



Universidade Federal de Ouro Preto  
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas  
Departamento de Engenharia Elétrica



## **Trabalho de Conclusão de Curso**

# **Análise da Precisão do Sinal de Receptores GPS sem Correção Diferencial Utilizados em Aplicações Agrícolas.**

**Tiago José dos Santos Reis**

João Monlevade, MG  
2019

**Tiago José dos Santos Reis**

**Análise da Precisão do Sinal de Receptores  
GPS sem Correção Diferencial Utilizados em  
Aplicações Agrícolas.**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.  
Orientador: Prof.Dr. Marcelo Moreira Tiago

**Universidade Federal de Ouro Preto  
João Monlevade  
2019**

R375a

Reis, Tiago José dos Santos.

Análise da precisão do sinal de receptores GPS sem correção diferencial utilizados em aplicações agrícolas [manuscrito] / Tiago José dos Santos Reis. - 2019.

55f.:

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Moreira Tiago.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Departamento de Engenharia Elétrica.

1. GPS (Sistema de Posicionamento Global). 2. Agricultura de Precisão. 3. Processamento de sinais - Técnicas digitais. I. Tiago, Marcelo Moreira. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 621.391

Catálogo: [ficha.sisbin@ufop.edu.br](mailto:ficha.sisbin@ufop.edu.br)



## FOLHA DE APROVAÇÃO

Tiago José dos Santos Reis

### ANÁLISE DA PRECISÃO DO SINAL DE RECEPTORES GPS SEM CORREÇÃO DIFERENCIAL UTILIZADOS EM APLICAÇÕES AGRÍCOLAS

Membros da banca

Marcelo Moreira Tiago - Doutorado - Universidade Federal de Ouro Preto  
Pablo Henrique Gonçalves - Graduação - Universidade Federal de Ouro Preto  
Wendy Yadira Eras Herrera - Doutorado - Universidade Federal de Ouro Preto

Versão final

Aprovado em 18 de dezembro de 2019.

De acordo

Marcelo Moreira Tiago



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Moreira Tiago, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 14/01/2020, às 22:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0032067** e o código CRC **28677F27**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.000274/2020-48

SEI nº 0032067

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000  
Telefone: - www.ufop.br

# Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus por ter me dado força para superar as dificuldades. Aos meus pais, irmãos e às minhas tias pelo apoio incondicional, pelo suporte financeiro e emocional, e pela confiança dedicada, sem vocês nada disso seria possível. Aos meus amigos, que fizeram e fazem com que a caminhada se torne menos árdua. Aos professores que me inspiraram e a UFOP pela oportunidade de crescimento pessoal e profissional. Por fim, agradeço de forma especial ao meu orientador Marcelo Moreira Tiago, por toda a dedicação, disponibilidade e confiança.

*"Se houver amor em sua vida, isso pode compensar muitas coisas que lhe fazem falta.  
Caso contrário, não importa o quanto tiver, nunca será o suficiente."  
– Friedrich Nietzsche*

# Resumo

O GPS, do inglês *Global Positioning System*, é uma ferramenta muito utilizada em aplicações envolvendo agricultura de precisão. O uso do GPS aumenta a precisão da localização e posicionamento de máquinas agrícolas, resultando num aumento da eficiência dos sistemas de plantio, adubação, pulverização e colheita. Sua utilização tem possibilitado um grande aumento nos índices de produção, mas a utilização dos receptores requer cuidados com a imprecisão dos sinais recebidos. No mercado, há equipamentos disponíveis que utilizam sinais de GPS com maior precisão, corrigidos em tempo real, através de um sinal enviado por satélite (RTX) ou por sinais de rádio provenientes de uma base que serve como ponto de referência (RTK). A utilização dessas técnicas requer grandes investimentos, inviabilizando a sua utilização por pequenos produtores. Esse cenário motivou o desenvolvimento deste trabalho, que apresenta um conjunto de técnicas de processamento de sinais aplicadas a sistemas GPS de baixo custo. Foram realizados ensaios utilizando um receptor GPS com frequência de amostragem de 1Hz e sem correção diferencial. Inicialmente foi feita uma análise estática da dispersão do receptor GPS, determinando as distâncias em metros dos afastamentos dos sinais em relação a um ponto adotado como referencial. O valor da dispersão máxima calculada para um dos dias de análise foi aproximadamente 5,9 m, então o sinal foi filtrado com objetivo de redução das dispersões, conseguindo um decréscimo de 46 % m em relação à dispersão máxima. O ensaio dinâmico utilizou para o processamento de sinais os filtros média móvel e a transformada *wavelet* Discreta. O filtro média móvel obteve uma redução aproximada de 45% e a transformada *wavelet* conseguiu uma redução aproximada de 23%.

**Palavras-chave:** Receptores GPS, Agricultura de Precisão, Processamento Digital de Sinais.

# Abstract

Global Positioning System (GPS) is a widely used tool in precision farming applications, as it allows for increased accuracy in the location and positioning of agricultural machinery, resulting in increased efficiency of planting, fertilizing and fertilizing systems, spraying and harvesting. Its use has enabled a large increase in production rates, but the use of receivers requires care with the inaccuracy of received signals. On the market, equipment is available that uses more accurate GPS signals, corrected in real time by satellite signal (RTX) or radio signals from a base station (RTK). The use of these techniques requires large investments, making their use unfeasible for small producers. This scenario motivated the development of this work, which presents a set of signal processing techniques applied to low cost GPS systems. Tests were performed using a GPS receiver with 1Hz sampling frequency and no differential correction. Initially a static analysis of the GPS receiver dispersion was made, determining the distances in meters of the signal distances in relation to a point adopted as a reference. The maximum dispersion value calculated for one of the days of analysis was approximately 5.9 m, so the signal was filtered to reduce dispersions, achieving a decrease of 46 % over maximum dispersion. The dynamic test used for signal processing the movable media filters and the Discrete wavelet transform. The moving average filter achieved an approximate reduction of 45 % and the transform wavelet achieved an approximate reduction of 23 %.

**Keywords:** GPS Receivers, Precision Agriculture and Digital Signal Processing..

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Exemplo hipotético de um sistema geodésico de referência . . . . .	10
Figura 2 – Esquema das Estações de Referência e Móvel do sistema RTK. . . . .	13
Figura 3 – Diagrama do funcionamento do sistema RTX . . . . .	14
Figura 4 – Diagrama de tolerâncias de um filtro passa-baixas. . . . .	18
Figura 5 – Reposta em frequência dos filtros utilizados para análise de multirresolução . . . . .	20
Figura 6 – Banda de Frequência . . . . .	21
Figura 7 – Latitude versus Longitude . . . . .	28
Figura 8 – Dispersão Máxima por hora do sinal original em relação a média . . . .	29
Figura 9 – Analise na frequência . . . . .	29
Figura 10 – Analise na frequência . . . . .	30
Figura 11 – Carrinho Utilizado . . . . .	31
Figura 12 – Latitude versus Longitude . . . . .	32
Figura 13 – Variação do deslocamento em função do tempo . . . . .	33
Figura 14 – Analise da velocidade Máxima em intervalos de tempos de 22 segundos.	33
Figura 15 – Gráfico Longitude versus Tempo: <i>Butterworth</i> . . . . .	35
Figura 16 – Gráfico Longitude versus Tempo: Média Móvel . . . . .	36
Figura 17 – Gráfico Longitude versus Tempo: DWT . . . . .	36
Figura 18 – Gráfico Latitude versus Tempo: <i>Butterworth</i> . . . . .	37
Figura 19 – Gráfico Latitude versus Tempo: Média Móvel . . . . .	38
Figura 20 – Gráfico Latitude versus Tempo- DWT . . . . .	38
Figura 21 – Dispersão máxima em cada Hora . . . . .	39
Figura 22 – Dispersão Máxima por hora(m) . . . . .	40
Figura 23 – Dispersão Máxima por hora(m) . . . . .	40
Figura 24 – Dispersão Máxima por hora(m)-DWT . . . . .	41
Figura 25 – Gráficos: Variação Máximo por hora(m)- <i>Butterworth</i> . . . . .	42
Figura 26 – Gráficos: Variação Máximo por hora(m)- Média Móvel . . . . .	42
Figura 27 – Gráficos: Variação Máximo por hora(m)- DWT . . . . .	43
Figura 28 – Gráficos: Variação Máximo por Dia . . . . .	44
Figura 29 – Gráficos: Variação Máximo por Dia . . . . .	44
Figura 30 – Comparação da Curva original e a curva construída com a média da velocidade . . . . .	46
Figura 31 – Comparação da Curva Média Móvel e a curva construída com a média da velocidade . . . . .	47
Figura 32 – Comparação da transformada <i>wavelet</i> e a curva construída com a média da velocidade . . . . .	48

Figura 33 – Comparação da Curva do filtro Média Móvel e o sinal coletado . . . .	49
Figura 34 – Comparação da Curva da transformada <i>wavelet</i> e o sinal coletado . . .	49
Figura 35 – Comparação Latitude versus Longitude do Filtro Média Móvel e o sinal coletado . . . . .	50
Figura 36 – Comparação Latitude versus Longitude da transformada <i>wavelet</i> e o sinal coletado . . . . .	51

# Lista de Siglas

<b>AP</b>	AP, Agricultura de Precisão
<b>GNSS</b>	Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS, do inglês <i>Global Navigation Satellite System</i> )
<b>GPS</b>	Sistema de Posicionamento Global (GPS, do inglês <i>Global Positioning System</i> )
<b>PPS</b>	Serviço de Posicionamento Preciso (PPS, do inglês <i>Precise Positioning Service</i> )
<b>RMSE</b>	Erro Médio Quadrático (RMSE, do inglês <i>Root Mean Square Error</i> )
<b>RTK</b>	<i>RTK, Real-Time Kinematic</i>
<b>RTX</b>	<i>RTX, Real-Time Extended</i>
<b>SIG</b>	SIG, Sistemas de Informações Geográficas
<b>SPS</b>	Serviço de Posicionamento Padrão (SPS, do inglês <i>Standard Positioning Service</i> )
<b>VRS</b>	Estação de Referência Virtual (VRS, do inglês <i>Virtual Reference Station</i> )
<b>DOP</b>	Diluições de Precisão (DOP, do inglês, <i>Dilution of Precision</i> )
<b>HDOP</b>	Diluição da Precisão Horizontal (HDOP, do inglês <i>Horizontal Dilution of Precision</i> )
<b>VDOP</b>	Diluição da Precisão Vertical (VDOP, do inglês <i>Vertical Dilution of Precision</i> )
<b>PDOP</b>	Diluição da Precisão de Posição (PDOP, do inglês <i>Position Dilution of Precision</i> )
<b>TDOP</b>	Diluição da Precisão Temporal (TDOP, do inglês <i>Time Dilution of Precision</i> )
<b>GDOP</b>	Diluição da Precisão Geométrica (GDOP, do inglês <i>Geometric Dilution of Precision</i> )
<b>DWT</b>	Transformada <i>Wavelet</i> Discreta (DWT, do inglês <i>Discrete Wavelet Transform</i> )
<b>CWT</b>	Transformada <i>Wavelet</i> Contínua (CWT, do inglês <i>Continuous Wavelet Transform</i> )

- HP** Alta Precisão (HP, do inglês *High Precision*)
- SP** Precisão Padrão (SP, do inglês *Standard Precision*)
- CEP** Erro Circular Provável (CEP, do inglês *Circular Error Probable*)
- NMEA** Associação Nacional de Eletrônica Marinha (NMEA, do inglês *National Marine Electronics Association*)

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Agricultura de Precisão</b>	<b>1</b>
<b>1.2</b>	<b>Funcionamento do Receptor GPS</b>	<b>3</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos</b>	<b>4</b>
<b>1.4</b>	<b>Estrutura do Trabalho</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>PROCESSAMENTO DE SINAIS DE GPS</b>	<b>6</b>
<b>2.1</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	<b>6</b>
<b>2.2</b>	<b>Protocolo NMEA</b>	<b>8</b>
<b>2.3</b>	<b>Cálculo de Distância</b>	<b>9</b>
<b>2.4</b>	<b>Diluição de Precisão no GNSS</b>	<b>12</b>
<b>2.5</b>	<b>Sinais com Correção</b>	<b>12</b>
<b>2.6</b>	<b>Cálculo de Incerteza</b>	<b>15</b>
<b>2.7</b>	<b>Filtros</b>	<b>16</b>
2.7.1	Tipos de filtros	18
2.7.1.1	Filtros <i>Butterworth</i>	18
2.7.1.2	Filtro Chebyshev e o Filtro Elíptico	18
2.7.1.3	Filtros Média Móvel	19
<b>2.8</b>	<b>Transformada Wavelet</b>	<b>19</b>
2.8.1	Análise de Multirresolução	20
2.8.2	Representação de funções através de subespaços	20
2.8.3	Famílias de <i>Wavelet</i>	22
2.8.3.1	Família Haar	22
2.8.3.2	Família <i>Daubechies</i>	23
2.8.3.3	Família <i>Symlets</i>	23
2.8.3.4	Família <i>Coiflets</i>	24
2.8.3.5	Família Bi-ortogonal	24
2.8.4	Transformada de Wavelet Discreta	24
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>26</b>
<b>3.1</b>	<b>Ensaio Estático</b>	<b>26</b>
3.1.1	Coleta dos dados	26
3.1.2	Processamento dos sinais	27
<b>3.2</b>	<b>Ensaio Dinâmico</b>	<b>31</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>35</b>

<b>4.1</b>	<b>Ensaio Estático</b> . . . . .	<b>35</b>
<b>4.2</b>	<b>Ensaio Dinâmico</b> . . . . .	<b>46</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> . . . . .	<b>52</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>53</b>

# 1 Introdução

Este capítulo contém a motivação para o desenvolvimento deste trabalho, explorando conceitos relacionados à agricultura de precisão e sua importância para os produtores rurais. Em seguida, apresenta-se uma breve descrição do funcionamento de receptores do Sistema de Posicionamento Global (GPS, do inglês *Global Positioning System*) utilizados para estas aplicações. Ao final, apresenta-se uma revisão bibliográfica a respeito das técnicas de processamento de sinais utilizadas para redução da dispersão do sinal adquirido por um receptor GPS.

## 1.1 Agricultura de Precisão

A agricultura tradicional é composta por um conjunto de técnicas de tratamentos das grandes áreas de produção para solucionar os problemas gerais de uma determinada região, ou seja, soluciona o problema sem a identificação exata de sua localização. Devido a isso, insumos com a mesma formulação e/ou quantidade são aplicados em áreas com diferentes necessidades. Essas técnicas solucionam apenas os problemas relacionados ao fornecimento de nutrientes para a cultura, mas podem provocar prejuízos financeiros e prejudicar o meio ambiente pelo excesso de insumos agrícolas. Então a preocupação da agricultura tradicional é somente para um tratamento das necessidades gerais de uma área de produção, ao invés do tratamento das necessidades específicas de cada parte do campo, resultando em uma lavoura com produtividade não uniforme (NUNES, 2016).

A necessidade do desenvolvimento de técnicas para maximizar a área de produção veio devido ao meio competitivo da agricultura, de forma que um alto grau de profissionalismo e especialização dos produtores rurais foi indispensável para a melhoria dos índices de produtividade (NUNES, 2016). Tecnologias como processamento de sinais e eletrônica auxiliaram para obtenção de informações adicionais da lavoura, que até então não eram consideradas pelos produtores. Nesse contexto, a AP, Agricultura de Precisão surge com o propósito de reduzir perdas e melhorar o aproveitamento das áreas de produção.

De acordo com Antuniassi, Baio e Sharp (2007), agricultura de precisão é um sistema de produção adotado por agricultores para o gerenciamento localizado, com a utilização de recursos como mapeamento dos fatores de produção, ferramenta de suporte a decisão e aplicação localizada de insumos. A ideia da AP surgiu antes da revolução industrial, com a busca de um aumento da produtividade considerando a localização e a fertilidade do solo, mas somente no início do século XX os fundamentos da agricultura moderna foram difundidos. Esses conceitos passaram a ser mais utilizados a partir da década de 1980, com o desenvolvimento de microcontroladores, sensores e softwares (LAMPARELLI, 2016).

A utilização da agricultura de precisão permite a aplicação de insumos agrícolas nas regiões corretas e nas quantidades adequadas, o gerenciamento de um campo produtivo metro a metro analisando as particularidades de cada parte dessa região, o aumento da eficiência com base na manipulação diferenciada nas regiões a partir das informações obtidas através do GPS, permitindo a localização em terra de equipamentos e máquinas. Com a aplicação da AP tem-se um maior conhecimento do campo de produção, possibilitando o melhoramento nas decisões das distribuições dos insumos e minimizando os custos de produção, com a uniformidade na produtividade pela correção dos fatores que contribuem para variabilidade e aplicação localizada de insumos necessários.

O uso de ferramentas adequadas na AP é um tópico primordial para obtenção de dados relativos a produção, tais como irrigação, propriedades físicas do solo, necessidades de aplicação de defensivos, etc. A AP utiliza várias ferramentas e técnicas para auxiliar os produtores rurais, como os SIG, Sistemas de Informações Geográficas que são *softwares* de manuseio de dados geográficos que possuem ferramentas que vão desde simples mostradores de dados até integradores de informação de diferentes bases de dados (LAMPARELLI, 2016). Como exemplo, os sistemas de mapeamento de colheita geram informações da produtividade, armazenando dados durante a colheita. Essas informações podem ser utilizadas durante o ajuste das taxas utilizadas nas aplicações de fertilizantes, sementes e corretivos, conforme as necessidades do solo. Os tipos de sensores utilizados ao longo deste processo podem ser divididos em dois grupos: sensores remotos e sensores de campo. Os sensores remotos detectam informações sem a necessidade de contato físico com o campo. Como exemplo, pode-se citar os sensores eletromagnéticos, sensores de infra-vermelho e sensores de imagens (MORAES, 2002). Já os sensores de campo fornecem dados da composição do solo, obtendo os fatores que não podem ser apurados por sensores remotos.

O uso da AP traz ao usuário diversos benefícios, como a redução dos riscos das atividades agrícolas, redução dos custos da produção, tomada de decisão adequada e rápida, controle de diversas situações pelo uso da informação, maior produtividade da lavoura, maior disponibilidade de tempo para o administrador e redução do impacto ambiental pelo menor uso de defensivos (NUNES, 2016).

Uma das principais ferramentas utilizadas na AP é o sistema de posicionamento global, que possibilita um mapeamento do campo ou da plantação, o direcionamento de tratores e máquinas agrícola, monitoramento e inspeção da colheita, o mapeamento de produção, além da possibilidade de trabalhos em locais com pouca visibilidade ou trabalho noturno. Essas características em conjuntos possibilitam um aumento na produtividade agrícola. Além disso, o uso desse tipo de sistema permite que outras variáveis sejam controladas, tais como monitoramento dos funcionários, verificando se suas tarefas estão sendo realizadas de maneira adequada, e também o monitoramento das máquinas e equipamentos.

## 1.2 Funcionamento do Receptor GPS

Desde a antiguidade, emprega-se a localização geográfica para o desenvolvimento das atividades humanas. Desta forma, a sociedade sempre criou métodos e instrumentos para sua orientação. Essas técnicas foram se desenvolvendo ao longo do tempo, iniciada na pré-história com marcações nas superfícies e paredes de pedras, e chegando ao sistema atual de localização por satélite. Esse sistema atualmente é conhecido como Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS, do inglês *Global Navigation Satellite System*).

O sistema GNSS é utilizado para estabelecer as coordenadas de um objeto em qualquer localidade terrestre, e sua precisão é estipulada durante a coleta de dados. O GNSS é composto por um conjunto de sistemas de navegação diferentes, destacando-se os sistemas Navstar GPS, GLONASS e GALILEO. GLONASS é um sistema de navegação global russo composto por 24 satélites, 3 planos orbitais com 8 satélites cada. Esse sistema fornece dois tipos de serviço, o sinal de Alta Precisão (HP, do inglês *High Precision*) que possui uma alta precisão e possui uso restrito, e o sinal de Precisão Padrão (SP, do inglês *Standard Precision*) que possui uma menor precisão e uso livre. O sistema GALILEO é um sistema de posicionamento europeu que é composto por 30 satélites divididos igualmente entre 3 planos orbitais com 10 satélites cada. Esse sistema é o único construído desde o início para fins civis e possui compatibilidade com os sistemas GPS e GLONASS. A maior quantidade de satélites do sistema GALILEO permite que o usuário seja menos impactado caso ocorra problemas na estrutura espacial (SANTIAGO, 2018).

O sistema Navstar GPS é um sistema criado inicialmente com o objetivo de auxiliar os americanos nos serviços militares. Visto a necessidade da utilização do sistema para aplicações civis, em 1980 o então presidente Ronald Reagan (1911 - 2014) decretou o uso civil do sistema GPS. Entretanto, por motivo de segurança o departamento de defesa americano introduziu um erro no sistema, cujo nome era denominado "Disponibilidade Seletiva", que foi encerrada nos anos 2000 devido ao avanço tecnológico que permitiu ao departamento de defesa conseguir obstruir a precisão do sistema nos locais e nos momentos de seus interesses (CARVALHO; ARAÚJO, 2009). Atualmente o sistema GPS fornece dois tipos de serviços, o Serviço de Posicionamento Padrão (SPS, do inglês *Standard Positioning Service*) que é um serviço livre e o Serviço de Posicionamento Preciso (PPS, do inglês *Precise Positioning Service*) que é um serviço com maior grau de confiabilidade e restrito a militares e usuários autorizados (SANTIAGO, 2018).

