PABLO HENRIQUE SOUZA GALHARDO

Análise do posicionamento GNSS cinemático em ambiente urbano
com uso da técnica RTK via Ntrip

SÃO PAULO

2018

PABLO HENRIQUE SOUZA GALHARDO

Análise do posicionamento GNSS cinemático em ambiente urbano
com uso da técnica RTK via Ntrip

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências.

SÃO PAULO

2018

PABLO HENRIQUE SOUZA GALHARDO

Análise do posicionamento GNSS cinemático em ambiente urbano
com uso da técnica RTK via Ntrip

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências.

Área de Concentração:
Engenharia de Transportes

Orientador:
Prof. Dr. Edvaldo Simões da Fonseca
Junior

SÃO PAULO

2018

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, de de 20

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

Catálogo-na-publicação

Galhardo, Pablo Henrique Souza

Análise do posicionamento GNSS cinemático em ambiente urbano com uso da técnica RTK via Ntrip / P. H. S. Galhardo -- São Paulo, 2018. 105 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.GPS 2.GNSS 3.RTK 4.Ntrip 5.RBMC-IP I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

Às minhas amadas, Aline e Gianna.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pelo dom da vida e por me colocar no longo caminho da busca pelo conhecimento.

Aos meu pais, Adelice e Paulo, por não terem medido esforços em me manterem na universidade, possibilitando que alcançasse o sonho de me tornar engenheiro.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Edvaldo Simões da Fonseca Junior, pela confiança, paciência, pelos conhecimentos transmitidos e disponibilidade, me acompanhando durante a longa jornada na qual se fez este mestrado.

À empresa Furtado Schmidt, pela ajuda ímpar, me liberando para frequentar as aulas e fornecendo o equipamento utilizado durante os testes.

Aos professores Dr. Flávio Guilherme Vaz de Almeida, Dr. João Carlos Chaves e Dr. Jorge Luiz Alves Trabanco, pelas contribuições valiosas no momento da qualificação e na defesa.

Aos amigos Erly Caldas de Lima e Lucas Lúcio, pelo auxílio com os programas utilizados neste trabalho.

À turma XXXI de Engenharia Cartográfica e professores do Departamento de Cartografia da Unesp de Presidente Prudente, pelos saudosos anos vividos e amizade que resiste ao tempo e a distância.

Ao Movimento Escoteiro, que despertou em mim o interesse pela cartografia quando jovem e ofereceu-me os valores necessários para formação de um homem temente a Deus e a serviço da pátria e do próximo.

E por fim, em especial, à minha esposa Aline, por todo incentivo e companheirismo, me dando forças e motivos para que nunca desistisse, entre um deles nossa linda e pequena Gianna.

A todos o meu muito obrigado e que Deus os abençoe imensamente.

*“Concedei-me, Senhor,
a agudeza de entender, a capacidade de reter,
a sutileza de relevar, a facilidade de aprender,
a graça abundante de falar e de escrever.
Ensinai-me a começar, regei-me no continuar
e no perseverar até o término”.
(Santo Tomás de Aquino)*

RESUMO

O constante avanço do *Global Navigation Satellite System* (GNSS) possibilita aos seus usuários ao redor do mundo a utilização de seus produtos para os mais diversos fins. Dentre eles, a navegação veicular autônoma se caracteriza como um dos principais focos de investimentos e pesquisas em universidades e instituições privadas. Concomitantemente, a modernização dos receptores GNSS acompanha esta evolução, oferecendo equipamentos de dimensões menores e mais versáteis que antes, com a capacidade de rastreamento de novas constelações e operações de precisão em tempo real. O uso de redes de celulares e conexões de *internet* sem fio vêm apoiando este desenvolvimento, permitindo aos profissionais da área de geomática realizar levantamentos utilizando a técnica conhecida como *Real Time Kinematic* (RTK). Esta pesquisa tem por finalidade avaliar a qualidade de dados coletados por meio desta técnica RTK, apoiada no uso do *Networked Transport of RTCM via Internet Protocol* (Ntrip) para obtenção das correções diferenciais necessárias à operação, em ambiente urbano, e utilizando a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS em tempo real (RBMC-IP). Para isto, foram feitas coletas de dados com um receptor de dupla frequência acoplado a um veículo, o qual percorreu o mesmo trajeto por vinte e nove dias. O local de realização dos testes foi o Corredor Norte-Sul da cidade de São Paulo, com extensão aproximada de 22.700 m. A metodologia de análise dos dados foi dividida em três casos: O primeiro considerou todo o trajeto. O segundo, apenas um trecho sem interferências (como árvores de grande porte, túneis, viadutos e prédios), plano e sem curvas. Por fim, o terceiro investigou como seria o comportamento do receptor após uma situação de bloqueio total do sinal de satélites, ao passar por baixo de um viaduto. Avaliou-se as precisões horizontais e verticais dos pontos registrados, a quantidade de satélites rastreados, os valores de *Positional Dilution of Precision* (PDOP), as soluções para o vetor das ambiguidades durante o percurso e a qualidade da conexão móvel. Os resultados mostraram que o uso da técnica RTK via Ntrip por meio de serviço RBMC-IP constitui-se uma ferramenta confiável para o posicionamento preciso em tempo real. Entretanto, em ambientes urbanos, e somado ao modo cinemático de coleta, tais valores tornam-se mais suscetíveis à degradação da precisão.

Palavras-chave: GPS. GNSS. RTK. Ntrip. RBMC-IP.

ABSTRACT

The continuous progress of the Global Navigation Satellite System (GNSS) enables its large user community around the world to use its products for a wide range of purposes. Amongst them, autonomous vehicular navigation is featured as one of the main focuses of investments and research in universities and private institutions. At the same time, the modernization of GNSS receivers follows this evolution, offering smaller and more versatile equipment than before, which are able to trace new constellations and high-precision operations in real time. The use of mobile networks and wireless Internet connections have supported this development, allowing geomatics professionals to carry out surveys using the technique known as Real Time Kinematic (RTK). This research aims at assessing the quality of the data gathered by this RTK technique, based on the use of the Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (Ntrip) to obtain differential corrections necessary to the operation in an urban environment, and the use of Brazilian Network of Continuous Monitoring of GNSS Systems in real time (RBMC-IP). In order to do so, we gathered data with the receiver installed in a vehicle which travelled the same route for twenty-nine days. The test site was the North-South Corridor in São Paulo, which is approximately 22,700 m long. The methodology of data analysis was divided into three cases: The first one took the whole route into account. The second one, only one travel leg without interference (such as tall trees, tunnels, viaducts and skyscrapers), flat and curveless. Lastly, the third one investigated how the receiver would behave after a situation of total blockade of satellites, such as under a viaduct. We evaluated the horizontal and vertical accuracies of the recorded points, the number of satellites traced, the Positional Dilution of Precision (PDOP) values, the solutions to the vector of ambiguities during the course and the quality of the mobile connection. The results showed that the use of the RTK technique via Ntrip via the RBMC-IP service is a reliable tool for precise positioning in real time. However, in urban environments in addition to the kinematic mode of collection, such values become more susceptible to the degradation of precision.

Keywords: GPS. GNSS. RTK. Ntrip. RBMC-IP.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Quadro esquemático do GNSS	20
Figura 2 – Segmento espacial do GPS	21
Figura 3 – Estações integrantes do segmento de controle do GPS	22
Figura 4 – Dispersão das coordenadas antes e após a desativação da SA	23
Figura 5 – Segmento espacial do GLONASS.....	24
Figura 6 – Segmento espacial do Galileo.....	26
Figura 7 – Segmento espacial do BeiDou	28
Figura 8 – Esquema de propagação dos sinais com e sem multicaminhamento ..	32
Figura 9 – Esquema de representação da perda de ciclos	33
Figura 10 – Comparação entre situações de PDOP bom e PDOP ruim	36
Figura 11 – Quadro esquemático dos métodos de posicionamento.....	37
Figura 12 – Esquema do posicionamento absoluto.....	38
Figura 13 – Esquema de funcionamento do serviço PPP do IBGE	39
Figura 14 – Esquema do posicionamento relativo.....	40
Figura 15 – Conceito básico de posicionamento diferencial	44
Figura 16 – Esquema do posicionamento RTK com uso de rádio UHF	49
Figura 17 – Propagação das ondas de rádio com obstrução	50
Figura 18 – Esquema dos componentes do Ntrip	54
Figura 19 – Representação esquemática do funcionamento do RTK via Ntrip	56
Figura 20 – Esquema da infraestrutura do RTK em Rede	59
Figura 21 – Esquema de funcionamento da RBMC-IP	62
Figura 22 – Estações da RBMC-IP	63
Figura 23 – Veículo CaRINA 2	65
Figura 24 – Área de estudo: Corredor Norte-Sul de São Paulo	67
Figura 25 – Receptor ProMark 220 da Spectra Precision	69
Figura 26 – Locais onde foram instalados os equipamentos no veículo	70
Figura 27 – Dimensões do veículo Ford Fiesta	71
Figura 28 – Coordenadas oficiais da estação POLI	71
Figura 29 – Trecho do arquivo de extensão TXT gerado na coleta.....	72
Figura 30 – Software GNSS Solutions: Processamento dos dados brutos	74
Figura 31 – Trecho da Análise 2: Avenida Moreira Guimarães	75

Figura 32 – Portal GeoSampa: obtenção da base cartográfica do município de São Paulo.....	76
Figura 33 – Trecho do MDC: Feições eixo de logradouro, quadra viária e pontos coletados.....	76
Figura 34 – Software QGIS: Extração das distâncias em relação ao canteiro central	77
Figura 35 – Esquema de coleta de dados na faixa da esquerda.....	78
<i>Figura 36 – Levantamento topográfico com estação total.....</i>	<i>78</i>
Figura 37 – Croqui do levantamento topográfico.....	79
Figura 38 – Trecho após o viaduto República Árabe Síria	80
Figura 39 – Esquema de posicionamento com receptor sem tecnologia Z-Blade e com a mesma.....	81
Figura 40 – Análise 1: Número total de pontos por dia de coleta.....	82
Figura 41 – Análise 1: Média do número de satélites.....	82
Figura 42 – Análise 1: Média do PDOP.....	83
Figura 43 – Análise 1: Média das precisões horizontais e verticais - RTK.....	83
Figura 44 – Análise 1: Número de pontos por tipo de solução da ambiguidade ...	85
Figura 45 – Análise 1: Porcentagem diária de cada tipo de solução da ambiguidade.....	86
Figura 46 – Análise 1: Porcentagem total de pontos de acordo com o tipo de solução da ambiguidade	86
Figura 47 – Análise 1: Trecho com interferências seguidas.....	87
Figura 48 – Análise 1: Distribuição normal das precisões horizontais e verticais - RTK.....	88
Figura 49 – Análise 1: Média das precisões horizontais e verticais - PP	90
Figura 50 – Análise 2: Média e desvio-padrão das distâncias do veículo até o canteiro central.....	92
Figura 51 – Análise 2: Trecho de arquivo resultante de coleta com problema de conexão.....	93
Figura 52 – Análise 2: Posição do veículo na faixa	94
Figura 53 – Análise 3: Médias de distância e tempo	95
Figura 54 – Análise 3: Velocidades médias desenvolvidas pelo veículo.....	97
Figura 55 – Análise 3: Melhor dia (12/06) à esquerda, e pior dia (26/03) à direita	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Erros envolvidos nas observáveis	31
Tabela 2 – Características das mensagens RTCM 3.1	52
Tabela 3 – Tipos de solução da ambiguidade no software ProMark Field v3.6.2..	73
Tabela 4 – Análise 1: Ocorrência por intervalos de precisão média - RTK (Horiz.)	84
Tabela 5 – Análise 1: Ocorrência por intervalos de precisão média - RTK (Vert.)	84
Tabela 6 – Análise 1: Média e desvio-padrão geral - RTK (Horiz.)	87
Tabela 7 – Análise 1: Porcentagem por intervalos de precisão - RTK (Horiz.).....	87
Tabela 8 – Análise 1: Média e desvio-padrão geral - RTK (Vert.)	88
Tabela 9 – Análise 1: Porcentagem por intervalos de precisão - RTK (Vert.)	88
Tabela 10 – Análise 1: Porcentagem por intervalos de precisão - PP (Horiz.).....	90
Tabela 11 – Análise 1: Média e desvio-padrão geral - PP (Horiz.).....	91
Tabela 12 – Análise 1: Porcentagem por intervalos de precisão - PP (Vert.).....	91
Tabela 13 – Análise 1: Média e desvio-padrão geral – PP. (Vert.).....	91
Tabela 14 – Análise 2: Média e desvio-padrão geral	92
Tabela 15 – Análise 3: Número de pontos, distância e tempo por dia	96

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AS	<i>Anti-spoofing</i>
BDS	<i>BeiDou Navigation Satellite System</i>
BDT	<i>BeiDou Time</i>
BKG	<i>Bundesamt für Kartographie und Geodäsie</i>
BPS	<i>Bits Per Second</i>
C/A	<i>Coarse Acquisition</i>
CACS	<i>Canadian Active Control System</i>
CaRINA	Carro Robótico Inteligente para Navegação Autônoma
CGCS2000	<i>China Geodetic Coordinate System 2000</i>
CORS	<i>Continuously Operating Reference Station</i>
CPC	<i>Carrier Phase Correction</i>
CS	<i>Commercial Service</i>
DD	Dupla Diferença
DGPS	<i>Differential Global Positioning System</i>
DGNSS	<i>Differential Global Navigation Satellite System</i>
DoD	<i>Department of Defense</i>
DOP	<i>Dilution of Precision</i>
EGNOS	<i>European Geostationary Navigation Overlay Service</i>
EP-USP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
ESA	<i>European Space Agency</i>
EUA	Estados Unidos da América
EUREF	<i>European Reference Frame</i>
FKP	<i>Flächen Korrektur Parameter</i>
FTP	<i>File Transfer Protocol</i>
GAGAN	<i>GPS Aided GEO Augmented Navigation</i>
GBAS	<i>Ground-Based Augmentation Systems</i>
GBCC	<i>GLONASS Ground-Based Control Complex</i>
GCC	<i>Ground Control Centers</i>
GDOP	<i>Geometric Dilution of Precision</i>

GEO	<i>Geostationary Earth Orbit</i>
GEONET	<i>GNSS Earth Observation Network system</i>
GIOVE	<i>Galileo In-Orbit Validation Element</i>
GLONASS	<i>Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GRAS	<i>Ground-based Regional Augmentation System</i>
GRS80	<i>Geodetic Reference System 1980</i>
GSA	<i>European GNSS Agency</i>
GSM	<i>Global System of Mobile</i>
GSS	<i>Galileo Sensor Stations</i>
HDOP	<i>Horizontal Dilution of Precision</i>
HP	<i>High Precision</i>
HPL	<i>Horizontal Protection Level</i>
HRMS	<i>Horizontal Root Mean Square</i>
HTTP	<i>Hipertext Transfer Protocol</i>
IBGE	<i>Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística</i>
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i>
IERS	<i>International Earth Rotation and Reference System Service</i>
IGS	<i>International GNSS Service</i>
IGSO	<i>Inclined Geosynchronous Satellite Orbit</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
IR	<i>Integrity Risk</i>
IRNSS	<i>Indian Regional Navigational Satellite System</i>
ITRF	<i>International Terrestrial Reference Frame</i>
LIDAR	<i>Light Detection And Ranging</i>
MAC	<i>Master-Auxiliary Concept</i>
MDC	<i>Mapa Digital da Cidade</i>
MEO	<i>Medium-Earth Orbit</i>
MSAS	<i>MSAT Satellite-based Augmentation System</i>

MSAT	<i>Multi-functional Satellite Augmentation System</i>
MVC	Matriz de Variância e Covariância
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NDGPS	<i>Nationwide Differential Global Positioning System</i>
NGS	<i>National Geodetic Survey</i>
NMEA	<i>National Marine Electronics Association</i>
NRTK	<i>Network Real Time Kinematic</i>
Ntrip	<i>Networked Transport of RTCM via Internet Protocol</i>
OTF	<i>On The Fly</i>
OS	<i>Open Service</i>
P	<i>Precision</i>
PC	<i>Personal Computer</i>
PD	Pseudodistância
PDA	<i>Personal Digital Assistant</i>
PDOP	<i>Positional Dilution of Precision</i>
PPM	<i>Part Per Million</i>
PPP	Posicionamento por Ponto Preciso
PRN	<i>Pseudo Random Noise</i>
PRS	<i>Public Regulated Service</i>
PZ90	<i>Parametry Zemli 1990</i>
QZSS	<i>Quase-Zenith Satellite System</i>
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS
RBMC-IP	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS em tempo real
RINEX	<i>Receiver Independent Exchange Format</i>
RTCM	<i>Radio Technical Commission for Maritime Services</i>
RTK	<i>Real Time Kinematic</i>
SA	<i>Selective Availability</i>
SAPOS	<i>Satellite Positioning Service of the German State Survey</i>
SBAS	<i>Satellite-Based Augmentation System</i>
SC104	<i>Special Committee 104</i>

SGB	Sistema Geodésico Brasileiro
SIG	Sistema de informações Geográficas
SIM	<i>Subscriber Identity Module</i>
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SOL	<i>Safety of Life</i>
SP	<i>Standard Precision</i>
TCP/IP	<i>Transfer Control Protocol/Internet Protocol</i>
TDOP	<i>Time Dilution of Precision</i>
TEC	<i>Total Electron Content</i>
TTA	<i>Time-To-Alert</i>
TTFF	<i>Time To First-Fix</i>
UE	União Europeia
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
Unesp	Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
URSS	União das Repúblicas Socialistas Soviéticas
USP	Universidade do Estado de São Paulo
UTC	<i>Universal Time Coordinated</i>
UTM	Universal Transversa de Mercator
VAT	Veículo Autônomo
VDOP	<i>Vertical Dilution of Precision</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i>
VPL	<i>Vertical Protection Level</i>
VRS	<i>Virtual Reference Station</i>
VRMS	<i>Vertical Root Mean Square</i>
WAAS	<i>Wide Area Augmentation System</i>
WGS84	<i>World Geodetic System 1984</i>
3D	Três Dimensões
8PSK	<i>8 Phase Shift Keying modulation</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Caracterização do assunto	15
1.2. Objetivos	17
1.2.1. Objetivo geral.....	17
1.2.2. Objetivos específicos	17
1.3. Justificativa.....	17
1.4. Estrutura do trabalho.....	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1. Sistemas de posicionamento GNSS	19
2.1.1. GPS	20
2.1.2. GLONASS	23
2.1.3. Galileo.....	25
2.1.4. BeiDou	27
2.2. Influência dos erros nas medições com GNSS	28
2.2.1. As observáveis GPS	29
2.2.2. Erros sistemáticos envolvidos nas observáveis	30
2.2.2.1. Multicaminhamento.....	31
2.2.2.2. Perdas de ciclo	32
2.2.3. Diluição da Precisão	34
2.3. Métodos de posicionamento GNSS	36
2.3.1. Posicionamento absoluto.....	37
2.3.1.1. Posicionamento por Ponto Preciso (PPP)	38
2.3.2. Posicionamento relativo	40
2.3.2.1. Posicionamento relativo estático.....	41
2.3.2.2. Posicionamento relativo estático rápido.....	41
2.3.2.3. Posicionamento relativo semicinemático (<i>stop-and-go</i>).....	41
2.3.2.4. Posicionamento relativo cinemático	41
2.3.2.5. Posicionamento diferencial GPS (DGPS)	42
2.4. Técnica <i>Real Time Kinematic</i> (RTK)	42
2.4.1. Modelo matemático.....	44
2.4.2. Solução das ambiguidades.....	46
2.4.3. <i>Link</i> de dados	48
2.4.4. Mensagens RTCM	51
2.4.5. Protocolo Ntrip	52

2.4.6. Redes CORS	59
2.4.6.1 Serviço RBMC-IP	61
2.5. Veículos autônomos.....	64
3. MATERIAIS E MÉTODOS	66
3.1. Área de estudo.....	66
3.2. Materiais utilizados.....	67
3.3. Coleta de dados	70
3.4. Análise dos dados.....	73
3.4.1. Análise 1: Trajeto completo	73
3.4.2. Análise 2: Trecho sem interferências.....	74
3.4.3. Análise 3: Trecho após o viaduto.....	79
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	82
4.1. Análise 1: Trajeto completo.....	82
4.2. Análise 2: Trecho sem interferências	92
4.3. Análise 3: Trecho após o viaduto.....	95
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	99
REFERÊNCIAS.....	102

1. INTRODUÇÃO

1.1. Caracterização do assunto

Assim como a *internet*, a navegação por satélites artificiais é um elemento essencial da infraestrutura global de informação, cada dia mais presente na vida das pessoas. Constantemente surgem novos empregos dessa tecnologia e, seja num *smartphone* de uso pessoal, que executa um aplicativo para navegação pelas ruas da cidade, ou em um navio plataforma em alto mar, que se posiciona para uma operação de extração de petróleo, a necessidade é a mesma: saber qual a sua posição para então definir em qual direção seguir.

Da mesma forma que os receptores *Global Positioning System* (GPS) foram sendo aperfeiçoados com o passar do tempo, novas técnicas de posicionamento foram desenvolvidas, possibilitando um refinamento das precisões e uma maior produtividade nos levantamentos realizados. Dentre elas é possível citar a técnica *Real Time Kinematic* (RTK) e a *Differential Global Positioning System* (DGPS), onde as correções de posição são transmitidas em tempo real da estação de referência para o receptor que se encontra sobre o ponto cujas coordenadas serão determinadas (SEEBER, 2003; MONICO, 2008).

A forma mais comum de transmissão dessas correções é via frequências emitidas por um rádio transmissor em *Ultra High Frequency* (UHF), o qual tem sua área de atuação diretamente ligada à potência de transmissão do rádio acoplado ao receptor denominado base. No RTK convencional (via UHF), a distância entre a estação de referência que transmite as correções e o receptor móvel que as recebe fica limitado entre 15 e 20 km. Essa limitação é causada por obstáculos, tais como: construções, montanhas, florestas (OCALAN e TUNALIOGLU, 2010; CHEN; LI e WEBER, 2004). Entretanto, com o avanço da telefonia móvel e o adensamento das redes celulares, resultando em uma melhor qualidade na transmissão de dados, surge como alternativa o uso da telefonia celular para o envio dessas correções. O uso do protocolo *Networked Transport of RTCM via Internet Protocol* (Ntrip) permite ao usuário trabalhar com a técnica RTK e obter maiores distâncias em relação à estação de referência, além de possibilitar que o usuário vá a campo com apenas um receptor. Os primeiros estudos desenvolvidos com essa ferramenta se iniciaram no ano de 2002 (WEBER; DETTMERING e GEBHARD, 2005).

Implantada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em 1996 a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC) tem sido de extrema importância para a manutenção e atualização da estrutura geodésica no país. É a principal ligação com redes geodésicas internacionais, além de ser a primeira rede estabelecida na América do Sul. A partir do ano de 2007 passou por um processo de expansão e modernização, permitindo o incremento no número de estações e a disponibilização de um novo serviço para o fornecimento de dados em tempo real, para aplicações DGPS e RTK via Ntrip, conhecido como Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS em tempo real (RBMC-IP). Os dados trafegam pela *internet* até um servidor localizado no IBGE, onde são acessados mediante um nome de usuário e uma senha (COSTA *et al.*, 2008).

Dentro do conceito de posicionamento pelo *Global Navigation Satellite System* (GNSS), um dos tópicos que tem sido tema de investigações atualmente é melhorar a eficiência da navegação veicular. Nesse ponto, observa-se que a técnica RTK tem grande potencial de contribuição, devido ao fato de fornecer ao usuário posicionamento com precisão centimétrica em tempo real. Pesquisadores estão desenvolvendo ferramentas para colocá-la em prática no controle de tráfego de veículos e direção assistida. A combinação de informações de posicionamento de alta precisão obtida com a técnica RTK via Ntrip, associada com dados de sensores inerciais poderá influenciar os mais recentes sistemas de controle de veículos autônomos desenvolvidos (URADZINSKI; KIM e LANGLEY, 2008; ANSARI; FENG e TANG, 2015).

Um cenário urbano oferece diversas restrições às tecnologias GNSS. Algumas destas, no entanto, são consideradas mais preponderantes quando o posicionamento GNSS é tratado sob o enfoque dos transportes rodoviários. Entre estas restrições estão o bloqueio, a refração e a difração de sinais GNSS, que podem gerar cenários de recepção de sinais sem visada direta e multicaminhamento. Um receptor GNSS integrado a um veículo recebe sinais que podem sofrer interferência de elementos estáticos (e.g. edificações e obras de infraestrutura) e de elementos dinâmicos (e.g. outros veículos, pessoas, etc.). Além disto, como o próprio receptor está em movimento (por estar integrado a um veículo), a relação do receptor, dos satélites e dos bloqueios varia constantemente no tempo e no espaço, tornando mais complexo o processo de modelar possíveis restrições no ambiente e estabelecer as melhores visadas. Em casos mais

exigentes, se uma rede de telecomunicação estiver disponível, pode-se utilizar técnicas de melhor qualidade como RTK e *Differential Global Navigation Satellite System* (DGNSS). No entanto, deve-se reconhecer os limites de operação (em especial, cobertura e disponibilidade de rede de telecomunicação) de cada técnica (PISSARDINI *et al.*, 2017).

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo geral

Este trabalho tem por objetivo analisar precisão e acurácia do posicionamento RTK via Ntrip no modo cinemático em ambiente urbano, utilizando-se um receptor de dupla frequência.

1.2.2. Objetivos específicos

Dentre os objetivos específicos pretende-se:

- 1) Estabelecer uma comparação do posicionamento em tempo real com o pós-processado para levantamentos cinemáticos;
- 2) Analisar a qualidade do serviço RBMC-IP disponibilizado pelo IBGE e o nível de repetibilidade da informação, ou seja, a capacidade de se obter todos os dias o mesmo resultado para o mesmo trajeto;
- 3) Verificar se a técnica RTK e o tipo de receptor utilizado podem ser empregados em sistemas de navegação autônoma, afim de melhorar a precisão oferecida.

1.3. Justificativa

Diversos trabalhos apresentam estudos sobre o uso de receptores GNSS como apoio à navegação veicular, visando principalmente a segurança dos ocupantes, com a redução da probabilidade de ocorrência de acidentes (ANSARI; FENG e TANG, 2015; PEYRAUD *et al.*, 2015; STEPHENSON *et al.*, 2013; WILLIAMS *et al.*, 2012)

Sabe-se que diminuição de incertezas e a melhora na precisão de levantamentos sempre foi o principal motivo do desenvolvimento de novas técnicas. Com a crescente expansão das conexões móveis e o uso de celulares para obtenção de informação, a qualidade da conexão ofertada pelas operadoras também evoluiu. Um claro exemplo dessa evolução é que num passado recente o tempo de compartilhamento de informações via dispositivos móveis era muito superior ao que se tem hoje.

Observa-se uma lacuna no tocante a trabalhos que coloquem à prova o posicionamento RTK em modo cinemático no uso da RBMC-IP, apresentando análises temporais passíveis de se obter resultados conclusivos. Referências encontradas sobre o assunto apresentam testes de posicionamento em tempo real na forma estática, nos quais ocupa-se pontos de coordenadas conhecidas e compara-se com o valor de referência. Entretanto, esta pesquisa vem abordar o caso cinemático, avaliando as condições do posicionamento RTK via Ntrip quando o receptor se encontra em movimento.

Por fim, tornou-se comum o uso da técnica RTK via Ntrip por profissionais da área de agrimensura em seus levantamentos e locações de obras civis. Com isso, surgiram também redes privadas, capazes de fornecer ao cliente que possui um receptor GNSS compatível com essa tecnologia um serviço de conexão paga.

1.4. Estrutura do trabalho

No capítulo 2 será apresentada uma revisão bibliográfica acerca do assunto, envolvendo os sistemas de posicionamento, erros nas observáveis, os modelos matemáticos envolvidos, os métodos de posicionamento, o posicionamento pela técnica RTK e o serviço RBMC-IP.

No capítulo 3 serão descritos os materiais utilizados e a metodologia aplicada nos testes. O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos com as coletas e as análises que se permite fazer acerca dos valores encontrados. Por fim, o capítulo 5 traz as conclusões do trabalho e recomendações para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As seções a seguir, presentes neste capítulo, apresentam o suporte teórico acerca do tema. Uma síntese das publicações já realizadas é apresentada visando elucidar os aspectos já abordados e quais são as lacunas ainda existentes na literatura.

2.1. Sistemas de posicionamento GNSS

Desenvolvidos inicialmente com o intuito de fornecer informações de posicionamento às operações militares, surgiram os primeiros sistemas de navegação por satélite. Hoje, em todo o mundo, a sociedade civil faz amplo uso desses serviços e cada vez mais implementa soluções que possam otimizar processos, auxiliar na navegação e elaboração de produtos cartográficos. A sigla GNSS passou a ser adotada a partir de setembro de 1991 durante a 10ª Conferência de Navegação Aérea da *International Civil Aviation Organization* (ICAO). O estabelecimento do GNSS pode ser definido em duas etapas, sendo elas GNSS-1 e GNSS-2 (SEEBER, 2003):

- GNSS-1: Baseado nos sistemas GPS e GLONASS como espinha dorsal, e incrementado por componentes civis adicionais;
- GNSS-2: É uma segunda geração do sistema, incrementada pelos satélites GPS do bloco IIF e o europeu Galileo.

Segundo Ocalan e Tunalioglu (2010) o GNSS é dividido em três categorias principais: sistemas globais, sistemas regionais e sistemas de aumento. Dentro dos sistemas globais, os operacionais são o GPS, criado e mantido pelos Estados Unidos da América (EUA), e o GLONASS, por parte da Rússia. Os outros sistemas, que estarão em pleno funcionamento num futuro próximo, são o Galileo, implementado como um projeto da União Europeia (UE), e o BeiDou, da China. Nos sistemas regionais os mais desenvolvidos são o japonês *Quasi-Zenith Satellite System* (QZSS) e o indiano *Indian Regional Navigational Satellite System* (IRNSS). Os sistemas de aumento do tipo *Satellite-Based Augmentation System* (SBAS) incluem o *Wide Area Augmentation System* (WAAS) dos EUA, o *European Geostationary Navigation Overlay Service* (EGNOS) da UE, o japonês *Multi-Functional Satellite Augmentation System* (MSAS), e o indiano *GPS Aided Geo Augmented Navigation* (GAGAN), que tem um papel ativo na complementação dos

sistemas globais. Além desses, dentro dos SBAS, existem sistemas comerciais de cobertura global, como OmniSTAR, StarFire, Veripos e outros. Os componentes do *Ground Based Augmentation Systems* (GBAS) têm sido utilizados para aplicações continentais, regionais e locais. Os sistemas GBAS mais conhecidos à escala regional são o australiano *Ground-Based Regional Augmentation System* (GRAS) e o americano *Nationwide Differential Global Positioning System* (NDGPS). As redes de estações de referência *Continuously Operating Reference Station* (CORS) completam o sistema. A figura 1 ilustra essa divisão.

Figura 1 – Quadro esquemático do GNSS

Fonte: Adaptado de Ocalan e Tunalioglu (2010)

2.1.1. GPS

O *Global Positioning System* (GPS) é um sistema de radionavegação desenvolvido pelo *Department of Defense* – *DoD* (Departamento de Defesa dos Estados Unidos). Visando ser o principal sistema de navegação das Forças Armadas norte-americanas, ele resultou da fusão de dois programas financiados pelo governo norte-americano: o *Timation* e o *System 621B*, sob responsabilidade da Marinha e da Força Aérea, respectivamente. Foi declarado operacional em 27 de abril de 1985 com uma constelação de 24 satélites (MONICO, 2008).

O GPS consiste de três segmentos principais: espacial, controle e de usuários. O primeiro está associado à constelação de satélites e seus sinais. O de controle monitora e faz as devidas manutenções do sistema. Por fim, o segmento de usuários é abrangente e amplia-se constantemente. O segmento espacial do GPS consiste de uma constelação de satélites artificiais que transmitem sinais de rádio para os usuários. Os satélites GPS orbitam a uma altitude de aproximadamente 20.200 km, 55° de inclinação em relação ao equador e dispostos em seis planos orbitais, igualmente espaçados em torno da Terra. Este arranjo garante que os usuários possam rastrear pelo menos quatro satélites em qualquer ponto do planeta, conforme mostra a figura 2. Cada satélite orbita a Terra duas vezes por dia (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER e WASLE, 2008).

Quanto aos sinais transmitidos, cada satélite GPS transmite duas ondas portadoras: L1 e L2, as quais são geradas a partir da frequência fundamental de 10,23 Mhz, que é multiplicada por 154 e 120, respectivamente. Dessa forma, as frequências (L) e os comprimentos de onda (λ) de L1 e L2 são (MONICO, 2008):

- L1 = 1575,42 MHz e $\lambda \cong 19$ cm;
- L2 = 1227,60 MHz e $\lambda \cong 24$ cm.

Figura 2 – Segmento espacial do GPS

Fonte: GPS (2018)

O segmento de controle GPS consiste de uma rede global de instalações terrestres que rastreiam os satélites GPS, monitoraram suas transmissões, realizam análises e enviam comandos e dados para a constelação. O segmento de controle operacional atual inclui uma estação mestra de controle, uma estação mestra de controle alternativa, 11 estações de comando e controle e 15 locais de monitoramento (SEEBER, 2003). A distribuição dessas estações ao redor do globo terrestre é mostrada no mapa da figura 3.

Figura 3 – Estações integrantes do segmento de controle do GPS

Fonte: Adaptado de GPS (2018)

Em maio de 2000, o então presidente americano Bill Clinton retirou, por meio de um decreto, a técnica de degradação *Selective Availability* (SA) que havia nos sinais da constelação GPS (figura 4). Dessa forma, as leituras de receptores GPS de usuários civis, que podiam estar incorretas na ordem de 100 metros, melhoraram cerca de dez vezes, beneficiando utilizadores civis e comerciais em todo o mundo (GPS, 2018).

Figura 4 – Dispersão das coordenadas antes e após a desativação da SA

Fonte: Adaptado de GPS (2018)

Segundo a página oficial do sistema na internet, a partir de 17 de outubro de 2017, havia um total de 31 satélites operacionais na constelação de GPS, não incluindo os satélites desativados, mantidos em órbita caso haja a necessidade de reativá-los (GPS, 2018).

2.1.2. GLONASS

Iniciado na antiga União das Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS), o GLONASS, cuja sigla em russo significa *Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*, teve seu primeiro satélite lançado em 12 de Outubro de 1982. Foi declarado operacional em 24 de setembro de 1993, com uma constelação de 24 satélites, distribuídos em três planos orbitais com inclinação de $64,8^\circ$ com o equador e satélites a uma altitude de 19.100 km. Atualmente é gerido pela *Russian Federation Space Forces* (EL-RABBANY, 2002; SEEGER, 2003). A figura 5 apresenta seu segmento espacial.

Figura 5 – Segmento espacial do GLONASS

Fonte: Kaplan e Hegarty (2006)

Da mesma maneira que o GPS, o sistema GLONASS possui dois tipos de serviços oferecidos: o *Standard Precision* (SP) e o *High Precision* (HP). O SP é o serviço que continuamente permanece disponível para usuários civis ao redor do mundo. A especificação de precisão para o SP é de 50 m na horizontal e 70 m na vertical (SEEBER, 2003).

A grande diferença entre o GLONASS e o GPS é que cada satélite GLONASS trabalha em uma frequência diferente. Tendo p como o número específico de cada satélite, as frequências L1 e L2 são dadas em MHz, respectivamente, por (LEICK; RAPOPORT e TATARNIKOV, 2015):

$$f_1^p = 1602 + 0.5625 * p \quad (2.1)$$

$$f_2^p = 1246 + 0.4375 * p \quad (2.2)$$

com:

$$\frac{f_1^p}{f_2^p} = \frac{9}{7} \quad (2.3)$$

No que concerne ao referencial geodésico, atualmente as coordenadas das estações de controle e dos satélites são dadas no *Parametry Zemli 1990* (PZ90), que é compatível com o *International Terrestrial Reference Frame* (ITRF2000) (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER e WASLE, 2008).

Uma consulta no site oficial do órgão responsável pela manutenção do sistema na data de 8 de fevereiro de 2018 mostra que 22 satélites estão operacionais, 1 em testes e 2 em manutenção (GLONASS, 2018).

2.1.3. Galileo

Galileo é o sistema de navegação por satélite desenvolvido pela *European Space Agency* (ESA) e financiado pela União Europeia. Seu primeiro satélite experimental foi lançado em 28 dezembro de 2005, denominado GIOVE-A (*Galileo In-Orbit Validation Element*) (GROVES, 2008).

A constelação completa consiste em 27 satélites operacionais e mais 3 sobressalentes, divididos em três planos orbitais de 56° de inclinação em relação ao plano do equador, com uma órbita circular de semieixo maior com 29.600 km (LEICK; RAPOPORT e TATARNIKOV, 2015). A figura 6 apresenta a constelação de satélites do sistema Galileo.

O segmento de controle do Galileo é composto por dois *Ground Control Centers* (GCC). Um é responsável pelo controle dos satélites e pela geração de navegação e dados de tempo, o outro responsável pelo controle da integridade. Compõe ainda o seguimento 30 estações de monitoramento distribuídas ao redor da Terra, as *Galileo Sensor Stations* (GSS), que fornecem dados para as GCC's. A transmissão de informações para os satélites é feita através de 10 dessas estações do segmento (SEEBER, 2003).

Figura 6 – Segmento espacial do Galileo

Fonte: GSA (2018)

Ao segmento de usuários o Galileo fornece quatro serviços (GROVES, 2008; KAPLAN e HEGARTY, 2006):

- Serviço de acesso aberto (*Open Service – OS*): Serviço gratuito com precisão de 2 m para a componente horizontal e 4 m para a vertical, muito superiores aos oferecidos por outros sistemas;
- Serviço de segurança (*Safety of Life – SOL*): Fornece os mesmos sinais que OS, porém com um nível de integridade adicional e autenticação dos dados;
- Serviço de acesso comercial (*Commercial Service – CS*): Para usuários que necessitam de criptografia de sinal e dados. O CS oferece uma maior taxa de transferência de dados, autenticação de sinal e maior precisão, aproximadamente 20 cm;
- Serviço público regulado (*Public Regulated Service – PRS*): Serviço de navegação criptografada restrito a utilizadores autorizados pelos

governos e que necessitam de uma elevada precisão e garantia de funcionamento do serviço.

Segundo consulta no site da GSA, na data de 8 de fevereiro de 2018 a constelação possuía 22 satélites em órbita, 4 em fase de testes e 18 com capacidade total de operação. Espera-se que a constelação esteja totalmente completa e o sistema operacional até o ano de 2020 (GSA, 2018).

2.1.4. BeiDou

O BeiDou Navigation Satellite System (BDS), popularmente conhecido como BeiDou, é o sistema de navegação desenvolvido pela China. Oficialmente foi implantado no ano de 1994, com seus dois primeiros satélites sendo lançados no ano de 2000 (KAPLAN e HEGARTY, 2006; ZHAO *et al.*, 2015).

Quando concluído, seu segmento espacial será composto de 35 satélites: 5 satélites geoestacionários do tipo *Geostationary Earth Orbit* (GEO), 27 de órbita média *Medium-Earth Orbit* (MEO) e 3 em órbita geoestacionária inclinada *Inclined Geosynchronous Satellite Orbit* (IGSO). Os satélites do tipo GEO operam a uma altitude de 35.786 km e posicionados com os seguintes ângulos de inclinação: 58,75°, 80°, 110,5°, 140° e 160°. Os MEO operam em uma órbita de 21.528 km de altitude, com inclinação de 55°, distribuídos em três planos orbitais. Os do tipo IGSO orbitam a uma altitude de 35.786 km com uma inclinação de 55° em relação ao plano equatorial (LEICK; RAPOPORT e TATARNIKOV, 2015). Segundo o site oficial do sistema, até o dia 8 de fevereiro de 2018 o sistema possuía 27 satélites em órbita, sendo 12 deles fora de operação (BEIDOU, 2018). A figura 7 apresenta a constelação do sistema.

Figura 7 – Segmento espacial do BeiDou

Fonte: BeiDou (2018)

Seu funcionamento ocorre da seguinte forma: o receptor registra um curto segmento do sinal de navegação e, em seguida, o equipamento do usuário transmite isto para o satélite com uma taxa de atraso fixa. Essa informação, por sua vez, é transmitida para o centro de controle, que calcula a solução de posição e a informa ao usuário via satélite. O centro de controle usa um banco de dados com um modelo de elevação terrestre para obter a latitude e longitude corretas. Os satélites do BeiDou transmitem sinais de navegação numa frequência de 2.491,75 MHz o equipamento do usuário transmite de volta em 1.615,68 MHz (GROVES, 2008).

O sistema de tempo utilizados é o BDT (*BeiDou Time*), cuja época inicial data de 00:00:00h *Universal Time Coordinated* (UTC) de 1 janeiro de 2006, e o sistema de referência é o China Geodetic Coordinate System 2000 (CGCS2000). Após o funcionamento completo do sistema o BeiDou poderá fornecer seu serviço de posicionamento ao mundo todo com precisão melhor que 10 m (BEIDOU, 2013).

2.2. Influência dos erros nas medições com GNSS

Os atrasos causados pelas camadas da troposfera e ionosfera, o ruído de sinal, o atraso do relógio e erros relacionados a dados de efemérides diminuem a

precisão das observações com receptores GNSS de forma independente (DAMMALAGE e SAMARAKOON, 2008).

2.2.1. As observáveis GPS

Cada satélite GPS transmite um sinal de micro-ondas composto por duas frequências portadoras, moduladas por dois códigos digitais e uma mensagem de navegação. Como visto em 2.1.1, as duas frequências são geradas em 1.575,42 Mhz (referente à portadora L1) e 1.227,60 Mhz (referente à portadora L2). Os dois códigos GPS são chamados *Coarse Acquisition* (C/A) e *Precision* (P). O código P é modulado nas portadoras L1 e L2. Já o código C/A, que antes era modulado apenas sobre a portadora L1, com a introdução dos satélites do bloco IIR passou a ser modulado também em L2. Como resultado dessa modernização, uma terceira frequência também foi adicionada: a L5, a qual é transmitida em 1.176,45 Mhz. O código P foi projetado, inicialmente, para fins militares, o que faz com que este código seja criptografado. O resultado dessa criptografia é conhecido como código Y, gerado pelo processo de criptografia conhecido como *Anti-spoofing* (AS). A mensagem de navegação, por sua vez, é transmitida nas frequências L1 e L2 por cada satélite, e contém, além de outras informações, coordenadas dos satélites da constelação GPS em função do tempo, o valor correspondente à qualidade do sinal do satélite, a correção do erro do relógio, o almanaque do satélite e dados atmosféricos (EL-RABBANY, 2002).

As observáveis básicas do GPS que permitem determinar a posição, velocidade e tempo podem ser identificadas como (MONICO, 2008):

- Pseudodistância, a partir do código; e
- Fase da onda portadora, ou diferença de fase da onda portadora.

A pseudodistância (PD) é igual à diferença entre o tempo t_r registrado no receptor no instante de recepção do sinal e o tempo t^s , registrado no satélite, no instante de transmissão do sinal, multiplicado pela velocidade da luz no vácuo. A PD pode ser obtida via correlação com o código P sobre as portadoras L1 e L2 e/ou com código C/A, sobre a portadora L1, cuja equação pode ser dada por:

$$PD_R^S = \rho_r^S + c[dt_r - dt^S] + I_r^S + T_r^S + dm_r^S + \varepsilon_{PD_r}^S \quad (2.4)$$

onde:

- ρ_r^s é a distância geométrica entre a antena do satélite e a antena do receptor;
- c é a velocidade da luz no vácuo;
- dt_r é o erro do relógio do receptor em relação ao tempo GPS no instante t_r ;
- dt^s é o erro do relógio do satélite em relação ao tempo GPS no instante t^s ;
- I_r^s é a refração ionosférica;
- T_r^s é a refração troposférica;
- dm_r^s é o efeito do multicaminhamento;
- $\varepsilon_{PD_r}^s$ é o erro da medida da pseudositância.

A fase da onda portadora φ_r^s é igual à diferença entre a fase do sinal do satélite, recebido no receptor (φ^s), e a fase do sinal gerado no receptor (φ_r), ambas no instante de recepção t_r , cujo número de ciclos é dado por:

$$\varphi_r^s = \varphi^s(t) - \varphi_r(t) + N_r^s + \varepsilon\varphi_r^s \quad (2.5)$$

onde:

- t é o instante de recepção do sinal no receptor r ;
- $\varphi^s(t)$ é a fase da onda portadora gerada no satélite s e recebida no receptor r no instante da recepção;
- $\varphi_r(t)$ é a fase gerada no receptor no instante de recepção;
- N_r^s é o número de ciclos inteiros da chamada ambiguidade da fase; e
- $\varepsilon\varphi_r^s$ é o erro da fase da onda portadora.

2.2.2. Erros sistemáticos envolvidos nas observáveis

Segundo Monico (2008), as observáveis GPS, como todas as outras observáveis envolvidas nos processos de medidas, estão sujeitas a erros aleatórios, sistemáticos e grosseiros. Portanto, as fontes de erros envolvidas nos processos de medidas devem ser bem conhecidas. Erros sistemáticos podem ser parametrizados (modelados como termos adicionais) ou reduzidos (ou mesmo eliminados) por técnicas apropriadas de observação. Os erros aleatórios, por sua vez, não apresentam qualquer relação funcional com as medidas e são, em geral, discrepâncias remanescentes nas observações, depois que todos os erros

grosseiros e sistemáticos forem eliminados ou minimizados. Eles são inevitáveis, sendo, portanto, considerados como uma propriedade inerente da observação.

Os diversos erros, agrupados segundo as possíveis fontes, são apresentados na tabela 1.

Tabela 1 – Erros envolvidos nas observáveis

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

Fonte: Monico (2008)

A seguir, descreve-se mais a fundo os dois tipos de erros mais comuns em levantamentos com receptores GPS em áreas urbanas: multicaminhamento e perdas de ciclo.

2.2.2.1. Multicaminhamento

Interferências por multicaminhamento podem ocorrer quando o equipamento do usuário recebe sinais refletidos de um determinado satélite, além dos sinais diretos. Em aplicações terrestres, geralmente os sinais são refletidos pelo solo, prédios ou árvores. Os sinais refletidos e difratados são sempre atrasados em relação aos sinais diretos e têm uma amplitude menor. Os sinais de satélites cujo ângulo de elevação seja baixo estão sujeitos a uma maior interferência por multicaminhamento, conforme ilustrado na figura 8 (GROVES, 2008).

Os efeitos do multicaminhamento na fase da onda portadora para posicionamento relativo com base curta, em geral, não são superiores a 1 cm. Em levantamentos estáticos com longos tempos de observação, períodos intermitentes de exposição a multicaminhamento não são um problema. Entretanto, para os casos cuja a ocupação é realizada de forma mais rápida, esses efeitos tornam-se mais prejudiciais (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER e WASLE, 2008).

Uma opção para reduzir os efeitos do multicaminhamento é a utilização de antenas conhecidas como *Choke Ring*. Trata-se de uma peça de metal que possui vários arcos concêntricos, os quais atenuam os sinais refletidos (EL-RABBANY, 2002).

Figura 8 – Esquema de propagação dos sinais com e sem multicaminhamento

Fonte: Adaptado de Grooves (2008)

2.2.2.2. Perdas de ciclo

Quando um receptor é ligado a parte fracional da fase, isto é, a diferença entre a portadora transmitida no satélite e a sua réplica gerada no receptor, é medida e um contador de ciclos inteiros é iniciado. Ao longo do rastreo este contador é incrementado com um ciclo sempre que a fase muda de 2π para 0. Assim, em uma determinada época, a fase observada é igual à soma da parte fracionada com a contagem do número inteiro. Essa ambiguidade de fase permanece constante, desde que não ocorram perdas por bloqueio do sinal. Quando isso ocorre o contador inteiro é reinicializado, o que provoca um salto na fase acumulada por um número inteiro de ciclos (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER e WASLE, 2008).

Em ambientes com amplo campo de visada as medidas de fase são, em geral, contínuas durante todo o período de uma seção de observação. Entretanto, esta condição não é sempre atendida, como no caso de levantamentos em áreas urbanas, por exemplo, onde pode ocorrer obstrução do sinal de um ou mais satélites rastreados, impedindo que o sinal do mesmo chegue até a antena do receptor. Assim, ocorrerá a perda de sinal e, conseqüentemente, uma perda na contagem do número inteiro de ciclos medidos no receptor. Tal evento é denominado perda de ciclos. A aceleração da antena, variações bruscas na atmosfera, interferências de outras fontes de rádio e problemas com o receptor e software também podem ocasionar perdas de ciclos (MONICO, 2008).

As perdas de ciclos podem ocorrer brevemente ou podem permanecer por vários minutos. Podem ser tão pequenos quanto um ciclo ou tão grande como milhões. Podem afetar um ou mais sinais de satélite. As perdas de ciclo devem ser identificadas e corrigidas para evitar grandes erros nas coordenadas calculadas. Isso pode ser feito usando vários métodos. A chamada tripla diferença é o mais popular deles (EL-RABBANY, 2002). A figura 9 traz uma representação esquemática da perda de ciclos.

A detecção e correção das perdas de ciclo estão associadas com o problema de solução das ambiguidades (seção 2.4.1).

Figura 9 – Esquema de representação da perda de ciclos

Fonte: Adaptado de Seeber (2003)

2.2.3. Diluição da Precisão

A geometria dos satélites visíveis é um fator importante para a obtenção de resultados com boa qualidade, especialmente no posicionamento cinemático. A visibilidade é caracterizada pela desobstrução da linha de visada entre o receptor e o satélite. Tal geometria muda com o tempo devido ao movimento do usuário e dos satélites. A medida instantânea dessa geometria é conhecida como o fator de diluição da precisão, do inglês, *Dilution of Precision* (DOP) (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER e WASLE, 2008).

Os fatores de DOP são funções simples dos elementos diagonais de uma matriz de covariância dos parâmetros ajustados, derivados do modelo linearizado (LEICK; RAPOPORT e TATARNIKOV, 2015). Trata-se de uma matriz 4x4, onde três componentes são constituídas pelas coordenadas cartesianas do local (X, Y e Z) e uma componente do relógio do receptor, resultando na matriz Q_X abaixo (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER e WASLE, 2008):

$$Q_X = \begin{bmatrix} q_{XX} & q_{XY} & q_{XZ} & q_{Xt} \\ q_{XY} & q_{YY} & q_{YZ} & q_{Yt} \\ q_{XZ} & q_{YZ} & q_{ZZ} & q_{Zt} \\ q_{Xt} & q_{Yt} & q_{Zt} & q_{tt} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Os elementos diagonais são usados para as seguintes definições de DOP:

- *Geometric Dilution of Precision* (GDOP)

$$GDOP = \sqrt{q_{XX} + q_{YY} + q_{ZZ} + q_{tt}} \quad (2.7)$$

- *Positional Dilution of Precision* (PDOP)

$$PDOP = \sqrt{q_{XX} + q_{YY} + q_{ZZ}} \quad (2.8)$$

- *Time Dilution of Precision* (TDOP)

$$TDOP = \sqrt{q_{tt}} \quad (2.9)$$

Os valores de DOP nas equações 2.7 a 2.9 são expressos no sistema cartesiano. Quando adota-se um sistema de coordenadas local topocêntrico, com eixos norte e leste e altura, a matriz cofatora global Q_X pode ser transformada em uma matriz cofatora local Q_x pela lei de propagação de covariância. Denotando,

agora, como Q_X a parte da matriz cofatora que contém os componentes geométricos (desconsiderando os componentes relacionados ao tempo), a transformação fica com a seguinte estrutura:

$$Q_X = RQ_XR^T = \begin{bmatrix} q_{nn} & q_{ne} & q_{nu} \\ q_{ne} & q_{ee} & q_{eu} \\ q_{nu} & q_{eu} & q_{uu} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

onde, a matriz rotação $R^T = |n \ e \ u|$ contém os eixos do sistema de coordenadas locais. Devido à invariância do traço da matriz com respeito à rotação, o valor do PDOP no sistema local é idêntico ao valor do sistema global. Em adição ao PDOP duas definições são dadas, sendo a primeira referente à posição horizontal e a segunda correspondente ao valor da componente vertical:

- *Horizontal Dilution of Precision (HDOP)*

$$HDOP = \sqrt{q_{nn} + q_{ee}} \quad (2.11)$$

- *Vertical Dilution of Precision (VDOP)*

$$VDOP = \sqrt{q_{uu}} \quad (2.12)$$

Seeber (2003) mostra que a relação entre o desvio padrão da observação (σ_r) e o desvio padrão associado ao posicionamento (σ^*) é dada pelo valor escalar do DOP, cuja equação é:

$$\sigma^* = DOP \cdot \sigma_r \quad (2.13)$$

Dessa forma, a razão de DOP é dada pelas expressões abaixo:

$$\sigma_H = HDOP \cdot \sigma_r \quad (2.14)$$

$$\sigma_V = VDOP \cdot \sigma_r \quad (2.15)$$

$$\sigma_P = PDOP \cdot \sigma_r \quad (2.16)$$

$$\sigma_T = TDOP \cdot \sigma_r \quad (2.17)$$

A combinação entre as expressões de posição e tempo resulta na componente GDOP:

$$GDOP = \sqrt{(PDOP)^2 + (TDOP)^2} \quad (2.18)$$

O PDOP pode, também, ser interpretado como o inverso do volume (V) de um tetraedro formado pelas posições do usuário e quatro satélites:

$$PDOP = \frac{1}{V} \quad (2.19)$$

A figura 10 traz uma comparação entre um arranjo de satélites que ocasiona um bom PDOP, e um mal arranjo, resultando em um valor de PDOP ruim, ilustrando a equação 2.19.

Figura 10 – Comparação entre situações de PDOP bom e PDOP ruim

Fonte: Adaptado de Seeber (2003)

Em resumo, pode-se dizer que quanto menor for o valor dos diferentes tipos de DOP, melhor a configuração dos satélites para realizar o posicionamento (MONICO, 2008).

2.3. Métodos de posicionamento GNSS

Diversos métodos de posicionamento foram desenvolvidos com o intuito de explorar a capacidade que o GPS tem de prover coordenadas precisas sobre a superfície terrestre, ou próximo dela. Este tem sido o grande intuito dos pesquisadores desde o surgimento do GPS (SEEBER, 2003).

A definição da técnica a ser adotada no posicionamento com receptores GNSS depende de alguns fatores, como por exemplo o tipo de observável utilizada,

consequentemente o tipo de receptor, qual o referencial adotado, o tipo de efeméride (transmitidas ou precisas), o número de receptores envolvidos, o tempo de coleta e o instante do processamento.

A figura 11 apresenta um quadro esquemático dos métodos de posicionamento, conforme descrito por Langley (1998). As seções seguintes ilustram cada um desses métodos.

Figura 11 – Quadro esquemático dos métodos de posicionamento

Fonte: Adaptado de Langley (1998)

Quanto aos tipos de receptores GPS empregados nos diferentes modos de posicionamento, Dammalage e Samarakoon (2010) classificam em 3 categorias:

- Alta precisão: Código (C/A), fase (L1/L2), dupla frequência e precisão menor que 1 cm. Custo elevado;
- Média precisão: Código (C/A), fase (L1), simples frequência e precisão de 1 a 10 m. Custo médio;
- Baixa precisão: Código (C/A), precisão horizontal de 5 a 15 m. Custo baixo.

2.3.1. Posicionamento absoluto

Quando as coordenadas de um ponto estão associadas diretamente ao geocentro classifica-se o posicionamento como absoluto (figura 12). Neste caso têm-

se a utilização de um único receptor rastreando e calculando as posições com base na observação de 4 ou mais satélites através das observações de código (IBGE, 2008).

Tal posicionamento é muito utilizado na navegação de baixa precisão, como por exemplo em celulares com aplicativos de posicionamento ou receptores GPS utilizados em atividades esportivas.

Figura 12 – Esquema do posicionamento absoluto

Fonte: IBGE (2008)

2.3.1.1. Posicionamento por Ponto Preciso (PPP)

O Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) é caracterizado pelo uso de efemérides precisas, correções dos relógios dos satélites e parâmetros de orientação da Terra, combinadas com as observáveis fase da onda portadora e/ou pseudodistância, coletadas por receptores de simples (L1) ou dupla frequência (L1/L2). Tais efemérides são disponibilizadas por órgãos como o IGS (*International GNSS Service*) e podem ser classificadas de acordo com o período de disponibilização nas seguintes categorias (MONICO, 2008):

- Final: Disponíveis com 12 dias de latência;
- Rápidas: Disponível com cerca de 17 horas de latência; e
- Ultra-rápidas: Liberadas quatro vezes por dia (03:00, 09:00, 15:00, e 21:00, UTC) e contém 48 horas de dados, sendo a primeira metade

calculada a partir de observações e a segunda metade prevista. Os arquivos são nomeados de acordo com o tempo médio no arquivo: 00, 06, 12 e 18 UTC.

Atualmente existem alguns serviços *on-line* que realizam o processamento desses dados no PPP, destacando-se o disponibilizado pelo IBGE (<http://www.ppp.ibge.gov.br/ppp.htm> – Acesso em 6 de janeiro de 2018). O tipo de efeméride e demais produtos a serem utilizados leva em conta a data do levantamento, considerando no processamento sempre o melhor produto disponível. A figura 13 ilustra o esquema do funcionamento do serviço.

Figura 13 – Esquema de funcionamento do serviço PPP do IBGE

Fonte: IBGE (2018)

A partir de outubro de 2013, como melhoria do serviço já oferecido, o IBGE passou a disponibilizar através do seu servidor *Caster Ntrip* um novo serviço chamado Posicionamento por Ponto Preciso em tempo real, ou simplesmente PPP em tempo real. Foi desenvolvida uma forma de acesso às órbitas e erros dos relógios, através de correções inseridas nas mensagens transmitidas em tempo real. Assim, para a realização do PPP em tempo real o usuário deve dispor de um receptor que envie os dados para um computador, através do formato *Radio Technical Commission for Maritime Services* (RTCM) 3.0, e ter acesso aos fluxos de correção, à órbita e ao relógio disponibilizados através do servidor *Caster* do IBGE. Os fluxos de correção são usados para realizar o processamento juntamente com o

fluxo de dados GNSS que está sendo recebido num aplicativo que é executado no computador do usuário. Maiores informações podem ser obtidas na página do serviço

(https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc/ppp_tempo_real.shtm – Acesso em 6 de janeiro de 2018).

2.3.2. Posicionamento relativo

No posicionamento relativo, as coordenadas são determinadas em relação a um referencial materializado através de uma ou mais estações com coordenadas conhecidas. Neste caso, é necessário que pelo menos dois receptores coletem dados de, no mínimo, dois satélites simultaneamente, onde um dos receptores deve ocupar a estação com coordenadas conhecidas, denominada de estação de referência ou estação base (IBGE, 2008). A figura 14 apresenta a configuração de um posicionamento relativo.

Figura 14 – Esquema do posicionamento relativo

Fonte: IBGE (2008)

Em todas as técnicas descritas, a seguir, podem ser utilizados tanto receptores de simples frequência (L1) como receptores de dupla frequência (L1/L2). Entretanto, sabe-se que a ausência da L2 impõe certas condições, como maior tempo de ocupação e linhas de base mais curtas. Isso se deve ao fato da acurácia da fase da onda portadora ser superior à da pseudodistância. Afim de se obter

melhores resultados de precisão no posicionamento, realiza-se a correção dos seguintes erros: efemérides, relógios dos satélites e parâmetros de orientação, a qual pode ser realizada em um procedimento posterior à coleta dos dados ou simultaneamente.

2.3.2.1. Posicionamento relativo estático

No posicionamento relativo estático tanto o receptor da estação de referência quanto o receptor sobre o ponto cujas coordenadas se pretende determinar permanecem estacionados durante todo o período do levantamento. A duração do levantamento pode durar de 20 minutos a várias horas. Trata-se da técnica mais utilizada em levantamentos geodésicos de alta precisão (IBGE, 2008).

2.3.2.2. Posicionamento relativo estático rápido

Ao realizar-se o posicionamento relativo estático rápido segue-se o mesmo princípio de posicionamento relativo estático, diferindo apenas no tempo de ocupação que, geralmente, é menor que 20 minutos. É adequado para linhas de base curtas, de até 10 km. Utiliza-se este método quando se pretende alta produtividade ou quando há muitas obstruções entre as estações a serem levantadas. Não há necessidade de continuar rastreando durante o deslocamento entre as estações, podendo o receptor ser desligado entre elas (IBGE, 2008).

2.3.2.3. Posicionamento relativo semicinemático (*stop-and-go*)

Também conhecido como *stop-and-go*, o posicionamento relativo semicinemático é similar ao estático-rápido, diferindo no tempo de permanência em cada estação (geralmente de alguns segundos) e na necessidade do receptor permanecer ligado, e sem a ocorrência de perdas de ciclos, durante todo o período do levantamento (IBGE, 2008).

2.3.2.4. Posicionamento relativo cinemático

No posicionamento relativo cinemático, enquanto um receptor está estacionado no vértice de referência, o receptor que coleta dados dos vértices de interesse permanece em movimento. A cada instante de observação, que coincide com o intervalo de gravação, é determinado um conjunto de coordenadas, sendo a trajetória descrita por uma série de pontos (IBGE, 2008).

2.3.2.5. Posicionamento diferencial GPS (DGPS)

A técnica de posicionamento diferencial GPS, do inglês *Differential Global Positioning System* (DGPS), baseia-se na medição da pseudodistância entre o satélite e a antena receptora e na transmissão das correções diferenciais da estação base para o receptor remoto, em tempo real. Esta técnica permite alcançar precisões submétricas para linhas de base que podem alcançar 200 km de raio em relação à estação base. O princípio baseia-se na medição contínua das pseudodistâncias entre a estação base e cada satélite rastreado, o que permite calcular as correções instantâneas para cada satélite. Essas correções permitem compensar, em grande parte, a influência dos erros das órbitas dos satélites e da atmosfera. Combinadas com outras informações disponibilizadas pelos satélites, essas correções formam um arquivo de mensagens denominado RTCM, que são transmitidas pela estação base e que permitem determinar a posição, em tempo real, das antenas remotas que as recebam (EL-RABBANY, 2002).

2.4. Técnica *Real Time Kinematic* (RTK)

A precisão obtida em um levantamento relativo depende, dentre outros fatores, da distância entre o ponto determinado como referência e os demais, cujas posições são registradas. Essa precisão pode ser de milímetros, no caso de distâncias muito curtas, para até dezenas de centímetros, no caso de distâncias de centenas de quilômetros ou mais. Em muitos casos, não existe a necessidade de as coordenadas desses pontos serem determinadas em tempo real, o que tornou o pós-processamento de dados bastante comum, gerando informações de coordenadas com boa precisão após a coleta em campo. No entanto, alguns levantamentos requerem posicionamento preciso e em tempo real, como é o caso de topógrafos ou engenheiros que estabelecem pontos para uma construção civil, a qual necessita ser

corretamente implantada em um determinado local. Com intuito de solucionar este problema é que a técnica RTK foi desenvolvida (LANGLEY, 1998).

Segundo Seeber (2003) a técnica de posicionamento RTK é baseada nas seguintes características:

- Transmissão em tempo real dos dados de fase da onda portadora e pseudodistância da estação base para estação móvel ou das correções das observáveis;
- Resolução das ambiguidades para linha de base entre a estação base e o móvel com solução quase instantânea;
- Determinação confiável do vetor da linha de base em tempo real. No entanto, no posicionamento RTK, os erros envolvidos no processo (ionosfera, troposfera e órbita dos satélites), são proporcionais ao comprimento da linha de base, o que restringe a distância entre a estação de referência e o usuário a poucos quilômetros.

Em uma configuração típica RTK, o receptor GPS de referência, popularmente conhecido como base, e cuja posição é geralmente fixa, transmite dados de pseudodistância e fase através de um *link* de rádio para o receptor móvel, também conhecido como *rover*. Os receptores GPS envolvidos nesta técnica podem ser de simples ou dupla frequência, porém o uso de receptores de dupla frequência facilita a solução das ambiguidades, fazendo com que esta ocorra de forma mais rápida e confiável. Quanto às aplicações dessa técnica, pode-se citar as seguintes áreas (SEEBER, 2003):

- Levantamentos planialtimétricos;
- Sistema de informações Geográficas (SIG);
- Locação de obras;
- Controle de máquinas; e
- Agricultura de Precisão.

Para a determinação precisa do vetor entre a base e o *rover* é necessário um software com capacidade de realizar processamentos em tempo real. Tal processamento pode utilizar o conceito de eliminação de parâmetros (simples ou dupla diferença) ou estimação dos parâmetros (observáveis indiferenciadas). Grande parte dos algoritmos RTK são soluções próprias e têm um impacto fundamental no desempenho do receptor.

2.4.1. Modelo matemático

Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Wasle (2008) apresentam que o posicionamento diferencial é uma técnica que envolve dois ou mais receptores, no qual um deles assume a função de estação de referência (base) com coordenadas conhecidas e os demais, conhecidos com *rover*, fixos ou em movimento, tem suas coordenadas determinadas em relação à base e em tempo real. A estação de referência calcula as correções para pseudodistância e as taxas dessas correções, as quais são transmitidas em tempo real para os receptores móveis. Estes, por sua vez, aplicam essas correções ao posicionamento do ponto, o que melhora consideravelmente a precisão obtida. A figura 15 ilustra o que foi descrito. Tal situação é semelhante à figura 14, porém com a presença de correções sendo transmitidas em tempo real.

Figura 15 – Conceito básico de posicionamento diferencial

Fonte: Adaptado de Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Wasle (2008)

Dessa forma, o intervalo da pseudodistância na base A para o satélite s rastreado na época t_0 pode ser modelado por:

$$R_A^s(t_0) = \rho_A^s(t_0) + \Delta \rho_A^s(t_0) + \Delta \rho^s(t_0) + \Delta \rho_A(t_0) \quad (2.20)$$

onde:

- $\varrho_A^s(t_0)$ é a distância geométrica;
- $\Delta\varrho_A^s(t_0)$ representa a tendência da posição na base e no satélites (Ex: Erro de órbita, efeito de refração);
- $\Delta\varrho^s(t_0)$ representa a tendência puramente dependente do satélite (Ex: efeito do erro do relógio satélite); e
- $\Delta\varrho_A(t_0)$ a tendência puramente dependente do receptor (efeito do erro do relógio do receptor, multicaminhamento).

A correção da pseudodistância (*Pseudorange Correction – PRC*) para o satélite s na base para a época t_0 é definido pela relação:

$$\begin{aligned} PRC^s(t_0) &= \varrho_A^s(t_0) - R_A^s(t_0) \\ &= -\Delta\varrho_A^s(t_0) - \Delta\varrho^s(t_0) - \Delta\varrho_A(t_0) \end{aligned} \quad (2.21)$$

e pode ser calculado através da distância geométrica $\varrho_A^s(t_0)$ obtida a partir da posição conhecida da estação de referência, das efemérides transmitidas e do valor observado $R_A^s(t_0)$. Como complemento, a correção da pseudodistância $PRC^s(t_0)$, o tempo derivado ou taxa de correção $RRC^s(t_0)$ é obtido para a estação base.

O intervalo e a taxa de correção do intervalo referentes à época de referência t_0 são transmitidos para o rover B em tempo real. Em B a correção da pseudodistância prevista para a observação na época t usa a relação:

$$PRC^s(t) = PRC^s(t_0) + RRC^s(t_0)(t - t_0) \quad (2.22)$$

onde $(t - t_0)$ é definido como a latência. A precisão possível de ser obtida é maior para variações menores de pseudodistâncias e menores latências.

Adaptando a equação 2.20 para o rover B e época t , a pseudodistância do código medido no rover pode ser modelado por:

$$R_B^s(t) = \varrho_B^s(t) + \Delta\varrho_B^s(t) + \Delta\varrho^s(t) + \Delta\varrho_B(t). \quad (2.23)$$

Aplicando a $PRC^s(t)$, conforme equação 2.22, para a pseudodistância medida $R_B^s(t)$ produz-se:

$$R_B^s(t)_{corr} = R_B^s(t) + PRC^s(t) \quad (2.24)$$

ou, substituindo a equação 2.23 e a correção da pseudodistância de acordo com a equação 2.21 e 2.22, respectivamente:

$$R_B^s(t)_{corr} = \varrho_B^s(t) + [\Delta\varrho_B^s(t) - \Delta\varrho_A^s(t)] + [\Delta\varrho_B(t) - \Delta\varrho_A(t)] \quad (2.25)$$

onde a tendência dependente do satélite foi cancelada. Para distâncias moderadas entre a base e o rover, a tendência específica satélite-receptor é altamente correlacionada. Assim, a influência dos erros de órbitas radiais e de refração são significativamente reduzidos. Retirando essas tendências, a equação 2.25 assume a seguinte forma:

$$R_B^s(t)_{corr} = \varrho_B^s(t) + \Delta\varrho_{AB}(t) \quad (2.26)$$

onde $\Delta\varrho_{AB}(t) = \Delta\varrho_B(t) - \Delta\varrho_A(t)$.

Agora, para o caso da fase, o intervalo medido entre a estação de referência A na época t_0 pode ser modelada por:

$$\lambda^s\Phi_A^s(t_0) = \varrho_A^s(t_0) + \Delta\varrho_A^s(t_0) + \Delta\varrho^s(t_0) + \Delta\varrho_A(t_0) + \lambda^sN_A^s \quad (2.27)$$

onde, por analogia ao modelo anterior, além dos itens descritos na equação 2.20, aparece a ambiguidade da fase N_A^s . Consequentemente, o intervalo de fase na época de referência t_0 é dado por

$$\begin{aligned} PRC^s(t_0) &= \varrho_A^s(t_0) - R_A^s(t_0) \\ &= -\Delta\varrho_A^s(t_0) - \Delta\varrho^s(t_0) - \Delta\varrho_A(t_0) - \lambda^sN_A^s. \end{aligned} \quad (2.28)$$

A formulação para a taxa de correção do intervalo na estação base A , bem como as aplicações de correções do intervalo para a fase do rover no ponto B são totalmente análogas ao procedimento descrito no código. Dessa forma:

$$\lambda^s\Phi_B^s(t)_{corr} = \varrho_B^s(t) + \Delta\varrho_{AB}(t) + \lambda^sN_{AB}^s. \quad (2.29)$$

2.4.2. Solução das ambiguidades

A solução das ambiguidades é a essência para o posicionamento preciso na técnica RTK, tendo como fator decisivo para o sucesso o número de satélites rastreados, a geometria satélite-receptor, o uso de dados de pseudodistância como acréscimo à fase, o ruído de observação e o uso de observações de dupla frequência. Sob boas condições o tempo de fixação pode ser menor que um minuto,

podendo chegar a menos que 10 segundos (LANGLEY, 1998; SOUZA, GARNÉS e MARQUES, 2014).

O vetor de ambiguidades presente nas equações de observação da fase da onda portadora, para o caso das Duplas Diferenças (DD's) é, teoricamente, composto por números inteiros. Entretanto, ele se apresenta como um vetor de números reais, associado a uma Matriz de Variância e Covariância (MVC), denominada solução flutuante (*float*). Trata-se de uma solução das ambiguidades com um vetor composto por números reais. Sua estimativa como um vetor de números inteiros, em geral denominada solução fixa (*fixed*), constitui um dos problemas mais pesquisados no posicionamento com receptores GNSS. Esse processo é denominado solução das ambiguidades (MONICO, 2008). Um fator chave para o posicionamento RTK é a capacidade do receptor móvel resolver tais ambiguidades enquanto a antena está em movimento. Essa característica é conhecida como *On The Fly* (OTF) (SEEBER, 2003).

Segundo Teunissen (1996), a solução das ambiguidades GNSS pode ser realizada em duas etapas:

1. A estimação do problema da ambiguidade, e
2. A validação do problema da ambiguidade.

Na primeira, procura-se estimar as ambiguidades inteiras utilizando o método de mínimos quadrados. Na segunda, verifica-se se um determinado candidato possui alta probabilidade de ser a solução.

Nas equações de observação linearizadas para o sistema GPS tem-se o seguinte (TEUNISSEN, 2003):

$$y = Aa + Bb + e \quad (2.30)$$

onde:

- y é o vetor das observações;
- a é o vetor desconhecido das duplas diferenças (DD's) da fase;
- b é o vetor desconhecido dos três componentes da linha de base;
- e é o vetor dos resíduos; e
- A e B correspondem às matrizes para ambiguidades e componentes da linha de base.

As entradas do vetor a são expressos em números de ciclos, ao invés de intervalos. Eles são conhecidos como inteiros, ou seja, $a \in \mathbb{Z}^n$. As entradas do vetor b consistirão no restante dos parâmetros conhecidos, como, por exemplo,

coordenadas e possivelmente parâmetros de atraso atmosférico (troposfera e ionosfera). Eles são conhecidos como valores reais, onde $b \in R^p$.

O procedimento que geralmente é seguido para solucionar o modelo da equação 2.27 pode ser dividido em três passos. No primeiro, simplesmente ignora-se as restrições inteiras $a \in Z^n$ nas ambiguidades e realiza-se um ajustamento padrão pelos mínimos quadrados. Como resultado, obtêm-se valores estimados para a e b , junto com a variância e covariância da matriz:

$$\begin{bmatrix} \hat{a} \\ \hat{b} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} Q_{\hat{a}} & Q_{\hat{a}\hat{b}} \\ Q_{\hat{b}\hat{a}} & Q_{\hat{b}} \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

Esta solução se refere à condição *float*. No segundo passo, a ambiguidade *float* $\hat{a}$ estimada é usada para calcular a ambiguidade inteira correspondente $\check{a}$. Isso implica que um mapeamento $S : R^n \rightarrow Z^n$, que parte de dimensão n no espaço dos reais para uma dimensão n no espaço dos inteiros, é introduzido tal que:

$$\check{a} = S(\hat{a}) \quad (2.32)$$

Uma vez que as ambiguidades inteiras são calculadas, elas são usadas no terceiro passo para, finalmente, corrigir a estimação *float* de b . Como resultado se obtém uma solução *fixed*, através de:

$$\check{b} = \hat{b} - Q_{\hat{b}\hat{a}} Q_{\hat{a}}^{-1} (\hat{a} - \check{a}). \quad (2.33)$$

2.4.3. Link de dados

A transmissão de dados RTK requer uma capacidade maior do que a transmissão de correções para pseudodistância, apenas. Para um conjunto de correções de fase de 12 satélites no formato RTCM 2.1 são necessários mais de 4800 *Bits Per Second* (bps). *Links* de dados em *Very High Frequency* (VHF) e *Ultra High Frequency* (UHF) são comumente usados na transmissão dessas correções. Porém, dependendo das leis de determinado país, essas frequências são pré-definidas e regulamentadas. Como consequência, o intervalo entre base e móvel fica reduzido a alguns quilômetros (SEEBER, 2003).

Langley (1998) mostra que o uso de *links* de dados VHF ou UHF é limitado, em grande parte, pela linha de visada com uma distância máxima d , em quilômetros, que é dada pela equação 2.34:

$$d = 3.57 \sqrt{k} (\sqrt{h_t} + \sqrt{h_r}) \quad (2.34)$$

onde h_t e h_r são as alturas, em metros, de das antenas de transmissão e recepção acima de um plano médio entre os pontos. O termo k é o fator que depende da curvatura da Terra e da refração atmosférica, cujo valor para climas moderados é de 1.33 (normalmente variando de 1.2 a 1.6, dependendo das condições climáticas). Para se ter uma ideia, para uma antena que transmite 30 metros acima do plano médio do solo e, cujo sinal é recebido por uma antena a 2 metros, a distância máxima de propagação será de 28 quilômetros.

A figura 16 ilustra um levantamento RTK via UHF, na qual o receptor base utiliza um rádio externo para a transmissão das correções ao receptor móvel.

Figura 16 – Esquema do posicionamento RTK com uso de rádio UHF

Fonte: Agrimensor do Futuro (2018)

O *link* de comunicação entre a estação de referência e o receptor móvel, desempenha um papel fundamental para o sucesso do levantamento RTK, pois as correções da estação de referência têm que chegar ao receptor móvel em tempo real. Um fator que limita a área de abrangência para a realização do RTK é o alcance da transmissão das ondas de rádio pois, se existirem obstáculos entre a referência e o receptor móvel, a precisão esperada não será alcançada, conforme ilustra a figura 17. Além disso, devido ao fato da separação entre dois canais de

rádio ser estreita, o sinal pode receber a interferência de outros usuários trabalhando na mesma banda de frequência, reduzindo a qualidade do levantamento (COSTA, *et al.*, 2008).

Figura 17 – Propagação das ondas de rádio com obstrução

Fonte: Adaptado de VE6XL (2018)

Uma das alternativas para contornar este problema é trocar o *link* de rádio pela comunicação via *modem Global System of Mobile* (GSM). Entretanto, a disponibilidade dos serviços de telefonia celular na área de trabalho torna-se um requisito básico (COSTA *et al.*, 2008; CHEN, LI e WEBER, 2004).

Lenz (2004) mostra que as diferentes técnicas para receber correções no posicionamento RTK através da *internet* são divididas em:

- GSM: é uma rede celular digital pública que usa técnicas para multiplexar e usar a faixa de transmissão em torno de 900 MHz. Uma rede GSM pode fornecer, além de serviços de telefonia, a transferência de pacotes de dados;
- *General Packet Radio Service* (GPRS): é um sistema global para comunicação móvel que aumenta a velocidade do canal de 9.600 bps (em GSM) a 14.400 bps. Um sistema GPRS também possui a capacidade de comprimir dados. Com GPRS as transmissões de dados podem ser mais rápidas (115.000 bps) e ainda continuar usando a estrutura GSM existente;

- *Enhanced Data rates for Global Evolution* (EDGE): possui um esquema de modulação chamado de *8 Phase Shift Keying modulation* (8PSK) que habilita cada impulso a transportar 3 bits de informação em comparação com o GPRS, que tem 1 bit por taxa de pulso. No geral, isso permite que o EDGE aumente a taxa de dados dos sistemas GSM existentes por três (384 Kbps);
- *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS): muitas vezes é referido como a terceira geração do sistema de comunicação móvel. O espectro para UMTS varia entre 1900 MHz e 2025 MHz, e de 2110 MHz a 2200 MHz. Permite transmissões multimídia com transferência simultânea de fala, imagens e dados com uma taxa de transmissão de 2 Mbps. Entretanto, Transmissão de fala e aplicações de baixa taxa de dados continuam a ser realizados por GSM.

Ao fazer uso de redes celulares móveis, a utilização de um chip, cuja nomenclatura original é *Subscriber Identity Module* (SIM card). Trata-se de um microchip que funciona como uma base de dados. Basicamente, entre esses dados estão o número telefônico, as chaves de segurança do SIM card e os dados da operadora. Essas informações são verificadas todas as vezes que o assinante se registra em uma rede ou faz uma ligação (PIVARO, 2008).

2.4.4. Mensagens RTCM

Para permitir o intercâmbio de dados os receptores GNSS fabricados são construídos para obterem informações segundo protocolos definidos. Dentre eles podemos citar o *National Marine Electronics Association* (NMEA-0183), usado para aplicação de navegação, e o *Radio Technical Commission for Maritime Services* (RTCM), que é um padrão internacional para a transmissão de dados em tempo real em aplicações RTK (OCALAN e TUNALIOGLU, 2010).

O padrão estabelecido pelo comitê especial, do inglês *Special Committee* (SC-104) do RTCM, é hoje internacionalmente aceito e suportado em todos os receptores GNSS. A versão inicial RTCM 1.0 de 1985 foi substituída em 1990 pela RTCM 2.0. Toda informação necessária pode ser transmitida em um intervalo de banda de 1200 bps ou menos. Esse formato fornecia pseudosistância e intervalos de correção suficientes para posicionamento DGPS. A versão RTCM 2.1, de janeiro de

1994, incluiu dados de fase e ofereceu a possibilidade de resolver as ambiguidades no receptor móvel. Essa versão era o padrão exigido para posicionamento DGPS e RTK. Na sequência, a versão RTCM 2.2 de janeiro de 1998, incluiu mais informações, em particular a opção de transmitir correções de dados de outros sistemas GNSS, como por exemplo o GLONASS. A versão 2.3, de maio de 2001, foi adiante, incluindo, por exemplo, informações de variação do centro de fase da antena. A versão RTCM 3.1 apresenta mensagens e técnicas para RTK em rede com as constelações GPS e GLONASS (SEEBER, 2003). A tabela 2 apresenta uma descrição dos tipos de mensagem presentes nesta versão.

Tabela 2 – Características das mensagens RTCM 3.1

Nome do grupo	Nome do sub-grupo	Tipo de mensagem
Observações	GPS L1	1001
		1002
	GPS L1/L2	1003
		1004
	GLONASS L1	1009
		1010
	GLONASS L1/L2	1011
		1012
Coordenadas da Estação		1005
		1006
Descrição da Antena		1007
		1008
Rede de Correções RTK	Mensagem de dados das estações auxiliares da rede	1014
	Diferenças de correção da ionosfera	1015
	Diferenças de correção da geomentria	1016
	Combinação das diferenças de correção da geometria e da ionosfera	1017
Informações Operacionais auxiliares	Parâmetros do sistema	1013
	Dados de efemérides de satélites	1019
		1020
	Código de texto	1029
Informação do proprietário		Atualmente atribuído aos números de mensagem 4088-4095

Fonte: Adaptado de RTCM (2006)

2.4.5. Protocolo Ntrip

O *Bundesamt für Kartographie und Geodäsie* (BKG), em cooperação com a Universidade de Dortmund da Alemanha, desenvolveu uma técnica para transmissão de dados GNSS para os usuários móveis. Esta técnica permite que

através do protocolo Ntrip usuários recebam correções RTCM para utilização no posicionamento preciso (CHEN, LI e WEBER, 2004; LENZ, 2004).

O Ntrip é um protocolo de transmissão baseado em *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP), onde os objetos são convertidos em mensagens adequadas para fluxos de dados. Ele foi projetado para a transmissão de correções diferenciais ou outros tipos de dados GNSS para usuários fixos ou móveis, permitindo conexões simultâneas através de *Personal Computers* (PC's), notebooks, *Personal Digital Assistants* (PDA's) ou receptores GNSS. Ele suporta o acesso sem fio através de redes IP móveis como GSM, GPRS, EDGE ou UMTS (WEBER, DETTMERING e GEBHARD, 2005).

As características principais do Ntrip são (CHEN, LI e WEBER, 2004):

- Baseado no popular padrão de distribuição de dados HTTP: Relativamente fácil de implementar ao ter um número limitado de clientes;
- Aplicação não se limitando a um tipo específico de conteúdo para transmissão: Capacidade de distribuir qualquer tipo de dado GNSS;
- Adequado para suportar o uso em massa: Divulgação de centenas de mensagens simultâneas para até mil usuários quando se usa um software de transmissão;
- Consideravelmente seguro: Provedores de informações e os usuários não necessariamente entram em contato, ou seja, não há risco de um usuário invadir o sistema e comprometer o funcionamento do serviço. Além disso, a transmissão de dados via HTTP não sofre bloqueio por firewalls ou servidores de *proxy* que protegem as redes de uma área local;
- Permite a transmissão através de qualquer linha fixa ou rede *Internet Protocol* (IP) móvel, devido ao uso de conexão *Transfer Control Protocol* / *Internet Protocol* (TCP/IP).

São três os componentes que fazem parte da implementação do protocolo Ntrip, sendo eles (COSTA *et al.*, 2008):

- Ntrip Server: Cria um canal de transferência de dados entre o receptor GNSS instalado em uma estação de referência e o Ntrip Caster;
- Ntrip Caster: É o distribuidor dos dados RTCM pela *internet* aos usuários. Tem funcionalidade similar à das estações de rádio na

internet, onde existe um programa musical e milhares de ouvintes que podem se sintonizar. Neste *Caster* convergem várias estações de referência e cada uma delas tem um nome identificador denominado de *mountpoint*. No *Caster* existe uma tabela (*sourcetable*) com todos os *mountpoints* que chegam nele e as suas respectivas configurações e informações. A responsabilidade do *Caster*, além da distribuição das correções GNSS, é verificar a qualidade e integridade dos dados recebidos e a autenticação dos usuários, através de um *login* e senha de acesso;

- *Ntrip Client*: É um aplicativo que se instala em um computador, coletor de dados ou celular, que esteja conectado a um receptor móvel para que este possa ter acesso às correções transmitidas pelo *Caster*. O acesso às correções é realizado selecionando no *Ntrip Client* um dos *mountpoints* que estão na tabela do *Ntrip Caster*.

A figura 18 apresenta esses componentes, ilustrando também o sentido do fluxo das trocas de informações.

Figura 18 – Esquema dos componentes do Ntrip

Fonte: Adaptado de CHEN (2004)

De acordo com Costa *et al.* (2008) as vantagens do uso do Ntrip nos levantamentos RTK e DGPS são:

- Os receptores não necessitam de licenças especiais para trabalhar com Ntrip, somente a necessidade de haver *internet* na região em que o levantamento é executado;
- Um *modem* GSM/GPRS ou 3G é mais econômico que um rádio UHF, comparando-se o Ntrip via telefone celular, com um sistema clássico RTK por UHF;
- Não é necessário manter um receptor GNSS na base com um operador durante todo o dia;
- Não é necessário buscar locais altos para instalar a base e o transmissor para um maior alcance das correções;
- O alcance da *internet* é maior que do rádio;
- O rádio não funciona com obstruções, a *internet* independe de obstruções entre o receptor móvel e a base;
- A jornada de trabalho com o Ntrip será reduzida quando comparada com o método clássico.

As desvantagens são as seguintes:

- Só funciona em áreas providas por *internet wireless* ou serviços providos por telefonia celular tais como GSM, GPRS e UMTS.

A figura 19 apresenta o funcionamento do posicionamento RTK via Ntrip e os fatores envolvidos.

Figura 19 – Representação esquemática do funcionamento do RTK via Ntrip

Fonte: Adaptado de Supergeo (2018)

Feng e Wang (2008) definem algumas características e parâmetros a serem considerados no posicionamento com a técnica RTK utilizando estações de referência, os quais podem ser utilizados para avaliar a performance de um sistema RTK. São eles:

- **Distância base-rover:** Trata-se do raio máximo de cobertura, no qual o sinal da base consegue chegar com eficiência, permitindo que os usuários recebam as correções de posição com latência adequada, obtendo as soluções época por época. A limitação da distância ocorre, principalmente, pela forte dependência da modelagem dos erros provenientes da ionosfera e troposfera. Aconselha-se que esta distância seja de, no máximo, 40 km;
- **Latência:** Definida como o intervalo entre a última mensagem RTCM disponibilizada para o usuário e sua seguinte. É a soma dos atrasos

causados pelo processamento dos dados na estação de referência (base) e sua transmissão, a partir de seu centro de processamento de dados, sendo, geralmente, de poucos segundos;

- Taxa de comunicação: Característica ligada à taxa de atualização de informação de posição, dada em Hertz (Hz). Exemplo: 1 Hz, 5 Hz ou 10 Hz. Quanto mais rápida a atualização da posição maior a taxa de comunicação necessária para controlar a precisão do posicionamento;
- *Time To First-Fix* (TTFF): Refere-se ao tempo necessário para resolver ou fixar suficientemente a parte inteira do vetor das ambiguidades na equação. Também é conhecida como tempo de inicialização. O ideal é que sistema RTK fixe a ambiguidade para todas as DD's de medidas de fase para a época atual na equação linear, de modo que se minimize a descontinuidade das soluções RTK;
- Taxa de *Ambiguity Resolution* (AR): Diz respeito à performance instantânea definida pela taxa de resultados inteiros estimados. A solução das ambiguidades pode ser comprometida quando a geometria dos satélites é ruim, ou há poucos satélites disponíveis, ou os efeitos dos vários erros são muito intensos. Nesses casos, a taxa de solução da ambiguidade pode ser calculada pela razão do número total de DD's fixas e o número total de DD's sem solução em uma seção;
- Disponibilidade AR: Definida como o percentual do total de correções de DD's fixas pelo número total de DD's. Em alguns estudos é também definida como o número total de épocas nas quais as ambiguidades inteiras são corretamente determinadas, em relação ao número total de épocas de uma seção de dados;
- Precisão RTK: Definida pelo grau de conformidade da posição RTK estimada e o valor de referência obtido em outro tipo de abordagem, preferencialmente com maior nível de precisão. Como de costume, a precisão RTK pode ser definida através da distância base-rover, como por exemplo $1.0 \text{ cm} + d * 0.5 \text{ ppm}$;
- Eficácia RTK: Percentual de tempo durante o qual as soluções RTK estão disponíveis, a uma certa precisão, como fixas ou flutuantes para a posição estimada;

- Integridade RTK: Relacionada com o nível de confiabilidade da informação fornecida pelo sistema RTK. Inclui a capacidade de o sistema providenciar mensagens de alerta aos usuários quando o sistema não deve ser utilizado para determinadas operações. Por exemplo: o sistema com capacidade de integridade pode informar aos usuários quando os erros das soluções RTK excederem o *Horizontal/Vertical Protection Level* (HPL/VPL) dentro de um *Time-To-Alert* (TTA) dado o *Integrity Risk* (IR). Para maiores detalhes sobre o assunto pode-se consultar Barbosa *et al.* (2010);
- Continuidade RTK: Definida como a disponibilidade de posicionamento RTK operacional sobre determinado período e condições. O TTFF e a disponibilidade AR são afetados com a continuidade RTK.

Uma variante da aplicação da técnica RTK via Ntrip é o RTK em Rede, cuja infraestrutura é apresentada na figura 20. Nesse tipo de técnica a distância entre o receptor de referência e o móvel pode variar entre 50 a 100 km com a ajuda de métodos de cálculo de posição e de transmissão (*Virtual Reference Stations* (VRS), *Flächen Korrektur Parameter* (FKP), *Master Auxiliary Concept* (MAC)). As estações da rede transmitem dados brutos GNSS em tempo real para um servidor central que calcula os erros dispersivos e não-dispersivos para cada estação de referência e interpola essas correções de acordo com a posição dos usuários. O usuário por sua vez recebe essas correções através de um *link* de comunicação com a rede (rádio, celular ou *internet*) e pode, em tempo real, obter precisões centimétricas em seu posicionamento. No caso do VRS e FKP os cálculos sobre os erros são realizados pelo software do servidor, enquanto no MAC são feitos pelo software do receptor móvel do usuário (APONTE *et al.*, 2009; OGUTCU e KALAYCI, 2016; RIZOS e HAN, 2003; SILVA; MONICO e ALVES, 2016).

Figura 20 – Esquema da infraestrutura do RTK em Rede

Fonte: Silva; Monico e Alves (2016)

2.4.6. Redes CORS

A partir da década de 90 as redes GNSS, que antes eram compostas por marcos cujas coordenadas eram uma vez determinadas e tomadas como referência, passaram a ser compostas por receptores GNSS e caracterizadas como ativas, coletando dados continuamente, permitindo posicionamento com melhores níveis de precisão. Esses dados podem hoje ser obtidos via *internet* para pós processamento, no caso de dados brutos no formato *Receiver Independent Exchange Format* (RINEX), ou em tempo real, no formato RTCM para levantamento com a técnica RTK (RIZOS, 2007).

As redes CORS têm muitas funções importantes, especialmente como a determinação das deformações da crosta terrestre, a atualização das redes geodésicas fundamentais e estudos sobre os terremotos e geodinâmica. Além disso, elas fornecem dados de correção para a aplicação de posicionamento diferencial (DGPS/DGNSS) e cinemático em tempo real (RTK GPS/GNSS). