



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS E
TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO

WEYLLER DIOGO ALBUQUERQUE MELO

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA POSICIONAMENTO VRS NO
TERRITÓRIO BRASILEIRO**

Recife

2018

WEYLLER DIOGO ALBUQUERQUE MELO

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA POSICINAMENTO VRS NO
TERRITÓRIO BRASILEIRO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação.

Área de concentração: Geodésia Aplicada.

Orientador: Prof^o. Dr. Silvio Jacks dos Anjos Garnés.

Recife
2018

Catálogo na fonte
Bibliotecária Valdicèa Alves, CRB-4 / 1260

M528d Melo, Weyller Diogo Albuquerque.

Desenvolvimento de metodologia para posicionamento vrs no território brasileiro / Weyller Diogo Albuquerque Melo - 2018.

71folhas, Il.; Tabs.; Abr.; e Sig..

Orientadora: Prof^o. Dr. Silvio Jacks, dos Anjos Garnés.

.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 2018.

Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia Cartográfica. 2. VRS. 3. Posicionamento 4. Atraso atmosférico. 5. Erros de Órbita. 6 Polinômio Interpolador de Lagrange. I. Garnés, Silvio Jacks dos Anjos. II. Título.

UFPE

526.1 CDD (22. ed.)

BCTG/2019-22

WEYLLER DIOGO ALBUQUERQUE MELO

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA POSICIONAMENTO VRS NO
TERRITÓRIO BRASILEIRO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação.

Área de concentração: Geodésia Aplicada.

Aprovada em: 17 de dezembro de 2018.

BANCA EXAMINADORA

Prof^o. Dr. Silvio Jacks dos Anjos Garnés (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. Dr^a. Techn. Andréa de Seixas (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. Dr^a. Cláudia Pereira Krueger (Examinador Externo)
Universidade Federal do Paraná

À minha querida mãe, Nina, que sempre, a despeito de todas dificuldades, me deu suporte e me ensinou a seguir em frente e me reerguer diante das dificuldades.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Silvio Jacks, por ter me dado a oportunidade de trabalharmos juntos e pelo compartilhamento de experiência; sem ele não haveria essa oportunidade de crescimento pessoal.

À Capes por fornecer o auxílio financeiro que me permitiu desenvolver essa pesquisa.

À minha mãe, Nina, por ter estado ao meu lado durante esse período de pesquisa, por me dar forças para suportar os momentos de dificuldades, e por ter sempre me apoiado a seguir em frente com meus objetivos.

Ao meu amigo Glauco Freitas, por me ajudar, com seu conhecimento, em várias etapas desta dissertação, ajuda esta que me fez alcançar o objetivo final da mesma.

À minha amiga Larissa, por me apoiar nos momentos difíceis e estar ao meu lado sempre que eu precisava de apoio durante essa jornada.

Ao meu amigo Rafael Lopes, por me dar algumas boas dicas para solução de problemas nesta dissertação.

À Prof.^a Dr. Andrea de Seixas, por contribuir intelectualmente numa melhor compreensão desta dissertação.

À Prof.^a Dr. Maria de Lourdes (Malu), por me ajudar em algumas etapas dessa dissertação, contribuindo para um melhor resultado final.

À Prof.^a Dr. Claudia Krueger, por me auxiliar a melhor organizar e expor as ideias desta dissertação.

RESUMO

Para realizar um levantamento GNSS (*Global Navigation Satellite System*) é necessário o uso de um receptor denominado móvel (rover), no ponto em que se deseja determinar as coordenadas. Na ausência de um segundo receptor, denominado base, tem-se o levantamento absoluto; caso haja um segundo receptor pode-se usar o levantamento/processamento denominado de relativo. Na realização de um levantamento relativo é preciso que o receptor base seja locado em um ponto de coordenadas conhecidas, ou, caso haja tempo hábil, que fique mais tempo neste ponto para ter maior redundância de observações e utilizar um Posicionamento por Ponto Preciso (PPP). Para solucionar o problema do posicionamento relativo com um receptor, surgiu o conceito de VRS (*Virtual Reference System*) que objetiva a criação de uma estação virtual que servirá de base para um rover num levantamento em que haja a ausência de uma base real. Neste trabalho foi apresentado o modelo matemático de criação da VRS bem como, quais as considerações devem ser tomadas para sua criação, a saber: a posição orbital por interpolação precisa e as modelagens atmosféricas. Para o processamento (ajustamento) da VRS criada com outras estações teste, foi utilizado o *software Topcon Tools v.8.2.3*. A VRS pode ser usada para levantamentos RTK ou pós-processada, nesta dissertação unicamente o pós-processamento foi considerado, dessa forma, foram criados arquivos RINEX, no formato 2.11. Ao longo do texto foram apresentados os métodos mais conhecidos, que podem ser consideradas na redução de erros como: erro de órbita, de troposfera e de ionosfera. O principal fruto desta dissertação foi a geração de uma VRS. No quesito qualidade do ajustamento as VRS geradas proporcionaram aos pontos desvios padrão entre 10 e 50 cm. Entretanto, no quesito discrepância com a posição real as VRS geradas não apresentaram boa qualidade, os variaram de 3 a 30m. Com base na experiência adquirida, sugestões foram feitas para pesquisas e melhorias da qualidade da técnica VRS apresentada.

Palavras-chave: VRS. Posicionamento. Atraso atmosférico. Erros de órbita. Polinômio interpolador de Lagrange.

ABSTRACT

To perform a GNSS (Global Navigation Satellite System) survey it is necessary to use a receiver called rover at the point where you want to determine the coordinates. In the absence of a second receiver, called the base, there is the absolute positioning; if there is a second receiver can be made the survey/processing called relative. In performing a relative positioning it is necessary that the base receiver be positioned at a point of known coordinates, or, if there is sufficient time, to spend more time at this point to have greater redundancy of observations and use the PPP (Precise Point Positioning). To solve this problem came the concept of VRS (Virtual Reference System) that aims to create a virtual station that will serve as a reference base for a rover in a survey in which there is no real base. In this work, the mathematical model of VRS creation was presented, as well as the considerations that must be taken for its creation, namely: the orbital position by precise interpolation and atmospheric modeling. Topcon Tools v.8.2.3 was used for the processing (adjustment) of VRS with other stations. VRS can be used for RTK or post-processed surveys, in this dissertation only the post-processing was considered, in this way, the RINEX file were created in 2.11 format. Throughout the text, it was presented the most known methods that can be considered for the reduction of errors like: orbital error, troposphere and ionosphere delay. The main fruit of this dissertation was the generation of a VRS. Regarding quality in the adjustment, the generated VRS provided standard deviations between 10 and 50 cm. However, relative to discrepancy to the real position, the generated VRS present errors varying from 3 to 30 meters. Based on the experience acquired, suggestions were made to researchs and improvments of quality of the VRS technical presented.

Keywords: VRS. Positioning. Atmospheric delay. Orbit errors. Polynomial Lagrange interpolator.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Rede de Referência e a VRS em um levantamento RTK...	24
Figura 2 –	Elementos envolvidos no deslocamento geométrico.....	26
Figura 3 –	Erros na linha de base causados pelos erros orbitais.....	38
Figura 4 –	Rede de monitoramento IGS.....	40
Figura 5 –	Órbitas finais IGS (2016).....	41
Figura 6 –	Esquema de metodologia aplicada a geração da VRS.....	45
Figura 7 –	Esquema de testes aplicados nas VRS geradas.....	46
Figura 8 –	Módulo das órbitas precisas do AstGeoTop.....	48
Figura 9 –	Órbitas precisas IGS do dia 22 de Janeiro de 2013.....	50
Figura 10 –	Arquivo RINEX criado para o dia 22 de Janeiro de 2013...	51
Figura 11 –	Posições relativas das estações do Teste 1.....	52
Figura 12 –	Estações envolvidas no Teste 2.....	54
Figura 13 –	Posições relativas das estações do Teste 3.....	56
Figura 14 –	Posições relativas das estações do Teste 4.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Comprimento de onda e frequência das observáveis GPS..	23
Tabela 2 –	Influência do erro orbital no levantamento relativo com $k=7$.	39
Tabela 3 –	Lista de abcissas e ordenadas para o exemplo.....	42
Tabela 4 –	Códigos para identificação do satélite no arquivo RINEX....	43
Tabela 5 –	Códigos para identificação do tipo de arquivo RINEX.....	44
Tabela 6 –	Coordenadas da VRS (pós tratamento)	53
Tabela 7 –	Discrepância entre as coordenadas EPS-4 e VRS.....	53
Tabela 8 –	Desvio padrão da VRS no pilar EPS4.....	53
Tabela 9 –	Desvio padrão entre SAT91551 com VRS como base.....	54
Tabela 10 –	Comparação entre SAT 91551 (real) e SAT 91551 (VRS)...	55
Tabela 11 –	Observáveis da VRS geradas em EPS1.....	56
Tabela 12 –	Levantamento real em EPS1.....	56
Tabela 13 –	Discrepância entre observáveis VRS e GPS (Pilar EPS1)...	57
Tabela 14 –	Observáveis da VRS geradas em EPS3.....	57
Tabela 15 –	Levantamento real em EPS3.....	57
Tabela 16 –	Discrepâncias entre as observáveis da VRS e do GPS.....	57
Tabela 17 –	Desvios Padrão da VRS em EPS1 como base.....	59
Tabela 18 –	Discrepância entre as coordenadas da VRS e EPS1.....	59

LISTA DE SIGLAS

ASCII	American Standard Code for Information Interchange
CGCS	China Geodetic Coordinate System
CODE	Centre for Orbit Determination in Europe
COMPASS	Compass Navigation Satellite System
DGPS	Differential Global Positioning System
EC	Estação Central
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EMQ	Erro Médio Quadrático
ESA	European Space Agency
EUREF 89	European Terrestrial Reference Frame 89
GEO	Satélite Geoestacionário
GIM	Global Ionospheric Maps
GLONASS	Global Orbiting Navigation Satellite System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communication
GTRF	Galileo Terrestrial Reference Frame
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICAO	International Civil Aviation Organization
IGS	International GNSS Service
IGSO	Satélite em Órbita Geossíncrona e Inclinada
IGR	Órbitas Rápidas IGS
IGU	Órbitas Ultrarrápidas IGS
IONEX	Ionosphere Map Exchange Format
JPL	Jet Propulsion Laboratory
MEO	Satélite em Órbita Média
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
NMR	Queensland Department of Natural Resources and Mines
NTRIP	Networked Transport of RTCM via Internet Protocol
PPP	Posicionamento por Ponto Preciso
PPS	Precise Positioning Service

PZ-90	Parametry Zemli/Parâmetros da Terra
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
RTCM	Radio Technical Commission for Maritime Services
RTK	Real-Time Kinematic
SBAS	Satellite-Based Augmentation System
SK	Systema Koordinate
SPS	Standard Positioning Service
SP3	Standard Product 3
TEC	Total Electron Content
TECU	Total Electron Content Unit
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UPC	Universitat Politècnica de Catalunya
URSS	União das Repúblicas Socialistas Soviéticas
VMF	Função de Mapeamento de Viena
VRS	Virtual Reference Station
VTEC	Vertical Total Electron Content
WGS-84	World Geodetic System 84
ZTD	Zenithal Tropospheric Delay

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo Geral.....	15
1.1.2	Objetivos Específicos.....	15
1.2	ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	16
2	EMBASAMENTO TEÓRICO.....	17
2.1	POSICIONAMENTO GNSS	17
2.2	ESTAÇÕES DE REFERÊNCIA VIRTUAIS (VRS).....	21
2.3	REFRAÇÃO TROPOSFÉRICA.....	26
2.3.1	Modelagem Hopfield	30
2.3.2	Modelagem Saastamoinen.....	31
2.4	REFRAÇÃO IONOSFÉRICA.....	32
2.4.1	Mapas Globais Da Ionosfera	37
2.5	ERROS DE ÓRBITA E ÓRBITAS PRECISAS	38
2.6	INTERPOLAÇÃO DE LAGRANGE	41
2.7	RINEX (RECEIVER INDEPENDENT EXCHANGE FORMAT).....	43
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	45
3.1	INTERPOLAÇÃO DE LAGRANGE APLICADA ÀS ÓRBITAS PRECISAS.....	47
3.2	CONCEPÇÃO DA VRS.....	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	52
4.1	TESTE 1 – VRS COMO ESTAÇÃO MÓVEL E RECF COMO BASE...	52
4.2	TESTE 2 – VRS COMO BASE E SAT91551 COMO MÓVEL.....	54
4.3	TESTE 3 – COMPARAÇÃO DE OBSERVÁVEIS VRS E DADOS REAIS.....55.....	55
4.4	TESTE 4 – VRS COMO BASE E 4 ESTAÇÕES COMO MÓVEIS.....	58
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	60
	REFERÊNCIAS	63
	APÊNDICE A - DESVIO PADRÃO DA VRS USADA COMO MÓVEL.	67
	APÊNDICE B - AJUSTAMENTO DA SAT91551 COM VRS BASE....	68
	APÊNDICE C - VRS COMO BASE PARA 4 ESTAÇÕES.....	69
	APÊNDICE D - PILARES EPS DENTRO DO CAMPUS DA UFPE.....	70

1 INTRODUÇÃO

O primeiro satélite a orbitar à Terra foi o Sputnik 1, lançado pela extinta União Soviética no ano de 1957, começando assim a corrida espacial. Após isso, foram desenvolvidos satélites com diversas utilidades: comunicação, localização, imageamento, meteorologia, dentre outros. Na metade da década de 1980 foi declarado operacional o programa estadunidense NAVSTAR (*Navigation Satellite Time and Ranging*); este, por sua vez, foi resultado da fusão de dois programas: *Timation* e *System 621B*¹. Este sistema de posicionamento global foi denominado de GPS (*Global Positioning System*) ou NAVSTAR-GPS.

Quase que paralelamente, a União Soviética desenvolve seu sistema de navegação por satélite – GLONASS (*Global Orbiting Navigation Satellite System*) –, depois deles surgiram outros sistemas. GALILEO é o nome dado ao sistema europeu e BEIDOU ao sistema chinês. Da junção dos sistemas supracitados surgiu o termo GNSS (*Global Navigation Satellite System*), sigla que surgiu pela primeira vez em 1991 pela ICAO (*International Civil Aviation Organization*) para designar sistemas globais de navegação que sejam íntegros, disponíveis e capazes de fornecer um serviço contínuo aos usuários.

A criação de uma técnica de posicionamento que utiliza satélites que orbitam a Terra facilitou os levantamentos topográficos e geodésicos.

Os levantamentos GNSS, quanto a quantidade de receptores envolvidos, podem ser classificados em absolutos e relativos. Os levantamentos absolutos, ou posicionamento por ponto, utilizam apenas um receptor; enquanto que os levantamentos relativos utilizam no mínimo dois receptores. Segundo Wells et al. (1986) posicionamentos relativos são mais acurados que levantamentos absolutos.

Para realizar um levantamento é preciso que um receptor, denominado como base, seja locado em um ponto (pilar, placa, entre outros) de coordenadas conhecidas, enquanto um segundo receptor, denominado como móvel (rover), seja deslocado ao longo dos pontos que se deseja determinar as coordenadas. A simultaneidade de observações é bastante importante no levantamento relativo para

¹ Timation e System 621B foram programas desenvolvidos, respectivamente, pela Marinha e pela Força Aérea dos Estados Unidos.

que haja a possibilidade de se realizar simples, duplas e triplas diferenças². Entretanto, conhecer as coordenadas acuradas do ponto em que a estação base está locada é pré-requisito para o processamento (ajustamento) dessas observações. Então, problemas surgem quando não existe um ponto de coordenadas conhecidas nas proximidades de onde o levantamento será realizado, o que faz com que a estação base precise de mais tempo para melhorar a qualidade da observação. Para suprir a necessidade de pontos de coordenadas conhecidas surgiu o conceito de redes ativas GNSS. As redes ativas, em oposição às redes passivas, possuem receptores coletando observações 24 horas por dia. Com as redes ativas é possível realizar levantamentos relativos usando as estações da rede como base, ou seja, considerando uma rede com boa distribuição em uma região que possa ser toda abrangida por essa rede é possível sempre ter uma estação base da rede ativa como referência. O grande problema no Brasil se encontra na dimensão do país – por se tratar de um país com dimensões continentais se torna difícil estabelecer uma rede que consiga cobrir a totalidade do país. Dessa forma, visando resolver esse problema foi criada a VRS (*Virtual Reference Station*).

A VRS é uma estação que de fato não existe fisicamente, mas sim virtualmente. É possível escolher o lugar em que se vai criar essa estação, por isso é bastante útil, pois pode ser concebida mesmo onde inexistente cobertura de estações de redes ativas. Em outras palavras, a VRS será posicionada nas coordenadas que se deseja a partir de modelagens de dados de redes ativas GNSS e dessa forma pode estar situada bem próxima da estação móvel, o que faz com que a VRS seja a sua estação de referência, isto é, a estação base. Com uma estação base (VRS) o mais próximo possível da estação móvel, é reduzida a linha de base – quanto maior a linha de base maiores os erros associados às observações. Mas é preciso lembrar que a qualidade da VRS estará intimamente ligada a qualidade da modelagem dos erros que surgem em observações GNSS, tais como: erro de órbita, ionosfera, troposfera, dentre outros.

Dessa forma essa dissertação tem como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia para criação de VRS, por meio da plataforma MATLAB 2016. É possível realizar a VRS em tempo real e pós processada. Nessa dissertação foi focado no pós-

² Simples, duplas e triplas diferenças são combinações lineares que se podem realizar entre as observáveis originais (pseudodistância e fase) visando obter dessa forma novas observáveis, ou segundo MONICO (2008), observáveis secundárias. As observáveis secundárias criadas a partir da combinação linear das observáveis originais são beneficiadas pela eliminação ou redução de alguns erros (erro de relógio de satélite, erro de relógio do receptor, etc.).

processamento, logo foi gerado um arquivo RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*) representando a VRS. Esse arquivo foi processado por meio do software *Topcon Tools v.8.2.3* (este programa foi escolhido porque o Departamento de Engenharia Cartográfica possui a licença do software). Esse processamento teve como finalidade observar a qualidade da VRS em si e testar o seu emprego como base para uma estação rover.

