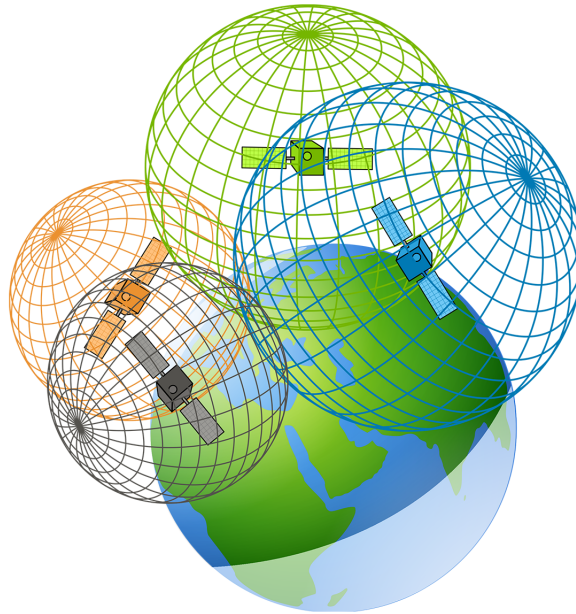
2.2 Funcionamento do GPS

O conceito por trás do sistema GPS é que se uma distância entre um ponto na superfície da terra onde se encontra o receptor GPS e as posições de três satélites GPS são conhecidas, é possível determinar a localização do ponto.

Tanto satélites quanto os receptores possuem um relógio interno que conta com uma grande precisão. Quando o sinal é emitido pelo satélite de forma constante e o horário de envio é enviado na mensagem. O receptor captura o sinal com a mensagem e calcula quanto tempo demorou até o recebimento da mensagem. Conhecido a velocidade da onda eletromagnética e o tempo em que o sinal demorou para chegar, é possível determinar a distância entre o receptor e os três satélites (WALTER, 2010). Com essas informações é possível usar a técnica de trilateração, a qual consegue calcular a posição do receptor. A ilustração da triangulação pode ser vista na Figura 1.

A trilateração é o processo para determinar a posição do receptor na terra através do conhecimento das localizações das orbitas dos satélites GPS e a distâncias desses satélites para o receptor. Para isso, é necessário relacionar a distância D em metros, a velocidade s em metros por segundo e o tempo t em segundos, como pode ser visto na

Figura 1 – Intersecção dos satélites.



Fonte: (GISGEOGRAPHY, 2022)

Equação 2.1. Isto é possível pelo fato dos satélites sempre estarem enviando sinais de rádio (GPS, 2014).

$$D = st \tag{2.1}$$

No posicionamento GPS, a velocidade é o quão rápido o sinal de rádio viaja, o qual é igual a velocidade da luz. O tempo é determinado pelo quanto demora para o sinal viajar do satélite até o receptor. Com a velocidade e o tempo conhecido, é possível resolver a distância entre o satélite e o receptor, uma vez que é necessário possuir a distância de pelo menos três satélites para que seja determinado uma posição tridimensional na superfície da terra (GPS, 2014).

Os satélites transmitem continuamente um sinal de micro-ondas composto por três portadoras, dois códigos e uma mensagem de navegação. Quando o receptor GPS é ativado, o sinal do satélite é recebido pela antena e processado. O sinal processado fornece as distâncias aproximadas (*pseudorange*) aos satélites GPS e as coordenadas dos satélites a partir da mensagem de navegação. O *pseudorange* é definido como o produto da velocidade da luz no vácuo pelo retardo correspondente à máxima correlação entre o sinal recebido pelo receptor e uma replica idêntica gerada por ele (WALTER, 2010). Para fins de navegação, é necessário um quarto satélite para obter informações como velocidade, aceleração e deslocamento.

2.2.1 Segmento Espacial

A constelação base do sistema GPS contém 24 satélites, alocados em órbitas elípticas em seis planos orbitais, com uma inclinação igual a 55° em relação ao Equador e com período de aproximadamente 12 horas (tempo sideral). Estão a uma altitude média aproximada de 20200 km acima da superfície terrestre, o que corresponde a semieixo maior igual a 26600 km. Este arranjo garante a cobertura projetada para o sistema. Os satélites completam duas revoluções orbitais enquanto a terra realiza apenas uma rotação. Assim, cada satélite recobre a mesma faixa de terreno uma vez por dia (SEGANTINE, 2005). Cada satélite é identificado por um código de dois caracteres, uma letra identifica o plano orbital (A à F) e um número que identifica o número do satélite no plano (1 à 4) (ENGE, 2010).

2.2.2 Segmento de Controle

Por trás do Segmento de Controle existe a *Master Control Station* (MCS) localizado em uma base da força aérea americana no estado do Colorado. A MCS coleta os dados das estações monitoras e calcula as órbitas, os parâmetros dos relógios dos satélites e suas futuras posições. Estes resultados são enviados para uma das três estações de antenas terrestres para que seja enviado aos satélites. Essa tarefa é executada a cada oito horas, passando a fazer parte das efemérides transmitidas pelos satélites (mensagem de navegação) (SEGANTINE, 2005). A MCS possui o controle dos satélites e de todo o sistema operacional. Segundo Enge (2010), as funções do Segmento de Controle são:

- monitorar as órbitas dos satélites;
- monitorar e conservar a integridade dos satélites;
- determinar o tempo do GPS;
- prever efemérides e o comportamento dos relógios;
- atualizar as mensagens de navegação;
- comandar pequenas manobras dos satélites para manter a órbita e realocações para compensar as falhas.

O Controle de Segmento também conta com estações de monitoramento e antenas terrestres, ambas são operadas remotamente pela MCS. As estações de monitoramento recebem todos os sinais de satélites, dos quais conseguem determinar a pseudodistância para todos os satélites visíveis e transmitir os dados distância junto com dados meteorológicos locais para a MCS. A partir desses dados, a MCS calcula as efemérides e o comportamento dos relógios dos satélites e gera a mensagem com dados de navegação.

Essa mensagem é transmitida para as antenas terrestres e enviada aos satélites visíveis. Por causa da distribuição global das antenas, ao menos três contatos por dias podem ser realizados entre o Controle de Segmento e cada satélite (ENGE, 2010).

2.2.3 Segmento de Usuário

O grande sucesso do uso do GPS em escala civil é atribuído ao grande avanço nos circuitos integrados (CI), que tornaram os receptores compactos, leves e muito mais baratos. O segmento de usuário é formado pelos receptores localizados tanto na superfície terrestre quanto no espaço. As antenas captam sinais de quatro ou mais satélites, simultaneamente ou sequencialmente, processam os dados determinando posição, velocidade e medida de tempo dos pontos observados (SEGANTINE, 2005).

Com a popularidade e o baixo custo da tecnologia, há diversos tipos de receptores, projetados para atender uma aplicação específica que possuem acesso a serviços disponíveis aos civis pelo código C/A ou para fins militares através do código P, que possui maior precisão. Existem uma grande quantidade de tipos de antenas, o *hardware* responsável pela amplificação dos sinais, decodificação das informações e processamento. Um bom exemplo disso são os *smartphones*, que em suas configurações mais básicas já possuem todo um *hardware* voltado para o uso de aplicações que utilizam o GPS, como a navegação.

2.2.4 Estrutura do Sinal

Os satélites GPS são sistemas que transmitem sinais de forma unidirecional que se propagam das antenas dos satélites até as antenas dos receptores. Cada sinal de GPS consiste em três componentes; as portadoras, os códigos e a mensagem de navegação.

Cada satélite transmite três ondas portadoras chamadas de L1, L2, L5. Inicialmente o sistema possuía as portadoras L1 e L2. Como resultado dos projetos de modernização, uma terceira portadora, denominada de L5, passou a fazer parte do sistema. Os valores das frequências das ondas portadoras são (GPS, 2021):

- L1: 1575 MHz de frequência;
- L2: 1227 MHz de frequência;
- L5: 1176 MHz de frequência.

O primeiro código é o código-C/A (*Coarse or Clear/Acquisition-code*), que é disponível para a comunidade civil. O segundo código é o código-P (*Precision or Protect-code*).

Foi projetado para uso militar ou para usuários autorizados, proporcionando um posicionamento preciso. É importante dizer que cada satélite estabelece o seu próprio código-C/A e o código-P. Os códigos têm duas funções importantes (SEGANTINE, 2005):

- identificação do satélite: os códigos são únicos para cada satélite e podem ser comparados com os respectivos códigos gerados pelos receptores;
- medida da propagação do tempo: medida do tempo necessário para que o sinal percorra a distância entre o satélite e a antena receptora.

A mensagem de navegação contém informações como: efemérides, correções do relógio do satélite, órbitas dos satélites, saúde dos satélites e outras correções da dados. Essas informações são utilizadas para o posicionamento e a navegação. A mensagem de navegação (efemérides) é composta pelas seguintes informações (SEGANTINE, 2005):

- informações do código-C/A;
- informações do código-P;
- informações de navegação dos satélites, dados os sinais e informações relativas a componente tempo;
- informações das fases das portadoras que podem ser usadas em um posicionamento mais preciso;
- informações a respeito do sistema GPS. Com essas informações é possível executar um planejamento de observações com a finalidade de obter dados a partir de uma boa geometria dos satélites. Esta definição é um parâmetro muito importante para a melhoria da precisão dos resultados.

2.2.5 Sistemas Utilizados no GPS

O objetivo fundamental do sistema de GPS é calcular a posição. Antes de entender como o cálculo é feito, o conceito de posição deve ser definido para o melhor entendimento. Quando se fala em posição, a maioria das pessoas pensam em latitude, longitude e altura. Enquanto latitude e longitude são úteis para representar a posição na superfície terrestre, elas não são adequadas para um modelo matemático, pois não fornecem um sistema de coordenada cartesiana. A representação da distância física por diferença de unidades entre duas longitudes não é constante e depende da posição (WALTER, 2017).

Para ser útil aos cálculos matemáticos, é necessário que o sistema de coordenada onde a diferença de unidade entre coordenadas represente uma distância física constante. Um conjunto de sistemas de coordenadas podem ser criadas definindo uma coleção de

eixos perpendiculares que cruzam em uma origem que está rigidamente ligada a terra. Tais coordenadas são chamadas de *Earth-centered, Earth-fixed coordinate system* (ECEF). Esses sistemas de coordenadas funcionam bem em expressar a posição de um usuário na terra enquanto ele rotaciona com a terra e a posição de um usuário estacionário na superfície da terra é constante. A utilização do sistema de coordenadas ECEF é simples, mas o planeta não é perfeitamente esférico. Após estudos do campo gravitacional em diversos pontos ao redor do globo, concluiu-se que a terra seria melhor representada por uma elipsoide de revolução geocêntrica. Assim, foi definido o sistema de referência *World Geodetic System* (WGS). O sistema de coordenadas ECEF mais usado é o sistema chamado WGS 1984, que é assim definido (ENGE, 2010):

- origem no centro de massa da terra;
- eixo z passando através do Conventional Terrestrial Pole (CTP). CTP é a média das posições dos polos da terra entre os anos 1900 e 1905;
- eixo x passando através da interseção do plano equatorial CTP e um meridiano de referência, também chamado de meridiano de Greenwich.

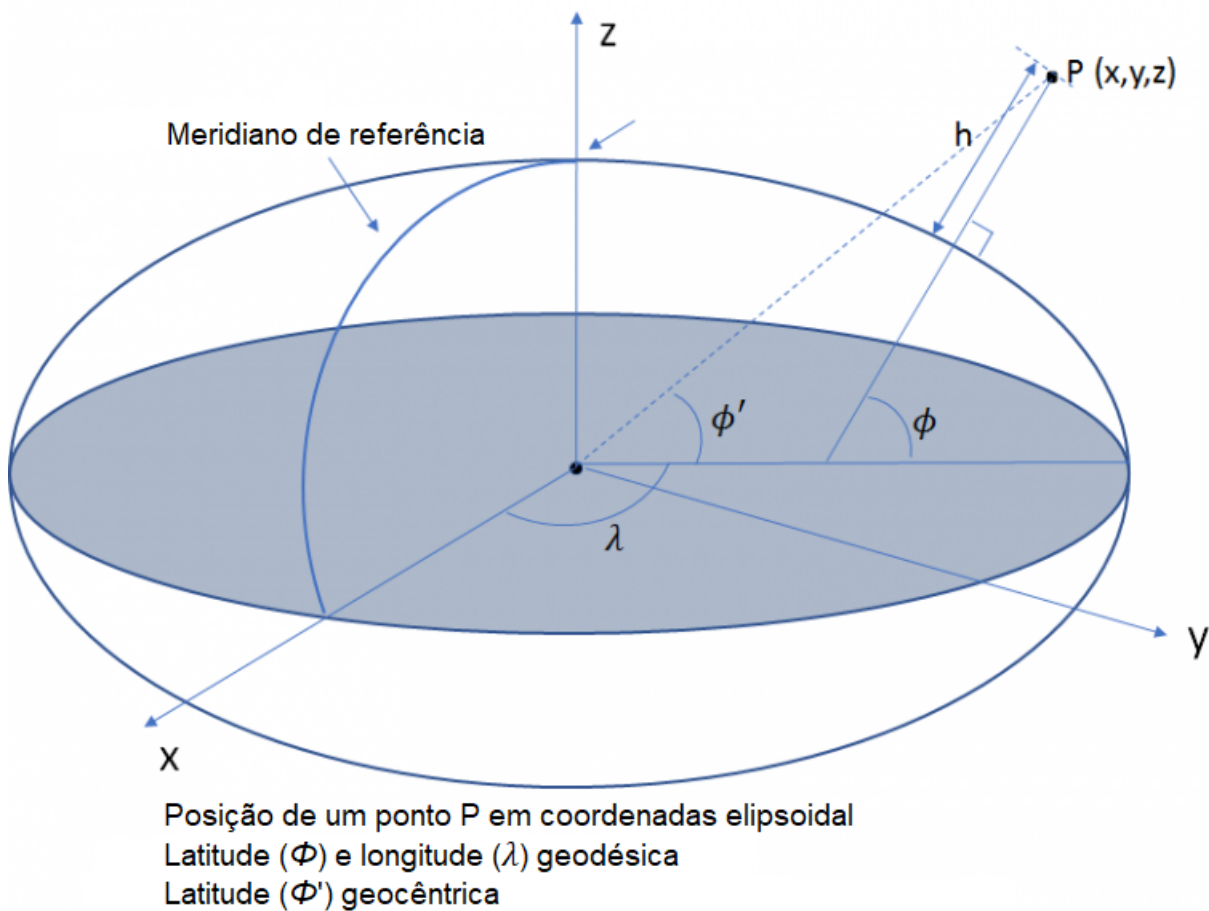
Os parâmetros das órbitas dos satélites são dados em um dos sistemas ECEF. Isso é conveniente por que eles são definidos no ECEF da rede de rastreamento. Esses parâmetros são considerados na estrutura inercial, pois uma representação matemática da órbita em uma estrutura inercial é mais simples (PETROVSKI; TSUJII, 2012). Para formular o problema do movimento dos satélites ao redor do planeta em concordância com as leis de movimento de Newton, mostra-se necessário um sistema de coordenadas inercial que pode expressar aceleração, posição e velocidade vetorial.

2.2.5.1 Latitude e Longitude

Utilizando uma representação elipsoidal, representada na Figura 2, do formato da terra e um sistema de coordenadas ECEF, é possível definir um ponto P nas coordenadas elipsoidal (comumente conhecido como latitude, longitude e altura).

- *Latitude Geodésica* (Φ): é o ângulo formado no plano meridiano através do ponto P entre o plano equatorial do elipsoide e a linha perpendicular à superfície do elipsoide em P.
- *Longitude Geodésica* (λ): é o ângulo no plano equatorial entre o meridiano de referência e o plano meridiano através de P.
- *Altura Geodésica* (h): medido ao longo da normal até o elipsoide através de P (WALTER, 2017).

Figura 2 – Modelo Elipsoidal.



Fonte: (ENGE, 2010)

Vale lembrar que a latitude é o ângulo entre o plano equatorial e a linha perpendicular a superfície da elipse no ponto P, não a linha que liga o ponto P e o centro da terra. O ângulo entre o plano equatorial e a linha que liga o ponto P ao centro da terra é chamada de latitude geocêntrica (o oposto de geodésica). Se a terra fosse perfeitamente esférica, a normal até um ponto iria passar pelo centro da terra, assim a geocêntrica e a geodésica coincidiriam (WALTER, 2017).

2.2.5.2 Conversão entre a Geodésica e Coordenadas Cartesianas

A conversão de elipsoidal para as coordenadas cartesianas pode ser realizada da seguinte forma:

$$\begin{aligned} X &= (N + h) \cos(\Phi) \cos(\lambda) \\ Y &= (N + H) \cos(\Phi) \sin(\lambda) \\ Z &= [(1 - e^2)(N + h) \sin(\Phi)] \end{aligned}$$

Onde:

Φ : Latitude geodésica

λ : Longitude geodésica

e : Excentricidade

h : Altitude acima da elipsoide

N : Raio de curvatura na vertical principal

2.2.5.3 Dados observados pelo GPS

As observáveis básicas do GPS são inferidas a partir da medida do tempo ou da diferença de fase entre os sinais recebidos dos satélites e os gerados internamente pelos receptores e podem ser identificadas como (MONICO, 2008):

- pseudodistância a partir do código;
- fase da onda portadora ou diferença de fase da onda portadora.

Ambas são tipos de medidas que representam a distância entre os satélites e o receptor.

2.2.5.3.1 Pseudodistância

Segundo Monico (2008), a distância é obtida pela multiplicação do tempo de propagação do sinal se propagando a velocidade da luz. Essa observável é denominada pseudodistância, diferentemente de distância, pois em razão ao não sincronismo entre os relógios responsáveis pela geração do código no satélite e sua réplica no receptor. Esses relógios nunca estão sincronizados, visto que a maioria dos receptores usam versões simples de osciladores de cristal de quartzo. Estes osciladores utilizados nos receptores não conseguem atingir o máximo de alinhamento com os osciladores dos satélites. Devido a isso, os receptores estimam as posições em função da pseudodistância a partir de cada satélite (SEGANTINE, 2005). Os osciladores dos satélites utilizam padrões atômicos de alta precisão, que operam no denominado sistema de tempo do satélite, no qual todos os sinais gerados e transmitidos são referenciados.

A pseudodistância pode ser encontrada calculando a diferença entre o tempo registrado no receptor no instante de recepção do sinal e o tempo registrado no satélite no instante da transmissão do sinal, multiplicado pela velocidade da luz no vácuo (MONICO, 2008). Estas medidas são provenientes tanto do código-C/A quanto do código-P.

Observa-se que as medidas da pseudodistância possuem uma degradação dada pelo erro de sincronização, comumente chamado de erro do relógio do receptor. Há algumas técnicas que permitem a eliminação desse erro, como, por exemplo, a medida da pseudodistância utilizando quatro satélites.

Para um sinal vindo do satélite s , a pseudodistância $P_{r,i}^{(s)}$ pode ser descrita usando o tempo do sinal de recepção $\bar{t}_r(s)$ medido pelo relógio do receptor e o tempo do sinal de transmissão $\bar{t}^{(s)}(s)$ medido pelo satélite como mostra a Equação 2.2 (SDR, 2021).

$$P_{r,i}^{(s)} = c(\bar{t}_r(s) - \bar{t}^{(s)}(s)) \quad (2.2)$$

A equação pode ser escrita usando a distância geométrica $\rho_r^{(s)}$ entre as antenas do satélite e do receptor, a diferença dos relógios do receptor e do satélite dt_r e dT^s , os atrasos causados pela ionosfera e pela troposfera $I_{r,i}^{(s)}$ e $T_r^{(s)}$ e o erro de medição ϵp (SDR, 2021), como descrito nas equações a seguir:

$$P_{r,i}^{(s)} = c((t_r + dt_r(t_r)) - (t^{(s)} + dT^{(s)}(t^{(s)}))) + \epsilon p \quad (2.3)$$

$$= c(t_r - t^{(s)}) + c(dt_r(t_r) - dT^{(s)}(t^{(s)})) + \epsilon p \quad (2.4)$$

$$= \rho_r^{(s)} + c(dt_r(t_r) - dT^{(s)}(t^{(s)})) + I_{r,i}^{(s)} + T_r^{(s)} + \epsilon p \quad (2.5)$$

onde:

- $P_{r,i}^{(s)}$ é a medida da pseudodistância (em metros);
- $\rho_r^{(s)}$ é a distância real entre o satélite e o receptor (em metros);
- c é a velocidade da luz no vácuo (em metros/segundo);
- dt_r é a diferença de tempo do relógio do receptor a partir do tempo do GNSS (em segundos);
- $dT^{(s)}$ é a diferença de tempo do relógio do satélite a partir do tempo GNSS (em segundos);
- $I_{r,i}^{(s)}$ é o atraso ionosférico (em metros);
- $T_r^{(s)}$ é o atraso troposférico (em metros);
- ϵp são erros de medição não caracterizados (em metros).

2.2.5.3.2 Fase da Onda Portadora

A fase da onda portadora é uma observável muito mais precisa e mais complexa de se definir do que a pseudodistância. Também conhecida como fase da portadora, essa observável é a fase de batimento da onda portadora. A fase portadora calculada pelo receptor GNSS é a diferença entre a fase do sinal gerado pelo satélite e a fase gerada pelo receptor (ENGE, 2010).

Quando comparado com o comprimento de onda do sinal, a fase da onda portadora caracteriza uma parcela da diferença da medida da fase do sinal emitido pelo satélite e a fase do sinal gerado pelo receptor, com uma grande parte da medida correlacionada com certos números de ciclos de sinais conhecidos previamente. Este número de ciclos é conhecido por ambiguidade de ciclos da portadora (SEGANTINE, 2005).

De acordo com Segantine (2005), "As medidas da fase da portadora são comparadas com seus comprimentos de onda convertidos de unidades de ciclos para unidades de comprimento".

2.2.6 Erros e Interferências

Essas duas observáveis, pseudodistância e fase da onda portadora, assim como outras observáveis vinculadas nos processos de medidas, estão sujeitas a erros aleatórios, sistemáticos e grosseiros. Para a obtenção de resultados confiáveis, o modelo matemático (funcional e estocástico) estabelecido deve ser válido para a realidade física a qual se tenta descrever, também deve ser capaz de detectar problemas. Assim, as fontes de erros envolvidas nos processos de medidas devem ser conhecidas de maneira satisfatória. Os erros sistemáticos podem ser parametrizados, modelados como termos adicionais, ou reduzidos ou até mesmo eliminados por técnicas adequadas de observação. Já os erros aleatórios não apresentam qualquer relação funcional com as medidas e são as divergências remanescentes nas observações, após a mitigação ou eliminação de todos os erros grosseiros e sistemáticos. Os erros aleatórios são inevitáveis, sendo considerados uma propriedade inerente da observação (MONICO, 2008). Existem uma quantidade considerável de erros e interferências que afetam os processos de medidas. Este trabalho não tem como foco descrever todos os erros existentes, descrevendo apenas aqueles que foram considerados mais relevantes.

2.2.6.1 Erros relacionados aos satélites

Alguns erros têm como fonte os satélites GNSS, como os erros relativos às órbitas e aos relógios dos satélites.

2.2.6.1.1 Erros orbitais

Os erros nas efemérides transmitidas pelo satélite são as mais difíceis de se lidar (WELLS et al., 1999). As coordenadas dos satélites calculadas a partir das efemérides são consideradas como fixas durante o processo de ajustamento dos dados dos satélites. Posto isso, erros nas coordenadas do satélite afetarão a determinação da posição do usuário. No posicionamento por ponto, os erros serão propagados quase diretamente para a posição do usuário. Os erros remanescentes degradam a acurácia das componentes da linha-base, à medida que está se torna mais longa (MONICO, 2008).

Uma regra muito útil, que expressa o erro na base como função do erro na posição do satélite (MONICO, 2008), está descrita na Equação 2.6.

$$\Delta b = b \frac{\Delta r}{r} \quad (2.6)$$

onde:

- Δb é o erro resultante na linha-base
- b é o comprimento da linha-base (km)
- Δr é o erro na posição do satélite
- r é a distância do satélite ao receptor

Para Wells et al. (1999), a principal forma de resolver problemas criados pela modelagem imperfeita de fenômenos físicos responsáveis por essas forças tem sido uma tratativa em suas fontes, isto é, desenvolvendo modelos mais precisos. Uma alternativa seria a possível utilização de modelos paramétricos de várias complexidades para os erros das efemérides.

2.2.6.1.2 Erros no relógio do satélite

Os relógios atômicos presentes nos satélites, embora altamente precisos, não acompanham o sistema de tempo a eles associados. Os sinais transmitidos pelos satélites GNSS são controlados por esses relógios, que influenciam diretamente a precisão do posicionamento. A diferença chega a ser, para o caso do GPS, no máximo, de 1 milissegundo (WELLS et al., 1999).

O relógio do satélite sofre com os efeitos relativísticos. Viajar a uma velocidade altíssima, na casa dos milhares de quilômetros por segundo, faz com que os relógios presentes nos satélites pareçam estar rodando mais lentamente que os relógios na superfície da terra, algo entorno dos 7 microssegundos por dia. Entretanto, estes efeitos nos relógios

em órbita são amenizados pela baixa gravidade ao seu redor. Esta baixa gravidade gera um efeito onde os relógios do satélite pareçam rodar mais rápidos que os relógios na terra, por volta dos 45 microssegundos. Levando em consideração os dois efeitos, por dia, os relógios dos satélites GPS parecem rodar 38 microssegundos mais rápidos que os relógios dos receptores no solo (SICKLE, 2015).

2.2.6.2 Erros relacionados a propagação

2.2.6.2.1 Refração Ionosférica

Situada entre aproximadamente 60 km até 1000 km, a ionosfera é constituída principalmente por elétrons livres, os quais interferem na propagação de ondas de rádio. Uma onda eletromagnética que cruza a ionosfera tem a sua velocidade e direção de propagação enviesada, caracterizando a ionosfera como um meio dispersivo (MATSUOKA; CAMARGO; BATISTA, 2009).

A ionosfera é considerada uma das principais fontes de erro sistemático no posicionamento com GPS. O erro gerado pela ionosfera nas observáveis GPS é diretamente proporcional ao *Total Electron Content* (TEC), ou seja, a quantidade de elétrons presentes ao longo do caminho percorrido pelo sinal entre o satélite e o receptor e inversamente proporcional ao quadrado da frequência do sinal. Um dos grandes problemas é que o TEC varia no tempo e no espaço, decorrente da variação da radiação solar, da localização e do campo geomagnético, além de outras irregularidades, como a anomalia equatorial e a cintilação ionosférica. Irregularidades como a cintilação ionosférica podem levar a perda de sintonia entre o receptor e o satélite (MONICO, 2008).

Segantine (2005) apresenta a Equação 2.7 para estimar o atraso devido ao TEC.

$$v = \frac{40.3}{cf} TEC \quad (2.7)$$

onde:

- v : atraso ionosférico
- c : velocidade da luz (em metros/segundo)
- f : frequência (em Hertz)
- TEC : elétron por metro cúbico. Possuindo valor máximo entre 10^{16} e 10^{19} (em metros cúbicos)

2.2.6.2.2 Refração Troposférica

A troposfera é a primeira camada e da atmosfera terrestre, se estendendo da superfície terrestre até próximo dos 20 km no equador e 8 km nos polos. Comporta-se, para frequências abaixo de 30 GHz, como um meio não dispersivo, ou seja, a refração é independente da frequência do sinal transmitido, dependendo apenas das propriedades termodinâmicas do ar (MONICO, 2008).

O erro causado pelo atraso troposférico é de aproximadamente 2,3 metros na direção zenital e aumentando com a cossecante do ângulo de elevação, alcançando de 20 metros para ângulo de 10 graus acima do horizonte. O atraso na troposfera depende da temperatura, umidade e pressão (PETROVSKI; TSUJII, 2012).

Os efeitos causados pela troposfera dependem da massa gasosa que se concentra nas camadas inferiores da atmosfera terrestre. Essa massa pode ser dividida em duas: uma composta de gases secos, chamada de componente hidrostática e a outra componente composta de vapor d'água, chamada componente úmida. A componente hidrostática pode ser precisamente descrita com acurácia de aproximadamente 1% pelos modelos disponíveis. O atraso do componente úmido, dependendo das condições atmosféricas, possuem uma acurácia não melhor que 1 ou 2 centímetros (SEEBER, 2003).

Segundo Dodo, N. e Yahya (2008), a Equação 2.8 é utilizada para expressar a refração troposférica.

$$N = \frac{77.6P}{T} + (3.73)10^5 \left(\frac{e}{T^2}\right) \quad (2.8)$$

onde:

- N : refração troposférica
- P : pressão atmosférica total
- T : temperatura (em Kelvin)
- e : pressão parcial do vapor de água (em milibar)

O componente hidrostático contribui com aproximadamente 90% do atraso causado pela troposfera. Esse componente pode ser calculado a partir da pressão medida no receptor. Esse atraso é expresso pela Equação 2.9, onde D_{dz}^{trop} é o atraso troposférico hidrostático em um determinado ângulo do zênite.

$$D_{dz}^{trop} = (77.62) \frac{P}{T} \quad (2.9)$$

O componente úmido contribui com os outros 10% do atraso troposférico total. Entretanto esse é o modelo mais difícil devido a variação da distribuição do vapor de água na atmosfera. Como resultado disso, o erro no componente úmido contribui com o fator mais significativo do sinal de refração. Esse atraso é expresso pela Equação 2.10, onde D_{wz}^{trop} é o atraso troposférico úmido em um determinado ângulo do zênite.

$$D_{wz}^{trop} = (12.96) \frac{e}{T} + (3.718) 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (2.10)$$

2.2.6.2.3 Multicaminhamento

O multicaminhamento se refere ao fenômeno de um sinal que chega a antena receptora por dois ou mais caminhos. Normalmente, a antena receptora recebe o sinal de forma direta e um ou mais sinais refletidos por estruturas nas proximidades, como edificações ou até mesmo refletidas pelo solo. Um sinal refletido é uma versão atrasada e muitas vezes mais fraca do sinal recebido diretamente. O erro na medida da distância devido ao erro do multicaminhamento depende da força do sinal refletido e do atraso entre o sinal direto e o refletido (ENGE, 2010).

Técnicas de mitigação do multicaminhamento são simples, mas geralmente são impraticáveis nos ambientes urbanos, onde possuem edifícios altos, que são particularmente responsáveis pela geração deste tipo de erro.

Meguro J.; Murata (2009) descreve uma técnica de mitigação do multicaminhamento que classifica satélites invisíveis, que é um satélite detectado pelo receptor, mas não possui uma *Line of Sight* (LOS). Essa técnica exclui os satélites invisíveis do cálculo da posição e a visibilidade do satélite é determinada pela projeção dos satélites no céu e das obstruções como as edificações, provando que é possível melhorar a acurácia ao determinar o posicionamento.

2.2.6.3 Erro relacionado ao receptor

Como foi dito anteriormente, os receptores GNSS são equipados com osciladores de quartzo, possuindo uma boa estabilidade interna e são relativamente baratos. Assim, cada receptor conta com a própria escala de tempo, definida por seu oscilador interno, a qual difere da escala de tempo do sistema. Há receptores que possuem osciladores altamente estáveis, mas são equipamentos de custo elevado, sendo utilizados em redes de alta precisão (MONICO, 2008).

O erro no relógio do receptor no instante das medições afeta igualmente a observação do tempo percorrido pelos sinais de todos os satélites, isso se torna a quarta incógnita a ser estimada, sendo adicionada as três coordenadas de posição. O usuário precisa de no mínimo quatro satélites para que possa ser realizado a estimativa quad-dimensional:

3 das coordenadas espaciais e uma do tempo. Pegando o erro do relógio do receptor dt e a velocidade da luz c , então cada posição em um determinado tempo estará errada por uma distância de cdt . A distância calculada erroneamente é a conhecida pseudodistância (MARQUES; KUGA; LOPES, 2003).

2.2.7 Principais formas de correção

2.2.7.1 *Satellite-based Augmentation Systems* (SBAS)

O desempenho do GNSS pode ser melhorado pelo *Satellite-based Augmentation Systems* (SBAS). O SBAS melhora a acurácia e a confiabilidade da informação do GNSS corrigindo erros de medição de sinal, fornecendo informações sobre a acurácia, integridade, continuidade e disponibilidade do sinal (EUSPA, 2021). O SBAS transmite os dados para os usuários por meio da frequência igual a L1 do GPS, porém em um formato diferente.

O SBAS utiliza uma rede de monitoramento de integridade que está disposta sobre uma área geográfica. Essas estações recebem os sinais de navegação transmitidos pelos satélites GNSS e retransmitem os dados a um computador que faz o processamento central, o qual avalia o sinal e calcula as correções necessárias, como os erros do relógio dos satélites e atrasos ionosféricos e troposféricos. A estação de processamento central estima os erros na transmissão, para cada satélite GNSS monitorado, e transmite as correções para as Estações de Enlace de Subida (Uplink) que as envia aos satélites geoestacionários SBAS. A partir desses satélites, a mensagem de correção é transmitida ao usuário (ALBARICI, 2011).

2.2.7.2 *Differential GNSS* (DGNSS)

A técnica DGNSS constitui-se na determinação da posição do GNSS a partir de uma busca acurada de uma posição, conhecida como estação de referência. Esse método consegue tomar vantagem de erros devido a predição das efemérides, erros do relógio dos satélites e atrasos ionosféricos e troposféricos. Começando pela estação de referência, o sistema calcula e transmite as correções das medidas da pseudodistância para os usuários do DGNSS. Para aplicar essas correções, o receptor deve estar habilitado para receber dados do DGNSS e estar nas proximidades da estação de referência para assegurar que os dois receptores, estação e usuário, estejam visualizando o mesmo satélite. Erros como o multicaminhamento podem não ser corrigidos por este método, necessitando a aplicação de técnicas específicas para a mitigação desses erros (ESA, 2020).

A acurácia do DGNSS está na ordem de 1 metro para usuários que estão a uma distância na casa das dezenas de quilômetros da estação de referência, aumentando a taxa de 1 metro a cada 150 quilômetros de distância.

O algoritmo do DGNS é baseado em diferenças únicas de observáveis da pseudo-distância. Em uma determinada época, e um dado satélite, a Equação 2.11 simplifica a observância da pseudodistância (ESA, 2020).

$$P = p + I + Tr + c(b_{Rx} - b_{Sat}) + \epsilon_P \quad (2.11)$$

onde:

- I : é o atraso do sinal devido a ionosfera;
- T_r : é o atraso do sinal devido a troposfera;
- b_{Rx} : é o erro do relógio receptor;
- b_{Sat} : é o erro do relógio do satélite;
- c : é a velocidade da luz no vácuo;
- ϵ_P : erros atribuídos a medição, incluindo multicaminhamento e outros efeitos;
- p : é a distância geométrica entre o satélite e o receptor.

