

FACULDADE DE ENGENHARIA DE MINAS GERAIS
Centro de Pesquisa, Produção e Divulgação Científica

FÁBIO CRISTIAN DAVI

SISTEMA DE NAVEGAÇÃO GLOBAL POR SATÉLITE: erros
relacionados ao efeito do multicaminhamento

BELO HORIZONTE – MG
JULHO/2021

FÁBIO CRISTIAN DAVI

**SISTEMA DE NAVEGAÇÃO GLOBAL POR SATÉLITE: erros
relacionados ao efeito do multicaminhamento**

Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao curso de Engenharia de Agrimensura da Faculdade de Engenharia de Minas Gerais (FEAMIG), como requisito parcial para obtenção de título de bacharel em Engenharia de Agrimensura.

Área de concentração: Agrimensura, Topografia, Cartografia e Geodésia.

Orientador de conteúdo: Prof. Esp. Evandro de Castro Gomide

Coorientador: Prof. Esp. Dorivaldo Damacena

Orientadoras de metodologia: Gabriela Fonseca Parreira

BELO HORIZONTE – MG

JULHO/2021



FACULDADE DE ENGENHARIA DE MINAS GERAIS

Instituto Educacional “Cândida de Souza”

Trabalho de Conclusão de Curso intitulado **SISTEMA DE NAVEGAÇÃO GLOBAL POR SATÉLITE: erros relacionados ao efeito do multicaminhamento**, de autoria do aluno **Fábio Cristian Davi**, aprovado pela banca examinadora constituída pelos seguintes professores:

Prof. Esp. Evandro de Castro Gomide
Orientador

Prof.
Membro da Banca

Prof.
Membro da Banca

Belo Horizonte - MG, 10 de julho de 2021.

Rua Gastão Bráulio dos Santos, 837 – Nova Gameleira – Belo Horizonte / MG (31) 3372-3703

www.feamig.br / e-mail: feamig@feamig.br

CARTA DE ACEITE

Certificamos para os devidos fins que o artigo **SISTEMA DE NAVEGAÇÃO GLOBAL POR SATÉLITE: ERROS RELACIONADOS AO EFEITO DO MULTICAMINHAMENTO** foi aceito para publicação no **4º CADERNO DE COMUNICAÇÕES UNIVERSITÁRIAS** do Simpósio de Engenharia, Arquitetura e Gestão – SEAG, promovido pelo Centro de Extensão da FEAMIG, nos dias 14, 15 e 16/05/2021 – **ISSN 2675-1879**.

Belo Horizonte, 09 de junho de 2021.

Professora Raquel Ferreira de Souza
Coordenadora do CENEX e do PPDC da FEAMIG
E-mail: raquel.ferreira@feamig.br

Agradecimentos

A minha amada esposa, Myreli Xavier de Lima, primeiramente por estar sempre ao meu lado e, também, por ter acreditado e me incentivado durante toda essa jornada.

A todos os queridos (as) professores (as) da FEAMIG, bem como meu orientador e todos os (as) funcionários (as) por toda sua ajuda.

A todos os meus amigos e também colegas de classe.

“Da próxima vez que alguém reclamar que você cometeu um erro, diga a essa pessoa que talvez isso seja uma boa coisa, porque sem imperfeição nem você nem eu existiríamos.”

Stephen Hawking

RESUMO

Por mais avançados que sejam os sistemas de posicionamento e navegação, eles sempre possuem certos limites que o estágio de desenvolvimento em questão ainda não foi capaz de superar. E isto vale mesmo para métodos já extremamente avançados como o atual Sistema de Navegação Global por Satélite (GNSS). Mesmo este sistema de vanguarda apresenta erros sistemáticos e difíceis de serem modelados em função de sua natureza aleatória. Sabe-se que sinais de radiofrequência são emitidos por satélites e recebidos por receptores GNSS. Estes sinais são, muitas vezes, refletidos por estruturas físicas (como prédios, carros, pontes etc.) presentes em circunstâncias que não podem ser evitadas – este efeito é conhecido como multicaminhamento e é um erro difícil de ser tratado por sua complexidade. Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) tem o propósito de descrever a dinâmica do multicaminhamento e investigar e comparar as melhores técnicas e posturas disponíveis para evitar ou minimizar este efeito. O multicaminhamento pode ser quantificado pelo *software* TEQC, projetado para realizar a tradução, a edição e o controle de qualidade dos dados GNSS. A relevância desta pesquisa está exatamente no fato de que estes sinais transportam dados indispensáveis, como a medição da distância e do tempo, para o correto posicionamento de uma coordenada na Terra. Interferências durante a propagação destes sinais podem ocasionar erros inadmissíveis e/ou custosos para projetos de engenharia. Este trabalho contou com ampla pesquisa bibliográfica, e tinha o objetivo de realizar estudos práticos de campo. Porém, a pandemia do COVID-19, dificultou a pesquisa de campo, prevista para ser realizada na Faculdade de Engenharia de Minas Gerais. Assim, os dados GNSS, necessários para a avaliação do multicaminhamento, foram coletados pelo download das estações da RBMC do Estado de Minas Gerais do ano de 2020, disponíveis no site do IBGE. Para cada arquivo de dados destas estações, um intervalo de 4 horas de rastreamento foi escolhido e, em seguida, foram todos processados pelo serviço de PPP do IBGE; em sequência, cada uma foi subtraída com os resultados de suas respectivas coordenadas oficiais disponibilizadas pelo relatório descritivo do IBGE do ano de 2020. Essa diferença teve como resultado o valor da acurácia de cada uma das coordenadas das estações em questão. Ainda, obteve-se o valor do multicaminhamento de cada uma dessas estações com o uso do *software* TEQC. Com todos esses dados coletados e disponíveis foi possível comparar, com a ajuda de gráficos, como o multicaminhamento afetou o valor da acurácia para cada uma dessas 14 estações. Baseado nos dados e na metodologia utilizada nesta pesquisa, os resultados apontaram não ser possível associar os valores obtidos da acurácia das estações escolhidas da RBMC com o efeito do multicaminhamento quantificado pelo TEQC.

Palavras-chave: GNSS. Propagação dos sinais. Multicaminhamento. Erros. TEQC.

ABSTRACT

Regardless of how advanced the positioning and navigation systems may be, they always have certain limits that the current stage of development has not yet been able to overcome. This is true even for extremely advanced methods such as the modern Global Navigation Satellite System (GNSS). Even this avant-garde system has systematic errors that are difficult to model due to its random nature. It is known that radio frequency signals are emitted by satellites and received by GNSS receivers. These signals are often reflected by physical structures (such as buildings, cars, bridges, etc.) present in circumstances that cannot be avoided – this effect is known as multipath and is an error difficult to deal with due to its complexity. This Final Year Project (FYP) aims to describe the dynamics of the multipath and to investigate and compare the best techniques and practices available to avoid or minimize it. Multipath can be quantified by the TEQC software, designed to perform translation, editing, and quality control of GNSS data. The relevance of this research is precisely due to the fact that these signals carry indispensable data for the proper positioning of a coordinate on Earth, such as distance and time measurements. Interference during the propagation of these signals may cause inadmissible and/or costly errors for engineering projects. This work carried out an extensive bibliographic research, and aimed to carry out practical field studies. However, the COVID-19 pandemic hindered field research, scheduled to be held at the Engineering College of Minas Gerais. Thus, the GNSS data, necessary for the evaluation of multipath, was collected by downloading the RBMC stations within the State of Minas Gerais in the year of 2020, available on the IBGE website. For each data file of these stations, an interval of 4 hours of tracking was chosen and, they all were processed by the PPP service from IBGE; after that, each one was subtracted with the results of their respective official coordinates available by the IBGE descriptive report for the year 2020. This difference resulted in the accuracy value of each of the coordinates of the stations in question. In addition, the value of the multipath of each one of these stations was obtained using the TEQC software. With all this data collected and available, it was possible to compare, with the help of graphs, how multipath affected the accuracy value for each of these 14 stations. Based on the data and the methodology used in this research, the results showed that it was not possible to associate the values obtained from the accuracy of the chosen RBMC stations with the effect of the multipath quantified by the TEQC.

Keywords: GNSS. Signal propagation. Multipath. Error. TEQC.

LISTA DE

Figura 1 - Astrolábio náutico antigo.....	25
Figura 2 - Uso de um astrolábio náutico.....	26
Figura 3 - Satélite Jason-2	29
Figura 4– Constelação de satélites GPS.	31
Figura 5 – Satélite GPS do Projeto Bloco IIF.	32
Figura 6– Satélite GLONASS-M.	34
Figura 7 – Satélite GIOVE-A embarcando em um foguete.....	35
Figura 8 – Estações de controle GPS.	37
Figura 9 – Relógio atômico GPS.....	41
Figura 10 – Princípio básico do método GNSS.....	42
Figura 11– A dinâmica da pseudodistância.	45
Figura 12 – Fase da onda portadora.....	47
Figura 13– Modulação em fase.	48
Figura 14– Posicionamento relativo GNSS.....	50
Figura 15– Receptor TOPCON Hiper VR.....	53
Figura 16– Receptor Trimble R8s	54
Figura 17– Receptor CHC i80.	54
Figura 18– Exemplo da ocorrência do multicaminhamento.....	58
Figura 19 – Antena Choke Ring.....	59
Figura 20– Antena pinwheel.	60
Figura 21 - Cartograma do IBGE com destaque para as estações da RBMC de MG em 202075	
Figura 22 - Arquivos de dados GNSS da estação MGBH da RBMC	75
Figura 23 - Arquivos RINEX da estação MGBH da RBMC	76
Figura 24 - Relatório PPP - Estação MGBH – Coordenadas corrigidas	78
Figura 25 - Relatório Descritivo - Estação MGBH – Coordenadas oficiais	79
Figura 26 - Arquivo “S” da estação MGBH. Destaque para os valores do multicaminhamento.	84

LISTA DE SIGLAS

DOS	<i>Disk Operating Systems</i>
EGNOS	<i>European Geostationary Navigation Overlay Service</i>
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ESA	<i>European Space Agency</i>
GLONASS	<i>Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INCRA	Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
OSTM	<i>Ocean Surface Topography Mission</i>
PDF	<i>Portable Document Format</i>
PPP	Posicionamento por Ponto Preciso
RINEX	<i>Receiver Independent Exchange Format</i>
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS
RTK	<i>Real Time Kinematic</i>
SGB	Sistema Geodésico Brasileiro
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
TEQC	<i>Translation, Editing and Quality Check</i>
UNAVCO	<i>University NAVSTAR Consortium</i>
UTM	<i>Universal Transversa de Mercator</i>

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Satélites GPS em operação em 20 de fevereiro de 2020.....	33
Tabela 2- Erros sistemáticos GNSS	56

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - (1) Coord. Oficiais dos Relatórios Descritivos; (2) Coord. Corrigidas dos arquivos de 4 horas do PPP	80
Quadro 2 - Diferenças de coordenadas – relatórios descritivos vs. com os resultados do PPP80	
Quadro 3 - Valores de MP1 e MP2 das estações da RBMC do Estado de MG.	85
Quadro 4 - Vetores / erros obtidos durante a obtenção de coordenadas das 14 estações da RBMC.....	86
Quadro 5 -Precisão obtida das estações da RBMC de MG em 31/07/2021.....	91

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Contexto	21
1.2	Problema	22
1.3	Objetivos.....	22
1.3.1	<i>Objetivo geral</i>	23
1.3.2	<i>Objetivos específicos</i>	23
1.4	Justificativa	23
2	REFERÊNCIAL TÉORICO	25
2.1	Breve contexto histórico do sistema de posicionamento e navegação.....	25
2.1.1	<i>Os satélites</i>	27
2.2	O Sistema de Navegação Global por Satélite - GNSS	29
2.2.1	<i>Segmento de controle</i>	36
2.3	Características e fundamentos técnicos do GNSS.....	37
2.3.1	<i>A importância dos sinais transmitidos</i>	39
2.3.2	<i>Relógios atômicos e o método relativístico da precisão</i>	40
2.3.3	<i>As observáveis GNSS</i>	43
2.3.3.1	Pseudodistância através do código.....	44
2.3.3.2	Fase da onda portadora	46
2.4	Métodos e procedimentos GNSS	49
2.4.1	<i>Posicionamentos absolutos e relativos</i>	49
2.4.2	<i>Alguns tipos de posicionamento relativo</i>	51
2.4.3	<i>Posicionamentos relativo estático e relativo estático rápido</i>	51
2.5	Segmento do usuário	52
2.5.1	<i>Alguns modelos de receptores GNSS</i>	53
2.6	Erros sistemáticos do GNSS	55
2.6.1	<i>Multicaminhamento ou sinais refletidos</i>	57
2.6.2	<i>Multicaminhamento – um efeito que pode ser atenuado</i>	59
2.6.3	<i>Multicaminhamento – um efeito que pode ser quantificado</i>	61
2.7	Sobre o software TEQC.....	62
3	METODOLOGIA	63
3.1	Tipo de pesquisa	63
3.2	Natureza da pesquisa	64

3.3	Pesquisa quanto aos fins	65
3.4	Pesquisa quanto aos meios.....	66
3.5	Universo e amostra.....	68
3.6	Local – Faculdade de Engenharia de Minas Gerais - FEAMIG.....	69
3.7	Coleta e análise de dados	69
3.8	Limitações	72
4	RESULTADOS E ANÁLISES	74
4.1	Coleta dos dados da RBMC para comparação da acurácia.....	74
4.2	Comparação dos dados coletados para análise do efeito do multicaminhamento	
	81	
4.2.1	<i>Gráfico Planimétrico – Multicaminhamento vs. Acurácia.....</i>	86
4.2.2	<i>Gráfico Altimétrico – Multicaminhamento vs. Acurácia.....</i>	88
4.3	Recomendação de técnicas e métodos para prevenir o multicaminhamento.....	89
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	92
6	REFERÊNCIAS	94
	APÊNDICE	104

1 INTRODUÇÃO

Ao longo da história, instrumentos foram desenvolvidos para medir distâncias, direções e ângulos. Seus objetivos eram solucionar problemas e suas funções eram amplas, como, por exemplo, calcular a profundidade de um poço, a altura de uma montanha, ou ainda descobrir as horas (BEZERRA, 2018). Porém, determinar a posição de um corpo no espaço foi, e ainda é, um dos seus principais usos. Diversos desses instrumentos foram propositadamente adaptados para definir pontos de referência acima e abaixo da superfície terrestre – muitas vezes, objetivando o deslocamento e a navegação (GESTEIRA, 2014).

Métodos de posicionamento obtiveram um salto evolutivo significativo a partir da década de 1970 e hoje se observa uma verdadeira “panaceia” tecnológica na determinação de coordenadas no globo terrestre. A Engenharia de Agrimensura é uma das maiores beneficiárias deste fenômeno.

É notável observar como os novos métodos de levantamento foram impulsionados pela recente revolução digital que praticamente substituiu a também precisa, mas pesada e de alto custo, tecnologia mecânica analógica (ANDRADE, 1998).

Um dos desdobramentos dessa revolução foi o estabelecimento de satélites artificiais em órbitas específicas, em conjunto com o desenvolvimento da indústria eletrônica e da informática, que, com a ajuda de instrumentos adequados – como receptores geodésicos – viabilizou a obtenção de dados precisos, no nível de milímetros, de um determinado local da superfície terrestre de maneira rápida, fácil e de baixo custo (PARZZANINI, 2019). Hoje este sistema se ampliou e é conhecido como Sistema de Navegação Global por Satélite – sigla GNSS.

Porém, o GNSS não é isento de problemas. Dentre eles, destacam-se erros característicos da tecnologia vigente. Embora sejam administráveis, estes erros não deixam de ser recorrentes e, acredita-se, ainda podem ser reduzidos ou evitados (BUENO, 2010). Enquanto novas tecnologias não substituïrem o GNSS, arrisca-se dizer que se chegou a um ponto em que novas conquistas estarão associadas exatamente à busca pela diminuição de erros deste avançado método de posicionamento.

Dentre os vários tipos de erros das observáveis GNSS, destacam-se os erros relacionados com a propagação dos sinais emitidos pelos satélites e captados por receptores locados na Terra. Este trabalho visa pesquisar um desses efeitos, conhecido como multicaminhamento. Este último gera erros, pois parte dos sinais são refletidos pela superfície

de estruturas físicas antes de chegar ao receptor (MONICO, 2008). Por sua vez, este efeito é passível de ser mensurado – aqui, com a ajuda do *software* TEQC, que faz a tradução, edição e verificação de dados GNSS (MARQUES et al., 2009).

Assim, este Trabalho de Conclusão de Curso pesquisará a administração de um dos erros ao se determinar as coordenadas de um objeto no plano terrestre a partir de métodos, práticas e instrumentos atuais. Mais especificamente, este trabalho irá discutir e responder problemas ligados ao efeito do multicaminhamento, erro sistemático típico do GNSS – tecnologia de ponta dos métodos de posicionamento contemporâneos deste trabalho de pesquisa.

1.1 Contexto

Algumas características da tecnologia GNSS, que podem levar a erros, ainda são recorrentes, por mais avançada que seja a tecnologia atual. O propósito deste TCC é evidenciar a importância da ciência por trás de um desses erros, para que o mesmo possa ser evitado, reduzido ou mesmo eliminado.

Segundo Monico (2008), existem vários tipos de erros sistemáticos e recorrentes do método de posicionamento pelo GNSS. Dentre eles, destacam-se erros característicos relacionados com os próprios satélites, ou com o receptor e sua antena, ou ainda com a estação.

Contudo, o objetivo desta pesquisa é analisar erros relacionados com a propagação dos sinais emitidos pelos satélites. Ainda segundo Monico, existem vários fatores e/ou situações que causam esses tipos de erros, a exemplo da refração atmosférica, da perda de ciclos ou do multicaminhamento. Sendo somente este último, o foco deste Projeto de Trabalho.

O multicaminhamento é um efeito provocado pelos sinais emitidos pelos satélites e refletidos em uma ou mais superfícies antes de atingir a antena do receptor. A ocorrência desses efeitos de reflexão depende do local e das superfícies no entorno da antena, como árvores, veículos, prédios, espelhos d'água etc. (BUENO, 2010). Nesta situação, o sinal pode chegar ao receptor por dois caminhos, um direto (desejável) e outro indireto (indesejável). No caso do caminho indireto, o sinal é refletido por essas superfícies, e é exatamente isso que afeta os sinais captados no receptor, causando distorções que afetam a correta transmissão dos dados, gerando erros grosseiros e inadmissíveis para a Engenharia (MÉTRICA TECNOLOGIA, 2019). O problema está no fato de que estes sinais transportam dados fundamentais para o correto posicionamento, entre eles a medição da distância (NOVATEL, 2019).

Estruturas físicas, mencionadas acima, fazem parte do cotidiano de trabalhos que utilizam o método GNSS. Contudo, as mesmas não podem ser modificadas, pois não é viável, por exemplo, mudar uma ponte ou um prédio de lugar. Por outro lado, os instrumentos GNSS e as técnicas e práticas profissionais podem ser adaptadas aos ambientes e suas condições postas, dando continuidade à evolução tecnológica e do conhecimento. Assim como erros do passado foram reduzidos, os erros de hoje podem ser reduzidos ainda mais, e este trabalho de pesquisa buscará contribuir para isso.

O multicaminhamento pode afetar a qualidade do posicionamento, diminuindo a precisão e a acurácia. Isso pode gerar diversos prejuízos, principalmente ligados a retrabalhos. Como exemplo, pode-se citar retornos ao local para refazer coordenadas fora da precisão, ou pagamento de indenizações em função de sobreposição de áreas depois do fim da construção de uma rodovia, ou mais grave ainda, a demolição completa de alguma estrutura por ter sido locada e construída no lugar errado, entre outros.

Aqui serão pesquisados os melhores métodos e práticas de posicionamento bem como quais conhecimentos os profissionais devem atentar para determinar uma coordenada na superfície terrestre. Para isso serão consideradas as opções que os instrumentos atuais disponibilizam para tal. Independentemente do resultado deste trabalho acredita-se que o simples fato de apresentar os erros supracitados para toda a comunidade acadêmica e profissional, discutindo-os de modo aprofundado, já representa um ganho e uma contribuição para que os mesmos possam ser evitados.

1.2 Problema

Quais são os métodos mais adequados para evitar e avaliar erros de propagação de sinal ao operar um receptor GNSS, considerando as estruturas causadoras da reflexão destes sinais?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Expor as principais causas de erros de propagação de sinal, ou seja, expor a dinâmica desses erros e, também, apresentar métodos de quantificação deste efeito em arquivos de dados coletados durante a operação com receptores GNSS, a fim de analisar se o multicaminhamento afeta ou não bons resultados na obtenção de coordenadas.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) Coletar dados em campo, com o uso de um receptor GNSS, em situações adversas ou em lugares específicos, que permita a comparação de resultados relacionados ao tipo de erro aqui delineado (com a ajuda do *software* TEQC);
- b) Comparar os dados coletados para analisar o efeito do multicaminhamento em relação a obtenção de bons resultados da acurácia;
- c) Recomendar técnicas e métodos que possam prevenir erros ligados à propagação dos sinais GNSS, principalmente os que estão ligados ao multicaminhamento.

1.4 Justificativa

Primeiramente, esta pesquisa se faz relevante porque contribui com o processo de evolução das ciências relacionadas à Engenharia de Agrimensura, de modo a apresentar conclusões – relacionadas a técnicas e posturas que previnam erros na determinação de coordenadas pelo método de posicionamento GNSS – que sejam úteis para a comunidade acadêmica e que contribuam para futuras pesquisas.

Em segundo lugar, é pertinente, uma vez que, discute os erros descritos anteriormente, contribuindo para a melhoria das práticas e técnicas de empresas de engenharia ou de profissionais autônomos. Muitas vezes prejuízos podem ser evitados, pois dados podem ser avaliados de modo a quantificar efeitos indesejados, como a do multicaminhamento – que será mensurado neste trabalho. Como já abordado, esses prejuízos estão normalmente relacionados

a retrabalhos, indenizações ou até mesmo em situações mais graves, como demolições de estruturas.

Para o autor desta pesquisa, a mesma se apresenta como um grande desafio, e, por isso, um grande aprendizado. Um novo mundo, antes desconhecido começa a se tornar mais aprofundado. O sucesso da pesquisa em questão, e todo o conhecimento e aprendizado envolvidos, representarão um ganho tanto para esta instituição (FEAMIG), quanto para seus professores e alunos, uma vez que todos são responsáveis e possuem seus respectivos méritos.

2 REFERÊNCIAL TÉORICO

2.1 Breve contexto histórico do sistema de posicionamento e navegação

Problemas antigos foram resolvidos a partir da elaboração de teorias matemáticas, muitas vezes, materializadas em instrumentos. Alguns desses instrumentos ainda hoje podem servir de exemplo para ilustrar como esses problemas eram resolvidos (HOFFMANN et al., 2009). É interessante observar como experiências práticas da vida cotidiana levaram ao desenvolvimento de teorias que se transformam em conhecimento, e como este último exerceu, e continua exercendo, influência no progresso da ciência e da tecnologia.

A busca de informações e técnicas que facilitam a ocupação e localização do homem no espaço é algo bem antigo. Essa preocupação vem desde as primeiras civilizações e é evidenciada, por exemplo, pelos mapas babilônicos de aproximadamente 4.500 A.C., ou pelo “topógrafo esticador de corda” do Egito de 1.400 A.C., conhecido como “*harpedonapata*” (OLIVEIRA, 2019).

Assim, ao longo da história diversos equipamentos rudimentares, mas não menos geniais, foram desenvolvidos e impulsionaram a evolução tecnológica da localização, que se intensificou com as Grandes Navegações, a partir do século XVI. Segundo Gesteira (2014), dentre as tecnologias deste período, destaca-se o astrolábio. A Figura 1 a seguir é o esboço de um astrolábio náutico antigo.

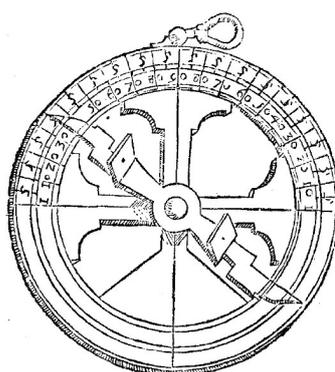


Figura 1 - Astrolábio náutico antigo
Fonte: WATERS (1966).

Este artefato de origem islâmica e judaica possuía diversas utilidades e foi adaptado para a navegação marítima pelos portugueses, de modo a medir a altura e a posição dos astros, principalmente das estrelas. Pode-se dizer que a descoberta do astrolábio foi um dos projetos

científicos mais antigos do mundo, uma vez que as raízes de seu desenvolvimento remontam à Grécia antiga – momento de descoberta das diversas teorias matemáticas que compõem os fundamentos básicos deste instrumento (PETRIN, 2015).

Ainda, segundo Gesteira (2014), foi exatamente o resultado alcançado com o desenvolvimento do astrolábio que serviu como a base técnica e científica, que possibilitou a expansão marítima europeia em 1500. Assim, obteve-se uma vantagem tecnológica e uma precisão incrível – para aquela época – de navegação pelos mares.

Este momento representou um marco emblemático do sistema de navegação. A partir de então, se tornou mais fácil para o homem referenciar sua própria localização; isto é, ficou mais fácil saber onde algo está localizado e, com isso, saber como ir e como voltar de determinado local (VAZ, 2015). Pode-se inferir que o “projeto astrolábio” é um clássico projeto de engenharia, exatamente pelo fato de ter gerado ganhos de custo e de tempo, além de ter resolvido um problema prático com a ajuda da ciência.

A Figura 2 a seguir ilustra bem o uso de um astrolábio náutico – e as respectivas relações trigonométricas envolvidas em seu conceito – para medir a altura de uma estrela em relação ao horizonte.

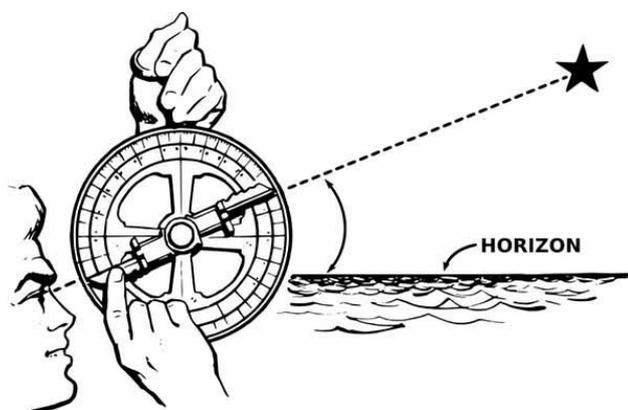


Figura 2 - Uso de um astrolábio náutico
Fonte: COPPENS (2020).

Segundo Teixeira (2014), outros instrumentos desempenharam um papel tão importante para a navegação quanto o astrolábio e, por vezes, em complementação ao mesmo, como a bússola, o quadrante, a balhestilha, o compasso, entre outros.

Assim como estrelas naturais do firmamento foram usadas com perspicácia pelo homem, como referência para o posicionamento e navegação, sobretudo durante a expansão marítima europeia, hoje, estrelas artificiais colocadas em órbita pelo próprio homem – conhecidas como satélites – evidenciam o enorme salto tecnológico dado, que não somente

facilitou o processo de posicionar um objeto no espaço, mas também aumentou extraordinariamente sua precisão e acurácia.

Pode-se considerar que o satélite artificial é, atualmente, um dos principais instrumentos do sistema de posicionamento e navegação, e sua elaboração foi concebida por meio da evolução de diversos instrumentos e técnicas do passado.

2.1.1 Os satélites

O INPE (2011) define os satélites como qualquer objeto que orbita ao redor de outro objeto, sendo este último, necessariamente, o objeto principal. Existem satélites naturais, como a lua que orbita em volta da Terra, e satélites artificiais. Estes últimos são naves espaciais fabricadas pelo homem e enviadas para o espaço em um veículo de lançamento (normalmente foguetes), sendo então capazes de orbitar ao redor de luas, cometas, asteroides, planetas, estrelas ou mesmo galáxias.

Além da matemática, outras ciências, entre elas a física, também contribuíram com o estabelecimento dos satélites artificiais. Segundo Júnior (s/d), foi o físico inglês Isaac Newton quem idealizou a possibilidade do lançamento de objetos que pudessem permanecer em órbita ao redor do planeta. Newton imaginou que da mesma forma que a lua orbita o planeta Terra, seria provável que outros objetos quaisquer também pudessem fazer o mesmo:

“Se um objeto é lançado horizontalmente do alto de uma montanha, ele descreve uma trajetória curva até tocar o solo. Aumentando-se a velocidade de lançamento, a distância horizontal percorrida pelo objeto também aumenta. Newton pensou que, se o objeto fosse lançado em uma determinada velocidade, ele descreveria uma trajetória circular ao redor de todo o globo terrestre e voltaria ao ponto do lançamento sem tocar no solo. Assim, os satélites artificiais são levados até a altura desejada a bordo de um ônibus espacial ou acoplados a um foguete. Ao atingir a altura desejada, o satélite é acelerado até que atinja a velocidade necessária para manter-se em órbita. Os satélites ocupam posições ao redor da Terra onde não existe atrito com o ar, o que garante que não haja perda de energia cinética. Com isso, o satélite mantém o movimento por inércia”. (JÚNIOR, s/d, s. pág.).

Neste contexto, Filho e Saraiva (2017) também ressaltam as Leis de Kepler, que se aplicam não somente aos planetas orbitando o Sol, mas a todos os casos em que qualquer corpo

celestial orbita em torno de um outro, sob a influência da gravitação – como é o caso da Lua e dos satélites artificiais orbitando a Terra.

Zanotta et al. (2011) também destaca a importância crucial de descobertas recentes da física – com destaque para a mecânica quântica e a teoria da relatividade de Einstein – para o funcionamento dos satélites que compõe o sistema global de posicionamento e navegação:

Se os efeitos da relatividade não fossem levados em consideração, os sistemas de navegação sofreriam uma perda considerável na precisão das coordenadas de posição e velocidade, inviabilizando e colocando em risco alguns meios de transporte modernos, como o avião. Os relógios (dos satélites) são afetados de duas maneiras diferentes: sua velocidade relativa (relatividade restrita) e seu potencial gravitacional (relatividade geral). A teoria da relatividade geral prevê que o tempo na superfície passará mais devagar em relação ao tempo dos satélites, devido à diferença do potencial gravitacional existente entre a superfície terrestre e a região onde os satélites orbitam (ZANOTTA *et al.*, 2011, s. pág.).

Köche (2011) atenta para a afirmação de Einstein, isto é, de que a referência espaço-tempo se diferente para observadores em movimentos diferentes, contrariando a postura clássica que prega o valor absoluto para o espaço e tempo:

“... as longitudes e as distâncias diferem segundo o observador em questão. É o mesmo que afirmar que o espaço e o tempo – a distância e a duração –, e todas as magnitudes que delas derivam (velocidade, aceleração, força, energia, ...), não dizem relação com algo absoluto do mundo externo, mas que são grandezas relativas que se modificam de acordo com a velocidade em que estiver o observador. O marco de referência não está no mundo, mas no observador e dele depende. (KÖCHE, 2011, p. 59).

A figura 3 a seguir é o esboço de um satélite nomeado Jason-2 e serve como um exemplo representativo de um satélite artificial. Este é um dos satélites da série OSTM (Missões de Topografia da Superfície do Oceano) – lançado em 20 de junho de 2008 em parceria entre Estados Unidos e França.

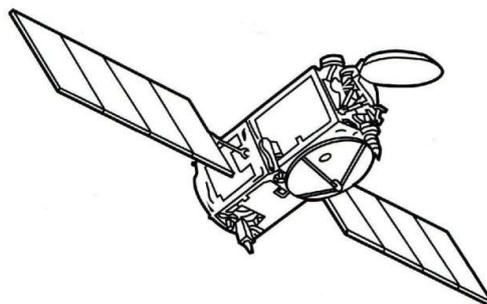


Figura 3 - Satélite Jason-2
Fonte: HILLGER (2020).

Os satélites artificiais utilizados com o objetivo de posicionamento e navegação compõem o chamado Sistema de Navegação Global por Satélite, conhecido pela sigla em inglês GNSS. Porém, sabe-se que este método de posicionamento não nasceu com esta sigla

2.2 O Sistema de Navegação Global por Satélite - GNSS

O GNSS é o nome atribuído ao conjunto de várias constelações de satélites artificiais, oriundos de vários países (SEEBER, 2003). Ele é um sistema de navegação baseado em coordenadas tridimensionais, obtidas em tempo real a partir de pontos situados sobre a superfície da Terra (PARZZANINI, 2019).

Segundo Ayres (2008), a concepção inicial deste método de posicionamento e navegação foi promovida e desenvolvida por militares, assim como outros tipos de invenções tecnológicas – vide a internet e os computadores. Contudo, hoje, seu uso, não é somente militar, como foi em seu início, mas também civil, representando um benefício de alcance global.

O método de posicionamento do GNSS é geodésico¹, uma vez que é composto por redes geodésicas que permitem maior precisão, de forma muito mais rápida quando comparados com métodos tradicionais anteriores (MONICO, 2008). Por exemplo, o sistema GNSS, em conjunto com o desenvolvimento da eletrônica e da informática, substituiu os métodos mecânico-analógicos de posicionamento (ANDRADE, 1998).

É importante destacar que a base cartográfica do GNSS é digital, que, por sua vez, é mantida e corrigida por um sistema geodésico de coordenadas. Este último, segundo Teixeira et al. (2003), tem suas posições referenciadas por um conjunto de pontos materializados (alocados fisicamente) no plano terrestre – conceito básico de redes geodésicas. Esses pontos

¹ Geodésia é a ciência que estuda a forma e as dimensões da Terra. Arte de medir as terras (DICIO, 2020).

materializados são, segundo o IBGE (s/d), um conjunto de informações planimétricas, altimétricas e gravimétricas, que, no Brasil, estão vinculadas às estações do SGB, e servem como referência em diversos trabalhos de posicionamento. Como exemplo, Suci e Faggion (2012), destacam a importância das redes geodésicas no monitoramento de possíveis deslocamentos físicos que possam estar ocorrendo em grandes obras de engenharia, como, pontes, pórticos, edifícios, barragens etc.

Assim, o IBGE (2020) conceitua o GNSS como:

“...uma constelação de satélites que possibilita o posicionamento em tempo real de objetos, bem como a navegação em terra ou mar. Esses sistemas são utilizados em diversas áreas, como mapeamentos topográficos e geodésicos, aviação, navegação marítima e terrestre, monitoramento de frotas, demarcação de fronteiras, agricultura de precisão, entre outros usos”. (IBGE, 2020, s. pág.).

Os satélites que compõem as constelações que formam o GNSS foram sendo gradativamente lançados no espaço por diversos países. Segundo Silva (s/d), os primeiros satélites foram lançados experimentalmente por soviéticos e estadunidenses ainda na década de 1950, durante a Guerra Fria (1947-1991), momento de disputa político-ideológica travada entre os dois lados. Conforme Júnior (s/d), o primeiro satélite posto em órbita na história foi o “Sputnik I” em 1957 pela União Soviética, porém, o mesmo não possuía uma função específica, apenas transmitia um sinal que podia ser ouvido como um “beep” por meio de um rádio.

De acordo com Kilroy (1998), este princípio usado para rastrear satélites lançados em órbita foi mais aperfeiçoado pelos cientistas estadunidenses, que utilizaram o efeito Doppler² associado à frequência de rádio recebida pelo “Sputnik I” para calcular sua órbita:

“Eles (cientistas estadunidenses) argumentaram que se alguém pudesse determinar a órbita de um satélite a partir de um ponto conhecido na Terra, também poderia usar esta mesma lógica inversamente, isto é, determinar a localização de um ponto na Terra a partir de um ponto conhecido no espaço. Essa percepção foi justamente o que levou ao conceito de um sistema de navegação e posicionamento de precisão baseado em satélites que poderia ser usado em qualquer tipo de clima, a qualquer momento, e em qualquer lugar da Terra”. (KILROY, 1998, s. pág.).

² O efeito Doppler é encontrado em qualquer propagação ondulatória. Conhecimentos referentes a este efeito foram fundamentais, pois permitiram a medição da velocidade relativa dos satélites, além de outros corpos celestes, em relação ao planeta Terra (SANTOS, s/d).

Desta forma, os Estados Unidos não só melhoraram a tecnologia existente até então, como também tomaram a frente da disputa político-ideológica contra a União Soviética ao lançar a primeira constelação de satélites. Esta constelação recebeu o nome de GPS (Sistema de Posicionamento Global) (VETTORAZZI, 2016).

Segundo Molin (2010), o projeto GPS foi criado em 1973 a partir de outros programas. Satélites teste começaram a ser lançados mais tarde (1978), e os primeiros satélites operacionais somente em 1989. A capacidade operacional inicial ocorreu em 1993 e a completa em 1995.

Já o termo GNSS, segundo Hein (2000 apud SEEBER, 2003), foi cunhado em 1991, ou seja, muito mais tarde que o surgimento do GPS. Ele foi criado pela Organização Internacional de Aviação Civil (ICAO) que reconheceu que o “sistema primário de navegação autônoma no século XXI” seria, a partir de então, fornecido pelo conjunto das constelações de satélites que compõem o Sistema de Navegação Global por Satélite.

Em 1980, o uso civil do GPS já tinha sido disponibilizado para aliados dos Estados Unidos, porém o termo “GNSS” ainda não havia sido criado (AYRES, 2008). Entretanto, quando o termo GNSS foi cunhado em 1991, o GPS passou a figurar somente como uma das constelações de satélite que formavam o GNSS. Como o GPS foi a primeira constelação de satélites a surgir – tendo surgido, inclusive, antes do termo “GNSS” – o próprio sistema GNSS é costumeiramente confundido, ou tomado como sinônimo do GPS (VETTORAZZI, 2016).

A Figura 4 logo a seguir é uma representação da constelação de satélites GPS e suas diferentes e, necessárias, órbitas.

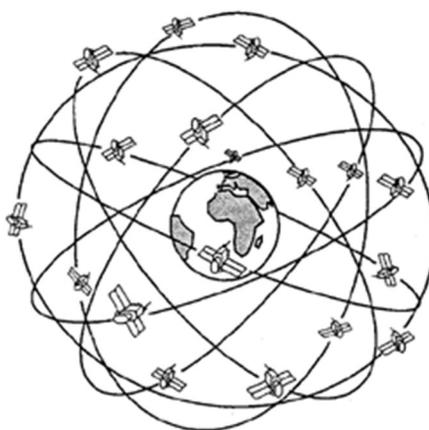


Figura 4– Constelação de satélites GPS.
Fonte: KILROY (1998)

De acordo com Parzzanini (2019), o método de navegação estadunidense GPS permitiu que posições fossem determinadas em três dimensões para pontos em qualquer parte do planeta

e em qualquer hora do dia, desde que acompanhado de um receptor na Terra capaz de captar os sinais emitidos pelos satélites em órbita.

Os satélites dispostos na constelação GPS são organizados em seis planos orbitais igualmente espaçados ao redor da Terra, onde cada plano possui quatro “posições” estrategicamente ocupadas pelos satélites. É exatamente este arranjo de, no mínimo, 24 satélites – ilustrado na Figura 4 anterior – que garante que receptores na terra possam captar pelo menos quatro satélites de praticamente qualquer ponto do planeta (GPS.ORG, 2020).

Isso representou enorme vantagem militar estadunidense frente a outros países, uma vez que possibilitou controlar informações precisas de posições e de tempo, de modo instantâneo, sobre toda a superfície do planeta.

Não por menos, a Rússia desenvolveu com certo atraso, em relação aos Estados Unidos, seu próprio sistema de localização e navegação por satélite, nomeado GLONASS - primeiro lançamento em 1982 e conclusão da primeira constelação em 1995 (EMBRAPA, 2013).

Assim, o GPS e o GLONASS foram as primeiras constelações de satélites globais a compor o sistema GNSS. Ressalta-se que o GNSS é um sistema que inclui mais do que apenas posicionamento baseado em satélite – ou seja, recurso já possibilitado inicialmente pelo GPS e pelo GLONASS. Outros recursos igualmente importantes, como a integridade, disponibilidade e continuidade do serviço também fazem parte do sistema GNSS. Devido ao inicial caráter predominantemente militar do GPS e do GLONASS, ambos apresentavam falhas no que se refere a estes três últimos recursos (SEEBER, 2003). Foi com o intuito de corrigir tais falhas que estes dois sistemas foram adaptados para o uso civil ao longo de seus desenvolvimentos.

A Figura 5 a seguir é um desenho de um satélite GPS do Projeto Bloco IIF:

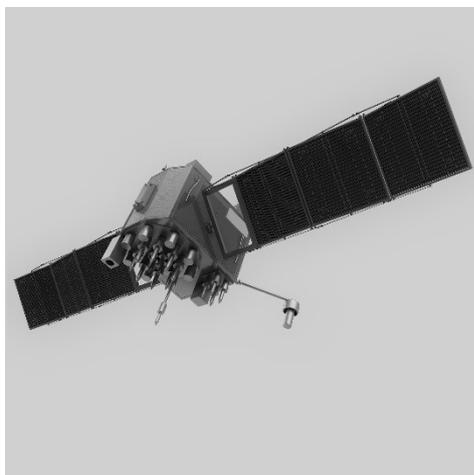


Figura 5 – Satélite GPS do Projeto Bloco IIF.
Fonte: FREE3D (S/d).

De acordo com o site oficial dos Estados Unidos sobre informações governamentais do Sistema de Posicionamento Global e tópicos relacionados³, a constelação GPS é, atualmente, uma mistura de satélites antigos e novos. A Tabela 1 a seguir é um resumo dos 31 satélites em plena capacidade operacional da constelação GPS em 20 de fevereiro de 2020 e serve como um parâmetro para avaliar como ocorre a evolução deste sistema:

Tipo (Série) Satélites	Quantidade em operação	Período de lançamento	Características
Bloco IIA Herdados	0	1990-1997	<ul style="list-style-type: none"> → Código de aquisição C/A na frequência L1 para usuários civis → Código P (Y) preciso nas frequências L1 e L2 para usuários militares → Vida útil do projeto de 7,5 anos
Bloco IIR Herdados	11	1997-2004	<ul style="list-style-type: none"> → Código C/A em L1 → Código P (Y) em L1 e L2 → Monitoramento do relógio a bordo Vida útil do projeto de 7,5 anos
Bloco IIR-M Modernos	7	2005-2009	<ul style="list-style-type: none"> → Inclui todos os sinais dos satélites herdados → 2° sinal civil em L2 (L2C) → Novos sinais de código militares para maior resistência a obstruções → Níveis de potência flexíveis para sinal militar → Segundo sinal civil em L2 (L2C) → Vida útil do projeto de 7,5 anos
Bloco IIF Modernos	12	2010-2016	<ul style="list-style-type: none"> → Inclui todos os sinais do bloco IIR-M Relógios atômicos avançados → Maior precisão, força do sinal e qualidade → 3° sinal civil na frequência L5 (L5) → Vida útil do projeto de 12 anos
GPS IIIF Modernos	1	2018	<ul style="list-style-type: none"> → Inclui todos os sinais do bloco IIF → 4° sinal civil em L1 (L1C) → Confiabilidade, precisão e integridade aprimoradas do sinal → IIIF: refletores a laser; carga útil de pesquisa e resgate → Sem disponibilidade selecionada → Vida útil de 15 anos

Tabela 1-Satélites GPS em operação em 20 de fevereiro de 2020
Fonte: GPS.ORG (2020).

O GLONASS também segue a mesma lógica de evolução e substituição de satélites obsoletos por satélites mais modernos.

De acordo com Jerez e Alves (2018), após um período de rápida degradação, em 2001 teve início um plano de metas que visava a modernização da constelação GLONASS, além do restabelecimento da cobertura global do mesmo – que foi perdida em função de problemas econômicos oriundos da queda do regime soviético.

³ GPS.ORG - Official U.S. Government Information About the Global Positioning System (GPS) and Related Topics (2020).

Ainda segundo Jerez e Alves (2018), novas gerações de satélites foram desenvolvidas, sendo a primeira delas a dos satélites GLONASS-M, posteriormente foram desenvolvidos os GLONASS-K1 e, atualmente, está em desenvolvimento a geração dos satélites GLONASS-K2.

Na Figura 6, segue um desenho da série de satélites russos GLONASS-M:

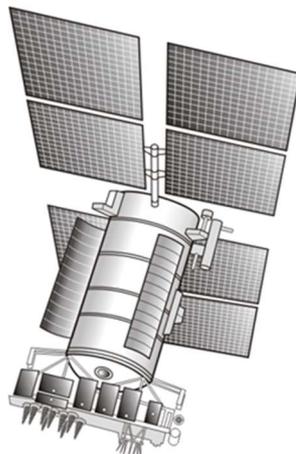


Figura 6– Satélite GLONASS-M.
Fonte: DUTTON (2018).

Os exemplos das constelações GPS e GLONASS demonstram parte da natureza e características desses tipos de sistemas de posicionamento, onde os satélites que compõem as constelações estão em constante evolução e substituição.

Com o surgimento de novas constelações além do GPS e do GLONASS, o sistema GNSS passou a se aperfeiçoar cada vez mais, pois o número de satélites em órbita aumentou consideravelmente, melhorando a distribuição geométrica espacial dos mesmos e, por consequência, melhorando a precisão do posicionamento e da navegação.

Segundo as empresas HEXAGON-NOVATEL, dentre as constelações que surgiram após o GPS/GLONASS, destacam-se:

- Sistema europeu GALILEO;
- Sistema chinês BeiDou / Compass;
- Sistema indiano IRNSS;
- Sistema japonês QZSS.

Observa-se que o sistema Galileo foi desenvolvido com um propósito estritamente civil (PARZZANINI, 2019). Já de acordo com Delazari (2012), uma de suas características é a interoperabilidade com os sistemas GPS e GLONASS, característica que permite a locação de

uma posição com o mesmo receptor tendo qualquer combinação de satélites disponíveis no momento. O grande número de satélites em combinação com a inclinação das órbitas possibilita uma cobertura mesmo em altas latitude. Para que isso ocorra, segundo a EMPRAPA (2013), os responsáveis pelo projeto Galileo, ou seja, a Agência Espacial Europeia – ESA, criaram um programa denominado EGNOS que vêm executando desde 1993 o aperfeiçoamento nos serviços oferecidos pelo GPS e GLONASS na Europa.

A Figura 7 a seguir mostra um dos satélites da constelação Galileo, chamado GIOVE-A, sendo acoplado ao nariz de um foguete:



Figura 7 – Satélite GIOVE-A embarcando em um foguete.
Fonte: ESA (2005)

Ainda segundo a EMBRAPA, o Galileo visa o aumento da acurácia dos dados enviados pelo conjunto dos sistemas em operação atuais, porém, a área de abrangência dos programas inclui apenas os estados Europeus, sendo que poderá ser estendida a outras regiões no futuro.

De todas as constelações GNSS citadas acima, as que estão totalmente operacionais, até a data deste trabalho de pesquisa, são o GPS, o GLONASS e o BeiDou. Os outros estão em vias de alcançar sua capacidade operacional⁴ (HEXAGON-NOVATEL, 2020).

⁴ A Capacidade operacional está ligada ao objetivo de uma constelação de prover cobertura diária inicial e, posteriormente, mundial, ao operar em qualquer condição atmosférica, e uma determinar posição 3D e velocidade de qualquer objeto sobre a superfície da Terra, utilizando apenas um receptor (PAIVA, 2004)

2.2.1 *Segmento de controle*

O segmento de controle GNSS são estações monitoras espalhadas estrategicamente na superfície do planeta com o objetivo de manter atualizada a mensagem de navegação dos satélites.

De acordo com Vaz (2015) o segmento de controle é responsável pelo monitoramento dos sistemas de satélites e do tempo GNSS, pela predição dos elementos orbitais e pela atualização periódica da mensagem de navegação.

Já de acordo com Lago et al. (2002), o segmento de controle é responsável pela operação de cada sistema (das constelações disponíveis), e sua finalidade é:

“...monitorar o comportamento dos osciladores atômicos e as condições operacionais dos satélites, determinar suas órbitas e transmitir aos satélites as mensagens que eles transmitirão posteriormente aos usuários. Este segmento é composto por estações terrestres, bem distribuídas geograficamente, nas quais se realiza o rastreamento de todos os satélites disponíveis.” (LAGO, et al. 2002, p. 3).

Observa-se que cada constelação possui um sistema de controle próprio. Por exemplo, o segmento de controle dos Estados Unidos (GPS) é constituído por 5 estações principais de controle, sendo uma central no Estado do Colorado (Oliveira, 2011). Já o segmento de controle do GLONASS está localizado na cidade de Moscou e as estações de monitoramento estão distribuídas, em sua maioria, no território da antiga União Soviética e, atualmente, estão sendo expandidas para outros países (JEREZ; ALVES, 2018).

Em relação ao segmento de controle, Seeber (2003) observa:

“O problema de posicionamento pode ser tratado dinamicamente e geometricamente. Na abordagem geométrica pura, os satélites são considerados como alvos em órbitas muito altas. O requisito mais importante é que o mesmo satélite possa ser observado simultaneamente a partir do maior número possível de estações terrestres. Essas observações podem ser usadas para estabelecer redes regionais e globais de triangulação e trilateração de satélites espaciais”. (SEEBER, 2003, p. 507).

Atenta-se, assim, para o conceito de “efemérides transmitidas”, que estão presentes em todas as constelações GNSS. Vaz (2015) as define como parâmetros para a predição da posição do satélite em uma órbita. Esses parâmetros são recebidos em poucos segundos, momento em

que o satélite transmite diversos dados relativos ao tempo, as órbitas e a saúde dos satélites, e também da ionosfera.

A Figura 8 a seguir mostra o segmento de controle do método estadunidense GPS e suas principais estações na Terra:



Figura 8 – Estações de controle GPS.
Fonte: GPS.ORG (2018)

As coordenadas dos satélites obtidas pelas efemérides transmitidas são um fator importante, uma vez que os satélites são instrumentos móveis que estão em constante movimento. Há dois tipos de efemérides: as “transmitidas”, que são obtidas durante o rastreamento juntamente com a pseudodistância e a fase da onda portadora; e as “precisas”, que são pós-processadas de acordo com criteriosas metodologias por órgãos públicos ou internacionais de monitoramento a fim de atender usuários que necessitam de maior precisão (estas podem ser requeridas e obtidas via internet) (PARZZANINI, 2019).

2.3 Características e fundamentos técnicos do GNSS

Cada constelação de satélites existente atualmente possui em média 30 satélites posicionados em diferentes planos orbitais com inclinações específicas em graus, e com um número também específico de satélites em cada um desses planos – variando de quatro a oito satélites por plano orbital. A altura média da órbita de cada constelação é de 20.000 km, sendo

que o período orbital⁵ para cada uma delas é variável de 12 a 14 horas. Este arranjo é proposital de modo a permitir que quatro satélites, no mínimo, sejam visíveis em qualquer local da superfície terrestre e em qualquer hora do dia. Isto não é mera coincidência, visto que para um receptor GNSS determinar uma posição é necessário, no mínimo, a visualização de 04 (quatro) satélites (PARZZANINI, 2019).

A função dos satélites é basicamente transmitir dados. Isto é feito medindo-se a distância entre o receptor e o satélite, ou, no caso do GNSS, medindo a distância para vários satélites. Como as coordenadas dos satélites são conhecidas, é possível determinar a posição de uma estação na terra, no ar ou no mar (TV UNESP, 2017).

Conceitos fundamentais da mecânica clássica, como a fórmula da velocidade e da distância são uma das bases iniciais de entendimento dos sinais transmitidos pelos satélites. Assim, segundo a empresa NovAtel (2017), a habilidade para se determinar uma posição com precisão milimétrica em qualquer lugar do planeta Terra começa com uma fórmula matemática muito simples:

$$\text{Velocidade} = \frac{\text{Distância}}{\text{Tempo}} \quad \rightarrow \quad \text{Distância} = \text{Velocidade} \times \text{Tempo} \quad (\text{Equação 1})$$

Estas fórmulas são importantes, pois o tempo de trânsito que um sinal de GNSS leva para viajar dos satélites até os receptores é usado para determinar as distâncias dos satélites. Basicamente, sabe-se que para se calcular uma posição qualquer, deve-se primeiro medir a distância.

De acordo com Molin (2010), o receptor GNSS irá medir o tempo gasto para que a onda chegue até ele; isto é, um tempo será gasto para que a velocidade da luz percorra a distância entre o satélite e o receptor.

Contudo, este princípio, embora importante, ainda não é suficiente para se alcançar o nível de precisão e acurácia disponibilizado pelo método GNSS.

⁵ Período orbital é o intervalo de tempo que o satélite leva para executar uma órbita completa em torno do planeta Terra (CREF, S/d).

2.3.1 A importância dos sinais transmitidos

Sinais de GNSS que transitam entre satélites e receptores são feitos por ondas de rádio capazes de propagar-se no vácuo na velocidade da luz (HELERBROCK, s/d).

A geodésia operacional do satélite é baseada em dados transmitidos do satélite para o usuário por meio de ondas eletromagnéticas, que, por sua vez, são geradas por uma força elétrica oscilante (alternada). Já a propagação das ondas eletromagnética está em conformidade com as leis de Maxwell (HOFMANN-WELLNHOF et al., 2001).

De acordo com Balan (s/d), ondas eletromagnéticas (conhecidas como ondas de rádio) são um fenômeno natural que o homem aprendeu a manipular. A natureza, por sua vez, possui a propriedade de transportar frequências na forma destas ondas eletromagnéticas. Assim, diferentes frequências foram divididas e aproveitadas de acordo com suas características para cada tipo de aplicação. Essa divisão é conhecida como o “espectro de frequências” ou “faixas de frequências”.

A unidade de medida das frequências eletromagnéticas, ou seja, das ondas de rádio, são dadas em Hertz, em homenagem ao físico alemão Heinrich Rudolph Hertz. Sendo que um (01) Hertz é igual a um ciclo, ou uma oscilação por segundo (ALTMAN, 2010).

Ainda segundo Balan, as aplicações mais comuns do dia a dia dentre as várias divisões do espectro de frequências, estão as emissoras de rádio e televisão, assim como a telefonia – ambas na faixa de frequência MHz (Mega-Hertz). Já no sistema de satélites, os sinais são derivados a partir de uma faixa de frequência em GHz (Giga-Hertz) gerada por um relógio atômico localizado no satélite.

É importante lembrar aqui que são exatamente esses sinais emitidos pelos satélites e recebidos na Terra que transmitem os dados necessários para a medição das distâncias e do tempo e, por consequência, o correto estabelecimento de coordenadas.

Por exemplo, no caso do GPS, Zanotta et al. (2011) considera seu princípio de funcionamento relativamente simples:

“Cada um dos 24 satélites componentes do sistema transmite continuamente um sinal de rádio (onda eletromagnética) que contém informações sobre a sua posição orbital, vinculado à um referencial geodésico, e o tempo marcado por seu relógio atômico interno. Um receptor GPS localizado na terra recebe informações de, no mínimo, quatro satélites diferentes e usa esses dados para calcular sua posição no planeta”. (ZANOTTA et al., 2011, s. pág.).

Ainda tomando como exemplo a estrutura dos sinais do método estadunidense GPS, que é baseada, de acordo com Parzzanini (2019), em uma frequência de 10,23 MHz gerados por um relógio atômico. De acordo com Pereira (2010), cada satélite transmite diversas frequências, entre elas: L1 equivalente a um comprimento de onda de 19,05 cm e L2 equivalente a um comprimento de onda de 24,45 cm, derivadas da seguinte frequência fundamental:

$$L1 = 10,23 \times 154 = 1.575,42 \text{ MHz} - \text{comprimento de onda} \cong 19,0425 \text{ cm}$$

$$L2 = 10,23 \times 120 = 1.227,60 \text{ MHz} - \text{comprimento de onda} \cong 24,4374 \text{ cm}$$

Hofmann-Wellenhof et al. (2001) ressaltam que essas frequências duplas são essenciais para eliminar uma das principais fontes de erro, ou seja, a refração ionosférica.

Molin (2010) observa que a banda L1 carrega dois códigos: “Coarse/Acquisition” (C/A) e código Preciso (P). Já a banda L2, possui apenas o código P, que era restrito apenas por aparelhos militares – disponível, atualmente, também para aparelhos civis. Ainda segundo Molin, o código C/A é o sinal “livre” conhecido como Serviço de posicionamento Padrão (PPS).

Os padrões de frequência variam de constelação para constelação. Algumas frequências, por exemplo, do GPS ainda são exclusivas para o uso militar e outras para o uso civil.

2.3.2 Relógios atômicos e o método relativístico da precisão

De acordo com Tuboy *et al.* (2009), relógios baseados em certas propriedades dos átomos, conhecidos como relógios atômicos, surgiram da necessidade de medir o tempo com maior precisão quando comparado com a tecnologia anterior, isto é, de relógios osciladores de quartzo. Estes últimos já não atendiam aos requisitos técnicos de tempo e frequência exigidos pelos sistemas de posicionamento global. Ainda segundo Tuboy, um dos mais importantes usos dos relógios atômicos ocorre nos sistemas de navegação, que, por sua vez, se baseiam em técnicas de rádio:

“Emissores de localização bem conhecida emitem sinais codificados e exatamente sincronizados. Em qualquer ponto da superfície da Terra, um receptor capta tais sinais e mede a diferença de chegada de cada um deles. Tendo essas informações é fácil determinar, por triangulação via satélite e com margem de erro de poucos metros, a posição do receptor. Essa é a base de funcionamento de sistemas como o de

posicionamento global GPS. O relógio atômico é fundamental nesses sistemas, pois é a única maneira de medir diferenças de tempo tão precisas para localizar o receptor”. (TUBOY, 2009, s. pág.).

Para se ter ideia do nível de precisão envolvido em uma operação do método GNSS, Silveira (2008) afirma que “um microssegundo de dessincronização entre um relógio atômico de um satélite e do relógio de quartzo de um receptor resultam num erro de distância da ordem de 300 metros”. Assim, um atraso de 10 nanossegundos no relógio do satélite resulta em um erro de 3 metros na posição calculada pelo receptor, onde 1 nanossegundo corresponde a 1 bilionésimo de segundo, ou seja, divide-se 1 segundo por 1.000.000.000, ou ainda, 1 nanossegundo = 0,000000001 ou 10^{-9} (DI, 2018). Relógios atômicos da atualidade precisariam de milhões de anos para atrasar um segundo.

A seguir, a Figura 9 mostra um exemplar de um relógio atômico do método GPS desenvolvido pela Administração Nacional do Espaço e da Aeronáutica dos Estados Unidos – NASA:



Figura 9 – Relógio atômico GPS.
Fonte: HARBAUGH (2018)

De acordo com Molin (2010), a aferição do tempo é quase perfeita a bordo de cada satélite justamente porque cada um contém a tecnologia de um relógio atômico. Entretanto, para manter o sistema GNSS barato, uma vez que relógios atômicos são muito caros, os receptores usados por operadores na Terra são feitos necessariamente com um relógio de quartzo, porém, são muito menos precisos quando comparados com um relógio atômico.

Zanotta et al. (2011) atenta para o fato de que os relógios de quartzo, embora muito menos precisos que um relógio atômico, são muito precisos quando comparados com relógios da tecnologia anterior do começo do século XX, que, por sua vez, eram baseados no balanço de um pêndulo. Contudo, mesmo com essa precisão, estes relógios não eram suficientes para alcançar o nível de acurácia necessário para o correto funcionamento dos satélites GNSS. Ainda segundo Zanotta, a descoberta do relógio atômico resolveu este problema:

“Mesmo contando com essa precisão, no entanto, ainda não era suficiente para os cientistas que buscavam estudar os efeitos da Teoria da Relatividade. A única maneira de fazer medições do tempo na escala de precisão necessária era controlando as oscilações ocorridas no átomo, assim, surgiram os relógios atômicos”. (ZANOTTA et al., 2011, s. pág.).

A Figura a seguir 10 é uma ilustração do princípio básico na determinação de uma posição com o uso de satélites e receptores, ou seja, pelo método GNSS (onde R significa “range”, tradução livre de “alcance”, que neste caso, se refere a “distância”):

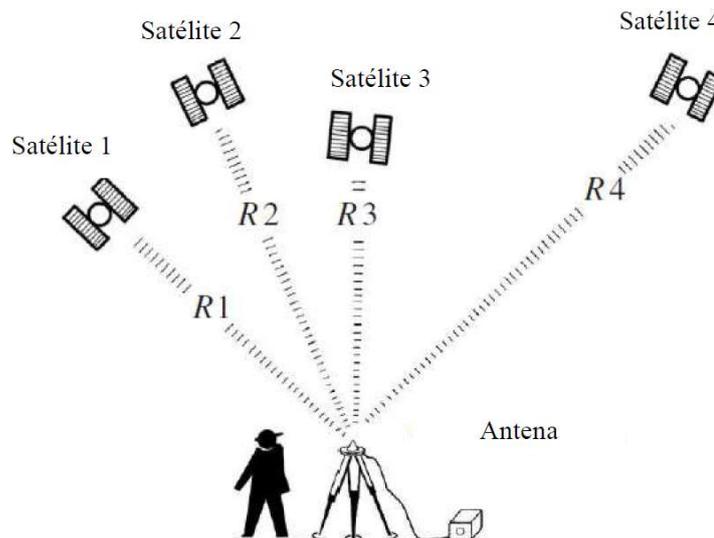


Figura 10 – Princípio básico do método GNSS.
Fonte: Adaptado de SEEBER (2003).

Ainda de acordo com Molin (2010), a sincronia dos diferentes relógios de satélites e receptores ocorre de acordo com a seguinte dinâmica:

“Se três medidas perfeitas podem identificar um ponto no espaço tridimensional, então quatro medidas imperfeitas podem fazer o mesmo. A quarta mensuração permite identificar a posição do receptor na superfície de uma quarta esfera que, quando alinhada com as outras três esferas para produzir uma intersecção quádrupla,

determina a exata correção de tempo necessária. Esse fator de correção coloca o relógio barato instalado no receptor em sincronia com os relógios atômicos a bordo dos satélites”. (MOLIN, 2010, p. 12).

Com isso, Junior (2010) complementa que a visibilidade de pelos menos 4 satélites (tridimensional) – isto é, 3 para a determinação da posição (bidimensional) e 1 para o problema do sincronismo dos relógios – é uma das condições mínimas para o posicionamento por satélite.

Para se obter dados de posição e de tempo minimamente precisos, é necessário saber o comprimento (distância) exato e direto do caminho entre o satélite e o equipamento – neste caso, um receptor GNSS, e o tempo é um fator fundamental neste processo.

Ao obter os dados das distâncias, é possível descobrir a posição de um ponto por um cálculo conhecido como trilateração:

“... termo usado na área da topografia e de sistemas de navegação por satélite para indicar o processo como são efetuados os cálculos de posicionamento. O cálculo por trilateração faz-se através de três pontos de referência que indicarão a posição exata de um referente no espaço” (FLIP, 2005, s. pág.).