Esta dissertação reveste-se de importância porque ao se aplicar VRS em um país como o Brasil poderá haver redução de custos quanto a implantação de estações de redes ativas. Por ter, o Brasil, grandes dimensões existe uma grande dificuldade de cobrir todo o território com uma rede ativa de referência. Entretanto, o uso das estações virtuais pode vir a facilitar, e a reduzir custos, no quesito levantamento geodésico/topográfico. Outras importâncias: aumentar os conhecimentos em torno da técnica VRS; esta, por sua vez, tem valor estratégico nos levantamentos GNSS. Outro ponto importante vem da economia que o procedimento trás, já que não há a necessidade de um segundo equipamento para o levantamento (apesar da necessidade de uma rede de referência para a modelagem dos erros provenientes de medidas GNSS).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Esta dissertação tem por fim desenvolver, bem como apresentar, uma metodologia para geração de VRS.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Gerar um arquivo de órbitas precisas (com épocas espaçadas de 1s) com aplicação do Polinômio de Lagrange usando o programa AstGeoTop;
- Criar um programa em plataforma MATLAB para ler o novo arquivo de órbitas precisas e gerar o arquivo RINEX;
- Usar o programa *Topcon Tools v.8.2.3* para processamento da VRS com outros arquivos de levantamento;

- Comparar e analisar os resultados obtidos com a VRS e dados reais.

1.2 ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está organizada segundo a descrição indicada na sequência.

No capítulo 2 se encontra o embasamento teórico. Este tópico foi dividido em subtópicos, sendo que o subtópico 2.1 apresenta um breve estado da arte concernente ao posicionamento GNSS. A VRS é apresentada aos leitores no subtópico 2.2. Em seguida, no subtópico 2.3., é explicada como a refração troposférica afeta as observações GNSS. O atraso ionosférico e a explicação de como a ionosfera pode ser tratada estão indicados no subtópico 2.4. Em seguida o subtópico 2.5 apresenta os erros de órbita e as órbitas precisas. Nos subtópicos 2.6. e 2.7. são apresentados a interpolação de Lagrange e o RINEX, respectivamente.

No capítulo 3 são apresentados os procedimentos metodológicos aplicados nessa dissertação. Sendo que no subtópico 3.1., é explicado como é aplicada a interpolação de Lagrange aplicada às órbitas precisas e no subtópico 3.2. é apresentada como foi gerada a VRS.

No capítulo 4 são apresentados os testes realizados ao longo da dissertação. No capítulo 5 é apresentada as conclusões e recomendações finais.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

Nesta seção são apresentados os principais conceitos teóricos estudados para elaborar essa dissertação: posicionamento GNSS, VRS, atraso troposférico, atraso ionosférico, erros de órbita, interpolação de Lagrange e RINEX.

2.1 POSICIONAMENTO GNSS

A determinação de coordenadas na superfície da Terra, depois do surgimento de satélites artificiais, passou a ser feita com mais facilidade. Porém, para determinação de coordenadas a partir de satélites é preciso que haja comunicação contínua entre os satélites e o receptor (este localizado na superfície terrestre). Quando não existe possibilidade do uso de receptores é possível aplicar as técnicas topográficas.

Hoje, ambas as técnicas (topográfica e GNSS) são utilizadas com frequência, entretanto, como foi mencionado, cada uma com suas restrições. As técnicas topográficas ficam restritas aos terrenos em que o topógrafo possa acessar com instrumentos comuns a essa atividade (tripé, estação total, nível, prisma, dentre outros). Por sua vez, as técnicas de GNSS são limitadas a ambientes que o sinal proveniente dos satélites possam alcançar o receptor.

Foi com os soviéticos – antiga URSS (União das Repúblicas Socialistas Soviéticas) – que houve a primeira aparição de um satélite artificial orbitando a Terra. Ele foi lançado no final da década de 1950 e recebeu o nome de Sputnik-1³ (10 anos depois do início da guerra fria – seu fim foi apenas em 1991). Aproveitando-se dessa tecnologia foram desenvolvidos os sistemas GPS e GLONASS que são, respectivamente, dos Estados Unidos e da URSS – hoje, Rússia. Objetivando escapar da dependência desses sistemas, foram desenvolvidos os sistemas GALILEO e o BEIDOU/COMPASS (*Compass Navigation Satellite System*), e pertencem, nessa ordem, à Comunidade Europeia e à China.

O termo GNSS foi utilizado pela primeira vez em 1991 pela ICAO na 10ª Conferência de Navegação Aérea para designar o conjunto de satélites que sejam íntegros, disponíveis e capazes de fornecer um serviço contínuo aos usuários.

³ A ideia de usar sinais de rádio enviados por satélites para navegação surgiu com o Sputnik 1.

Atualmente, os sistemas abrangidos pelo termo GNSS são divididos em três segmentos: espacial, controle e usuários. Os segmentos de controle e de usuários são semelhantes em todos os sistemas abordados nessa dissertação, por isso, aqui, será feito um breve resumo de como funciona esses segmentos para o GPS, e, por analogia, ficará subentendido para os demais sistemas.

O segmento de controle tem como funções principais (SEEBER, 2003):

- Monitoramento contínuo e controle dos satélites;
- Determinação do tempo GPS;
- Predição das efemérides dos satélites e do comportamento do relógio dos satélites;
- Envio periódico das mensagens de navegação para cada satélite; e
- Pequenas manobras para manter a órbita ou relocar, visando a substituição de um satélite não saudável.

O segmento de controle do GPS possui 11 estações localizadas ao redor do globo, na qual a principal se encontra em *Colorado Springs* (Estados Unidos) e as outras são estações de monitoramento.

De acordo com Krueger (2018), o segmento de usuários é caracterizado por todos os usuários, civis e militares, que empregam receptores GPS quer seja nas navegações ou nos posicionamentos. Atualmente existem vários tipos de receptores que podem ser adquiridos pelos usuários, sejam eles de baixa ou de alta precisão (os preços variam de acordo com vários critérios, a precisão é um deles). Os usuários podem contar com dois tipos de serviços: SPS (*Standard Positioning Service*) e PPS (*Precise Positioning Service*). O SPS é fornecido a todos usuários que tem acesso ao código C/A, já o PPS é limitado aos militares ou usuários autorizados.

O sistema NAVSTAR-GPS foi declarado operacional na metade da década de 1980. O segmento espacial se trata da constelação de satélites que continuamente enviam sinais para a Terra; os Estados Unidos mantêm um mínimo de 24 satélites funcionando, porém atualmente existem 31 (KRUEGER, 2018); estes satélites estão distribuídos em 6 órbitas ao redor da Terra. O sistema de referência do GPS é o WGS-

84 (G1762⁴) – *World Geodetic System* – e o elipsóide de referência recebe o mesmo nome (GPS, 2017).

O sistema GLONASS teve seu primeiro satélite lançado no início da década de 1980. Atualmente este segmento espacial possui 27 satélites distribuídos em 3 órbitas; estes satélites se encontram a uma altitude de 19130 quilômetros. O sistema de coordenadas do GLONASS é o PZ-90 – *Parametry Zemli*//Parâmetros da Terra –, e o elipsóide é o *SK-42 reference system* (ROSSBACH, 2000).

No dia 15 de dezembro de 2016 o sistema GALILEO, da Comunidade Europeia, é declarado operacional. O segmento espacial possui 18 satélites distribuídos em 3 planos orbitais, entretanto, o objetivo é alcançar 30 satélites. O segmento de controle tem por finalidade monitorar as mensagens de navegação e o sistema de tempo, dentre outros. O segmento dos usuários objetiva a construção de receptores para o sistema. O sistema de referência do GALILEO é o GTRF (*Galileo Terrestrial Reference Frame*); o órgão responsável por ele, a ESA – *European Space Agency* – (MONICO, 2008; ESA, 2016).

O sistema de satélites BEIDOU/Compass ainda não está operando em âmbito global – apenas na China –, mas objetiva, no segmento espacial, pôr em órbita 5 satélites geoestacionários (GEO), 27 satélites em órbita média (MEO) e mais 3 satélites em órbita geossíncrona inclinada (IGSO). Seu sistema de referência é o CGCS2000 – *China Geodetic Coordinate System* – (BeiDou, 2017).

Um dos primeiros trabalhos que foram realizados no Brasil, com auxílio do NAVSTAR-GPS, foi elaborado por Tierra Criollo (1993). Em sua dissertação foi realizado um teste com os métodos relativos estático, estático rápido, *stop-and-go* e pseudocinemático. Os resultados alcançados puderam atingir precisão centimétrica nas distâncias obtidas.

Na década de 90 resultados foram obtidos por Krueger (1994) concernentes a aplicação da técnica DGPS (*Differential GPS*) no posicionamento cinemático de trens. Foi alcançado, dessa forma, uma precisão melhor que 3m na planimetria e 5m para a altitude (SOUZA, 2013).

Em Camargo (1999) é demonstrado como a ionosfera afeta as observáveis GNSS. Foram realizados testes com bases curtas e longas em levantamentos absoluto e relativo; ambos foram comparados com as coordenadas originais da

⁴ O código G1762 indica a realização do WGS-84. Isto é feito para atualizar o sistema de referência.

RBMC. Com isso, foi constatado que as discrepâncias (após correções devido a ionosfera) reduziram, em média, da ordem de 80,7% e 41,7%, respectivamente, para o posicionamento por ponto e relativo de linhas de base entre 10km e 215km. Já as coordenadas cartesianas obtidas no posicionamento por ponto apresentaram discrepâncias da ordem de 1 metro.

Em 2004 foi criado um novo protocolo padronizado para fluxo de dados GNSS, foi chamado de NTRIP (*Networked Transport of Radio Technical Commission for Maritime Services via Internet Protocol*) (SOUZA, 2013). O NTRIP faz uso do formato RTCM (*Radio Technical Commission for Maritime Services*) e sua transmissão se dá por meio da *internet*, é possível ao usuário receber as correções RTK diretamente em receptores, que contam com a tecnologia de comunicação GSM – *Global System for Mobile* – (MARQUES et al., 2013).

Em Marques, Sapucci e Monico (2007) foi realizado um estudo baseado na análise de regressão múltipla com variáveis meteorológicas medidas na superfície da Terra. Sua finalidade era determinar as melhores variáveis para determinar o ZTD (*Zenital Tropospheric Delay* – atraso nas observações GNSS causado pela troposfera nas observações GNSS).

Em Melo e Marques (2014) é apresentada uma modelagem da troposfera por meio da estimativa de sua componente úmida e a correção por meio da Previsão Numérica do Tempo com dados do modelo europeu ECMWF – *European Centre for Medium-range Weather Forecasts* – que são disponibilizados com a VMF (*Vienna Mapping Function* – Função de Mapeamento de Viena). Paralelamente foi testada a modelagem de Hopfield (também para a componente úmida da troposfera). Nesta dissertação as análises foram realizadas com estimativas das coordenadas da estação RECF da RBMC – Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo – usando a técnica PPP (Posicionamento por Ponto Preciso). Os resultados alcançados mostraram que o método ECMWF e VMF apresentou EMQ (Erro Médio Quadrático – em média 0,20 m) melhor que a modelagem de Hopfield (0,575 m até 0,819 m – item 3).

No final da década de 90 surgiu a Rede de Estações de Referência; conjunto de estações GNSS que servem para modelar os erros provenientes de observações GNSS. Paralelamente a Rede de Estações de Referência surge a VRS, que, por sua vez, se trata de uma estação que não existe fisicamente, mas que serve de referência para um receptor *rover*.

Em Vollath et al. (2000) são apresentadas estratégias necessárias para a modelagem de dados de diferentes estações de referência (rede de referência). Visando a solução das ambiguidades dentro da rede e gerar correção dos erros necessários para a elaboração da VRS. Neste artigo foram levadas em consideração os principais erros GNSS: ionosfera, troposfera, órbita dos satélites e multicaminho.

Em Higgins (2001) é apresentado um projeto estabelecido, no estado de Queensland (Austrália), entre três parceiros: NMR (*Queensland Department of Natural Resources and Mines*), *Trimble Navigation* e *Ultimate Positioning Group*. Esse projeto visava investigar os aspectos técnicos e financeiros de uma rede de referência VRS neste estado de *Queensland*.

Unindo as constelações NAVSTAR-GPS, GLONASS e, em 2003, GALILEO, a empresa Swissat⁵ estabeleceu uma rede VRS com 24 estações de referência distribuídas sobre o território suíço. Afirmavam que a precisão garantida é de 2cm para a planimetria e de 3 a 4cm para a altimetria (LANGLOIS, 2003).

Em Alves (2008) no PPP com uma VRS gerada, utilizando modelos de tratamento de erros provenientes da atmosfera foi obtido, em média, uma EMQ resultante de 2,51cm num período de 24h de dados. Já com a técnica DGPS, foi alcançado um EMQ de 167,83cm.

Para maior aprofundamento da VRS alguns trabalhos podem ser acessados: (VOLLATH et al., 2000), (VOLLATH, DEKING e LANDAU., 2001), (WANNINGER, 2002), (LACHAPELLE e ALVES, 2002), (KUMAR-MILLS et al., 2005), (OLIVEIRA, 2013), (LANDAU, VOLLATH e CHEN, 2002), (ROFATTO e ASSUNÇÃO, 2017).

2.2 ESTAÇÕES DE REFERÊNCIA VIRTUAIS (VRS)

O GNSS se baseia na determinação de coordenadas de pontos localizados na superfície da Terra, levando em consideração satélites que orbitam ao redor de nosso planeta. Para isso, a antena do receptor que se localiza na superfície terrestre recebe um sinal emitido pelo satélite, e neste sinal são encontradas suas informações de órbita (efemérides transmitidas). Essas efemérides são usadas para a determinação da posição dos satélites, que, por sua vez, são usadas para a determinação das coordenadas finais do receptor GNSS.

⁵ Empresa suíça de tecnologia que atua no domínio de medições com GNSS.

As coordenadas do receptor são determinadas por intermédio das equações de observação das observáveis GNSS. Com ajuda do ajustamento das observações (e da redundância de observação) é possível determinar as coordenadas finais do receptor e seus respectivos desvios padrão (MONICO, 2008; WELLS, 1986; GHILANI e WOLF, 2013).

As duas equações das observáveis: equação de pseudodistância e equação da fase da onda portadora podem ser encontradas em Wells et al. (1986). As equações (2.2.1) e (2.2.2) descrevem respectivamente a pseudodistância e a fase da onda portadora para um instante de tempo (t). Na Tabela 1, para o caso do NAVSTAR-GPS, estão os comprimentos de onda e frequência de suas observáveis (SEEBER, 2003).⁶

$$Pd = \rho + d\rho + c \cdot (dt - dT) + d_{ion} + d_{trop} + M + \varepsilon \quad (2.2.1)$$

$$\phi = -\left(\frac{f}{c}\right) \cdot \rho - f \cdot (dt - dT) - \left(\frac{f}{c}\right) \cdot (-d_{ion} + d_{trop}) + \lambda \cdot N + M + \varepsilon \quad (2.2.2)$$

Onde:

- ρ é a distância geométrica⁷;
- $d\rho$ é o erro cometido ao se determinar a posição do satélite (erros de órbita);
- c é a velocidade da luz no vácuo;
- $dt - dT$ é a diferença de tempo do relógio do satélite com o relógio do receptor;
- d_{ion} é o atraso ionosférico (notar que na pseudodistância esse valor é positivo, enquanto que na fase o valor é negativo);
- d_{trop} é o atraso troposférico;
- d_{hard} é o atraso de *hardware* do receptor;
- D_{hard} é o atraso de *hardware* do satélite;
- M é o erro de multicaminho;

⁶ Nesta dissertação não foram considerados todos esses erros (apenas ionosfera, troposfera e órbita), mas estão sendo apresentados unicamente para explicação da equação.

⁷ $\rho = \sqrt{(X^S - X_R)^2 + (Y^S - Y_R)^2 + (Z^S - Z_R)^2}$, com X^S, Y^S, Z^S coordenadas geocêntricas do satélite no momento da transmissão do sinal; X_R, Y_R, Z_R são as coordenadas geocêntricas do receptor no momento da transmissão.

- w é o ângulo de fase *windup* do receptor;
- W é o ângulo de fase *windup* do satélite;
- f é a frequência da fase;
- N é a ambiguidade da fase;
- ε são erros aleatórios.

Tabela 1 – Comprimento de Onda e Frequência das observáveis GPS.

Observável GPS	Comprimento de Onda (λ)	Frequência (f)
Código P	29,33 m	10,23 MHz
Código C/A	293,26 m	1,023 MHz
Código CM	586,10 m	511,5 KHz
Código CL	586,10 m	511,5 KHz
L1	19,05 cm	1575,42 MHz
L2	24,45 cm	1227,60 MHz
L5	25,50 cm	1176,45 MHz
L2C	24,43 cm	1227,60 MHz

Fonte: Adaptado de Seeber (2003).

Quando se está realizando um levantamento GNSS, visando uma melhor qualidade dos resultados finais, é comum a utilização de um segundo equipamento – uma base de coordenadas conhecidas –, para servir de referência ao receptor itinerante (receptor que caminhará nos pontos que se deseja determinar). No entanto, em locais onde não existem pontos com coordenadas conhecidas para serem usados nos levantamentos relativos, torna-se inviável esse tipo de levantamento – isso faz com que o tempo de ocupação nos pontos seja maior. Dessa forma, quando não há pontos de coordenadas conhecidas o levantamento demanda mais tempo para alcançar uma precisão melhor. Essa é a vantagem da VRS – levantamentos sem a necessidade de uma estação conhecida na proximidade do *rover*.

A concepção de VRS é baseada na existência de uma rede GNSS de referência continuamente conectada via *link* de rádio ou *internet* a um centro de controle. O centro de controle (computador de processamento) cria um modelo regional de correções – dos erros presentes nas observáveis GNSS – e envia para o usuário as informações da rede (LANDAU, VOLLATH e CHEN 2002). O principal objetivo da VRS é reduzir a linha de base entre o *rover* e a estação de referência, visando minimizar erros espacialmente correlacionados (KISLIG e PETOVELLO, 2011).