2.2.7.3 Real Time Kinematic (RTK)

O Posicionamento Cinemático em Tempo Real é uma técnica de posicionamento relativo. A técnica RTK utiliza a coleta de dados por meio de uma estação de referência e os transmite para uma estação móvel, conhecido como *Rover*, através de um link de rádio. O receptor da estação móvel processa esses dados em tempo real, com uma solução quase instantânea do vetor de ambiguidades. Esse método se utiliza da fase portadora, ao invés da pseudodistância que é empregado no DGNS, o que melhora de modo considerável a qualidade dos resultados (SEEBER, 2003).

As mensagens transmitidas pelo RTK contêm as medidas da fase da onda portadora e pseudodistâncias coletadas na estação de referência e as correções às respectivas medidas, que são enviadas para a estação móvel, junto com outras informações. As correções são apoiadas no conhecimento da posição da estação de referência, na posição dos satélites e no comportamento do relógio dos satélites, já corrigindo o erro do relógio da estação-base. Os atrasos da troposfera e da ionosfera não são considerados, pois as aplicações deste método são limitadas às distâncias curtas, onde esses efeitos são considerados idênticos nas duas estações e ficam bastante reduzidos nas equações DD (duplas diferenças) (SEEBER, 2003) (MONICO, 2008).

2.2.7.4 *Precise Point Positioning* (PPP)

O Posicionamento por Ponto Preciso é um método de pós-processamento de dados GNSS. Esse método permite aos usuários com receptores GPS e/ou GLONASS, adquirir coordenadas referenciadas ao Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS2000) e ao *International Terrestrial Reference Frame* (ITRF) por meio de um processamento preciso (IBGE, 2020).

O PPP estima de forma precisa as órbitas e o relógio do satélite baseado em observações de alta qualidade por uma rede global. Essa informação é usada para resolver os parâmetros de qualquer lugar no mundo (SEEBER, 2003).

No Brasil existe um serviço online gratuito chamado de IBGE-PPP que processa dados GNSS (GPS e GLONASS) que foram coletados por receptores de uma ou duas frequências no modo estático ou cinemático. Para a utilização desse serviço, é necessário que o usuário informe o arquivo de observação no formato RINEX ou HATANAKA, se a captura foi no modo estático ou cinemático, o modelo e a altura da antena utilizada. Após o processamento, será disponibilizado em um link com o arquivo com os resultados (IBGE, 2020).

3 Suporte Tecnológico

Essa sessão descreve os hardwares e softwares utilizados para a coleta de dados de geolocalização através de receptores GNSS. Para escolhas dos equipamentos foi levando em consideração o relativo baixo custo, afim de visualizar quais erros esses equipamentos estão sujeitos e se há alguma forma de mitigar estes erros.

3.1 Hardware

3.1.1 Smartphones

Foi utilizado um smartphone modelo Redmi Note 10 da marca Xiaomi. Esse smartphone possui o sistema operacional Android na versão 12, que é a mais recente. Possui um sistema de posicionamento que suporta GPS, Galileo, GLONASS e BeiDou. Para o sistema GPS, o smartphone possui suporte apenas ao sinal L1 ([XIAOMI, 2021](#)).

3.1.2 Notebook

Um notebook modelo Inspiron 15 da marca Dell foi utilizado para auxiliar a coleta e uso dos softwares envolvidos nas análises dos dados. O sistema operacional foi o Windows 10 Pro de 64 bits na versão 21H2.

3.1.3 U-Blox NEO-6M

Outro equipamento utilizado para a captura de dados foi o U-Blox NEO-6M que é um módulo GPS de fácil conexão, muito utilizado devido ao seu peso, seu baixo consumo de energia e por ser seu preço acessível. Sua arquitetura compacta e baixo consumo de energia o torna ideal para dispositivos portáteis que utilizam bateria, de baixo custo e possuem uma limitação de espaço.

O NEO-6M utiliza comunicação serial, na captura foi utilizado a interface *Universal Asynchronous Receiver / Transmitter* (UART), a qual permite a comunicação entre o módulo GPS e a placa Arduino. Esse módulo possui suporte a frequência GPS L1 e possui uma acurácia de até 2.5 metros ([UBLOX, 2021a](#)).

3.1.4 Arduino Uno R3

Para o envio dos dados do módulo GPS ao computador foi escolhido o Arduino Uno, um microcontrolador (ATmega328P) que possui 14 pinos digitais e suporte a comunicação UART. O Arduino também conta com uma conexão do tipo *Universal Serial Bus*

(USB) para que seja conectado a um computador. Essa conexão proporciona a troca de dados entre o computador e o dispositivo, além da alimentação do mesmo.

3.2 Softwares

3.2.1 GNSS *Logger* e GNSS *Analysis*

Dispositivos Android compatíveis com medições brutas podem utilizar de ferramentas para registrar e analisar dados GNSS. Nesse trabalho foi utilizado o GNSS *Logger*, que é um aplicativo que permite registrar dados de localização do usuário do dispositivo Android, incluindo medições GNSS brutas. O GNSS *Logger* e captura dados dos sistemas GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou e Quasi-Zenith Satellite System.

Após a coleta de dados com o GNSS *Logger*, é possível analisar as medições brutas através do programa GNSS *Analysis*, o qual lê as medições brutas de GNSS coletados pelo GNSS *Logger* e as utiliza para analisar o comportamento do receptor (ANDROID, 2019). Os dados são plotados em gráficos interativos, facilitando a leitura dos dados por parte do usuário.

3.2.2 U-Center

O *u-center* é uma ferramenta de avaliação e visualização de dados GNSS coletados por um módulo GNSS *U-Blox*. O *u-center* pode se comunicar com os receptores utilizando os protocolos UBX ou *National Marine Electronics Association* (NMEA) e gerar registros em ambos os protocolos (UBLOX, 2021b).

Todos os dados coletados com os módulos *U-Blox* são apresentados no *u-center*. Todos os aspectos dos dados GNSS como, posição, velocidade, tempo, satélites entre outras informações podem ser monitoradas e registradas.

3.3 Protocolos

Nesta seção, serão descritos os protocolos que foram utilizados para os registros dos dados obtidos pelos receptores. Protocolos são convenções que determinam um conjunto de regras, padrões e especificações técnicas. Esses protocolos independem do sistema operacional de cada equipamento, pois estabelece regras que uniformizam a comunicação, permitindo uma troca de dados de maneira eficiente.

3.3.1 NMEA-0138

O protocolo NMEA é um conjunto de especificações de dados para comunicação de dispositivos eletrônicos de navegação, como receptores GNSS. A Figura 3 mostra a

estrutura de uma mensagem NMEA.

Figura 3 – Estrutura da mensagem NMEA.

Protocolo NMEA

\$	<Address>	{,<value>}	*<checksum>	<CR><LF>		
Caracter inicial Sempre '\$'	Campo de endereço Apenas dígitos e letras maiúsculas, não podendo ser nulo. Esse campo é subdividido em dois campos. <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <tr> <td><XX></td> <td><XXX></td> </tr> </table>	<XX>	<XXX>	Campo(s) de dados Delimitado por vírgula. Tamanho pode variar, mesmo que para um certo campo	Campo de verificação Inicia com '*' e consiste em dois caracteres representando um número hexadecimal. A verificação é um OU exclusivo de todos caracteres entre '\$' e '*'	Fim da sequência Sempre <CR><LF>
<XX>	<XXX>					
Identificador do transmissor, sempre GP para um receptor GPS, P para mensagens proprietárias	Formatador de sentença. Define o conteúdo da mensagem					
Exemplo:						
\$	GP ZDA	,141644.00,22,03,2002,00,00	*67	<CR><LF>		

Fonte: Traduzido de (UBLOX, 2021a)

Como mostrado na Figura 3, as regras do protocolo são as seguintes:

- Toda mensagem começa com o símbolo cifrão (\$);
- O segundo campo é o de endereço. São permitidos apenas letras maiúsculas e dígitos. Esse campo é dividido em dois subcampos:
 - O primeiro subcampo indica a origem da mensagem;
 - O segundo subcampo indica o tipo da mensagem;
- O terceiro campo é o de dados. Os dados são delimitados por vírgulas, e seu tamanho pode variar;
- O quarto campo são de dígitos verificares e começa com um asterisco (*) que é seguido por dois caracteres, os quais são representados na forma hexadecimal e são uma disjunção exclusiva dos dados presentes no segundo e terceiro campos da mensagem;
- A mensagem termina com uma quebra de linha que é representada por <CR><LF> ou "\n".

3.3.2 GNSS *Logger Raw Message*

O GNSS *Logger* e o GNSS *Analisis*, além do suporte ao protocolo NMEA, possuem um protocolo próprio para o registro de dados brutos gerados por smartphones com sistema operacional Android na versão 10 ou superior.

3.4 Informações Fornecidas Pelas Ferramentas

Esta seção descreve algumas das funcionalidades dos programas utilizados para realizar a coleta de dados através do receptor de um celular e do receptor dedicado *U-Blox*. Para cada equipamento, há um software com uma série de ferramentas para a visualização das informações extraídas dos dados recebidos. Os dados apresentados nesta seção são apenas um conjunto de teste que foram coletados para fins informativos.

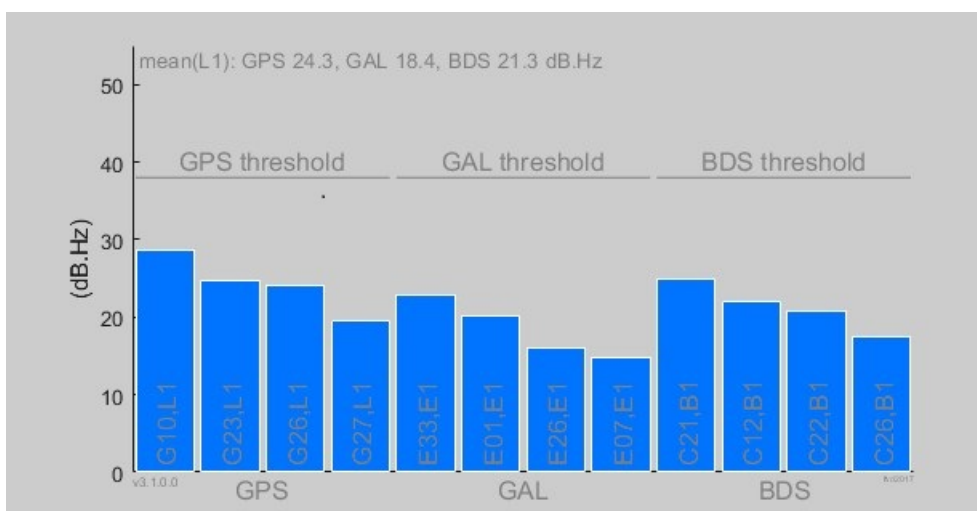
3.4.1 Informações do GNSS *Logger*

A coleta realizada pelo celular foi através do aplicativo GNSS *Logger*. Essa coleta gerou um arquivo proprietário que posteriormente será enviado a um computador no qual ele será processado pelo GNSS *Analisis*. Também foi gerado um arquivo no padrão NMEA. O programa possui uma funcionalidade para que seja aplicado filtro Kalman.

Os dados do arquivo proprietário foram plotados pelo programa GNSS *Analisis* conforme as Figuras 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13. Essas imagens exemplificam algumas das funcionalidades oferecidas pelo programa.

A Figura 4 mostra os quatro satélites com os sinais mais fortes das constelações GPS, Galileo e BeiDou. Neste trabalho apenas serão consideradas as informações provenientes dos satélites GPS.

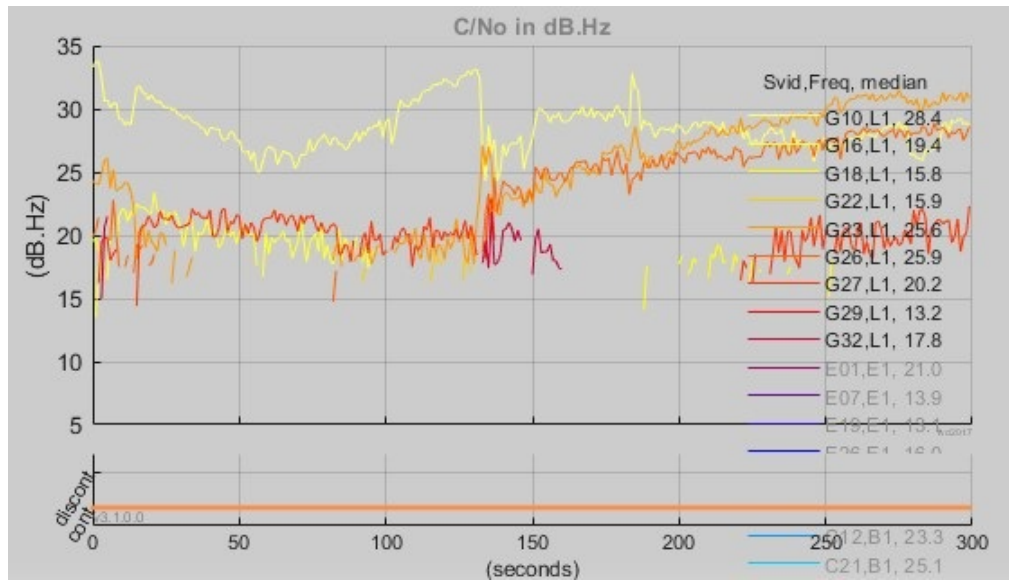
Figura 4 – Sinais mais fortes dos satélites



Fonte: Autoria Própria

A Figura 5 mostra para cada satélite, o gráfico de tempo da portadora pela densidade do ruído. Nesta imagem se destacam os sinais dos satélites G10, G23, G26 e G27, todos da constelação GPS.

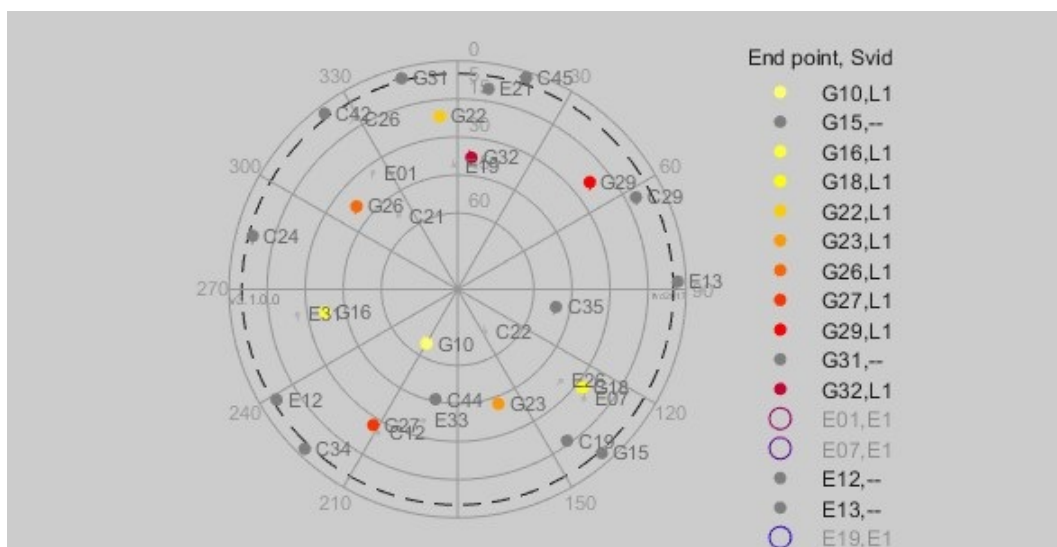
Figura 5 – Densidade do ruído



Fonte: Autoria Própria

A Figura 6 mostra as posições dos satélites no céu. Os satélites que estão coloridos são os possíveis de se extrair informações. Os iniciados em "G" são da constelação GPS e os iniciados em "E" da Galileo.

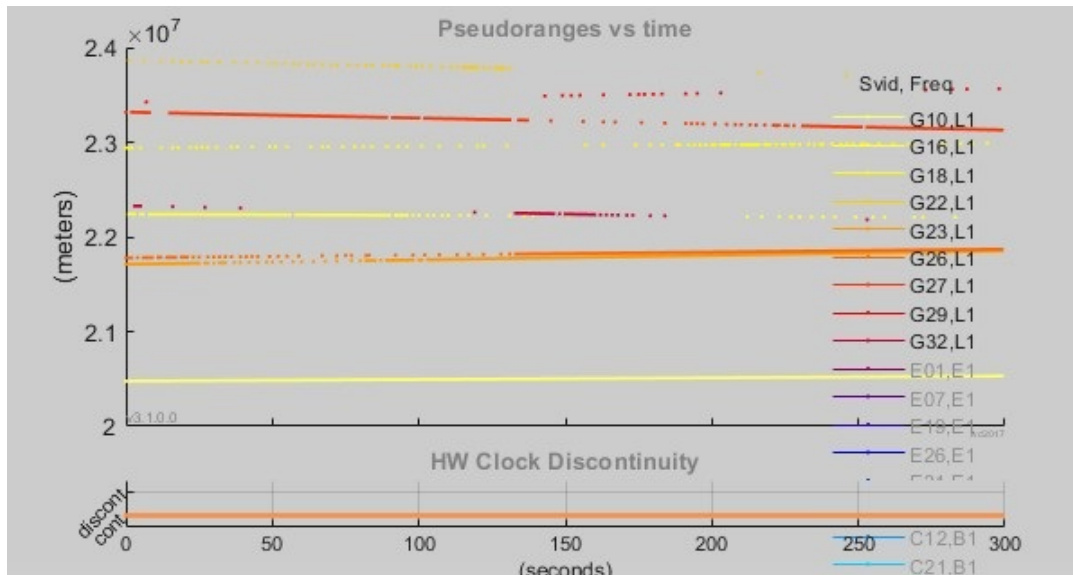
Figura 6 – Posições dos satélites no céu



Fonte: Autoria Própria

A Figura 7 mostra as pseudodistâncias pelo tempo. Se houver uma drástica mudança no relógio, como um pulso na ordem dos milissegundos, será possível visualizar nas pseudodistâncias.