Neste contexto, Monico (2008) destaca os dois principais conceitos do GNSS que permitem determinar a posição, velocidade e tempo: a pseudodistância a partir do código e a fase da onda portadora ou diferença de fase da onda portadora.

2.3.3 As observáveis GNSS

De acordo com Segantine (2005 apud SILVEIRA, 2008), os dados observados no método GNSS são deduzidos a partir da medição do tempo de percurso ou da diferença de fase entre os sinais recebidos dos satélites e os gerados pelos receptores. Esses “dados observados” são conhecidos como “observáveis GNSS” e os dois principais são: a pseudodistância e a fase da onda portadora.

2.3.3.1 Pseudodistância através do código

Seeber (2003) define pseudodistância como um “pseudo-faixa” de medições de código igual à mudança de tempo necessária para correlacionar a sequência de código recebida com uma sequência de código gerada no receptor GPS, multiplicada pela velocidade da luz. Ainda segundo Seeber:

O princípio básico da navegação é baseado na medição das chamadas “pseudodistâncias” entre o usuário e os quatro satélites. Partindo das coordenadas conhecidas do satélite em um quadro de referência adequado, as coordenadas da antena do usuário podem ser determinadas do ponto de vista geométrico, onde três medidas de faixa são suficientes. Uma quarta observação é necessária porque o GPS usa a técnica de alcance unidirecional e o relógio do receptor não é sincronizado com o relógio do satélite. Este erro de sincronização é o motivo do termo "pseudo-faixa" (SEEBER, 2003, p. 211).

Já segundo Parzzanini (2019), a pseudodistância nada mais é do que a distância entre o receptor e o satélite e essa distância é calculada com base no tempo de trânsito do sinal entre os dois. Ainda segundo Parzzanini:

O tempo de trânsito (Δt) é obtido mediante comparação entre o código recebido do satélite e uma réplica desde, gerada no receptor. A defasagem entre os dois códigos (o recebido e o gerado no receptor), possibilita determinar o tempo de trânsito do sinal transmitido pelo satélite, que multiplicado pela velocidade da luz, fornece a pseudodistância (PARZZANINI, 2019, p.13).

Segundo Monico (2011), a pseudodistância é identificada como medida do código, em razão do processo de correlação do código utilizado na realização da medida. A precisão medida fica na ordem métrica – ou seja, somente ela seria insuficiente para o nível de precisão do método GNSS quando se trata de trabalhos extremamente precisos.

Peroni (2004) descreve de maneira sucinta como cientistas fizeram para saber quando o sinal partiu do satélite:

O grande truque para medir o tempo de viagem do sinal de rádio é saber exatamente quando o sinal partiu do satélite. Para conseguir isto, os projetistas do GPS apareceram com uma ideia inteligente: sincronizar os receptores e os satélites de modo que

estejam gerando o mesmo código exatamente ao mesmo tempo. Então tudo que necessitamos fazer é receber os códigos do satélite e então olhar para ver quanto tempo trás nosso receptor gerou o mesmo código. Esta diferença de tempo significa quanto tempo o sinal levou para chegar até nós (PERONI, 2004, p. 18).

Monico (2008) ressalta que as coordenadas do receptor e do satélite estão implícitas na distância geométrica. Qualquer termo modelado incorretamente resultará em erros nas coordenadas do receptor.

A Figura 11 a seguir é uma representação de como um receptor, neste caso, de uma estação base, mede sua distância de um satélite (ou seja, distância nomeada como pseudo-faixa ou pseudodistância), tornando possível o cálculo do erro. Este erro é chamado de correção diferencial:

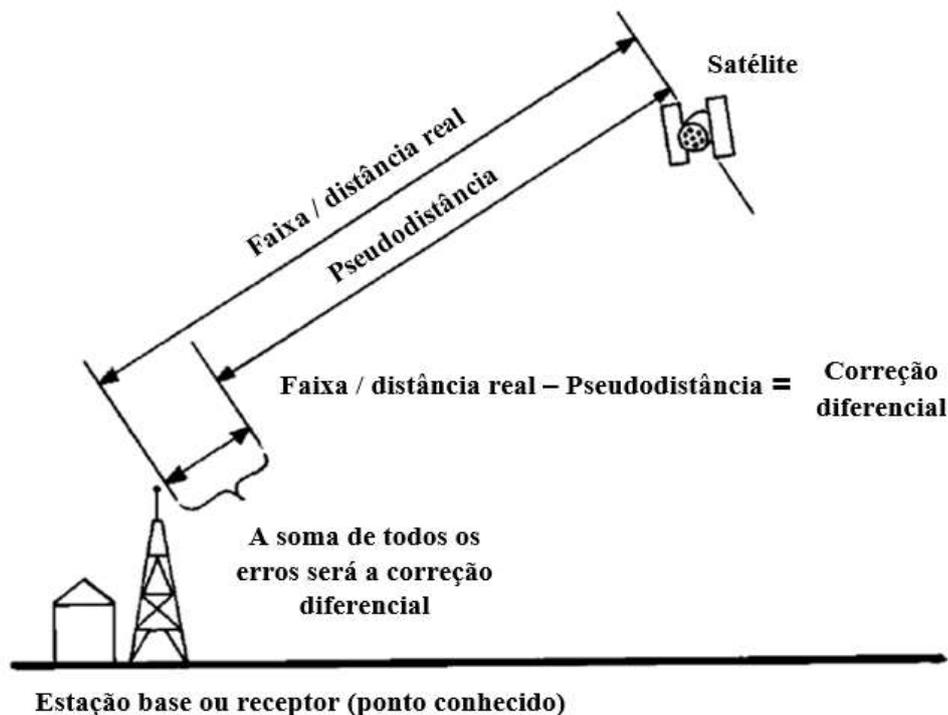


Figura 11– A dinâmica da pseudodistância.
Fonte: Adaptado de PFOST (1998).

De acordo com Blitzkonw e Sá (1985 apud PEREIRA, 2010) a modulação em fase da pseudodistância é feita em através de uma sequência de valores binários +1 e -1 ou 0, e aparentam ter um caráter aleatório, mas são perfeitamente identificados pelo receptor.

Como já descrito anteriormente, medidas de tempo acuradas são fundamentais para o sistema GNSS. Assim, para Cararo et al. (2010), em virtude do alto desempenho e acurácia dos relógios atômicos a bordo dos satélites, medidas de pseudodistância podem ser efetuadas na

ordem de nanosegundos – com precisão na ordem métrica – e a fase da onda portadora no nível dos centímetros/milímetros.

2.3.3.2 Fase da onda portadora

Muito embora as medidas calculadas pela pseudodistância sejam importantes e, de fato, utilizadas no método GNSS, para se obter um posicionamento refinado de alta acurácia e precisão (em milímetros), a observável fundamental é a “fase da onda portadora”. Esta última permite que a distância seja determinada através da contagem do número de ciclos existente entre o satélite e o receptor (Monico, 2011). Seu conceito e sua aplicação são bem mais elaborados quando comparados com a pseudodistância, pois envolvem avançados algoritmos.

Como já discutido, sabe-se que 1 Hertz (Hz) é um ciclo por segundo, sendo que os sinais dos satélites utilizam faixas de frequências em giga-hertz (GHz). Por exemplo as portadoras L1 e L2 das constelações GPS e GLONASS são moduladas em fase e giram em torno de mil mega-hertz (onde 1 giga-hertz = 1000 mega-hertz) (Parzzanini, 2019).

Vaz (2015), define a onda portadora como um sinal caracterizado por três variáveis: amplitude, frequência e fase – e, é exatamente essa sequência que compõe um ciclo (frequência) para a fase da onda portadora. Ainda segundo Vaz, a modulação é a modificação (perturbação) de uma onda portadora, antes de ser irradiada, feito de modo que as informações ou dados possam ser transportados.

De acordo com Figueirêdo (2005), ao modelar as diferenças de fase, obtém-se o número inteiro de comprimento de onda entre o satélite e o receptor. Este número é conhecido por ambiguidade inteira. Ainda segundo Figueirêdo:

Obviamente a distância exata do satélite ao receptor, não necessariamente terá um número inteiro de comprimento de onda, poderá existir uma fração de comprimento de onda, que é determinada por meio da diferença de fase. Adicionando o número inteiro à fração de comprimento de onda, e multiplicando esta soma pelo respectivo comprimento de onda da portadora, determina-se então a *verdadeira distância* (r), entre o receptor e o satélite a cada instante (FIGUEIRÊDO, 2005, p.27).

A Figura 12 a seguir é uma representação do sinal da fase da onda portadora, onde N é a ambiguidade:

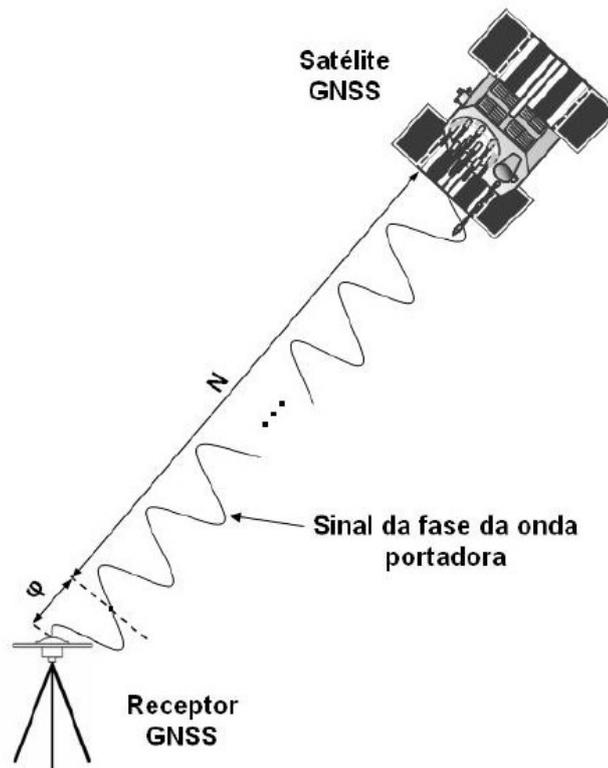


Figura 12 – Fase da onda portadora.
 Fonte: MONICO (2008)

A modulação, de acordo com Zanotta et al. (2011) consiste em modificar um sinal eletromagnético de forma que este transporte informações, que no caso são os dados de posição e tempo do satélite no momento em que o sinal é emitido.

“O receptor armazena o tempo medido no seu próprio relógio interno e os valores de tempo registrados pelos relógios internos de cada satélite no momento do envio da onda portadora. Isso permite calcular a sua distância linear até cada um dos satélites a partir da subtração dos tempos. Sabendo que as ondas de radiofrequência viajam à velocidade da luz (aproximadamente 3×10^8 m/s), se o receptor registrou uma diferença de um centésimo de segundo (1×10^{-2} s) entre o valor do seu relógio e o relógio do satélite, significa que a onda eletromagnética demorou esse tempo para se deslocar até a antena do receptor. Aplicando-se a equação $\Delta S = Vm \cdot \Delta t.$, conclui-se que a distância entre o satélite e o receptor no momento da emissão da onda era de 3×10^6 m ou 3.000 km”. (ZANOTTA et al. 2011, s. pág.).

A figura 13 a seguir é um exemplo da estrutura de sinais emitidos pelo método GPS. Nota-se que as duas observáveis estão presentes neste tipo de modulação em fase.

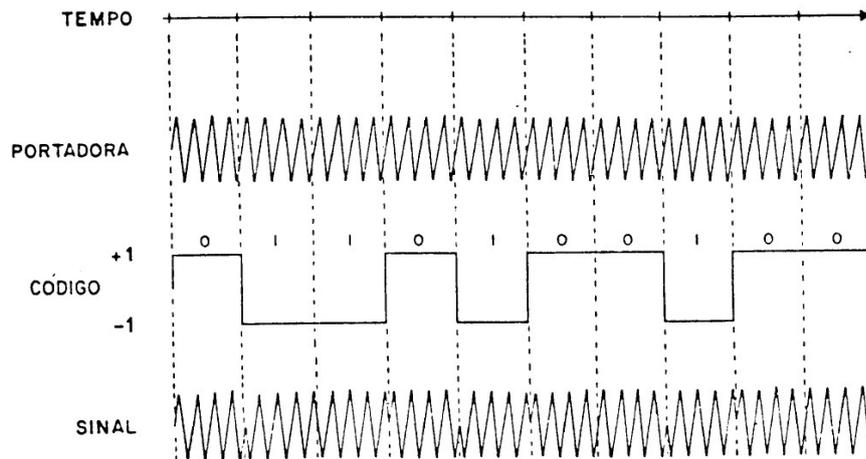


Figura 13– Modulação em fase.
Fonte: JUNIOR (2010).

Na prática, porém, nem todos os métodos de posicionamento usarão as duas observáveis ao mesmo tempo. Isso é estabelecido de acordo com o critério do trabalho a ser realizado.

Pereira (2010) observa que, além dos códigos e algoritmos envolvidos neste tipo de modulação, também são moduladas uma sequência de dados, de baixa frequência, de 50 bps, que contém a mensagem de navegação do satélite.

Dutton (2018) destaca que, atualmente, os algoritmos necessários que obtém alta precisão, característica da faixa da onda portadora, podem ser simplificados, uma vez que a maioria dos novos sinais GNSS carregam um código voltado para o uso civil. De modo geral, a correlação do código é um problema mais direto do que a diferenciação da portadora. Isso pode levar a receptores geodésicos menos complicados e, eventualmente, fazer com que estes tipos de equipamento sejam barateados.

Segundo Leick (2004 apud SILVERIA, 2008) a fase da onda portadora e a pseudodistância são um dos erros inerentes ao receptor e do multicaminhamento. Em outras palavras, Seeber (2003) destaca que a propagação multicaminho, ou seja, efeito que reflete os sinais emitidos pelos satélites, afeta diretamente tanto a pseudodistância quanto a fase da onda portadora. Este conceito será melhor explicado a frente.

Trabalhos rotineiros de topografia e de atividades geodésicas há a necessidade de se alcançar maior acurácia. Desta forma, a aplicação da fase da onda portadora é elementar, por exemplo, para técnicas como a do “Posicionamento Cinemático em Tempo Real” – conhecido como RTK – e do “Posicionamento por Ponto Preciso” – conhecido como PPP (NOVATEL, 2015; PARZZANINI, 2019).

2.4 Métodos e procedimentos GNSS

2.4.1 Posicionamentos absolutos e relativos

No ano de 2013, o INCRA lançou a 1ª edição do “Manual Técnico de Posicionamento para Georreferenciamento de Imóveis Rurais”. Além de estabelecer parâmetros para o uso da topografia clássica, este manual reconheceu alguns dos melhores métodos de posicionamento por GNSS.

Segundo Monico (2008), posicionamento, neste contexto, diz respeito à determinação da posição de objetos com relação a um referencial específico. Assim, pode ser classificado em:

“...posicionamento absoluto, quando as coordenadas estão associadas diretamente ao geocentro, e relativo, no caso em que as coordenadas são determinadas com relação a um referencial materializado por um ou mais vértices com coordenadas conhecidas” (MONICO, 2008, p. 279).

Ainda segundo Monico, o objetivo a ser posicionado pode estar em repouso ou em movimento, o que gera um complemento à classificação com respeito ao referencial adotado. No primeiro caso, trata-se do posicionamento estático, enquanto no segundo, do tipo cinemático. Já na utilização do posicionamento GNSS:

“...independente do estado do objeto, ele pode ser realizado pelos métodos absoluto e relativo. Pode-se ainda usar, no contexto do posicionamento por satélite, o método denominado DGPS (*Differential GPS*), muito empregado na navegação (...). Logo, pode-se ter posicionamento absoluto estático ou posicionamento absoluto cinemático. A mesma classificação pode ser feita em relação ao posicionamento relativo e quanto ao DGPS.” (MONICO, 2008, p. 279).

Na prática, de acordo com Oliveira (2011), o posicionamento relativo é pós-processado e necessita de um receptor alocado em uma coordenada conhecida e outro receptor em movimento. Neste caso, utiliza-se além do código C/A, as portadoras L1 e L2, porém consegue-se uma precisão na ordem dos milímetros (pode-se alcançar, dependendo das condições até ~ 1 mm). Segundo Vaz (2015), o método relativo estático usa um receptor estático e uma base (estação de referência). Hoffmann-Wellenhof et al. (2001) destaca ainda que quando se trata de

alta precisão, levantamentos pelo método GNSS implicam a medição precisa do vetor entre dois (ou mais) receptores.

A Figura 14 a seguir demonstra como é feito o posicionamento relativo – (o posicionamento absoluto está demonstrado na Figura 10 acima):

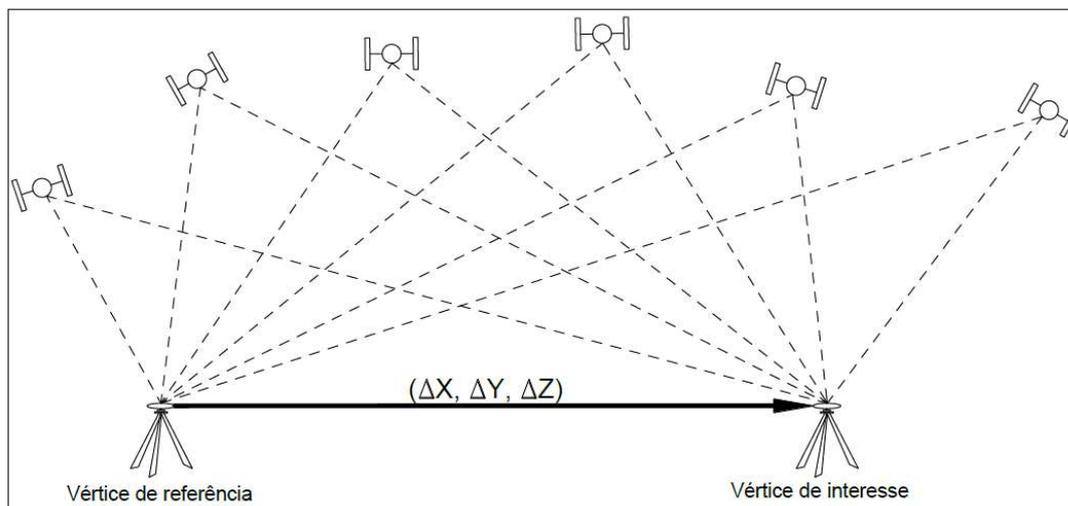


Figura 14– Posicionamento relativo GNSS
Fonte: INCRA (2013)

Ainda de acordo com Oliveira (2011), o posicionamento absoluto usa apenas um receptor e obtém as coordenadas em tempo real, além de utilizar o código C/A (de menor precisão). A precisão Horizontal/Vertical varia de 10 a 30 metros. Segundo Vaz (2015) o posicionamento absoluto é uma técnica de observação (rastreamento) realizada por apenas um receptor – parado (estático) ou em movimento (cinemático) – seja um popular “GPS de navegação”, seja por um GNSS topográfico. Já Parzzanini (2019) ressalta que este é um método empregado para navegação de baixa precisão em levantamentos expeditos. Por exemplo, este método é o utilizado em aplicativos de *smartphones* como o *Google Maps*, *Waze*, entre outros.

Sabe-se, assim, que o método de posicionamento relativo é mais preciso, e, por sua vez, será o método mais adequado para a análise proposta neste Trabalho de Conclusão de Curso. Isto é, sua precisão é adequada para trabalhos de engenharia – que exigem níveis de precisões na ordem dos centímetros ou milímetros, além de alta acurácia. Não é à toa que os tipos de posicionamento por GNSS previstos pelo INCRA são, em sua maioria, posicionamentos relativos, ou os que somente consideram precisões refinadas que contemplam a observável da fase da onda portadora – presentes, por exemplo, nos métodos RTK e o PPP.

2.4.2 Alguns tipos de posicionamento relativo

De acordo como o INCRA (2013), no posicionamento relativo, as coordenadas do vértice de interesse são determinadas a partir de um ou mais vértices de coordenadas conhecidas. Alguns dos principais métodos de posicionamento GNSS estão previstos pelo INCRA (2013). São eles:

- Posicionamento relativo estático;
- Posicionamento relativo estático-rápido;
- Posicionamento relativo semicinemático (*stop and go*);
- Posicionamento relativo cinemático;
- Posicionamento relativo a partir do código C/A;
- RTK convencional;
- RTK em rede;
- *Differential GPS (DGPS)*;
- Posicionamento por ponto preciso (PPP).

Sabe-se que cada tipo de posicionamento tem um propósito e é escolhido e adequado para cada tipo de trabalho específico. Assim, este trabalho contemplará somente dois dos métodos descritos acima, uma vez que se encaixam para o tipo de experimento proposto neste trabalho.

2.4.3 Posicionamentos relativo estático e relativo estático rápido

Para Hoffman-Wellenhof et al. (2001), o posicionamento estático feito pela fase da onda portadora é a técnica de posicionamento mais precisa e a mais utilizada pelos topógrafos e agrimensores – também é chamada de levantamento estático:

Esta técnica visa a determinação do vetor (geralmente chamado de linha base) entre dois receptores estacionários. Porém, é preciso distinguir entre a determinação da linha base como sendo única ou multiponto. Obviamente, a solução multiponto envolve mais de dois lugares. No levantamento estático, é possível obter precisões de 1 ppm a 0,1 ppm (ou até melhor). Isso é equivalente à precisão milimétrica para linhas

de base por volta de alguns quilômetros. (HOFMANN-WELLENHOF et al. 2001, p. 135).

Já de acordo com Rosa (2008), a ideia de posicionamento relativo surgiu depois do lançamento dos primeiros satélites e até então tem sido um método dominante, por apresentar resultados muito bons, simplificando de maneira considerável os modelos, em razão da diferenciação das observações.

Monico (2008) ressalta que o rastreamento neste tipo de posicionamento pode variar de dezenas de minutos (20 minutos no mínimo) até algumas horas. Já casos envolvendo períodos menores que 20 minutos de rastreamento são tratados como método relativo estático rápido.

Ainda segundo Monico, o posicionamento relativo estático rápido segue, em linhas gerais, o mesmo princípio que o posicionamento estático. A utilização deste método é propícia para levantamentos em que se deseja alta produtividade em condições específicas.

Assim, os métodos de posicionamento estão diretamente relacionados com a escolha dos tipos de equipamentos usados, neste caso, os receptores GNSS.

2.5 Segmento do usuário

Atualmente, os receptores GNSS são usados rotineiramente para realizar toda sorte de pesquisas e de controles terrestres e geodésicos. Topógrafos, Cartógrafos e Agrimensores normalmente usam receptores para diversos tipos de trabalhos, principalmente para o controle de solo e auxílio, muitas vezes indispensáveis, para o mapeamento (HOFMANN-WELLENHOF et al. 2001).

Seeber (2003) destaca que a escolha de receptores adequados é essencial para captar sinais GNSS para fins de navegação e/ou posicionamento. Equipamentos antigos de usuário são frequentemente substituídos por equipamentos novos e o número de fabricantes cresce a cada dia, tornando inviável relacionar todas as marcas e modelos em um livro e, neste caso, neste trabalho.

Assim, vale ressaltar apenas as composições genéricas comuns a todos os receptores. Vaz (2015) e Langendolff e Pellegrini (2008) relacionam a composição de um receptor como: antena com pré-amplificador; seção de rádio frequência (para identificação e processamento do sinal); microprocessador (para controle do receptor, amostragem e processamento dos dados); provisão de energia (bateria); memória (para armazenar os dados coletados); uma interface

entre o usuário e o receptor (como painel de exibição de dados e comandos de operação, que permitem a configuração do receptor antes dos levantamentos) e; um oscilador para gerar uma frequência intermediária do sinal (relógio de quartzo).

Para Oliveira 2011, o segmento de usuários é mais amplo e refere-se a tudo que diz respeito a comunidade usuária do GNSS, seja civil e/ou militar, como: receptores, programas de processamento, métodos e técnicas de levantamentos.

O experimento proposto neste trabalho contará com um receptor GNSS e dois softwares, um de processamento dos dados coletados e outro para análise de erro.

2.5.1 Alguns modelos de receptores GNSS

Todos os receptores relacionados abaixo foram pesquisados nos sites das empresas de suas marcas respectivas em 12 de maio de 2020, ou seja, são modelos em pleno uso nesta data de pesquisa e de elaboração deste trabalho.

- Receptor GNSS – Marca: TOPCON – Modelo: Hiper VR.



Figura 15– Receptor TOPCON Hiper VR.
Fonte: TOPCON (2019)

Nota-se que este receptor tem disponibilidade para rastrear e receber dados de qualquer satélite GNSS (observáveis), de qualquer constelação.

Por exemplo, sua precisão RTK horizontal em movimento é de $5\text{mm} + 0.5\text{ ppm}$ e vertical de $10\text{ mm} + 0.8\text{ ppm}$. Já sua precisão pós processado horizontal é de $3,0\text{mm} + 0.1\text{ ppm}$ e vertical de $3,5\text{mm} + 0.4\text{ ppm}$. (TOPCON, 2019).

- Receptor GNSS – Marca: TRIMBLE – Modelo: R8s



Figura 16– Receptor Trimble R8s
Fonte: TRIMBLE (2020).

Este receptor também é capaz de rastrear a maior parte das constelações GNSS, como GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou e QZSS e possui precisão máxima de 8mm horizontal e 15 mm vertical (TRIMBLE, 2020).

- Receptor GNSS – Marca: CHC – Modelo: i80



Figura 17– Receptor CHC i80.
Fonte: CHCNAV (2018).

Esta marca e modelo de receptor, assim como os outros acima, também possui canais que rastreiam as principais constelações GNSS. Sua precisão é de $2,5\text{mm} + 0.1\text{ ppm RMS}$ horizontal e $3,5\text{ mm} + 0.5\text{ ppm RMS}$ vertical para o método de posicionamento pós processado estático (CHCNAV, 2018).

O IBGE (2017) classifica os tipos de receptores GNSS (como os citados acima):

“Os receptores GNSS normalmente são caracterizados pelo tipo de observáveis que rastreiam, sendo elas: os códigos e as fases das ondas portadoras. Os receptores denominados de geodésicos ou de dupla frequência são aqueles que rastreiam códigos e fase em, pelo menos, dois sinais da banda L. Os receptores geodésicos comercializados atualmente possuem a terceira frequência, L5 proporcionando um posicionamento de qualidade superior das demais frequências”. (IBGE, 2017, p. 21).

Considerando todas as variáveis, conceitos e equipamentos do “universo” GNSS, deduz-se que diversos fatores podem afetar a precisão e a acurácia deste método de posicionamento e navegação devido à complexidade de sua operação.

Segundo Cavalcante (2018), a transmissão de dados por satélite é marcada por diversos desafios no campo das telecomunicações.

“Além dos desafios para funcionamento e manutenção de um sistema nos ares, vencer as adversidades do canal de transmissão com tamanha distância e as altas dinâmicas associadas também representa grande esforço no campo de processamento de sinais” (CAVALCANTE, 2018, p.8).

Afinal, como já descrito, um satélite está orbitando o planeta a uma média de 20.000 km de altura, isto é, existem diversos erros que podem ocorrer em função de todas as características e fatos vistos até agora.

2.6 Erros sistemáticos do GNSS

Constelações GNSS, a exemplo do GPS, GLONASS e Galileo, estão sujeitas a erros que ocorrem sistematicamente ou não e que podem afetar o resultado do posicionamento (Pereira, 2010).

De acordo com Monico (2008), erros sistemáticos do GNSS estão relacionados as duas principais observáveis básicas já citadas acima, isto é, a pseudodistância e a fase da onda portadora. Ainda segundo Monico:

“As observáveis GNSS, como todas as outras observáveis envolvidas nos processos de medidas, estão sujeitas a erros aleatórios, sistemáticos e grosseiros. Para obter resultados confiáveis, o modelo matemático (funcional e estocástico) estabelecido deve ser válido para a realidade física que se tenta descrever e capaz de detectar problemas. Dessa forma, as fontes de erros envolvidas nos processos de medidas devem ser bem conhecidas. Erros sistemáticos podem ser parametrizados (modelados como termos adicionais) ou reduzidos (ou mesmo eliminados) por técnicas apropriadas de observação”. (MONICO, 2008, p. 189).

Peroni (2004) resume as principais fontes dos erros no método GNSS:

“Erro devido à geometria dos satélites com relação ao observador; desvios dos relógios dos satélites; atraso de propagação e processamento dos sinais pelos circuitos dos satélites; erros devido a trajetórias múltiplas dos sinais; efeitos da atmosfera sobre a velocidade e a trajetória de propagação dos sinais transmitidos; erros devidos à resolução e ruído do receptor do usuário; erro na determinação da posição dos satélites (erro de efeméride). (PERONI, 2004, p.10).

A Tabela 2 a seguir especifica ainda mais ao demonstrar todos os erros sistemáticos do GNSS:

FONTES	ERROS
Satélites	Erro da órbita Erro do relógio Relatividade Atraso entre as duas portadoras no hardware do satélite Centro de fase da antena do satélite Fase <i>wind-up</i>
Propagação do sinal	Refração atmosférica Refração ionosférica Perdas de ciclos Multicaminhamento ou Sinais refletidos Rotação da Terra
Receptor/Antena	Erro do relógio Erro entre os canais Centro de fase da antena do receptor Atraso entre as duas portadoras no hardware do receptor Fase <i>wind-up</i>
Estação - (alguns erros são na realidade efeitos geodinâmicos que devem ser corrigidos).	Erro nas coordenadas Multicaminho ou sinais refletidos Marés terrestres Movimento do polo Carga oceânica Pressão da atmosfera

Tabela 2- Erros sistemáticos GNSS
 Fonte: MONICO (2008, p.190)

Considerando todos os erros sistemáticos possíveis e característicos do método GNSS, relacionados acima na Tabela 2 anterior, sabe-se que cada um deles são fontes potenciais de estudos, isto é, são temas com alto grau de detalhamento, além de profundos o suficiente para serem dignos de análises, trabalhos acadêmicos, artigos etc. (assim como já o são).

Dentre os erros sistemáticos citados acima, destaca-se aqui os relacionados a propagação dos sinais entre satélites artificiais e receptores GNSS. Esta fonte de erro está relacionada a estruturas físicas que representam entraves à ideal propagação dos sinais. A principal delas é o multicaminhamento, que é um efeito indesejado que faz com que os sinais emitidos pelos satélites sejam refletidos por diversas estruturas físicas antes de chegar ao receptor.

2.6.1 Multicaminhamento ou sinais refletidos

A distância medida pelas observáveis GNSS podem ser afetadas caso os sinais sejam distorcidos no momento em que estão sendo emitidos. Este efeito gera um erro resultante da reflexão do sinal em obstáculos como, por exemplo, montanhas e prédios, causando um aumento do tempo de deslocamento entre satélite e receptor, gerando valores falsos para as distâncias calculadas, ou seja, valores incorretos e inaceitáveis na maioria dos trabalhos de posicionamento (ZANOTTA et al, 2011).

De acordo com Langendolff e Pellegrini (2008), o sinal pode chegar à antena do receptor por caminhos diferentes, direto e indireto.

O caminho indireto causado pela reflexão em superfícies vizinhas à antena, tais como construções, carros, árvores, massas de água e cercas, dentre outros, produz distorções na fase da portadora e no código modulado sobre a portadora, degradando a qualidade do posicionamento”. (LANGENDOLFF; PELLEGRINI, 2008, p.34).

Para Peroni (2004), esta fonte de erro, isto é, a interferência resultante da reflexão dos sinais dos satélites em qualquer objeto (antes de chegar ao receptor), causa um efeito semelhante a imagem “fantasma” na televisão. Como o sinal leva mais tempo para alcançar o receptor, este último “entende” que o satélite está com uma distância maior do que na realidade.