O sistema GPS divide-se em três segmentos diferentes:

1. Segmento Espacial: Nesse segmento encontram-se 24 satélites em uso, localizados em seis orbitas que contém inclinação de 55 graus acima do Equador e espaçamento de 60 graus de distância entre elas, possuindo-se então quatro satélites por órbitas. O período orbital é de 12 horas, então cada satélite completa duas órbitas por dia, garantindo-se assim a visibilidade de quatro satélites em qualquer lugar do planeta

em todos os momentos.

2. Segmento de Controle: Com controle do departamento de defesa americano, esse segmento é constituído por estações terrestres e possui finalidade de monitorar, corrigir e garantir o funcionamento do sistema.
3. Segmento do Usuário: É representado pelos receptores que variam de modelo, tamanho e fabricante.

O GPS é um sistema de posicionamento que opera conforme o princípio da triangulação, ou seja, a determinação da posição de um ponto é feita pela medição dos lados do triângulo que é formado entre o ponto desconhecido e dois ou mais pontos conhecidos no caso, os satélites que emitem um sinal codificado que os diferencia. Para o cálculo da localização, os receptores GPS recebem um sinal do satélite visível e cronometram o tempo de viagem desse sinal até o receptor. Esse processo é determinado da seguinte maneira: um padrão digital é transmitido num determinado instante e o receptor neste mesmo momento produz o mesmo padrão digital; o sinal chega ao receptor com atraso em relação ao padrão por ele produzido, e esse atraso determina o tempo de viagem do sinal. Multiplicando o valor da velocidade da luz (300 000 km/s) pelo valor do tempo medido, encontra-se a distância que o sinal viajou (CARVALHO; ARAÚJO, 2009). A determinação da posição de um objeto é feita através da intersecção entre as distâncias determinadas para os satélites. Para o cálculo dos valores de latitude e longitude, a utilização de três satélites é suficiente, mas para uma determinação da posição com maior precisão, utilizam-se mais satélites. Para uma boa precisão, o erro na medição do tempo deve ser o mínimo possível. Para que isso ocorra, nos satélites são utilizados relógios atômicos, que são caracterizados por apresentar grande precisão nas medidas de tempo.

As localizações do GPS carregam incertezas devido a vários erros como: erros do relógio do satélite e do receptor, devido à propagação das ondas na atmosfera (refração), reflexão do sinal conforme o relevo e construções civis, atividades solares, localização dos satélites, órbitas do satélite e pontos da Terra. Para aplicações específicas, como na agricultura de precisão, que utiliza máquinas com receptores GPS para gerar mapas de produtividade, há uma necessidade de estudos que aperfeiçoam a precisão dos dados coletados pelos receptores de GPS, buscando melhorar a precisão do sinal recebido e, conseqüentemente, maximizar os índices de produção.

### 1.3 Objetivos

Os objetivos deste trabalho são:

- Realizar uma análise estática e dinâmica da precisão do receptor GPS.

- Estudar técnicas de processamento para melhorar a precisão de GPS sem correção.
- Analisar os efeitos da utilização de filtros digitais na precisão dos sinais adquiridos por receptores GPS sem correção diferencial.
- Auxiliar os pequenos produtores na otimização da sua produção, com a utilização dos receptores GPS de baixo custo.

## 1.4 Estrutura do Trabalho

No capítulo 2 é apresentado um breve estudo das técnicas e ferramentas utilizadas para o processamento dos dados fornecido pelos receptores GPS. São descritos também alguns conceitos necessários para a manipulação dos dados como cálculo de distância, correção de sinais e cálculo de incerteza. No capítulo 3 é apresentado uma descrição das metodologias utilizadas para confecção dos ensaios estáticos e dinâmicos. No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos experimentalmente fazendo-se um comparativo dos sinais antes e após a utilização de técnicas de processamento de sinais. Por fim no capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho, além de algumas propostas para os trabalhos futuros.

## 2 Processamento de Sinais de GPS

Nesse capítulo serão abordados os conceitos fundamentais para manipulação e processamentos de dados. Um breve estudo sobre os protocolos de comunicação da Associação Nacional de Eletrônica Marinha (NMEA, do inglês *National Marine Electronics Association*) é abordado para o entendimento dos dados fornecidos pelos receptores GPS. Os conceitos de cálculos de distâncias são apresentados com o objetivo de mostrar quais foram os modelos matemáticos utilizados para determinação do posicionamento em metros do receptor GPS. Para a avaliação quantitativa do estudo fez-se um breve levantamento das ferramentas estatísticas, e por fim fez-se uma análise da utilização dos filtros nos processamentos de sinais.

### 2.1 Revisão Bibliográfica

Quando o assunto em estudo é a maximização da produção na agricultura, diversas metodologias são pesquisadas para a análise e correção dos sinais gerados pelos receptores GPS, como o estudo de Santos et al. (2016) que avaliou a qualidade dos dados geográficos fornecidos por receptores GPS, utilizando o método diferencial estático para o pós-processamento dos dados. Todos os tratamentos realizados pelos receptores operaram com base no *Datum* geocêntrico *World Geodetic system* (WGS-84) para obtenção dos dados geográficos. Como resultado foram encontrados receptores que estavam fora do intervalo de confiança, apresentando erros associados às características intrínsecas dos receptores ou as condições atmosféricas no momento da coleta.

O trabalho proposto por Frasson et al. (2005) avalia o desempenho estático de três receptores GPS com características diferentes (dois receptores de navegação Garmin, e um terceiro receptor OmniStar com sinal diferencial), através de uma análise estatística, calculando os desvios entre os pontos de coletas em relação ao ponto de referência através do Erro Médio Quadrático (RMSE, do inglês *Root Mean Square Error*) e do Erro Circular Provável (CEP, do inglês *Circular Error Probable*). A análise da precisão é verificada com os desvios dos pontos em relação a média das leituras. Durante essa análise, o receptor OmniStar apresentou uma melhor precisão em relação aos receptores Garmin.

A proposta de Machado, Molin et al. (2011) analisou o desempenho de oito receptores GPS ativando ou não a correção diferencial, através de ensaios estático e cinemático. Inicialmente, o sistema foi posicionado em um local livre de impedimentos físicos para afixar os receptores. Os tratamentos foram realizados em dias consecutivos, pois a coleta de dados em dias consecutivos para um geometria inalterada, deve seguir os mesmos padrões. Nos receptores utilizados, alguns possuíam regulagem da intensidade de filtragem, outros possuíam a opção para sintonização de correção diferencial. A análise do desem-

penho cinemático foi realizada utilizando uma referência e um trator, que realizava um percurso simulando o plantio mecanizado para duas fileiras espaçadas de 1,50 m. Os autores observaram que os receptores GPS que utilizaram correções diferenciais via satélite demonstraram ter uma maior precisão que os outros utilizados.

Uma metodologia para o estudo dos ensaios cinemáticos pode ser observada no trabalho de Molin e Carreira (2006), no qual utilizou-se um pulverizador autopropelido equipado com piloto automático e antenas instaladas de forma alinhada na cabine. Como referência utilizou-se um receptor GPS *RTK*, *Real-Time Kinematic* com uma base localizada em coordenadas conhecidas. A utilização de um receptor (base fixa) equipado com um transmissor de rádio VHF foi necessária para transmitir dados de correção em tempo real para a unidade móvel. Os dados referentes ao tratamento foram separados com o auxílio do software Microsoft Excel e um aplicativo programado em Visual Basic realizou a análise dos dados gerados pelos receptores. A utilização do GPS *RTK* como referência proporcionou a análise dos dados sem a necessidade de mensuração dos erros em campo, o que representou uma maior rapidez com menor chance de erros. Nesse trabalho também observou-se a influência da velocidade na mensuração dos erros, realizando experimento com três velocidades diferentes e progressivas, e verificando que para as maiores velocidades os erros foram menores.

No trabalho de Stabile e Balastreire (2006) realizou-se uma comparação dos desempenhos de três receptores GPS para o uso na agricultura de precisão, dando enfoque para a análise envolvendo a repetibilidade dos dados e a estabilidade do sistema. Realizou-se a análise de maneira cinemática, com as antenas dos receptores localizadas ao redor de um ponto na cabine de um trator, com a intenção de reduzir os erros. Para plotar os gráficos dos pontos e realizar os cálculos das regressões e os desvios das linhas, o autor utilizou o software Microsoft Excel.

No trabalho apresentado por Salvi, Passalacqua e Molin (2011) foi realizada uma avaliação dos sinais *RTK* e *RTK* em rede, realizando ensaios cinemáticos e estáticos num local que não era totalmente livre de obstáculos, com a intenção de simular condições reais de trabalho, onde são encontradas frequentemente árvores próximas das bordas dos talhões, que são as unidades mínimas de cultivos de uma propriedade. Para os ensaios foram utilizados sistemas *RTK* com correção diferencial pela base de campo, *RTK* com correção diferencial pela rede de estação via rádio e *RTK* com correção diferencial por meio de estação via internet. As repetições nos ensaios foram realizadas com uma hora de coletas de dados e uma hora de intervalo. Para o ensaio cinemático montou-se uma estrutura circular, na qual o veículo se desloca com velocidade constante. A análise foi realizada estabelecendo um modelo que calculava os desvios em relação ao trajeto correto. Esse modelo foi determinado em função da menor soma do quadrado dos desvios entre a referência e os pontos coletados.

A maioria dos autores citados realizou a medição dos erros utilizando GPS com

correção diferencial, mas para redução dos custos da aplicação tecnológica na agricultura de precisão, a pesquisa realizada por Delalibera et al. (2007) propôs uma análise da precisão de receptores de sinais sem correção diferencial, e utilizou versão gratuita do programa computacional GPS TrackMaker como interface entre o receptor manual e o computador, possibilitando a manipulação das coordenadas. Durante o período de um ano o receptor foi fixado um local para a determinação da localização indicada. A coleta de dados foi realizada três vezes na semana com cinco observações diárias. Os valores em coordenadas planas foram transferidos para o software Microsoft Excel para fazer as análises preliminares, com isso determinou-se a precisão do receptor, obtendo um erro escalar em metros e um erro vetorial em graus. Com os conjuntos de valores coletados se determinou a precisão do receptor através da coordenada média estabelecida com várias leituras do receptor. Os valores dos erros foram transformados e normalizados, e como resultado observou-se uma tendência do receptor em indicar as coordenadas coletadas próximas da referência, possuindo uma alta incerteza e razoável precisão.

## 2.2 Protocolo NMEA

O protocolo NMEA é composto por um conjunto de especificações de dados para comunicação entre dispositivos eletrônicos de navegação. A comunicação realizada pelo sistema GPS é definida através dos protocolos NMEA, fornecendo linhas de dados (sentenças) que são totalmente independentes. As linhas de dados sempre são iniciadas com o símbolo \$ e terminam com um carriage return, e cada item de dado é separado por vírgula ( , ). Os dados são descritos no formato do código Padrão Norte-americano para Intercâmbio de Informações (ASCII, do inglês, *American Standard Code for Information Interchange*) e possuem até 82 caracteres. O primeiro padrão NMEA foi liberado no ano de 1983, e vem sendo atualizado constantemente, sendo sua última versão disponibilizada em Janeiro de 2002.

Alguns protocolos foram definidos para padronizar a comunicação envolvendo sinais de GPS (HEWERDINE, 2005). Nas Tabelas 1 e 2, são apresentados os significados dos campos de cada item de dados para as sentenças GLL e RMC.

1. Protocolo GLL (Geographic Position - Latitude/Longitude)

Tabela 1 – Tabela com informações de cada dado do protocolo GLL.

Nome	Exemplo	Unidade	Descrição
Mensagem ID	\$GPGLL		Cabeçalho do Protocolo
Latitude	3723.2475		dddmm.mmmm
Indicador N/S	N		N=norte ou S=sul
Longitude	1215.83416		dddmm.mmmm
Indicador E/W	W		E=leste or W=oeste
Hora UTC	1612.29487		hhmmss.sss
Status	A		A=dados válidos ou V=dados não válidos
Soma de Verificação	*10		
<CR> <LF>			Fim da mensagem

Fonte: Retirado de Mehafeey (2004).

## 2. Protocolo RMC (Recommended Minimum Specific GNSS Data)

Tabela 2 – Tabela com informações de cada dados do protocolo RMC

Nome	Exemplo	Unidade	Descrição
Mensagem ID	\$GPRMC		Cabeçalho do Protocolo
Hora UTC	16122.9487		hhmmss.sss
Status	A		A=dados válidos ou V=dados não válidos
Latitude	3723.2475		ddmm.mmmm
Indicador N/S	N		N=norte ou S=sul
Longitude	1215.83416		dddmm.mmmm
Indicador E/W	W		E=leste or W=oeste
Velocidade sobre o solo	0.13	nós	
Curso sobre o solo	309.62	graus	
Data	120598		ddmmaa
Varição Magnética		graus	
Soma de Verificação	*10		
<CR> <LF>			Fim da mensagem

Fonte: Fonte: Retirado de Mehafeey (2004).

## 2.3 Cálculo de Distância

Os receptores GPS recebem os protocolos de comunicação. Através desses protocolos padronizados pela NMEA é possível obter dados específicos para cada aplicação. Dentre os dados disponíveis, destacam-se os valores das coordenadas geodésicas, representado pela latitude e longitude. A latitude de um ponto é a distância angular entre o plano do equador e um ponto da superfície da terra, unido perpendicularmente ao centro do planeta e com variação entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , nas direções norte e sul. A longitude de um

ponto é considerada como o ângulo formado entre o meridiano de origem (geralmente o Greenwich= 0° ) e o ponto considerado, a longitude varia entre 0° e 180°, nas direções leste e oeste desse meridiano (FITZ, 2018).

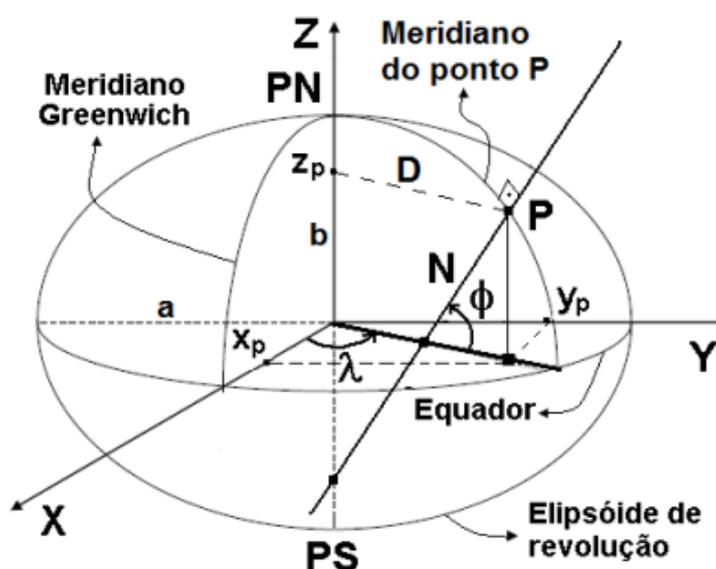
Nos protocolos utilizados para comunicação, geralmente os valores de latitude e longitude são fornecidos na forma de graus, minutos e segundos, mas para aplicações de posicionamento é interessante trabalhar na forma de graus decimais. Uma transformação é necessária para fazer a conversão, e na Equação (2.1) é mostra uma forma de fazer essa conversão.

$$Grausdecimais = Graus + ((Minutos/60) + (Segundos/3600)) \quad (2.1)$$

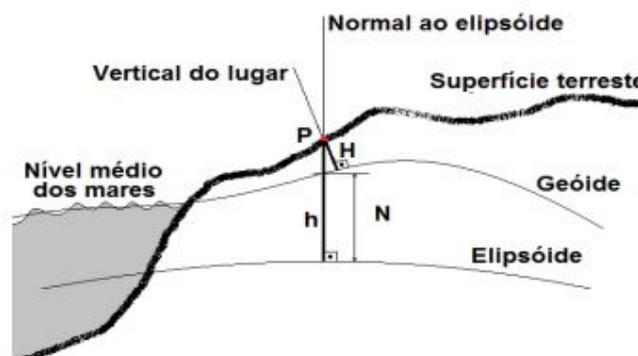
No modelo de coordenadas geodésicas, é adotado como superfície de referência um elipsoide, que é dividido em círculos paralelos ao equador, e em elipses perpendiculares aos paralelos e passantes pelos polos terrestres como ilustrado nas Figuras 1a e 1b.

Figura 1 – Exemplo hipotético de um sistema geodésico de referência

(a) Sistema geodésico de referência



(b) Altitudes de um ponto na superfície terrestre



Fonte:Retirado de Silva (2012)

Uma transformação do sistema de coordenadas geodésicas para o sistema de coordenadas cartesianas facilita os cálculos de distância, pois é importante se obter a distância em metros (m) ou quilômetros (Km). Para a transformação de coordenadas são utilizados os modelos matemáticos apresentados nas equações (2.2), (2.3) e (2.4) (SILVA, 2012):

$$X = (N + h)\cos\lambda\cos\Phi, \quad (2.2)$$

$$Y = (N + h)\sen\lambda\cos\Phi, \quad (2.3)$$

$$Z = [(1 - e^2)N + h]\sen\Phi, \quad (2.4)$$

em que  $N$  é um dos raios principais de curvatura, calculado pela Equação (2.5) e  $h$  é a altitude terrestre, como ilustrada na Figura 1b.

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2\sen^2\Phi}}, \quad (2.5)$$

Na equação (2.5) as constantes ‘ $a$ ’ e ‘ $e$ ’ são respectivamente o semi-eixo maior do elipsoide e a primeira excentricidade, tal que (sendo  $b$  o semi-eixo menor) a primeira excentricidade ( $e$ ) é calculada conforme a equação (2.6)

$$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}, \quad (2.6)$$

Com as coordenadas cartesianas torna-se fácil a determinação da distância entre dois pontos na superfície terrestre, bastando apenas aplicar o teorema de pitágoras como pode ser visto na Equação (2.7) .

$$d(P, Q) = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2}, \quad (2.7)$$

A superfície terrestre é muito difícil de ser estudada, devido a sua irregularidade, por isso modelos matemáticos são desenvolvidos por cientistas para estudar o planeta. Assim sendo, o *Datum* um modelo matemático teórico da representação da superfície da Terra. Dessa forma, ao efetuar conversões, deve-se informar qual é o *Datum* utilizado para realização dos cálculos. O *Datum* padrão no mundo é o WGS 1984 (*World Geodetic System*, de 1984), mas existem outros modelos de terra e *Datum* adotados, como por exemplo o Sirgas 2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas, ano 2000), utilizado no Brasil. Para o uso nos GPS é frequente o uso do datumo 1984, de forma que para realizar os cálculos de distâncias deve-se considerar o modelo matemático WGS 1984.

## 2.4 Diluição de Precisão no GNSS

Entre os fatores que afetam a eficiência das coletas de dados pelos receptores GPS estão às posições dos satélites na constelação. Como já mencionado, são necessários quatro satélites para obter a posição em três dimensões (latitude, longitude, altitude e tempo) e três satélites para obter a posição em duas dimensões (latitude, longitude e tempo), embora seja aconselhável ter cinco ou mais satélites visíveis durante a coleta de dados, pois esses satélites asseguram que a posição seja coletada mesmo se o sinal de um satélite perca durante a leitura da posição. A posição relativa entre esses satélites podem alterar a precisão dos dados coletados pelos receptores GPS (DUTRA, 2017).