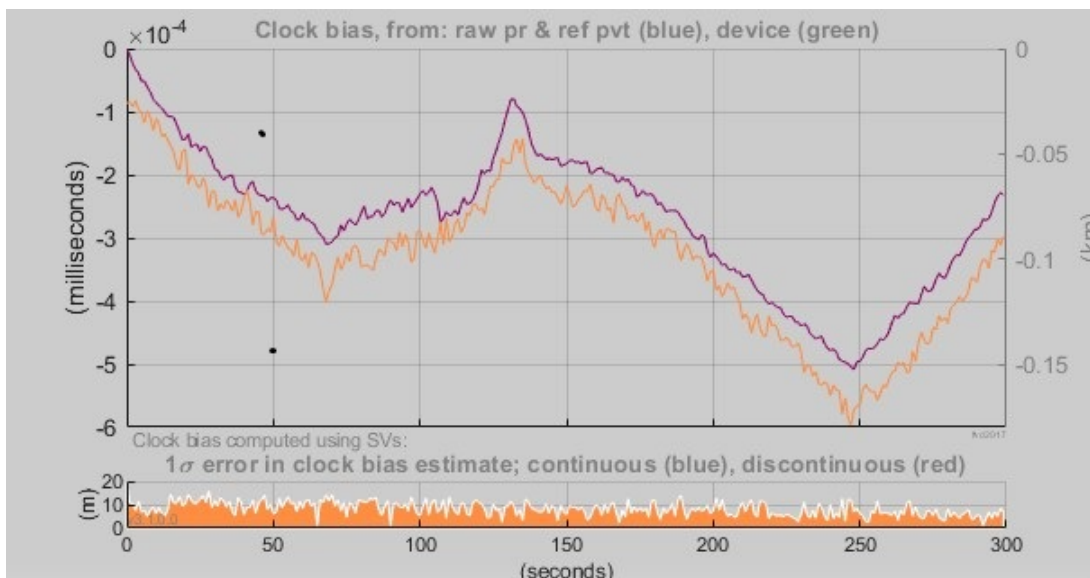
Figura 7 – Pseudodistâncias pelo tempo



Fonte: Autoria Própria

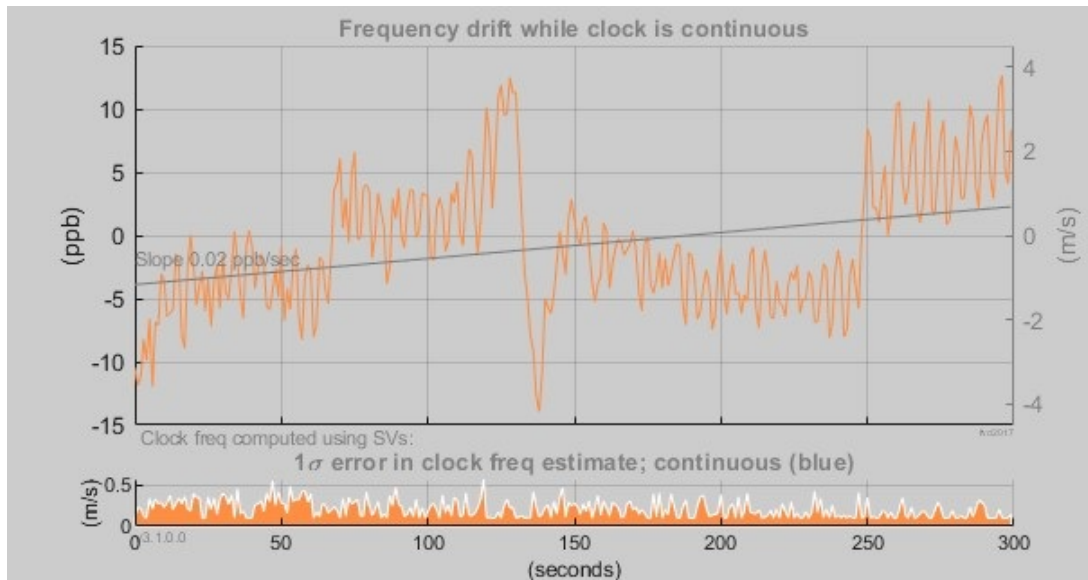
A Figura 8 mostra diferença da frequência do relógio do receptor, sendo alinha azul a de referência e a verde a do receptor. A Figura 9 mostra o deslocamento do relógio em espera que mantém a hora quando o receptor redefine o ciclo de trabalho do oscilador.

Figura 8 – Diferença da frequência do relógio do receptor



Fonte: Autoria Própria

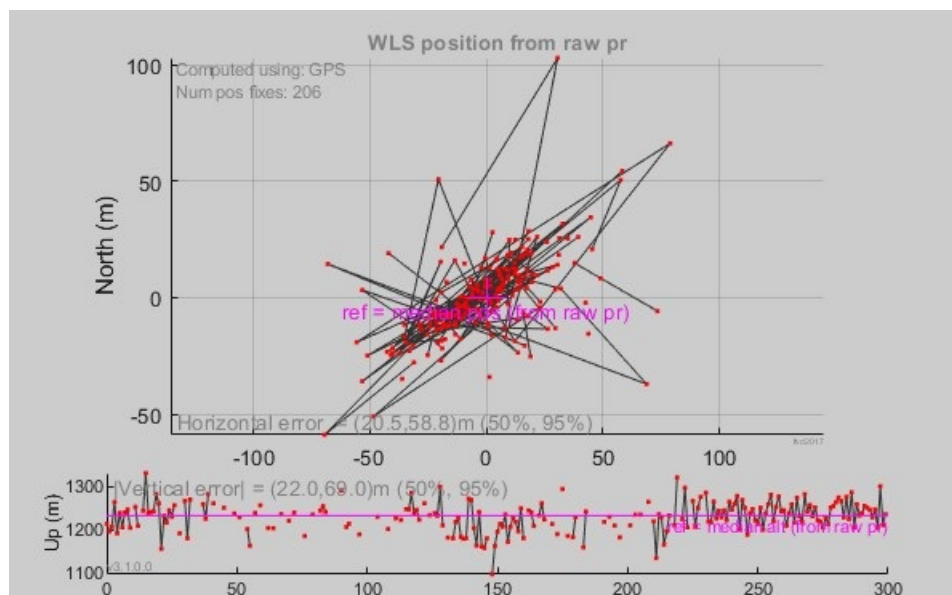
Figura 9 – Deslocamento do relógio em espera



Fonte: Autoria Própria

A Figura 10 mostra os resultados da posição dos mínimos quadrados ponderados obtidos da pseudodistância bruta.

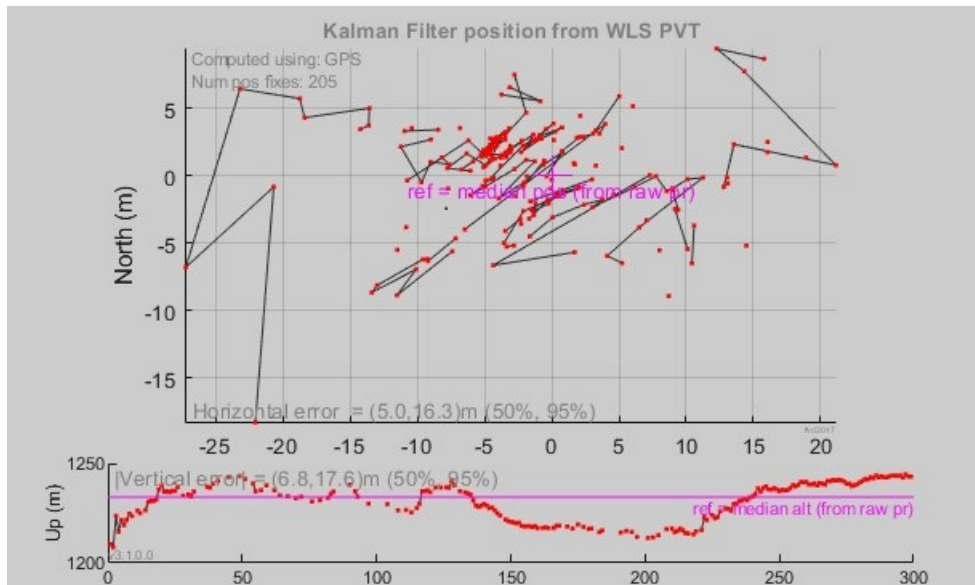
Figura 10 – Posição obtidos através de dados brutos



Fonte: Autoria Própria

A Figura 11 mostra os resultados da posição dos mínimos quadrados ponderados obtidos da pseudodistância bruta, aplicado o filtro Kalman. Segundo Neto (2014), a função deste filtro é resolver problemas de estimação de estado em sistemas lineares ou linearizados. É a técnica de estimação de estado mais difundida.

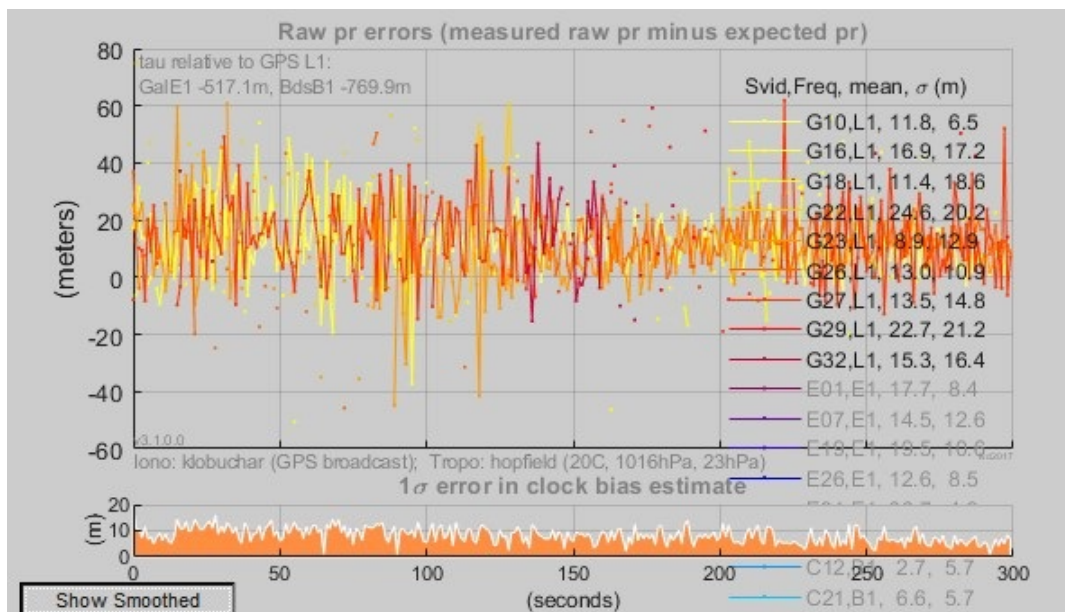
Figura 11 – Posição obtidos através de dados brutos aplicado filtro Kalman.



Fonte: Autoria Própria

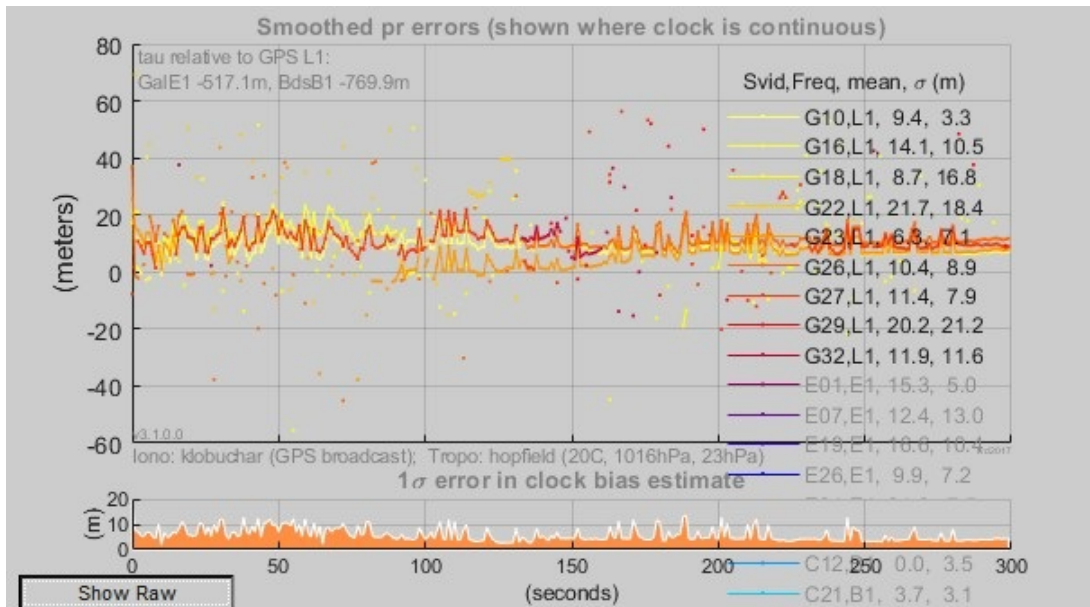
As Figuras 12 e 13 mostram, respectivamente, os erros de cada pseudodistância para cada medição e os erros de cada pseudodistância para cada medição aplicando uma suavização. Elas apresentam os erros residuais das medições individuais. O erro residual é a diferença entre o valor coletado e o valor esperado.

Figura 12 – Erros de cada pseudodistância.



Fonte: Autoria Própria

Figura 13 – Erros de cada pseudodistância suavizados.



Fonte: Autoria Própria

3.4.2 Informações do *U-Center*

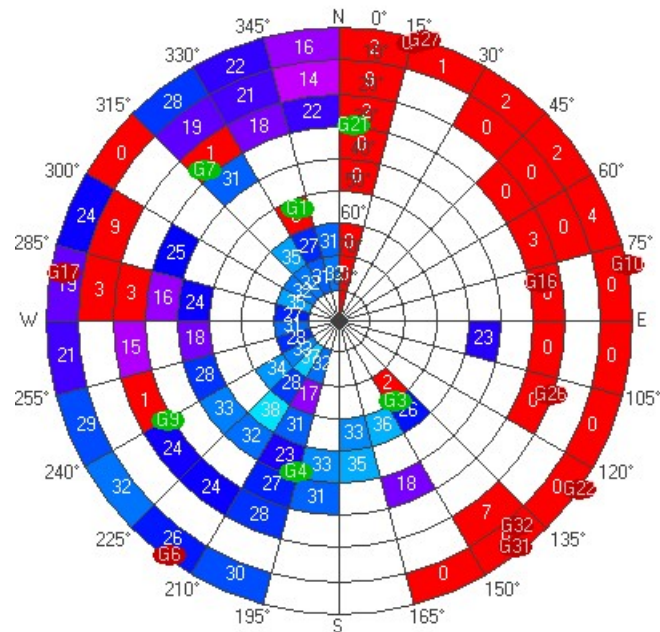
A coleta realizada pelo *U-Blox* modelo NEO-6M foi através de uma conexão com um Arduino Uno, o qual foi conectado a um computador. Os dados captados pelo receptor foram enviados para o computador e visualizados no programa *U-Center*. Essa coleta gerou um arquivo no padrão NMEA.

Este dispositivo não permite a extração dos dados brutos, os quais são gerados pelo mecanismo de rastreamento e incluem medições para cada satélite rastreado. É uma cópia das medições que a tarefa de navegação principal do receptor usa internamente. Os dados brutos, em seu nível mais básico, podem conter informações do satélite, a fase da portadora e o *Doppler*. Os dados coletados e utilizados neste trabalho são tratados pelo sistema SBAS citado na Seção 2.2.7.1, onde, os dados são recebidos pelos satélites geostacionários SBAS, os quais transmitem a mensagem corrigida ao usuário.

Os dados do arquivo NMEA foram plotados pelo programa *U-Center* conforme as Figuras 14, 15, 16 e 17.

A Figura 14 mostra algumas informações sobre os satélites, como a força do sinal, sua posição no céu, a identificação dos satélites e também indica quais satélites estão sendo utilizados pelo receptor. Os satélites de cor verde são os utilizados pela navegação (com efemérides). Os satélites de cor azul possuem sinal disponível, mas não estão sendo utilizados pelo receptor. Os de cor vermelha o sinal não está disponível.

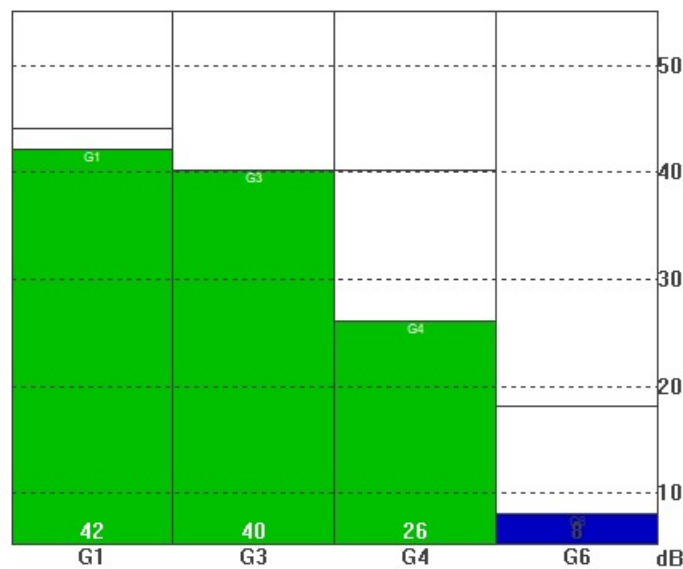
Figura 14 – Informações sobre os satélites



Fonte: Autoria Própria

A Figura 15 mostra os satélites GPS e a força do seu sinal. Todos os os satélites mostrados são da constelação GPS.

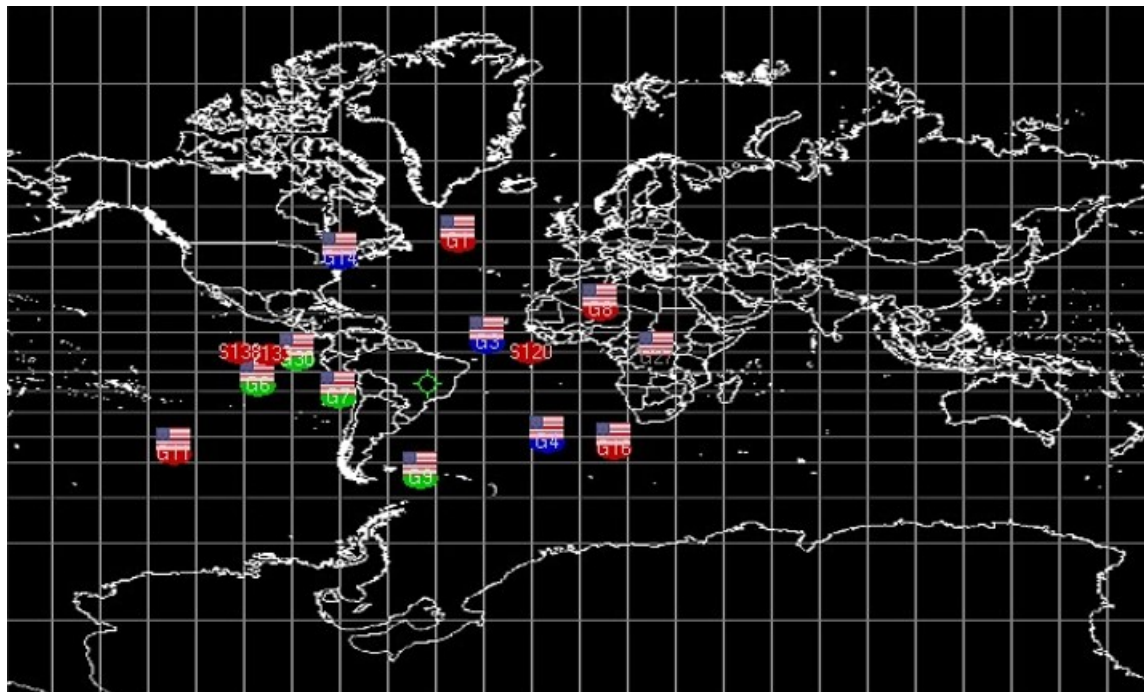
Figura 15 – Força dos sinais dos satélites



Fonte: Autoria Própria

A Figura 16 mostra o a posição do receptor e dos satélites em um mapa-múndi. Os satélites em verde, G6, G7, G9 e G30 são os que foram utilizados pelo receptor para calcular a posição do receptor.

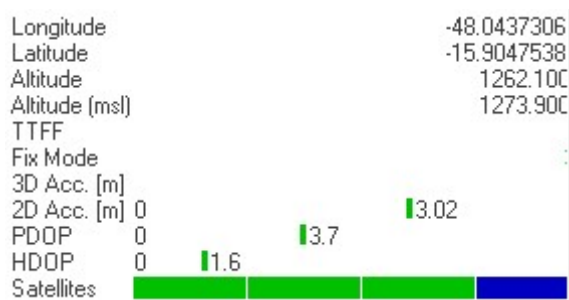
Figura 16 – Posição do usuário e dos satélites



Fonte: Autoria Própria

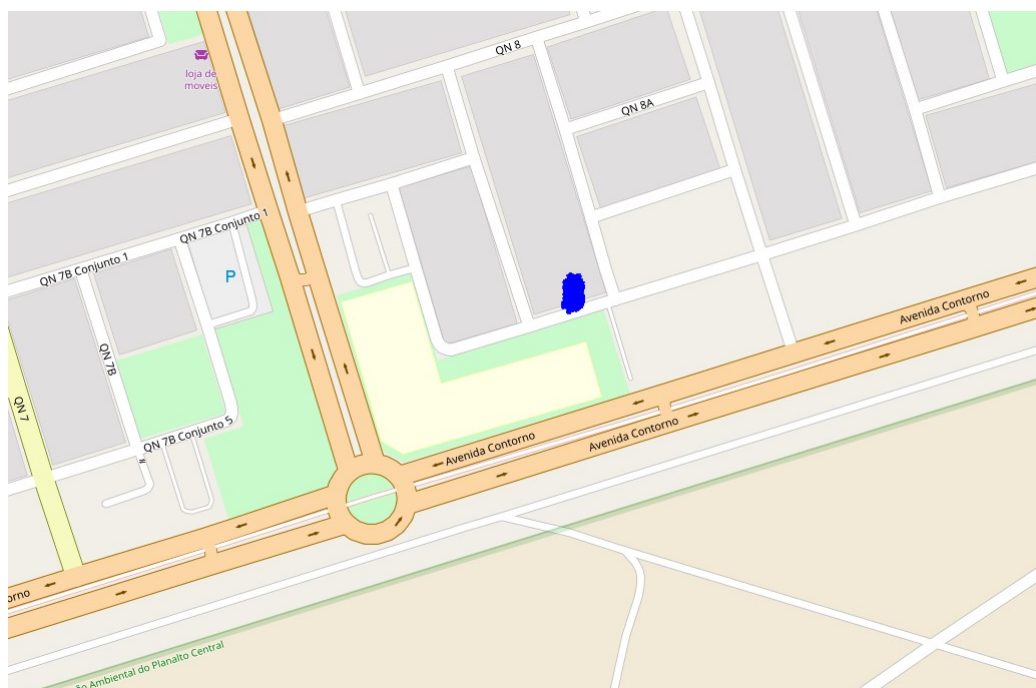
A Figura 17 mostra alguns dados da navegação como a posição, a *Time To First Fix* (TTFF), que é uma medida utilizada pelos dispositivos de navegação GPS para receber sinais e dados de navegação dos satélites, a acurácia e o *Dilution of precision* (DOP), que é a diluição geométrica da precisão e especifica a propagação do erro como um efeito matemático da geometria envolvida entre a antena do receptor e os satélites (SILVEIRA, 2008).

Figura 17 – Posição do usuário e dos satélites



Fonte: Autoria Própria

Figura 20 – Plotagem de dados obtidos pelo *U-Blox*



Fonte: Autoria Própria

4 Metodologia

De acordo com [Gerhardt e Silveira \(2019\)](#), "Metodologia científica é o estudo sistemático e lógico dos métodos empregos nas ciências, seus fundamentos, sua validade e sua relação com as teorias científicas". Tendo traçado certos objetivos, o método científico compreende um conjunto de dados iniciais e um sistema de operações apropriadas para a formulação de conclusões.

Segundo [Oliveira \(2011\)](#), a metodologia de pesquisa adotada neste trabalho pode ser classificada de acordo com as cinco categorias a seguir: quanto aos objetivos da pesquisa, quanto à natureza da pesquisa, quanto à escolha do objetivo de estudo, quanto à técnica de coleta de dados e quanto à técnica de análise de dados. A escolha das classificações em cada categoria visa preparar com o conhecimento necessário para o desenvolvimento deste trabalho, sendo escolhidas as metodologias que seriam adequadas a proposta do mesmo.

4.1 Escolhas Metodológicas

Para este trabalho, foi seguido o modelo proposto por [Gerhardt e Silveira \(2019\)](#), o qual diz que uma pesquisa científica pode ser classificada nas categorias: abordagem da pesquisa, natureza da pesquisa, objetivos da pesquisa e procedimentos.

4.1.1 Abordagem da pesquisa

A classificação deste trabalho em relação à abordagem da pesquisa é definida como quantitativa. Segundo [Oliveira \(2011\)](#), a pesquisa quantitativa é caracterizada pelo uso da quantificação, tanto nas modalidades de coleta de informações quanto no tratamento delas. [Gerhardt e Silveira \(2019\)](#) cita que a pesquisa quantitativa recorre à linguagem matemática para descrever as causas de um fenômeno, as relações entre variáveis entre outros.

O emprego da pesquisa quantitativa neste trabalho teve como objetivo o entendimento detalhado dos fenômenos que interferem nos dados coletados por receptores GNSS, identificando as fontes de erros e suas possíveis correções. Como citado no Capítulo 2.2, alguns erros e interferências possuem modelos matemáticos que descrevem tais fenômenos.

4.1.2 Natureza da Pesquisa

A classificação deste trabalho em relação à natureza da pesquisa é definida como aplicada. De acordo com [Prodanov e Freitas \(2013\)](#), a pesquisa aplicada tem como objetivo

gerar conhecimento para aplicação prática dirigidos à solução de problemas específicos.

A utilização da pesquisa aplicada neste trabalho visa solucionar um problema recorrente no contexto dos sistemas GNSS.

4.1.3 Objetivos da Pesquisa

A classificação deste trabalho em relação aos da pesquisa é definida como exploratória. Para [Gil \(1991\)](#), estas pesquisas têm como objetivo proporcionar maior familiaridade com o problema visando explicitá-lo. A pesquisa exploratória é a porta de entrada para o pesquisador que não conhece suficientemente bem a área abordada.

A escolha da pesquisa exploratória neste trabalho se deve pela necessidade de aprofundamento sobre o funcionamento e interferências sofridas pelos receptores GPS, com o objetivo de analisar os dados provenientes de receptores GNSS de baixo custo e as possíveis correções para estes dados.

4.1.4 Procedimentos

A classificação deste trabalho em relação aos procedimentos pode ser dividida em duas partes. A primeira é o de pesquisa bibliográfica. De acordo com [Gerhardt e Silveira \(2019\)](#), a pesquisa bibliográfica é realizada a partir do levantamento de referências teóricas já analisadas, e publicadas por meios de livros, artigos científicos, páginas na web, entre outros.

O outro procedimento utilizado foi o observacional. A observação é considerada uma coleta de dados para conseguir informações sob determinados aspectos da realidade. Dos métodos de observação existentes, a observação na vida real foi a empregada neste trabalho, pois ela permite colher os dados à medida que vai acontecendo o fenômeno, de modo natural ([OLIVEIRA, 2011](#)).

A escolha dos procedimentos de pesquisa bibliográfica e o método observacional vai ao encontro do que é descrito por [Oliveira \(2011\)](#), o qual cita que "a maioria das técnicas de pesquisa devem ser utilizadas juntamente com outra técnica de pesquisa, pois, do ponto de vista científico, essa técnica possui vantagens e limitações que podem ser administradas com o uso concorrente de outras técnicas de pesquisa".

4.1.5 Cronograma

O curso de Engenharia de Software da Universidade de Brasília (UnB) exige a realização de dois trabalhos de conclusão de curso (TCC). O primeiro TCC tem como foco a escolha do tema, determinar os pilares teóricos para o embasamento do projeto, assim como escolher e se familiarizar com os equipamentos que auxiliarão o desenvolvimento

do projeto. Para o segundo TCC, o trabalho esteve focado em atingir o objetivo geral de coletar e processar dados gerados por receptores GNSS, com o propósito de analisar os dados obtidos em alguns cenários para verificar como a acurácia do posicionamento é afetado pelas variáveis, com base nas fundamentações teóricas levantadas na primeira etapa do trabalho de conclusão.

As atividades realizadas no TCC 1 foram: selecionar tema, definir metodologia, definir suporte tecnológico, realizar pesquisa bibliográfica, escrever referencial teórico, explorar equipamentos e apresentar TCC 1. O cronograma dessas atividades foram divididas conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Cronograma de atividades TCC 1

Atividade	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maió
Selecionar tema	X				
Definir metodologia	X	X			
Definir suporte tecnológico	X	X			
Realizar pesquisa bibliográfica	X	X	X	X	X
Escrever referencial teórico		X	X	X	X
Explorar equipamentos			X	X	X
Realizar coleta de teste			X	X	X
Apresentar TCC 1					X

Fonte: Autoria Própria

As atividades realizadas no TCC 2 foram: redefinir cenários, desenvolver ferramenta para análise dos resultados, coletar dados, plotar dados coletados, analisar resultados e apresentar TCC 2. O cronograma dessas atividades foram divididas conforme a Tabela 3.

Tabela 3 – Cronograma de atividades TCC 2

Atividade	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro
Redefinir cenários	X				
Desenvolver ferramenta para análise dos resultados	X	X	X		
Coletar dados	X	X	X	X	
Plotar dados coletados	X	X	X	X	
Analisar resultados		X	X	X	
Apresentar TCC 2					X

Fonte: Autoria Própria

4.2 Coleta de Dados

Nesta seção será descrita como foi realizado o processo de coleta de dados para criar os cenários propostos. Como descrito previamente, foram escolhidos equipamentos

e softwares que fossem acessíveis e permitissem a coleta de dados GNSS de maneira prática. Antes de iniciar a coleta, foi realizado um levantamento bibliográfico para o melhor entendimento das principais fontes de erro dos receptores GNSS e como isso afeta quem usa receptores de baixo custo.

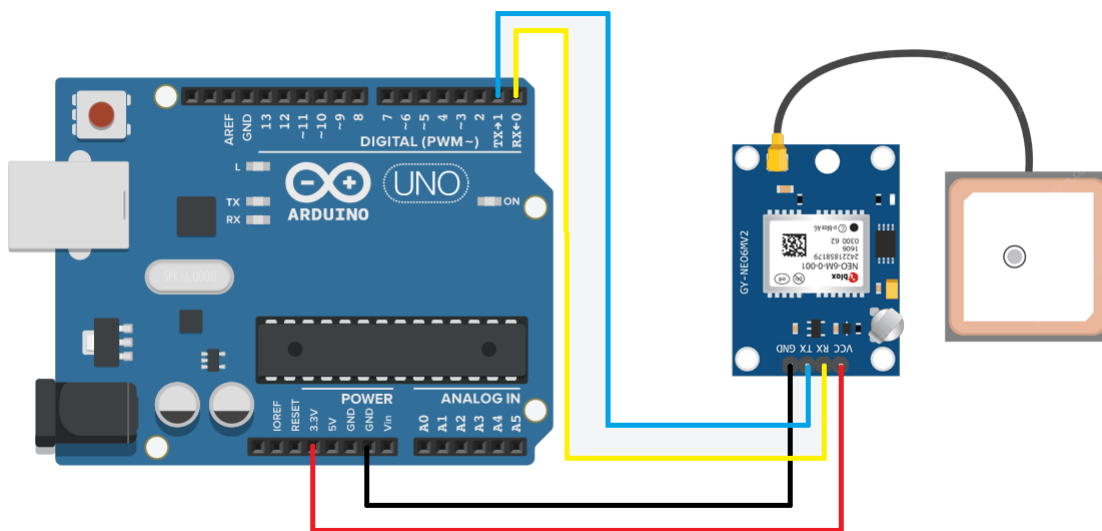
4.2.1 Preparação

Como informado no início deste capítulo, dois equipamentos foram escolhidos para a coleta de dados, um smartphone rodando Android 12 e um *U-Blox* NEO-6M. O software escolhido para a coleta com o smartphone foi o *GNSS Logger* (Versão 3.0.5.6), gerando arquivos no protocolo NMEA e no protocolo proprietário do aplicativo. Para a coleta de dados do *U-Blox* foi necessário a utilização de um Arduino Uno, pois facilita o interfaceamento entre o módulo GNSS e o computador.

Os softwares para análise dos dados foram *U-Center* (Versão 21.05), para a visualização em tempo real e registro dos dados gerados pelo *U-Blox*, e o *GNSS Analysis* (Versão 4.0.0.0) para os dados gerados pelo *GNSS Logger*. Nenhum tipo de equipamento que possibilitaria uma referência como *ground-truth* foi utilizado, devido a ausência de um equipamento desta natureza.

As conexões entre o Arduino e o *U-Blox* podem ser vista na Figura 21.

Figura 21 – Conexões entre Arduino e *U-Blox*.