Seeber (1993 apud PEREIRA 2010), informa que em condições desfavoráveis, o multicaminhamento dos sinais dos códigos pode causar a perda de sintonia desses sinais pelos

receptores e que seu efeito é duas ordens de magnitude maior sobre as observações dos códigos que sobre a medida de fase da portadora.

Por sua vez Leick (1995 apud MONICO, 2008), descreve o impacto do erro produzido pelo multicaminhamento sobre a medida da onda portadora:

- O erro máximo corresponde a aproximadamente um quarto do comprimento de onda, ou seja, 4,8 cm para a portadora L1;
- A frequência do multicaminhamento é proporcional à distância perpendicular entre a superfície refletora e a antena e inversamente proporcional ao comprimento de onda, além de ser função do ângulo de elevação do satélite; e;
- A fase da onda portadora livre dos efeitos da ionosfera, se comporta de maneira muito complicada quando sujeita ao multicaminhamento”. (MONICO, 2008, p. 222).

Monico ainda ressalta que é interessante observar que, como o satélite está movimentando-se continuamente, a frequência do multicaminhamento é função do tempo.

A Figura 18 a seguir é uma ilustração de como ocorre o multicaminhamento:

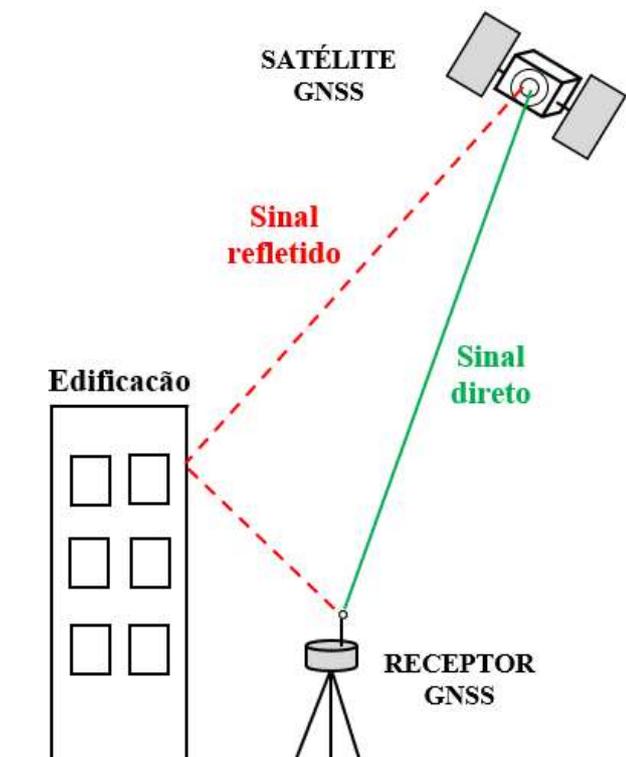


Figura 18– Exemplo da ocorrência do multicaminhamento.
Fonte: Adaptado de NOVATEL (2015).

Pereira (2010) observa que os sinais indiretos podem chegar à antena após serem refletidos por superfícies que estejam inclinadas, horizontais ou mesmo verticais.

O multicaminhamento é, de acordo com Leick (1995 apud PEREIRA 2010), a principal fonte de erro a ser considerada no posicionamento do tipo GNSS.

2.6.2 *Multicaminhamento – um efeito que pode ser atenuado*

De modo geral, não há um modelo para tratar o efeito do multicaminhamento, pois de acordo com Langendolff e Pellegrini (2008), as situações geométricas dos diferentes locais variam de forma arbitrária.

“A forma de atenuação do efeito é aumentar o tempo de coleta, o uso de antenas capazes de atenuar o efeito do multicaminhamento (antenas *Choke Ring*) e evitar os fatores que podem causar esse efeito, como não posicionar a antena do receptor próximo a edificações, por exemplo”. (LANGENDOLFF; PELLEGRINI, 2008, p.50).

Já segundo Pereira (2010), os efeitos do multicaminhamento podem ser atenuados com longos períodos de observação, principalmente devido à mudança da geometria de posição dos satélites ao longo do tempo, que resulta em diferentes ângulos de chegada dos sinais à antena.

A Figura 19 a seguir mostra uma antena geodésica do tipo Choke Ring, da marca TRIMBLE (modelo Ti-V2):



Figura 19 – Antena Choke Ring.
Fonte: TRIMBLE (2020).

A antena choke ring é uma das técnicas de proteção/redução do sinal refletido, e Kunysz, (2001) ressalta sua importância:

“Trata-se de uma antena com um plano de terra (disco metálico horizontal onde a antena é centrada) que contém uma série de círculos concêntricos com altura de aproximadamente um quarto do comprimento de onda, valor máximo do multicaminhamento para a portadora. Essa composição faz desse tipo de antena um dos melhores para proteção contra o multicaminhamento. A desvantagem está relacionada com seu peso e tamanho. Um dos desenvolvimentos mais recentes em relação a antenas que reduzem multicaminhamento diz respeito à tecnologia denominada *pinwheel*, com performance similar às antenas *choke ring* e muito mais leves e pequena”. (apud MONICO, 2008, p. 223-224).

A Figura 20 a seguir mostra a antena redutora do multicaminhamento *pinwheel* da marca NovAtel – modelo GPS-700 Series:



Figura 20– Antena pinwheel.
Fonte: NOVATEL (2009).

Ray et al. (1999 apud HOFMANN-WELLENHOF et al. 2001) classifica, além da mitigação do efeito dos sinais refletidos com o uso de antenas, outros dois métodos desenvolvidos, como: melhorar a tecnologia de receptores (que, de fato, estão em constante evolução) e processar os sinais e os dados.

O processamento dos sinais e dos dados são úteis para a quantificação do efeito do multicaminhamento, tanto para o estabelecimento de parâmetros quanto para estudos sobre sua mitigação.

2.6.3 Multicaminhamento – um efeito que pode ser quantificado

O multicaminhamento é um efeito que pode ser quantificado. Este fato, aparentemente, é pouco difundido, porém, muito útil em diversas aplicações e situações envolvendo o posicionamento.

De acordo com Ogaja e Redford (2007), tomar conhecimento da direção e local do multicaminhamento em um vértice específico é importante por vários motivos. Por exemplo, essas informações podem ser usadas para avaliar a escolha do melhor local para estabelecer um ponto de referência ou até mesmo para instalar um marco geodésico oficial.

Sabe-se que no Brasil, o IBGE é responsável por “estabelecer requisitos mínimos de precisão, através de orientações e procedimentos a serem adotados em levantamentos geodésicos visando o estabelecimento e densificação das Redes Geodésica de Referência que materializam o Sistema Geodésico Brasileiro (SGB)” (IBGE, 2017).

Assim, a importância da quantificação do multicaminhamento se encaixa diretamente com a atualização e as especificações e Normas Gerais para levantamentos geodésicos no Brasil, uma vez que levantamento oficiais realizados pelo IBGE usam, atualmente, receptores GNSS. Por exemplo, o estabelecimento do SIRGAS2000 só foi possível aliado a nova tecnologia de posicionamento e navegação GNSS:

“...o posicionamento através dos sistemas globais de navegação por satélite passou a ser a única técnica utilizada no estabelecimento da rede geodésica planimétrica, que pelas características de tridimensionalidade do posicionamento por satélites, recebeu a denominação de rede planialtimétrica do SGB. Desde então, foram estabelecidas as estações denominadas SAT-GPS, através das redes estaduais GPS, suas densificações/expansões e a homologação de marcos geodésicos”. (IBGE, 2017, p.10).

Ao homologar um marco geodésico ao SGB, um profissional, a exemplo de um Engenheiro Agrimensor, deve cumprir procedimentos parametrizados e obrigatórios, além de encaminhar as observações GNSS ao IBGE, bem como informações do levantamento e toda a descrição da construção do marco geodésico implantado em questão, conforme “Instruções para homologação de estações estabelecidas por outras instituições” (IBGE, 2018). Observa-se que as instruções vistas aqui são as disponibilizadas pelo IBGE na versão de outubro de 2018.

Muito embora as instruções para homologação não exijam a quantificação do multicaminhamento, mas apenas que “a área ao redor da estação deverá ser livre de obstruções

que possam interferir na captação dos sinais dos satélites”, Monico (2008), observa que “a ocorrência do multicaminho depende de condições específicas do meio onde se posiciona o receptor GNSS e das características de sua antena, bem como das técnicas utilizadas para reduzir este efeito”. Assim, a quantificação dos efeitos do multicaminhamento podem servir não somente para o estabelecimento de estações geodésicas de referência, mas também como verificação da qualidade dos sinais por parte de quem estabeleceu determinada estação/vértice, servindo, ao mesmo tempo, como respaldo e/ou informação extra de validação e, por consequência, possibilitando conferir maior credibilidade ao estabelecimento de uma estação / vértice / posicionamento (ou outros tipos de trabalhos que exijam parâmetros criteriosos).

Existem várias técnicas para quantificação do multicaminhamento, bem como demonstram Fan e Ding (2006). Porém, destaca-se aqui o software TEQC (pronúncia “tek”).

2.7 Sobre o *software* TEQC

O software TEQC foi projetado pela UNAVCO⁶, e é desenvolvido, e constantemente atualizado, para fazer a tradução, edição e verificação de dados GNSS. Ou seja, este software grátis (domínio público) é capaz de quantificar os efeitos do multicaminhamento.

De acordo com Monico (2005; 2008), muito embora as condições para avaliar o efeito dos sinais refletidos sejam consideravelmente arbitrárias, o que torna uma modelagem muito difícil de ser estabelecida, o software TEQC surgiu exatamente como uma ferramenta capaz de indicar o nível dos efeitos do multicaminhamento nas portadoras L1 e L2, além de determinar a repetibilidade deste efeito em dias consecutivos, o ângulo de elevação e o azimute dos satélites.

Por ser um software de domínio público, informações adicionais sobre a UNAVCO e o software TEQC podem ser facilmente obtidas através de rápida pesquisa na internet – observando que as informações de site oficial estão disponíveis na língua inglesa (UNAVCO, 2019).

Já o tutorial de uso e noções básicas do TEQC, de 6 de junho de 2014, podem ser facilmente baixadas no próprio site da UNAVCO (UNAVCO, 2014).

⁶ A UNAVCO é um tipo de Consórcio-Universidade sem fins lucrativos, voltado para facilitar a pesquisa e educação em geociências e que conta com o suporte das ciências geodésicas. Os principais patrocinadores da UNAVCO são a Fundação Nacional de Ciências (NSF) e a Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (NASA), ambas dos Estados Unidos.

3 METODOLOGIA

O termo “metodologia”, em ciências, de acordo com Zanella (2009), é o estudo dos caminhos a serem percorridos para se realizar uma pesquisa. Contudo, o que é pesquisa?

Ander-Egg (1978 apud LAKATOS e MARCONI, 2003, p. 155) define a pesquisa como um “procedimento reflexivo sistemático, controlado e crítico, que permite descobrir novos fatos ou dados, relações ou leis, em qualquer campo do conhecimento”.

Köche (2011), por sua vez, ressalta que uma das preocupações permanentes que motivam a pesquisa científica é de caráter prático, fato este, que condiz com a proposta deste Trabalho de Conclusão de Curso. Ainda segundo Köche:

“...conhecer as coisas, os fatos, os acontecimentos e fenômenos, para tentar estabelecer uma previsão do rumo dos acontecimentos que cercam o homem e controlá-los. Com esse controle pode ele melhorar sua posição em face ao mundo e criar, através do uso da tecnologia, condições melhores para a vida humana”. (KÖCHE, 2011, p. 44).

Para Silva e Menezes (2001), a pesquisa pode ser definida de muitas formas. Porém, ambas apontam para uma definição relativamente simples sobre o que é pesquisa, isto é, “procurar respostas para indagações propostas”.

Assim, a pesquisa aqui proposta, buscará responder quais são os métodos mais adequados para avaliar e evitar erros do multicaminhamento ao operar um receptor do método de posicionamento e navegação GNSS.

Ainda segundo Silva e Menezes (2001), existem várias formas de classificar as pesquisas. Dentre as formas clássicas de pesquisa disponíveis na literatura acadêmica, serão escolhidas aquelas que são mais adequadas para a pesquisa proposta.

3.1 Tipo de pesquisa

Inicialmente, classifica-se dois tipos de pesquisa: básica ou aplicada.

A pesquisa básica ou “pesquisa pura” está voltada para o progresso da ciência, além de explorar o desenvolvimento de conhecimentos científicos. Não tem preocupação direta com

aplicações e consequências práticas. Objetiva a generalização, com o propósito de construir teorias e leis e seu desenvolvimento tende a ser bastante formalizado. (GIL, 2008).

Já a pesquisa aplicada, tem grande influência e proximidade com a pesquisa básica, uma vez que suas descobertas tem papel fundamental no seu desenvolvimento. A diferença está no fato de que a pesquisa aplicada, como o próprio nome diz, está voltada para a aplicação, utilização e consequências práticas dos conhecimentos. Pode-se dizer que a pesquisa aplicada está voltada para a aplicação imediata em uma realidade circunstancial do que para o desenvolvimento de teorias de valor universal. (GIL, 2008).

Considerando as definições acima a pesquisa adotada será aplicada. O interesse dessa pesquisa está voltado para a aplicação e utilização, de fato, dos conhecimentos apresentados até agora, ou seja, relacionados a avaliação dos efeitos do multicaminhamento – com vistas a evitar e/ou minimizar esse tipo de erro – ao operar um receptor GNSS. Em outras palavras, este trabalho busca alcançar consequências práticas dos conhecimentos adquiridos – tanto os de pesquisa bibliográfica, quanto os relacionados ao experimento prático ao coletar dados para avaliar o fenômeno do multicaminhamento.

3.2 Natureza da pesquisa

Os dois tipos de pesquisas do ponto de vista da abordagem do problema podem ser:

- Pesquisa quantitativa: este tipo de pesquisa traduz em números, opiniões e informações, de modo a tornar mais fácil a classificação e a análise. O método da pesquisa quantitativa considera que tudo pode ser quantificável. Necessita de ferramentas e técnicas estatísticas, como, percentagem, média, desvio-padrão, coeficiente de correlação etc. (SILVA; MENEZES, 2011).

- Pesquisa qualitativa é definida por Silva e Menezes (2001):

“...considera que há uma relação dinâmica entre o mundo real e o sujeito, isto é, um vínculo indissociável entre o mundo objetivo e a subjetividade do sujeito que não pode ser traduzido em números. A interpretação dos fenômenos e a atribuição de significados são básicas no processo de pesquisa estatísticas. O ambiente natural é a fonte direta para coleta de dados e o pesquisador é o instrumento-chave. É descritiva. Os pesquisadores tendem a analisar seus dados indutivamente. O processo e seu

significado são os focos principais de abordagem”. (SILVA e MENEZES, 2001, p. 20).

Tanto a pesquisa qualitativa, quanto a pesquisa quantitativa serão adotadas neste trabalho. A pesquisa qualitativa é relevante, uma vez que o ponto levantado será avaliado em termos de qualidade; isto é, quão preciso e acurado foi o posicionamento deste ponto segundo os padrões do que se espera de um levantamento GNSS. Uma análise qualitativa dos dados coletados pode ser feita.

Já a pesquisa quantitativa será a principal a ser adotada, uma vez que o fenômeno do multicaminhamento é passível de ser quantificado após a coleta dos dados de uma medição/posicionamento – lembrando que o software TEQC da UNAVCO, é próprio para este tipo de quantificação.

Ressalta-se que a pesquisa qualitativa e quantitativa se auto complementam, bem como observa Köche (2011): “o experimento trabalha com hipóteses, isto é, com a elaboração teórica quantitativa a priori que orienta a observação e o questionamento dos fatos”. Portanto, ainda segundo o Köche, o experimento pressupõe pensamento teórico, elaborado aprioristicamente, expresso em linguagem matemática e acrescido de teste.

3.3 Pesquisa quanto aos fins

As pesquisas quanto aos fins podem ser classificadas da seguinte forma:

- Exploratória: é praticada em alguma área pouco explorada ou conhecida, onde há pouco conhecimento acumulado e sistematizado. Por ter um caráter mais investigativo, não aceita hipóteses que, contudo, poderão surgir durante ou ao final da pesquisa (MORESI, 2003).

- Descritiva: apresenta características de determinado fenômeno ou mesmo de uma população. Eventualmente pode formar correlações entre variáveis e definir sua natureza. Embora não esteja voltada para explicação dos fenômenos que descreve, pode ser usada como base para esclarecimentos (MORESI, 2003).

- Explicativa: objetiva tornar algo mais compreensível e justificar os motivos deste “algo”. Tem o intuito de clarear quais foram os fatores que contribuíram, de algum modo, para o episódio de determinado fenômeno (MORESI, 2003).

- Intervencionista: o objetivo deste tipo de pesquisa é interferir na realidade estudada de modo a modificá-la. Uma simples explicação não é suficiente. A pesquisa intervencionista vai além da pesquisa aplicada, uma vez que a proposta não é somente propor resoluções de problemas, mas também participar na resolução efetiva dos mesmos (MORESI, 2003).

Sendo assim, considerando as opções acima, este trabalho adotará a pesquisa descritiva quanto aos fins, uma vez que esta é a que melhor se encaixa com a proposta delineada, isto é, apresentar as características do fenômeno dos sinais refletivos, conhecidos como multicaminhamento – ao se determinar uma posição com o uso de um receptor GNSS. Isto deve-se ao fato de que a quantificação que será feita a partir dos dados coletados em campo, pelo software TEQC, tornando viável a correlação e entendimento entre as variáveis, ou seja, tornando mais compreensível a natureza deste fenômeno.

3.4 Pesquisa quanto aos meios

Lakatos e Marconi (2003, p. 174), definem “técnica” como um “conjunto de preceitos ou processos de que se serve uma ciência ou arte; é a habilidade para usar esses preceitos ou normas, a parte prática. Toda ciência utiliza inúmeras técnicas na obtenção de seus propósitos”.

Sendo assim, as pesquisas quanto aos meios, podem ser definidas, segundo algumas das técnicas utilizadas, como:

- Pesquisa bibliográfica: pode ser feita por diversos tipos de bibliografia disponibilizada publicamente, que possua, necessariamente, relação ao tema de estudo. Alguns exemplos: teses, livros, pesquisas, monografias, revistas especializadas, mapas, boletins, anais, e diversos outros (LAKATOS e MARCONI, 2003). O objetivo, segundo Lakatos e Marconi (2003, p. 183), é “colocar o pesquisador em contato direto com tudo o que foi escrito, dito, ou filmado sobre determinado assunto, inclusive conferências seguidas de debates que tenham sido transmitidos por alguma forma, quer publicadas, quer gravadas”.

- Documental: a fonte de coleta de dados está restrita somente a documentos – escritos ou não. Estes documentos podem ter sido feitos no momento em que o fenômeno ou o fato ocorreram, assim como podem ter sido feitos depois. Alguns exemplos: rádio, estudos

históricos, fontes estatísticas, cartas, mapas, relatórios de pesquisa, arquivos particulares ou públicos, filmes, ilustrações, esboços, e diversos outros (LAKATOS e MARCONI, 2003).

- Pesquisa de campo: o objetivo é conseguir dados e/ou adquirir conhecimentos sobre um determinado problema; isto é, procura-se, neste tipo de pesquisa, uma resposta, seja de uma hipótese levantada (que se queira evidenciar), seja descobrir novos fenômenos ou relações entre eles (LAKATOS e MARCONI, 2003). Ainda sobre a pesquisa de campo:

“Consiste na observação de fatos e fenômenos tal como ocorrem espontaneamente, na coleta de dados a eles referentes e no registro de variáveis que se presume relevantes, para analisá-los. A pesquisa de campo propriamente dita “não deve ser confundida com a simples coleta de dados (este último corresponde à segunda fase de qualquer pesquisa); é algo mais que isso, pois exige contar com controles adequados e com objetivos preestabelecidos que discriminam suficientemente o que deve ser coletado”. (Trujillo, 1982, p. 229 apud LAKATOS e MARCONI, 2003, p. 184).

- Pesquisa de laboratório: embora seja um tipo de investigação mais difícil, seus resultados são mais exatos. Descreve e analisa o que ocorre em situações controladas. Para isso é necessário instrumentos precisos e específicos utilizados em ambientes apropriados. Lakatos e Marconi (2003, p. 190) ressaltam que “o objetivo da pesquisa de laboratório depende daquilo que se propôs alcançar; deve ser previamente estabelecido e relacionado com determinada ciência ou ramo de estudo. As técnicas utilizadas também variam de acordo com o estudo a ser feito”.

- Pesquisa experimental: são realizadas por investigações de pesquisa baseadas na experiência e seu objetivo essencial é o teste de hipóteses que demonstrem causa e efeito (LAKATOS e MARCONI, 2003).

- Pesquisa-Ação: “quando concebida e realizada em estreita associação com uma ação ou com a resolução de um problema coletivo. Os pesquisadores e participantes representativos da situação ou do problema estão envolvidos de modo cooperativo ou participativo”. (SILVA e MENEZES, 2001, p. 22).

- Estudo de caso: é o tipo de pesquisa que discorre com considerável profundidade um tipo de estudo. Normalmente, limita-se somente a um ou poucos objetivos de pesquisa – por isso tem grande profundidade e pouca amplitude (ZANELLA, 2009).

Assim, a pesquisa de campo será a técnica adotada neste trabalho quanto aos meios. Isso se deve ao fato de que além dos dados serem coletados em campo com o uso de um receptor

GNSS, o objetivo é adquirir conhecimentos e posterior análise sobre o fenômeno dos sinais refletidos (com o uso destes dados coletados). Sabe-se que ao se determinar um vértice/marco geográfico durante o rastreamento, feito, necessariamente em campo, dados são coletados na memória de um receptor. Estes dados são então baixados e devidamente processados, logo após submetidos a um software específico (TEQC), que por sua vez, possibilita a quantificação dos efeitos dos sinais refletidos (multicaminhamento) ocorridos durante a medição/rastreamento realizada no campo. Entende-se assim, que o receptor GNSS é a técnica de obtenção dos dados para a análise do efeito do multicaminhamento, e o software TEQC é a ferramenta que permite a observação dos dados e a análise ou quantificação deste efeito.

3.5 Universo e amostra

O universo e a amostra são conceitos que podem ser definidos como:

- Universo: “População (ou universo da pesquisa) é a totalidade de indivíduos que possuem as mesmas características definidas para um determinado estudo”. (MORESI, 2003, p. 29).

- Amostra: “é parte da população ou do universo, selecionada de acordo com uma regra ou plano. A amostra pode ser probabilística e não-probabilística”. (MORESI, 2003, p. 29).

O universo empregado neste trabalho é qualquer lugar da superfície terrestre onde se possa determinar uma posição geográfica com o uso de um receptor GNSS; ou, qualquer lugar da superfície terrestre onde estruturas físicas estejam presentes de modo a causar o efeito do multicaminhamento.

A amostra deste trabalho será a escolha de dois pontos na superfície terrestre para se estabelecer um posicionamento geodésico relativo, isto é, uma coordenada será determinada em relação a um referencial materializado por um vértice de coordenada conhecida, como, por exemplo, um marco homologado pelo IBGE. Na prática, dois receptores estacionários serão usados, um receptor base (referencial) e um receptor para posicionar o ponto que se escolheu determinar. A determinação deste ponto pelo receptor e a subsequente coleta e processamento dos dados coletados, possibilitarão a avaliação daquele ponto específico nos termos delineados aqui, ou seja, se naquele ponto específico ocorreu o fenômeno dos sinais refletidos ou não.

3.6 Local – Faculdade de Engenharia de Minas Gerais - FEAMIG

Entende-se que a organização em estudo, nesta pesquisa, é a Faculdade de Engenharia de Minas Gerais – FEAMIG, uma vez que o marco geodésico que servirá como parâmetro para a pesquisa proposta se encontra nesta instituição de ensino.

Como já citado, a proposta desta pesquisa é avaliar o efeito do multicaminhamento a partir da coleta de dados ao realizar o levantamento GNSS de um vértice. Assim, para fins de comparação do resultado obtido, optou-se aqui por realizar este levantamento em um marco homologado no IBGE estabelecido na FEAMIG.

A FEAMIG é uma faculdade de engenharia criada em 1962, e os cursos ofertados são: Engenharia de Agrimensura (relevante para este trabalho/pesquisa), Engenharia Civil e Engenharia de Produção. Atualmente possui outros cursos fora da engenharia, como o curso de Direito e Administração.

Ressalta-se que a FEAMIG foi a primeira faculdade de Engenharia de Agrimensura de Minas Gerais. Além dos cursos de graduação, a FEAMIG ainda está voltada para a iniciação científica e extensão, pós-graduação lato sensu em Engenharia de Segurança do Trabalho, Engenharia de Estradas, Engenharia de Qualidade, Engenharia Ambiental e Georreferenciamento de Imóveis Rurais.

3.7 Coleta e análise de dados

Lakatos e Marconi (2003, p. 166) ressaltam que “são vários os procedimentos para a realização da coleta de dados, que variam de acordo com as circunstâncias ou com o tipo de investigação”.

Gerhardt e Silveira (2009, p. 95), complementam que a coleta de dados é a “fase da pesquisa em que se reúnem dados ou informações por meio de técnicas e instrumentos específicos”. Pode-se dizer que esta etapa é a pesquisa propriamente dita.

Já a análise dos dados é, segundo Moresi (2003, p. 11), “a organização das ideias de forma sistematizada visando à elaboração do relatório final”. Ainda segundo Moresi:

“...o pesquisador fazer a previsão de quais recursos manuais ou computacionais que serão empregados para analisar, tabular e apresentar os dados obtidos na pesquisa de campo. Atualmente, com o advento da informática, é natural a escolha de recursos

computacionais para dar suporte à elaboração de índices e cálculos estatísticos, tabelas, quadros e gráficos”. (MORESI, 2003, p. 80)

Assim, esta concepção de análise de dados se encaixa com a análise proposta neste trabalho, uma vez que ao coletar os dados em campo, com o uso de um receptor GNSS, será necessário a escolha de um lugar específico, um ponto conhecido (propenso ou não ao fenômeno do multicaminhamento⁷), para se determinar um vértice/ponto geográfico. Esses dados/informações coletados serão quantificados no software TEQC, possibilitando assim, a análise do erro.

As informações relativas à recomendação das técnicas, dos métodos ou das posturas que possam prevenir erros ligados ao multicaminhamento, em um posicionamento pelo método GNSS, serão obtidas pelas deduções tanto das pesquisas bibliográficas quanto da coleta dos dados e a posterior análise se o multicaminhamento (agora quantificado) acarretou em um erro significativo.

Abaixo segue uma relação de alguns dos instrumentos que podem ser utilizados para a coleta e análise dos dados:

- Observação: de acordo com Gerhardt e Silveira (2009) a observação é uma técnica que usa os sentidos para a compreensão de certos aspectos da realidade em análise. Para as autoras a observação “consiste em ver, ouvir e examinar os fatos, os fenômenos que se pretende investigar. A técnica da observação desempenha importante papel no contexto da descoberta e obriga o investigador a ter um contato mais próximo com o objeto de estudo” (GERHARDT e SILVEIRA, 2009, p. 74).

- Formulário: Gerhardt e Silveira (2009) apontam o formulário como um conjunto de questões elaboradas por um pesquisador ao entrevistar alguém face a face. Ainda segundo as autoras “as perguntas devem ser ordenadas, da mais simples às mais complexas; vale lembrar que as perguntas devem referir-se a uma ideia de cada vez e possibilitar uma única interpretação, sempre respeitado o nível de conhecimento do informante” (GERHARDT e SILVEIRA, 2009, p. 71).

⁷ Pode-se escolher, por exemplo, um vértice oficial de controle do IBGE, para fins de comparação. Pode-se também, escolher um vértice próximo a um prédio – lugar propenso ao efeito do multicaminhamento. Em ambos os casos, é possível quantificar o efeito do multicaminhamento (se o mesmo ocorreu ou não, ou seja, se ocorreu um erro inaceitável para os parâmetros geodésicos do GNSS).

- Questionário: para Gerhardt e Silveira (2009), o questionário é uma ferramenta voltada para coletar dados, onde as perguntas são ordenadas de tal modo que dispensa a presença do pesquisador; ou seja, o questionário pode ser respondido por escrito, em qualquer lugar, pelo informante. O objetivo do questionário, ainda segundo Gerhardt e Silveira (2009, p. 69) é “levantar opiniões, crenças, sentimentos, interesses, expectativas, situações vivenciadas. A linguagem utilizada no questionário deve ser simples e direta, para que quem vá responder compreenda com clareza o que está sendo perguntado”.

- Entrevista: “constitui uma técnica alternativa para se coletarem dados não documentados sobre determinado tema. É uma técnica de interação social, uma forma de diálogo assimétrico, em que uma das partes busca obter dados, e a outra se apresenta como fonte de informação” (GERHARDT e SILVEIRA, 2009, p. 72).

- Análise documental: “realizada a partir de documentos, contemporâneos ou retrospectivos, considerados cientificamente autênticos (não-fraudados)” (GERHARDT e SILVEIRA, 2009, p. 69).

- Medição “in loco”: de acordo com Ander-Egg (1978, p. 96 apud Lakatos e Marconi, 2003, p. 192) a medição “in loco” é o tipo de investigação científica empregada dentre as “várias modalidades de observação, que variam de acordo com as circunstâncias”; mais precisamente, a medição “in loco” é feita “segundo o lugar onde se realiza”, seja a observação efetuada na vida real (trabalho de campo), seja a observação efetuada em laboratório (LAKATOS e MARCONI, 2003, p. 192).

Assim, considerando os instrumentos utilizados para a coleta e análise dos dados, conceituados acima, este trabalho adotará os seguintes:

- Observação (simples): do local a ser escolhido para se determinar um vértice/coordenada geográfica. Isso será feito no 2º semestre do ano letivo de 2020. O tempo necessário para a escolha do local irá variar de acordo com as opções disponíveis. Duas pessoas serão necessárias para determinar o local (que neste caso serão dois locais, um para a base do receptor e outro para o receptor “rover” que determinará o ponto que se quer obter).

- Medições in loco: será determinada uma coordenada de um vértice, em um lugar específico, a fim de se verificar a precisão e acurácia deste ponto, e assim, analisar o efeito do multicaminhamento. Observa-se que um receptor GNSS, durante a locação de um vértice, está realizando uma medição. O instrumento/equipamento utilizado será um receptor geodésico do

método de posicionamento GNSS. Essa medição ocorrerá no 2º semestre do ano letivo de 2020. Os receptores GNSS são capazes de armazenar diversos dados das medições em sua memória, inclusive quais satélites foram captados, o tempo, a velocidade e as distâncias dos sinais, entre outros. Com esses dados determinam a dimensão do erro.

Com os dados coletados será possível quantificar o erro do multicaminhamento pelo software TEQC (que é específico para a quantificação deste tipo de erro, entre outros). Ou seja, tendo conhecimento da dimensão deste efeito, pode-se fazer uma análise do erro como aceitável ou não para o vértice escolhido.

3.8 Limitações

Köcher (2011) alerta para a “importância de se avaliar as limitações que apresentam um e outro tipo de pesquisa”.

Kerlinger (1985 apud KÖCHER, 2011), aponta, como limitações, a falta de generalidade em uma pesquisa:

“Um resultado evidenciado em uma pesquisa experimental de laboratório nem sempre é o mesmo do obtido em uma situação de campo, onde há variáveis muitas vezes desconhecidas ou imprevisíveis que podem intervir nos resultados, bem como a própria natureza das variáveis “naturais” que se diferenciam das “artificiais”. Por esse motivo, os seus resultados devem permanecer restritos às condições experimentais”. (KERLINGER, 1985, p. 127 apud KÖCHE, 2011, p. 125).