O indicador que fornece a informação referente à posição relativa da localização de cada satélite em relação com os demais é denominado Diluições de Precisão (DOP, do inglês, *Dilution of Precision*). Valores baixos de DOP indicam que os resultados terão uma alta precisão, e se o valor do DOP indicar um valor alto, então os resultados terão baixa precisão. Todas as variáveis que contém a terminação com as letras “DOP” significa diluições de precisão, e a modificação do significado da variável é representado pela letra anterior ao DOP, como podem ser vistos nos tópicos a seguir:

- **HDOP:** Diluição da Precisão Horizontal (HDOP, do inglês *Horizontal Dilution of Precision*)
- **VDOP:** Diluição da Precisão Vertical (VDOP, do inglês *Vertical Dilution of Precision*)
- **PDOP:** Diluição da Precisão de Posição (PDOP, do inglês *Position Dilution of Precision*), Geralmente VDOP e HDOP foram substituídas pelo PDOP que já dá a precisão das duas anteriores na mesma variável.
- **TDOP:** Diluição da Precisão Temporal (TDOP, do inglês *Time Dilution of Precision*)
- **GDOP:** Diluição da Precisão Geométrica (GDOP, do inglês *Geometric Dilution of Precision*), basicamente é a combinação de todos as diluições acima, como indicado na Equação (2.8) .

$$GDOP = \sqrt{(PDOP)^2 + (TDOP)^2} \quad (2.8)$$

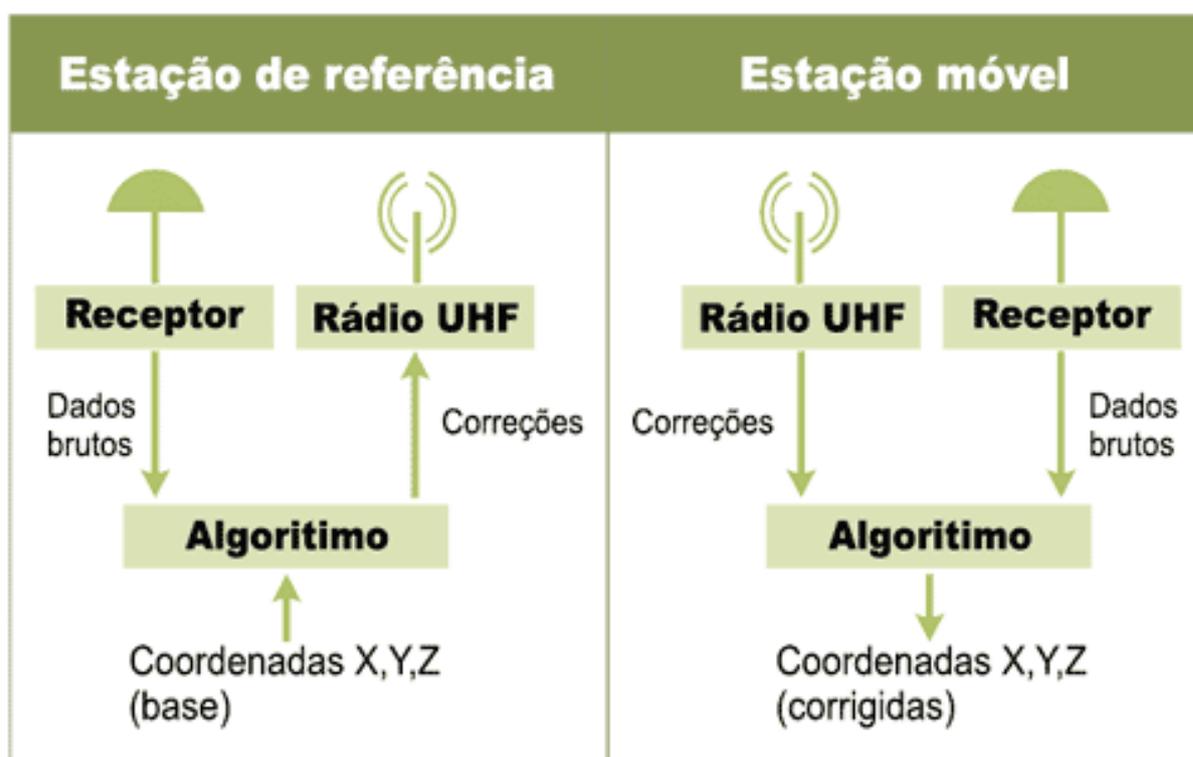
## 2.5 Sinais com Correção

Buscando melhorar a precisão do posicionamento de um objeto foram desenvolvidos sistemas como o RTK e *RTX, Real-Time Extended* , que possibilitam a minimização dos erros em tempo real. O sistema RTK proporciona uma precisão de nível centimétrico

possuindo dois ou mais receptores, sendo um receptor fixo localizado em um ponto de coordenadas conhecido (estação de referência), e um ou mais receptores móveis. Os erros entre as posições fornecidas pelos satélites e a posição real é calculada nas estações de referência, que geram e retransmitem através de conexão de rádio as correções diferenciais para as estações móveis, que utilizam essas informações para correção instantânea da sua posição (PASSALAQUA et al., 2016). Na Figura 2 está ilustrado um esquema do sistema RTK, no qual a estação de referência recebe a coordenada base e os dados brutos, e com a utilização de um algoritmo o sinal é corrigido e transmitido via rádio para a estação móvel. Na estação móvel o sinal corrigido e os dados brutos são recebidos e utilizados por um algoritmo que realiza a correção das coordenadas recebidas.

As estações de referência virtuais (VRS, do inglês, *Virtual Reference Station*) são alternativas de correções, pois possuem uma rede de estações que enviam dados de GNSS a um servidor central para correções dos erros de forma regionalizada, sem a necessidade da utilização de antenas para a comunicação via rádio com o receptor (PASSALAQUA et al., 2016).

Figura 2 – Esquema das Estações de Referência e Móvel do sistema RTK.

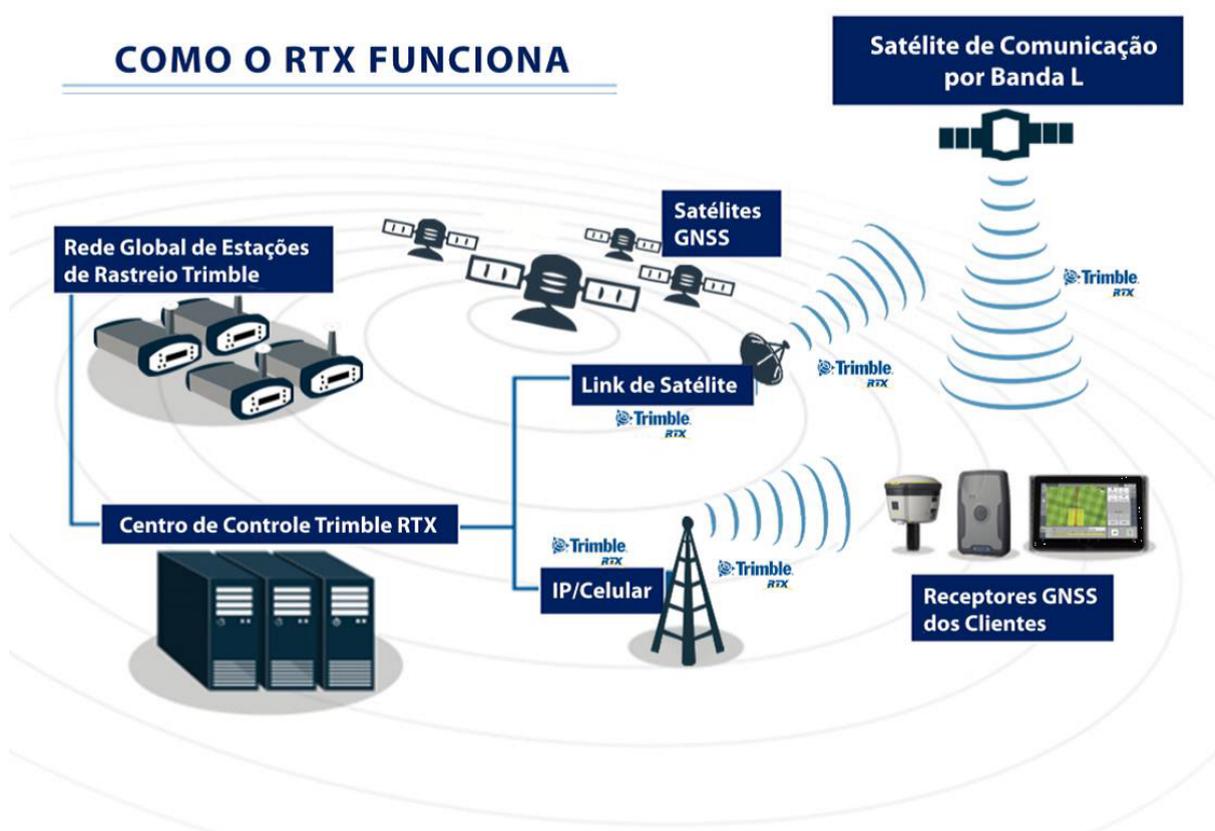


Fonte:Retirado de Oliveira (2011)

Os sistemas RTX proporcionam ao usuário uma precisão centimétrica, e utilizam dados de rede global de estação de referência de monitoramento contínuo para calcular e retransmitir dados corrigidos. As correções do sistema RTX são transmitidas via satélite

ou via internet IP (*Internet Protocol*) para todo o mundo, permitindo a disponibilidade do serviço em locais difíceis. A Figura 3 compreende ao princípio de funcionamento do sistema RTX. A rede de estação de referência transmite dados via internet para os centros de controle do RTX. Nos centros de controle são realizadas as correções dos erros dos sinais. Esse sistema possui uma infraestrutura suficiente para propagação das correções via internet e também um sistema de comunicação que transmite a correção para os satélites. Desta forma o usuário recebe a correção por meio de receptores GNSS (DALBELO RODRIGUES, 2016).

Figura 3 – Diagrama do funcionamento do sistema RTX .



Fonte:Retirado de Dalbello Rodrigues (2016)

Além dos dois tipos de sistemas de correção mencionados anteriormente, existem outros serviços de correção de sinais disponíveis. Dentre eles, podemos citar os quatro tipos serviços oferecidos pela empresa Omnistar:

1. Omnistar HP que possui uma precisão de 10 cm, operando em tempo real e dispensando a necessidade de estação base locais, e utilizados para orientações de maquinas e tarefas de levantamentos
2. Omnistar G2 disponibiliza também os serviços de precisão de 10 cm, na sua utilização inclui os satélites do sistema GLONASS que viabiliza o seu uso em locais

com condições que limitam a visibilidade de satélites, como terreno, vegetações e edifícios.

3. Omnistar XP é adequado para sistemas de direção automáticos, apesar de possuir uma precisão menor que Omnistar HP
4. Omnistar VBS possui um erro máximo de até 1m num intervalo de 24 horas.

## 2.6 Cálculo de Incerteza

O objetivo de uma medição é a determinação do valor do mensurando, mesmo mantendo todos os cuidados na hora da medição e possuindo uma condição ambiental favorável, os resultados serão afetados por erros, então os valores encontrados em uma medição são estimativas do valor do mensurando, que se completa pelo acompanhamento da declaração de incerteza dessa estimativa (BIPM et al., 2012). Para caracterizar o grau de rigor em que as medidas são efetuadas, os conceitos de exatidão e precisão são utilizados. Segundo BiPM et al. (2012) a exatidão é o grau de concordância entre o valor medido e um valor verdadeiro dum mensurando, ao passo que a precisão é o grau de concordância entre a indicação ou valores medidos, obtidos por medição repetidas no mesmo objeto ou em objetos similares sob condições específicas.

A existência dos erros em uma medida pode ser associada a diversos fatores, e podem ser classificados em:

- Erros grosseiros: são associados à falta de atenção, pouco treino ou falta de pericia do operador, sendo um erro fácil de identificação e eliminação.
- Erros sistemáticos: são os erros que influenciam no resultado sempre no mesmo sentido, como por exemplo, o posicionamento incorreto da escala do zero que influenciam todas as leituras feitas com esse instrumento. Esses erros devem ser compensados e corrigidos.
- Erros aleatórios: são os erros devido à variabilidade dos processos físicos, nesses casos os erros são imprevisíveis e devem ser tratados com métodos estatísticos.

Mesmo com as correções dos erros grosseiro e sistemático, existem na medição uma imprecisão em todos os valores medidos, devido a efeitos ambientais ou efeitos das características intrínsecas dos instrumentos de medição. Por isso uma análise estatística dos dados é fundamental, pois permite uma estimação da incerteza associada ao resultado. As incertezas são agrupadas em dois componentes, baseadas no seu método de avaliação, a incerteza-padrão do tipo A e a incerteza-padrão do tipo B. A avaliação do tipo A é um método de avaliação de incerteza pela análise estatística de séries de observações, ao passo que a avaliação do tipo B é um método de avaliação de incerteza por outros meios que

não utiliza a análise estatística de séries de observações. Os componentes de incerteza são quantificados pela(DAMASCENO; ANTONIO; OLIVEIRA, 2008):

1. A variância ( $S^2$ ) que caracteriza um componente de incerteza obtido de uma avaliação do tipo A, e é calculada a partir de uma série de observação repetida, sendo determinada com a Equação (2.9).

$$S^2(q_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2 \quad (2.9)$$

Em que  $n$  é o número de leituras,  $q$  são as observações individuais e  $\bar{q}$  é a média aritmética das observações que é calculada conforme a Equação (2.10).

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (2.10)$$

2. O desvio padrão( $S$ ) é a raiz quadrada positiva da variância, e por vez denominada incerteza-padrão do tipo A.
3. O erro circular provável indica o limite que contém 50 % de todos os erros em uma distribuição circular (CABRAL, 2004), seu calculo é conforme a equação (2.11).

$$CEP = 1,18\sqrt{\sigma_E^2 + \sigma_N^2} \quad (2.11)$$

no qual CEP é o desvio circular provável,  $\sigma_E$  é o desvio padrão da coordenada E (m) e  $\sigma_N$  é o desvio padrão da coordenada N (m).

## 2.7 Filtros

Filtros são ferramentas utilizadas para a remoção das partes indesejadas do sinal, como componentes de uma certa frequência e extrair partes uteis de um sinal. Os filtros podem se classificar em filtros analógicos e filtros digitais. Os filtros analógicos são constituídos por circuitos eletrônicos compostos basicamente por resistores, capacitores e amplificadores operacionais e os filtros digitais utilizam processamentos digitais de sinais para realização de cálculos numéricos em cima de amostras de sinal (NUNES et al., 2006).

Os filtros digitais possuem as seguintes vantagens em relação aos filtros analógicos:

- São programáveis, possibilitando fazer alterações sem a necessidade de realizar modificações nos circuitos eletrônicos.
- São fáceis de serem projetados, possibilitando as realizações de testes e as implementações em computadores simples.

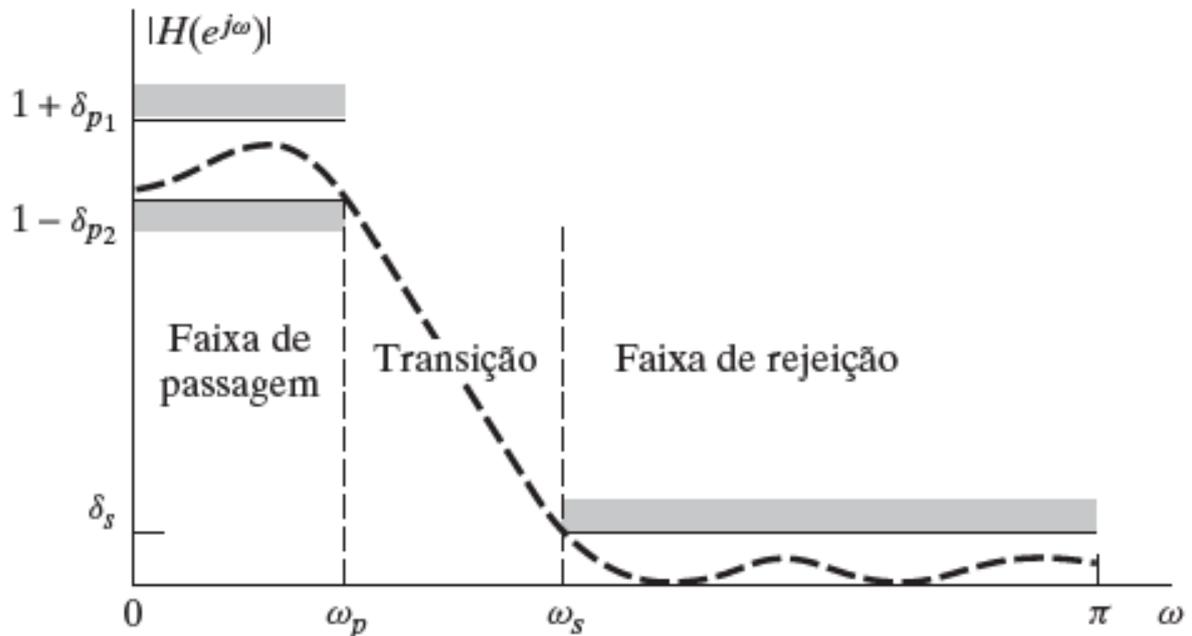
- São inertes as mudanças de temperatura, não sofrendo alterações nos valores devido as variações de temperatura.
- Suportam uma larga escala de trabalho em baixas frequências.
- Capacidade de adaptação automaticamente a característica de cada sinal, o que os torna muito mais versáteis no processo de filtragem (NUNES et al., 2006).

De acordo com a faixa de passagem e atenuação dos sinais, os filtros digitais podem ser classificados em :

1. **Filtros Passa-baixas:** são filtros que permitem a passagem dos sinais somente em baixas frequências, e atenuam os sinais de altas frequências.
2. **Filtros Passa-altas:** são filtros que permitem a passagem somente em frequências altas e atenuam os sinais de baixas frequências
3. **Filtros Passa-faixas:** são filtros que permitem a passagem somente de sinais em uma faixa de frequência, e atenuam os sinais de altas e baixas frequências.
4. **Filtros Rejeita-faixas:** São filtros que permitem a passagem de sinais de altas e baixas frequências, e atenuam os sinais de uma faixa de frequência.

A Figura 4 ilustra os limites de tolerância com aproximação de um filtro ideal com ganho unitário. Como a transição da faixa de passagem para a faixa de rejeição não é realizada de maneira abrupta, uma região de transição de frequência da extremidade da faixa de passagem  $\omega_p$  até o início da faixa de rejeição em  $\omega_s$  é permitida. De acordo com a aplicação dos filtros a faixa de passagem pode variar simetricamente em relação ao ganho unitário caso em que  $\delta_1 = \delta_2$  (OPPENHEIM; SCHAFER, 2012).

Figura 4 – Diagrama de tolerâncias de um filtro passa-baixas.



Fonte: Retirado de Oppenheim e Schafer (2012)

## 2.7.1 Tipos de filtros

### 2.7.1.1 Filtros *Butterworth*

Os filtros *Butterworth* foram desenvolvidos com a finalidade de possuírem o mínimo possível de oscilações tanto na banda passante como na banda de corte. A magnitude da resposta em frequência de um filtro *Butterworth* passa-baixas de ordem “n” pode ser definida matematicamente por (2.12).

$$G_n(\omega) = |H_n(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega/\omega_c)^{2n}}} \quad (2.12)$$

Em que G é o ganho do filtro, H é a função de transferência, n é a ordem do filtro,  $\omega$  é a frequência angular do sinal em radianos por segundo e  $\omega_c$  é a frequência de corte (frequência com - 3 dB de ganho).

O filtro *Butterworth* é o único filtro que mantém o mesmo formato para as ordens mais elevadas, mas com uma inclinação mais íngreme na banda atenuada, diferentemente das outras variedades de filtros (PETRY, 2015).

### 2.7.1.2 Filtro Chebyshev e o Filtro Elíptico

Os filtros Chebyshev são filtros desenvolvidos para realizar a minimização do erro entre as características do filtro idealizado e o filtro projetado, mas há um maior ripple

na faixa de passagem em comparação com os filtros *Butterworth* e também possuem um aumento na atenuação mais íngreme. Os filtros elípticos são filtros que possuem ondulação tanto na banda passante, quanto na banda rejeitada. Os filtros elípticos também minimizam o erro máximo, ao mesmo tempo na banda passante e na banda rejeitada (PETRY, 2015).

### 2.7.1.3 Filtros Média Móvel

Como já mencionado, os sinais de GPS carregam incertezas, que podem ser atribuídas à reflexão dos sinais, aos múltiplos caminhos, entre outros motivos. A utilização de filtros digitais nesses sinais permite a redução dos níveis de dispersão. Filtros de média móvel são ferramentas utilizadas para detecção de tendências e remoção de ruído. Seu funcionamento é baseado no cálculo de médias utilizando como referência os sinais adquiridos previamente, conforme definido na equação 2.13 (LIMA, 2015).

$$y_i = \frac{1}{N} \sum_{K=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} x_{i+k} \quad (2.13)$$

Em que  $y_i$  são os termos da série temporal filtrada pela média móvel centrada,  $N$  é a ordem da média móvel, sendo um número ímpar e  $x$  são os termos da série temporal original

## 2.8 Transformada Wavelet

A transformada *Wavelet* compreende uma das etapas do processo evolutivo da análise de sinais, relacionando tempo e escala. Trata-se de uma ferramenta conhecida por permitir a decomposição de funções e possibilitar a reconstrução destas, com uma resolução razoavelmente boa. A principal vantagem dessa técnica é a não utilização de uma escala fixa na análise dos sinais, impedindo o comprometimento com uma escala específica. Com isso, é possível implementar escalas maiores para analisar sinais de baixa frequência e escalas menores para analisar sinais de alta frequência (TIAGO, 2011).

Segundo Tiago (2011) enquanto as senóides que são a base da transformada de Fourier não têm duração finita, são suaves e previsíveis, as funções *wavelet* exibem duração finita, são irregulares e em certos casos são assimétricas, possibilitando a essa transformada uma boa localização no tempo, e sua análise interessante para casos em que o sinal estudado não mostra características uniformes.