Fonte: Autoria Própria

Foi determinado que a coleta seria realizada dentro de um automóvel e cobririam os seguintes cenários:

- **1º Cenário:** Parado no descampado;

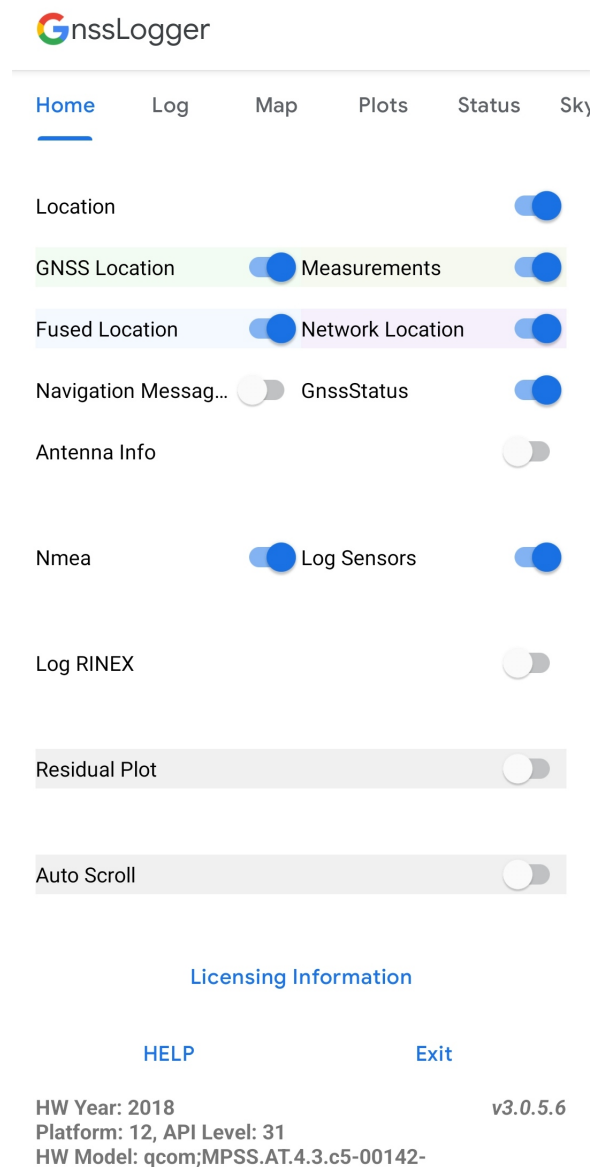
- **2º Cenário:** Se locomovendo a céu aberto;
- **3º Cenário:** Se locomovendo por entre edifícios.

4.2.2 Configuração dos equipamentos

4.2.2.1 Celular

As configurações utilizadas para a coleta através do GNSS *Logger* foram as que vem por padrão no aplicativo. A frequência que os dados são coletados é de 1 Hz. A Figura 22 apresenta a configuração *default* do aplicativo.

Figura 22 – Configuração do GNSS *Logger*.

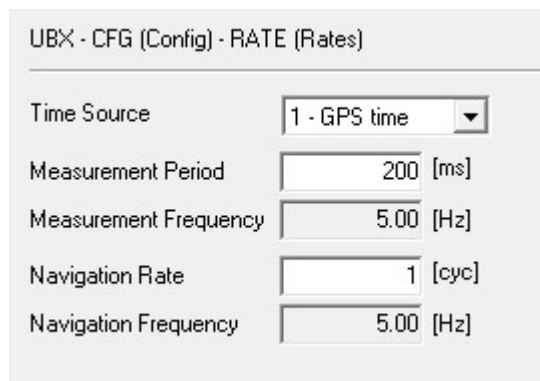


Fonte: Autoria Própria

4.2.2.2 U-Blox

Por padrão, o equipamento apresenta uma frequência de coleta de 5 Hz e um protocolo de mensagem proprietária do equipamento, o *UBX protocol*. Essa configuração foi alterada para que as mensagens fossem apresentadas no protocolo NMEA. Para realizar a mudança da configuração do *U-Blox*, foi utilizado o programa *U-Center*. As configurações utilizadas para a coleta através do *U-Blox* são as apresentadas nas Figuras 23 e 24.

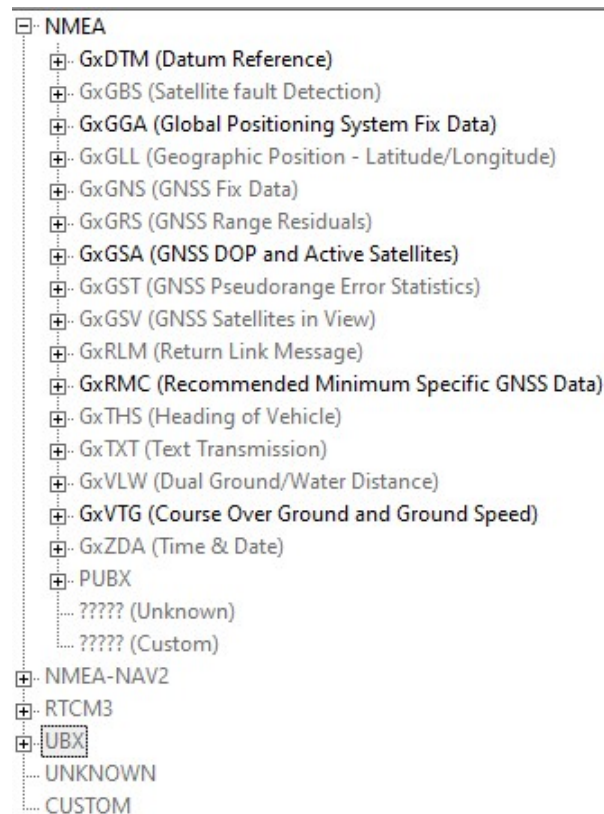
Figura 23 – Menu para configurar a frequência de medição



UBX - CFG (Config) - RATE (Rates)	
Time Source	1 - GPS time
Measurement Period	200 [ms]
Measurement Frequency	5.00 [Hz]
Navigation Rate	1 [cyc]
Navigation Frequency	5.00 [Hz]

Fonte: Autoria Própria

Figura 24 – Configuração para apresentar mensagens no protocolo NMEA



Fonte: Autoria Própria

4.2.3 Problema de Sincronização

Os equipamentos possuem diferenças na frequência de captura dos dados. O *U-Blox* possui uma frequência padrão de 5 Hz, podendo variar até 10 Hz. O *GNSS Logger* possui a frequência fixa de 1 Hz. Para solucionar o problema de sincronização entre os equipamentos, foi utilizado a interpolação por *splines* cúbicas.

4.2.3.1 Interpolação por *Splines* Cúbicas

A interpolação por *spline* cúbica é utilizada para a aproximação por polinômios seccionados de terceiro grau. [Justo et al. \(2020\)](#) define que para um *spline* de ordem m , dado um conjunto de n pontos $I = (x_j, y_j)_{j=1}^n$ tais que $x_{j+1} > x_j$, isto é, as abscissas são distintas e estão em ordem crescente. Um *spline* de ordem m que interpola estes pontos é uma função s com as propriedades a seguir:

- Em cada intervalo $[x_j, x_{j+1}]$, $j = 1, 2, \dots, n-2$ e no segmento x_{n-1}, x_n s é um polinômio de grau menor ou igual a m ;
- Alguns intervalos s é um polinômio de grau m ;
- Para cada $x_j \in I$, $s(x_j) = y_j$, ou seja, o *spline* interpola os pontos dados;
- s é uma função de classe C^{m-1} , ou seja, é uma função $m - 1$ vezes continuamente diferenciável.

Para solucionar o problema de sincronização, será o caso onde $m = 3$, pois reproduz o comportamento físico de réguas delgadas com estrutura elástica homogênea e perfil uniforme sujeitas aos vínculos representados pelos pontos do conjunto I ([JUSTO et al., 2020](#)). Assim, será possível definir os pontos ausentes na medição do equipamento de menor frequência, e fazer uma comparação ponto a ponto entre os dois dispositivos.

4.2.4 Distância das Posições Medidas

Para calcular a distância entre as posições medidas, foi utilizado a formula de *haversine*, ou seja, a menor distância entre dois pontos na superfície da terra. Esta formula permite que a distância seja calculada diretamente pela latitude e longitude de dois pontos, como mostra a equação a seguir ([VENESS, 2019](#)):

$$\begin{aligned} a &= \sin^2(\Delta\varphi/2) + \cos \varphi_1 * \cos \varphi_2 * \sin^2(\Delta\lambda/2) \\ c &= 2 * \arctan 2(\sqrt{a}, \sqrt{1-a}) \\ d &= R * c \end{aligned}$$

onde:

- φ : latitude;
- δ : longitude;
- R : raio terrestre em quilômetros;
- c : a distância angular em radianos;
- a : é o quadrado da metade do comprimento da linha entre os pontos.

4.2.5 Arquivo Gerado Pelos Equipamentos

Os arquivos gerados pelos equipamentos estão no padrão NMEA, citado na Seção 3. Os arquivos são processados pelo programa presente no repositório apresentado no Apêndice A para que seja solucionado o problema de sincronização, conforme reportado na Seção 4.2.3.1. Por fim, o arquivo é gerado com a distância entre os equipamentos utilizando a fórmula apresentada na Seção 4.2.4. Os dados das distâncias foram utilizados para gerar gráficos exibidos na Capítulo 5

4.2.6 Cenários da coleta

A coleta foi realizada duas vezes para cada cenário. Sendo a primeira de dentro do carro, com os receptores posicionados no colo do passageiro e a segunda com os receptores posicionados no para-brisa do veículo. A foi iniciada a coleta dos dados por ambos dispositivos, celular e *u-blox*. Os dados da coleta serão obtidos através de sinais GPS.

Para o primeiro cenário, o local escolhido foi o estacionamento da Faculdade do Gama (FGA), como mostra o ponto roxo na Figura 25. Os receptores devem estar posicionados a céu aberto.

Figura 25 – Parado no Estacionamento da FGA



Fonte: Autoria Própria

Para o segundo cenário, o local escolhido foi o perímetro do estacionamento da FGA, como mostra a linha roxa na Figura 26. Com o carro em movimento, serão realizadas duas coletas, uma com o receptor dentro do carro e a outra com o receptor fora do carro.

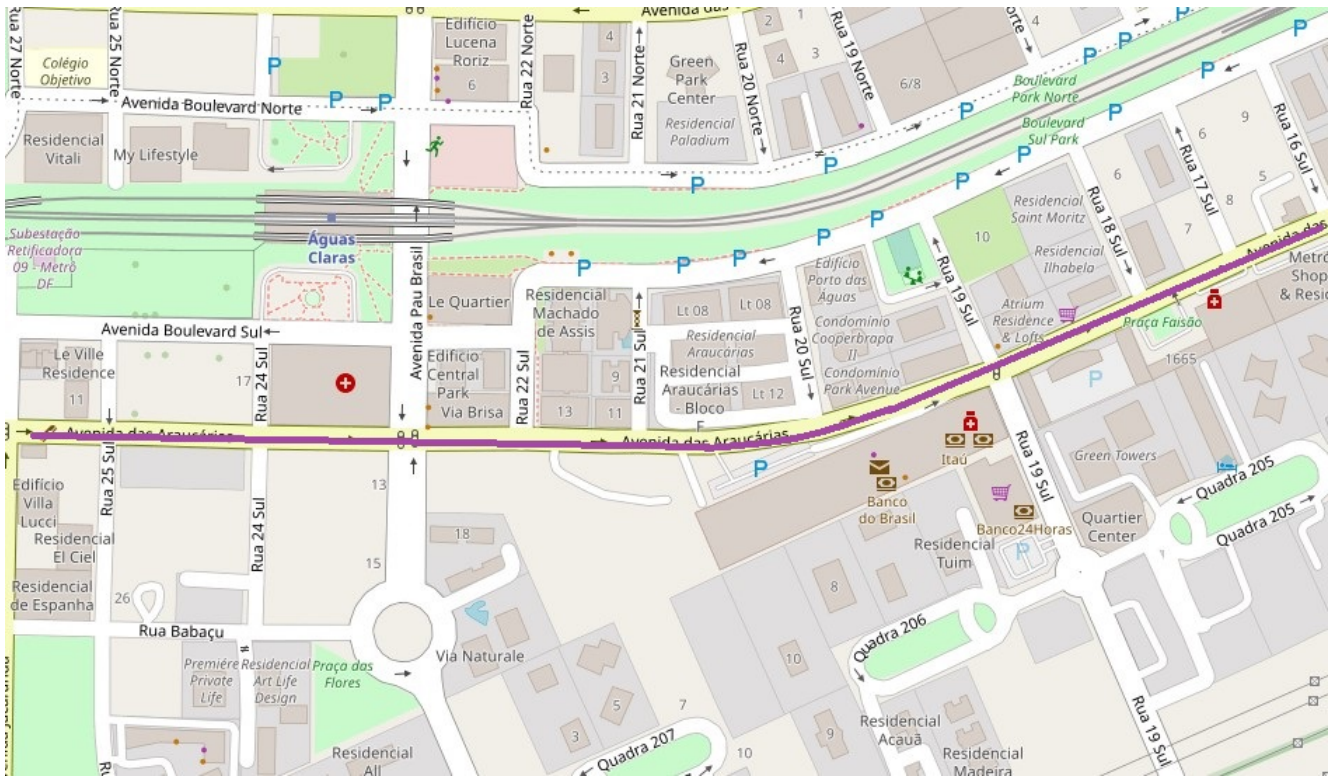
Figura 26 – Andando no Estacionamento da FGA



Fonte: Autoria Própria

Para o último cenário, o local escolhido foi um trecho da Avenida das Araucárias na cidade de Águas Claras, como mostra a linha roxa na Figura 27. Com o carro em movimento, serão realizadas duas coletas, uma com o receptor dentro do carro e a outra com o receptor fora do carro.

Figura 27 – Avenida das Araucárias - Águas Claras



Fonte: Autoria Própria

5 Experimentos e Resultados

Esta seção descreve os dados coletados de acordo com os procedimentos descritos na Seção 4.2. Também será mostrado uma comparação entre os dispositivos, plotando o posicionamento de ambos em um mapa.

Os mesmos dados utilizados para plotar no mapa, serão aproveitados para serem comparados em gráficos que mostram a diferença de medição entre os dois. Os dados coletados pelos receptores e o programa desenvolvido para auxiliar o processamento destes dados estão disponíveis no repositório apresentado no Apêndice A. O *output* gerado pelo programa serviu para a criação dos gráficos apresentados nesta seção.

5.1 Primeiro Cenário

As coletas do primeiro cenário foram realizadas no estacionamento da FGA. A Figura 28 exibe o resultado da coleta.

Figura 28 – Parado no Estacionamento da FGA, sensores a céu aberto



Fonte: Autoria Própria

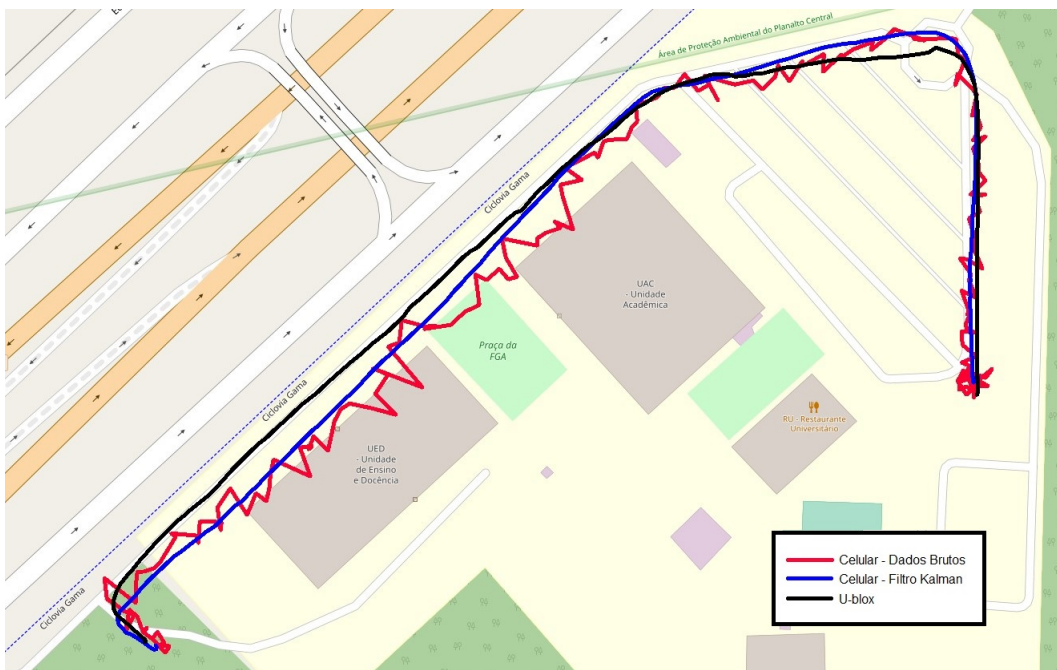
Mesmo os equipamentos estando fixos e a céu aberto no primeiro cenário, é perceptível a variação que ocorre com os dados coletados pelo celular.

5.2 Segundo Cenário

As coletas do segundo cenário foram realizadas no estacionamento da FGA. As duas coletas foram realizadas no mesmo dia. As Figuras 29, 30, 31, 32 e 33 exibem os resultados das duas coletas.

Na Figura 29 é plotado no mapa as coletas com os equipamentos dentro do carro. A distância entre as medições é nítida.

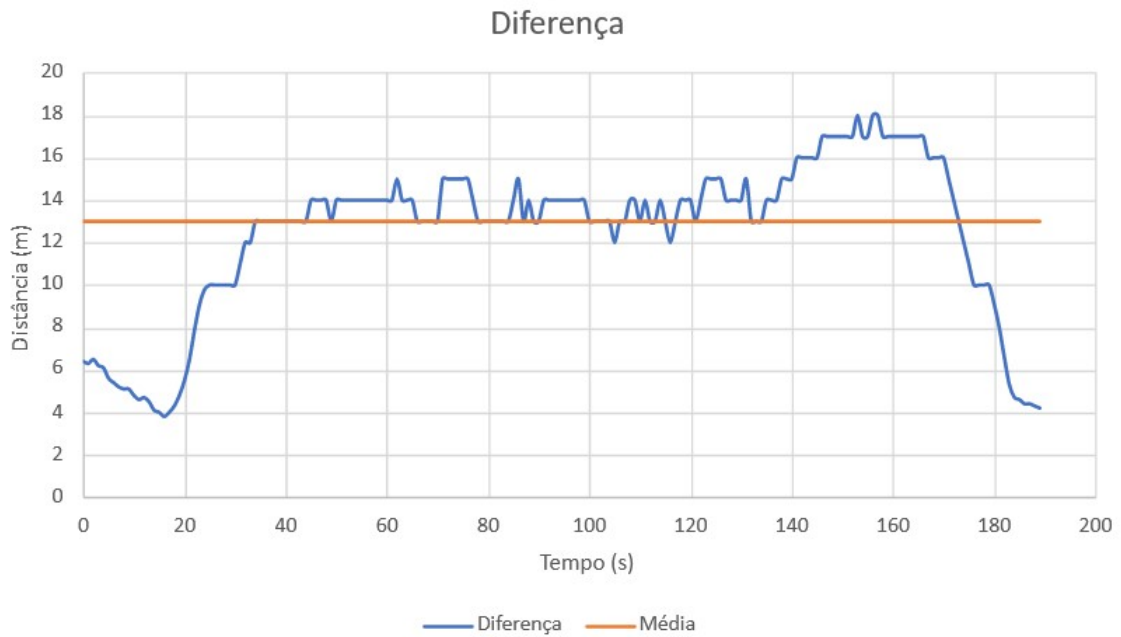
Figura 29 – Andando no estacionamento da FGA, sensores dentro do carro



Fonte: Autoria Própria

A Figura 30 apresenta a diferença entre as coletas do segundo cenário com os equipamentos dentro do veículo. A distância máxima entre a coleta foi de 18 metros, tendo uma média de 12,4 metros.

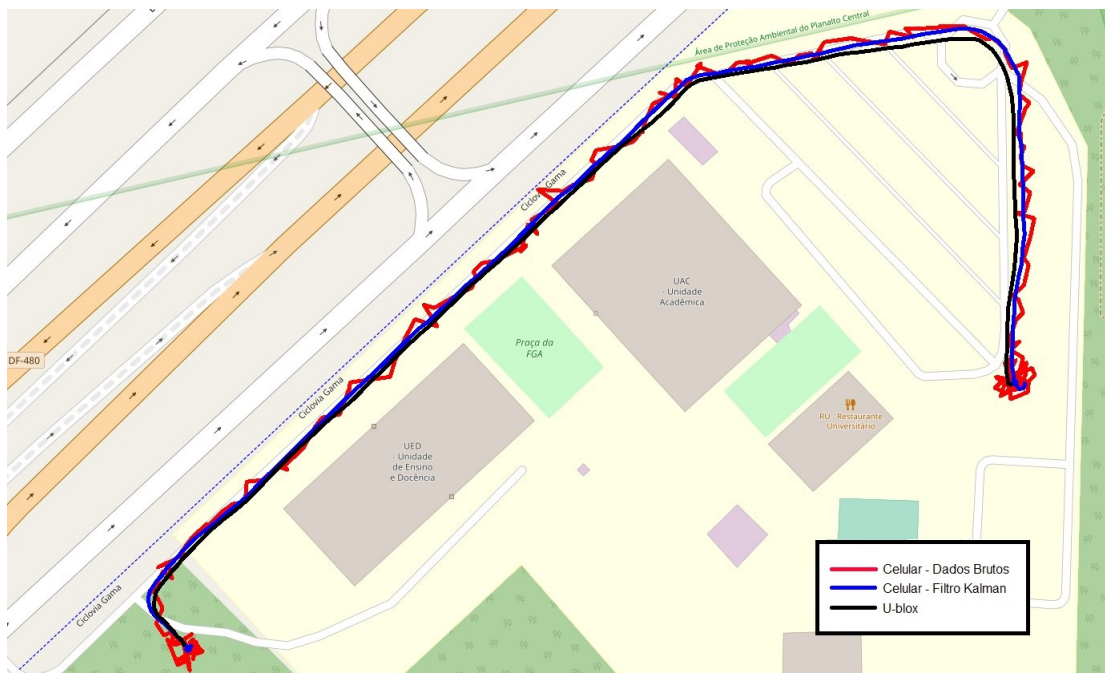
Figura 30 – Gráfico da diferença entre as medições



Fonte: Autoria Própria

Na Figura 31 é plotado no mapa as coletas com os equipamentos fora do carro. Em relação a coleta de dentro do veículo, este cenário apresenta uma maior aproximação entre as duas coletas.

Figura 31 – Andando no estacionamento da FGA, sensores fora do carro

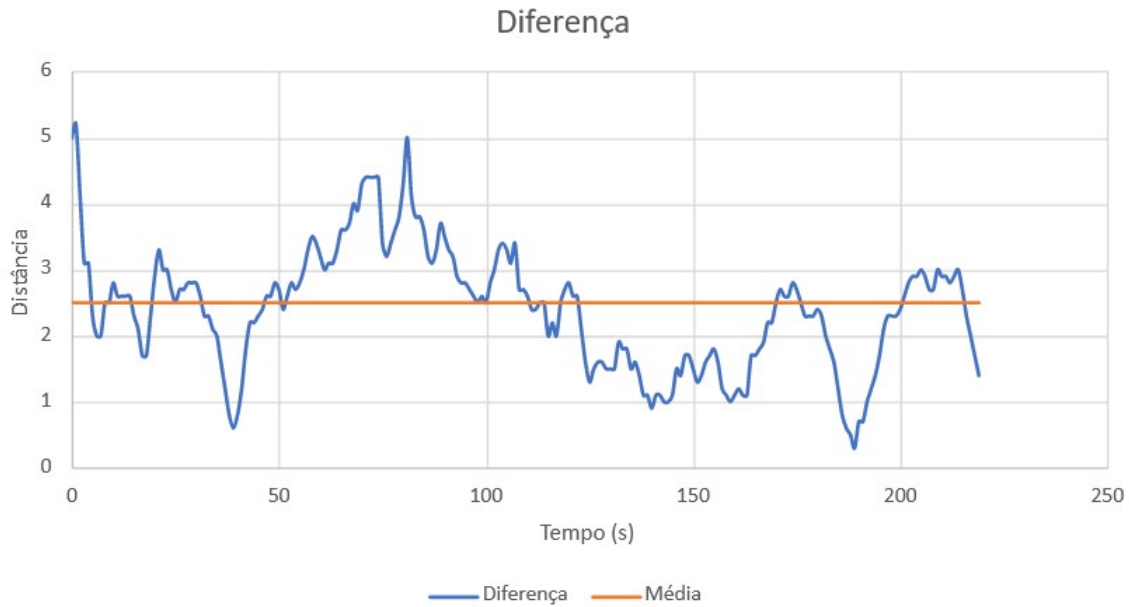


Fonte: Autoria Própria

A Figura 32 apresenta a diferença entre as coletas do segundo cenário com os equipamentos fora do veículo. A distância máxima entre a coleta foi de 5,2 metros, tendo

uma média de 2,5 metros.

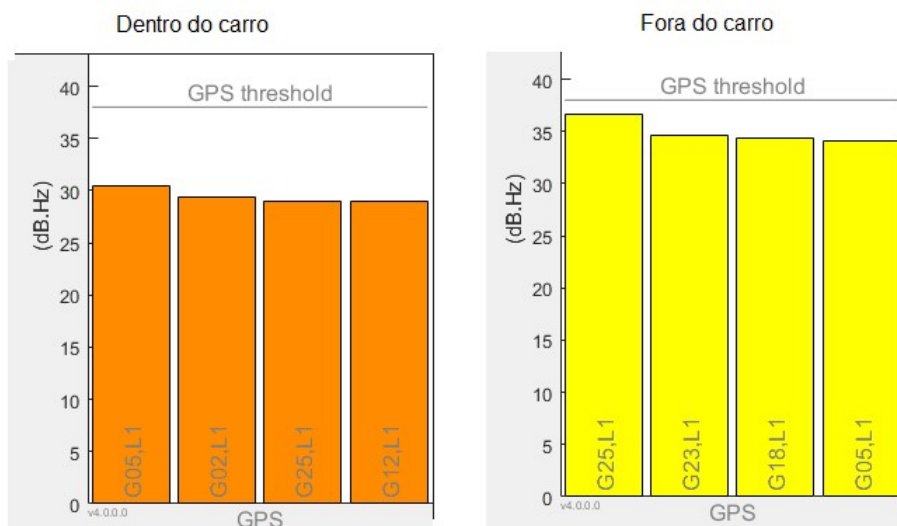
Figura 32 – Gráfico da diferença entre as medições



Fonte: Autoria Própria

A comparação da força do sinal do segundo cenário entre o celular dentro e fora do carro é apresentada na Figura 33. É perceptível que a força do sinal é maior quando o receptor está fora do carro.

Figura 33 – Força do sinal das coletas do segundo cenário



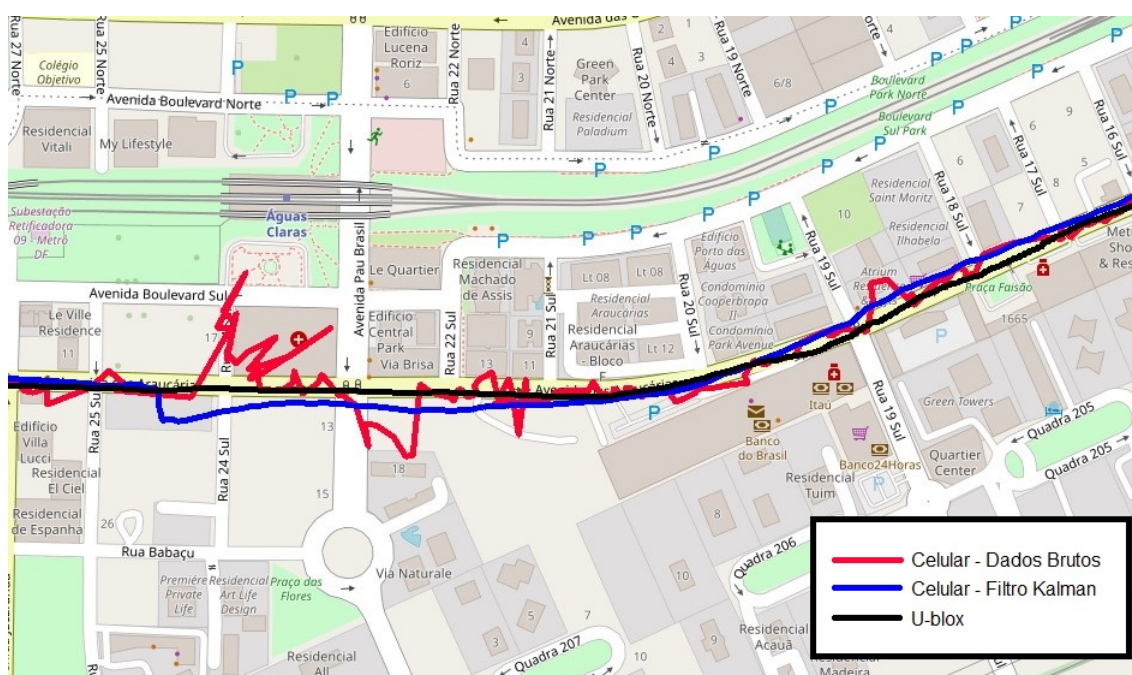
Fonte: Autoria Própria

5.3 Terceiro Cenário

As coletas do terceiro cenário foram realizadas na Avenida das Araucárias - Águas Claras. As duas coletas foram realizadas no mesmo dia. As Figuras 34, 35, 36, 37 e 38 exibem os resultados das duas coletas.

Na Figura 34 é plotado no mapa as coletas com os equipamentos dentro do carro. Em uma parte do percurso, a diferença aumenta de forma acentuada.

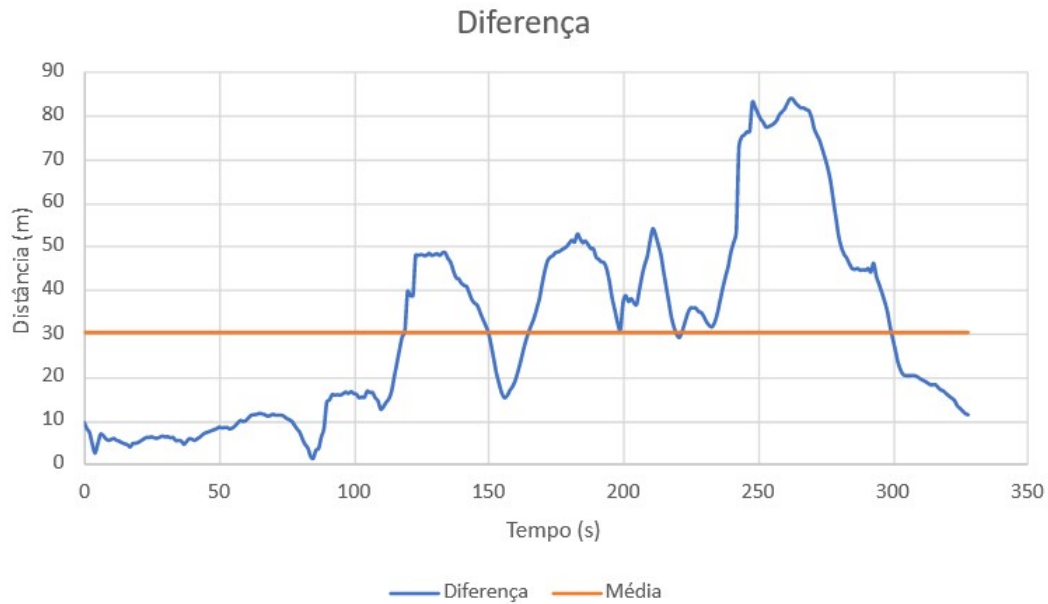
Figura 34 – Avenida das Araucárias - Águas Claras, sensores dentro do carro



Fonte: Autoria Própria

A Figura 35 apresenta a diferença entre as coletas do terceiro cenário com os equipamentos dentro do veículo. A distância máxima entre a coleta foi de 83,9 metros, tendo uma média de 30,2 metros.

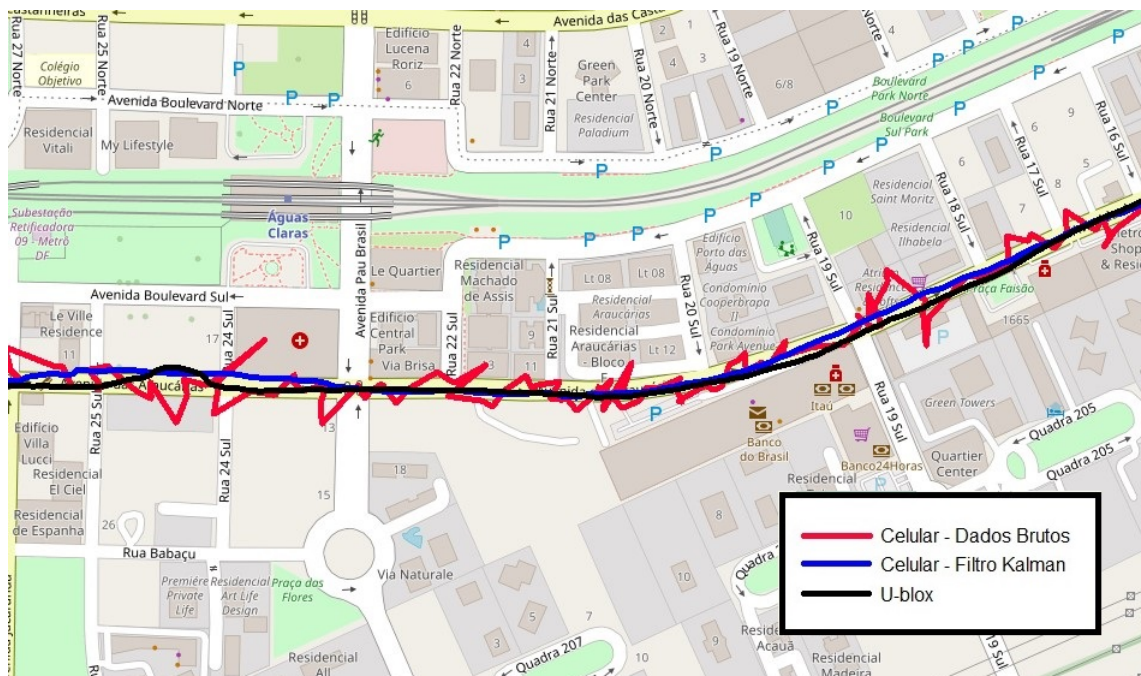
Figura 35 – Gráfico da diferença entre as medições



Fonte: Autoria Própria

Na Figura 36 é plotado no mapa as coletas com os equipamentos fora do carro. Houve uma diminuição na diferença entre as duas medições.

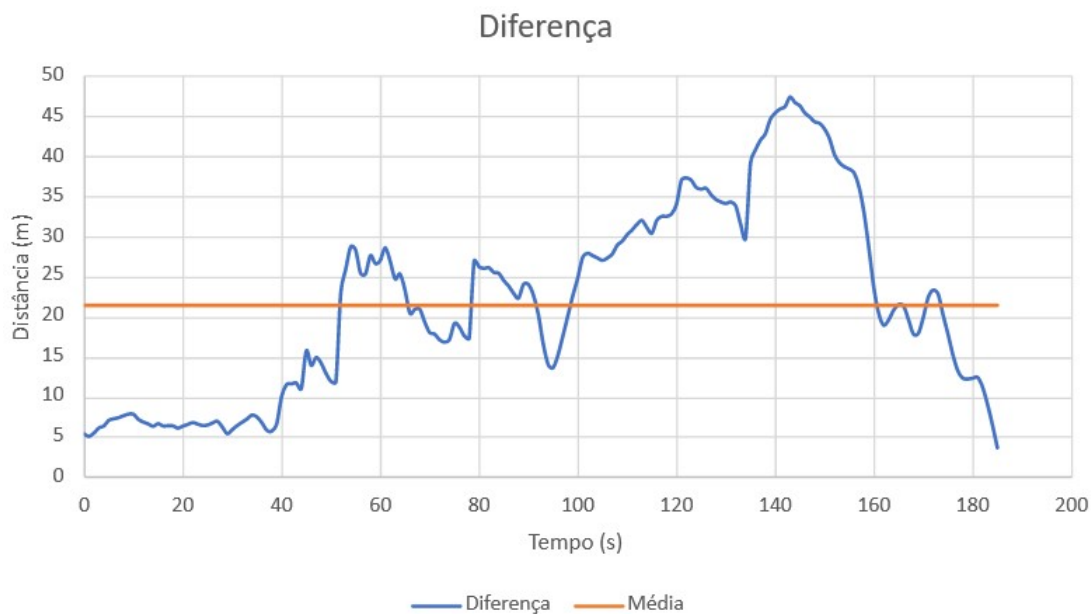
Figura 36 – Avenida das Araucárias - Águas Claras, sensores fora do carro



Fonte: Autoria Própria

A Figura 37 apresenta a diferença entre as coletas do terceiro cenário com os equipamentos fora do veículo. A distância máxima entre a coleta foi de 47,4 metros, tendo uma média de 21,4 metros.

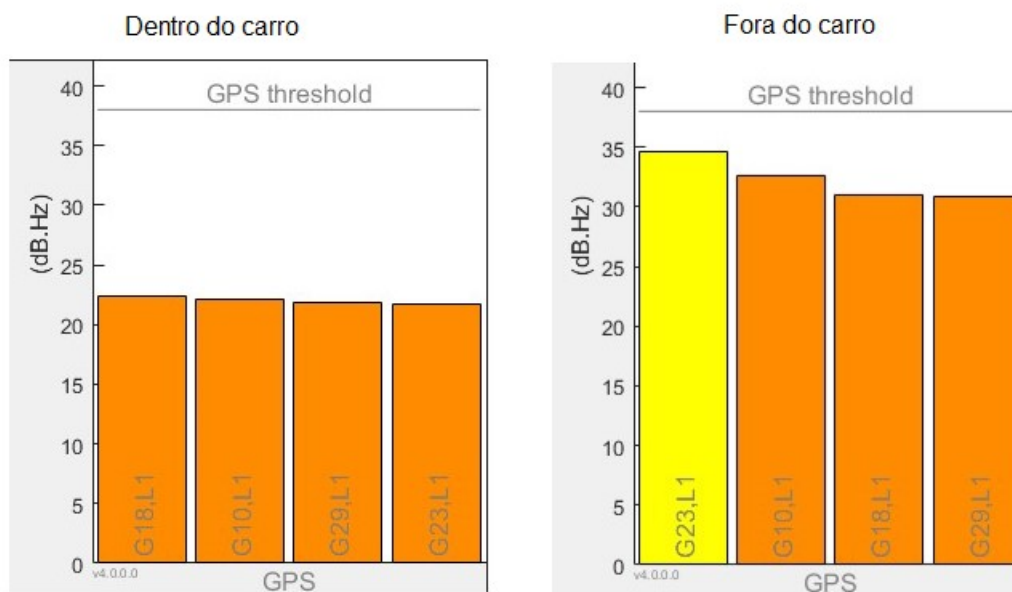
Figura 37 – Gráfico da diferença entre as medições



Fonte: Autoria Própria

A comparação da força do sinal do terceiro cenário entre o celular dentro e fora do carro é apresentada na Figura 38. É perceptível que a força do sinal é maior quando o receptor está fora do carro.

Figura 38 – Força do sinal das coletas do terceiro cenário



Fonte: Autoria Própria

5.4 Comparação das Medições

Analisando os gráficos apresentados nas Figuras 30 e 32 obtidos no primeiro cenário, nota-se um aumento na diferença das medições, passando de uma média de 2,5 metros, quando os sensores são posicionado fora do carro, para uma média de 12,4 metros, quando os sensores são posicionados dentro do carro. Essa diferença pode ser vista se compararmos o que foi plotado no mapa. Na Figura 29 há uma maior diferença do posicionamento entre os equipamentos. Já na Figura 31 mostra uma maior convergência entre as medições, com uma maior precisão sobre o trajeto.

No segundo cenário a diferença aumenta. Analisando os gráficos apresentados nas Figuras 35 e 37, também há um aumento na diferença das medições, passando de uma média de 21,4 metros, quando os sensores são posicionados fora do carro, para uma média de 30,2 metros, quando os sensores são posicionados dentro do carro. É notável a menor diferença na plotagem no mapa quando os sensores estão fora do carro, apresentando maior precisão em relação ao mapa, como apresentado na Figura 36, e mais discrepante quando os sensores estão dentro do carro, como apresentado na Figura 34.

6 Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste capítulo são apresentadas as conclusões do presente trabalho de conclusão de curso e a sugestão para a continuidade de trabalhos nesta área de conhecimento.

6.1 Conclusões

Como foi apresentado ao longo deste trabalho, os sinais dos satélites GNSS sofrem de diversos tipos de interferências, sendo um dos mais comuns nos centros urbanos o erro de multicaminhamento e/ou a falta de visada, devido as edificações. Alguns algoritmos e técnicas tentam diminuir esse tipo de erro. Visto isso, este trabalho buscou entender como é o funcionamento dos sistemas GNSS, em especial o GPS, aprender a manusear e extrair dados de equipamentos receptores. Por fim, houve a análise dos dados coletados.

Ao longo da primeira parte do trabalho, o foco foi entender como funciona os sistemas GNSS, as suas características e as tecnologias envolvidas neste sistema. Também foram levantados os problemas e as soluções conhecidas, assim como escolher os receptores e quais os possíveis cenários para a coleta de dados. Foi realizado uma coleta para a familiarização com os equipamentos e seus respectivos softwares.

A segunda parte deste trabalho visou coletar os dados em novos cenários que foram definidos durante o desenvolvimento. Foram utilizados as ferramentas disponíveis em cada equipamento, e quando possível, foi aplicado um algoritmo que melhorou a precisão no cálculo do posicionamento.

Analisando os dados e os gráficos gerados a partir deles, é possível confirmar que houve uma degradação da acurácia dos dados recebidos pelos equipamentos nos cenários urbanos que possui elementos que causem algum tipo de interferência, como o multicaminhamento e a obstrução da linha de visada. Levando em consideração as coletas onde o receptor estava fora do veículo, a discrepância da média da diferença entre as medições do segundo e terceiro cenário foi de 18,9 metros, um número muito alto.

Notou-se também a diferença no posicionamento do receptor, onde os dados coletados de dentro do veículo possuíam uma diferença maior do que as que foram coletadas fora do carro. Vale salientar que em algumas coletas, os receptores acabaram perdendo as informações de alguns pontos, pois foram posicionados em um local muito baixo dentro do carro, tirando a visão do céu. Os receptores foram realocados dentro do carro para que eles não perdessem nenhuma informação, sendo possível fazer a comparação ponto a ponto de cada posição.

Por fim, foi possível concluir que os equipamentos GNSS de baixo custo sofrem de-

masiadamente com as interferências proporcionadas pelo ambiente, principalmente quando se trata de ambientes urbanos que obstruem e ricocheteiam os sinais dos satélites. A falta de acurácia destes equipamentos acaba inviabilizando a sua utilização em sistemas que exigem dados precisos do posicionamento do receptor.

6.2 Recomendações para Trabalhos Futuros

A ausência de um equipamento que funcione como *ground truth* inviabilizou o resultado de qual equipamento possuía a maior acurácia. Olhando as plotagens nos mapas e os gráficos gerados, o U-Blox se mostrou mais preciso, pois possuía linhas menos tortuosas e condizentes com os pontos no mapa. Para melhor definir qual equipamento consegue entregar dados mais próximos do real, faz-se necessário a utilização de um equipamento de referência.

Como recomendação para trabalhos futuros, existe a possibilidade de extensão dos casos de testes e a inclusão de um terceiro equipamento que possua a acurácia necessária para ser utilizado como *ground truth* para viabilizar a comparação entre os equipamentos de baixo custo e o equipamento de referência, e assim, dizer qual está mais alinhado com a posição real do receptor.

Referências

- ALBARICI, F. L. Posicionamento relativo: análise dos resultados combinando as observáveis L1 dos satélites gps e sbas. 2011. Acessado em: 04 de Março de 2022. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-01062011-135146/pt-br.php>>. Citado na página 40.
- ANDROID. Raw gnss measurements. 2019. Acessado em: 22 de Março de 2022. Disponível em: <<https://developer.android.com/guide/topics/sensors/gnss>>. Citado na página 44.
- BEIDOU. China's beidou navigation satellite system. 2016. Disponível em: <<http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/Officialdocument/201806/P020180608525769123446.pdf>>. Citado na página 26.
- BEIDOU. Beidou navigation satellite system. 2020. Disponível em: <<http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/System/>>. Citado na página 25.
- DODO, J.; N., K. M.; YAHYA, M. H. The effect of tropospheric delay on gps height differences along the equator. 2008. Acessado em: 25 de Fevereiro de 2022. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/233578431_The_Effect_of_Tropospheric_Delay_on_GPS_Height_Differences_along_the_Equator>. Citado na página 38.
- ENGE, P. M. . P. Global positioning systems: Signals, measurements and performance. Massachusetts, Brazil, p. 590, 2010. Citado 6 vezes nas páginas 28, 29, 31, 32, 35 e 39.
- ESA. Dgnss fundamentals. 2020. Acessado em: 03 de Março de 2022. Disponível em: <https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/DGNSS_Fundamentals>. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 41.
- EUSPA. *What is SBAS?* EUSPA, 2021. Disponível em: <<https://www.euspa.europa.eu/european-space/eu-space-programme/what-sbas>>. Acesso em: 12 de Março de 2022. Citado na página 40.
- EUSPA. Galileo is the european global satellite-based navigation system. 2022. Disponível em: <<https://www.euspa.europa.eu/european-space/galileo/What-Galileo>>. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. Métodos de pesquisa. Porto Alegre, Brasil, p. 120, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 57 e 58.
- GIL, A. C. *Como elaborar projetos de pesquisa*. [S.l.]: Atlas, 1991. ISBN 85-224-0724-X. Citado na página 58.
- GISGEOGRAPHY. How gps receivers work – trilateration vs triangulation. 2022. Disponível em: <<https://gisgeography.com/trilateration-triangulation-gps/>>. Citado na página 27.
- GLONASS. About glonass. 2020. Disponível em: <https://www.glonass-iac.ru/en/about_glonass/>. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.

GNSS, G. Galileo applications. 2020. Disponível em: <<https://galileognss.eu/category/galileo-applications/>>. Citado na página 25.

GPS. How to find a position using gps. 2014. Disponível em: <<https://www.gps.gov/multimedia/tutorials/trilateration/>>. Citado na página 27.

GPS. Gps - space segment. 2021. Disponível em: <<https://www.gps.gov/systems/gps/space/>>. Citado 3 vezes nas páginas 23, 24 e 29.

IBGE. Ibge-ppp - serviço online para pós-processamento de dados gnss. 2020. Acessado em: 04 de Março de 2022. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/servicos-para-posicionamento-geodesico/16334-servico-online-para-pos-processamento-de-dados-gnss-ibge-ppp.html?=&t=o-que-e>>. Citado na página 42.

IBGE. Sistema global de navegacao por satelite (gnss). 2021. Disponível em: <<https://atlascolar.ibge.gov.br/conceitos-gerais/o-que-e-cartografia/sistema-global-de-navegac-a-o-por-sate-litess.html>>. Citado na página 23.

JUNIOR, P. T. S. et al. Posicionamento multi-gnss. In: *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*. [S.l.: s.n.], 2020. v. 72, n. Especial, p. 1200–1215. Citado na página 24.

JUSTO, D. A. R. et al. Cálculo numérico: Um livro colaborativo. Rio Grande do Sul, Brasil, p. 373, 2020. Citado na página 63.

MARQUES, E.; KUGA, H. K.; LOPES, R. Vieira da F. Real time estimation of gps receiver clock offset by the kalman filter. 2003. Acessado em: 28 de Fevereiro de 2022. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/43655015_Real_time_estimation_of_GPS_receiver_clock_offset_by_the_Kalman_filter>. Citado na página 40.

MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O.; BATISTA, I. S. Análise da ionosfera usando dados de receptores gps durante um período de alta atividade solar e comparação com dados de digissondas. 2009. Acessado em: 23 de Fevereiro de 2022. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbg/a/B45cLCkn7jqBPRJR6VFqzC/?lang=pt>>. Citado na página 37.

MEGURO J.; MURATA, T. T. J.-i. A. Y. H. T. Gps multipath mitigation for urban area using omnidirectional infrared camera. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems vol. 10 iss. 1*, v. 10, mar 2009. Disponível em: <<libgen.li/file.php?md5=acd86e1b9fc2102a41efb78b57b2534c>>. Citado na página 39.

MONICO, J. F. G. Posicionamento pelo gnss: Descrição, fundamentos e aplicações. São Paulo, Brasil, p. 476, 2008. Citado 8 vezes nas páginas 19, 33, 35, 36, 37, 38, 39 e 41.

NETO, A. M. M. da S. Comparação entre o filtro de kalman e filtro de partículas aplicados na robótica móvel. São Paulo, Brasil, p. 6, 2014. Citado na página 49.

OLIVEIRA, M. F. de. Metodologia científica: um manual para a realização de pesquisas em administração. Goiás, Brasil, p. 72, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 57 e 58.

- PETROVSKI, I. G.; TSUJII, T. Digital satellite navigation and geophysics: A practical guide with gnss signal simulator and receiver laboratory. Califórnia, Estados Unidos, p. 338, 2012. Citado 4 vezes nas páginas 23, 26, 31 e 38.
- PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. *Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico*. [S.l.]: Feevale, 2013. ISBN 978-85-7717-158-3. Citado na página 57.
- REISDORF, P.; PFEIFER, T.; BREBLER, J. The problem of comparable gnss results – an approach for a uniform dataset with low-cost and reference data. 2016. Disponível em: <http://www.thinkmind.org/index.php?view=article&articleid=vehicular_2016_1_10_30007>. Citado na página 19.
- SDR, G. Pseudorange measurement. 2021. Disponível em: <<https://gnss-sdr.org/docs/sp-blocks/observables/#pseudorange-measurement>>. Citado na página 34.
- SEEBER, G. Satellite geodesy. Nova Iorque, Estados Unidos, p. 612, 2003. Citado 4 vezes nas páginas 24, 38, 41 e 42.
- SEGANTINE, P. C. L. Gps: Sistema de posicionamento global. São Paulo, Brazil, p. 179, 2005. Citado 6 vezes nas páginas 28, 29, 30, 33, 35 e 37.
- SICKLE, J. V. *GPS for Land Surveyors*. [S.l.]: CRC Press, 2015. ISBN 9781466583108. Citado na página 37.
- SILVEIRA, G. C. da. Influência da geometria dos satélites na precisão das coordenadas geodésicas obtidas com o sistema gps. São Paulo, Brasil, p. 170, 2008. Citado na página 53.
- UBLOX. Neo-6 u-blox 6 gps modules data sheet. 2021. Acessado em: 04 de Abril de 2022. Disponível em: <https://www.mouser.in/datasheet/2/1025/NEO_6_DataSheet__GPS_G6_HW_09005_-2010081.pdf>. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 45.
- UBLOX. u-center gnss evaluation software for windows. 2021. Acessado em: 05 de Abril de 2022. Disponível em: <https://content.u-blox.com/sites/default/files/u-center_Userguide_UBX-13005250.pdf>. Citado na página 44.
- VENESS, C. Calculate distance, bearing and more between latitude/longitude points. 2019. Disponível em: <<https://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html>>. Citado na página 63.
- WALTER, A. Caracterização do canal de propagação gps em ambientes urbanos. 2010. Disponível em: <<https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=37567@1>>. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.
- WALTER, A. Calculating position from raw gps data. 2017. Disponível em: <https://www.telesens.co/2017/07/17/calculating-position-from-raw-gps-data/#Processing_Raw_GPS_Data>. Citado 3 vezes nas páginas 30, 31 e 32.
- WELLS, D. et al. Guide to gps positioning. New Brunswick, Canada, p. 291, 1999. Citado na página 36.
- XIAOMI. Redmi note 10 specifications. 2021. Acessado em: 15 de Fevereiro de 2022. Disponível em: <<https://www.mi.com/br/mi-note-10/specs/>>. Citado na página 43.

Apêndices

APÊNDICE A – Dados e Código

Este apêndice tem como objetivo apresentar alguns dos dados coletados e o código fonte desenvolvido para a implementação da solução de software utilizada para auxiliar o desenvolvimento deste trabalho. Estes dados podem ser acessados através do *hiperlink* do repositório:

- [Repositório no *Github*](#)