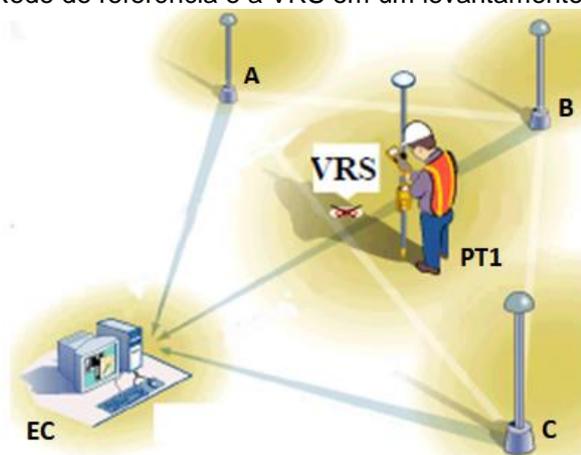
A ideia central por trás da Estações de Referência Virtual é criar dados de uma estação de referência que simule uma estação de referência próxima do usuário.

Criando dessa forma uma linha de base curta para o usuário, eliminando a necessidade de haver um receptor de referência posicionado sobre um ponto de coordenadas conhecidas (VOLLATH et al. 2000).

Hu et al. (2003) afirmam que a VRS não produz dados de um receptor real. São gerados de observações reais de GPS feita por uma rede de múltiplas estações de referência. A ideia básica é que a VRS se assemelhe o máximo possível de um receptor real na mesma posição.

A Figura 1 apresenta um esquema aproximado de como uma VRS se apresenta ao usuário. É possível ver três antenas (A, B e C) representando a rede de estações GNSS, que servirão de referência para a geração da VRS. O desenho do computador indica a estação central (EC) que receberá as informações da rede e dessa forma modelará os dados captados e enviará as correções por modelo para o receptor móvel (receptor – PT1 – que está com o homem na Figura 1). Na falta de uma estação de referência próxima do usuário (uma estação base), as três estações de referência (A, B e C) servirão para gerar coletar dados que serão processadas pelo computador central.

Figura 1 – Rede de referência e a VRS em um levantamento RTK.



Fonte: Landau, Vollath e Chen. (2002).

“Dessa forma o receptor GNSS *rover* determina a própria posição interpretando os dados gerados pela VRS como se fosse de uma estação real” (LANDAU, VOLLATH e CHEN, 2002). De acordo com Alves (2008), existe a possibilidade da aplicação do conceito VRS tanto para o RTK quanto para o modo pós-processado, este último se dá com a geração do arquivo RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*) – a VRS é também muito útil para aplicação em georreferenciamento de imóveis rurais.

O uso de redes de estações de referência em lugar de uma única estação de referência permite modelar os erros sistemáticos na região, providenciando assim, uma redução dos erros (atmosféricos e de relógios) envolvidos (LANDAU, VOLLATH e CHEN, 2002).

Para aplicação do modelo matemático é necessário escolher uma das estações de referência para ser a base. Essa estação base pertence a rede de referência e será escolhida a que se localizar mais próxima do *rover* – esse procedimento se dá em um levantamento RTK, em que é necessário que as coordenadas conhecidas se apresentem em tempo real. Com as observações de fase e pseudodistância, além dos erros atmosféricos modelados e erros de relógio é que a VRS é gerada (ALVES, 2008). Dessa forma, têm-se as equações 2.2.3 e 2.2.4:

$$\rho_b^s(t) = \sqrt{(X^s - X_b)^2 + (Y^s - Y_b)^2 + (Z^s - Z_b)^2} \quad (2.2.3)$$

$$\rho_v^s(t) = \sqrt{(X^s - X_v)^2 + (Y^s - Y_v)^2 + (Z^s - Z_v)^2} \quad (2.2.4)$$

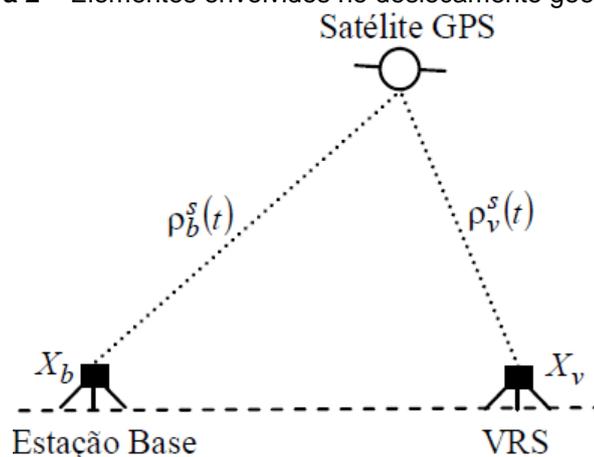
Onde:

- $\rho_b^s(t)$ e $\rho_v^s(t)$ são as distâncias geométricas entre o satélite e a estação de referência base e a VRS, respectivamente (m);
- t é a época que está sendo trabalhada (s);
- X^s, Y^s, Z^s é a posição do satélite na época t (m);
- X_b, Y_b, Z_b e X_v, Y_v, Z_v são as posições da estação de referência base e a posição da VRS, respectivamente (m).

Assim, é preciso deslocar as observações de fase e da pseudodistância da base para a posição da VRS através da equação 2.2.5. (ALVES, 2008):

$$\Delta\rho = \rho_v^s(t) - \rho_b^s(t) \quad (2.2.5)$$

Figura 2 – Elementos envolvidos no deslocamento geométrico.



Fonte: Alves (2008).

Depois de determinar os deslocamentos geométricos da estação base para a VRS, pode-se começar a introdução dos elementos que influenciam nas medições GNSS. Os erros, que podem ser introduzidos, são: troposfera, ionosfera, órbita do satélite, multicaminho, relógio do receptor, centro de fase da antena, dentre outros (ALVES, 2008).

Segundo Wanninger (2002), a qualidade da VRS depende de dois aspectos: em primeiro lugar dos erros causados pelo multicaminho e em segundo pelos erros causados pela atmosfera (ionosfera e troposfera). As magnitudes da tendência e da qualidade da VRS são estimadas conjuntamente através dos modelos de correções (esses modelos são apresentados nos tópicos 2.3.1, 2.3.2, 2.4.1 e 2.5 – os dois primeiros apresentam uma modelagem da troposfera, o terceiro uma modelagem da ionosfera e por último uma modelagem da órbita).

Quando aplicada ao método RTK, a técnica VRS alcança, dentro da área de abrangência da rede GNSS, uma precisão de 2 cm na horizontal e 4cm na vertical. Outro ponto benéfico da VRS, por ser gerada a partir de uma rede de referência (em lugar de uma única estação de referência), é a distância que pode ser gerada, superando os atuais 10–15 km (KISLIG e PETOVELLO, 2011).

2.3 REFRAÇÃO TROPOSFÉRICA

Partindo da superfície terrestre até 50 Km se encontra a porção da atmosfera conhecida por troposfera. Se caracteriza por ser um meio não dispersivo, isto é, o atraso troposférico independe da frequência do sinal que cruza esta camada da

atmosfera. A troposfera possui uma influência sobre as medidas GNSS e causam erros que podem atingir 30 m (MONICO, 2008). Por conseguinte, existe uma preocupação da comunidade científica para a elaboração de modelos matemáticos que descrevam bem o comportamento da troposfera, objetivando melhorar a qualidade das observações GNSS.

As ondas eletromagnéticas no vácuo são descritas pelas equações (2.3.1), (2.3.2), (2.3.3) e (2.3.4) conhecidas como equações de Maxwell (HALLIDAY, RESNICK e WALKER 2012b; BÖHM e SCHUH, 2013):

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0 \quad (2.3.1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.3.2)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.3.3)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu\epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (2.3.4)$$

Com:

- E e B representando os campos elétrico e magnético, respectivamente;
- μ é a constante de permeabilidade magnética;
- ϵ é a constante de permissividade elétrica⁸.

Dessa forma, após algumas substituições e considerações é possível obter a equação 2.3.5.

$$\nabla^2 \cdot \vec{E} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \rightarrow \nabla^2 \cdot \vec{E} = \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (2.3.5)$$

⁸ $\epsilon = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m (Farad por metro) e $\mu = 1,257 \cdot 10^{-6}$ H/m (Henry por metro).

Na equação (2.3.5) c representa a velocidade da luz e n é o índice de refração do ar. Esse índice de refração se relaciona com a refratividade⁹ (N) através da equação 2.3.6. Como o valor aproximado de n na atmosfera terrestre é próximo de 1 é preferível trabalhar com um número de magnitude maior como o N_{ref} (BÖHM e SCHUH, 2013).

$$N_{ref} = (n - 1) \cdot 10^{-6} \quad (2.3.6)$$

Numa modelagem da troposfera é comum separá-la em duas componentes: uma hidrostática (seca) e outra úmida; com isso a refração troposférica pode ser determinada a partir da soma dessas componentes (MONICO, 2008; MELO e MARQUES, 2014).

A componente seca da refração troposférica pode ser aproximada por meio da equação (2.3.7) (WELLS et al., 1986).

$$D_{TC} = 2,27 \cdot 10^{-3} P_0 \quad (2.3.7)$$

Em que D_{TC} é obtido em metros e P_0 é a pressão na superfície terrestre e é medido em mbar. Considerando que em média a pressão na superfície é 1013 mbar, tem-se um atraso de aproximadamente 2,3 m, correspondendo assim, a componente seca da troposfera.

Um outro modelo simplificado para determinar o atraso troposférico é apresentado na equação (2.3.8) (TSUI, 2005).

$$\Delta = \frac{2,47}{\sin \xi + 0,0121} \quad (2.3.8)$$

Em que:

- ξ é o ângulo de elevação entre o usuário e o satélite;

⁹ Mais precisamente a refratividade é um número complexo (real mais imaginário), $N = N_0 + N'(v) - iN''(v)$. Apesar disso é possível separar a parte real da parte imaginária para trabalhar com sinais GNSS, já que os comprimentos de onda desses sinais não passam de alguns centímetros. Para mais informações consultar BÖHM e SCHUH (2013).

- Δ é o atraso troposférico em metros.

As componentes úmida e seca possuem uma influência de aproximadamente 10% e 90%, respectivamente, sobre o atraso troposférico total (MELO e MARQUES, 2014). Entretanto, possuem níveis de dificuldades diferentes para a modelagem: a componente úmida – que depende da quantidade de água na atmosfera – é de difícil modelagem; a componente hidrostática é mais facilmente trabalhada, o que é positivo, já que possui uma maior influência – 90% – nas observações GNSS (ALVES, 2008).

Para a determinação dos valores iniciais do atraso troposférico (ZTD – *Zenital Tropospheric Delay*) usualmente são utilizados modelos matemáticos, dentre eles, Hopfield e Saastamoinen são os mais usados (MARQUES, SAPUCCI e MONICO, 2007). A equação 2.3.9 representa a diferença entre a trajetória do sinal (caminho percorrido com efeito da refração) e a trajetória geométrica – este atraso troposférico pode ser interpretado como a integral ao longo do caminho de propagação do sinal (SAPUCCI e MONICO, 2001; GARNÉS, 2001).

$$D_{TROP} = S - S_g \rightarrow \int n ds - \int ds \rightarrow \int (n - 1) ds \rightarrow 10^{-6} \int N ds \quad (2.3.9)$$

Em que:

- S e S_g representam as distâncias percorrida pelo sinal e a distância geométrica, respectivamente;
- n representa o índice de refração do ar;
- $N = (n-1) \times 10^6$ é denominado refratividade atmosférica;
- ds é o elemento diferencial a ser integrado.

Visando facilitar a determinação da refratividade atmosférica e paralelamente o atraso troposférico, são utilizadas funções de mapeamento que consideram a refratividade como uma função da temperatura (T), da densidade do ar (ρ) e da pressão parcial do vapor d'água (e), essas variáveis por sua vez estão em função da altitude (h), como pode ser visualizado na equação (2.3.10) (SAPUCCI e MONICO, 2001).

$$N = 10^{-6} \int_{h_0}^{\infty} k_1 R_h \rho dh + 10^{-6} \int_{h_0}^{\infty} (k_2' \frac{e}{T} Z_w^{-1} + k_3 \frac{e}{T^2} Z_w^{-1}) dh \quad (2.3.10)$$

- $R_h = 287,0538 \text{ JKg}^{-1}\text{K}^{-1}$ é a constante específica para gases hidrostáticos;
- ρ densidade do ar;
- e pressão parcial do vapor d'água¹⁰;
- Z_w^{-1} é o inverso da constante de compressibilidade do vapor d'água;
- T é a temperatura em Kelvin.

Com k_1 , k_2 e k_3 com valores bem definidos¹¹. Outro modelo para determinar a refratividade com uma acurácia 0,5% (caso a frequência se encontre abaixo de 30GHz) é o de Smith-Weintraub; baseado em observações meteorológicas (GARNÉS, 2001).

Na equação (2.3.9) é possível integrar a refratividade com relação a h (o elemento ds), dessa forma, o resultado obtido será o atraso troposférico na direção zenital, enquanto que a equação (2.3.10) – novamente integral com relação a h – fornece a refratividade hidrostática – primeira parcela da equação (2.3.10) – já as duas últimas parcelas (a integral de uma soma) fornecem a refratividade com respeito a componente úmida (SAPUCCI e MONICO, 2001).

É possível notar que na equação (2.3.10) a primeira parcela (a contribuição hidrostática) tem como única variável a densidade do ar (ρ), dessa maneira é possível determinar esta parcela através de uma relação entre P_0 (pressão do ar na superfície) em hPa, latitude local (φ), e da altitude (H_0) em Km como mostrado na equação (2.3.11) (SAPUCCI e MONICO, 2001).

$$D_{ZH} = 2,27671422 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{P_0}{(1 - 0,0026 \cdot \cos 2\varphi - 0,00028H_0)} \quad (2.3.11)$$

2.3.1 Modelagem Hopfield

O modelo Hopfield considera que o índice de refratividade deve ser obtido através de valores de temperatura e pressão medidos na superfície terrestre e em

¹⁰ A relação entre pressão parcial do vapor d'água e a umidade relativa do ar (R_h) estão relacionadas através da seguinte relação: $e_{mbar} = 0,01R_h(\%)e^{-37,2465+0,213166T-0,000256908T^2}$ (LEICK, RAPOPORT e TATARNIKOV, 2015).

¹¹ As constantes físicas k_1 , k_2 e k_3 (chamadas de constantes de refratividade atmosférica) são obtidas em parte por experimentos e em parte teoricamente, em LEICK, RAPOPORT e TATARNIKOV (2015) são apresentados os seus valores: $k_1 = 77,60 \text{ K hPa}^{-1}$, $k_2 = 22,10 \text{ K hPa}^{-1}$ e $k_3 = 370100 \text{ K}^2 \text{ hPa}^{-1}$.

função da altura da camada atmosférica que influencia na propagação de sinais (SAPUCCI e MONICO, 2001).

As equações (2.3.1.1) e (2.3.1.2) descrevem, respectivamente, os atrasos zenitais para a componente seca (hidrostática) e a componente úmida. Os elementos T_0 e P_0 – temperatura (Kelvin) e pressão (hPa) – são medidos na superfície terrestre. Os elementos H_H e H_W são as alturas das camadas atmosféricas das componentes hidrostática e úmida, respectivamente, em metros e que podem ser determinados pelas equações (2.3.1.3) e (2.3.1.4) (SAPUCCI e MONICO, 2001).

$$D_{zh} = 155,2 \times 10^{-7} \frac{P_0}{T_0} H_H \quad (2.3.1.1)$$

$$D_{zw} = 155,2 \times 10^{-7} \frac{4810 e_0}{T_0^2} H_W \quad (2.3.1.2)$$

$$H_H = 40136 + 148,72(T_0 - 273,16) \quad (2.3.1.3)$$

$$H_W = 11000 - 44,44\varphi \quad (2.3.1.4)$$

2.3.2 Modelagem Saastamoinen

Este é outro modelo que tem por objetivo modelar a troposfera. Parte da premissa que a densidade do ar é diretamente proporcional a pressão atmosférica e inversamente proporcional a altitude e a gravidade (SAPUCCI e MONICO, 2001). As equações (2.3.2.1), (2.3.2.2) e (2.3.2.3) descrevem o modelo.

$$D_{ZH} = 0,002277DP_0 \quad (2.3.2.1)$$

$$D_{ZW} = 0,002277D \left(\frac{1255}{T_0} + 0,05 \right) e_0 \quad (2.3.2.2)$$

$$D = (1 + 0,0026\cos 2\varphi + 0,00028h_0) \quad (2.3.2.3)$$

Em que P_0 e e_0 estão em hPa e T em Kelvins. Na equação (2.3.2.3) o parâmetro h_0 possui unidade de quilômetros. A temperatura e a pressão podem ser determinadas

de maneira direta ou indireta: a maneira direta é a obtida por medições realizadas em campo durante as observações GNSS e a maneira indireta diz respeito a modelos matemáticos que relacionam a altitude com a pressão e a temperatura.

2.4 REFRAÇÃO IONOSFÉRICA

Entre 50 e 1000Km da superfície da Terra se encontra a camada da atmosfera conhecida como ionosfera. Nesta região, a radiação ultravioleta do sol ioniza as moléculas de gás que se encontram na atmosfera e liberam dessa forma elétrons livres. Essas partículas livres carregadas – partículas ionizadas – interferem no sinal GNSS, degradando dessa forma a qualidade do resultado obtido. O erro causado pela refração ionosférica pode variar de 1 a 100 metros (CAMARGO, 1999; ARMENDARIS, MATSOUKA e CAMARGO, 2009; WELLS et al., 1986).