A Transformada *Wavelet* pode ser utilizada em forma contínua ou discreta. A Transformada *Wavelet* contínua foi largamente estudada por matemáticos e possui como principais aplicações a remoção de ruídos e a compressão de imagens. Sua derivação e compreensão das propriedades matemáticas das funções *wavelet*, sua discretização é essencial para aplicações práticas, como por exemplo, em casos onde se tem a necessidade

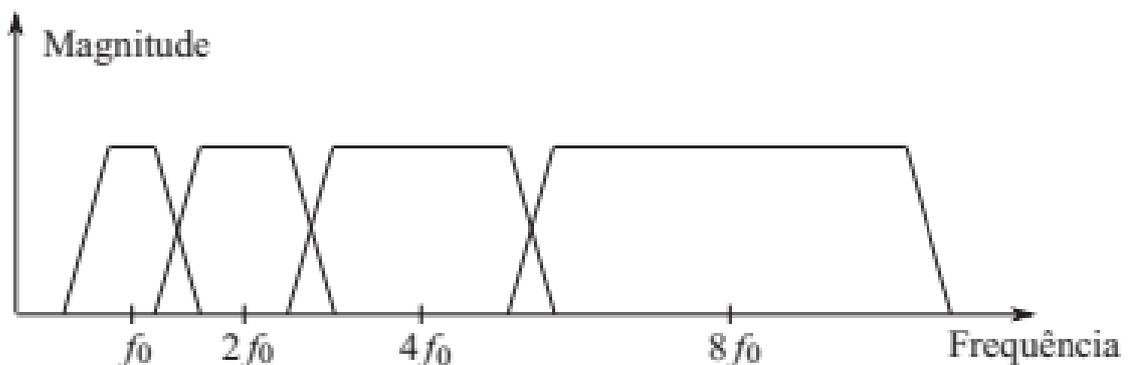
de inverter uma operação, ou descrever um sinal unidimensional em uma representação bidimensional (SILVA, 2008). Dessa forma, nesse trabalho será utilizada a Transformada *Wavelet* Discreta (DWT, do inglês *Discrete Wavelet Transform*).

### 2.8.1 Análise de Multirresolução

O estudo de análise de Multirresolução se refere a uma técnica que visa formalizar as variações de escala para que a representação de características dos elementos físicos seja realizada de maneira adequada. Essa técnica tem como principal característica permitir a variação da escala para caracterizar os sinais, possibilitando identificar características que antes não eram perceptíveis através da variação da resolução tanto no tempo quanto na frequência (TIAGO, 2011).

Segundo Tiago (2011) essa ferramenta pode ser executada aplicando banco de filtros. Dessa forma, ao se usar um banco de filtros com uma largura de banda ajustada em função de uma frequência central estabelecida, as informações antes eliminadas podem ser empregadas num processo de classificação de sinais. Podendo ser verificado esse comportamento na Figura 5, que corresponde a resposta em frequência de um banco de filtros usados na transformada de *wavelet*.

Figura 5 – Resposta em frequência dos filtros utilizados para análise de multirresolução



Fonte: Retirado de (TIAGO, 2011)

Analisando a Figura 5, nota-se que essa análise é bastante eficiente para caracterizar sinais de baixa frequência e longa duração somada a elementos de alta frequência e curta duração, que são situações encontradas frequentemente em aplicações práticas.

### 2.8.2 Representação de funções através de subespaços

O espaço de escala tem como finalidade representar uma função qualquer através de um somatório de subespaços, com funções que podem ser representadas em determinada

escala. Em geral sua representação é em potência de dois ( $2^s$ ), em que  $s$  é um número inteiro para definir a escala adotada.

Por isso, para uma determinada função  $\Phi(t)$  com  $s$  inteiro é criado um espaço de escala com auxílio de um subespaço  $V_s \subset L^2\mathbb{R}$ , com  $\mathbb{R}$  o conjunto de funções quadraticamente integráveis de energia finita. Esse conceito é aplicado na Equação (2.14).

$$\Phi_{s,k}(t) = 2^{-s/2}\Phi(2^{-s}t - k), \quad s, k \in \mathbb{R} \tag{2.14}$$

Sendo  $s$  o fator escala,  $k$  o índice de translação da função e  $\Phi_{s,k}(t)$  uma função de modulação. Essa função é denominada função de escala.

Assim  $\Phi_{s,k}(t)$  é a representação de uma versão escalonada e transladada da função original  $\Phi(t)$ , é possível representar através de um somatório de funções  $\Phi_{s,k}(t)$  uma função qualquer de energia finita:

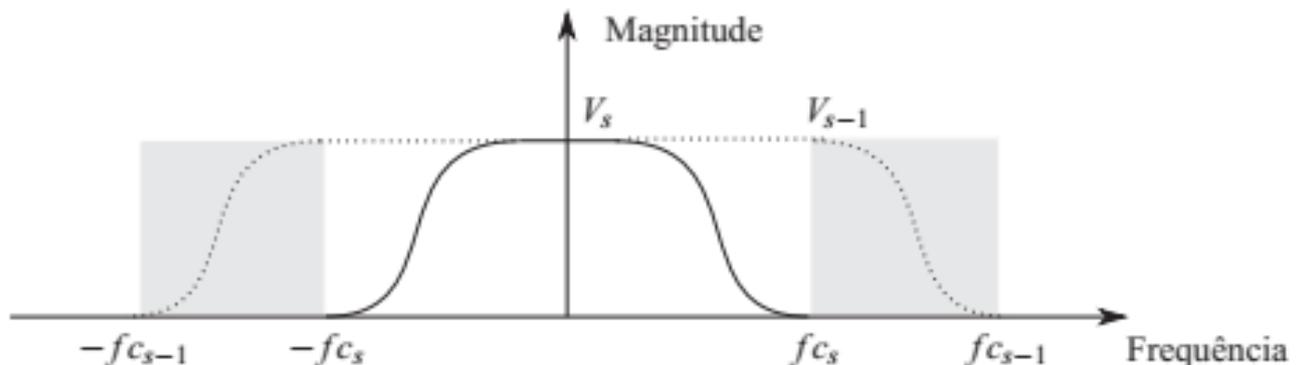
$$f(t) = \sum_k c_k \Phi_{s,k}(t), \tag{2.15}$$

Em que  $c_k$  representa as constantes de aproximação que minimizam o valor da função de erro.

Como nota-se, é possível usar um conjunto de filtros para decompor um sinal original, com bandas de frequências  $\omega$ , contendo diferentes sinais com banda de frequências distintas, permitindo o sinal original ser reconstruído a partir dos sinais decompostos. Essa banda de frequências é denominada subespaço. A visualização desses subespaços pode ser facilitada através da análise de Fourier (TIAGO, 2011).

Observando a Figura 6, tem-se uma analogia entre a projeção ortogonal de uma função  $f(t) \in L^2\mathbb{R}$  e a resposta em frequência de um filtro passa-baixas.

Figura 6 – Banda de Frequência



Fonte: Retirado de (TIAGO, 2011)

Fazendo a frequência de corte do filtro como  $fc_s$ , tem-se que cada subespaço  $V_s$  é composto por funções com banda entre  $[-fc_s, fc_s]$ . Dessa forma, na passagem do subespaço

$V_s$  para  $V_{s-1}$ , a escala é reduzida a  $2^s$  para  $2^{s-1}$ , aumentando a banda de sinal para  $[-fc_{s-1}, fc_{s-1}]$  como apresentado na Figura 6.

Entretanto é possível relacionar a escala utilizada para análise dos sinais com a resposta em frequência de um filtro passa-baixas. Dessa forma, da perspectiva de processamento de sinais, a função de escala  $\Phi(t)$  pode ser representada por uma função de transferência de um filtro passa-baixas

### 2.8.3 Famílias de *Wavelet*

A análise wavelet apresenta a decomposição dos sinais por meio de versões escalonadas e deslocadas da família wavelet escolhida para realização da decomposição, denominada wavelet-mãe (TIAGO, 2011).

Na seleção da família, não existe um método específico para a escolha da família wavelets a ser empregada para determinado caso, sendo que esse processo se torna complexo, em decorrência do grande número de variações de cada uma das wavelets-mãe.

Na definição de uma função como uma família de wavelets, é necessário atender algumas condições básicas e necessárias (SILVA, 2008):

1. Que  $\psi \in L^2 \mathbb{R}$ , ou seja, a função pertença ao espaço das funções de quadrado integrável ou, ainda, o espaço das funções de energia finita, conforme a Equação 2.16 (SILVA, 2008):

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty, \quad (2.16)$$

2. A transformada e Fourier de  $\psi(t)$ , denotada por  $\Psi(\omega)$ , atenda a condição de admissibilidade, conforme 2.17:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty, \quad (2.17)$$

Através da equação 2.17 se conclui que as áreas negativas anulam as positivas no gráfico de uma função *Wavelet*, pois o somatório das áreas de uma função *Wavelet* no domínio do tempo deve ser nulo.

#### 2.8.3.1 Família Haar

Essa família se trata da mais simples, foi proposta em 1909 pelo matemático húngaro Alfred Haar. A *Wavelet* de Haar demonstra as grandezas que envolvem os valores de forma não contínua, resultando em um caso particular da transformada *Wavelet* discreta e se assemelha a uma função degrau unitário (TIAGO, 2011).

As funções de escala  $\phi(t)$  e *Wavelett*  $\psi(t)$  são definidas pelas equações 2.18 e 2.19.

$$\phi(t) \begin{cases} 1, t \in [0, 1] \\ 0, t \notin [0, 1] \end{cases} \quad (2.18)$$

$$\psi(t) = \begin{cases} 1, t \in [0, 0.5] \\ -1, t \in [0.5, 1] \\ 0, t \in [0, 1] \end{cases} \quad (2.19)$$

Durante o processo de decomposição utilizando funções *Wavelet* de Haar, pode haver descontinuidade ocasionado pelo fato dessas funções não serem continuamente diferenciáveis. Como consequência, a reconstrução do sinal original a partir de decomposições não ocorre de forma perfeita.

### 2.8.3.2 Família *Daubechies*

Segundo Tiago (2011) trata-se de uma família de *Wavelets* ortonormais de suporte compacto. A expressão suporte compacto significa que as funções da família *Daubechies* estão definidas em um intervalo fechado, de forma que os valores que não estão dentro desse intervalo sejam nulos.

Uma informação importante é que o tamanho do suporte compacto pode variar. Dessa forma, as *Wavelet* de *Daubechies* são divididas em subgrupos, comumente expressos por dbN, em que N faz menção ao número de *Wavelet moments* apresentados pela função. A expressão *Wavelet moments*, decorre da análise dos coeficientes da família de *Wavelets*, e condiz ao número de zeros que função exibe em  $\omega = \pi$  no plano Z (TIAGO, 2011).

Pelo fato de uma função de *Wavelet* com N *vanishing moments* permitir representar qualquer sinal polinomial cuja ordem não seja superior a N-1. O aumento do número de *vanishing moments* permite a família de *Wavelet* representar sinais mais complicados. Em decorrência dessa característica, o termo N pode ser denominado de acurácia da família de *Wavelet* (TIAGO, 2011).

### 2.8.3.3 Família *Symlets*

Desenvolvida por Daubechies (1992), a família *symlets* foi criada com a finalidade de formar uma família com maiores características de simetria do que a família *Daubechies*. Possui características semelhantes as da família *Daubechies*, como suporte compacto e diferenciabilidade. A identificação dessa família ocorre pela expressão *symN*, onde N indica o número de *vanishing moments* apresentado pela função. E o suporte é definido pela relação  $2N-1$ .

### 2.8.3.4 Família *Coiflets*

Essa família é usualmente identificada pela notação *coiflets* $N$ . Foi desenvolvida também por Daubechies (1992), a pedido de Ronald R. Coifman. Também é usada a expressão família *Coiflets* de ordem  $N$  (TIAGO, 2011). Dentre as características dessa família pode-se citar o fato de apresentar um número de *vanishing moments* para a função de escala. Com isso, o número de *vanishing moments* da função  $\phi(t)$  é definido por  $2N-1$ , e o *vanishing moments* da função  $\psi(t)$  é definida por  $2N$ . Além de apresentar um grau de simetria maior do que o da família *Daubechies*, e um suporte definido por  $6N-1$ .

### 2.8.3.5 Família Bi-ortogonal

A principal característica da família *Wavelet* bi-ortogonal é a propriedade de fase linear, sendo implementada em operações envolvendo compressão de imagem, em que o sinal decomposto será reconstruído. Em relação a desvantagem, pode-se citar a necessidade de duas *Wavelet* distintas: uma para o processo de decomposição e outra para o processo de reconstrução (TIAGO, 2011). Da mesma forma que a família de *Daubechies*, a família bi-ortogonal apresenta um grande número de variações, e é comumente expressa como  $N_r N_d$ , sendo que  $N_r$  indica a *Wavelet* utilizada para reconstrução e  $N_d$  a *Wavelet* utilizada para decomposição.

## 2.8.4 Transformada de Wavelet Discreta

A DWT é o resultado da amostragem da transformada *wavelet* contínua. Esse fator permite que a Transformada seja implementada através do uso de sistemas digitais (TIAGO, 2011).

Durante o processo de discretização da função de escala  $\Phi_{s,k}(t)$ , acontece a substituição dos índices  $s$  e  $k \in \mathbb{R}$  pelos índices  $u$  e  $v \in \mathbb{N}$ . Pode-se reescrever a função de escala da seguinte forma:

$$\Phi_{u,v}(t) = 2^{-u/2} \Phi(2^{-u}t - v), \quad u, v \in \mathbb{N} \quad (2.20)$$

sendo  $u$  o fator de escala e  $v$  o índice de translação da função para sinais discretos.

Na situação da função *Wavelet*  $\Psi_{s,k}(t)$ , durante o processo de discretização, os índices  $s$  e  $k \in \mathbb{R}$  são substituídos pelos índices  $2^u$  e  $2^u v$  respectivamente, com  $v \in \mathbb{N}$ . Podendo reescrever a equação  $\Psi_{s,k}(t)$ , da seguinte forma:

$$\Psi_{s,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{|2^u|}} \Psi\left(\frac{t - 2^u v}{2^u}\right) \quad u, v \in \mathbb{N} \quad (2.21)$$

Com  $u$  sendo o fator de escala,  $v$  o índice de translação da função  $\frac{1}{\sqrt{|2^u|}}$  um fator usado para normalizar a energia da função.

Através do resultado obtido em na Equação 2.21, acontece a discretização da transformada de *Wavelet* contínua Equação 2.22. O resultado disso é a chamada Transformada *Wavelet* Discreta (TIAGO, 2011):

$$D(u, v) = \frac{1}{\sqrt{|2^u|}} \int_{-\infty}^{+\infty} d(t) \Psi \left( \frac{t - 2^u v}{2^u} \right) dt \quad u, v \in \mathbb{N} \quad (2.22)$$

Sabendo que  $D(u, v)$  se refere a transformada *Wavelet* discreta da função  $d(t)$ .

Assim, devido as funções escala *Wavelet* formarem uma base ortogonal, representa-se um sinal através do uso das funções  $\phi_{u,v}(t)$  e  $\psi_{u,v}(t)$ . A Equação 2.23 corresponde ao procedimento aplicado para decompor um sinal  $g(t)$  a partir de uma base ortogonal formada pelas funções de escala e de *Wavelet*

$$g(t) = \sum_{v=-\infty}^{\infty} cA(v) \phi_v(t) + \sum_{u=0}^{\infty} \sum_{v=-\infty}^{\infty} cD(u, v) \psi_{u,v}(t), \quad u, v \in \mathbb{N} \quad (2.23)$$

A fim de deixar essa equação mais próxima da função original, ocorre a necessidade de obter valores para os coeficientes  $cA(u,v)$  e  $cD(u,v)$  que minimizem a função de erro definida anteriormente. Esses coeficientes são encontrados através das equação 2.24 e 2.25.

$$cA(u, v) = \int g(t) \phi_{u,v}(t) dt \quad (2.24)$$

$$cD(u, v) = \int g(t) \psi_{u,v}(t) dt \quad (2.25)$$

A finalidade principal da Equação 2.23 é implantar os conceitos apresentados durante a análise multirresolução na representação de um sinal realizando uma aproximação mais grosseira e seus detalhes. É devido ao comportamento das funções de escala que são análogas a de um filtro passa-baixas, os coeficiente  $cA$  e  $cD$ , são denominados, respectivamente, coeficientes de aproximação e detalhes (TIAGO, 2011).

## 3 Metodologia

Esta seção descreve a metodologia utilizada para adquirir os dados do receptor GPS durante as análises estática e dinâmica. Além disso, são descritas as técnicas de processamento de sinais utilizadas para melhorar a precisão do equipamento. A análise da precisão do receptor GPS será em duas etapas. Inicialmente, a abordagem será através do ensaio estático, utilizando um receptor GPS fixado em um local pré-determinado para a coleta de dados. Posteriormente, a abordagem será através de um ensaio dinâmico, no qual para a coleta de dados utilizou-se o receptor GPS em movimento.

### 3.1 Ensaio Estático

Para a realização do ensaio estático o utilizou-se um receptor GPS do fabricante Ublox, modelo GN-803G (chip M-8030), com frequência de amostragem de 1 Hz, fonte de alimentação entre 3.5 V e 5.0 V e aceita sinais de até 72 satélites ao mesmo tempo (UBLOX, 2015). O receptor foi fixado no telhado de um prédio com o objetivo de minimizar a obstrução do sinal, durante o período de 16 de maio de 2018 até 27 de julho de 2018, na cidade de João Monlevade - MG. As próximas seções descrevem as atividades realizadas durante o processo de aquisição e análise dos dados.

#### 3.1.1 Coleta dos dados

Os dados recebidos pelo receptor GPS foram adquiridos com o auxílio de um computador portátil, e as informações foram armazenadas em um arquivo de texto.

O padrão utilizado pelo receptor GPS do experimento é o protocolo padrão NMEA, então escolher a sentença que carrega o máximo de informações necessárias para o processamento dos sinais é fundamental. Os dados de latitude, de longitude, data, hora e do número de satélite são necessários para a realização do processamento adequado. Para adquirir todas essas informações, foram utilizadas duas sentenças: a GNRMC e a GNGGA. A sentença GNRMC será utilizada para obter as informações de latitude, longitude, data e hora, e a sentença GNGGA será utilizada para obter a informação do número de satélites. Um exemplo da sequência de dados das sentenças utilizadas é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Exemplo de sentenças recebidas pelo receptor GPS.

\$GNRMC,133856.00,A,1950.26888,S,04310.68795,W,0.005,,030518,,D*66
\$GNGGA,133856.00,1950.26888,S,04310.68795,W,2,12,0.71,878.4,M,-7.4,M,,0000*5E

Fonte: Elaborada pelo Autor.

O próximo passo consiste na separação dos dados necessários para o processamento. Para separar os dados, utilizou-se o software Microsoft Excel, separando os dados em forma de matriz numérica, conforme o exemplo apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Exemplo de dados após a separação das informações do arquivo original.

Hora	Latitude	Longitude	Data	Número de satélite 4
14283100	195026970	431068784	150518	10
14283200	195026967	431068793	150518	10
14283300	195026966	431068794	150518	10

Fonte: Elaborada pelo Autor.

O receptor GPS coletou os dados durante três meses. Algumas interferências ocorreram durante o processo da coleta de dados como, por exemplo, o desligamento do notebook provocado pelas quedas de energia ou o superaquecimento pela aproximação do equipamento com o telhado que estava exposto ao sol, devido essas interferências foram escolhidos dez dias para realizações das análises. A Tabela 5 corresponde a relação dos dias utilizados durante as análises feitas neste trabalho.

Tabela 5 – Dias selecionados para análise.

16/05/18	23/05/18	07/06/18	16/06/18	27/07/18
17/05/18	28/05/18	05/06/18	11/06/18	19/07/18

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Os receptores GPS informam a hora conforme o Tempo Universal Coordenado (UTC, do inglês, *Universal Time Coordinated*). De acordo com o fuso horário de Brasília a hora do GPS deve ser ajustada para GMT-3.

As coordenadas são fornecida nas sentenças no formato ddmm.mmmm, Para facilitar a manipulação dos dados, as coordenadas foram transformadas para o formato de graus decimais (dd.dd). utilizando a equação (2.1).

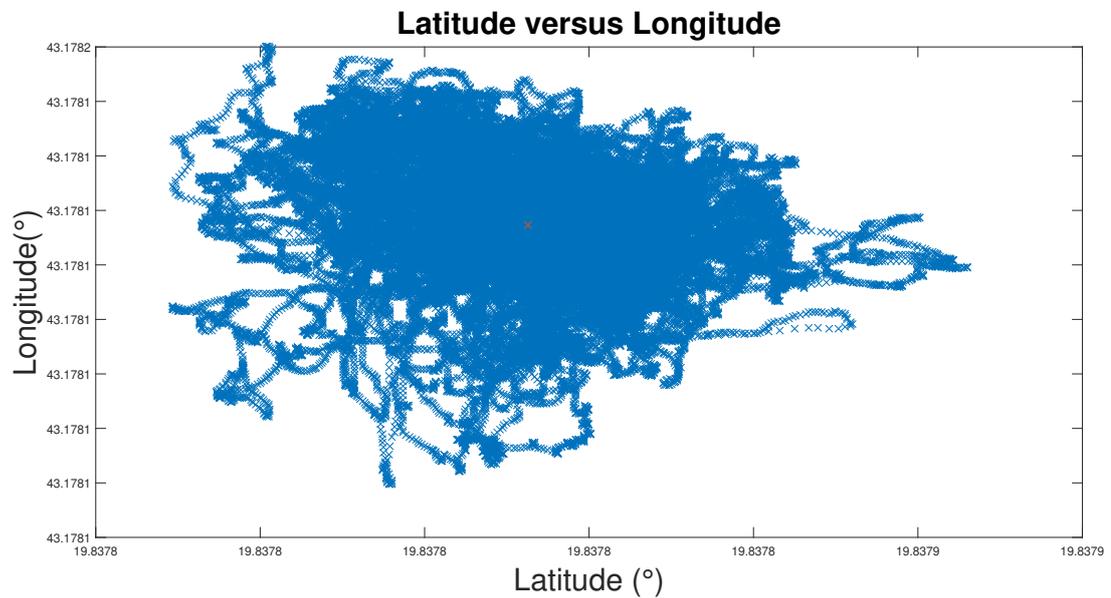
Os valores de latitude e longitude foram utilizados para calcular a distância em metros entre dois pontos. Para a transformação utilizou a função *geodetic2ned* presente no *software* Matlab, que recebe os valores das coordenadas de dois pontos e retorna a distância em metros entre eles.

### 3.1.2 Processamento dos sinais

A realização de uma análise preliminar é uma etapa importante para o processamento dos sinais, desta forma inicialmente plotou-se gráficos de latitude versus longitude

para verificar a dispersão, e observou que os pontos representados por um 'X' estão bem espalhados, como é apresentado na Figura 7.

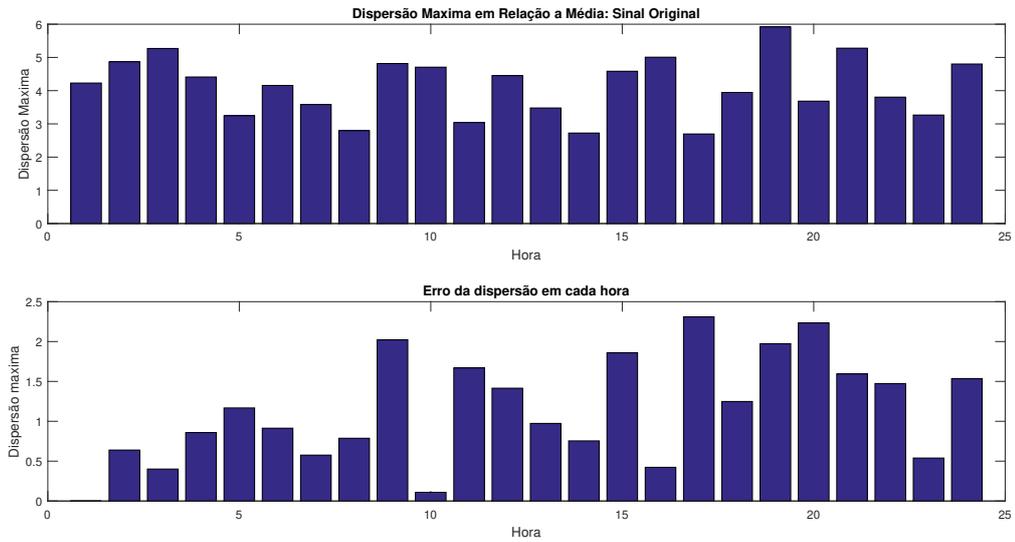
Figura 7 – Latitude versus Longitude



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Em seguida avaliou-se a ocorrência da dispersão em um determinado dia, e para uma melhor avaliação foi observado qual seria a maior dispersão por hora em relação ao valor médio dos dados coletados. Com essas informações foi possível a construção dos gráficos de barras apresentados na Figura 8. No gráfico de dispersão máxima em relação a média é possível verificar que a maior dispersão ocorreu às 19 horas do dia avaliado, possuindo um distanciamento de aproximadamente 5,9 m em relação ao valor médio, já no gráfico do erro da dispersão em relação a média, é possível observar que em torno das 20 hs foram registrados as maiores diferenças por hora, chegando a uma diferença de 2,3 metros.

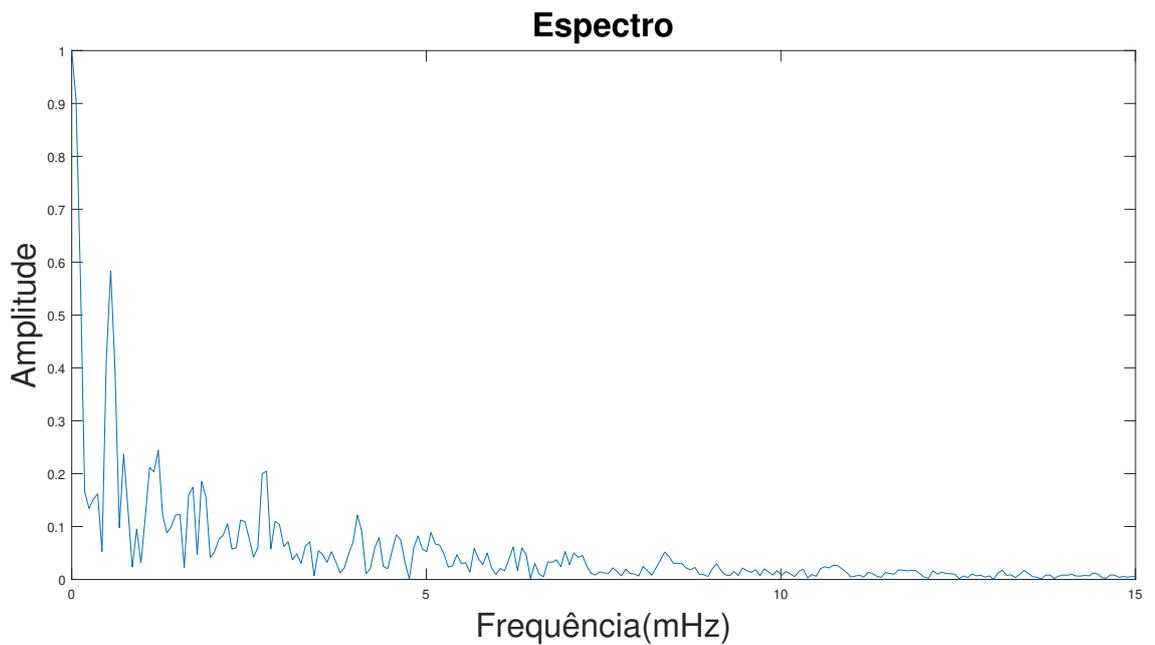
Figura 8 – Dispersão Máxima por hora do sinal original em relação a média



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Para iniciar o processamento, primeiramente foi realizada a análise espectral dos sinais através da transformada de Fourier do sinal. O objetivo desta análise é avaliar o comportamento do espectro do sinal recebido, e o resultado obtido para a análise da latitude é apresentado na Figura 9.

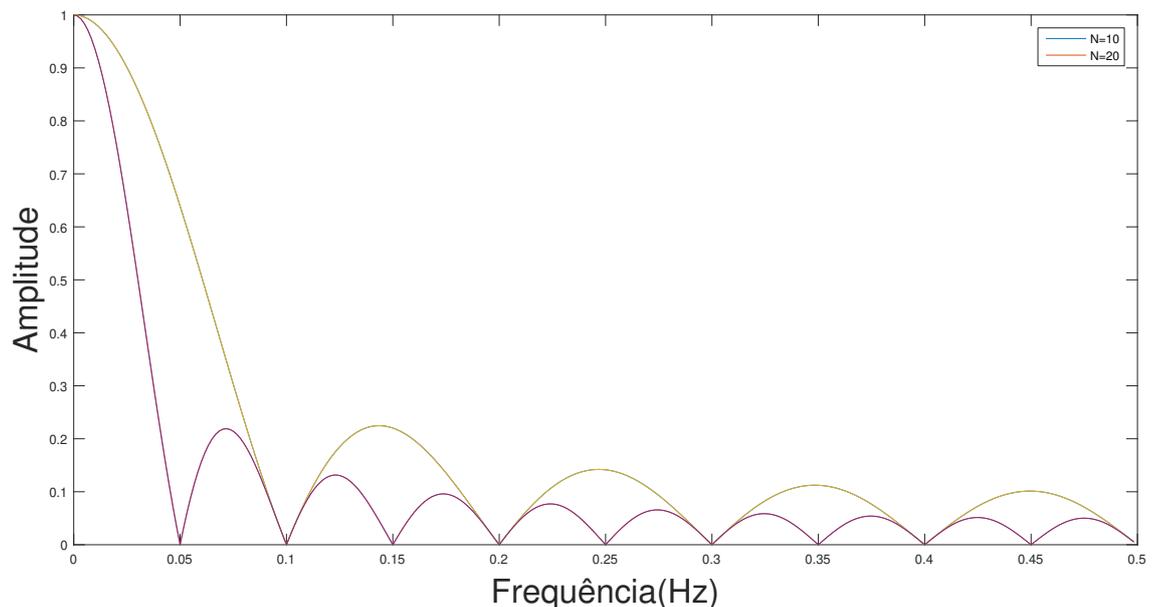
Figura 9 – Análise na frequência



Fonte: Elaborada pelo Autor.

O objetivo principal é eliminar o ruído de alta-frequência através de um filtro passa-baixas, pois o GPS estava parado, ou seja, os valores de latitude e longitude deveriam permanecer constantes. Para isso, foram utilizados filtros digitais passa-baixas. O primeiro filtro utilizado foi um filtro de média móvel, o segundo filtro foi um filtro digital passa-baixa *Butterworth*. O filtro *Butterworth* foi projetado através do *toolbox fdatool* do *software* MATLAB, com frequência de passagem igual a 15 mHz e frequência de rejeição igual a 50 mHz. Para o projeto do filtro média móvel foi levado em consideração o número de pontos do filtro, o tempo de atraso do sinal e o valor da precisão do sinal filtrado. No filtro média móvel se o valor da ordem do filtro (N) é muito alta, o tempo de atraso introduzido pelo filtro será alto, pois o filtro calcula a média de N sinais de entrada. Dessa forma, o primeiro sinal válido irá ser fornecido para a saída após N aquisições, ou N sentenças recebidas. A Figura 10 ilustra a resposta em frequência de um filtro média móvel, através dessa análise é possível perceber que a medida que a ordem do filtro aumenta, a frequência de corte diminui.

Figura 10 – Análise na frequência



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Após filtrar os sinais, foram feitas comparações entre os sinais antes e depois da filtragem. Em seguida, foi calculado o CEP, a fim de avaliar a melhoria obtida após o processamento dos dados.

## 3.2 Ensaio Dinâmico

Para a realização do ensaio dinâmico o receptor GPS foi fixado na parte superior de um carrinho de controle remoto como pode ser visto na Figura 11, o carrinho foi controlado para se deslocar com velocidade constante e trajetória retilínea e os dados foram coletados com o auxílio de um notebook e o software “PUTTY” que permitia realizar a leitura dos dados e salvar no arquivo de texto. Os testes foram realizados durante 20 dias, iniciando no dia 06/04/2019 e finalizando no dia 28/04/2019. Nos dias 11/04, 16/04 e 17/04 não foram realizadas as coletas de dados, pois os testes eram realizados ao ar livre e nesses dias estava chovendo, mas a falta desses dias não influenciaram nas análises, pois os dados coletados nos outros dias foram suficientes para as realizações das análises.

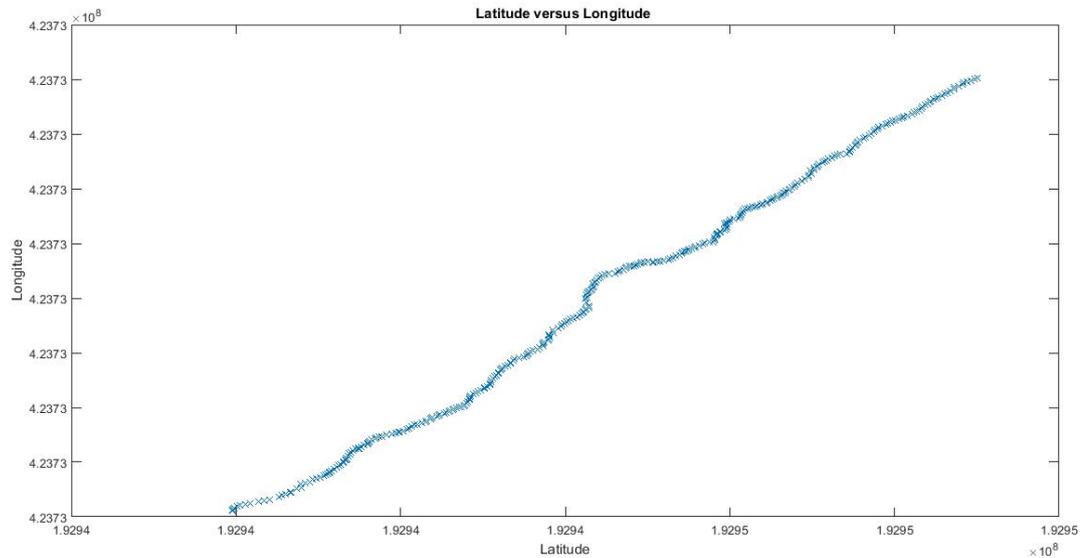
Figura 11 – Carrinho Utilizado



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Para o processamento dos sinais adquiridos durante os ensaios dinâmicos foram seguidos os procedimentos descrito no ensaio estático. Para iniciar o pré-processamento dos dados plotou-se o gráfico de latitude versus longitude, que pode ser visto na Figura 12. No gráfico é mostrado que a variação de posição pode ser representada através de uma reta. Esse comportamento já era esperado, pois o protótipo do trator se movimenta com velocidade constante e em linha reta, o que caracteriza um movimento retilíneo uniforme que possui como característica gráfica de posição versus tempo uma função do primeiro grau, que tem como modelo gráfico uma reta. No gráfico pode-se observar um desvios na curva, esse comportamento pode ser explicado pela irregularidade do relevo da rua, onde foi realizada as coletas de dados.

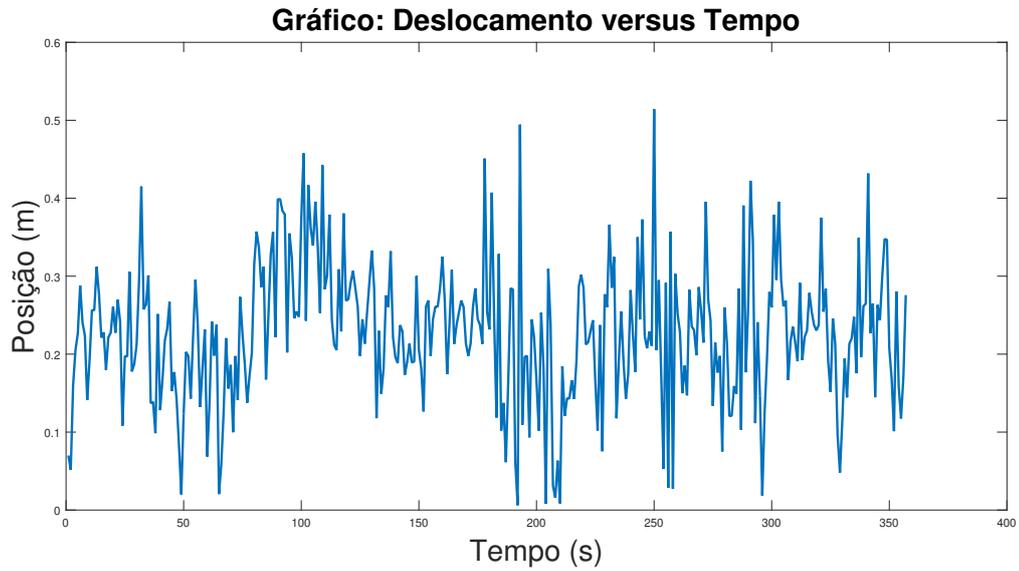
Figura 12 – Latitude versus Longitude



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Na Figura 13 está representado o deslocamento do carrinho durante a coleta de dados. Considerando que o carrinho manteve sua velocidade constante durante o teste, então a cada intervalo de tempo o carrinho deveria estar em uma posição definida aproximadamente pelo deslocamento, então o receptor GPS deveria receber aproximadamente a coordenada dessa posição, espera-se então um gráfico sem variação do deslocamento, mas como o receptor GPS carrega erros, então o gráfico do sinal recebido pelo receptor GPS possui algumas variações. A finalidade de usar o processamento de sinais é minimizar os erros provocados por ruídos de alta frequência, reduzindo a dispersão do deslocamento e fazer com que o carrinho ocupe a posição esperada. A Figura 14 contém um gráfico de barras e um gráfico de velocidade versus tempo que corresponde os deslocamentos máximos nos intervalos 22 segundos, ou seja, o primeiro intervalo seria de 0 a 22 segundos, então nesse intervalo foi calculado o maior deslocamento com carrinho e assim foi feito para os outros intervalos, o tempo de 22 segundos foi utilizado para que temos 15 gráficos plotados.

Figura 13 – Variação do deslocamento em função do tempo



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Figura 14 – Análise da velocidade Máxima em intervalos de tempos de 22 segundos.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Para realizar o processamento dos sinais, inicialmente realizou a filtragem com o filtro média móvel utilizando o mesmo número de coeficientes ajustado na análise estática. A utilização da transformada *wavelet* também foi realizada nos testes, mas para obter um bom desempenho foi necessário escolher de forma empírica a melhor família *wavelet*, então foram realizados testes para observar qual família e a decomposição eram mais

adequadas para os sinais recebidos pelo receptor GPS, obtendo um resultado satisfatório com a aplicação da família Daubechies (db5) e com nível de decomposição igual a 5 para o ensaio estático e dinâmico. Durante as análises, observou-se que o número de decomposições maiores apresentavam resultados melhores, porém, o tempo de atraso para o processamento das decomposições adicionais seria muito elevado, comprometendo o funcionamento do sistema em tempo real. Devido a isso, optou-se por utilizar um número de decomposição mais baixo, para fazer uma comparação mais viável com o filtro média móvel. Neste trabalho, definiu-se um limite de 120 segundos para o tempo de atraso. Esse parâmetro foi utilizado para ajustar o valor de  $N$  no filtro de média móvel e também para escolher o número de decomposições utilizadas na DWT. Para minimizar esse atraso uma solução seria a utilização de receptores GPS com frequências de 5Hz ou 10Hz . Os resultados podem ser analisados na seção 4.

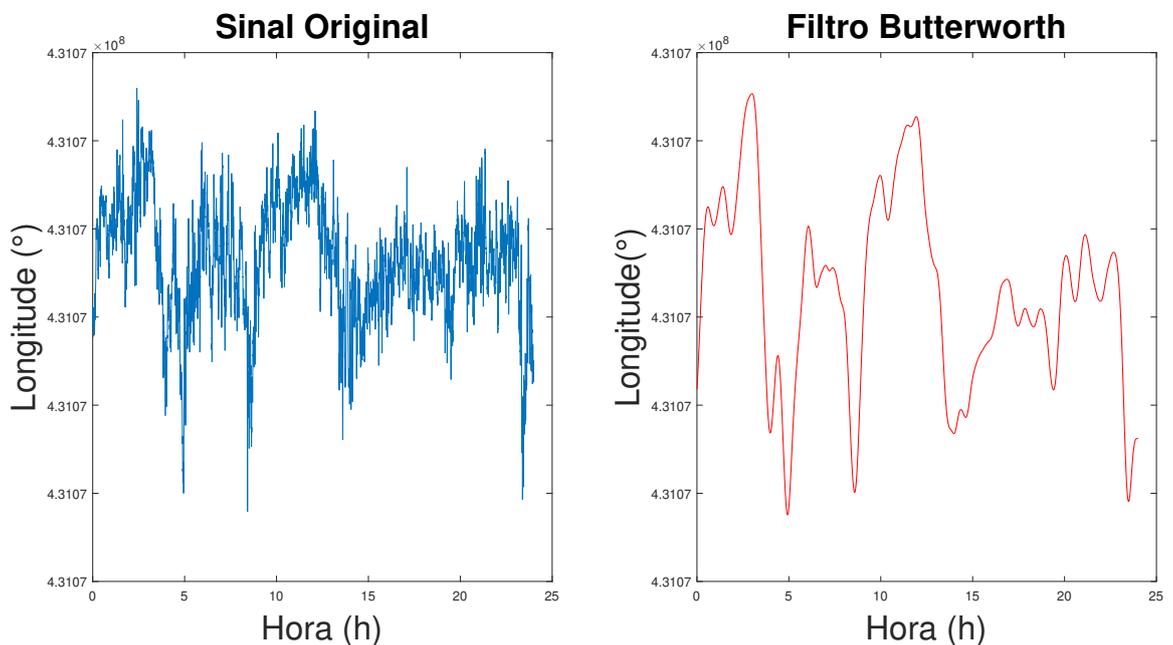
## 4 Resultados e Discussões

Nesse capítulo será realizado uma avaliação dos resultados obtidos com os processamentos dos sinais. O capítulo é estruturado em duas seções, desta forma será possível realizar as análises dos resultados tanto do ensaio estático, quanto do ensaio dinâmico.

### 4.1 Ensaio Estático

Inicialmente a finalidade analisar os efeitos dos filtros nos sinais obtidos do ensaio estático, para isso primeiramente plotou-se o gráfico de longitude (em graus) em função do tempo (hs) como é ilustrado na Figura 15, 16 e 17. No gráfico da Figura 15 é mostrado uma comparação entre o sinal sem o processo de filtragem e o sinal filtrado com o filtro *Butterworth*, pela imagem é possível verificar uma suavização da curva filtrada em relação a curva do sinal original.

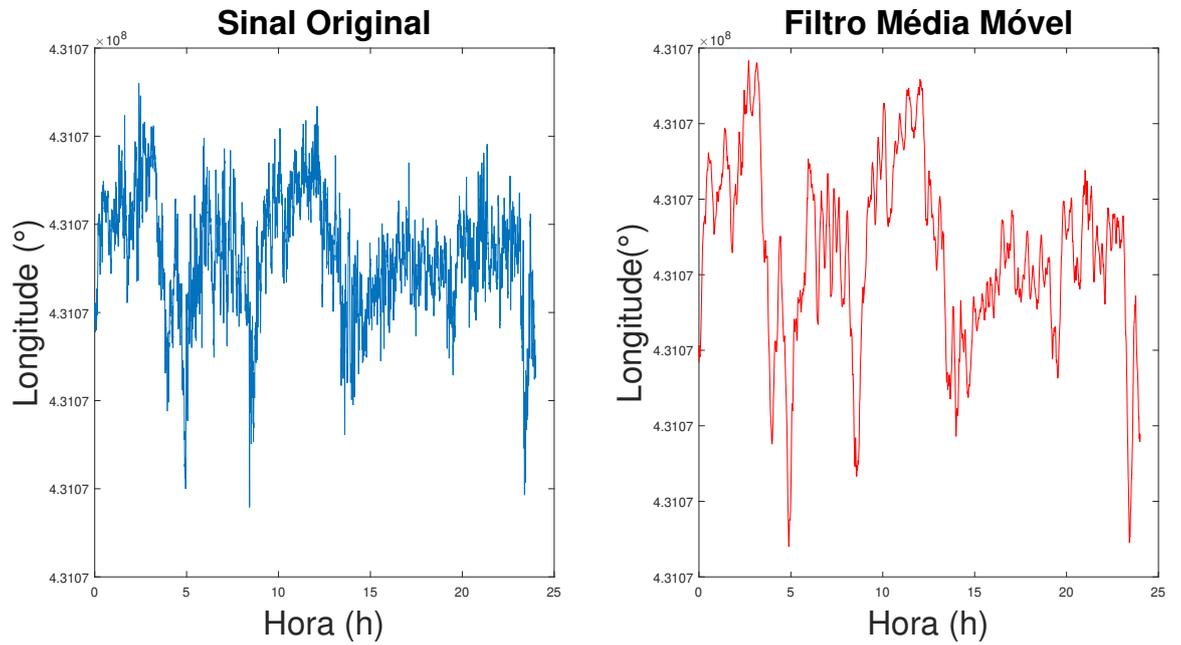
Figura 15 – Gráfico Longitude versus Tempo: *Butterworth*



Fonte: Elaborada pelo Autor.

No gráfico da Figura 16 é representado o sinal de longitude filtrado utilizando o filtro média móvel. O filtro média móvel obteve um resultado da suavização da curva inferior ao resultado obtido com a utilização do filtro *Butterworth*, esse desempenho é verificado com o sinal mais limpo no gráfico do filtro *Butterworth*.

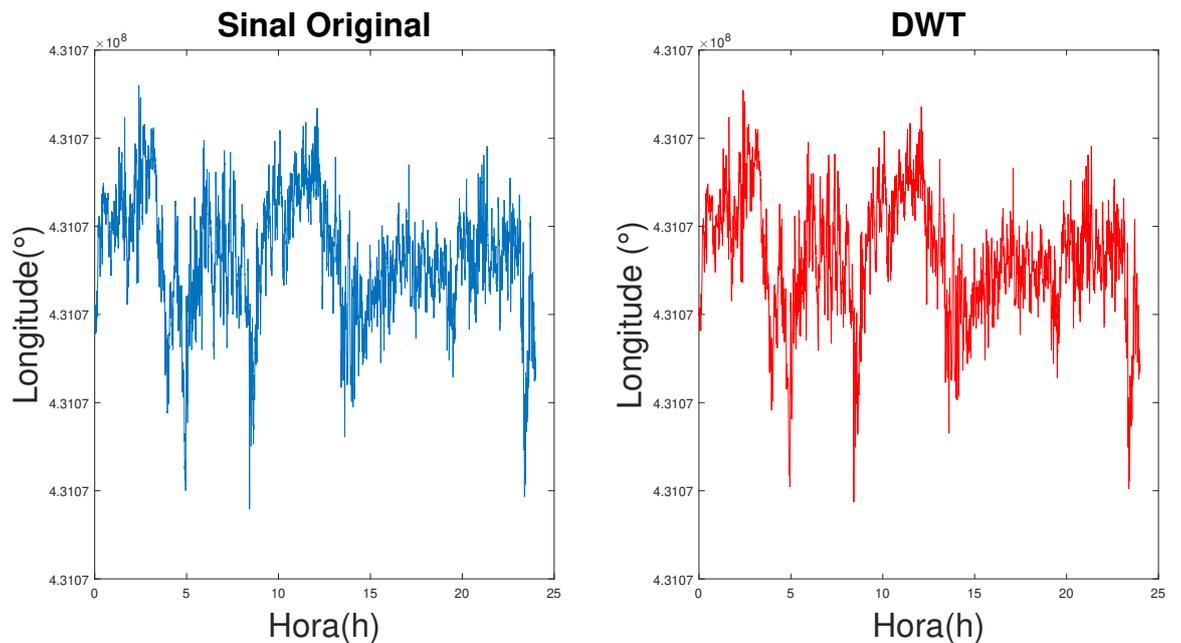
Figura 16 – Gráfico Longitude versus Tempo: Média Móvel



Fonte: Elaborada pelo Autor.

No gráfico representado na Figura 17 é analisado o resultado obtido com a utilização do filtro da DWT nos dados de longitude, na Figura pode ser verificado que não obteve-se uma boa suavização da curva, quando comparado com a curva do sinal original.

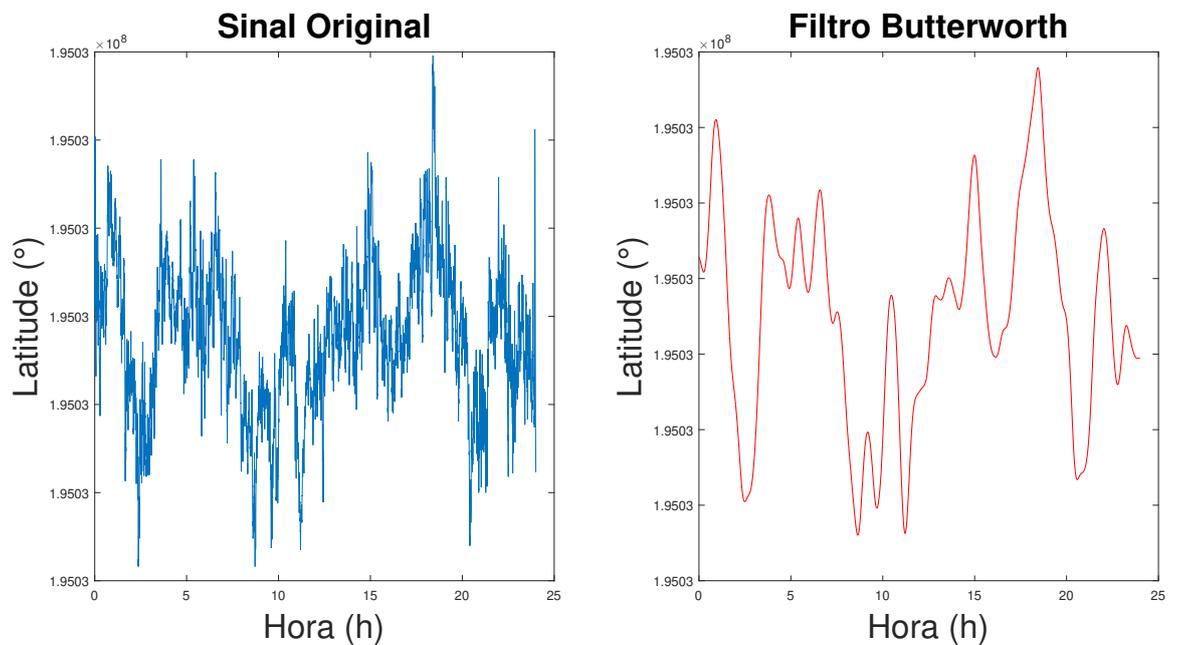
Figura 17 – Gráfico Longitude versus Tempo: DWT



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Fazendo a mesma análise feita com o sinal de longitude, os gráficos ilustrados nas Figuras 18, 19 e 20 referem-se aos resultados para latitude. No gráfico da Figura 18 percebe-se um bom desempenho do filtro *Butterworth* no sinal da latitude, obtendo um resultado semelhante ao da longitude.

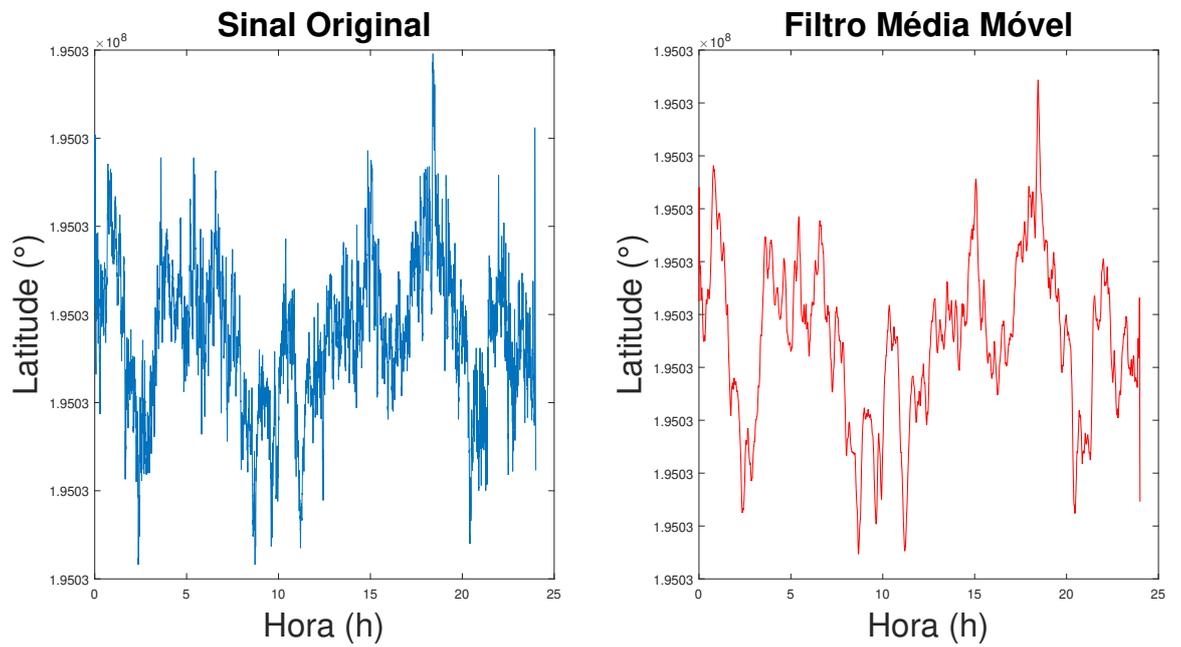
Figura 18 – Gráfico Latitude versus Tempo: *Butterworth*



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Na figura 19 é possível verificar o resultado da filtragem com o filtro média móvel para o sinal de latitude, mas uma vez o filtro média móvel obteve um resultado inferior do filtro *Butterworth*.

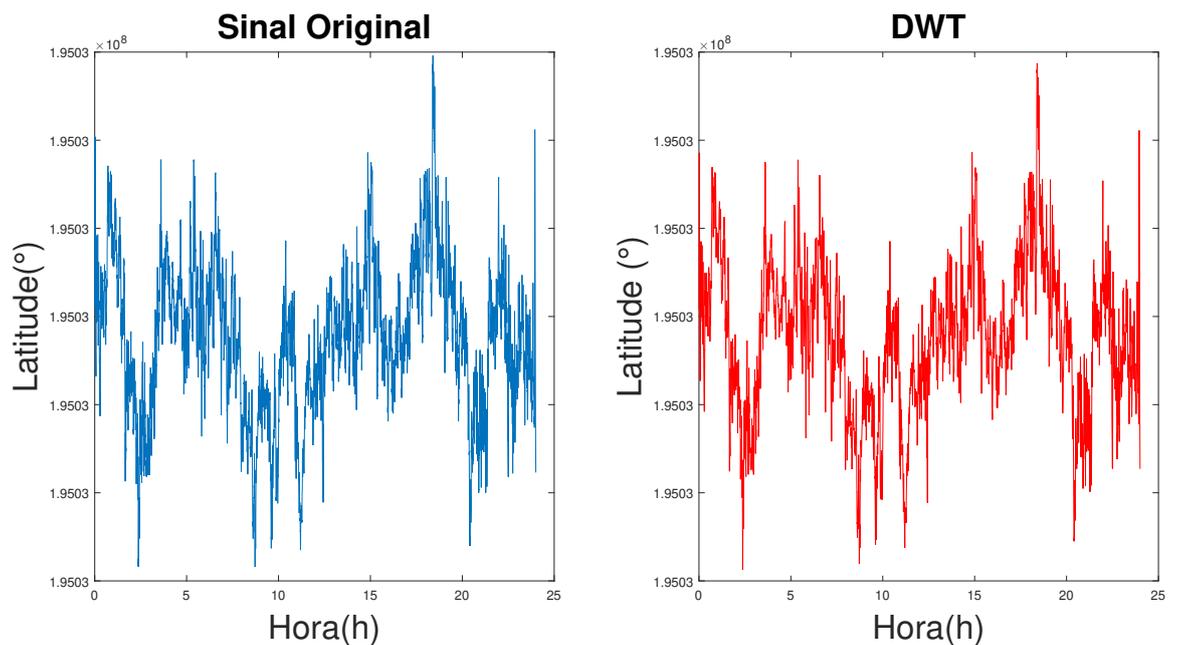
Figura 19 – Gráfico Latitude versus Tempo: Média Móvel



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Na figura 20 é possível verificar o resultado com a utilização da DWT, essa técnica não obteve um bom desempenho, que pode ser verificado na curva em comparação com o sinal original.

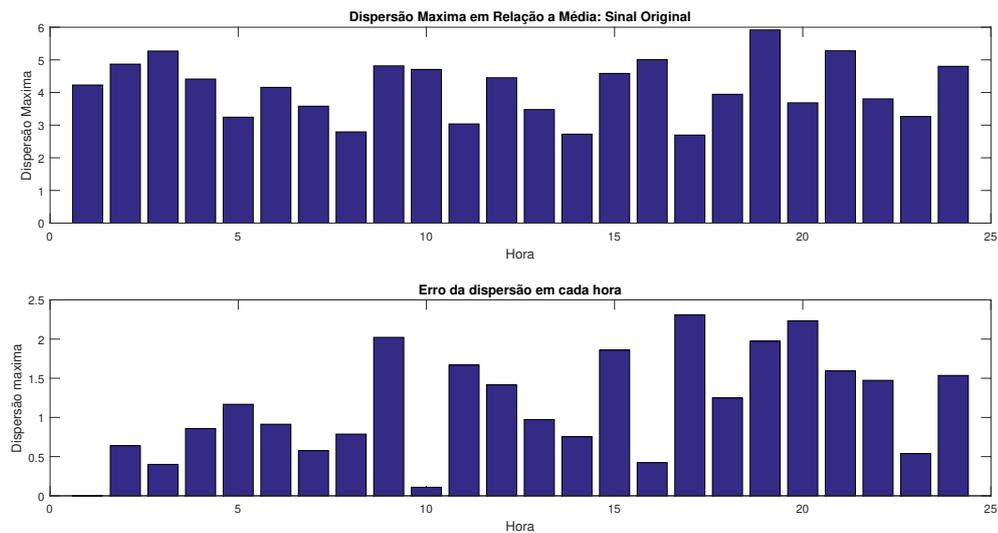
Figura 20 – Gráfico Latitude versus Tempo- DWT



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Uma análise das dispersões em função da hora do dia é representada na Figura 21, em que se observa uma máxima dispersão de 5,9 m na hora 19 do dia 16/05/18 sem o processamento. Na Figura 21, o gráfico inferior corresponde a variação da dispersão máxima por hora. O cálculo da variação é realizado com a subtração da dispersão máxima de maior hora pela dispersão máxima de menor hora como é ilustrado na Tabela 6. É observável que o maior erro ocorre entre as horas 19 e 20, sendo de aproximadamente 2,31 m.

Figura 21 – Dispersão máxima em cada Hora



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Tabela 6 – Exemplo do erro entre a hora 1 e 2.

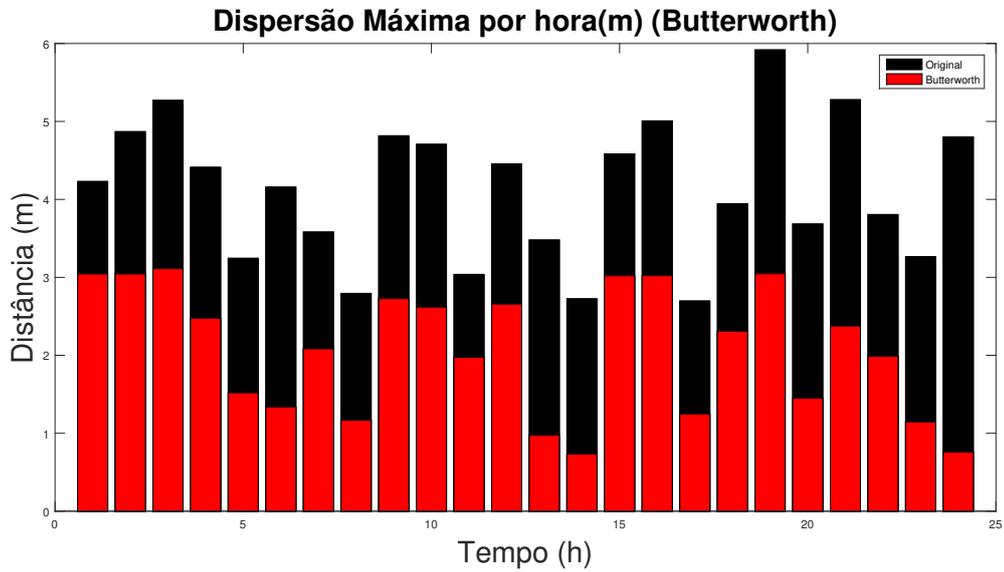
Hora	Dispersão Máxima (m)
1	4,2
2	4,8
Variação	0,6

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Nas Figuras 22, 23 e 24 estão os resultados das dispersões máximas dos sinais utilizando o filtro *Butterworth*, o filtro média móvel e a DWT. Com a utilização dos filtros foi possível verificar uma redução da dispersão máxima de aproximadamente 2,8 m utilizando o filtro *Butterworth*, uma redução de aproximadamente 1,3 m utilizando o filtro média móvel e com a utilização da transformada obteve-se um redução de aproximadamente de 0,8 m da dispersão dos dados. A utilização da DWT obteve uma redução menor do que os outros filtros, como pode ser observado nas Figuras, já o filtro média móvel obteve um

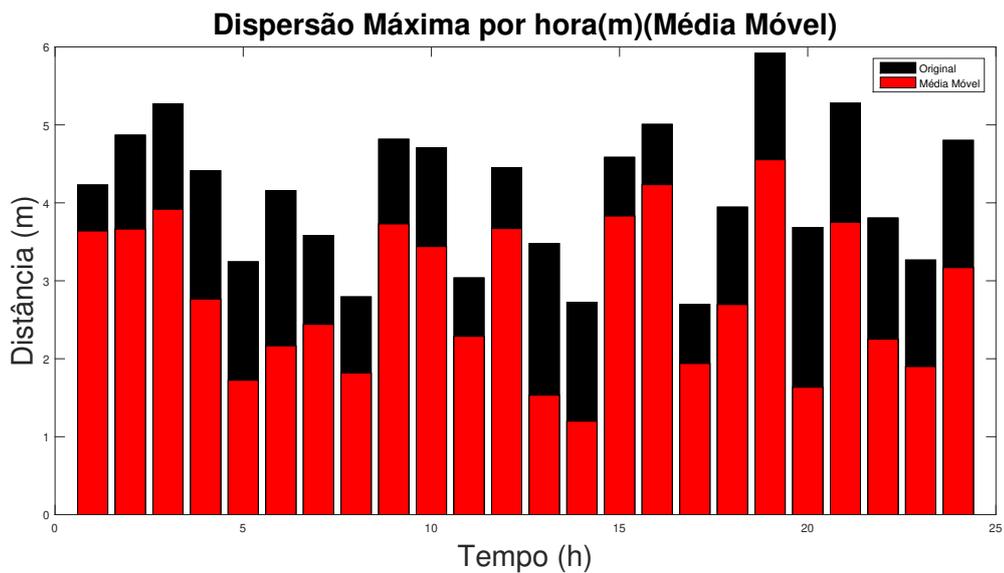
desempenho inferior ao do filtro *Butterworth*, devido ao filtro média móvel levar algum tempo para entrar em regime, pois ele utiliza 600 pontos para o cálculo da média. O filtro *Butterworth* obteve o melhor resultado se comparado com os outros filtros.

Figura 22 – Dispersão Máxima por hora(m)



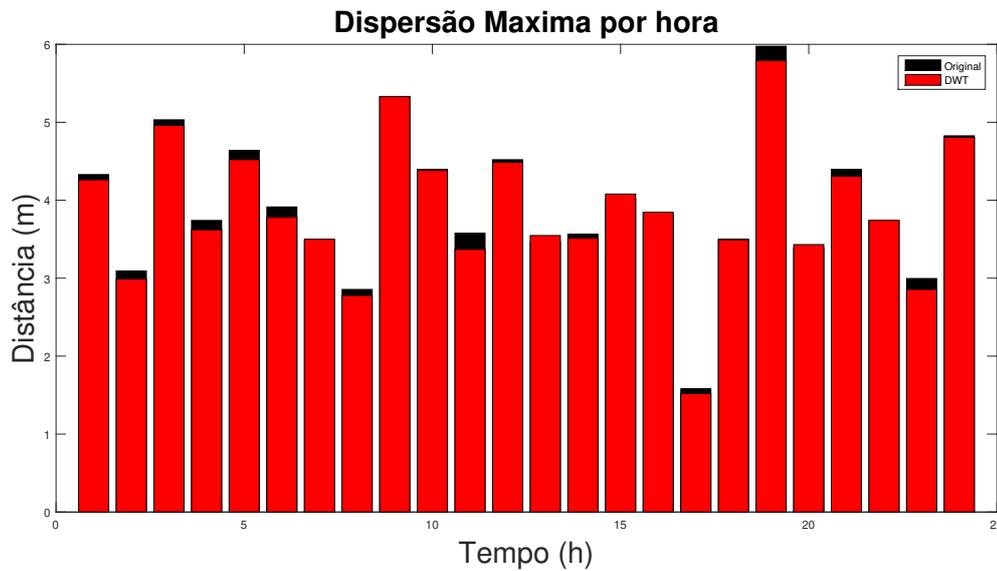
Fonte: Elaborada pelo Autor.

Figura 23 – Dispersão Máxima por hora(m)



Fonte: Elaborada pelo Autor.

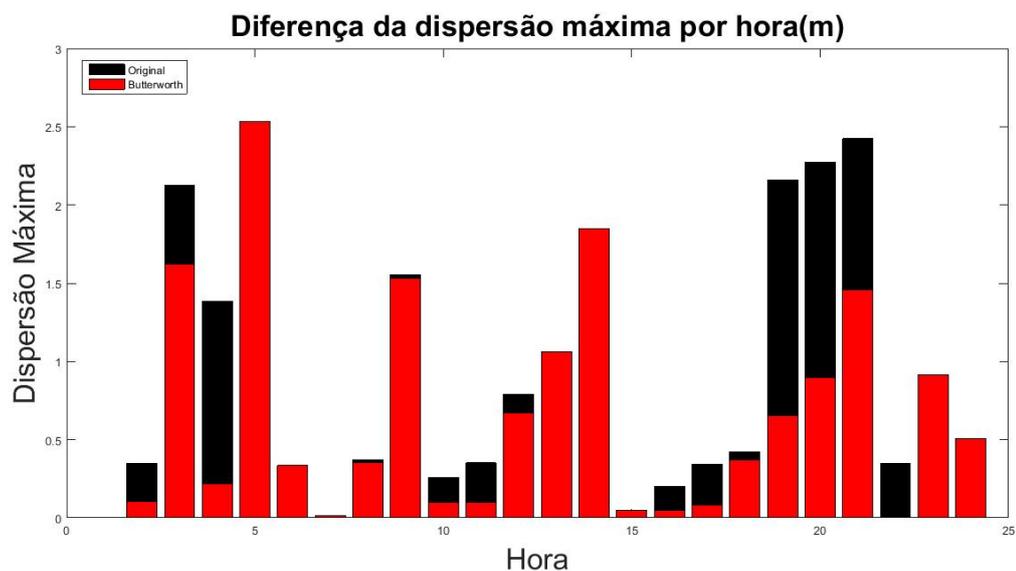
Figura 24 – Dispersão Máxima por hora(m)-DWT



Fonte: Elaborada pelo Autor.

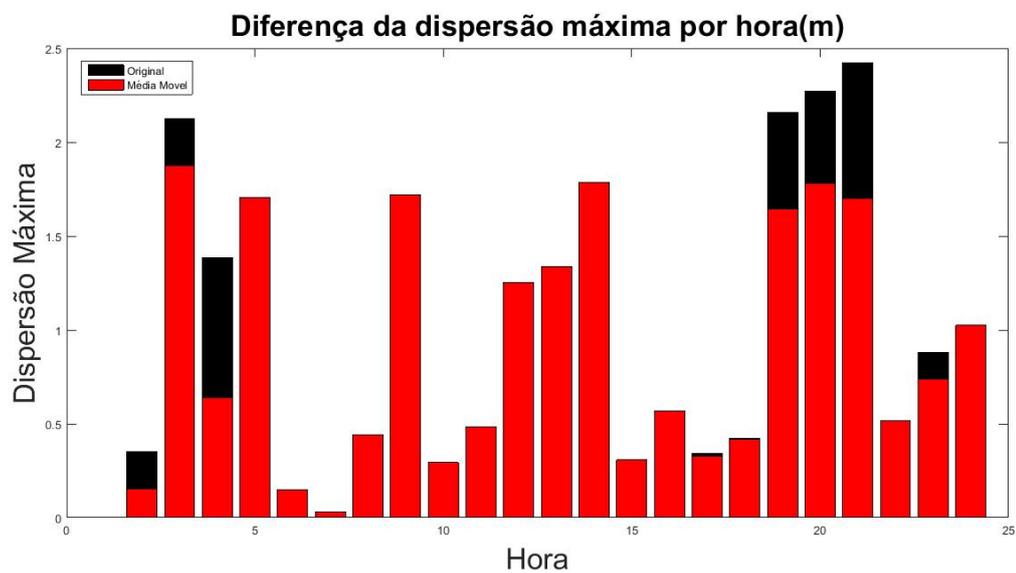
Nas Figuras 25, 26 e 27 estão apresentados as variações entre as horas para o filtro média móvel, o filtro *Butterworth*. Nesses gráficos é possível observar em qual hora se obteve uma maior dispersão, em todos os gráficos é possível verificar que entre as horas 18 hs e 19 hs obteve-se uma maior dispersão dos dados. Esse comportamento pode ser explicado pela ocorrência de maior intensidade de campo elétrico ao entardecer, período que divide o dia da noite, período que ocorre a cintilação ionosfera. A cintilação ionosfera está intimamente relacionada com a física dos processos da ionosfera, ocasionando irregularidades, sendo o maior limitante da operação do receptor GPS, pois degrada a relação portadora ruído, aumentando a influência do ruído térmico na malha do receptor (OLIVEIRA; MOURA, 2012).

Figura 25 – Gráficos: Variação Máximo por hora(m)- *Butterworth*



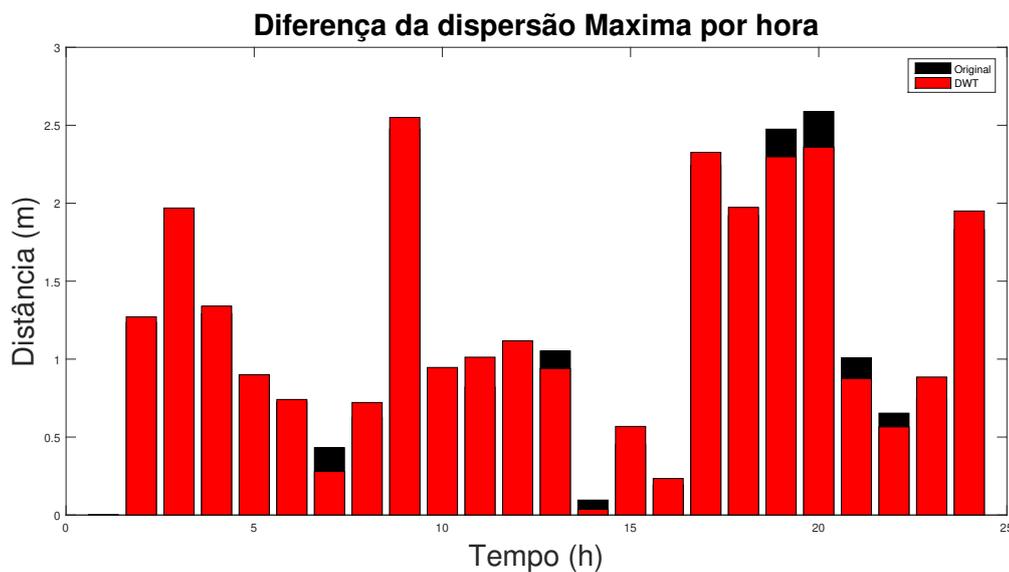
Fonte: Elaborada pelo Autor.

Figura 26 – Gráficos: Variação Máximo por hora(m)- Média Móvel



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Figura 27 – Gráficos: Variação Máximo por hora(m)- DWT



Fonte: Elaborada pelo Autor.

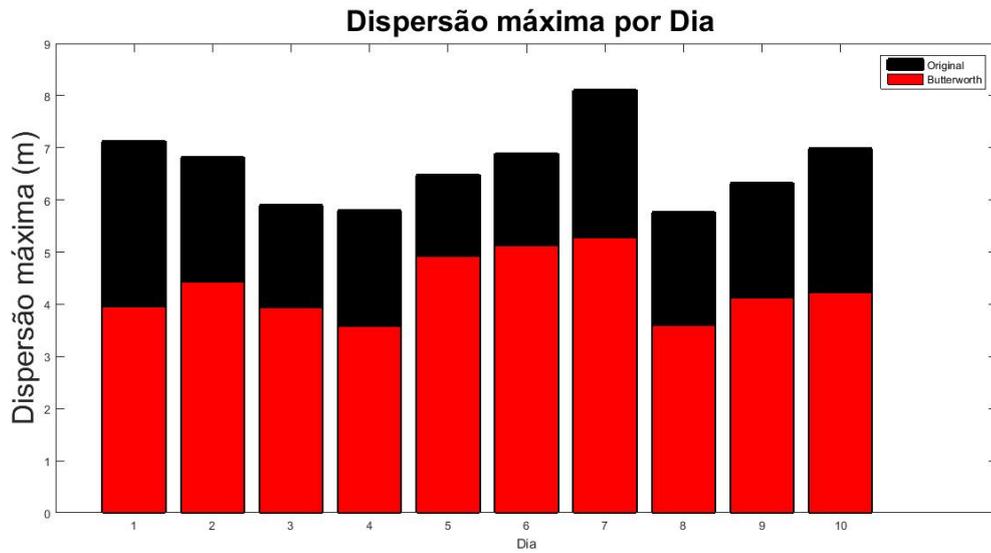
As comparações dos desempenhos dos filtros média móvel, *Butterworth* para outros dias são mostradas nas Figuras 28 e 29, que indica os valores das maiores dispersões ocorridas em cada dia analisado. O melhor desempenho foi verificado nos dia 28/05 e o dia 16/06 para o filtro *Butterworth* e filtro média móvel e nos dias 23/05 é observado também a vantagem nos resultados dos filtros *Butterworth* em relação ao filtro média móvel devido as menores dispersões. A Tabela 7 corresponde as datas de coleta de dados.

Tabela 7 – Datas referentes aos dias na Figura 16 .

Dia	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Data	16/05	17/05	23/05	28/05	05/06	07/06	11/06	16/06	19/07	27/07

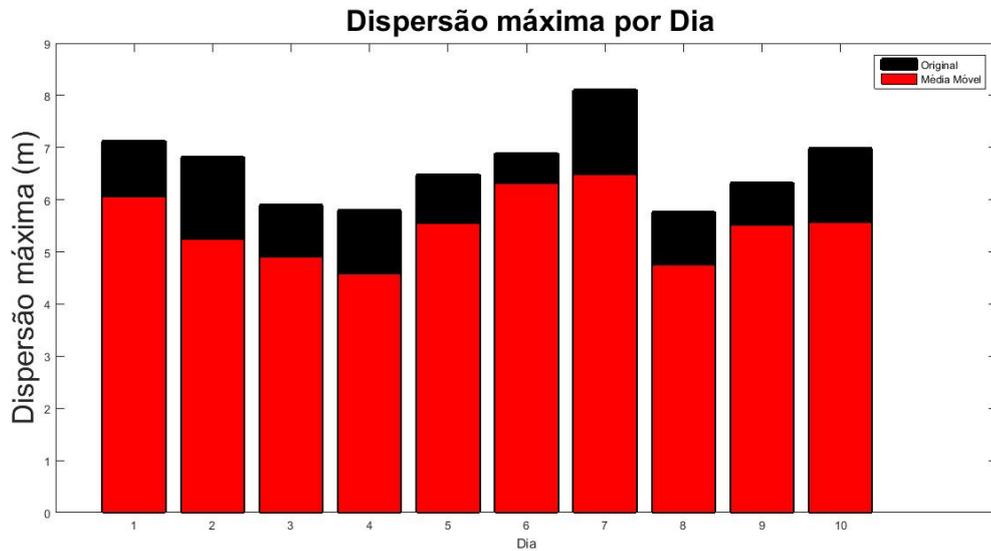
Fonte: Elaborada pelo Autor.

Figura 28 – Gráficos: Variação Máximo por Dia



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Figura 29 – Gráficos: Variação Máximo por Dia



Fonte: Elaborada pelo Autor.

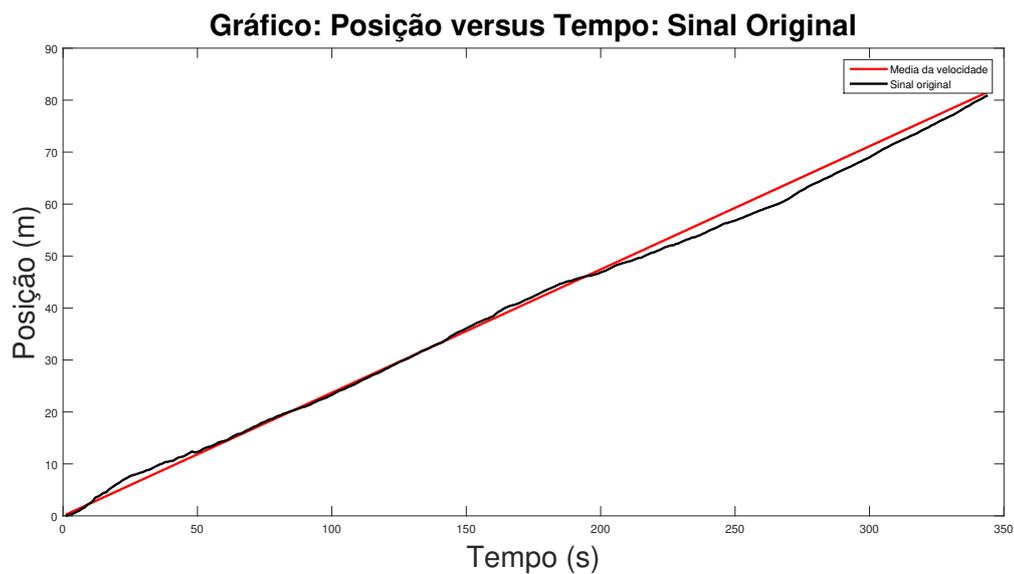
Para uma análise quantitativa dos efeitos dos filtros utilizado nas dispersão dos sinais, calculou-se o desvio padrão do sinal antes e depois do processamento. Antes da filtragem o desvio padrão era 1,1 m e depois do processamento com a utilização do filtro *Butterworth* passou para 1,0 m, já com a utilização do filtro Média Móvel passou para 1,1 m. De acordo com o calculo do CEP obteve-se um valor de 5,2 m para o sinal original,

1,65 m para o filtro *Butterworth*, 2,0 m para o filtro média móvel e com a utilização da Transformada *Wavelet* obteve um CEP de 3,63. Com os resultados da dispersão e do CEP, observou que o filtro *Butterworth* obteve o melhor desempenho, conseguindo desta forma suavizar a curva dos dados coletados de maneira mais eficiente.

## 4.2 Ensaio Dinâmico

Nessa seção abordaremos os resultados obtidos no ensaio dinâmico. Primeiramente são apresentados os gráficos de posição versus tempo, esses gráficos tem a finalidade de mostrar quais os efeitos dos filtros nos dados coletados. Nessa etapa utiliza-se o filtro média móvel e a Transformada *Wavelet*, devido o filtro *Butterworth* não responder adequadamente aos dados coletados no ensaio dinâmico, devido a dificuldade do projeto de um filtro *Butterworth* com faixa de corte estreita. Na Figura 30 é apresentado o gráfico de posição versus tempo do sinal coletado sem o processamento, desta forma a curva destacada pela cor vermelha representa o sinal original, já a curva representada pela cor preta apresenta a reta média do sinal coletado. Analisando o gráfico pode-se observar que o sinal possuiu alguns desvios em torno da sua média, esse característica é observada aproximadamente no intervalo de tempo de 250 a 300 segundos.

Figura 30 – Comparação da Curva original e a curva construída com a média da velocidade

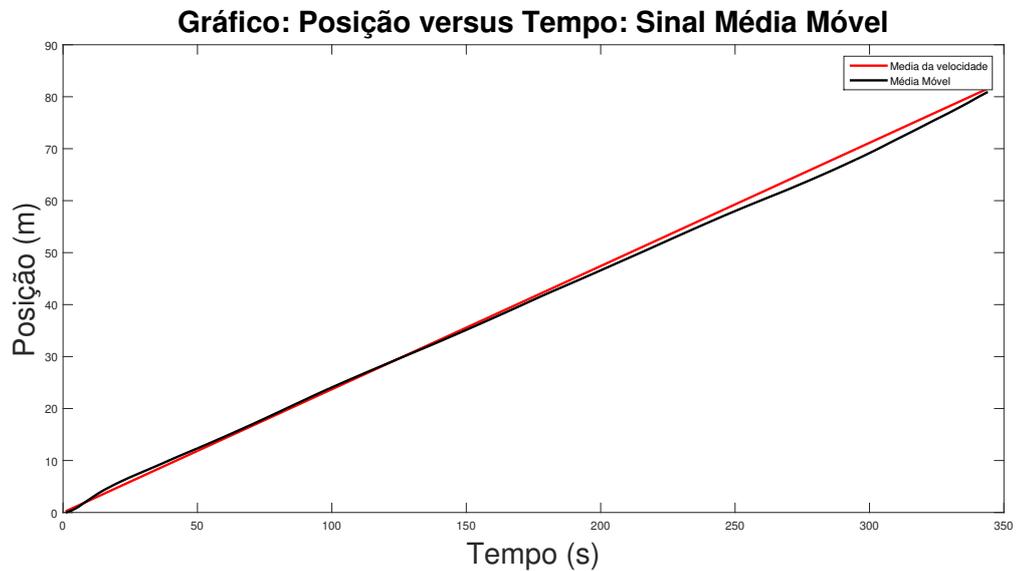


Fonte: Autor

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Na Figura 31 percebe-se que a curva referente ao filtro media móvel acompanhou a curva da sua média na maior parte do tempo, podendo verificar que o filtro media móvel obteve uma boa aproximação em torno da sua média. em comparação com o sinal original observa-se uma suavização no intervalo de tempo em que ocorreu o desvio.

Figura 31 – Comparação da Curva Média Móvel e a curva construída com a média da velocidade

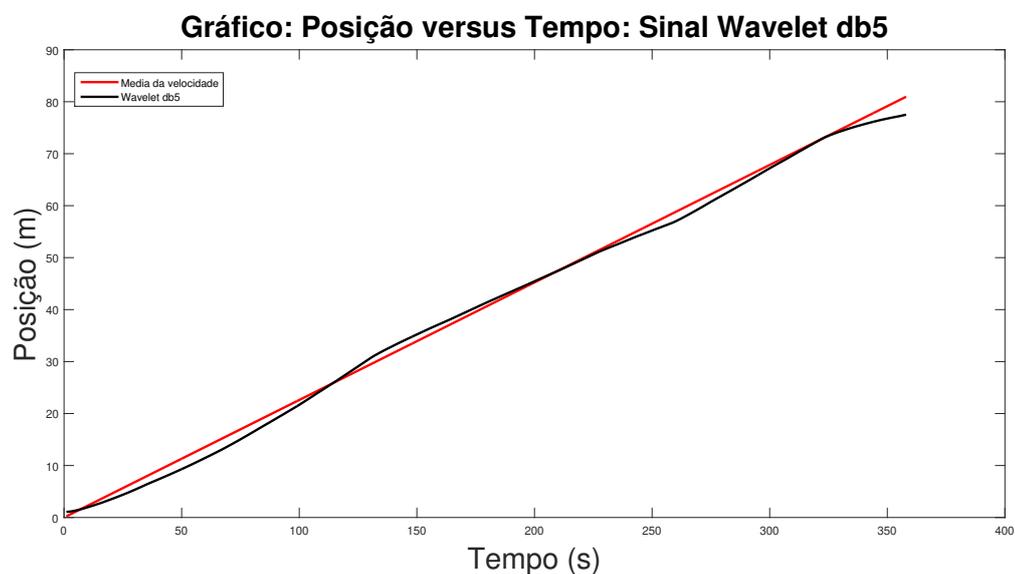


Fonte: Autor

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Na Figura 32 mostra-se o resultado obtido na utilização da transformada de *wavelet*, o sinal obtido é uma aproximação resultante de várias filtragens passa-baixas em cascata, que utilizou 5 decomposições. No gráfico observou que o sinal processado teve uma boa aproximação da curva média do sinal coletado, possuindo um pouco de erro no final do movimento que é aproximadamente no intervalo de tempo de 250 a 300 segundos.

Figura 32 – Comparação da transformada *wavelet* e a curva construída com a média da velocidade

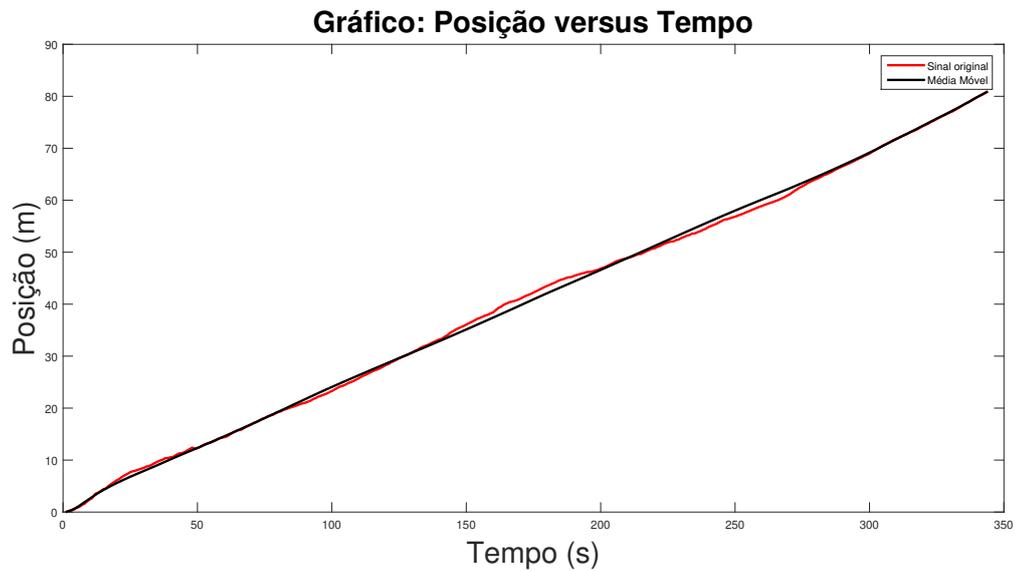


Fonte: Autor

Fonte: Elaborada pelo Autor.

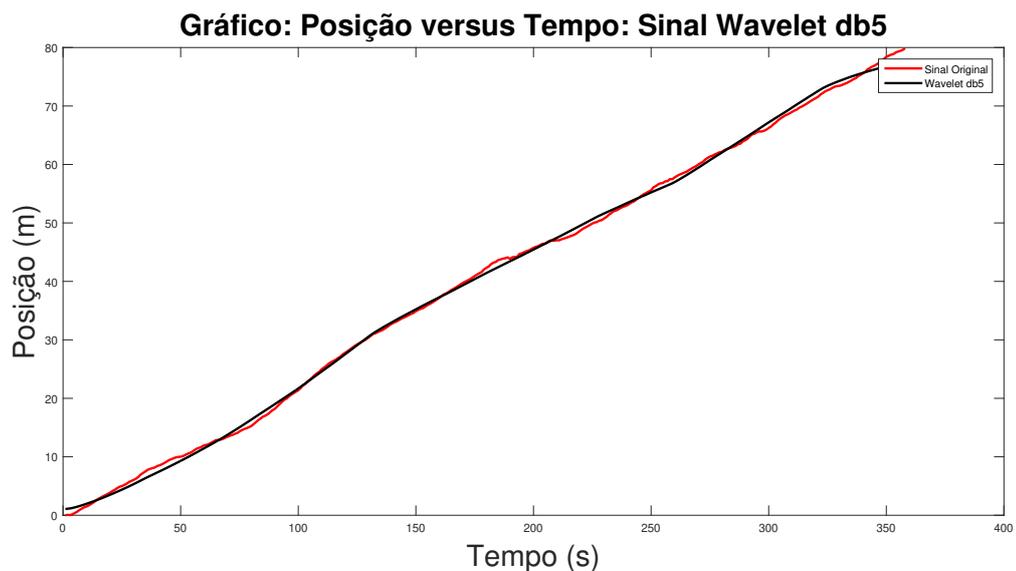
Na Figura 33 pode-se observar o gráfico de posição em função do tempo, para comparar o sinal filtrado utilizando o filtro média móvel com o sinal coletado. Nesse gráfico é possível ver que o sinal filtrado suavizou bem o sinal coletado, podendo observar que é uma boa aproximação do movimento real do carrinho.

Figura 33 – Comparação da Curva do filtro Média Móvel e o sinal coletado



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Na Figura 34 é apresentada a comparação do sinal coletado com os resultados obtidos utilizando a transformada *wavelet*, observa-se um desempenho regular devido o sinal processado acompanhar o sinal original na maior parte do tempo, percebe-se também uma redução do erro no final do movimento. Em comparação com o filtro média móvel, a transformada *wavelet* obteve um resultado inferior.

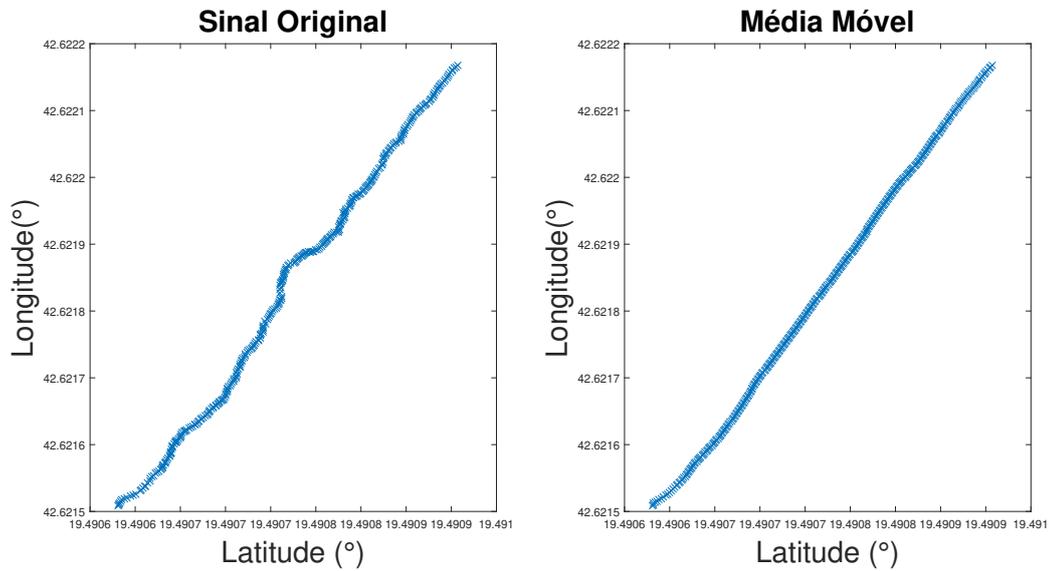
Figura 34 – Comparação da Curva da transformada *wavelet* e o sinal coletado

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Na Figura 35 é apresentada uma comparação gráfica da latitude versus longitude

do sinal coletado e o sinal do filtro média móvel. No gráfico pode-se observar que a utilização do filtro suavizou a curva em comparação com o sinal recebido pelo receptor GPS.

Figura 35 – Comparação Latitude versus Longitude do Filtro Média Móvel e o sinal coletado

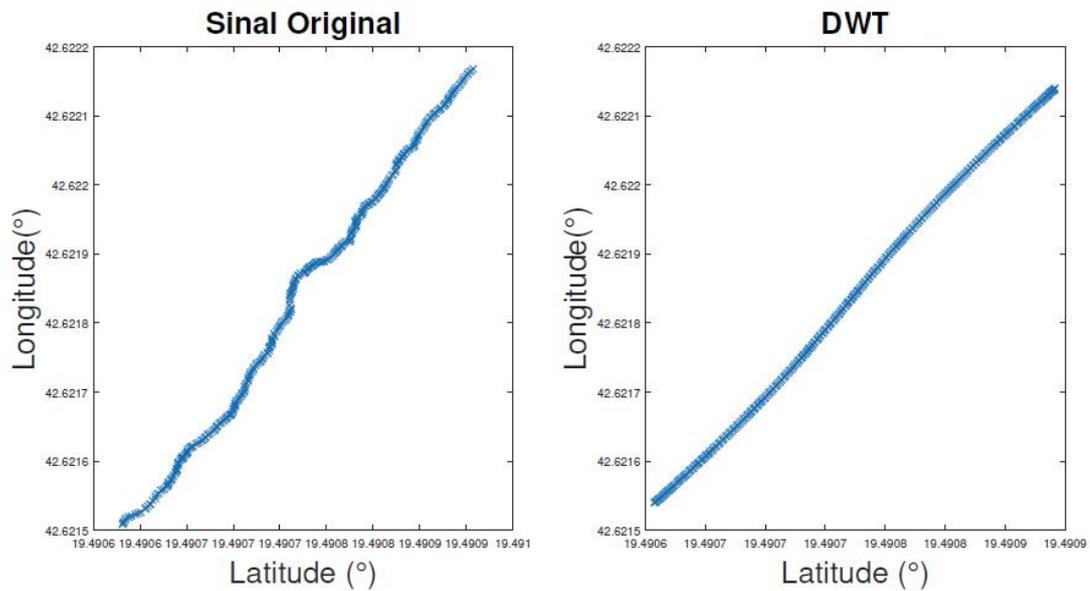


Fonte: Autor

Fonte: Elaborada pelo Autor.

A Figura 36 também é um gráfico de latitude versus longitude, ] mas nesse momento é para realizar uma comparação entre a DWT e o sinal coletado, percebe-se que o sinal processado obteve um boa suavização da curva em comparação com o sinal coletado.

Figura 36 – Comparação Latitude versus Longitude da transformada *wavelet* e o sinal coletado



Fonte: Autor

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Um maneira de verificar o desempenho das técnicas utilizadas é a incerteza do ajuste. O sinal coletado obteve um valor de desvio padrão igual a 1,10 m, já com a utilização do filtro média móvel o desvio padrão reduziu para 0,80 m e com a utilização da transformada de *wavelet* o valor do desvio padrão reduziu para 0,93 m . De acordo com os valores da incertezas encontrados observou que o a transformada de *wavelet* obteve um desempenho inferior do que o filtro média móvel.

## 5 Conclusão

O desenvolvimento do presente estudo possibilitou a análise das técnicas de processamento de sinais com o intuito de melhorar a precisão de receptores GPS sem correção diferencial. Além disso, também permitiu a realização de testes estáticos e dinâmicos para obter dados mais consistentes para realizar a análise.

Ao fazer o teste estático, a principal limitação encontrada foi a indisponibilidade da coordenada geográfica exata do local que o receptor GPS foi instalado, desta forma não permitindo realizar uma análise da exatidão dos dados. Devido a isso, utilizou-se como referência a média dos dados coletados para realizar a análise da precisão.

Analisando os dados em relação a um valor médio, o teste estático possibilitou estimar a dispersão dos sinais adquiridos através do receptor GPS. A utilização dos filtros *Butterworth*, média móvel e a Transformada *Wavelet* proporcionou uma redução considerável da dispersão dos dados. O filtro *Butterworth* obteve um melhor resultado em relação aos filtros, pois a dispersão máxima detectada dos dados sem o processamento de sinais era de aproximadamente 5,9 m, e com o filtro *Butterworth* observou que a dispersão máxima caiu para aproximadamente 40%. O filtro média móvel para o teste estático obteve um desempenho inferior ao do filtro *Butterworth*, pois ele conseguiu reduzir a dispersão máxima apenas para 4,6 m.

A análise do teste dinâmico também foi realizada considerando o valor médio dos dados, com isso foi possível avaliar a redução da dispersão utilizando os filtros média móvel e a transformada *wavelet*. A utilização da transformada *wavelet* obteve um resultado inferior em comparação com o filtro média móvel, pois o filtro média móvel obteve uma redução de 45 % da dispersão em relação ao seu valor médio, visto que a transformada *wavelet* conseguiu uma redução de 23 % da dispersão em relação a sua média.

Dada à importância do assunto, torna-se necessário o desenvolvimento de formas de reduzir a dispersão utilizando receptores GPS de baixo custo e torná-los fáceis de serem utilizados por pequenos produtores. Nesse sentido, a utilização dessas técnicas permite aos produtores realizarem seu trabalho de forma mais rápida e eficiente.

Para os trabalhos futuros na área é importante determinar as coordenadas geográficas exatas do local em que o receptor GPS foi fixado e o local em que o carrinho manteve o seu movimento. É interessante também no teste dinâmico fazer a modificação da velocidade do carrinho, pois no campo os veículos dificilmente mantêm a mesma velocidade quando vão realizar as atividades, então o estudo com a velocidade variando. Fica como proposta também um estudo da aplicação do filtro de Kalman nos sinais recebidos pelos receptores GPS sem correção diferencial.

# Referências

- ANTUNIASSI, U. R.; BAILO, F. H.; SHARP, T. C. Agricultura de precisão. In: *Congresso Brasileiro do Algodão*. [S.l.: s.n.], 2007. v. 6, p. 11–21. 1
- BIPM, I. et al. The international vocabulary of metrology—basic and general concepts and associated terms (vim). *JcGM*, v. 200, p. 2012, 2012. 15
- CABRAL, P. Erros e incertezas nas medições. *sítio da Internet, disponível no endereço <http://www.peb.ufrj.br/cursos/COB783/ErrosIncertezas.pdf>, último acesso em Dezembro/2011*, 2004. 16
- CARVALHO, E. A. de; ARAÚJO, P. C. de. Noções básicas de sistema de posicionamento global gps. *RN*, v. 900, p. 910, 2009. 3, 4
- DALBELO RODRIGUES, S. M. *Trimble RTX: posicionamento preciso em tempo real sem o uso de uma base convencional*. 2016. Disponível em: <[https://www.santiagocintra.com.br/adm/uploads/downloads/artigo-rtx-a-mira\\_10.pdf](https://www.santiagocintra.com.br/adm/uploads/downloads/artigo-rtx-a-mira_10.pdf)>. 14
- DAMASCENO, J. C.; ANTONIO, J.; OLIVEIRA, S. P. de. *Avaliação de dados de medição—Guia para a expressão de incerteza de medição*. [S.l.]: sn, 2008. 16
- DELALIBERA, H. C. et al. Incerteza e precisão de um receptor manual de sinais de satélites (sistema navstar-gps), sem correção diferencial. *Publicatio UEPG: Ciências Exatas e da Terra, Agrárias e Engenharias*, v. 13, n. 01, 2007. 8
- DUTRA, A. C. Análise comparativa de dados tomados a partir do sistema de posicionamento global (gps) utilizando a correção diferencial. 2017. 12
- FITZ, P. R. *Geoprocessamento sem complicação*. [S.l.]: Oficina de textos, 2018. 10
- FRASSON, F. et al. Avaliação do desempenho estático de receptores de gps. In: *V CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROINFORMÁTICA, SBI-AGRO. Anais. Londrina*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 1–7. 6
- HEWERDINE, W. *NMEA Reference Manual*. [S.l.]: SIRF Technology, Inc, San Jose, 2005. 8
- LAMPARELLI, M. *Agricultura de Precisão*. 2016. Disponível em: <[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01\\_72\\_711200516719.html#](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_72_711200516719.html#)>. 1, 2
- LIMA, J. N. A utilização de filtros digitais em séries temporais gnss. In: *Comunicação apresentada em VIII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia: VIII CNCG*. [S.l.: s.n.], 2015. 19
- MACHADO, T. M.; MOLIN, J. P. et al. Ensaios estáticos e cinemáticos de receptores de gps. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Departamento de Engenharia Agrícola-UFCG, v. 15, n. 9, p. 981–988, 2011. 6

- MEHAFFEY, J. Nmea data. *sítio da Internet, disponível no endereço* <https://www.gpsinformation.org/dale/nmea.htm>, último acesso em Novembro/2019, 2004. 9
- MOLIN, J. P.; CARREIRA, P. T. Metodologia para ensaios cinemáticos de receptores de gnss utilizando um gps rtk como referência. *Revista Brasileira de Agroinformática*, v. 8, n. 1, p. 53–62, 2006. 7
- MORAES, E. C. de. Capítulo 1 fundamentos de sensoriamento remoto. 2002. 2
- NUNES, M. *Agricultura de Precisão*. 2016. Disponível em: <[https://www.agrolink.com.br/georreferenciamento/agricultura-de-precisao\\_361504.html](https://www.agrolink.com.br/georreferenciamento/agricultura-de-precisao_361504.html)>. 1, 2
- NUNES, R. A. A. et al. Introdução a processadores de sinais digitais-dsp. *Apostila Da CBPF, Rio De Janeiro*, 2006. 16, 17
- OLIVEIRA, K.; MOURA, L. Os efeitos da cintilação ionosférica na propagação de ondas eletromagnéticas aplicados nos sistemas gps. 09 2012. 41
- OLIVEIRA, M. *Posicionamento em tempo real com GPS RTK ComenteEnvie por E-mailCompartilhePosicionamento em tempo real com GPS RTK*. 2011. Disponível em: <<https://mundogeo.com/blog/2000/01/01/posicionamento-em-tempo-real-com-gps-rtk/>>. 13
- OPPENHEIM, A.; SCHAFER, R. *Processamento em tempo discreto de sinais*. [S.l.]: São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2012. 17, 18
- PASSALAUQA, B. P. et al. Avaliação da precisão dos sinais rtk e rtk em rede em ensaios estático e cinemático evaluation of the precision of rtk and networked rtk signals in static and kinematic tests. 2016. 13
- PETRY, C. A. *Filtros Passivos e Ativos*. 2015. 18, 19
- SALVI, J. V.; PASSALAUQA, B. P.; MOLIN, J. P. Avaliação da precisão dos sinais rtk e rtx em ensaio estático e cinemático. 2011. 7
- SANTIAGO, M. *Como funciona o Sistema Global de Navegação por Satélite?* 2018. Disponível em: <<https://www.santiagoocintra.com.br/blog/geo-tecnologias/como-funciona-o-sistema-global-de-navegacao-por-satelitey>>. 3
- SANTOS, R. de S. et al. Utilização de receptor de sinal de gps de navegação como ferramenta de apoio à atividade agropecuária. *ENERGIA NA AGRICULTURA*, v. 31, n. 1, p. 97–101, 2016. 6
- SILVA, C. R. da. Proposta de um modelo para cálculo direto da latitude em função das coordenadas cartesianas. *Ciência e Natura*, Universidade Federal de Santa Maria, v. 34, n. 2\*, p. 193–209, 2012. 10, 11
- SILVA, J. F. d. Sistema de armazenamento de imagens comprimidas através da transformada wavelet. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2008. 20, 22
- STABILE, M. C.; BALASTREIRE, L. A. Comparação de três receptores gps para uso em agricultura de precisão. *Eng. Agríc., Jaboticabal*, SciELO Brasil, v. 26, n. 1, p. 215–223, 2006. 7

TIAGO, M. M. Classificação de sinais acústicos utilizando a transformada wavelet discreta e a decomposição de modo empírico: aplicações na área de alimentos. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2011. 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25

UBLOX. Neo m8 ublox m8 concurrent gnss modules. *sítio da Internet, disponível no endereço <https://https://www.u-blox.com/sites/default/files/>, último acesso em Novembro/2019*, 2015. 26



---

## TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado “Análise da Precisão do Sinal de Receptores GPS sem Correção Diferencial Utilizados em Aplicações Agrícolas.” é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 10 de janeiro de 2020

Tiago José dos Santos Reis  
Tiago José dos Santos Reis