Assim, dentre as limitações que podem ocorrer durante a coleta dos dados em campo com o uso do receptor GNSS, proposto nesta pesquisa/trabalho, pode-se citar outras variações físicas que não estarão sendo avaliadas, que todavia, podem limitar a qualidade da precisão e da acurácia durante a determinação da coordenada geográfica levantada. Como exemplo, pode-se citar a densidade da atmosfera no dia da medição (coleta de dados); momento em que a massa gasosa que se concentra nas baixas camadas da atmosfera terrestre pode estar composta por dois extremos, isto é, por excesso de gases secos ou por excesso de vapor d’água (MONICO, 2008). Este efeito é conhecido como refração atmosférica e, em conjunto com o ângulo de elevação dos satélites desfavorável (em um determinado momento), pode representar uma

limitação para a correta avaliação do efeito proposto aqui, ou seja, do multicaminhamento. Nestes termos, avaliar o melhor dia, ou o dia mais ideal, para se determinar um vértice é uma limitação clara, que deve ser considerada (pode-se, por exemplo, avaliar as médias de dados meteorológicos a fim de se escolher o melhor dia/época para o rastreio).

4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 Coleta dos dados da RBMC para comparação da acurácia

A coleta dos dados, com o uso de receptores GNSS em situações adversas e/ou lugares específicos foi feita, oportunamente, pelo download dos marcos ou estações geodésicas da RBMC do Estado de Minas Gerais disponíveis no site do IBGE, a fim avaliar se o efeito do multicaminhamento afeta a acurácia das coordenadas. Lembrando que o erro do multicaminhamento é quantificado aqui pelo *software* TEQC.

Isso foi extremamente oportuno, pois estes marcos geodésicos possuem receptores GNSS que disponibilizam dados, 24 horas por dia, necessários para a realização desta pesquisa, ou seja, disponibilizam dados de medições e de rastreamento da mesma forma que poderia ter sido coletado em campo, salvo as limitações impostas pela pandemia do COVID-19, o que dificultou a realização das medições *in loco*.

Ressalta-se, entretanto, que a pesquisa, os resultados, as conclusões e o aprendizado não foram afetados, pois, mesmo em situações normais, deduz-se que o mais aconselhado seria usar estes marcos geodésicos da RBMC, uma vez que estes possibilitaram o uso de mais de uma marca e modelos de antenas/receptores no rastreamento, além de maior abrangência na área territorial e na diversidade da pesquisa, que englobou diversas cidades do Estado de Minas Gerais. No total, foram usados três modelos de antenas da marca TRIMBLE, um modelo de antena da marca LEICA e um modelo da marca NavXperience.

Ainda, o autor desta pesquisa já realizou diversos trabalhos com receptores GNSS e a ida ao campo para a coleta dos dados não representaria um aprendizado novo, somente mais uma oportunidade para aumentar o ganho de experiência no manuseio destes equipamentos.

Segundo o site do IBGE (2021), a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS – RBMC é “o conjunto de estações geodésicas, equipadas com receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*) de alto desempenho, que proporcionam, uma vez por dia ou em tempo real, observações para a determinação de coordenadas”.

Assim, os dados/arquivos da RBMC disponibilizados pelo site do IBGE foram “baixados” para esta pesquisa ao clicar na aba “Geociências”, seguindo o caminho: → redes geodésicas → RBMC → Downloads → , onde aparecem diversas pastas disponíveis para download, entre elas, e as que interessam aqui, a pasta chamada “cartogramas”, que contém mapas do Brasil com as redes de estações ativas e disponíveis nos últimos 10 anos e, outra pasta

Estes arquivos possuem os dados de observação e navegação. Por exemplo, o arquivo “d” é o arquivo de observação compactado em HATANAKA. Já o arquivo “n” e “g” são as efemérides transmitidas das órbitas respectivas “GPS” e “GLONASS” (PARZZANINI, 2019). Observa-se que estes arquivos baixados são similares aos tipos de arquivos que teriam sido coletados em campo e, em ambas as situações, usam-se antenas/receptores GNSS de duas frequências.

Após, deve-se gerar o arquivo de observação “o”, também conhecido como RINEX, que é editável, ou seja, que proporciona que os dados das observáveis sejam lidos e processados em qualquer *software* de processamento, incluindo o TEQC. Para gerá-lo, usa-se o *software* “**crx2rnx**”⁸, que ao ser colocado dentro da pasta junto aos outros arquivos (“n”, “l”, “g”, “d”), basta arrastar, com o *mouse*, o arquivo compactado “d” em cima deste *software*, momento em que o arquivo “o” aparece junto aos outros automaticamente (PARZZANINI, 2019). Seguindo o exemplo dado na Figura 22 anterior, o arquivo gerado para esta estação específica teria o seguinte nome: “mgbh2131.20o”, ou seja, com o final “o”. Este documento pode ser aberto, por exemplo, no *WordPad*, ou mesmo no *Word*. A Figura 23 a seguir é um exemplo, novamente da estação **MGBH**, que mostra o cabeçalho inicial deste tipo de arquivo RINEX, que contém as informações importantes, como o tipo da antena/receptor usado, a altura dessa antena (que foi estabelecida naquele local específico), a hora em que a primeira observação começou a ser gravada, o ano, mês e dia do rastreamento, entre outros.

2.11	OBSERVATION DATA		M (MIXED)		RINEX VERSION / TYPE	
teqc 2019Feb25			20200801 07:31:24UTC		PGM / RUN BY / DATE	
RBMC	IBGE/CGED				OBSERVER / AGENCY	
5750R51586	TRIMBLE NETR9		5.45		REC # / TYPE / VERS	
1551129618	TRM115000.00		NONE		ANT # / TYPE	
0.0060	0.0000		0.0000		ANTENNA: DELTA H/E/N	
4320741.8192	-4161560.4725		-2161984.2456		APPROX POSITION XYZ	
17	C1	C2	C5	C7	C8	L1
	L8	P1	P2	S1	S2	S5
						S7
						S8
15.0000					L7# / TYPES OF OBSERV	
CODIGO: 93922	Estacao: Belo Horizonte				# / TYPES OF OBSERV	
MGBH					INTERVAL	
41667M001					COMMENT	
2020	7	31	0	0	0.0000000	GPS
18					MARKER NAME	
					MARKER NUMBER	
					TIME OF FIRST OBS	
					LEAP SECONDS	
					END OF HEADER	
20	7	31	0	0	0.0000000	0
					25E07E08E13E15E18E21E26E27E30G02G05G12	
					G15G18G20G24G25G29R05R06R09R10R11R20	
					R21	

Figura 23 - Arquivos RINEX da estação MGBH da RBMC
Fonte: IBGE (2020).

⁸ Este *software* de pré-processamento pode ser encontrado e baixado no site da UNAVCO (2020).

Ressalta-se que o arquivo RINEX, exemplificado na Figura 23, tem 24 horas de observações, com início às 0h e final às 23h59min45seg – sendo que, neste caso, seu tamanho é de 28.813 KB – possuindo, assim, grande quantidade de dados. Se, por exemplo, tivesse sido aberto em um documento Word, abaixo do cabeçalho poderiam ser vistas 7.024 páginas de observações das 24 horas de rastreamento deste dia específico.

Por sua vez, este trabalho de pesquisa está voltado para as práticas da Agrimensura do dia a dia, onde marcos geodésicos de referência são, normalmente, estabelecidos em campo com o rastreamento mínimo de 4 horas, segundo precisões esperadas em metros para um levantamento estático para receptores de duas frequências (este padrão pode ser verificado nos Relatórios de Posicionamento por Ponto Preciso, emitidos pelo IBGE). Assim, optou-se por “cortar” os arquivos (escolher um intervalo de rastreamento) escolhidos de 24 horas em arquivos de somente 4 horas, pois, como já foi explicado, os arquivos RINEX são passíveis de serem editados. Existem maneiras diferentes de se cortar estes arquivos, dentre elas, com o uso do software TEQC no sistema operacional DOS (Disk Operating Systems) presente na maioria dos computadores. O modo de como cortar esses arquivos é detalhado no “tutorial de uso e noções básicas do TEQC”, que pode ser facilmente baixado no site da UNAVCO (UNAVCO, 2014).

Todos os arquivos RINEX gerados a partir das estações da RBMC do Estado de Minas Gerais na data de 31 de julho de 2020 que possuíam 24 horas de rastreamento foram cortados, isto é, foram gerados novos arquivos com um intervalo de somente 4 horas de rastreamento para a pesquisa aqui proposta. Nota-se que todos os arquivos contemplaram este intervalo de 4 horas no mesmo horário – com início às 8h e fim às 12h daquele dia. Seguindo o exemplo do arquivo RINEX original gerado a partir da estação MGBH, no caso o arquivo de 24 horas nomeado “mgbh2131.20o”, ao ser cortado pelo software TEQC, agora passou a ter um novo arquivo similar, porém somente com os dados de observações/rastreamento de 4 horas, nomeado “mgbh2131_4h.20o”, bem menor que o anterior – agora com um tamanho de 4.927KB e com 2.377 páginas de observações abaixo do cabeçalho de informações (se aberto no Word).

Uma vez com todos os arquivos RINEX “cortados” em 4 horas, o procedimento para se saber a acurácia obtida em cada um deles é processar os mesmos no PPP⁹ do IBGE a fim de comparar os resultados obtidos das coordenadas UTM (Norte, Este e altitude), com os resultados do relatório descritivo, também emitido pelo IBGE, de cada uma destas estações.

⁹ O Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) do IBGE é um serviço online gratuito para pós-processamento de dados GNSS e permite aos usuários com receptores GNSS obterem coordenadas referenciadas ao SIRGAS 2000. Os dados que foram coletados por receptores de uma ou duas frequências no modo estático ou cinemático são processados. Por exemplo, o INCRA aceita esses resultados fornecidos em processos de certificação de imóveis rurais (IBGE, 2021).

Assim, todas as estações escolhidas para este experimento foram processadas no PPP do IBGE, onde cada uma gerou um arquivo compactado (.rar). Ao descompactar este arquivo, obtêm-se um documento em PDF, que é o relatório com as coordenadas SIRGAS da estação em questão (neste caso, isso foi feito com cada uma das 14 estações da RBMC do Estado de MG, do dia 31 de julho de 2020, com intervalo de 4 horas de observações). Na Figura 24 a seguir, pode-se ver o exemplo de parte deste relatório da estação MGBH, com destaque para as coordenadas UTM corrigidas (que são as de interesse desta pesquisa):

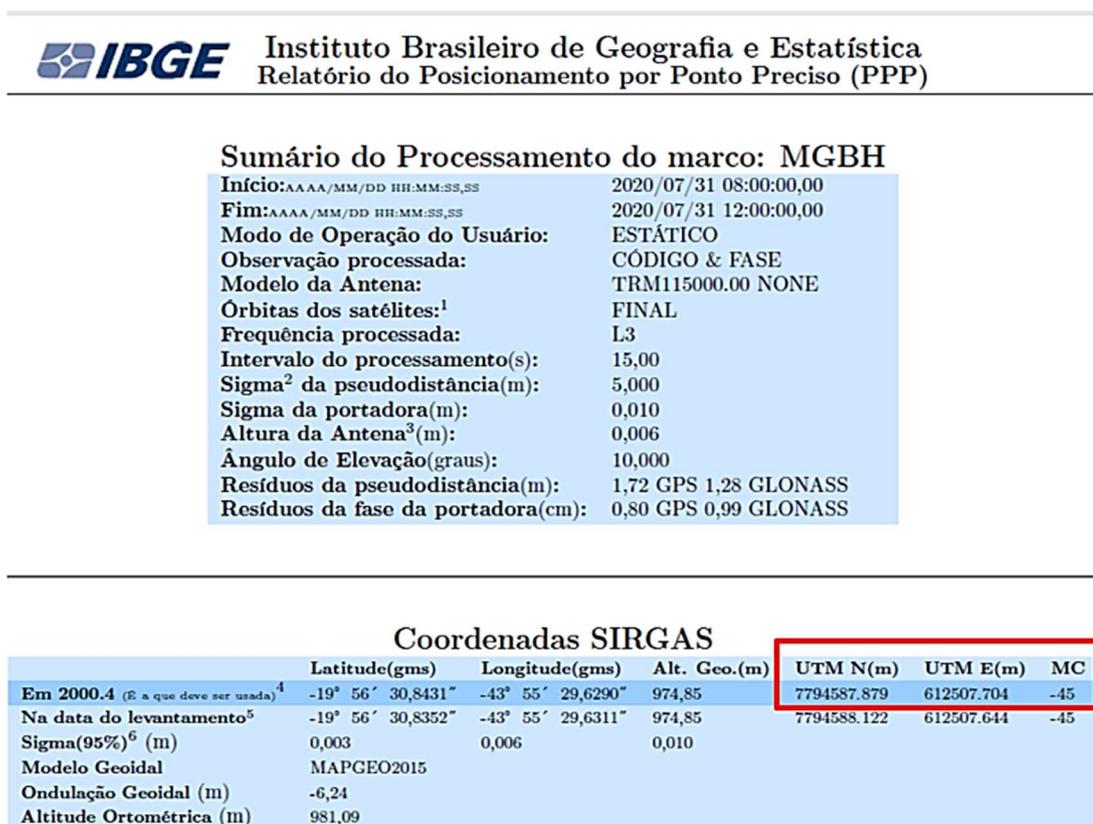


Figura 24 - Relatório PPP - Estação MGBH – Coordenadas corrigidas
Fonte: IBGE (2020).

Para avaliar a acurácia das coordenadas dessas estações – isto é, no dia 31 de julho de 2020, durante rastreamento de observações de 4 horas – também se tornou necessário baixar os relatórios descritivos de cada uma dessas 14 estações do IBGE que contém diversas informações, entre elas, suas coordenadas oficiais e a localização. E é exatamente a comparação entre essas duas coordenadas que proporcionará quão acurado foi o rastreamento naquele dia. Com esta informação da diferença das coordenadas pode-se avaliar o efeito do multicaminhamento com o uso do *software* TEQC.

Assim, o relatório descritivo que contém as coordenadas oficiais de cada uma dessas estações também é obtido no site do IBGE. Ao clicar na aba “Geociências”, faz-se o seguinte caminho: → “Redes Geodésicas” → “RBMC” → “Downloads” → pasta “relatórios”. Feito isso, procura-se a estação que se deseja e clica-se nela, momento em que o download do relatório é feito imediatamente em formato PDF. Isso foi feito com cada uma das 14 estações escolhidas para essa pesquisa. A Figura 25 é um exemplo de parte desse relatório, também da estação MGBH, com destaque para as coordenadas UTM oficiais:



RBMC - Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS
Relatório de Informação de Estação
MGBH - Belo Horizonte

0. Formulário

Preparado por: Centro de Controle Eng. Kátia Duarte Pereira - RBMC
 Data: 02/01/2009
 Atualização: 04/06/2020 - Atualização de Firmware

1. Identificação da estação GPS

Nome da Estação: BELO HORIZONTE
 Ident. da Estação: MGBH
 Código SAT: [93922](#)
 Código Internacional: 41667M001

2. Informação sobre a localização

Cidade: Belo Horizonte
 Estado: Minas Gerais
 Informações Adicionais: Prisma retangular de concreto medindo 0,20 m x 0,39 m e 0,46 m de altura, engastado numa coluna de concreto, sobre a laje do terceiro andar do prédio do INCRA. Possui no topo um dispositivo de centragem forçada padrão IBGE e uma chapa de identificação na lateral estampada SAT 93922. Na laje do terceiro andar do prédio do INCRA (Instituto Nacional de Colonização de Reforma Agrária), Avenida Afonso Pena, 3500, Bairro Cruzeiro - Cep.: 30130-00 - Belo Horizonte - MG.

3. Coordenadas oficiais

3.1. SIRGAS2000 (Época 2000.4)

Coordenadas Geodésicas			
Latitude:	- 19° 56' 30,84306"	Sigma:	0,001 m
Longitude:	- 43° 55' 29,62908"	Sigma:	0,001 m
Alt. Elip.:	974,855 m	Sigma:	0,006 m
Coordenadas Cartesianas			
X:	4.320.741,8192 m	Sigma:	0,004 m
Y:	-4.161.560,4725 m	Sigma:	0,004 m
Z:	-2.161.984,2456 m	Sigma:	0,002 m
Coordenadas Planas (UTM)			
UTM (N):	7.794.587,880 m		
UTM (E):	612.507,702 m		
MC:	-45		

Figura 25 - Relatório Descritivo - Estação MGBH – Coordenadas oficiais
 Fonte: IBGE (2020).

Já o Quadro 1 a seguir mostra os resultados da coordenadas UTM obtidas de todas as quatorze estações da RBMC, isto é, UTM Norte, UTM Este, Alturas (geométrica e elipsoidal) e MC (Meridiano Central), onde (1) possui as coordenadas oficiais dos relatórios descritivos e

(2) possui as coordenadas dos arquivos cortados em 4 horas de 31 de julho de 2020 que foram processadas e corrigidas pelo PPP do IBGE.

Coord. Oficiais IBGE em 2020 07 31				PPP IBGE dos arquivos de 2020 07 31 cortados em 4h				
Descritivo				EM 2000.4				
Marcos	UTM N (m)	UTM E (m)	Alt.Elíp.(m)	Arq. marco 4h	UTM N (m)	UTM E (m)	Alt.Geo.(m)	MC
GVA1	7912547,808	188333,126	178,589	gva12131_4h.20o	7912547,803	188333,101	178,600	-39
JAMG	8301179,038	632355,399	475,220	jamg2131_4h.20o	8301179,049	632355,380	475,250	-45
MGBH	7794587,880	612507,702	974,855	mgbh213_4h.20o	7794587,879	612507,704	974,850	-45
MGIN	7531309,953	363219,730	883,720	mgin2131_4h.20o	7531309,980	363219,712	883,710	-45
MGJF	7590987,497	668261,970	921,357	mgjf2131_4h.20o	7590987,504	668261,955	921,350	-45
MGJP	7804565,449	608362,491	831,804	mgjp2131_4h.20o	7804565,455	608362,481	831,770	-45
MGMC	8151469,818	621712,542	618,164	mgmc2131_4h.20o	8151469,838	621712,525	618,190	-45
MGMT	7927817,000	233867,337	912,469	mgmt2131_4h.20o	7927817,028	233867,320	912,490	-45
MGRP	7875564,471	380943,157	1123,485	mgrp2131_4h.20o	7875564,490	380943,142	1123,500	-45
MGTO	8020875,190	235263,799	390,566	mgto2131_4h.20o	8020875,195	235263,774	390,560	-39
MGUB	7905871,702	789027,535	869,241	mgub2131_4h.20o	7905871,731	789027,529	869,250	-51
MGV1	7617734,092	454956,774	957,192	mgv12131_4h.20o	7617734,113	454956,759	957,200	-45
UBE1	7909251,443	782656,473	791,735	ube12131_4h.20o	7909251,464	782656,462	791,740	-51
VICO	7702785,752	721757,712	665,955	vico2131_4h.20o	7702785,748	721757,685	665,950	-45

Quadro 1 - (1) Coord. Oficiais dos Relatórios Descritivos; (2) Coord. Corrigidas dos arquivos de 4 horas do PPP
Fonte: Autor (2021); IBGE (2020).

Considerando todas as coordenadas do Quadro 1 anterior, primeiramente, será considerado as diferenças das coordenadas planimétricas (UTM N e UTM E), para a avaliação da acurácia. Assim, o Quadro 2 a seguir mostra as diferenças de coordenadas dos relatórios descritivos com os resultados das coordenadas realizados no PPP, isto é, mostra a diferença das coordenadas vistas no Quadro 1.

DIFERENÇAS			
Descritivo - Em 2000.4			
Marcos	UTM N (m)	UTM E (m)	Alt.Geo.(m)
GVA1	0,005	0,025	-0,011
JAMG	-0,011	0,019	-0,030
MGBH	0,001	-0,002	0,005
MGIN	-0,027	0,018	0,010
MGJF	-0,007	0,015	0,007
MGJP	-0,006	0,010	0,034
MGMC	-0,020	0,017	-0,026
MGMT	-0,028	0,017	-0,021
MGRP	-0,019	0,015	-0,015
MGTO	-0,005	0,025	0,006
MGUB	-0,029	0,006	-0,009
MGV1	-0,021	0,015	-0,008
UBE1	-0,021	0,011	-0,005
VICO	0,004	0,027	0,005

Quadro 2 - Diferenças de coordenadas – relatórios descritivos vs. com os resultados do PPP
Fonte: Autor (2021); IBGE (2020).

De acordo com Teixeira (s/d), operações com vetores devem ser realizadas somente após a análise da posição relativa entre eles. No caso da planimetria, sabe-se que os vetores envolvidos são relativos às projeções horizontais e planas (desconsiderando a altimetria) para a definição de uma coordenada ou ponto topográfico. Assim, consideram-se aqui como vetores a acurácia obtida da diferença entre as coordenadas UTM Norte e Este do Relatório Descritivo e as coordenadas UTM Norte e Este do relatório corrigido (PPP). Considera-se assim que estes vetores são perpendiculares entre si, pois se trata de Norte vs. Este, sendo a fórmula de vetores dessa natureza igual a $d^2 = d_1^2 + d_2^2$. O resultado destes vetores servirá para a devida análise dos efeitos do multicaminhamento, retratada em um gráfico para melhor visualização.

Também serão consideradas as diferenças das altitudes coletadas no PPP e no relatório descritivo a fim de comparação do efeito do multicaminhamento, o que exigirá um gráfico a parte para melhor visualização.

Assim, todos os gráficos serão elaborados com o intuito de enriquecer a análise e a visualização dos dados coletados até aqui para avaliar se o multicaminhamento realmente afeta a acurácia das coordenadas levantadas em trabalho de Agrimensura com o uso de receptores GNSS.

4.2 Comparação dos dados coletados para análise do efeito do multicaminhamento

O controle de qualidade dos dados GNSS coletados pela RBMC, dentre eles informações sobre a propagação do sinal, mais especificamente a do efeito do multicaminhamento, pode ser feito pelo software TEQC. Como já visto, este último é capaz de resolver problemas de pré-processamento de toda a constelação GNSS desde que os dados se encontrem no formato RINEX (FAZAN et al. 2002). Observa-se que o multicaminhamento é um erro que não possui uma solução definitiva, e informações sobre sua incidência são importantes para avaliar a qualidade dos dados coletados, principalmente, neste trabalho de pesquisa, para a determinação de coordenadas durante um rastreamento com receptores GNSS em trabalhos de Agrimensura.

Segundo Fazan et al. (2002, p. 3), devido ao grande número de aplicações dos dados de estações ativas, como é o caso da RBMC, “é de extrema importância que tais dados passem por um controle de qualidade. Assim, outros usuários terão a sua disposição informações sobre a qualidade dos mesmos”.

Ainda segundo Fazan et al., (2002, p. 37) o software TEQC “realiza o controle de qualidade de uma estação por vez. Os resultados são apresentados na forma de arquivos”, com várias extensões, dentre elas: o MP1, ou efeito de multicaminhamento em L1 para observações dos códigos C/A ou P1 e, o MP2, ou efeito de multicaminhamento em L2 para observações do código P2.

Monico (2008) salienta as características e a lógica matemática de como o multicaminhamento pode ser medido, uma vez que não existe um padrão que possibilite tratar este efeito – que ocorre em situações geométricas adversas de acordo com cada local específico onde o rastreo é realizado. Em situações desfavoráveis, como já explicado, as observáveis fase da onda portadora e pseudodistância são degeneradas, afetando a qualidade do posicionamento.

Leick (1995 apud MONICO, 2008, p. 222) indica, em números, o impacto do multicaminhamento sobre a fase da onda portadora: “o erro máximo correspondente a aproximadamente um quarto do comprimento de onda, ou seja, 4,8 cm para a portadora L1”.

Para a portadora L2, o comprimento de onda é 24,44 cm, sendo o erro máximo para L2 também um quarto deste valor, isto é, 6,10 cm. Porém, considera-se aqui, somente a referência mais rigorosa da portadora L1, ou seja, 4,8 cm, ou um quarto do comprimento de onda de 19,05 cm (PARZZANINI, 2019).

Ainda segundo Monico (2008, p. 224), mesmo com condições diversas e arbitrárias em boa parte dos levantamentos com receptores GNSS – o que torna muito difícil elaborar um modelo desses efeitos nestas situações – algumas combinações de observáveis viabilizam a avaliação do nível dos sinais refletidos. Essas combinações lineares são:

$$MP1 = PD_{L1} - \left(1 + \frac{2}{\alpha-1}\right) \Phi_{L1} + \left(\frac{2}{\alpha-1}\right) \Phi_{L2}$$

$$MP2 = PD_{L2} - \left(\frac{2\alpha}{\alpha-1}\right) \Phi_{L1} + \left(\frac{2\alpha}{\alpha-1}\right) \Phi_{L2}$$

Sendo que $\alpha = (f1 / f2)^2$, propicia uma indicação da quantidade do efeito do multicaminhamento em uma dada estação, sendo que MP1 e MP2 dizem respeito, respectivamente, ao multicaminho em L1 e L2. Monico (2008, pág. 225) especifica que “embora MP1 seja melhor que o MP2, isso não significa necessariamente que o multicaminho em MP2 é maior que em MP1.

Para realizar o QC (Quality Control) ou “Controle de Qualidade” dos vários parâmetros do GNSS, entre eles, o do multicaminhamento nas extensões MP1 e MP2, pode-se consultar o

“tutorial de uso e noções básicas do TEQC” (UNAVCO, 2014). Lembrando que foi exatamente neste mesmo tutorial que se obteve as informações e o passo a passo de como se “cortar” um arquivo RINEX, isto é, de como escolher um intervalo de rastreo qualquer.

De modo geral, fez-se, para cada um dos arquivos delimitados em 4 horas de observações das 14 estações da RBMC o seguinte (novamente, usou-se a estação MGBH como exemplo):

- Abrir o DOS (escrever CMD no “executar” do Windows);
- Com o *Prompt* de Comando aberto, digitar “cd” e espaço;
- Copia-se e cola-se o caminho da pasta onde estão os arquivos, que neste caso foi:
C:\Users\Celeron\Desktop\Estações-RBMC-MG-dia.213 (clica-se “enter”);
- Uma vez dentro da pasta, digita-se o nome do *software* “teqc” espaço “+qc” espaço (e digita-se o arquivo que se quer analisar) e clica-se *enter*, assim como indicado abaixo:
C:\Users\Celeron\Desktop\Estações-RBMC-MG-dia.213>teqc +qc mgbh2131_4h.20o (enter)

Um arquivo nomeado, neste caso, mgbh2131_4h.20S, ou seja, com a extensão “S”, será criado dentro da pasta onde já se encontram seus arquivos originários. Ao abri-lo com o WordPad, pode-se ler os valores de MP1 e MP2 além de vários outros parâmetros do Controle de Qualidade. Por exemplo, no início do arquivo/documentos, pode-se observar um gráfico que descreve a qualidade da observação.

De acordo com o “tutorial de uso e noções básicas do TEQC” (UNAVCO, 2014), os valores de MP1 e MP2 estarão representados neste arquivo “S”, respectivamente, como MP12 e MP21. A Figura 26, mostra somente uma parte deste arquivo “S” gerado pelo TEQC, pois o mesmo é muito extenso. Novamente, toma-se como exemplo a estação MGBH com destaque para os valores do multicaminhamento em MP1 e MP2:

```

Clk|                                                                                               |Clk
+-----+-----+-----+-----+
08:00                                                                                               12:00
2020 Jul 31                                                                                       2020 Jul 31

*****
QC of RINEX file(s) : mgbh2131_4h.20o
*****

4-character ID      : MGBH (# = 41667M001)
Receiver type      : TRIMBLE NETR9 (# = 5750R51586) (fw = 5.45)
Antenna type       : TRM115000.00  NONE (# = 1551129618)

Time of start of window : 2020 Jul 31 08:00:00.000
Time of end of window   : 2020 Jul 31 12:00:00.000
Time line window length : 4.00 hour(s), ticked every 1.0 hour(s)
Observation interval    : 15.0000 seconds
Total satellites w/ obs : 43
NAVSTAR GPS SVs w/o OBS : 2  5 12 13 14 15 17 18 19 20 23 24
                          25 28 29
GLONASS SVs w/o OBS    : 5  6  7  8  9 10 16 20 21 22
Galileo SVs w/o OBS    : 2  3  5  6  7  8 10 13 15 16 17 18
                          20 22 23 24 25 28 29 30 32 34 35 36 37
                          38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50
                          51 52 53

Rx tracking capability : 44 SVs
Poss. # of obs epochs : 961
Epochs w/ observations : 961
Epochs repeated       : 0 (0.00%)
Complete observations  : 25928
Deleted observations   : 425
Obs w/ SV duplication  : 0 (within non-repeated epochs)
Moving average MP12    : 0.693961 m
Moving average MP21    : 0.354971 m
Moving average MP15    : 0.574524 m

```

Figura 26 - Arquivo “S” da estação MGBH. Destaque para os valores do multicaminhamento.
Fonte: IBGE (2020); UNAVCO (2014).

Nota-se que foram gerados arquivos com extensão “S” para todas as 14 estação da RBMC do Estado de Minas Gerais do dia 31 de julho de 2020, que tiveram suas observáveis cortadas em 4 horas, assim como foi feito no exemplo da Figura 26 acima. Repetindo que isso foi feito com o uso do *software* TEQC, objetivando obter informações relativas aos valores do multicaminhamento nas extensões MP1 e MP2. O Quadro 3 a seguir mostra os valores de MP1 e MP2 para todas essas 14 estações que foram obtidas exatamente do modo mencionado:

UNAVCO teqc +qc Controle de Qualidade Multicaminhamento		
Marcos RBMC	MP12 (m)	MP21 (m)
GVA1	0,077971	0,011048
JAMG	0,553286	0,379741
MGBH	0,693961	0,354971
MGIN	0,529207	0,423546
MGJF	0,506189	0,510838
MGJP	0,477086	0,567161
MGMC	0,637909	0,514010
MGMT	0,569913	0,411214
MGRP	0,537464	0,479944
MGTO	0,631441	0,425926
MGUB	0,659445	0,359883
MGV1	0,107722	0,140212
UBE1	0,106090	0,119790
VICO	0,582076	0,507359

Quadro 3 - Valores de MP1 e MP2 das estações da RBMC do Estado de MG.
Fonte: Autor (2021); IBGE (2020); UNAVCO (2014).

Já praticamente com todos os dados disponibilizados, pode-se começar a elaborar os gráficos de comparação entre a acurácia obtida em cada uma das coordenadas de 4 horas de observações das 14 estações da RBMC e os respectivos valores obtidos em MP1 e MP2, ou seja, do efeito medido do multicaminhamento pelo software TEQC.

Entretanto, para o gráfico de comparação planimétrico, ainda é necessário obter os valores dos vetores que geraram tal erro. Como já explicado anteriormente, os vetores planimétricos em questão estão representados pela acurácia obtida entre a diferença das coordenadas UTM Norte e UTM Este do Relatório Descritivo destas estações menos a as diferenças das coordenadas UTM Norte e Este do relatório corrigido (PPP). Lembrando novamente que estes vetores são perpendiculares entre si, pois se trata de Norte (N) versus Este (E), sendo a fórmula de vetores dessa natureza igual a $d^2 = d1^2 + d2^2$. O Quadro 4 a seguir mostra o resultado destes vetores, entendidos aqui, como o erro ou desvio normalmente obtido na obtenção de coordenadas:

DIFERENÇAS			FÓRMULA	ERRO (m)
Descritivo - Em 2000.4				
Marcos	UTM N (m)	UTM E (m)		
GVA1	0,005	0,025	$d^2 = \text{UTM N}^2 + \text{UTM E}^2$	0,025
JAMG	-0,011	0,019		0,022
MGBH	0,001	-0,002		0,002
MGIN	-0,027	0,018		0,032
MGJF	-0,007	0,015		0,017
MGJP	-0,006	0,010		0,012
MGMC	-0,020	0,017		0,026
MGMT	-0,028	0,017		0,033
MGRP	-0,019	0,015		0,024
MGTO	-0,005	0,025		0,026
MGUB	-0,029	0,006		0,030
MGV1	-0,021	0,015		0,026
UBE1	-0,021	0,011		0,024
VICO	0,004	0,027		0,027

Quadro 4 - Vetores / erros obtidos durante a obtenção de coordenadas das 14 estações da RBMC
Fonte: Autor (2021); IBGE (2020); UNAVCO (2014).

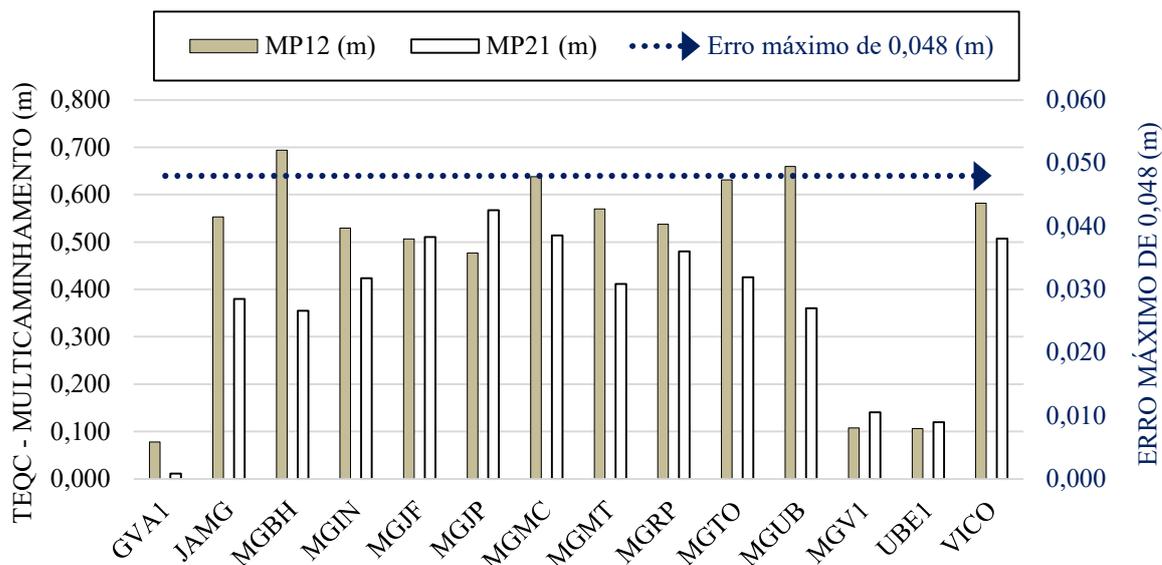
Os dados obtidos até aqui fazem parte do conteúdo de elaboração dos gráficos a seguir, que permitem avaliar se o multicaminhamento realmente afeta a acurácia das coordenadas levantadas em trabalhos de Agrimensura com o uso de receptores GNSS.

4.2.1 Gráfico Planimétrico – Multicaminhamento vs. Acurácia

Os gráficos a seguir tem como objetivo facilitar a análise de como o multicaminhamento afeta ou não a acurácia na determinação de coordenadas com o uso de receptores geodésico GNSS.

Os dados usados para a elaboração do Gráfico 1 a seguir, podem ser vistos no Quadro 3, que mostra os valores de MP1 e MP2, ou seja, do efeito do multicaminhamento em todas as 14 estações da RBMC, em confronto com o valor do impacto produzido pelo multicaminhamento sobre a medida de fase da onda portadora, descrito por Monico (2008), isto é, a do erro máximo de 0,048 metros, que corresponde por volta de um quarto do comprimento de onda para a portadora L1. (Este gráfico serve como referência de comparação para os Gráficos 2 e 3).

Gráfico 1 - Multicaminhamento X Erro máximo de 0,048 m

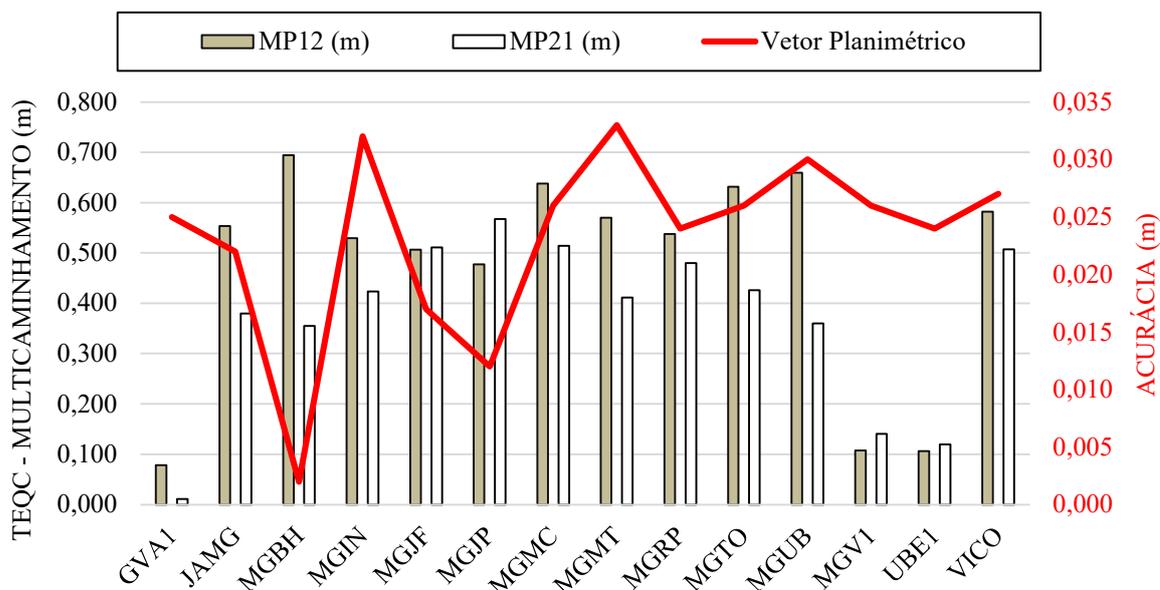


Bases da RBMC do ESTADO de MG em 2020 07 31

Fonte: AUTOR (2021); IBGE (2020); MONICO (2008); UNAVCO (2014)

Já o próximo Gráfico 2, confronta os dados do Quadro 3, que contém valores de MP1 e MP2, com os dados do Quadro 4, que possui os resultados dos vetores N e E, que representam o erro da acurácia em cada uma das 14 estações da RBMC de MG no dia 31 de julho de 2020.,

Gráfico 2 - Planimétrico - Multicaminhamento X Acurácia



Bases da RBMC do ESTADO de MG em 2020 07 31

Fonte: AUTOR (2021); IBGE (2020); MONICO (2008); UNAVCO (2014)

Em primeira análise, ao observar em conjunto os Gráficos 1 e 2, pode-se inferir que as acurácias dos vetores planimétricos das 14 estações da RBMC sofrem influência em maior ou menor quantidade dos efeitos do multicaminhamento.

Vale observar que praticamente todas as estações da RBMC apresentaram valores abaixo ou igual ao erro máximo de 0,048m, com exceção das estações MGBH e MGUB, que ultrapassaram este limite em MP1. Entretanto, a estação MGBH possui o melhor resultado da acurácia de todas as 14 estações, ou seja, de 0,002m. Já a estação MGUB apresenta acurácia de 0,030m, que é um valor próximo da maior parte dos resultados da acurácia das estações vistas no gráfico que, contudo, obtiveram valores de multicaminhamento abaixo do erro máximo.

Já as estações MGV1, UBE1 e GVA1, muito embora relataram valores baixos em MP1 e MP2, obtiveram acurácia próximo dos 0,030m, o que, teoricamente, é um contrassenso.

Assim, deduz-se que 05 das 14 estações analisadas não apresentaram correlação lógica entre o efeito do multicaminhamento e os valores da acurácia.

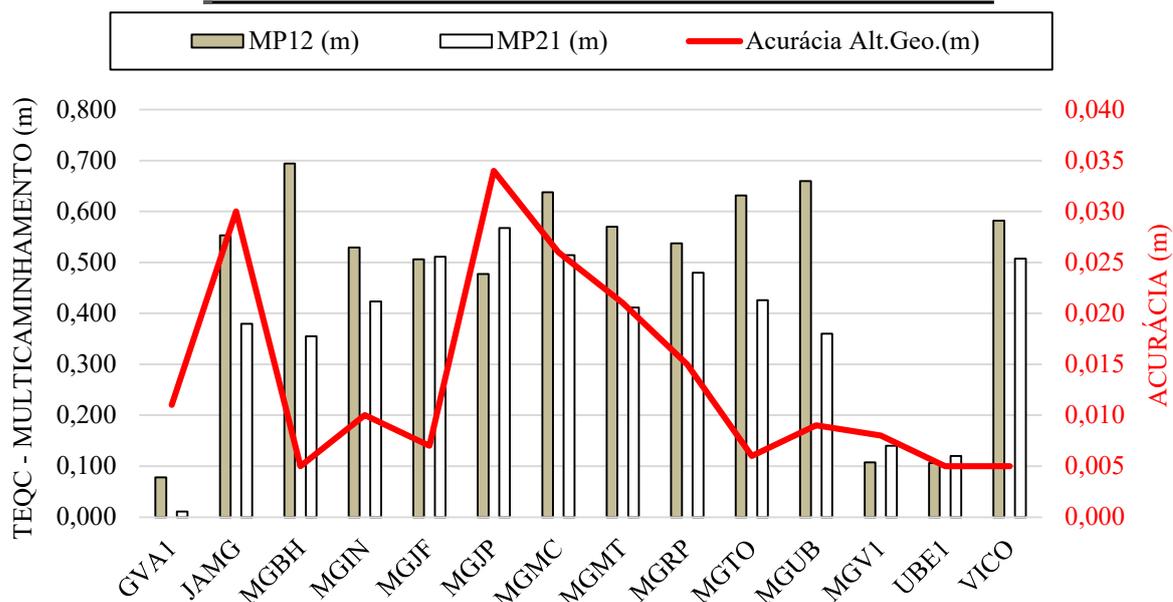
Todas as outras 09 estações possuem, aparentemente, uma correlação mais aproximada entre o multicaminhamento e os valores da acurácia, com valores à primeira vista próximos entre si. Todavia, pode-se observar que mesmo nestes casos não há um padrão e/ou sequência que mostre uma relação entre os valores obtidos do efeito do multicaminhamento (em MP1 e MP2) com os valores obtidos da acurácia, visto que ambos os valores variam consideravelmente entre essas 09 estações.

4.2.2 Gráfico Altimétrico – Multicaminhamento vs. Acurácia

Assim como o gráfico planimétrico, o gráfico altimétrico a seguir tem como objetivo facilitar e refinar ainda mais a análise de como o multicaminhamento afeta ou não a acurácia na determinação de coordenadas com o uso de receptores geodésicos GNSS.

Os dados usados para a elaboração do Gráfico 3 também podem ser vistos no Quadro 3, assim como no gráfico planimétrico, porém, em confronto com o Quadro 2, que contém dados da acurácia da altitude – agora sem a necessidade do cálculo do vetor, mas apenas pela diferença entre a altura elipsoidal do relatório descritivo menos a altura geométrica processada dos arquivos cortados em 4 horas pelo PPP das 14 estações da RBMC no dia 31 de julho de 2020.

Gráfico 3 - Altimétrico - Multicaminhamento X Acurácia



Bases da RBMC do ESTADO de MG em 2020 07 31

Fonte: AUTOR (2021); IBGE (2020); MONICO (2008); UNAVCO (2014)

Ao comparar o Gráfico 3 com o Gráfico 1 (que mostra o multicaminhamento em relação ao erro máximo de 0,048 m), pode-se notar que o mesmo também não apresenta uma correlação aparente que indique um padrão entre o efeito do multicaminhamento e a obtenção da acurácia. Os únicos resultados vistos que poderiam correlacionar os valores obtidos em MP1 e MP2 com um bom resultado da acurácia são as estações MGV1 e UBE1. Entretanto, todas as outras correlações destes valores são arbitrárias se analisadas em conjunto, pois boa parte das estações apresentam bons resultados da acurácia com altos valores do multicaminhamento, assim como a estação GVA1 apresenta uma acurácia relativamente alta versus um valor do multicaminhamento muito baixo. Considerando tais resultados, pode-se deduzir que não há uma relação, demonstrada no Gráfico 3, de que o efeito do multicaminhamento afeta, de fato, a obtenção de bons ou maus resultados da acurácia ao se determinar coordenadas geodésicas.

4.3 Recomendação de técnicas e métodos para prevenir o multicaminhamento

Considerando os resultados desta pesquisa, obtidos dentro do universo dos dados observados e da metodologia adotada, não foi possível constatar que o efeito do multicaminhamento afeta, de fato, a acurácia ou mesmo a precisão. Por isso, a recomendação de técnicas e métodos para prevenir o multicaminhamento ficarão restritas a literatura

especializada disponível. Dentre elas, vale destacar duas situações distintas discutidas aqui, isto é, a implantação de marcos para uma rede geodésica de referência e trabalhos de levantamentos do dia a dia com o uso de receptores GNSS.

Assim, ao implantar uma rede geodésica de apoio, a exemplo da RBMC, deve-se evitar levantamentos em lugares propícios a essa ocorrência, ou seja, é recomendável local o marco em locais mais altos, abertos e livres e/ou acima de estruturas, inclusive longe de espelhos d'água, que geram o efeito do multicaminhamento (MONICO, 2008). Ressalta-se, que neste tipo de trabalho a escolha de locais mais adequados é normalmente possível e maleável.

No entanto, sabe-se que no dia a dia das práticas de um Topógrafo e/ou de um Engenheiro Agrimensor, a escolha ideal para realizar um levantamento não é sempre possível, pois na maior parte dos casos, especialmente em obras ou áreas florestais, a presença de edificações, árvores e ou estruturas e/ou lugares propícios a esse efeito são comuns. Nestes casos, é aconselhável realizar maior tempo de rastreamento, a fim de obter melhores resultados de precisão. Observa-se, contudo, que de acordo com a metodologia aplicada neste estudo não é possível afirmar que esse maior tempo de rastreamento terá um impacto necessariamente positivo sobre a acurácia.

No exemplo desta pesquisa, as precisões das coordenadas foram verificadas diretamente nos relatórios do PPP para cada uma das 14 estações processadas. Este parâmetro pode ser verificado no campo “Coordenadas SIRGAS” e se chama Sigma (95%), ou seja, é um desvio-padrão dado em metros, que “representa a confiabilidade interna do processamento e não a exatidão da coordenada” (IBGE, 2020). Outra informação fornecida em todo relatório gerado pelo PPP do IBGE se refere a “Precisão esperada para um levantamento estático (metros)”, sendo que, neste caso, o tipo de receptor usado nas estações da RBMC é de duas frequências e os parâmetros esperados para um levantamento planimétrico (Norte e Este) e altimétrico (altura) são, respectivamente, os seguintes:

- Após 1 hora de rastreamento = 0,040 e 0,040;
- Após 2 horas de rastreamento = 0,017 e 0,018;
- Após **4 horas** de rastreamento = **0,009 e 0,010** (que é o caso desta pesquisa);
- Após 6 horas de rastreamento = 0,005 e 0,008.

Assim, pode-se verificar no Quadro 5 a seguir, que os resultados obtidos de todas as 14 estações da RBMC não foram afetadas e se encontram dentro da precisão esperada após 4 horas de rastreo.

PPP-IBGE-Bases-RBMC / MG em 31.07.2020			
SIGMA (95%) (m)			
Marcos	UTM N (m)	UTM E (m)	Alt.Geo.(m)
GVA1	0,003	0,006	0,009
JAMG	0,002	0,004	0,008
MGBH	0,003	0,006	0,010
MGIN	0,003	0,005	0,009
MGJF	0,003	0,006	0,010
MGJP	0,003	0,006	0,009
MGMC	0,003	0,007	0,009
MGMT	0,003	0,004	0,009
MGRP	0,002	0,005	0,009
MGTO	0,003	0,006	0,009
MGUB	0,003	0,005	0,009
MGV1	0,003	0,006	0,010
UBE1	0,003	0,004	0,009
VICO	0,002	0,004	0,009

Quadro 5 -Precisão obtida das estações da RBMC de MG em 31/07/2021.

Fonte: IBGE (2020)

Em contraponto aos bons resultados vistos no Quadro 5, não foi possível verificar se este mesmo tempo de rastreo exerceu qualquer influência sobre aos valores obtidos das acurácias.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho tinha como objetivo geral expor as causas e a dinâmica de erros de propagação de sinal e, também, apresentar métodos de quantificação deste efeito em arquivos de dados coletados durante a operação com receptores GNSS, a fim de analisar se o multicaminhamento afeta ou não bons resultados na obtenção de coordenadas.

O objetivo geral da pesquisa foi atingido, primeiramente, através de uma pesquisa histórica a fim de contextualizar a tecnologia GNSS, o que tornou possível apresentar as características de funcionamento deste sistema e, conseqüentemente expor seus diversos tipos de erros, dentre eles e mais especificamente, o do multicaminho.

Em seguida, foi apresentado o *software* TEQC, capaz de editar e também prover diversas informações sobre os dados coletados com receptores GNSS, como o controle de qualidade, dado em números, do multicaminhamento nas portadoras L1 e L2.

Os dados escolhidos para a análise foram planejados inicialmente para serem colhidos em campo, porém, devido a pandemia do COVID-19, optou-se por baixar os arquivos RINEX das 14 estações da RBMC/IBGE do Estado de MG no dia 31 de julho de 2021. Para todos os arquivos de dados destas estações foram escolhidos o intervalo de 4 horas de rastreo, e os resultados destas coordenadas UTM, de 4 horas, foram processados pelo PPP do IBGE; em sequência, foram comparadas/subtraídas com os resultados das coordenadas oficiais, também em UTM, disponibilizadas pelo relatório descritivo do IBGE do ano de 2020. O resultado dessa diferença de coordenadas mais o cálculo do vetor resultante proporcionou o valor da acurácia obtida para cada uma dessas estações. Com todos esses dados em mãos foi possível comparar, com a ajuda de gráficos, como o multicaminhamento, aqui quantificado em números, afetou o valor da acurácia para cada uma dessas 14 estações.

Os resultados apontaram não ser possível associar os valores obtidos da acurácia das estações escolhidas da RBMC com o efeito do multicaminhamento quantificado pelo TEQC. Ou seja, baseado nos dados obtidos e na metodologia utilizada, não foi possível constatar a influência do efeito do multicaminhamento nem na precisão nem na acurácia. Pode-se sugerir que a não constatação do que foi planejado por essa pesquisa seja em função de alguns fatores, como a escolha das estações, do horário e da época ou ainda em função da geometria dos satélites no intervalo de tempo de rastreo escolhido nesta pesquisa. Pode-se ainda sugerir que os filtros para a redução do multicaminhamento, presentes nos equipamentos mais atuais e modernos, realmente funcionam.

Portanto, este trabalho não se esgota em si mesmo. Assim, sugere-se estudos posteriores que demonstrem quais foram as condições ou tipos de erros que levaram a estes resultados da acurácia segundo os parâmetros definidos nesta pesquisa, como, por exemplo, constatar se os fabricantes conseguiram reduzir o multicaminhamento por filtros ou algoritmos.

6 REFERÊNCIAS

ALTMAN, M. **Hoje na História: Heinrich Hertz propõe uma teoria de ondas eletromagnéticas**. Opera Mundi – UOL – São Paulo, SP. 2010. Disponível em: <<https://operamundi.uol.com.br/politica-e-economia/3236/hoje-na-historia-heinrich-hertz-propoe-uma-teoria-de-ondas-eletromagneticas>>. Acesso em 04 mai. 2020.

AMADEI, J. R. P.; FERRAZ, V. C. T. **Guia para elaboração de referências: ABNT NBR 6023:2018**. Bauru, 2019. 54 p. Disponível em: <<https://usp.br/sddarquivos/aulasmetodologia/abnt6023.pdf>>. Acesso em 30 mar. 2020.

ANDRADE, J. Bittencourt de. **Fotogrametria**. Ed. SBEE. Curitiba, Brasil: 1998.

AYRES, M. **Entenda como funciona o sistema GPS**. UOL. Notícias. Tecnologia. 2008. Disponível em: <<https://tecnologia.uol.com.br/ultnot/2008/01/15/ult4213u295.jhtm>>. Acesso 01 mai. 2020.

BALAN, W. C. **Tecnologia em Rádio e TV. Cap. 3 – Espectro de Frequência**. UNESP. S/d. Disponível em: <http://willians.pro.br/frequencia/cap3_espectro.htm>. Acesso em 24 mar. 2020.

BEZERRA, Juliana. **Astrolábio – Importância, origem, funcionamento, partes**. Astronomia. TodaMatéria: conteúdos escolares. 25 out. 2018. Disponível em: <<https://www.todamateria.com.br/astrolabio/>>. Acesso em 13 fev. 2020.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Agrário. **Manual Técnico de Posicionamento: georreferenciamento de imóveis rurais**. INCRA. 1ª Edição. Brasília, DF, 2013. Disponível em: <http://www.incra.gov.br/sites/default/files/uploads/estrutura-fundiaria/regularizacao-fundiaria/certificacao-de-imoveis-rurais/manual_tecnico_de_posicionamento_1_edicao.pdf>. Acesso em 07 mar. 2020.

BUENO, Régis. **O efeito do multicaminhamento na determinação de coordenadas no posicionamento por satélites**. MundoGeo. Agrimensura. 04 dez. 2010. Disponível em: <<https://mundogeo.com/2000/01/01/o-efeito-do-multicaminhamento-na-determinacao-de-coordenadas-no-posicionamento-por-satelites/>> Acesso em 22 fev. 2020.

CABRAL, P. **Erros e Incertezas nas Medições**. IEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto. Portugal, Porto – julho 2014. Disponível em: <<http://www.peb.ufrrj.br/cursos/ErrosIncertezas.pdf>>. Acesso em 25 mai. 2020.

CARARO, A. C.; FERREIRA, L. D. D.; AFONSO, G. B. **Correções Relativísticas sobre as Medidas de Tempo PGS**. UFPR. Bol. Ciênc. Geod., sec. Artigos, Curitiba, v. 16, no 1, p.156-176, jan-mar, 2010. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/bcg/article/view/17250>>. Acesso em 01 mar. 2020.

CARVALHO, G. N.; BARBOSA, L. G.; VARGAS, R. M. de A.; RODRIGUES, T. L. **Influência do Multicaminhamento de Sinais dos Satélites GNSS e do Tempo de Rastreamento na Precisão do PPP para Vértices de Limites da NTGIR**. Revista Agrogeoambiental, Pouso

Alegre, v. 10, n. 1, mar. 2018. Disponível em: <file:///C:/Users/Celeron/Downloads/967-7025-2-PB.pdf>. Acesso em 25 de mar. 2020.

CAVALCANTE, H. R. G. **Aquisição de frequência em sinais de satélites de baixa órbita por meio do critério da máxima correntropia**. 2018. Dissertação (Mestrado) – UFRN. Centro de Tecnologia, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Natal, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/25102/1/HugoRafaelGoncalvesCavalcante_DISSERT.pdf>. Acesso em 30 abr. 2020.

CHCNAV. Agosto 2018. 2 ilustrações. Disponível em: <https://www.chcnav.com/product-detail/i80-gnss>

PERÍODO ORBITAL. In: CREF - Centro de Referência para o Ensino de Física. UFRGS. S/d. Disponível em: <<http://cref.if.ufrgs.br/~maikida/periodoorbital.htm>>. Acesso em 03 mai. 2020.

COPPENS, T. **The Astrolabe: How to Make One and Understanding Its Use**. Updated on February 7, 2020. 1 ilustração. Disponível em: <<https://owlcation.com/stem/History-of-the-Astrolabe-and-How-to-Make-One>>. Acesso em 04 mai. 2020.

DELAZARI, L. S. **GNSS muito além do mapeamento**. Seções - Revistas-Artigos. MundoGeo. 22/08/2012. Disponível em: <<https://mundogeo.com/2005/06/30/gnss-muito-alem-do-mapeamento/>>. Acesso em 04 mai. 2020.

DUTTON, J. A. **Lesson 10: Basic GNSS and the Future – GEOG 862**. Penn State College of Earth and Mineral Sciences – e-Education Institute. 2018. Disponível em: <<https://www.e-education.psu.edu/geog862/print/110.html>>. 10 mai. 2020.

EMBRAPA. **Galileo Positioning System**. Centro Nacional de Pesquisa de Monitoramento por Satélite. 2013. Disponível em: <https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/sat/conteudo/missao_galileo.html>. Acesso em 12 mai. 2020.

EMBRAPA. **Global Navigational Satellite System – GLONASS**. Satélites de Monitoramento. Fonte: Spacecorp, 2013. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/glonass>>. Acesso em 17 abr. 2020.

ESA. 20 dez. 2005. 1 ilustração. Disponível em: <https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2005/12/GIOVE-A_ready_to_be_enclosed_in_the_rocket_nose_cone>. Acesso em 12 mai. 2020.

EUROPEAN GNSS AGENCY. **What is multipath? Multipath errors reduce positioning accuracy**. GSA – European Global Navigation Satellite System. 20 nov. 2017. 1 vídeo (53 segundos). Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=IUTM76GLzMI>>. Acesso em 21 fev. 2020.

FAN, K. K.; DING, X. I. **Estimation of GPS Carrier Phase Multipath Signals Based on Site Environment**. Journal of Global Positioning System (2006) Vol. 5, No. 1-2:22-28. Department

of Land Surveying & Geo-Informatics, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong. Disponível em: <<https://www.scirp.org/html/328.html>>. Acesso em 15 mai. 2020.

FAZAN, J. A.; MONICO, J. F. G.; CAMARGO, P. O. **Controle de Qualidade dos Dados GPS da RBMC**. Anais do Simpósio Brasileiro de Geomática, Presidente Prudente - SP, 9-13 de julho de 2002. p.042-051. UNESP. Disponível em: <http://www2.fct.unesp.br/departamentos/cartografia/eventos/2002_I_SBG/htm/artigos/pdf/A_084.pdf>. Acesso em

FIGUEIRÊDO, D. C. **Curso Básico de GPS**. Apostila – CONAB – setembro de 2005.

FILHO, K. S. O. F.; SARAIVA, M. F. O. **Astronomia e Física**. UFRGS – Departamento de Astronomia do Instituto de Física. 2017. ISBN 978-85-7861-485-0. Disponível em: <<http://astro.if.ufrgs.br/>>. Acesso em 03 mai. 2020.

FREE3D. GPS Satellite Navstar Block IIF Model 3d. S/d. 1 ilustração. Disponível em: <<https://free3d.com/3d-model/gps-satellite-navstar-block-iif-5956.html>>. Acesso em 06 mai. 2020.

GEODÉSIA. In: DICIO. Definições e significados. 2009-2020. Disponível em: <<https://www.dicio.com.br/geodesia-2/>>. Acesso em 17 abr. 2020.

GERHARDT, E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de pesquisa**. Coordenado pela UAB/UFRGS e pelo curso de Graduação Tecnológica – Planejamento e Gestão para-0071-8 o Desenvolvimento Rural da SEAD/UFRGS. – Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009. ISBN 978-85-386. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/cursopgdr/downloadsSerie/derad005.pdf>>. Acesso em 22 mai. 2020.

GESTEIRA, H. M. **O astrolábio, o mar e o Império**. Hist. cienc. saude-Manguinhos vol.21 no.3 Rio de Janeiro jul./set. 2014. Versão impressa ISSN 0104-5970. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-59702014000301011&lng=pt&tlng=pt#aff2>. Acesso em 14 fev. 2020

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. – 6. Ed. – São Paulo: Atlas, 2008. ISBN 978-85-224-5142-5. Disponível em: <<https://ayanrafael.files.wordpress.com/2011/08/gil-a-c-mc3a9todos-e-tc3a9nicas-de-pesquisa-social.pdf>>. Acesso em 23 mai. 2020.

GPS.ORG. 8 nov. 2018. 1 ilustração. Disponível em: <<https://www.gps.gov/systems/gps/control/>>. Acesso em 12 mai. 2020.

GPS.ORG. Official U.S. **Government Information About the Global Positioning System (GPS) and Related Topics**. U.S. Air Force. Website host: NOAA – Page last modified on April, 22, 2020. Disponível em: <<https://www.gps.gov/systems/gps/space/>>. Acesso em 06 mai. 2020.

HELERBROCK, R. **Ondas de rádio**. In: Mundo Educação – Física. Magnetismo. S/d. Disponível em: <<https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/ondas-radio.htm>>. Acesso em 04 mai. 2020.

HEXAGON. NOVATEL. **An Introduction to GNSS. GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo and other Global Navigation Satellite System.** 2020. Disponível em:

<<https://www.novatel.com/an-introduction-to-gnss/chapter-1-gnss-overview/>>. Acesso em 27 fev. 2020.

HILLGER, D; TOTH, G. **Environmental-observing.** (Earth-observation). Satellite's list. Colorado State University, 2001-2020. Updated: 2020-04-14. Disponível em:

<<http://rammb.cira.colostate.edu/dev/hillger/environmental.htm>>. Acesso em 17 abr. 2020.

HOFFMANN, D.; BÚRIGO, E. BARRETO, M. M.; DIAS, M. T.; FAGUNDES, F.; **Geometria e Trigonometria na Resolução de Problemas.** Curso de Especialização e Prática Pedagógica II. “Matemática, Mídias Digitais e Didática”. UAB/MEC. UFRS, 2009. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/espmat/disciplinas/geotri/>>. Acesso em 18 fev. 2020.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. **GPS Theory and Practice.** Ed. SpringerVerlag Wien. 5ed., 2001. Disponível em:

<<https://zoo.cs.yale.edu/classes/cs434/cs434-2017-spring/readings/gps.pdf>>. Acesso em 17 abr. 2020.

IBGE. 2020. 1 ilustração/mapa. Disponível em:

<https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rbmc/cartogramas/RBMC_2020_01.pdf>. Acesso em 21 mar. 2021.

IBGE. **Especificações e Normas para Levantamentos Geodésicos Associados ao Sistema Geodésico Brasileiro.** Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão – Diretoria de Geociências – Coordenação de Geodésia. Rio de Janeiro/RJ – 2017. Disponível em: <file:///C:/Users/NOTEBOOK/Downloads/normas_levantamentos_geodesicos.pdf>. Acesso em 15 mai. 2020.

IBGE. **Instruções para homologação de estações estabelecidas por outras instituições.** DGC-CGED. Rio de Janeiro, RJ, outubro/2018. Disponível em:

<http://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/outros_documentos_tecnicos/homologacao_marcos/homologacao_de_marcos.pdf>. Acesso em 27 mai. 2020.

IBGE. **O que é Cartografia.** GNSS. Atlas Escolar: conceitos gerais. 2020. Disponível em:<<https://atlascolar.ibge.gov.br/conceitos-gerais/o-que-e-cartografia/sistema-global-de-navegac-a-o-por-sate-litess.html>>. Acesso em 03 mar. 2020.

IBGE. **O que é PPP.** Serviço online para pós-processamento de dados GNSS – IBGE-PPP. 2021. Disponível em:

<<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/servicos-para-posicionamento-geodesico/16334-servico-online-para-pos-processamento-de-dados-gnss-ibge-ppp.html?=&t=o-que-e>>. Acesso em 28 mar. 2021.

IBGE. **O que é RBMC.** Geociências/Posicionamento geodésico/Redes Geodésicas. 2021. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/16258-rede-brasileira-de-monitoramento-continuo-dos-sistemas-gnss-rbmc.html?=&t=o-que-e>>. Acesso em 21 mar. 2021.

IBGE. **Redes Geodésicas** (definição). Geociências. Posicionamento geodésico. (s/d). Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica.html>>. Acesso em 30 abr. 2020.

INPE. **Nano Satélites - CONASAT**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. 2011. Disponível em: <<http://www.crn.inpe.br/conasat1/nanosatt.php>>. Acesso em 30 abr. 2020.

JEREZ, G. O.; ALVES, D. B. M. **GLONASS: Revisão teórica e estado da arte**. R. bras. Geom., Curitiba, v. 6, n. 2, p. 155-173, abr/jun. 2018. Disponível em: <[file:///C:/Users/NOTEBOOK/Downloads/7368-29724-3-PB%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/NOTEBOOK/Downloads/7368-29724-3-PB%20(2).pdf)>. Acesso em: 06 mai. 2020.

JUNIOR, E. S. da F. **Sistema de Posicionamento por Satélites Artificiais – Conceitos e Aplicações**. Apostila. Escola Politécnica da USP. Laboratório de Topografia e Geodésia. São Paulo, SP. 2010

JÚNIOR, J. S. S. "**Satélites artificiais**". Brasil Escola. (S/d). Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/fisica/satelites-artificiais.htm>>. Acesso em 30 abr. 2020.

KILROY, B. **Resource Applications of GPS Technology**. Technology & Development Program. United States Department of Agriculture Forest Service. 9871-2324-MTDC August, 1998. Disponível em: <<https://www.fs.fed.us/t-d/pubs/htmlpubs/htm98712324/index.htm>>. Acesso em 17 abr. 2020.

KÖCHE, J. C. **Fundamentos de Metodologia Científica: teoria da ciência e iniciação à pesquisa**. – Petrópolis, RJ: Vozes, 2011. ISBN 85.236.xxxx-x – Edição digital. Disponível em: <http://www.brunovivas.com/wp-content/uploads/sites/10/2018/07/K%C3%B6che-Jos%C3%A9-Carlos0D0AFundamentos-de-metodologia-cient%C3%ADfica_-teoria-da0D0Aci%C3%A0ncia-e-inicia%C3%A7%C3%A3o-%C3%A0-pesquisa.pdf>. Acesso em 22 mai. 2020

LAGO, I. F. *et al.* **GPS e GLONASS: Aspectos Teóricos e Aplicações Práticas**. Bol. Ciênc. Geod., sec. Artigos, Curitiba, v. 8, no 2, p.37-53, 2002. ISSN: 1982-2170. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/bcg/article/view/1419/1173>>. Acesso em: 09 mai. 2020.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003. Disponível em: <http://docente.ifrn.edu.br/olivianeta/disciplinas/copy_of_historia-i/historia-ii/china-e-india/view>. Acesso em: 22 mai. 2020.

LANGENDOLFF, A; PELLEGRINI, G. **Fundamentos de Cartografia e o Sistema de Posicionamento Global – GPS**. Curso Técnico em Geoprocessamento - Colégio Politécnico da UFSM – Santa Maria, RS. 2008.

MARQUES, H. A.; MONICO, J. F. G.; AQUINO, M.; ROSA, G. P. dos Santos. **Efeitos de segunda e terceira ordem da ionosfera no posicionamento GNSS no Brasil**. Rev. Bras. Geof. vol.27 no.3 São Paulo July/Sept. 2009. ISSN 0102-261X. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-261X2009000300005>. Acessado em 14 fev. 2020.

MAROHOM, H. R. 20 mar. 2018. 1 ilustração. Disponível em: <https://unstats.un.org/unsd/geoinfo/UNGEGN/docs/Training/Manila/day%202/08_MAROHOM_GNSS_Demo.pdf>. Acesso em 10 mai. 2020.

MENDONÇA, C. H. C. **Detecção e Correção de Perdas de Ciclos para Dados GPS de Tripla Frequência**. Dissertação (mestrado) – UNES – Presidente Prudente – SP. 2019. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/183236>>. Acesso em 08 mai. 2020.

MÉTRICA TECNOLOGIA. **Processamento GNSS**. 04 fev. 2019. 20 vídeos. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=hD6ckq7u96I&list=PLLP_y9YAyslBAPO9BU_k2iESIwmhHyR2t>. Acesso em 11 fev. 2020.

MOLIN, J. P. **Sistemas de Posicionamento**. 2010. Projeto Apostila. DER-ESALQ/USP.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. 2ª edição. São Paulo: Editora UNESP, 2008. ISBN 978-85-7139-788-0.

MONICO, J. F. G. **Pseudodistância e Fase da Onda Portadora**. Alta acurácia. MundoGeo, 14 abr. 2011. Disponível em: <<https://mundogeo.com/2010/05/05/pseudodistancia-e-fase-da-onda-portadora/>>. Acesso em 28 fev. 2020.

MOREIRA, A. J. C. **Técnicas de modulação**. Departamento de Sistema de Informação. Universidade do Minho. Fev./1999. Disponível em: <<http://www3.dsi.uminho.pt/adriano/Teaching/Comum/TecModul.html>>. Acesso em 26 fev. 2020.

MORESI, E. **Metodologia da Pesquisa**. Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Gestão do Conhecimento e Tecnologia da Informação. UCB – PRPG. Brasília – DF. Mar. 2003. Disponível em: <<http://www.inf.ufes.br/~pdcosta/ensino/2010-2-metodologia-de-pesquisa/MetodologiaPesquisa-Moresi2003.pdf>>. Acesso em 24 mai. 2020.

NANOSEGUNDO. In: DI – Dicionário informal. Definições e outros. 08/10/2018. Disponível em: <<https://www.dicionarioinformal.com.br/nanosegundo/>>. Acesso em: 04 mai. 2020.

HARBAUGH, J. **Deep Space Atomic Clock**. 5 mar. 2018. 1 ilustração. Disponível em: <https://www.nasa.gov/mission_pages/tm/clock/deep-space-atomic-clock>. Acesso em 09 mai. 2020.

NOVATEL. 2009. 1 ilustração. Disponível em: <http://www.ppmgmbh.de/pdf_d/GPS%20Hardware/GPS%20Antennen/NovAtel%20Antennen.pdf>. Acesso em 14 mai. 2020.

NOVATEL. PPP vs. RTK. **Intro to Precise Positioning. Autonomy & Positioning – Assured**. 2017. 3 vídeos. Disponível em: <https://www.youtube.com/playlist?list=PLDQ4NEkkthCvo_J31uz1zb7G4YBpAq0T3>. Acesso em 25 mar. 2020.

NOVATEL INC. **An Introduction to GNSS**. 2015 Second Edition – e-book. ISBN: 978-0-9813754-0-3. Disponível em: <<https://novatel.com/an-introduction-to-gnss>>. Acesso em 06 mai. 2020.

OGAJA, C.; HEDFORS, J. **TEQC multipath metrics in MATLAB**. GPS Solutions, Volume 11, Number 3, July, 2007, pages 215-222. Geoscience Australia and Uppsala University, Sweden. Disponível em: <<file:///C:/Users/NOTEBOOK/Downloads/multipath-metrics.pdf>>. Acesso em 15 mai. 2020.

OLIVEIRA, J. C. de. **Conceitos Básicos sobre Posicionamento por Satélites Artificiais**. XIV Curso de uso escolar de sensoriamento remoto no estudo do meio ambiente. INPE. Julho 2011. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/vcsr/files/Apresentacao_GPS.pdf>. Acesso em 30 abr. 2020

OLIVEIRA, J. César de. **Novas Tecnologias para Agrimensura**. Palestra – Semana da Engenharia. FEAMIG. Belo Horizonte, 13 de maio de 2019.

PAIVA, J. A. G. **Efeitos da Ionosfera de Baixas Latitudes no GPS – SBAS (Global System Positioning –Space Based Augmentation System)**. Rio de Janeiro, 2004. 96p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Disponível em: :<https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/5863/5863_4.PDF>. Acesso em 11 mai. 2020.

PARZZANINI, Pedro Donizete. **Métodos de Posicionamento GNSS**. Apostila – Notas de aula. FEAMIG. Belo Horizonte, 2019.

PERONI, R. Fundamentos de GPS. Apostila – **Informática aplicada a Geografia**. FINOM – Faculdade do Noroestes de Minas, 2004.

PEREIRA, L. A. **Global Navigation Satellite System – GNSS**. Apostila. Curso de Geoprocessamento para Gestão Urbana e Cadastro Rural. UNILINS – Lins, SP. 2010.

PERÍODO ORBITAL (definição). *In*: Centro de Referência para o Ensino de Física – CREF. UFRS (S/d). Disponível em: <<http://cref.if.ufrgs.br/~maikida/periodoorbital.htm>>. Acesso em 05 mar. 2020.

PETRIN, Natália. **Astrolábio**. Estudo prático, Terra Educação, 02 nov. 2015. Disponível em: <<https://www.estudopratico.com.br/astrolabio/>>. Acesso em 14 fev. 2020.

PFOST, D. *et al.* **Precision Agriculture: Global Positioning System (GPS)**. Water Quality – University of Missouri – USA, 1998. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/1e76/f64176553c7cddf76b4a8fbb47b8f6cd0dee.pdf?_ga=2.242222724.748610680.1588807686-973687199.1588531491>. Acesso em 07 mai. 2020

ROSA, G. P. dos Santos. **Análise de séries temporais de coordenada com GPS: uma proposta metodológica para eliminação de efeitos sazonais**. 2008[s.n]. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia. Presidente Prudente, 2008. Disponível em: <file:///C:/Users/Celeron/Downloads/rosa_gps_me_prud.pdf>. Acesso em 29 fev. 2020.

SANTOS, Marco Aurélio da Silva. **"Efeito Doppler"**. Brasil Escola. S/d. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/fisica/o-efeito-doppler.htm>>. Acesso em 30 abr. 2020.

SEEBER, G. **Satellite geodesy: foundations methods, and applications**. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 2003, 612 p. extended ed. Disponível em: <<http://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-seeber-g-satellite-geodesy-2003.pdf>>. Acesso em 16 abr. 2020.

SEVERINO, A. J. **Metodologia do trabalho científico**. – 23. ed. rev. e atual. – São Paulo: Cortez, 2007. ISBN 978-85-249-1311-2. Disponível em: <[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3480016/mod_label/intro/SEVERINO_Metodologia_a_do_Trabalho_Cientifico_2007.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3480016/mod_label/intro/SEVERINO_Metodologia_do_Trabalho_Cientifico_2007.pdf)>. Acesso em 23 mai. 2020.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. – 3ª edição rev. atual. – Florianópolis: Laboratório de Ensino a Distância da UFSC, 2001. Disponível em: <<http://cursos.unipampa.edu.br/cursos/ppgcb/files/2011/03/Metodologia-da-Pesquisa-3a-edicao.pdf>>. Acesso em 22 mai. 2020.

SILVA, Daniel Neves. **"Sputnik 1"**. Brasil Escola. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/historia/sputnik.htm>>. Acesso em 17 abr. de 2020.

SILVEIRA, G. C. **Influência da Geometria dos Satélites na Precisão das Coordenadas Geodésicas Obtidas com o Sistema GPS**. 2008. 170 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18143/tde-28042009-171231/publico/Silveira2008.pdf>>. Acesso em 04 mai. 2020.

SOARES, Luís Antônio. **Artigo: erros mais comuns ao realizar um levantamento topográfico**. Notícias. Agrimensura e Cartografia. MundoGeo, 19 jun. 2018. Disponível em: <<https://mundogeo.com/2018/06/19/artigo-erros-mais-comuns-ao-realizar-um-levantamento-topografico/>>. Acesso em 05 mar. 2020.

SOUZA, E. M.; POLEZEL, W. G. C.; MONICO, J. F. G. **Avaliação do nível de multicaminhamento no posicionamento relativo GPS e sua atenuação através da análise de multiresolução**. Bol. Ciênc. Geod., sec. Artigos, Curitiba, v. 11, no 2, p. 221-234, jul-dez, 2005. Disponível em: <<file:///C:/Users/Celeron/Downloads/4393-9621-1-PB.pdf>>. Acesso em 15 mar. 2020.

SUCI, F. M.; FAGGION, P. L. **Análise da Estabilidade da Rede Geodésica de Monitoramento da UHE Salto Caxias a Partir de Dados GPS**. UFPR – Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Setor de Ciências da Terra - Departamento de Geomática – Bol. Ciênc. Geod., sec. Artigos, Curitiba, v. 18, no 4, p.564-582, out-dez, 2012. Disponível em: <<https://www.scielo.br/pdf/bcg/v18n4/a04v18n4.pdf>>. Acesso em 01 mai. 2020.

TEIXEIRA, M. M. **Operações com vetores**. In: Brasil Escola. S/d. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/fisica/operacoes-com-vetores.htm>>. Acesso em 26 mar. 2021.

TEIXEIRA, N. N.; FERREIRA, L. D. D. **Análise da Confiabilidade de Redes Geodésicas**. UFPR – Curso de Pós-graduação em Ciências Geodésicas. Departamento de Geomática – Laboratório de Geodésia Espacial – Bol. Ciênc. Geod., sec. Artigos, Curitiba, v. 9, no 2, p.199-

216, jul-dez, 2003. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/bcg/article/viewFile/1444/1198>>. Acesso em 01 mai. 2020

TEIXEIRA, S. F. **O Laboratório de Ensino de Matemática Temático Centrado nos Instrumentos de Navegação: uma proposta para o IFRN de Mossoró**. Natal, RN, 2014. Dissertação (Mestrado) – UFRN. Centro de Ciências Exatas e da Terra. Programa de Pós-Graduação em Ensino de ciências naturais e matemática. Disponível em: <file:///C:/Users/Celeron/Downloads/SidneyFariasTeixeira_DISSERT.pdf>. Acesso em 17 abr. 2020.

TIMBÓ, M. A. **Levantamentos Através do Sistema GPS**. Apostila. Departamento de Cartografia. UFMG, Belo Horizonte - MG. 2000.

TOPCON. 2019. 2 ilustrações. Disponível em: <https://www.topconpositioning.com/sites/default/files/product_files/hiper_vr_broch_7010-2258_revb_sm.pdf>. Acesso em 14 mai. 2020.

TRILATERAÇÃO. In: FLIP. **Dúvidas Linguísticas**. Pedro Mendes, 29/11/2005. Disponível em: <<https://www.flip.pt/Duvidas-Linguisticas/Duvida-Linguistica/DID/1284>>. Acesso em 05 mai. 2020.

TRIMBLE GEOSPATIAL. 2020. 2 ilustrações. Disponível em: <<https://geospatial.trimble.com/products-and-solutions/trimble-r8s>>. Acesso em 12 mai. 2020.

TRIMBLE. 2020. 2 ilustrações. Disponível em: <<https://www.trimble.com/Real-Time-Networks/Trimble-Choke-Ring-Antenna.aspx>>. Acesso em 14 mai. 2020.

TUBOY, A. M. *et al.* **O Relógio Atômico Brasileiro**. Instituto de Física de São Carlos – USP. 04-02-2009. Cap.3 – e-física/Mecânica/pesquisa hoje. 36k. Disponível em: <<http://www.cepa.if.usp.br/e-fisica/mecanica/pesquisahoje/cap3/>>. Acesso em 04 mai. 2020.

TV UNESP. **Múltiplos usos do GNSS**. Ciências sem limites. Vídeo entrevista com o Prof. João Francisco Galera Monico. TV UNESP. 2017. 1 vídeo (27 minutos). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=pqyZ_q9ILE&app=desktop>. Acesso em 25 fev. 2020.

UNAVCO. **TEQC – Translation, Editing, and Quality Check**. (Software). Denver, USA, 2019. Disponível em: <<https://www.unavco.org/software/data-processing/teqc/teqc.html#overview>>. Acesso em 25 mai. 2020.

UNAVCO. **Teqc Tutorial – Basics of Teqc Use and Teqc Products** – by Lou Estey and Stuart Wier. Boulder, Colorado U.S.A., 2014. Disponível em: <https://www.unavco.org/software/data-processing/teqc/doc/UNAVCO_Teqc_Tutorial.pdf>. Acesso em 02 de junho de 2020.

VAZ, Flávio. **GNSS: Métodos de Posicionamento**. Tecnologias de Rastreamento de Veículos. Apostila USP, São Paulo, PTR5923, 2015. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/380603/mod_resource/content/1/GNSS-Metodos%20de%20posicionamento.pdf>. Acesso em 13 fev. 2020.

VAZ, Flávio. **Modulação de Sinais**. Tecnologias de Rastreamento de Veículos. Apostila USP, São Paulo, PTR5923, 2015. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/380597/mod_resource/content/1/Modula%C3%A7%C3%A3o%20de%20Sinais.pdf>. Acesso em 07 mai. 2020.

VETTORAZZI, C. A. **GNSS - Topografia e Geoprocessamento II**. ESALQ - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - Departamento de Engenharia de Biosistemas. USP, 2016. Arquivos de aula, LEB-0450. Disponível em: <http://www.leb.esalq.usp.br/aulas2016_/>. Acesso em 17 abr. 2020.

WATERS, D. **The Sea – or Mariner’s Astrolabe**. Agrupamento de Estudos de Cartografia Antiga. XV Secção de Coimbra. Junta de Investigações do Ultramar. Coimbra. 1966. Separata da Revista da Faculdade de Ciências. Vol. XXXIX. Disponível em: <[https://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/40499/1/N.%c2%ba%2015%20%e2%80%93%20avid%20Waters%20\(1966\),%20%e2%80%9cThe%20sea%20%e2%80%93%20or%20marine%e2%80%99s%20astrolabe%e2%80%9d.pdf](https://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/40499/1/N.%c2%ba%2015%20%e2%80%93%20avid%20Waters%20(1966),%20%e2%80%9cThe%20sea%20%e2%80%93%20or%20marine%e2%80%99s%20astrolabe%e2%80%9d.pdf)>. Acesso em 04 mai. 2020.

ZANELLA, L. C. H. **Metodologia de estudo e de pesquisa em administração**. – Florianópolis: Departamento de Ciências da Administração/UFSC; (Brasília): CAPES: UAB, 2009. 164 p.: il. ISBN: 978-85-61608-75-0. Disponível em: <<https://www2.unifap.br/claudiomarcio/files/2015/12/LIVRO-Metodologia-de-Estudo-e-Pesquisa-em-Administra%C3%A7%C3%A3o.pdf>>. Acesso em: 23 mai. 2020.

ZANOTTA, D. C.; CAPPELLETOO, E.; MATSUOKA, M. T. **O GPS: unindo ciência e tecnologia em aulas de física**. SciELO. Revista Bras. Ensino Fís. Vol. 33 no. 2 São Paulo – Abril / Junho-2011. ISSN 1806-1117. Disponível em: <https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172011000200014>. Acesso em 03 mai. 2020.

APÊNDICE



SISTEMA DE NAVEGAÇÃO GLOBAL POR SATÉLITE: ERROS RELACIONADOS AO EFEITO DO MULTICAMINHAMENTO

Fábio Cristian Davi¹
Evandro de Castro Gomide²

RESUMO

Esta pesquisa tem como objetivo geral expor a dinâmica e as principais causas de um dos erros de propagação de sinal, dito multicaminhamento, além de apresentar métodos de quantificação deste fenômeno indesejado em arquivos de dados coletados durante a operação com receptores GNSS, a fim de analisar se este efeito afeta, ou não, os bons resultados na obtenção de coordenadas. Em função da pandemia do COVID-19 que restringiu a coleta de dados em campo, optou-se por utilizar os arquivos GNSS, disponibilizados no site oficial do IBGE, mais precisamente, das 14 estações da RBMC do Estado de MG com observações na data de 31 de julho de 2020, juntamente com seus respectivos relatórios descritivos de coordenadas oficiais do mesmo ano. Todas as estações escolhidas foram processadas no PPP do IBGE, em um intervalo escolhido de 4 horas. A subtração dos resultados das coordenadas UTM corrigidas com os resultados das coordenadas UTM oficiais, teve como resultado a acurácia das coordenadas das estações em questão. Já os valores, disponibilizados em números, do multicaminhamento, foram obtidos com o uso do *software* TEQC da UNAVCO. Com todos os dados em mãos, gráficos de comparação foram elaborados, facilitando a análise do efeito do multicaminhamento sobre a acurácia das coordenadas das 14 estações escolhidas. Baseado nos dados obtidos e na metodologia aplicada, o resultado deste experimento demonstrou não ser possível constatar a influência do efeito do multicaminhamento sobre a acurácia, ou mesmo sobre a precisão, nas coordenadas coletadas.

Palavras-chave: GNSS. Multicaminhamento. Coordenadas. TEQC. Erros.

Correspondência/Contato

Faculdade de Engenharia de Minas Gerais

FEAMIG

Rua Gastão Bráulio dos Santos, 837
CEP 30510-120
Fone (31) 3372-3703
parametrica@feamig.br
<http://www.feamig.br/revista>

Editores responsáveis

Wilson José Vieira da Costa
wilsoncosta@feamig.br

Raquel Ferreira de Souza
raquel.ferreira@feamig.br

¹ Graduando em Engenharia de Agrimensura – FEAMIG – E-mail: davi.cfabio@gmail.com

² Engenheiro Agrimensor; Especialista em Georreferenciamento de Imóveis Rurais; Docente da FEAMIG

1 INTRODUÇÃO

O Sistema de Navegação Global por Satélite ou “*Global Navigation Satellite System*” (GNSS) é o método mais avançado de posicionamento e navegação da atualidade. A informática, a indústria eletrônica e a revolução digital foram os principais responsáveis por seu desenvolvimento (ANDRADE, 1998).

Satélites GNSS possuem excelentes resultados na obtenção de coordenadas, porém erros sistemáticos deste método são comuns, sejam eles relacionados com os próprios satélites, com os receptores, com os sinais emitidos, entre outros (BUENO, 2010).

É exatamente sobre um desses erros sistemáticos, conhecido como “multicaminhamento”, que esta pesquisa está centrada. A grosso modo, o multicaminhamento é um efeito provocado por sinais de radiofrequência emitido pelos satélites e refletidos em uma ou mais superfícies antes de atingir a antena de um receptor GNSS. Este erro é, teoricamente grave, pois interfere na medição da distância, uma das principais variáveis para o estabelecimento de uma coordenada na Terra, principalmente em trabalhos de engenharia, que exigem, na maioria das vezes, locações e levantamentos centimétricos (MONICO, 2008).

Assim, o objetivo geral desta pesquisa é tratar sobre um dos principais erros de propagação de sinais emitido por satélites GNSS – dito multicaminhamento. Busca-se aqui expor a dinâmica de como esse erro ocorre e também apresentar métodos de quantificação deste efeito (com o uso do *software* TEQC da UNAVCO) em arquivos de dados coletados durante a operação com receptores GNSS, a fim de analisar se o multicaminhamento afeta, ou não, os bons resultados na obtenção de coordenadas na superfície terrestre.

2 O SISTEMA DE NAVEGAÇÃO GLOBAL POR SATÉLITE

O GNSS aperfeiçoou o processo de navegação e posicionamento de um objeto no espaço ao obter ganhos de custo e tempo além de aumentar extraordinariamente a precisão e a acurácia na determinação de coordenadas (MONICO, 2008).

O segmento espacial do GNSS é composto por satélites artificiais, definidos como naves espaciais fabricadas pelo homem e enviadas para o espaço, sendo então capazes de orbitar a Terra (INPE, 2011). GNSS é o nome atribuído ao conjunto de várias constelações de satélites artificiais, oriundos de vários países, a exemplo do precursor sistema GPS (estadunidense), seguido pelo GLONASS (russo), GALILEO (europeu), entre outras (SEEBER, 2003).

Segundo o IBGE (2020), o GNSS possibilita o posicionamento em tempo real de objetos, resultando em diversas aplicações, como mapeamentos topográficos e geodésicos. É um sistema de navegação baseado em coordenadas tridimensionais, obtidas em tempo real a partir de pontos situados sobre a superfície da Terra (PARZZANINI, 2019). A função dos satélites GNSS é basicamente transmitir dados. Isto é feito medindo-se a distância entre o receptor e vários satélites. Como as coordenadas dos satélites são conhecidas, é possível determinar a posição de uma estação na terra, no ar ou no mar (TV UNESP, 2017).

O GNSS também contempla o segmento de controle ou estações espalhadas na superfície do planeta que realizam atualizações periódicas das mensagens de navegações, além também, do segmento de usuários, ou receptores responsáveis por captar e processar os sinais emitidos pelos satélites (VAZ, 2015; LANGENDOLFF e PELLEGRINI, 2008). Este último vai além dos receptores, incluindo programas de processamento, métodos e técnicas de levantamento (OLIVEIRA, 2011). Dentre alguns tipos de posicionamento previstos no “Manual Técnico de Posicionamento para Georreferenciamento de Imóveis Rurais” (INCRA), destacam-se os posicionamentos relativos: estático, cinemático, RTK convencional, DGPS e PPP ou Posicionamento por Ponto Preciso (que será usado aqui), entre outros (INCRA, 2013).

Os sinais emitidos de satélites para receptores são feitos por ondas de rádio e propagam-se no vácuo na velocidade da luz (HELERBROCK, s/d). O GPS, por exemplo, possui 24 satélites (mínimos para se obter uma cobertura global) que transmitem estes sinais de rádio (ondas eletromagnéticas) com informações de seu posicionamento orbital, vinculados a um referencial geodésico e também ao tempo cronometrado por um relógio atômico em cada satélite. Estes últimos são necessariamente postos em diferentes órbitas distribuídas ao redor do planeta, que possibilitam uma cobertura global. Este arranjo possibilita que um receptor GPS na Terra receba dados, no mínimo, de quatro satélites diferentes. Os dados obtidos possibilitam o cálculo da posição de um receptor locado na Terra (ZANOTTA, *et al*, 2011).

A estrutura dos sinais da constelação GPS tem como base uma frequência de 10,23 MHz, gerados pelo relógio atômico (PARZZANINI, 2019). Os satélites transmitem diversas frequências, com destaque para as duas mais usadas em trabalhos de topografia e agrimensura: a **L1**, equivalente a um comprimento de onda de $\cong 19,0425$ cm; e a **L2**, equivalente a um comprimento de onda de $\cong 24,4374$ cm. A banda L1 carrega dois códigos: “*Coarse/Acquisition*” (C/A), menos preciso, e o código (P), que é mais preciso (MOLIN, 2010). Já a banda L2 possui apenas o código P (PEREIRA, 2010). Alguns padrões de frequência, além de outras diferenças, variam em cada constelação GNSS, contudo a base de funcionamento deste método é basicamente a mesma para todas.

Os dados observados no método GNSS são deduzidos a partir da medição do tempo de percurso ou da diferença de fase entre os sinais recebidos dos satélites e os gerados pelos receptores. Esses dados são conhecidos como “observáveis GNSS” e os dois principais são a “pseudodistância” e a “fase da onda portadora” (SEGANTINE, 2005 *apud* SILVEIRA, 2008).

A pseudodistância é a distância calculada com base no tempo de trânsito do sinal entre o receptor e o satélite, e é identificada como a medida do código, em razão do processo de correlação do código utilizado na realização da medida, que, por sua vez, fica na ordem métrica, insuficiente para trabalhos muito precisos (PARZZANINI, 2019; MONICO, 2011).

Para se obter um posicionamento com precisão centimétrica, a observável fundamental é a “fase da onda portadora”, que permite que a distância seja determinada através da contagem do número de ciclos existente entre o satélite e o receptor (MONICO, 2008). A onda portadora é caracterizada por três variáveis: amplitude, frequência e fase, e é exatamente esta sequência que compõe um ciclo. Já a modulação, é a modificação de uma onda portadora, antes de ser irradiada, feito de modo que as informações ou dados possam ser transportados. Ao modelar as diferenças de fase, obtém-se a ambiguidade inteira, que é o número inteiro de comprimento da onda entre o satélite e o receptor. Contudo, a distância exata entre o satélite e o receptor nem sempre terá um número inteiro de comprimento de onda, podendo existir uma fração desta medida determinada por meio da diferença de fase. Ao adicionar o número inteiro à fração de comprimento de onda e multiplicar esta soma pelo respectivo comprimento de onda da portadora, é possível determinar a distância verdadeira entre o receptor e o satélite a cada instante (FIGUEIRÊDO, 2005; VAZ, 2015). A Figura 1 é uma representação do sinal da fase da onda portadora, onde N é a ambiguidade.

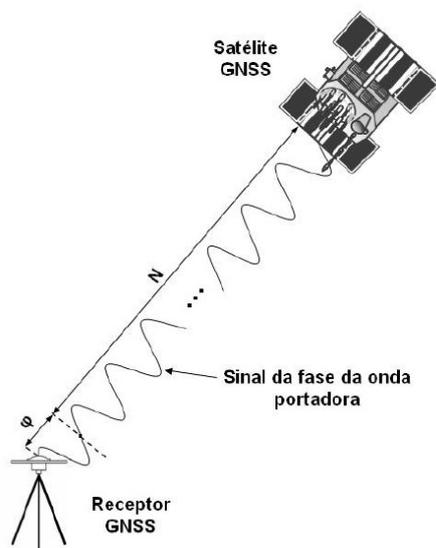


Figura 1 – Fase da onda portadora.

Fonte: MONICO (2008)

Todas as constelações GNSS sofrem erros sistemáticos que podem interferir no resultado do posicionamento (PEREIRA, 2010). Tais erros estão relacionados as duas observáveis já mencionadas: a pseudodistância e a fase da onda portadora (MONICO, 2008).

Dentre algumas das várias fontes conhecidas responsáveis por erros sistemáticos do GNSS, pode-se citar: os satélites, que geram erros da órbita, do relógio, entre outros; os receptores, que geram atrasos entre as duas portadoras em seu hardware, erros relacionados ao centro de fase da antena, entre outros (MONICO, 2008). Todavia, destaca-se aqui, o multicaminhamento, que é um erro na “propagação dos sinais” entre satélites e receptores.

As distâncias medidas pelas observáveis podem ser afetadas caso os sinais sejam distorcidos ao serem emitidos. Este efeito é um erro resultante da reflexão do sinal em obstáculos como montanhas, prédios, árvores ou espelhos d’água, causando um aumento do tempo de deslocamento entre satélite e receptor e, conseqüentemente, valores falsos para as distâncias calculadas (ZANOTTA *et al*, 2011). Como o sinal leva mais tempo para alcançar o receptor, este último “entende” que o satélite está a uma distância maior do que na realidade, gerando o efeito do multicaminhamento, ilustrado na Figura 2 (PERONI, 2004).

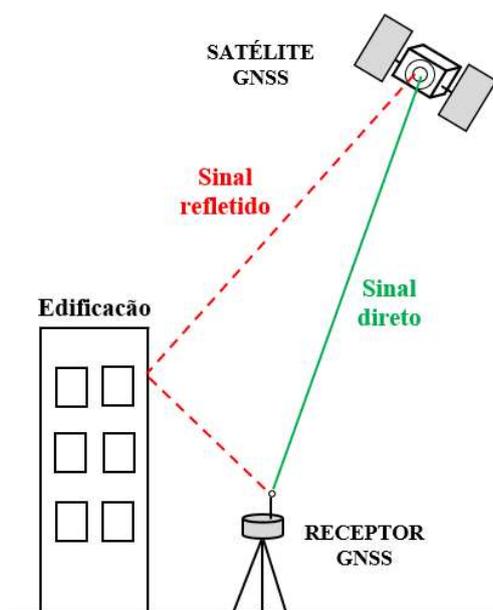


Figura 2 – Exemplo da ocorrência do multicaminhamento.

Fonte: Adaptado de NOVATEL (2015).

O multicaminhamento é, de acordo com Leick (1995 *apud* PEREIRA, 2010) o principal erro a ser considerado no posicionamento GNSS. De modo geral, não há um modelo para tratar este efeito, pois as situações geométricas dos diferentes locais variam de forma arbitrária. As práticas de atenuação do multicaminhamento vão desde o aumento de tempo

de coleta dos dados até o uso de antenas específicas e, quando possível, evita-se posicionar o receptor próximo a edificações ou estruturas físicas (LANGENDOLFF e PELLEGRINI, 2008).

Muito embora o efeito do multicaminhamento seja difícil de ser tratado, seu efeito pode ser quantificado pelo *software* TEQC, projetado pela UNAVCO (Consórcio-Universidade), voltado para a tradução, edição e verificação de dados GNSS. O TEQC e seu tutorial de uso e noções básicas, estão disponíveis no site da UNAVCO (UNAVCO, 2019; UNAVCO; 2014). Esta prática de quantificação é, aparentemente, pouco difundida, porém útil para a análise da qualidade de alguns trabalhos de posicionamento, como, por exemplo, homologar um marco geodésico oficial de referência, a exemplo das estações da RBMC do IBGE.

3 RESULTADOS E ANÁLISES

Os dados utilizados neste experimento foram adquiridos no site do IBGE por meio de *download* das estações da RBMC do Estado de MG, que oferecem dados de rastreamento idênticos aos que poderiam ser coletados em campo – sem nenhum prejuízo para este experimento.

A Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC) é “o conjunto de estações geodésicas, equipadas com receptores GNSS, que proporcionam, uma vez por dia ou em tempo real, observações para a determinação de coordenadas” (IBGE, 2021, s/p.). A escolha dessas estações foi feita pelo *download* do “cartograma”, no campo “Geociências”, no site do IBGE, que contém mapas do Brasil mostrando as redes de estações ativas de um determinado ano. Ao abrir o mapa do ano que se deseja, pode-se verificar e anotar as estações ativas de um determinado Estado ou região do Brasil. Assim, foram escolhidas 14 estações do Estado de MG na data 31 de julho de 2020.

Feito o recorte e decidido a data, obteve-se os “dados” no próprio site do IBGE ao se fazer o *download* dos arquivos zipados (.zip) da pasta do dia “213” (referente ao dia 31 de julho de 2020) de cada uma das estações de MG escolhidas no cartograma do ano de 2020: GVA1; JAMG; MGBH; MGIN; MGJF; MGJP; MGMC; MGMT; MGRP; MGTO; MGUB; MGVB; UBE1 e VICO. Ao descompactar esses arquivos, obteve-se os dados de observação e navegação GNSS, propriamente ditos, com várias extensões (“n”, “l”, “g”, “d”, entre outros). Por exemplo, “d” é o arquivo compactado conhecido como HATANAKA e “n” possui dados transmitidos das órbitas GPS (PARZZANINI, 2019). Estes dados são similares aos arquivos que teriam sido coletados em campo, observando que, em ambas as situações, usam-se, normalmente, receptores GNSS de duas frequências.

O arquivo RINEX, ou arquivo de observação com a extensão “o”, que proporciona que os dados das observáveis sejam lidos e processados em qualquer *software* de processamento, incluindo o TEQC, foi necessariamente gerado com a ajuda do *software* “crx2rnx” – que também pode ser encontrado e “baixado” no site da UNAVCO.

Assim, gerou-se um arquivo RINEX para cada uma das 14 estações da RBMC. Ao abrir cada um destes arquivos individualmente, por exemplo, no *WordPad*, pode-se ler informações importantes no cabeçalho inicial da primeira página, como o tipo do receptor usado, a altura que o mesmo foi estabelecido, a hora em que a primeira observação começou a ser gravada, o ano, o mês e o dia do rastreamento, entre outros. Nota-se que todos os arquivos do tipo RINEX gerados para cada uma das estações, possuem 24 horas de observações.

Contudo, este trabalho de pesquisa está voltado para as práticas da Agrimensura, onde marcos geodésicos de referência são normalmente estabelecidos em campo com o rastreamento de 4 horas, segundo precisões esperadas em metros para um levantamento estático para receptores de duas frequências (padrão que pode ser verificado nos Relatórios de Posicionamento por Ponto Preciso do IBGE). Deste modo, foi escolhido, para cada uma das 14 estações, um intervalo de 4 horas de rastreamento, ou seja, foram criados novos arquivos RINEX, menores que os arquivos originais de 24 horas, com início às 8h e fim às 12 horas. Para maiores detalhes de como estabelecer um intervalo em arquivos RINEX, verificar o “tutorial de uso e noções básicas do TEQC”, disponível no site da UNAVCO (UNAVCO, 2014).

Assim, todos os arquivos RINEX dentro do intervalo estabelecido de 4 horas foram processados, individualmente, no PPP³ do IBGE a fim de comparar os resultados obtidos das coordenadas UTM (Norte, Este e altitude), com os resultados das mesmas coordenadas oficiais UTM (Norte, Este e altitude) dos relatórios descritivos, também emitido pelo IBGE, de cada uma destas estações. Ambos os relatórios são disponibilizados em um documento *PDF*. A diferença dessas duas coordenadas UTM obtidas em cada um desses relatórios tem como resultado o valor da acurácia.

Assim, o Quadro 1 a seguir mostra os valores das acurácias obtidas de cada uma das 14 estações da RBMC do Estado de MG, isto é, mostra o resultado das diferenças das coordenadas UTM oficiais (Norte, Este e altitude) dos relatórios descritivos menos as coordenadas UTM (Norte, Este e altitude) dos arquivos de 31 de julho de 2020 com intervalo de 4 horas, que foram processados e corrigidos pelo PPP do IBGE.

³ O “Posicionamento por Ponto Preciso” do IBGE é um serviço online gratuito para pós-processamento de dados GNSS e permite aos usuários com receptores GNSS obterem coordenadas referenciadas ao SIRGAS 2000 (IBGE, 2021).

DIFERENÇAS			
Descritivo - Em 2000.4			
Marcos	UTM N (m)	UTM E (m)	Alt.Geo.(m)
GVA1	0,005	0,025	-0,011
JAMG	-0,011	0,019	-0,030
MGBH	0,001	-0,002	0,005
MGIN	-0,027	0,018	0,010
MGJF	-0,007	0,015	0,007
MGJP	-0,006	0,010	0,034
MGMC	-0,020	0,017	-0,026
MGMT	-0,028	0,017	-0,021
MGRP	-0,019	0,015	-0,015
MGTO	-0,005	0,025	0,006
MGUB	-0,029	0,006	-0,009
MGV1	-0,021	0,015	-0,008
UBE1	-0,021	0,011	-0,005
VICO	0,004	0,027	0,005

Quadro 1 – Diferenças de coordenadas – relatórios descritivos IBGE vs. resultados do PPP do IBGE
 Fonte: Autor (2021); IBGE (2020).

Como já informado, o controle de qualidade do multicaminhamento pode ser feito pelo *software* TEQC que gera este controle de qualidade de uma estação por vez e os resultados são apresentados em arquivos com várias extensões, dentre elas: o MP1 e o MP2, que mostram o efeito do multicaminhamento em, respectivamente, L1 e L2 (FAZAN *et al.*, 2002).

O impacto do multicaminhamento sobre a fase da onda portadora é traduzido como o erro máximo correspondente a aproximadamente um quarto do comprimento de onda de 19,05 cm, ou seja, 4,8 cm para a portadora L1. Para a portadora L2 este erro é de 6,10 cm. (LEICK, 1995 *apud* MONICO, 2008; PARZZANINI, 2019). Somente a referência mais rigorosa de 4,8 cm será considerada nesta pesquisa

Monico (2008) salienta a lógica matemática de como o multicaminhamento pode ser medido, mesmo em condições pouco favoráveis em boa parte dos levantamentos com receptores GNSS, como no exemplo das combinações lineares de observáveis a seguir:

$$MP1 = PD_{L1} - \left(1 + \frac{2}{\alpha-1}\right) \Phi_{L1} + \left(\frac{2}{\alpha-1}\right) \Phi_{L2} \quad \& \quad MP2 = PD_{L2} - \left(\frac{2\alpha}{\alpha-1}\right) \Phi_{L1} + \left(\frac{2\alpha}{\alpha-1}\right) \Phi_{L2}$$

Onde $\alpha = (f_1 / f_2)^2$, indica a quantidade do multicaminhamento em uma estação.

Assim, com o uso do *software* TEQC no sistema operacional DOS (*Disk Operation System*), foram gerados, para cada uma das 14 estações, um arquivo com a extensão “S”. Ao abrir cada arquivo com o *WordPad*, pode-se anotar os valores de MP1 e MP2, representados como MP12 e MP21 (UNAVCO, 2014). O modo de gerar estes arquivos “S” para avaliar o “Controle de Qualidade” (QC) do multicaminhamento está disponível no “tutorial de uso e noções básicas do TEQC” (UNAVCO, 2014). O Quadro 2 a seguir mostra os valores de MP1 e MP2 obtidos para as 14 estações da RBMC do Estado de MG em 31 de julho de 2020:

UNAVCO teqc +qc Controle de Qualidade Multicaminhamento		
Marcos RBMC	MP12 (m)	MP21 (m)
GVA1	0,077971	0,011048
JAMG	0,553286	0,379741
MGBH	0,693961	0,354971
MGIN	0,529207	0,423546
MGJF	0,506189	0,510838
MGJP	0,477086	0,567161
MGMC	0,637909	0,514010
MGMT	0,569913	0,411214
MGRP	0,537464	0,479944
MGTO	0,631441	0,425926
MGUB	0,659445	0,359883
MGV1	0,107722	0,140212
UBE1	0,106090	0,119790
VICO	0,582076	0,507359

Quadro 2 – Valores de MP1 e MP2 das estações da RBMC do Estado de MG.
Fonte: Autor (2021); IBGE (2020); UNAVCO (2014).

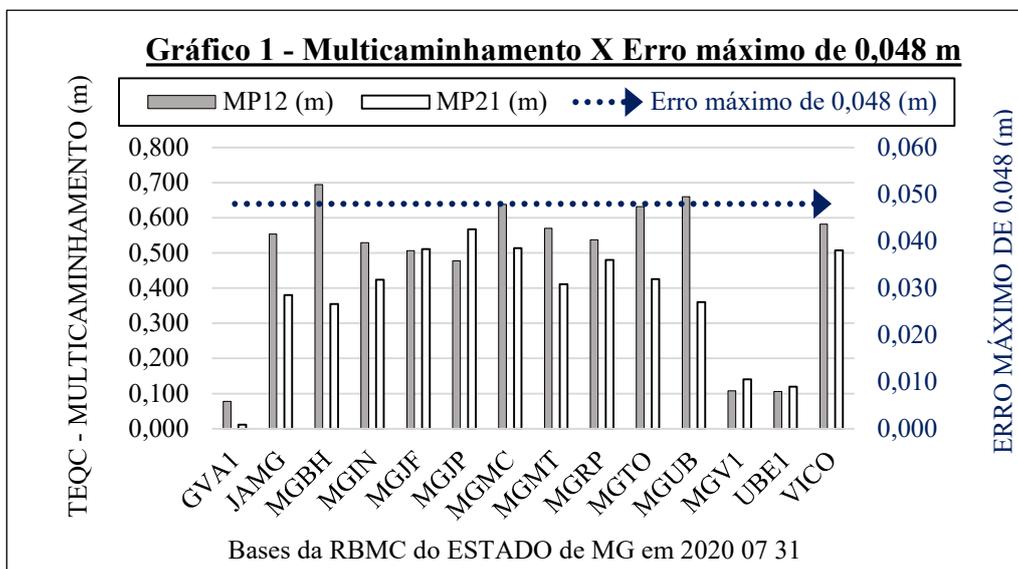
Com todos os dados em mãos, pode-se elaborar gráficos de comparação, um planimétrico e outro altimétrico, entre as acurácias obtidas e os valores de MP1 e MP2. Entretanto, os vetores planimétricos estão representados pela acurácia obtida entre a diferença das coordenadas oficiais e das coordenadas corrigidas pelo PPP. Por serem vetores perpendiculares entre si, Norte (N) e Este (E), a posição relativa entre vetores dessa natureza é calculada pela fórmula $d^2 = d1^2 + d2^2$ (TEIXEIRA, s/d). O Quadro 3 mostra o resultado destes vetores, isto é, do erro obtido na obtenção de coordenadas:

DIFERENÇAS			FÓRMULA	ERRO (m)
Descritivo - Em 2000.4				
Marcos	UTM N (m)	UTM E (m)		
GVA1	0,005	0,025	$d^2 = \text{UTM N}^2 + \text{UTM E}^2$	0,025
JAMG	-0,011	0,019		0,022
MGBH	0,001	-0,002		0,002
MGIN	-0,027	0,018		0,032
MGJF	-0,007	0,015		0,017
MGJP	-0,006	0,010		0,012
MGMC	-0,020	0,017		0,026
MGMT	-0,028	0,017		0,033
MGRP	-0,019	0,015		0,024
MGTO	-0,005	0,025		0,026
MGUB	-0,029	0,006		0,030
MGV1	-0,021	0,015		0,026
UBE1	-0,021	0,011		0,024
VICO	0,004	0,027		0,027

Quadro 3 – Vetores / erros obtidos durante a obtenção de coordenadas das 14 estações da RBMC
Fonte: Autor (2021); IBGE (2020); UNAVCO (2014).

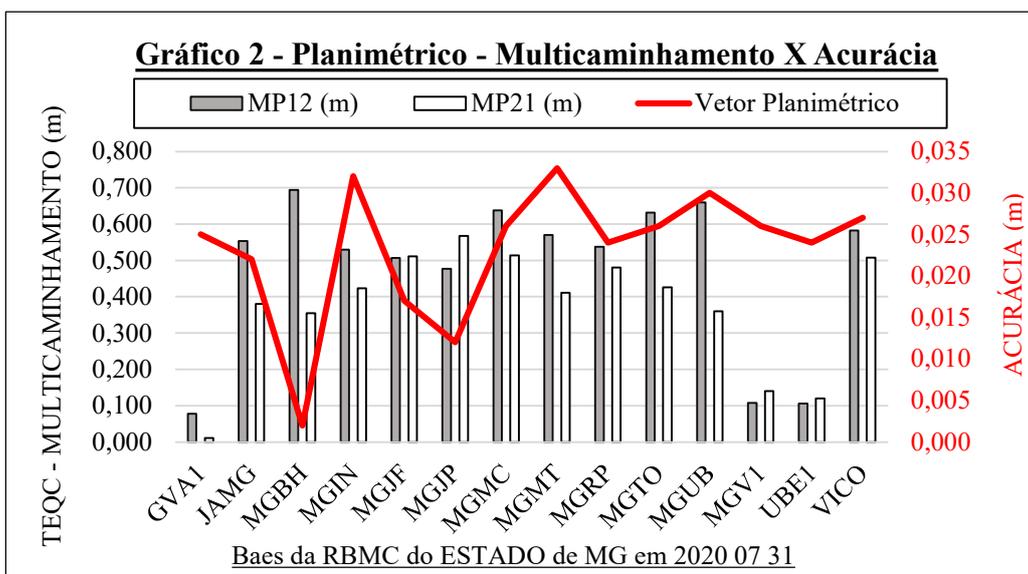
Os gráficos a seguir foram elaborados com o intuito de enriquecer a análise e a visualização de todos os dados coletados até agora para avaliar se o multicaminhamento realmente afeta a acurácia das coordenadas levantadas com o uso de receptores GNSS.

Os dados usados no Gráfico 1 a seguir, podem ser vistos no Quadro 3, que mostra valores de MP1 e MP2, e foram colocados em confronto com o erro máximo de 0,048 m descrito por Monico (2008). O Gráfico 1 serve de comparação para os Gráficos 1 e 2.



Fonte: AUTOR (2021); IBGE (2020); MONICO (20 08); UNAVCO (2014)

Já o Gráfico 2 abaixo, confronta os dados da Tabela 3, que contém valores de MP1 e MP2, com os dados da Tabela 4, que possui os resultados dos vetores N e E, que representam o erro da acurácia em cada uma das 14 estações da RBMC de MG no dia 31 de julho de 2020.



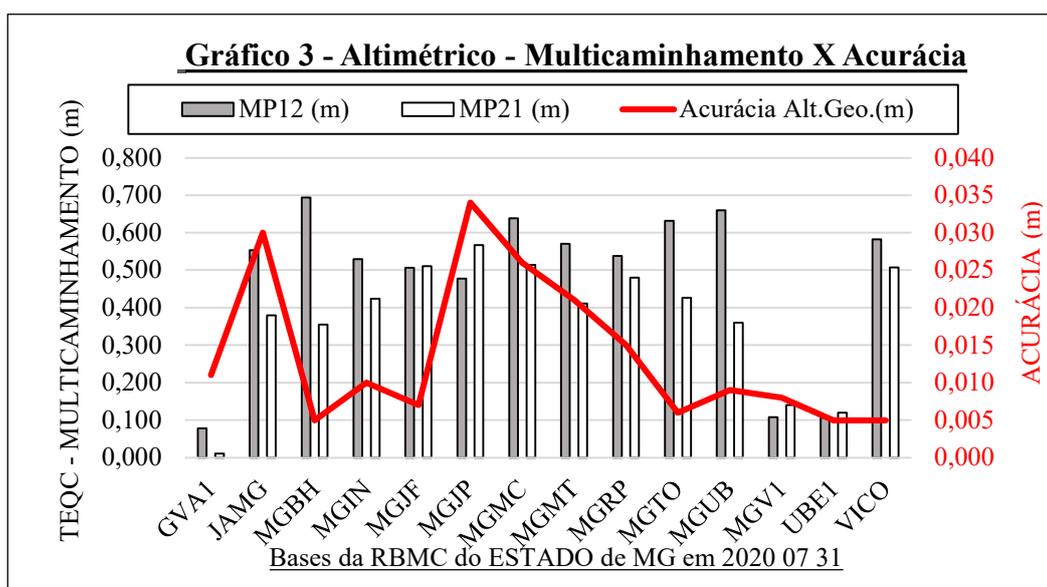
Fonte: AUTOR (2021); IBGE (2020); MONICO (2008); UNAVCO (2014)

Em primeira análise, ao observar em conjunto os Gráficos 1 e 2, pode-se inferir que as acurácias dos vetores planimétricos das 14 estações da RBMC sofrem influência em maior ou menor quantidade dos efeitos do multicaminamento.

Vale observar que praticamente todas as estações da RBMC apresentaram valores abaixo ou igual ao erro máximo de 0,048m, com exceção das estações MGBH e MGUB, que ultrapassaram este limite em MP1. Entretanto, a estação MGBH possui o melhor resultado da acurácia de todas as 14 estações. Já a estação MGUB apresenta acurácia de 0,030m, que é um valor próximo da maior parte dos resultados da acurácia das estações vistas no gráfico que, contudo, obtiveram valores de multicaminhamento abaixo do erro máximo. Já as estações MGV1, UBE1 e GVA1, embora apresentem valores baixos em MP1 e MP2, obtiveram acurácia próximo dos 0,030m, o que, teoricamente, é um contrassenso.

Assim, deduz-se que 05 das 14 estações analisadas não apresentaram correlação lógica entre o efeito do multicaminhamento e os valores da acurácia. Todas as outras 09 estações possuem, aparentemente, uma correlação aproximada entre o multicaminhamento e as acurácias, com valores à primeira vista próximos entre si. Todavia, pode-se observar que mesmo nestes casos não há um padrão e/ou sequência que mostre uma relação entre os valores obtidos do efeito do multicaminhamento (em MP1 e MP2) com os valores obtidos da acurácia, visto que ambos os valores variam consideravelmente entre essas 09 estações.

Já o Gráfico 3, confronta os dados da Tabela 3 com a Tabela 2 que, por sua vez, contém dados altimétricos da acurácia – agora sem a necessidade de calcular o vetor, mas apenas considerar os valores da diferença entre a altura elipsoidal do relatório descritivo menos a altura geométrica dos arquivos do PPP.



Fonte: AUTOR (2021); IBGE (2020); MONICO (2008); UNAVCO (2014)

Ao comparar o Gráfico 3 com o Gráfico 1 (que mostra o multicaminhamento em relação ao erro máximo de 0,048 m), pode-se notar que o mesmo também não apresenta uma

correlação aparente que indique um padrão entre o efeito do multicaminhamento e a obtenção da acurácia. Os únicos resultados vistos que poderiam correlacionar os valores obtidos em MP1 e MP2 com um bom resultado da acurácia são as estações MGV1 e UBE1. Entretanto, todas as outras correlações destes valores são arbitrárias se analisadas em conjunto, pois boa parte das estações apresentam bons resultados da acurácia com altos valores do multicaminhamento. Por outro lado, a estação GVA1 apresenta uma acurácia relativamente alta versus um valor do multicaminhamento muito baixo. Considerando a correlação dos resultados do Gráfico 3, não é possível afirmar de forma conclusiva que o efeito do multicaminhamento realmente afeta a obtenção de bons ou maus resultados da acurácia ao se determinar coordenadas geodésicas.

Ainda, considerando os dados observados em todos os Gráficos elaborados neste estudo, bem como a metodologia adotada, não foi possível constatar que o multicaminhamento afeta a acurácia ou mesmo a precisão.

Assim, a recomendação de técnicas e métodos para prevenir este efeito ficarão restritas a literatura especializada disponível. Em casos de implantação de estações de redes geodésicas, a exemplo da RBMC, deve-se evitar a locação de marcos em locais propensos a este efeito. Já no dia a dia das práticas da Agrimensura, isso nem sempre é possível, pois são trabalhos executados em obras, área florestais, entre outras situações. Nestes casos, é aconselhável realizar maior tempo de rastreamento, a fim de obter melhores resultados de precisão. Observa-se que de acordo com a metodologia aplicada neste estudo não é possível afirmar que esse maior tempo de rastreamento terá um impacto necessariamente positivo sobre a acurácia.

Todavia constatou-se que apenas com 4 horas de rastreamento, os resultados obtidos de todas as estações da RBMC se encontram dentro da precisão esperada do IBGE para um levantamento estático (em metros) (IBGE, 2020).

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho tinha como objetivo geral expor as causas e a dinâmica de erros de propagação de sinal e, também, apresentar métodos de quantificação deste efeito em arquivos de dados coletados durante a operação com receptores GNSS, a fim de analisar se o multicaminhamento afeta ou não bons resultados na obtenção de coordenadas.

O objetivo geral da pesquisa foi atingido, ao apresentar algumas das características de funcionamento do GNSS e, conseqüentemente explicar seus diversos tipos de erros, dentre eles e mais especificamente, o do efeito do multicaminhamento. Em seguida, foi

apresentado o *software* TEQC, capaz de editar e também prover diversas informações sobre os dados coletados com receptores GNSS, como o controle de qualidade (QC), dado em números, do multicaminhamento nas portadoras L1 e L2. Os dados escolhidos para a análise foram planejados inicialmente para serem colhidos em campo, porém, devido a pandemia do COVID-19, optou-se por baixar os arquivos RINEX das 14 estações da RBMC/IBGE do Estado de MG no dia 31 de julho de 2021. Para todos os arquivos de dados destas estações foram escolhidos o intervalo de 4 horas de rastreamento, e os resultados destas coordenadas UTM, de 4 horas, foram processados pelo PPP do IBGE; em sequência, foram comparadas/subtraídas com os resultados das coordenadas oficiais, também em UTM, disponibilizadas pelo relatório descritivo do IBGE do ano de 2020. O resultado dessa diferença de coordenadas proporcionou o valor da acurácia obtida para cada uma dessas estações. Com todos esses dados em mãos foi possível comparar, com a ajuda de gráficos, como o multicaminhamento, aqui quantificado em números, afetou o valor da acurácia para cada uma dessas 14 estações.

Baseado nos dados obtidos e na metodologia utilizada, não foi possível constatar a influência do efeito do multicaminhamento na precisão ou na acurácia. Pode-se sugerir que a não constatação do que foi planejado por essa pesquisa seja em função de alguns fatores, como a escolha das estações, do horário, ou da geometria dos satélites no intervalo de tempo de rastreamento escolhido. Pode-se inferir que os filtros para a redução do multicaminhamento, presentes nos equipamentos mais atuais e modernos, realmente funcionam.

Portanto, este trabalho não se esgota em si mesmo. Assim, sugere-se estudos posteriores que demonstrem quais foram as condições ou tipos de erros que levaram a estes resultados da acurácia segundo os parâmetros definidos nesta pesquisa, como, por exemplo, constatar se os fabricantes conseguiram reduzir o multicaminhamento por filtros ou algoritmos.

REFERÊNCIAS

AMADEI, J. R. P.; FERRAZ, V. C. T. Guia para elaboração de referências: ABNT NBR 6023:2018. Bauru, 2019. 54 p. Disponível em: <<https://usp.br/sddarquivos/aulasmetodologia/abnt6023.pdf>>. Acesso em 30 mar. 2020.

ANDRADE, J. Bittencourt de. **Fotogrametria**. Ed. SBEE. Curitiba, Brasil: 1998.

BUENO, Régis. O efeito do multicaminhamento na determinação de coordenadas no posicionamento por satélites. MundoGeo. Agrimensura. 04 dez. 2010. Disponível em: <<https://mundogeo.com/2000/01/01/o-efeito-do-multicaminhamento-na-determinacao-de-coordenadas-no-posicionamento-por-satelites/>> Acesso em 22 fev. 2020.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Agrário. **Manual Técnico de Posicionamento: georreferenciamento de imóveis rurais**. INCRA. 1ª Edição. Brasília, DF, 2013. Disponível

em: <http://www.incra.gov.br/sites/default/files/uploads/estrutura-fundiaria/regularizacao-fundiaria/certificacao-de-imoveis-rurais/manual_tecnico_de_posicionamento_1_edicao.pdf>. Acesso em 07 mar. 2020.

FAZAN, J. A.; MONICO, J. F. G.; CAMARGO, P. O. Controle de Qualidade dos Dados GPS da RBMC. Relatório Científico de Bolsa de Pesquisa de Iniciação Científica. FAPESP (Processo n. 01/03145-2). Presidente Prudente, SP. 2002.

FIGUEIRÊDO, D. C. Curso Básico de GPS. Apostila – CONAB – setembro de 2005.

HELERBROCK, R. Ondas de rádio. *In*: Mundo Educação – Física. Magnetismo. S/d. Disponível em: <<https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/ondas-radio.htm>>. Acesso em 04 mai. 2020.

IBGE. O que é Cartografia. GNSS. Atlas Escolar: conceitos gerais. 2020. Disponível em: <<https://atlasescolar.ibge.gov.br/conceitos-gerais/o-que-e-cartografia/sistema-global-de-navegac-a-o-por-sate-litess.html>>. Acesso em 03 mar. 2020.

IBGE. O que é RBMC. Geociências/Posicionamento geodésico/Redes Geodésicas. 2021. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/16258-rede-brasileira-de-monitoramento-continuo-dos-sistemas-gnss-rbmc.html?=&t=o-que-e>>. Acesso em 21 mar. 2021.

INPE. Nano Satélites - CONASAT. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. 2011. Disponível em: <<http://www.crn.inpe.br/conasat1/nanosatt.php>>. Acesso em 30 abr. 2020.

LANGENDOLFF, A; PELLEGRINI, G. **Fundamentos de Cartografia e o Sistema de Posicionamento Global – GPS**. Curso Técnico em Geoprocessamento. Colégio Politécnico da UFSM. Santa Maria, RS. 2008.

MOLIN, J. P. Sistemas de Posicionamento. 2010. Projeto Apostila. DER-ESALQ/USP.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. 2ª edição. São Paulo: Editora UNESP, 2008. ISBN 978-85-7139-788-0.

MONICO, J. F. G. Pseudodistância e Fase da Onda Portadora. Alta acurácia. MundoGeo, 14 abr. 2011. Disponível em: <<https://mundogeo.com/2010/05/05/pseudodistancia-e-fase-da-onda-portadora/>>. Acesso em 28 fev. 2020.

NOVATEL INC. An Introduction to GNSS. 2015 Second Edition – e-book. ISBN: 978-0-9813754-0-3. Disponível em: <<https://novatel.com/an-introduction-to-gnss>>. Acesso em 06 mai. 2020.

OLIVEIRA, J. C. de. Conceitos Básicos sobre Posicionamento por Satélites Artificiais. XIV Curso de uso escolar de sensoriamento remoto no estudo do meio ambiente. INPE. Julho 2011. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/vcsr/files/Apresentacao_GPS.pdf>. Acesso em 30 abr. 2020

PARZZANINI, Pedro Donizete. Métodos de Posicionamento GNSS. Apostila – Notas de aula. FEAMIG. Belo Horizonte, 2019.

PERONI, R. Fundamentos de GPS. Apostila – Informática aplicada a Geografia. FINOM – Faculdade do Noroestes de Minas, 2004.

PEREIRA, L. A. *Global Navigation Satellite System – GNSS*. Apostila. Curso de Geoprocessamento para Gestão Urbana e Cadastro Rural. UNILINS – Lins, SP. 2010.

SEEBER, G. **Satellite geodesy: foundations methods, and applications**. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 2003, 612 p. extended ed. Disponível em: <<http://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-seeber-g-satellite-geodesy-2003.pdf>>. Acesso em 16 abr. 2020.

SILVEIRA, G. C. **Influência da Geometria dos Satélites na Precisão das Coordenadas Geodésicas Obtidas com o Sistema GPS**. 2008. 170 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18143/tde-28042009-171231/publico/Silveira2008.pdf>>. Acesso em 04 mai. 2020.

TEIXEIRA, M. M. Operações com vetores. *In*: Brasil Escola. S/d. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/fisica/operacoes-com-vetores.htm>>. Acesso em 26 mar. 2021.

TV UNESP. Múltiplos usos do GNSS. Ciências sem limites. Vídeo entrevista com o Prof. João Francisco Galera Monico. TV UNESP. 2017. 1 vídeo (27 minutos). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=pqybZ_q9ILE&app=desktop>. Acesso em 25 fev. 2020.

UNAVCO. TEQC – Translation, Editing, and Quality Check. (Software). Denver, USA, 2019. Disponível em: <<https://www.unavco.org/software/data-processing/teqc/teqc.html#overview>>. Acesso em 25 mai. 2020.

UNAVCO. Teqc Tutorial – Basics of Teqc Use and Teqc Products – by Lou Estey and Stuart Wier. Boulder, Colorado U.S.A., 2014. Disponível em: <https://www.unavco.org/software/data-processing/teqc/doc/UNAVCO_Teqc_Tutorial.pdf>. Acesso em 02 de junho de 2020.

VAZ, Flávio. GNSS: Métodos de Posicionamento. Tecnologias de Rastreamento de Veículos. Apostila USP, São Paulo, PTR5923, 2015. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/380603/mod_resource/content/1/GNSS-Metodos%20de%20posicionamento.pdf>. Acesso em 13 fev. 2020.

ZANOTTA, D. C.; CAPPELLETOO, E.; MATSUOKA, M. T. O GPS: unindo ciência e tecnologia em aulas de física. SciELO. Revista Bras. Ensino Fís. Vol. 33 no. 2 São Paulo–Abril / Junho-2011. ISSN 1806-1117. Disponível em: <https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172011000200014>. Acesso em 03 mai. 2020.