A ionosfera é um meio dispersivo, o que significa dizer que a refração ocorrida em algum sinal transmitido através dela depende da frequência deste; pode-se dizer que a fase e o código serão afetados de formas diferentes – a portadora sofre um avanço e a modulação sofre um retardo (MONICO, 2008). Associada à portadora, tem-se a velocidade de fase (v_f), enquanto que a modulação tem a velocidade de grupo (v_{gr}) (WELLS et al., 1986); a equação da velocidade de fase é apresentada em (2.4.1):

$$V_f = \lambda \cdot f \quad (2.4.1)$$

Para a velocidade de grupo a equação (2.4.2) muda um pouco (HOFMANN-WELLENHOF, LICHTENEGGER e COLLINS, 2012):

$$V_{gr} = - \frac{\partial f}{\partial \lambda} \lambda^2 \quad (2.4.2)$$

A forma diferencial de (2.4.1) resulta em (2.4.3):

$$dV_f = f d\lambda + \lambda df \quad (2.4.3)$$

Reorganizando a equação (3.4.3), obtém-se a equação (2.4.4):

$$\frac{df}{d\lambda} = \frac{1}{\lambda} \frac{dV_f}{d\lambda} - \frac{f}{\lambda} \quad (2.4.4)$$

Substituindo (2.4.4) em (2.4.2), tem-se a equação (2.4.5):

$$V_{gr} = -\lambda \frac{dV_f}{d\lambda} + f\lambda \quad (2.4.5)$$

Substituindo (2.4.1) em (2.4.5), chega-se a equação (2.4.6):

$$V_{gr} = V_f - \lambda \frac{dV_f}{d\lambda} \quad (2.4.6)$$

Quando estão em um meio não dispersivo as velocidades (de grupo e de fase) são iguais e têm suas velocidades correspondente a velocidade da luz, ou seja, 299792458 m/s (BÖHM e SCHUH, 2013; HOFMANN-WELLENHOF, LICHTENEGGER e COLLINS, 2012). Num meio em que o índice de refração influencia a velocidade do sinal as equações ficam (equações 2.4.7 e 2.4.8).

$$V_f = \frac{c}{n_f} \quad (2.4.7)$$

$$V_{gr} = \frac{c}{n_{gr}} \quad (2.4.8)$$

Quando a equação (2.4.7) é derivada com relação a λ , obtém-se a equação (2.4.9):

$$\frac{dV_f}{d\lambda} = -\frac{c}{n_f^2} \frac{dn_f}{d\lambda} \quad (2.4.9)$$

Substituindo (2.4.9), (2.4.8) e (2.4.7) em (2.4.6) chega-se a equação (2.4.10):

$$\frac{c}{n_{gr}} = \frac{c}{n_f} + \lambda \frac{c}{n_f^2} \frac{dn_f}{d\lambda} \quad (2.4.10)$$

Organizando a equação (2.4.10), obtém-se a equação (2.4.11):

$$\frac{1}{n_{gr}} = \frac{1}{n_f} \left(1 + \frac{1}{n_f} \frac{dn_f}{d\lambda} \right) \quad (2.4.11)$$

Por aproximação $(1+\varepsilon)^{-1} = (1- \varepsilon)$; aplicando-a na equação (2.4.11) tem-se a equação (2.4.12):

$$n_{gr} = n_f - \lambda \frac{dn_f}{d\lambda} \quad (2.4.12)$$

Em Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Collins (2012), afirma-se que a equação (2.4.12) é a equação modificada de Rayleigh.

O índice de refração que afeta a fase pode ser obtido através de uma série, como na equação (2.4.13):

$$n_f = 1 + \frac{c_2}{f^2} + \frac{c_3}{f^3} + \frac{c_4}{f^4} + \dots \quad (2.4.13)$$

Nessa série os coeficientes c_2 , c_3 , c_4 , não dependem da frequência do sinal, mas sim do número de elétrons presentes na atmosfera. Usando como aproximação até o segundo termo (c_2) e calculando seu diferencial, obtêm-se as equações (2.4.14) e (2.4.15):

$$n_f = 1 + \frac{c_2}{f^2} \quad (2.4.14)$$

$$dn_f = - \frac{2c_2}{f^3} df \quad (2.4.15)$$

Substituindo (2.4.15) e (2.4.14) em (2.4.12), chega-se ao seguinte resultado¹²:

¹² Para chegar na equação (2.4.16) é preciso lembrar que $C = \lambda \cdot f$ e que a derivada dessa equação com relação a λ pode ser igualada com a da derivada com relação a f . Dessa forma, obtêm-se a seguinte relação $\frac{\lambda}{d\lambda} = - \frac{f}{df}$. Essa relação pode ser útil para ser substituída na equação (2.4.12) que está em função de λ , ficando dessa forma em função de f , com isso é possível chegar na equação (2.4.16).

$$n_{gr} = 1 - \frac{c_2}{f^2} \quad (2.4.16)$$

A refração ionosférica é causada por conta do TEC (*Total Electron Contents* – Conteúdo Total de Elétrons), que é o número de elétrons estimados no caminho percorrido pelo sinal GNSS – sinal que vai do satélite ao receptor GNSS (MONICO, 2008).

Alguns fatores influenciam na variação do TEC: variações diurnas que ocorrem devido à recombinação de elétrons e íons; as estações do ano também influenciam na variação da densidade devido a mudança do ângulo zenital do sol e de outros fatores; e por fim, há variações cíclicas devido as manchas solares – ciclos que duram aproximadamente 11 anos (CAMARGO, 1999; MONICO, 2008; ARMENDARIS, MATSUOKA e CAMARGO, 2009).

Uma forma de minimizar o erro causado pela ionosfera é a utilização da combinação *ion-free*¹³ (MONICO, 2008). Mas existem formas alternativas para se reduzir os erros causados pela ionosfera, entre eles o mais famoso é o modelo de Klobuchar, cujos coeficientes estão contidos nas efemérides transmitidas (ARMENDARIS, MATSUOKA e CAMARGO, 2009).

Outro modelo que pode ser aplicado para a minimização desses erros é o GIM (*Global Ionospheric Maps* – Mapa Ionosférico Global) que é fornecido pelo IGS (*International GNSS Service* – Serviço GNSS Internacional). Esse modelo contém os valores de TEC que foram determinados através da sua rede de receptores GNSS de dupla frequência – os mapas globais são disponibilizados no formato IONEX – *Ionosphere Map Exchange Format* (ARMENDARIS, MATSUOKA, e CAMARGO, 2009).

O atraso ionosférico pode ser definido através das equações (2.4.17) e (2.4.18):

$$I_{fr}^s = -\frac{40,3}{f^2} TEC \quad (2.4.17)$$

¹³ Para eliminar o efeito da ionosfera das observações, pode-se usar a estratégia da combinação linear, que é basicamente a criação de uma nova observável a partir da combinação de outras observáveis. Com isso se obtém o seguinte resultado: $Pd_{L1L2} = Pd_{L1} - \frac{(f_{L1})^2}{(f_{L2})^2} Pd_{L2}$ (pseudodistância) e $\varphi_{L1L2} = \varphi_{L1} - \frac{f_{L1}}{f_{L2}} \varphi_{L2}$ (fase) (GHILANI e WOLF, 2013; MONICO, 2008).

$$I_{gr}^s = \frac{40,3}{f^2} TEC \quad (2.4.18)$$

A equação (2.4.18) representa o atraso ionosférico causado na pseudodistância, enquanto que a equação (2.4.17) representa o atraso da fase – ambos são numericamente iguais, mas possuem sinais diferentes, isto se dá porque a ionosfera age de forma diferente em ambos.

O valor TEC (que possui unidade de elétrons/m²) pode ser definido como uma integral do número de elétrons ao longo do caminho. Esta integral se baseia em uma coluna que se estende do receptor ao satélite com uma área da seção transversal de 1 m²; o TEC pode variar de 10¹⁶ a 10¹⁸ elétrons/m² e o atraso ionosférico pode variar de dezenas de centímetros a dezenas de metros; pode ser obtido a partir da equação (2.4.19) (GARNÉS, 2001; WELLS et al., 1986).

$$TEC = \int Ne ds \quad (2.4.19)$$

Para quantidade de TEC na vertical (ou VTEC) é possível determinar a refração ionosférica a partir das equações (2.4.20) e (2.4.21).

$$I_{fr}^s = -\frac{1}{\cos Z'} \frac{40,3}{f^2} VTEC \quad (2.4.20)$$

$$I_{gr}^s = \frac{1}{\cos Z'} \frac{40,3}{f^2} VTEC \quad (2.4.21)$$

Z' é o ângulo zenital no caminho do sinal em relação a um plano de altitude média (H_m), e pode ser obtido por meio da equação (2.4.22).

$$Z' = -\frac{R_m}{R_m + H_m} \text{sen } Z \quad (2.4.22)$$

Em que:

- R_m é o raio médio da Terra;
- H_m representa a altura média da ionosfera, que varia entre 300 e 450 km;

- z é a distância zenital do satélite.

2.4.1 Mapas Globais da Ionosfera

O IGS por meio de uma rede de receptores GNSS disponibiliza os GIM (*Global Ionospheric Maps* – Mapas Ionosféricos Globais) que por sua vez fornecem o VTEC (*Vertical TEC* – TEC Vertical) para que a partir deste último o TEC seja calculado e se possa modelar a ionosfera (ARMENDARIS, MATSUOKA e CAMARGO, 2009).

Os mapas globais são fornecidos com latências que variam de horas a semanas. Na página do IGS, onde se encontram os produtos fornecidos, podem ser visualizadas as latências com que são fornecidos os mapas:

- *Rapid Ionospheric TEC grid* – grade do TEC Ionosférico Rápido – é fornecido diariamente com latência menor que 24 horas com precisão de 2-9 TECU¹⁴ com intervalo de 5° de longitude por 2,5° de latitude;
- *Final Ionospheric TEC Grid* – grade do TEC Ionosférico Final – é fornecido com uma latência de aproximadamente 11 dias possui uma precisão de 2-8 TECU com o intervalo da amostra de 5° de longitude por 2,5° de latitude (IGS, 2016).

Os mapas da ionosfera são produzidos no formato IONEX (*Ionosphere Map Exchange Format*). Como esses mapas fornecem o VTEC é necessário aplicar uma função de mapeamento para convertê-lo em TEC (CAMARGO, 1999).

Os mapas são produzidos pelos órgãos: CODE (*Centre for Orbit Determination in Europe*), ESA (*Europe Space Agency*), JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) e UPC (*Universitat Politècnica de Catalunya*). “Desta forma, para cada dia é disponibilizado pelo IGS um total de 4 arquivos IONEX.”

Desde o final de 2002 os arquivos IONEX desses centros são combinados para gerar um arquivo – também conhecido como IONEX – geral. “Uma das aplicações destes arquivos IONEX do IGS é possibilitar ao usuário de receptor de simples frequência uma forma de obter o valor do erro devido à ionosfera para realizar a

¹⁴ TECU – *TEC Unit* (Unidade de TEC) – cada TECU equivale a 10^{16} elétrons/m² (ARMENDARIS, MATSUOKA e CAMARGO, 2009)

correção das suas observáveis, e desta forma, melhorar a qualidade do seu posicionamento.” (MATSUOKA, COLLISCHONN e CAMARGO, 2010).

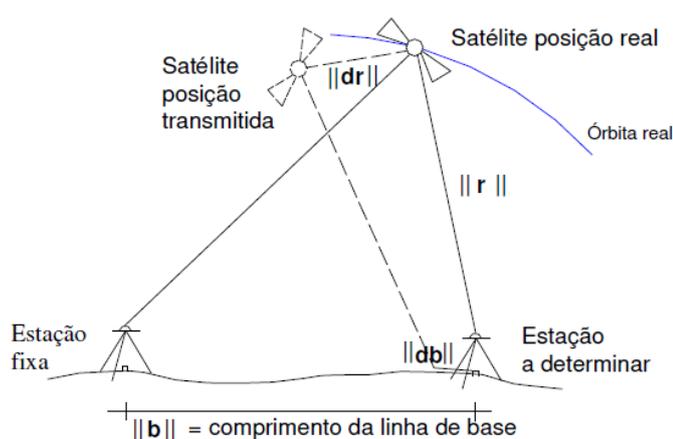
2.5 ERROS DE ÓRBITA E ÓRBITAS PRECISAS

As órbitas dos satélites, sejam eles, artificiais ou naturais, assim como as dos planetas em torno das estrelas, respeitam as três leis de Kepler¹⁵. No entanto, tais órbitas, descritas por essa lei, não levam em consideração perturbações que ocorrem por conta da presença de outros objetos (estrelas e planetas).

Situações reais precisam considerar forças que perturbam essa órbita, como: atração da Lua e do Sol, o efeito da saliência equatorial, pressão da radiação solar, arrasto atmosférico (WELLS et al., 1986).

Para a determinação das coordenadas de um ponto na superfície terrestre, com um receptor GNSS, é necessário que haja comunicação com o satélite. Entretanto as coordenadas dos satélites possuem erros – erros que são transmitidos para a estação –, oriundos de diversas fontes, como já citado, que muitas vezes, caso haja necessidade de maior precisão num levantamento, devem ser eliminados ou ao menos reduzidos. A Figura 3 ilustra o erro causado na linha de base devido a erros na determinação da posição do satélite.

Figura 3 – Erros na linha de base causados pelos erros orbitais.



Fonte: Garnés (2001).

¹⁵ As três leis de Kepler: 1ª lei – as órbitas dos satélites (a lei original faz referência a planetas, mas a lei é aceita para qualquer objeto que orbite em torno de outro de massa muito maior) são elipses, cujo um dos focos se localiza no centro de massa da Terra; 2ª lei – a área do ‘setor’ delimitada pelo movimento do satélite possui sempre o mesmo valor para iguais intervalos de tempo; 3ª lei – o quadrado do período de revolução do satélite é proporcional ao cubo do semi-eixo maior da elipse descrita no movimento ($T^2 = k.a^3$) – para mais informações consultar: UFRGS, 2017; HALLIDAY, RESNICK e WALKER, 2012a.

Em Wells et al. (1986) é indicada uma relação entre o erro na linha de base no levantamento relativo com erro na posição do satélite, esta relação é a equação (2.5.1):

$$\frac{\Delta b}{b} = \frac{\Delta r}{r} \quad (2.5.1)$$

Em que:

- Δb é o erro na linha de base;
- b é o comprimento da linha de base;
- Δr é o erro na posição do satélite;
- r é a distância entre o satélite e o receptor GNSS.

Porém em Beutler et al. (1998) apud GARNÉS (2001) a equação mais adequada para descrever a linha de base – latitude (ϕ), longitude (λ) e altitude geométrica (h) – é a (2.5.2) com a inserção do termo k ($4 < k < 10$), enquanto que a (2.5.1) descreve apenas a componente da altitude.

$$\frac{\Delta b}{b} = \frac{\Delta r}{kr} \quad (2.5.2)$$

A equação (2.5.1) relaciona a magnitude do erro do satélite com o erro da base (GARNÉS, 2001). A Tabela 2 mostra o que ocorre com a linha de base, caso seja cometido um erro de 100 metros na posição dos satélites ($\Delta r = 100$ metros).

Tabela 2 – Influência do Erro Orbital no Posicionamento Relativo com $k=7$.

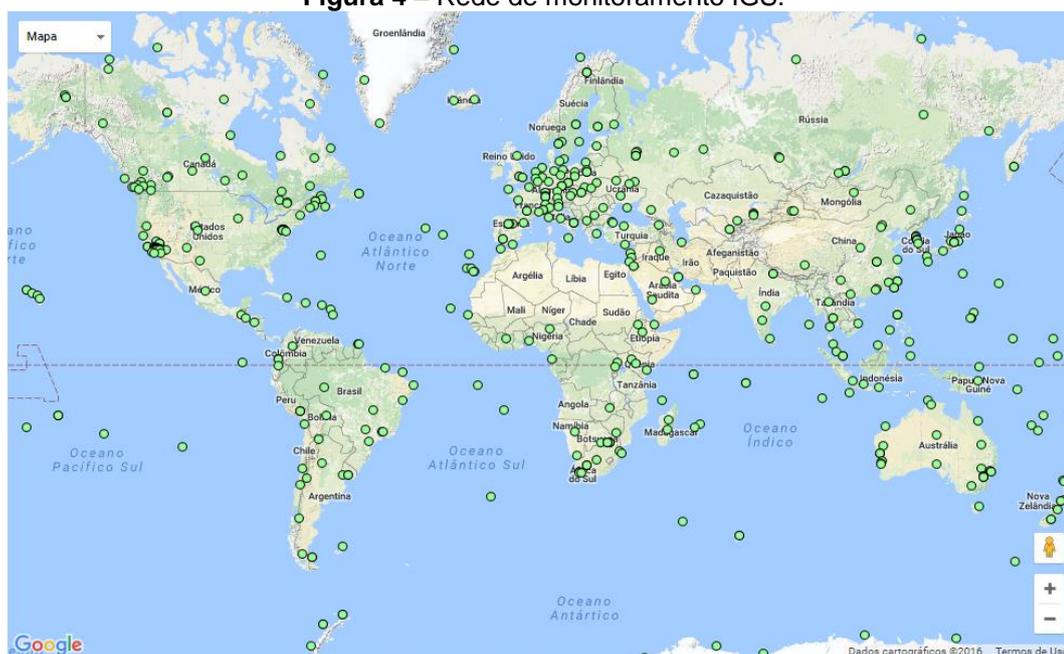
Comprimento da Linha de Base (b - Km)	Erro da Linha de Base (Δb - mm)
1	0,6
10	5,7
20	11,4
40	22,9
60	34,3
80	45,7
100	57,1

Fonte: Adaptado de GARNÉS (2001).

Para a determinação das coordenadas dos satélites de forma melhorada pode se fazer uso dos arquivos de órbitas precisas

Para correção dos erros de órbita são necessários ajustes que atualmente são gerados pelo IGS (*International GNSS Service*). O IGS possui uma rede mundial de aproximadamente 400 estações que monitoram a órbita dos satélites diariamente como pode ser visualizado na figura 4 (MONICO, 2008).

Figura 4 – Rede de monitoramento IGS.



Fonte: IGS Network (2016).

O IGS pode fornecer ajustes às órbitas de forma diversa. Esses ajustes podem ser classificados de acordo com as seguintes siglas: IGU (órbitas ultrarrápidas), IGR (órbitas rápidas) e IGS (órbitas finais) (IGS, 2016; MONICO, 2008).

- IGU – são conhecidas como órbitas ultrarrápidas que podem ser divididas em duas partes: uma predita e outra observada. São disponibilizadas 4 vezes por dia e geralmente são as mais úteis por poderem ser usadas no dia do levantamento. A acurácia da órbita predita fica em torno de 5 cm, enquanto que a observada fica em torno de 3 cm, já para o erro do relógio do satélite o EMQ fica em torno de 3 ns para a órbita predita, enquanto que para a observada fica em torno de 150 ps;
- IGR – são conhecidas como órbitas rápidas e possuem latência de 17 horas. A acurácia das órbitas fica em torno de 2,5 cm, enquanto que a EMQ do relógio fica em torno de 75 ps;

- IGS – são conhecidas dessa forma as órbitas finais e possui acurácia igual à órbita rápida; não há muita diferença entre as órbitas rápidas e órbitas finais para a maioria das aplicações.

Os arquivos de órbitas precisas estão no formato SP3 (*Standard Product 3*); a Figura 5 apresenta um arquivo de órbita final. Neste arquivo se encontram as coordenadas dos satélites em quilômetros (com precisão de 1 mm) e as correções dos relógios dos satélites em micrômetro (com precisão de 1 picosegundo – 10-12) (HILLA, 2016).

Figura 5 – Órbitas Finais IGS (2016).

```
#cP2016 9 19 0 0 0.00000000 96 ORBIT IGS08 HLM IGS
## 1915 86400.00000000 900.00000000 57650 0.00000000000000
+ 32 G01G02G03G04G05G06G07G08G09G10G11G12G13G14G15G16G17
+ G18G19G20G21G22G23G24G25G26G27G28G29G30G31G32 0 0
+ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
+ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
+ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
++ 2 2 2 3 2 2 2 2 2 3 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
++ 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 0 0
++ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
++ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
++ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
%G G cc GPS ccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc
%c cc cc ccc ccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc
%F 1.2500000 1.025000000 0.00000000000 0.0000000000000000
%F 0.0000000 0.000000000 0.00000000000 0.000000000000000
%i 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
%i 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
/* FINAL ORBIT COMBINATION FROM WEIGHTED AVERAGE OF:
/* cod emr esa gfs grg jpl mit ngs sio
/* REFERENCED TO IGS TIME (IGST) AND TO WEIGHTED MEAN POLE:
/* PCV:IGS08_1915 OL/AL:FES2004 NONE Y ORB:CMB CLK:CMB
* 2016 9 19 0 0 0.00000000
PG01 -14328.764589 21070.126747 6937.941539 34.435342 9 5 6 107
PG02 16324.695579 -1483.929747 -20371.438445 551.079994 9 7 10 95
PG03 -16895.555430 13150.687686 -15714.034500 -87.902533 11 10 8 136
PG04 18865.905054 9991.122585 16165.785142 999999.999999
PG05 26514.521156 -2371.863266 -1695.607354 -90.174757 8 8 9 118
PG06 10725.266818 12116.607567 -21055.958015 248.202773 5 9 3 76
PG07 -4638.326545 24556.334203 8497.459640 426.191356 8 6 7 116
PG08 -13964.952170 6512.656211 21685.813728 -32.340007 9 7 7 112
PG09 3299.412423 21705.803348 -14957.106466 208.907280 5 5 6 114
PG10 -14619.740834 -11543.690888 18979.411803 -99.152447 11 8 13 116
```

Fonte: IGS Network.

2.6 INTERPOLAÇÃO DE LAGRANGE

Num arquivo IGS (órbitas finais) as coordenadas dos satélites são fornecidas num intervalo temporal de 15min. Isso significa dizer que se uma época ocorre no instante 0h0min00seg, a próxima época ocorrerá em 0h15min00seg. É possível, com aplicação da interpolação de Lagrange, baseada num conjunto de funções polinomiais, obter épocas intermediárias dentro desse intervalo de 15min.

Supondo que existem $n+1$ elementos distintos $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$ e $y_i = f(x_i)$ com $i = 0, 1, 2, \dots, n$. Tem-se também os polinômios P_i descrito pela equação (2.6.1):

$$P_i = \frac{(x-x_0)\dots(x-x_{i-1})(x-x_{i+1})\dots(x-x_n)}{(x_i-x_0)\dots(x_i-x_{i-1})(x_i-x_{i+1})\dots(x_i-x_n)} \quad (2.6.1)$$

Esse polinômio pode ser simplificado com a equação (2.6.2):

$$P_i = \prod_{j \neq i} \left(\frac{x - x_j}{x_i - x_j} \right) \quad (2.6.2)$$

Dessa forma, segundo Hoffman e Kunze (1971), após algumas considerações referentes aos espaços e sub-espaços, a fórmula de interpolação de Lagrange fica como apresentado na equação (2.6.3):

$$f = \sum_{i=0}^n f(x_i) \cdot P_i \quad (2.6.3)$$

Para ilustrar a equação (2.6.3) será apresentado um exemplo elucidando como se deve aplicar a fórmula de interpolação de Lagrange. Considerando a Tabela 3 a seguir tem-se o seguinte resultado:

Tabela 3 – Lista de abcissas e ordenadas para o exemplo.

X	f(x)
x ₀	y ₀
x ₁	y ₁
x ₂	y ₂

Fonte: Adaptado de SEEBER (2003).

Considerando que os valores de x₀, x₁, x₂, y₀, y₁ e y₂ são conhecidos, então, pode-se desenvolver a equação de interpolação de Lagrange. Nesse caso, como existem 3 pares de variáveis a equação (2.6.1) fica como na equação (2.6.4):

$$P_2(x) = y_0 \frac{(x-x_1)(x-x_2)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)} + y_1 \frac{(x-x_0)(x-x_2)}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)} + y_2 \frac{(x-x_0)(x-x_1)}{(x_2-x_0)(x_2-x_1)} \quad (2.6.4)$$

Substituindo os valores conhecidos de x_i e y_i é possível obter para qualquer valor de x o valor de P₂ da equação 2.6.4. Dessa maneira, essa interpolação de Lagrange é aplicada para determinar épocas intermediárias.

2.7 RINEX (*RECEIVER INDEPENDENT EXCHANGE FORMAT*)

O *Receiver Independent Exchange Format* (RINEX) se constitui de pelo menos três arquivos ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*): um de navegação (.n), um de observação (.o) e um meteorológico (.m). Ele possibilita que observações oriundas de receptores de diferentes fabricantes sejam representadas em um mesmo formato. Apesar da existência deste formato cada empresa tem a liberdade de criar seu próprio arquivo de dados GNSS, entretanto, fornecem programas que realizam a conversão para o RINEX (MONICO, 2008).

A primeira versão do arquivo RINEX foi realizada pelo *Astronomical Institute of the University of Berne*. Visava facilitar o intercâmbio de dados GPS durante a campanha EUREF 89 (*European Terrestrial Reference Frame*), cuja realização envolvia mais de 60 receptores GPS oriundos de 4 empresas diferentes. Cada arquivo possui um cabeçalho e uma seção de dados (as observáveis GNSS). O cabeçalho possui informações gerais do arquivo – tipo de antena, coordenadas aproximadas, data do levantamento, quantidade de observáveis, dentre outros – (GURTNER e ESTEY, 2009).

Dentre as observáveis no arquivo RINEX, pode-se destacar as fases da onda portadora (L1 e L2), os códigos (C/A e P) e tempo.

De acordo com GURTNER e ESTEY (2009) o arquivo RINEX possui códigos para identificação dos satélites. Na Tabela 4 é apresentado um resumo de como é feita tal identificação.

Tabela 4 – Códigos para identificação do satélite no arquivo RINEX.

Código	Satélite
G	GPS
R	GLONASS
S	SBAS ¹⁶
E	GALILEO
C	COMPASS

Fonte: GURTNER e ESTEY (2009).

Esse código alfabético é seguido por um código numérico que identifica o número do satélite pertencente a dada constelação. Os arquivos RINEX podem ser

¹⁶ SBAS – *Satellite-Based Augmentation System*.

identificados por um código do tipo ssssdddf.yyt; a Tabela 5 explica como interpretar o “t” desse código.

Tabela 5 – Códigos para identificação o tipo de arquivo RINEX.

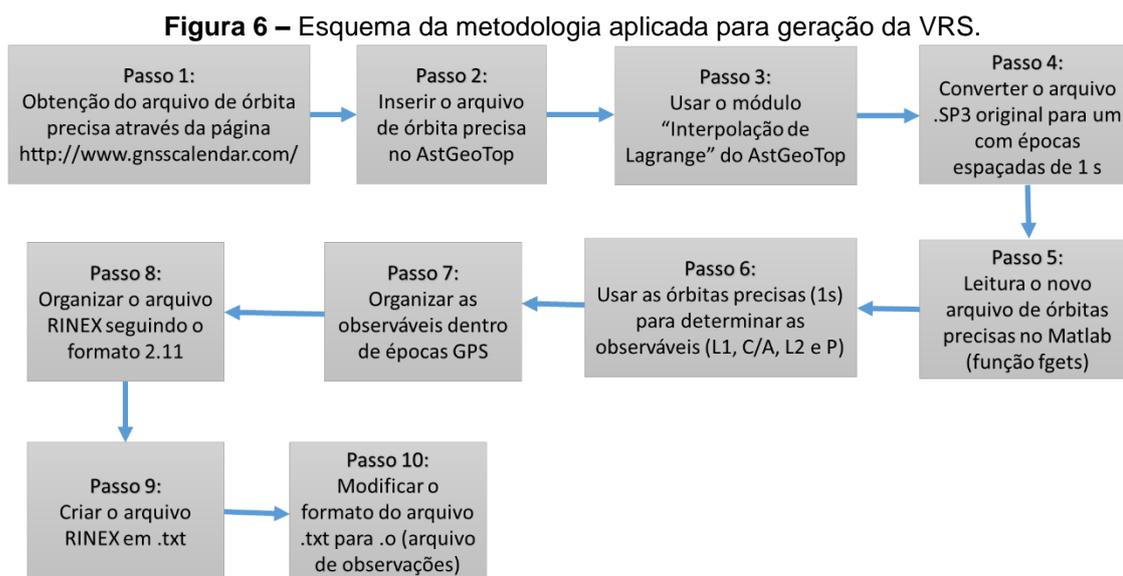
Código	Significado
O	Arquivo de observação
N	Arquivo de navegação GPS
M	Arquivo de dados meteorológicos
G	Arquivo de navegação GLONASS
L	Arquivo de navegação GALILEO
P	Arquivo de misto de navegação GNSS
H	Arquivo de navegação SBAS (Payload)
B	Efemérides transmitidas SBAS
C	Arquivo de relógio
S	Arquivo de resumo (não é um padrão)

Fonte: GURTNER e ESTEY (2009).

O “yy” que aparece no código representa os dois últimos dígitos do ano em que o arquivo foi gerado. O “f” corresponde ao número ou caractere do dia em que foi gerado, por exemplo, se f = 0 significa que é um arquivo diário; se f = “a” isso indica um arquivo da primeira hora do dia (00h – 1h); se f = “b” isso indica um arquivo da segunda hora do dia (1h – 2h); se f = “x” isso indica um arquivo da vigésima quarta hora do dia (23h – 24h). O termo “ddd” indica o dia do ano em que foi registrado o arquivo, já o “ssss” é o nome da estação que gerou o arquivo (GURTNER e ESTEY, 2009).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Nesta seção será apresentada a metodologia para o posicionamento VRS em Recife no território brasileiro. Na sequência visualiza-se a Figura 6 indicando a metodologia desenvolvida e que foi aplicada nos testes.

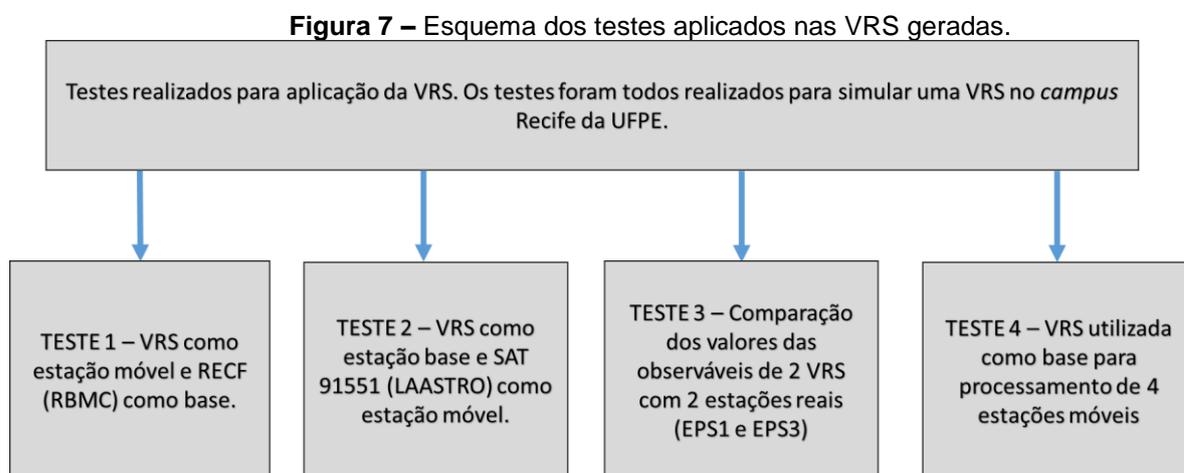


Fonte: O Autor.

O passo 1 indica a página da *internet*, onde foi obtido o arquivo de órbitas precisas (*GNSS Calendar* – nesta página é possível obter outras informações além do arquivo de órbitas finais do IGS). O passo 2 diz respeito a inserir o arquivo de órbitas precisas (épocas de 15 em 15 min) no programa AstGeoTop (Programa desenvolvido pelo Prof. Dr. Silvio J. Garnés). O passo 3 diz respeito a utilização do módulo de interpolação de Lagrange do programa AstGeoTop para converter o arquivo de órbitas precisas original (épocas de 15 em 15 min) e aplicar esta interpolação, obtendo dessa forma um novo arquivo de órbitas precisas (esta terá épocas espaçadas de 1 em 1 segundo). No passo 4 é preciso converter o formato do arquivo de órbitas precisas – este se encontra no formato “.SP3” – para o formato “.txt”, pois assim é possível abrir este arquivo no *MATLAB 2016* por meio da função “fopen”. No passo 5 foi feita a aplicação da função “fgets” que faz a leitura dos elementos de um arquivo “.txt” linha por linha. Após essa etapa é preciso aplicar uma função para converter os arquivos de *string* para *double*, pois “fgets” faz a leitura das linhas do arquivo e converte o que leu para *string*. No passo 6, com os dados das

coordenadas dos satélites, oriundas do arquivo de órbitas precisas (épocas espaçadas de 1 segundo), é possível determinar as observáveis GNSS – nesta dissertação foram usadas L1, C/A, L2 e P. Depois do passo 6 são obtidos 4 vetores com várias observações – valores de observáveis calculados com relação a posições de cada satélite e com relação a posição da VRS (esta posição fica a critério de quem está criando a VRS). O passo 7 foi realizado para criar a região dentro do arquivo RINEX para pôr os valores das observáveis – esta etapa é basicamente organizacional, mas não foi de grande dificuldade. O passo 8 trata da organização do arquivo RINEX – esta etapa ofereceu grande dificuldade para elaboração porque o formato RINEX exige que cada elemento contido deva estar no seu devido lugar, caso ocorra algum erro quanto a posição de alguma informação o RINEX não poderá ser lido posteriormente pelo programa de processamento GNSS. O passo 9 trata da criação do arquivo “.txt” que, no passo 10, é transformado para “.SP3”.

A metodologia indicada foi aplicada em 4 testes como apresentado na Figura 7.



Fonte: O Autor.

O Teste 1 consiste em utilizar a VRS (criada para simular uma estação locada no pilar EPS4 – ver no capítulo 4 – no dia 22 de janeiro de 2013), não como base, mas como uma estação móvel, e utilizar a RECF (estação da rede ativa do IBGE – RBMC) como estação base. Neste teste, os arquivos RINEX de ambas as estações foram inseridos no programa *Topcon Tools v.8.2.3* e dessa forma foram ajustados.

No Teste 2 a VRS foi criada para simular uma estação real locada no pilar EPS4. Dessa forma ela serviu de base para um processamento em que a estação

móvel foi posicionada em SAT 91551 (LAASTRO – pilar localizado no topo do prédio administrativo de engenharia da UFPE) no dia 19 de junho de 2018. O levantamento teve início às 13h42min e foi finalizado às 19h38min40seg (tendo, portanto, uma duração de 5h56min40seg), dessa forma foi criada uma VRS que cobrisse todo o intervalo de rastreamento para que fosse possível ao programa de processamento (*Topcon Tools v.8.2.3*) criar as simples, duplas e triplas diferenças. O RINEX da VRS criado simula uma estação que começa a receber dados a partir das 13h e termina às 20h (7 horas de dados).

O Teste 3 foi realizado para verificar erros que possam existir nas observáveis da VRS. Dessa forma, foi realizada uma comparação das observáveis da VRS com observáveis de um levantamento real. Para isso, foram utilizados dados de um levantamento no *campus* Recife da UFPE (19 de junho de 2018). Foi realizado um levantamento estático¹⁷ nos pilares da UFPE; desse levantamento foram selecionados 2 arquivos, referentes aos pilares EPS1 e EPS3, e onde foram criadas posteriormente VRS para comparação.

No Teste 4 foi aplicada uma correção devida a diferenças apresentadas no Teste 3 (foi retirada a discrepância das observáveis). Dessa forma, foi possível refazer a comparação das observáveis da VRS com um levantamento real no pilar EPS1. Além disso, foi elaborado um processamento tendo como base a VRS em que 4 estações móveis, levantadas no *campus* da UFPE, foram ajustadas. Dessa forma foi possível avaliar a qualidade da VRS como base em um ajustamento via *Topcon Tools v.8.2.3*.

Para obtenção das discrepâncias foram utilizadas as coordenadas dos pilares que se encontram no Apêndice D. Nele, se encontra adicionalmente um mapa que indica a localização de cada pilar dentro do *campus* da UFPE.

3.1 INTERPOLAÇÃO DE LAGRANGE APLICADA ÀS ÓRBITAS PRECISAS

Em Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Collins (2012) é apresentado uma maneira de aplicar a interpolação de Lagrange às órbitas precisas para determinação de um maior número de épocas. “A posição e a velocidade dos vetores entre as dadas

¹⁷ Levantamento realizado para a elaboração do trabalho de graduação de Yan Lucena (2018) cujo título é “Utilização das Redes Celulares para Posicionamento Geodésico Através do Aparelho Móvel”.

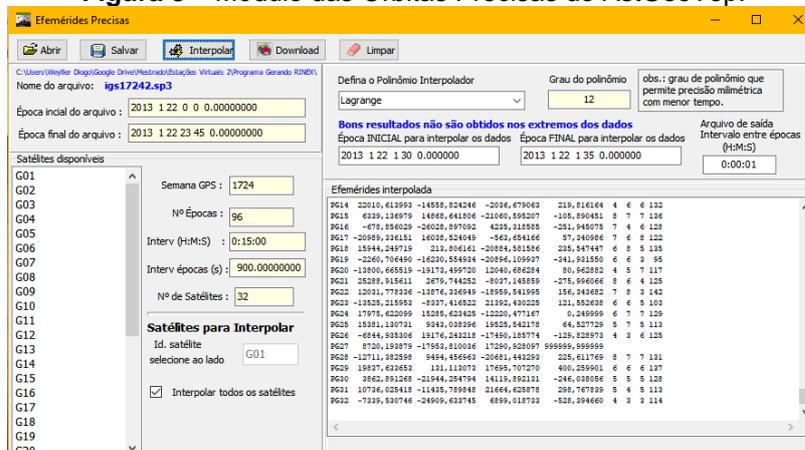
épocas são obtidas onde a interpolação de Lagrange, funções de base polinomiais, é usada”.

Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Collins (2012) afirmam que B. W. Remondi após vários estudos concluiu que observações GPS com épocas em um intervalo de 30min e um interpolador de nona ordem é suficiente para uma acurácia de alguns decímetros.

Para aplicar a interpolação de Lagrange, nessa dissertação, foi utilizado o *software* AstGeoTop que foi desenvolvido pelo prof. Dr Silvio J. A. Garnés (GARNÉS, 2014). O AstGeoTop é um *software* que possui diversas ferramentas que podem ser úteis ao cartógrafo: ferramentas na área de astronomia geodésica, geodésia, topografia, cartografia, metrologia e cadastro.

Uma das ferramentas, dentre as várias existentes, é a processamento de dados de órbitas precisas. Com essa ferramenta é possível aplicar às órbitas precisas a interpolação de Lagrange. A Figura 8 apresenta uma imagem do módulo de órbitas precisas do AstGeoTop.

Figura 8 – Módulo das Órbitas Precisas do AstGeoTop.



Fonte: O Autor.

Nesta etapa, de geração do novo arquivo de órbitas precisas, foi realizada a conversão do arquivo de órbitas precisas original (épocas com intervalos de tempo de 15 min) e convertido em um arquivo de órbitas precisas com épocas espaçadas em intervalos de 1 seg. No programa foi utilizado um polinômio de grau 12, é possível também escolher de que horas deve começar o arquivo e que horas vai terminar. A recomendação é que se interpole dado a partir de 1h30min do início do arquivo até 1h30min do final do arquivo. Quando se deseja arquivos de 24h de interpolação, deve-

se juntar arquivos SP3 do dia anterior e do dia posterior para que as interpolações de 24h tenham precisam em torno de 1cm.

3.2 CONCEPÇÃO DA VRS

Para elaboração do primeiro RINEX, cujo desenvolvimento se deu em ambiente MATLAB, para representar a VRS, foi utilizado um arquivo de efemérides precisas (órbitas finais) referido ao dia 22 de janeiro de 2013. Esse arquivo (RINEX) foi criado simulando um receptor localizado no pilar EPS4¹⁸.

Os pilares EPSs estão localizados no campus do Recife da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE – (*Campus Universitário Reitor Joaquim Amazonas*). Os pilares estão distribuídos no interior do campus como apresentado no Apêndice D, neste mesmo apêndice se encontram as coordenadas oficiais dos pilares, bem como outras coordenadas.

A Figura 8 apresenta uma parte do arquivo IGS (órbitas finais – formato SP3) obtido para o dia 22 de janeiro de 2013, neste arquivo é possível ver as coordenadas dos satélites (segunda à quarta coluna) e o erro de relógio do satélite (quinta coluna).

Na Figura 9 é apresentado o arquivo de órbitas precisas criado após a aplicação da interpolação de Lagrange no arquivo de órbitas precisas original – o formato RINEX utilizado nesta dissertação é o 2.11.

¹⁸ Os pilares que se encontram na UFPE foram desenvolvidos por Vila-Flor (2010) e são nomeados EPS1, EPS2, ..., EPS7. Na página do Departamento de Engenharia Cartográfica da UFPE podem ser encontradas as coordenadas desses pilares em SIRGAS2000, Sistema Geodésico Local e UTM. Link: < <https://www.ufpe.br/latop>>. Suas coordenadas Topográficas Locais também podem ser encontradas em MENDONÇA et al. (2010).

A Figura 10 apresenta o arquivo RINEX criado para o dia 22 de janeiro de 2013. Este arquivo foi um dos primeiros a ser desenvolvido. Nele consta 4 observáveis: L1, C1, L2 e P2.

Figura 10 – Arquivo RINEX criado para o dia 22 de janeiro de 2013.

2.11	OBSERVATION DATA	M (MIXED)	RINEX VERSION / TYPE	
teqc	2012Jun6	RBMC	20130123	05:01:38UTC
EPS04			PGM / RUN BY / DATE	
41617M001			MARKER NAME	
EPS04	UFPE/CGED		MARKER NUMBER	
4923K35519	TRIMBLE NETR8	4.41	OBSERVER / AGENCY	
4951353655	TRM59800.00	NONE	REC # / TYPE / VERS	
5176459.7286	-3618302.3787	-887433.9237	ANT # / TYPE	
0.0710	0.0000	0.0000	APPROX POSITION XYZ	
1	1		ANTENNA: DELTA H/E/N	
4	L1	C1	WAVELENGTH FACT L1/2	
1.0000		L2	# / TYPES OF OBSERV	
CODIGO: 93110	Estacao: EPS04	L3	INTERVAL	
2013	1	22	COMMENT	
12	02	27.0000000	TIME OF FIRST OBS	
02	GPS		END OF HEADER	
13	1	22	12	2
27.0000000	0	24G01G02G03G04G05G06G07G08G09G10G11G12		
		G13G14G15G16G17G18G19G20G21G22G23G24		
131446698.13603	25013474.966	102425998.54755	98158248.608	
143307979.01001	27270601.667	111668555.07274	107015698.611	
144492103.66632	27495933.097	112591249.61012	107899947.543	
130165452.66300	24769662.059	101427625.45169	97201474.391	
129517884.46536	24646433.928	100923026.85612	96717900.737	
150250557.96697	28591730.516	117078356.85738	112200091.988	
120043551.15139	22843528.244	93540429.46861	89642911.574	
120022614.99246	22839544.226	93524115.57854	89627277.429	
144540043.94759	27505055.829	112628605.67345	107935747.104	
114355873.64767	21761199.202	89108472.97221	85395619.932	
129508074.25594	24644567.107	100915382.53709	96710574.931	

Fonte: O autor.

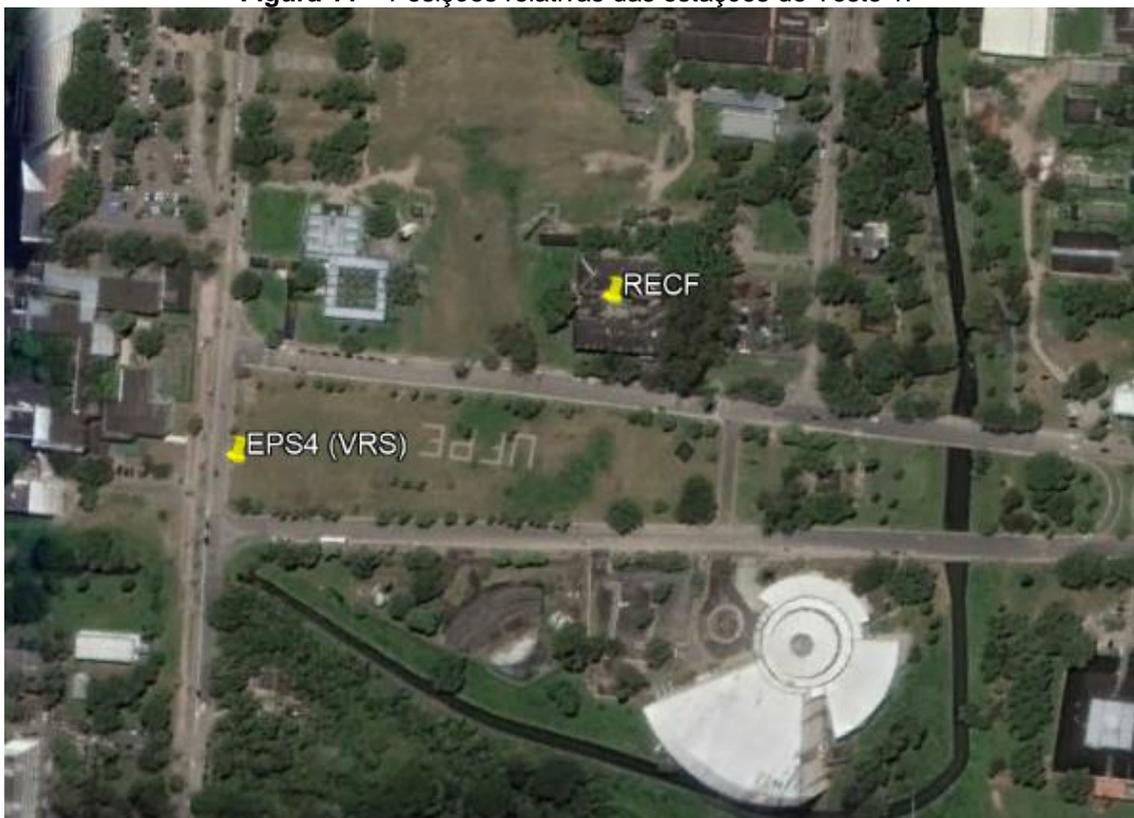
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico são apresentados os resultados dos testes apresentados no tópico 3 (Procedimentos Metodológicos). Aqui são feitas avaliações da qualidade da VRS.

4.1 TESTE 1 – VRS COMO ESTAÇÃO MÓVEL E RECF COMO BASE

De posse das coordenadas oficiais foi possível fazer um comparativo com as coordenadas da VRS. A Tabela 6 apresenta as coordenadas da VRS (após o ajustamento através do *Topcon Tools v.8.2.3*) e a Tabela 7 apresenta a discrepância entre a VRS e o pilar EPS-04. A Figura 11 apresenta as posições relativas das estações envolvidas: VRS em EPS4 e RECF da RBMC.

Figura 11 – Posições relativas das estações do Teste 1.



Fonte: Google Earth.

Tabela 6 – Coordenadas da VRS (pós tratamento).

VRS	Coordenada
Latitude	8°03' 06,16639"S
Longitude	34°57' 13,23195"W
Este	284693,401 m
Norte	9109470,899 m
Altitude Geométrica	-10,504 m

Fonte: O autor.

Tabela 7 – Discrepância entre as coordenadas EPS-4 e VRS (VRS – EPS4).

VRS	Discrepância
Latitude	0°0 00,32491"S
Longitude	00°00' 1,6073"W
Este	-49,175 m
Norte	-10,219 m
Altitude Geométrica	-15,396 m

Fonte: O autor.

Após realizar o ajustamento no *Topcon Tools v.8.2.3* é fornecido ao usuário os resultados do tratamento: desvios padrão dos resultados, coordenadas finais (mostradas na Tabela 6). A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos pelo *Topcon Tools v.8.2.3*. E no Apêndice A se encontra uma imagem do processamento do Teste 1.

Tabela 8 – Desvio padrão da VRS no pilar EPS4.

Estação	Desv. Pad. N (m)	Desv. Pad. E (m)	Desv. Pad. U (m)
VRS	0,222	0,259	0,688

Fonte: O autor.

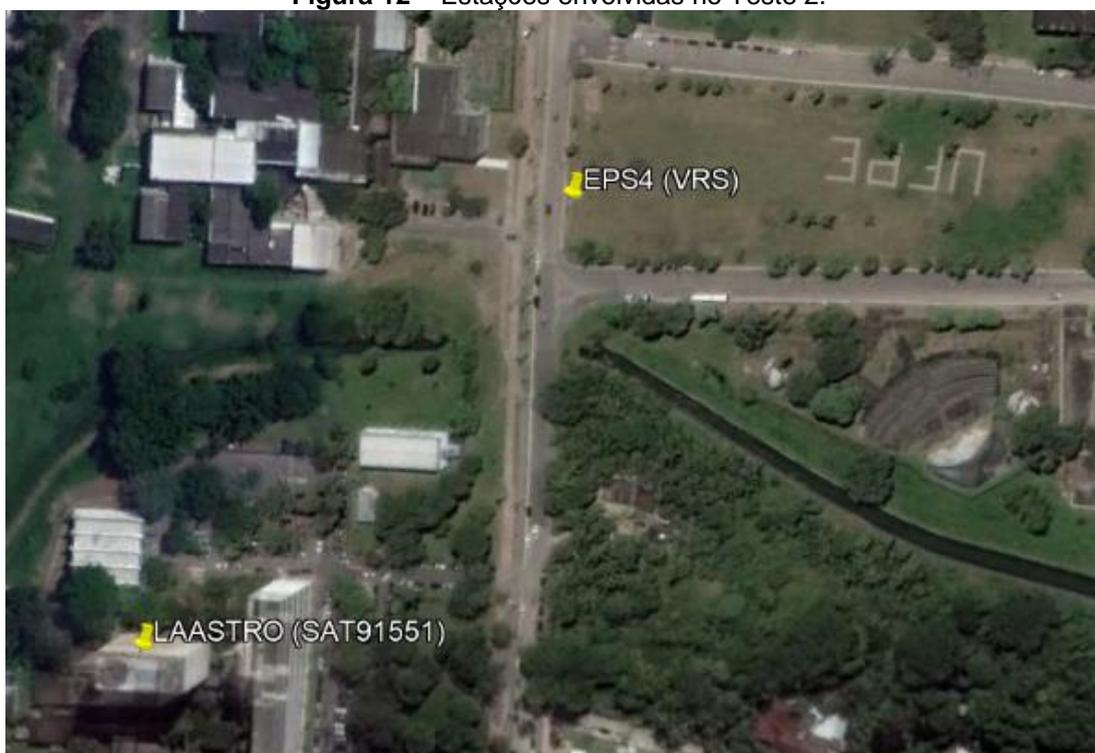
É possível perceber que apesar de apresentar um resultado de qualidade parcialmente bom (Tabela 8) com desvios padrão na horizontal abaixo de 30cm, e para a vertical o desvio padrão ficou próximo de 70cm, no quesito acurácia (relativo as coordenadas oficiais do pilar EPS4) a VRS ainda apresenta baixa qualidade. Com uma discrepância, em módulo, para o Este de aproximadamente 50m, para o Norte 10m e 15m para a altitude é preciso ainda algumas correções visando melhorar a acurácia, já que teoricamente a VRS foi criada virtualmente em cima do pilar EPS4.

No próximo teste a VRS foi testada como uma referência num processamento envolvendo um levantamento real. Dessa forma, será verificada a qualidade de um processamento com a VRS.

4.2 TESTE 2 – VRS COMO BASE E SAT91551 COMO MÓVEL

Os arquivos (o do levantamento e o RINEX da VRS) foram importados para o *Topcon Tools v.8.2.3* e processados, considerando as coordenadas da VRS como fixas, gerando o resultado apresentado na Tabela 9. O resultado do ajustamento é apresentado no apêndice B. A Figura 12 apresenta as posições relativas das estações envolvidas no teste 2: VRS em EPS4 e LAASTRO.

Figura 12 – Estações envolvidas no Teste 2.



Fonte: Google Earth.

Tabela 9 – Desvio padrão entre SAT91551 com VRS como base.

Estação	Desv. Pad. N (m)	Desv. Pad. E (m)	Desv. Pad. U (m)
SAT 91551	0,162	0,281	0,327

Fonte: O autor.

Já na Tabela 10 é apresentada uma comparação entre as coordenadas oficiais do SAT 91551 com as mesmas coordenadas (do SAT 91551), mas obtidas com a VRS como referência.

Tabela 10 – Comparação entre SAT 91551 (real) e SAT 91551 (VRS).

Estação	Latitude	Longitude	Alt. Geométrica
LAASTRO (VRS)	8°03'11,04960"S	34°57'17,60365"W	94,006m
SAT 91551	8°03'10,89712"S	34°57'16,95422"W	49,194m
Discrepância	$\Delta\phi$	$\Delta\lambda$	Δh
Laa (VRS – Ofic) ¹⁹	0,15248"	0,64943"	44,812m

Fonte: O autor.

É possível perceber que ao converter para metros as discrepâncias pôde-se encontrar valores grandes de erros. Para a latitude 4,71m, para a longitude 20,06m e para a altitude aproximadamente 45 m.

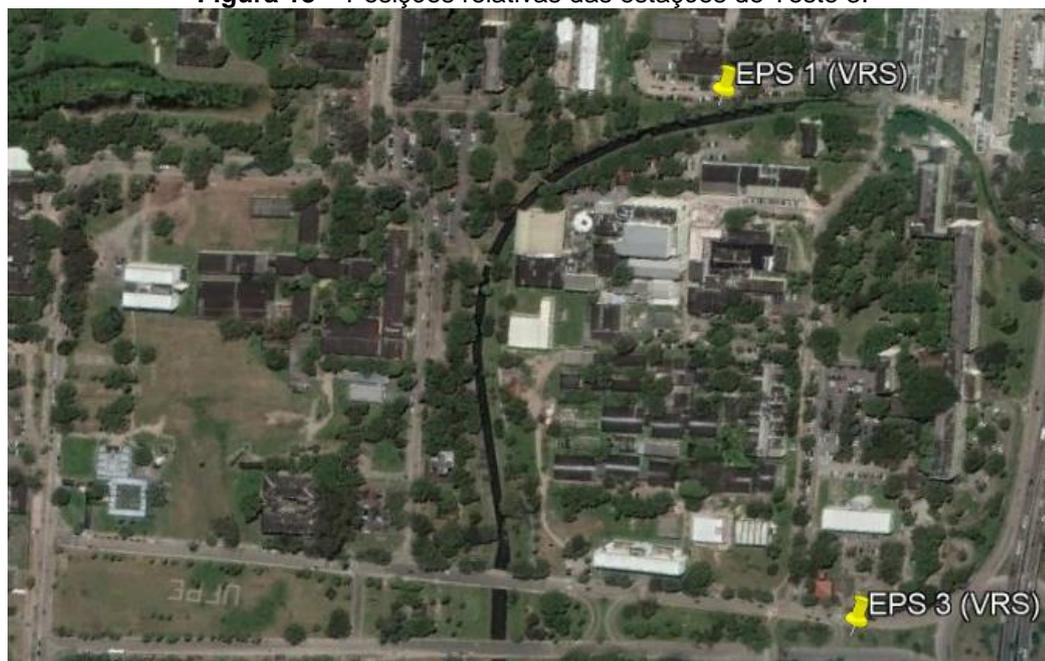
Com isso fica claro que apesar do processamento apresentar bons resultados como apresenta a Tabela 9 ainda é preciso fazer correções no programa que gera a VRS; a Tabela 10 demonstra que o resultado, como apresentado é ilusório. É necessário verificar qual a fonte de erro da VRS e para isso que foi realizado um teste verificando as observáveis da VRS em comparação com as de um levantamento real.

4.3 TESTE 3 – COMPARAÇÃO DE OBSERVÁVEIS VRS E DADOS REAIS

Dessa forma foram obtidos as VRS e para comparar foi escolhida uma determinada época para eventual comparação. As Tabelas 11, 12 e 13 apresentam, respectivamente, os dados da VRS, do levantamento e as discrepâncias entre ambos, todos em relação ao pilar EPS1. As Tabelas 14, 15 e 16 seguem a mesma ideia, com o diferencial do pilar – EPS3. As comparações são realizadas entre 4 observáveis (L1, C1, L2, P2). A Figura 13 apresenta as posições relativas das estações envolvidas no teste 3: EPS1 e EPS3.

¹⁹ Para transformar esses dados de segundos sexagesimais para metros é preciso fazer a seguinte relação: se $1^\circ = 3600''$ e a relação entre arco e ângulo numa esfera é $S = R \cdot \theta$, então, é possível determinar quanto equivale $1''$ em metros conhecendo-se o raio da Terra $R = 6371000\text{m}$. Dessa forma, a equação de arco fica da seguinte forma: $S = 6371000 \cdot [\pi \cdot 1 / (180 \cdot 3600)] \rightarrow S \cong 30,887\text{m}$. Então, para converter qualquer valor de segundos para metros basta multiplicar por 30,887. Essa relação é uma aproximação, dado que se baseia na esfera, enquanto que os levantamentos são feitos considerando-se o elipsóide de revolução.

Figura 13 – Posições relativas das estações do Teste 3.



Fonte: Google Earth.

Tabela 11 – Observáveis da VRS geradas em EPS1.

VRS				
EPR	L1	C1	L2	P2
G1	117048275,5940	22273546,2580	91206448,5156	22273546,2580
G8	121914289,4240	23199517,9010	94998147,6035	23199517,9010
G10	125703525,2350	23920585,5010	97950798,8857	23920585,5010
G11	118273710,0670	22506738,6840	92161332,5207	22506738,6840
G14	121541650,9660	23128607,1600	94707779,9734	23128607,1600
G16	124351734,0450	23663348,1900	96897455,1008	23663348,1900

Fonte: O autor.

Tabela 12 – Levantamento real em EPS1.

GPS				
EPR	L1	C1	L2	P2
G1	116867305,5450	22239109,6140	91065445,2515	22239111,7525
G8	121733087,5370	23165036,6310	94856960,9754	23165040,0854
G10	125522047,5620	23886052,8100	97809396,9314	23886053,9514
G11	118092626,1170	22472279,7750	92020226,4634	22472279,4004
G14	121360158,8350	23094070,7850	94566357,1904	23094071,0064
G16	124170566,4450	23628873,5790	96756293,5734	23628875,1794

Fonte: O autor.

Tabela 13 – Discrepância entre observáveis VRS e GPS (Pilar EPS1).

EPR	$\Delta L1$	$\Delta C1$	$\Delta L2$	$\Delta P2$
G1	180970,0490	34436,6440	141003,2641	34434,5056
G8	181201,8870	34481,2700	141186,6281	34477,8156
G10	181477,6730	34532,6910	141401,9543	34531,5496
G11	181083,9500	34458,9090	141106,0573	34459,2836
G14	181492,1310	34536,3750	141422,7830	34536,1536
G16	181167,6000	34474,6110	141161,5274	34473,0106

Fonte: O autor.

Tabela 14 – Observáveis da VRS geradas em EPS3.

VRS				
EPR	L1	C1	L2	P2
G1	111154356,8020	21151970,8030	86613784,5216	21151970,8030
G3	111071841,7740	21136268,7160	86549487,0964	21136268,7160
G8	128546071,0790	24461503,9890	100165769,6726	24461503,9890
G11	119447930,1060	22730185,3280	93076309,1734	22730185,3280
G16	115838108,2230	22043259,0640	90263460,9535	22043259,0640
G18	113978201,3230	21689330,5490	88814182,8495	21689330,5490

Fonte: O autor.

Tabela 15 – Levantamento real em EPS3.

GPS				
EPR	L1	C1	L2	P2
G1	111789961,3850	21272923,4000	87109079,5685	21272928,1124
G3	111707624,1420	21257254,1280	87044918,6225	21257257,7565
G8	129181742,8580	24582467,0170	100661098,7744	24582472,4684
G11	120083500,8750	22851130,9290	93571559,9294	22851130,5114
G16	116473582,3670	22164186,0150	90758633,1455	22164184,6364
G18	114613638,6570	21810251,3180	89309340,5715	21810252,5854

Fonte: O autor.

Tabela 16 – Discrepâncias entre as observáveis da VRS e do GPS.

EPR	$\Delta L1$ (nº ciclos)	$\Delta C1$ (m)	$\Delta L2$ (nº ciclos)	$\Delta P2$ (m)
G1	-635604,5830	-120952,5970	-495295,0469	-120957,3094
G3	-635782,3680	-120985,4120	-495431,5261	-120989,0405
G8	-635671,7790	-120963,0280	-495329,1018	-120968,4794
G11	-635570,7690	-120945,6010	-495250,7560	-120945,1834
G16	-635474,1440	-120926,9510	-495172,1919	-120925,5724
G18	-635437,3340	-120920,7690	-495157,7220	-120922,0364

Fonte: O autor.

Fica claro, a partir da análise das Tabelas 13 e 16 (discrepâncias), que existe uma grande diferença ainda entre os dados da VRS e de um levantamento real. Entretanto, é possível perceber que a exemplo da Tabela 13 os valores de discrepâncias apresentam valores homogêneos (o mesmo ocorre na Tabela 16) – na Tabela 13 (pilar EPS1) o valor de discrepância para L1 gira em torno de 181000 (número de ciclos), C1 e P2 apresentam discrepâncias que giram em torno de 34500 (metros), L2 apresentam valores um pouco maiores que 141000; por sua vez, na Tabela 16, que se refere ao pilar EPS3 os valores de discrepâncias para L1, C1, L2 e P2 giram em torno de -635500 nº ciclos, -121000 m, -495000 nº ciclos e -121000 m, respectivamente. É preciso, então, verificar uma maneira de reduzir essa diferença.

4.4 TESTE 4 – VRS COMO BASE E 4 ESTAÇÕES COMO MÓVEIS

Na Tabela 17 é apresentado o resultado do ajustamento realizado com ajuda do *Topcon Tools v.8.2.3*. O resultado do ajustamento se encontra no apêndice C. A Figura 14 apresenta as posições relativas das estações envolvidas no teste 4: VRS em EPS-1, Estação 1, Estação 2, Estação 3 e Estação 4.

Figura 14 – Posições relativas das estações do Teste 4.



Fonte: Google Earth.

Tabela 17 – Desvios Padrão do processamento com a VRS em EPS1 como base.

Estação	Desv. Pad. N (m)	Desv. Pad. E (m)	Desv. Pad. Alt. (m)
Estação 1	0,171	0,346	0,492
Estação 2	0,179	0,364	0,372
Estação 3	0,199	0,189	0,449
Estação 4	0,116	0,124	0,530

Fonte: O autor.

Após esse ajustamento, em que a VRS foi considerada como base, foi feita uma comparação entre a VRS e as coordenadas oficiais do pilar EPS1. Dessa forma, a Tabela 18 apresenta as discrepâncias existentes entre os dois dados.

Tabela 18 – Discrepância entre as coordenadas da VRS e EPS1.

Estação	Latitude	Longitude	Alt. Geométrica
EPS1 (VRS)	8°02'54,76513"S	34°57'05,07318"W	11,184 m
EPS1 Oficial	8°02'53,44032"S	34°56'53,45504"W	2,789 m
Discrepância	$\Delta\phi$	$\Delta\lambda$	Δh
EPS1 (VRS – Ofic)	1,32481"	11,61814"	8,395 m

Fonte: O autor.

É possível perceber que a despeito do que é apresentado na Tabela 17 (boa qualidade no ajustamento), ainda são necessárias algumas melhoras porque a discrepância entre a VRS e as coordenadas oficiais do pilar EPS1 ainda é grande, 1,32481" para Latitude, 11,61814" para Longitude e 8,395 m na Altitude Geométrica.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Ao longo da dissertação apresentada, pode-se perceber a evolução positiva da qualidade da VRS em alguns aspectos. Inicialmente, usando somente correções devido à posição do satélite, depois adicionando correções da atmosfera. Houve algumas dificuldades para elaborar o RINEX durante o trabalho – a maior de todas foi o formato do RINEX que deve ter cada dado, número, observação, texto, etc., em seu devido lugar, pois senão o arquivo apresenta erro e não pode ser lido pelos softwares de processamento, a exemplo do *Topcon Tools v.8.2.3*. Apesar das dificuldades encontradas os objetivos foram atingidos: conseguiu-se gerar um arquivo de órbitas precisas com épocas espaçadas de 1s com aplicação do polinômio de Lagrange, este objetivo foi atingido com ajuda do programa AstGeoTop de autoria do Prof. Dr. Silvio Jacks; com um pouco mais de dificuldade, foi possível criar um programa em plataforma *MATLAB 2016* com a finalidade de gerar o arquivo RINEX; o programa *Topcon Tools v.8.2.3* foi utilizado para leitura dos arquivos RINEX gerados e dessa forma foi possível fazer o processamento da VRS em conjunto com outros levantamentos; e, por último, foi possível, após processamento no *Topcon Tools v.8.3.2* realizar uma análise com os resultados obtidos.

O primeiro teste visou a adoção da RECF (estação da RBMC) como base em um ajustamento simples, envolvendo apenas uma segunda estação – a VRS –, e verificando o resultado final desse ajustamento. Verificou-se que apesar das boas qualidades do ajustamento (desvio padrão de 0,341m na horizontal e 0,688m na vertical) ainda havia uma grande discrepância quando comparada a VRS com o local onde foi criada – no caso do primeiro teste a estação de comparação foi o pilar EPS4. As discrepâncias foram de aproximadamente 50m, 10m e 15m, para Este, Norte e altitude elipsoidal, respectivamente. Ou seja, se mostrou de uma qualidade enganosa, pois mostrava servir de boa referência para o ajustamento, enquanto que quando comparada com as coordenadas do lugar, onde foi de fato criada, apresentava erros grosseiros. Ainda que tenha falhado no quesito qualidade, foi uma primeira conquista que o *Topcon Tools v.8.2.3* tenha reconhecido o arquivo RINEX da VRS e realizado o ajustamento, apontando dessa forma, que apenas eram necessárias correções (atmosféricas) dos dados da VRS, enquanto que o formato (RINEX 2.11) estava correto.

Num segundo teste, a VRS foi utilizada como base de um levantamento. Utilizando-se uma estação locada no SAT 91551 (LAASTRO) foi feito um ajustamento usando o *Topcon Tools v.8.2.3* foi alcançado um desvio padrão de $\pm 0,162\text{m}$ para o Norte, $\pm 0,281\text{m}$ para o Este e $\pm 0,327\text{m}$ para a altitude; o que indica um bom resultado dado que até mesmo a altitude apresentou um desvio padrão abaixo de 50cm (e a vertical é a direção de menos precisão das observações GNSS). O resultado, entretanto, da comparação entre as coordenadas oficiais do SAT 91551 e as mesmas coordenadas obtidas por processamento via *Topcon Tools v.8.2.3* demonstra novamente que ainda há problemas com a VRS. Uma diferença de aproximadamente 0,15" na latitude, 0,64" na longitude e 44m na altitude geométrica expõe mais uma vez que o ajustamento apresenta um resultado de qualidade ilusória. No próximo teste foi feita uma comparação entre as observáveis de dados reais e da VRS.

Este terceiro teste mostra que ainda é preciso aplicar mais reduções de erros para equiparar as observáveis de uma VRS a uma observável oriunda de um levantamento real. Aqui foi possível perceber que numa mesma estação, numa mesma época, as observáveis da VRS e da estação real apresentavam valores bastante discrepantes. É preciso, então, melhorar o modelo para que os valores fiquem equiparados.

Um último teste foi elaborado fazendo correções devido a ionosfera e troposfera (uma correção média) e a eliminação dos erros grosseiros apresentados no teste anterior. Com isso, foi feita um ajustamento com 4 estações mais a VRS, esta, sendo considerada a base e aquelas as estações a ser ajustadas. Constatou-se que a média de desvio padrão para o Norte foi de 0,17m, para o Este foi de 0,25m e para a altitude foi de 0,46m; ou seja, bons resultados apresentados. Todavia, mais uma vez, quando comparada com dados oficiais a VRS apresenta grandes discrepâncias (neste caso, ela foi gerada simulando uma estação no pilar EPS1).

Esta dissertação contribuiu para o melhor entendimento da VRS. Com ela foi possível perceber as dificuldades encontradas ao longo da produção do programa para gerar a VRS. Devido ao pouco tempo para desenvolvimento de um programa complexo, não foi possível elaborar melhoramentos para corrigir os erros grosseiros que foram apresentados nos resultados dos testes.

Percebe-se que apesar dos avanços ainda há o que ser feito, pois conseguiu-se atingir qualidades no ajustamento, mas ainda não se obteve sucesso na qualidade posicional da VRS, onde ela foi de fato gerada (significa dizer que se ela foi gerada

em uma determinada coordenada – geralmente, nesta dissertação, foi considerada coordenadas oficiais – as coordenadas que ela deve apresentar devem ser as mesmas em que foi gerada).

Portanto, como sugestão para futuras pesquisas, recomenda-se: criar um modelo de correção para a atmosfera de melhor qualidade do que aquele que foi apresentado aqui; reparar o problema da discrepância que ocorre após o ajustamento e por último aplicar outros tipos de correção dos dados GNSS. É possível, em trabalhos futuros também elaborar um método de aplicação da VRS em tempo real, o que possibilitará o uso do RTK.

Esta dissertação é bastante útil para os engenheiros cartógrafos que forem fazer levantamentos geodésicos e precisem de pontos de referência nas proximidades do local, onde se está fazendo levantamento. É preciso realizar algumas melhoras (que podem ser feitas em pesquisas futuras) para que a VRS venha a atingir as qualidades exigidas em levantamentos de precisão.

REFERÊNCIAS

ALVES, D. B. M. **Posicionamento Baseado Em Redes De Estações De Referência GPS Utilizando o Conceito De Estação Virtual**. 2008. 160 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2008.

ARMENDARIS, O. C.; MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O. **Desempenho do modelo global da ionosfera do IGS: Avaliação no posicionamento por ponto na região sul do Brasil em período de alta atividade solar**. Boletim de Ciências Geodésicas, p. 208-223, 2009.

BeiDou – **Navigation Satellite System**. Disponível em: <<http://www.beidou.gov.cn/>>. Acesso em: 17 de setembro de 2017.

BEUTLER, G; WEBER, R; HUGENTOBLE, U; ROTHACHER, M; VERDUN, A. **GPS satellite orbits**. In: TEUNISSEN, P. J. G; KLEUSBERG, A. **GPS for Geodesy**. 2.ed. Berlin: Springer-Verlag, 1998, p.43-109.

BÖHM, J.; SCHUH, H. (Ed.). **Atmospheric effects in space geodesy**. Berlin, Germany: Springer, 2013.

CAMARGO, P. O. **Modelo Regional da Ionosfera para Uso em Posicionamento com Receptores GPS de uma Frequência**. Tese elaborada para obtenção do grau de Doutor na Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná. 1999.

ESA – **European Space Agency**. Disponível em: <<http://www.esa.int/ESA>>. Acesso em: 17 de setembro de 2016.

GARNÉS, S. J. A. **Resolução Das Ambiguidades GPS Para Linhas De Base Curta: Análise Dos Algoritmos De Otimização**. Tese apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. 2001.

_____. **AstGeoTop, Software**. Recife-PE: Departamento de Engenharia Cartográfica. Universidade Federal de Pernambuco. Compilação janeiro, 2014.

GHILANI, C. D.; WOLF, P. R. **Geomática** – tradução Daniel Vieira, revisão técnica Alessandro Salles Carvalho – São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2013.

GPS: **The Global Positioning System**. Disponível em: <<http://www.gps.gov/>>. Acesso em: 14 de Fevereiro de 2017.

GURTNER, W.; ESTEY, L. **RINEX: The Receiver Independent Exchange Format. Version 3.01**. June 2009.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física, volume 2: Gravitação, Ondas e Termodinâmica**. São Paulo: LTC, 2012a.

_____, . **Fundamentos de física, volume 4: Óptica e Física Moderna.** São Paulo: LTC, 2012b.

HIGGINS, M. B. **An Australian pilot project for a real time kinematic GPS network using the virtual reference station concept.** In: Annual Working Meeting of the International Federation of Surveyors, Seoul Corea. Proceedings. 2001.

HILLA, S. **The extended Standard Product 3 orbit format (SP3-d).** National Ocean Service, NOAA - National Geodetic Survey. 2016.

HOFFMAN, K.; KUNZE, R. **Linear algebra.** Englewood Cliffs, New Jersey. 1971.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J.. **Global positioning system: theory and practice.** Springer Science & Business Media, 2012.

HU, G. R., KHOO H. S., GOH P. C., LAW C. L. **Development and assessment of GPS virtual reference stations for RTK positioning.** J Geod 77(5-6):292–302. 2003.

IGS – International GNSS Service – **IGS Products.** Disponível em: <<http://www.igs.org/products>>. Acesso em: 25 de Novembro de 2016.

KISLIG, L.; PETOVELLO, M. **What is a virtual reference station and how does it work?.** GNSS magazine, p. 28-31, 2011.

KRUEGER, C. P. **Posicionamento Cinemático de Trens.** Curitiba, 1994. 168 f. Dissertação (Mestrado em Geodésia) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, 1994.

_____. **Levantamentos Geodésicos II: Sistemas Globais de Posicionamento Parte II (1/54).** 9ª Edição. Curitiba. 2018. Disponível em: <https://drive.google.com/drive/folders/0B3tAY3ZHB-M1dkxnRE1FOU5oeW8>. Acesso em: 20 de novembro 2018.

KUMAR-MILLS, D.; HOLMER, J.; KUBIK, K.; HIGGINS, M. **Efficient RTK Positioning by Integrating Virtual Reference Stations with WCDMA Network.** Positioning, v. 1, n. 09, p. 0, 2005.

LACHAPELLE, G.; ALVES, P. **Multiple reference station approach: overview and current research.** Journal of Global Positioning Systems, v. 1, n. 2, p. 133-136, 2002.

LANDAU, H., VOLLATH, U., CHEN, X. **Virtual Reference Station Systems.** Journal of Global Positioning Systems, v. 1, n. 2, p. 137-143, 2002.

LANGLOIS, L. **Un Réseau de Type VRS (Stations Virtuelles de Référence) GPS+ GLONASS Révolutionne la Prise de Mesures par Satellites sur le Terrain. Le Réseau de Stations Permanentes GNSS SWISSAT.** XYZ, n. 96, p. 61-64, 2003.

LEICK, A.; RAPOPORT, L.; TATARNIKOV, D. **GPS satellite surveying**. John Wiley & Sons, 2015.

MARQUES, H. A.; SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G. **Modelagem do Atraso Zenital Troposférico a Partir de Regressão Linear Múltipla**. II Simpósio Brasileiro de Geomática, V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas. ISSN 1981-6251, p. 1112-1115. 2007.

MARQUES, H. A.; NASCIMENTO, A.; GARNÉS, S. J. A.; SILVA, E. G. S. **Avaliação do RTK Via NTRIP Utilizando Dados da Multi-Constelação GNSS**. VIII Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas. 2013.

MATSUOKA, M. T.; COLLISCHONN, C.; CAMARGO, P. O. **Análise do Desempenho do Modelo Global da Ionosfera do IGS no Posicionamento Por Ponto Durante Períodos de Tempestades Geomagnéticas: Estudo de Caso para 29-30 de Outubro de 2003 na Região Sul do Brasil**. III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. 2010.

MELO, W. D. A.; MARQUES, H. A. **Avaliação do Atraso Troposférico Advindo Do Modelo ECMWF e Função de Mapeamento de Viena no Posicionamento por Ponto Preciso**. V Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. 2014.

MENDONÇA, F. J. B.; GARNÉS, S. J. A.; PEREIRA, C. M.; NETO, J. A. B.; MELO, W. D. A. **Análise do Ajustamento por Mínimos Quadrados de Uma Trilateração Topográfica com Injunções nos Planos UTM E Topocêntrico**. III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. 2010.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, Fundamentos e aplicações**. 2ª Edição São Paulo, Editora UNESP. 2008.

OLIVEIRA, A. F. **Análise Comparativa de Diferentes Modelos Troposféricos para RTK em Rede Usando o Conceito de Estação de Referência Virtual**. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná. 2013.

ROFATTO, V. F.; ASSUNÇÃO, J. W. M. **Avaliação da utilização de estações virtuais de referência para o georreferenciamento de imóveis rurais**. Revista Brasileira de Geomática, v. 5, n. 3, p. 361-379, 2017.

ROSSBACH, U. **Positioning and Navigation Using the Russian Satellite System GLONASS**. Dissertation – Universität der Bundeswehr München. 2000.

SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G. **Avaliação dos Modelos de Hopfield e de Saastamoinen para a Modelagem do Atraso Zenital Troposférico em Território Brasileiro Utilizando GPS**. Séries em Ciências Geodésicas 30 anos de Pós Graduação em Ciências Geodésicas no Brasil. Curitiba, 2001, v. 1, p. 47-61.

SEEBER, G. **Satellite geodesy: foundations, methods, and applications**. Walter de Gruyter, 2003.

SOUZA, A. N. **Avaliação Das Coordenadas GNSS Obtidas pelo Posicionamento Cinemático RTK/NTRIP E PPP**. 2013. Dissertação (Mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Informação) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

TIERRA CRIOLLO, A. R. **Comparação da precisão dos métodos cinemáticos para distâncias menores a dez quilômetros**. Curitiba, 1993. 120 f. Dissertação (Mestrado em Geodésia) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

TSUI, J. B. **Fundamentals of global positioning system receivers: a software approach**. John Wiley & Sons, 2005.

UFRGS. **Universidade Federal do Rio Grande do Sul**. Disponível em: <<http://astro.if.ufrgs.br/Orbit/orbits.htm>>. Acesso em: 28 de março de 2017.

VILA FLOR, C. D. R. **Rede geodésica cadastral do campus Recife da UFPE: Fase I – planejamento e implantação da rede principal**. Trabalho final de graduação. Departamento de Engenharia Cartográfica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

VOLLATH, U.; BUECHERL, A.; LANDAU, H.; PAGELS, C.; WAGNER, B. **Multi-Base RTK Using Virtual Reference Stations**, Proceedings of the ION-GPS, Salt Lake City, Utah. 2000.

VOLLATH, U.; DEKING, A.; LANDAU, H. **Long-Range RTK Positioning Using Virtual Reference Station**. Proc. Institute of Navigation National GPS, p. 1143-1147, 2001.

WANNINGER, L. **Virtual Reference Stations for Centimetre-Level Kinematic Positioning**, Proceedings of ION GPS, Portland, OR, 1400-1407. 2002.

WELLS, D.; BECK, N.; DELIKARAOGLOU, D.; KLEUSBERG, A.; KRAKIWSKY, E. D.; LACHAPELLE, G.; LANGLEY, R. B.; NAKIBOGLU, M.; SCHWARZ, K. P.; TRANQUILLA, J. M.; VANICEK, P.. et al. **Guide to GPS Positioning**. Canadá: Canadian GPS Associates, Fredericton, N. B., 1986.

APÊNDICE A - DESVIO PADRÃO DA VRS USADA COMO MÓVEL

Na Figura 15 se encontra a imagem do resultado final do processamento do Teste 1. Nele a estação RECF foi usada como base e a VRS foi empregada como estação móvel.

Figura 15 – Desvio padrão da VRS usada como móvel.

The screenshot shows a software window titled "Adjustment Result" with a yellow header. The main content area displays the following information:

Control Tie Analysis: skipped

Subnetwork [EPS4.RECF](#) (Horizontal Minimal Constraint + Vertical Minimal Constraint)

Type	Adjusted Points	Fixed Points	Weighted Points	Equations (Used/Rejected)	UWE	UWE Bounds
				GPS		
Horz	2	1	0	1	1.00	[1.00,1.00]
Vert	2	1	0	1	1.00	[1.00,1.00]

QC fail Points

Name	StdDev n(m)	StdDev e(m)	StdDev u(m)
EPS4	0.222	0.259	0.688

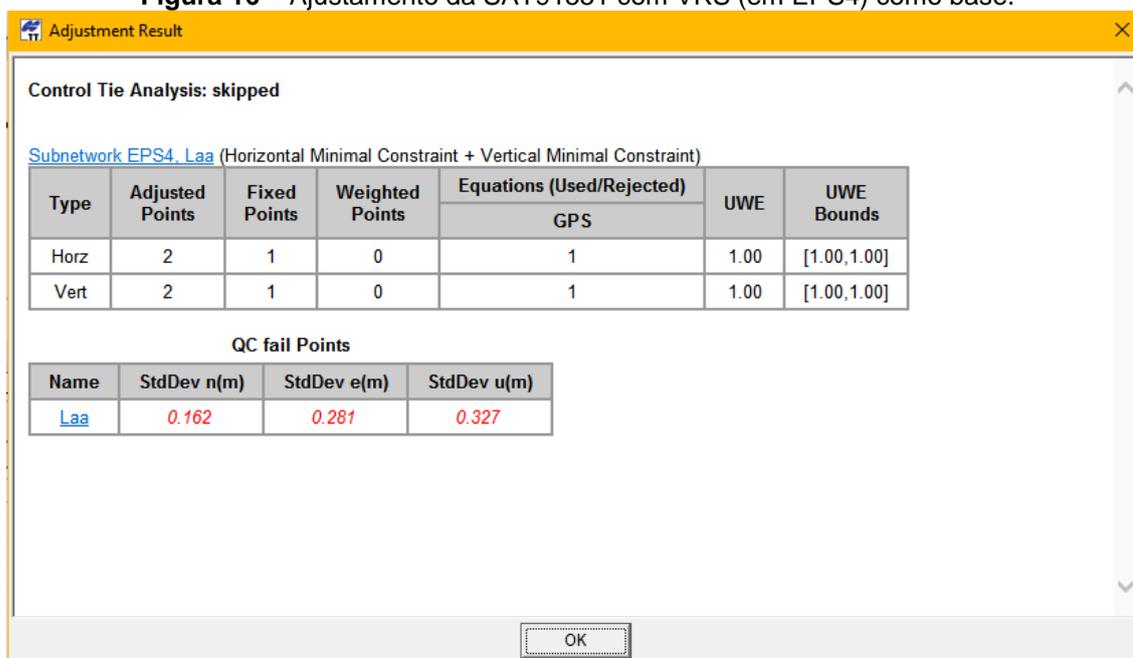
An "OK" button is located at the bottom center of the dialog box.

Fonte: O autor.

APENDICE B - AJUSTAMENTO DA SAT91551 COM VRS BASE

Resultado do processamento do t3pico 5.2: VRS utilizada como refer3ncia para uma esta3o levantada em cima do Laborat3rio de Astronomia – ponto LAASTRO ($\varphi = 8^{\circ}03'10,89712''$ e $\lambda = 34^{\circ}57'16,95422''$).

Figura 16 – Ajustamento da SAT91551 com VRS (em EPS4) como base.



Fonte: O autor.

APÊNDICE C - VRS COMO BASE PARA 4 ESTAÇÕES

Resultado do processamento do tópico 5.4: Uma VRS locada virtualmente no pilar EPS1, servindo de referência para 4 outras estações.

Figura 17 – VRS como base para 4 estações.

The screenshot shows a software window titled "Adjustment Result". It contains the following information:

- Control Tie Analysis:** skipped
- Subnetwork:** Estação 1, VRS, Estação 2, ... (Horizontal Minimal Constraint + Vertical Minimal Constraint)
- Summary Table:**

Type	Adjusted Points	Fixed Points	Weighted Points	Equations (Used/Rejected)	UWE	UWE Bounds
				GPS		
Horz	5	1	0	4	1.00	[1.00,1.00]
Vert	5	1	0	4	1.00	[1.00,1.00]
- QC fail Points Table:**

Name	StdDev n(m)	StdDev e(m)	StdDev u(m)
Estação 1	0.171	0.346	0.492
Estação 4	0.179	0.364	0.372
Estação 2	0.199	0.189	0.449
Estação 3	0.116	0.124	0.530

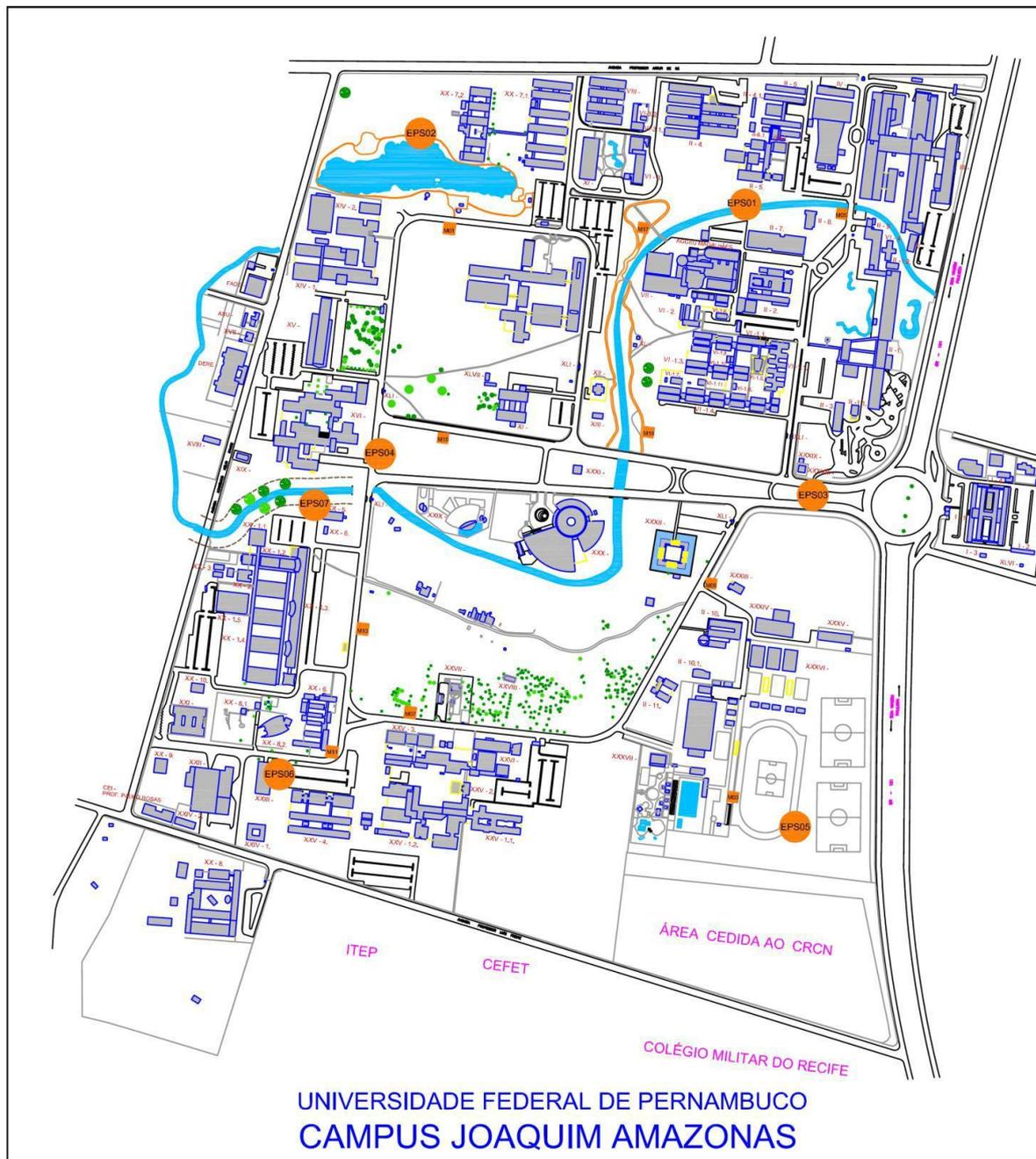
An "OK" button is located at the bottom center of the window.

Fonte: O autor.

APENDICE D - PILARES EPS DENTRO DO CAMPUS DA UFPE

Planta do *campus* Recife da UFPE. Nela se localizam as posições dos pilares EPS.

Figura 18 – Pilares EPS dentro do *campus* da UFPE.



Fonte: Vila Flor (2010).

Tabela 19 – Coordenadas Geodésicas e Altitude Geométrica.

Ponto	Latitude	Erro N	Longitude	Erro L	Altura	Erro Alt.
Recf	8°03'03,46970"S	0,000m	34°57'05,45910"O	0,000m	20,180m	0,000m
EPS1	8°02'53,44032"S	0,000m	34°56'53,45504"O	0,000m	2,789m	0,000m
EPS2	8°02'50,24855"S	0,000m	34°57'09,19544"O	0,000m	4,334m	0,000m
EPS3	8°03'07,57601"S	0,000m	34°56'50,66167"O	0,000m	5,201m	0,000m
EPS4	8°03'05,84147"S	0,000m	34°57'11,62465"O	0,000m	4,893m	0,000m
EPS5	8°03'23,36083"S	0,000m	34°56'51,38976"O	0,000m	3,084m	0,000m
EPS6	8°03'21,26424"S	0,000m	34°57'16,23981"O	0,000m	4,587m	0,000m
EPS7	8°03'08,21199"S	0,000m	34°57'14,65600"O	0,000m	4,636m	0,000m
M001	8°02'54,65759"S	0,003m	34°57'08,07744"O	0,003m	3,909m	0,015m
M003	8°03'22,19550"S	0,004m	34°56'54,60568"O	0,004m	1,207m	0,018m
M005	8°02'54,17550"S	0,003m	34°56'49,32253"O	0,003m	2,538m	0,010m
M007	8°03'18,24716"S	0,001m	34°57'10,12819"O	0,001m	2,758m	0,002m
M009	8°03'11,95661"S	0,001m	34°56'55,82209"O	0,001m	2,966m	0,007m
M011	8°03'19,96836"S	0,001m	34°57'13,64908"O	0,003m	3,267m	0,005m
M013	8°03'14,04700"S	0,001m	34°57'12,50847"O	0,001m	3,290m	0,003m
M015	8°03'04,61811"S	0,001m	34°57'08,41074"O	0,001m	3,071m	0,004m
M017	8°02'54,81162"S	0,001m	34°56'58,99395"O	0,001m	2,521m	0,033m
M019	8°03'04,61032"S	0,003m	34°56'58,59560"O	0,003m	3,250m	0,016m

Fonte: Vila Flor (2010).

Tabela 20 – Coordenadas no SGL e UTM.

Ponto	X (m)	Y (m)	N (m)	E (m)
REC	150000.000	250000.000	9.109.554,894993	284.931,043438
EPS1	150367.559	250308.112	9.109.864,810700	285.297,190602
EPS2	149885.595	250406.169	9.109.960,583077	284.814,681575
EPS3	150453.087	249873.846	9.109.430,884770	285.384,804005
EPS4	149811.216	249927.136	9.109.481,118280	284.742,576082
EPS5	150430.788	249388.920	9.108.945,774006	285.364,817743
EPS6	149669.906	249453.330	9.109.006,560852	284.603,505999
EPS7	149718.398	249854.310	9.109.407,837857	284.650,091380
M001	149919.828	250270.717	9.109.825,273929	284.849,566310
M003	150332.320	249424.720	9.108.981,110505	285.266,163412
M005	150494.095	250285.526	9.109.842,824092	285.423,853727
M007	149857.037	249546.019	9.109.100,158665	284.790,224809
M009	150295.077	249739.271	9.109.295,533363	285.227,412338
M011	149749.231	249493.141	9.109.046,757579	284.682,653974
M013	149784.155	249675.053	9.109.228,864939	284.716,714425
M015	149909.623	249964.719	9.109.519,177388	284.840,820115
M017	150197.960	250265.986	9.109.821,867939	285.127,765541
M019	150210.156	249964.958	9.109.520,850824	285.141,399963

Fonte: Vila Flor (2010).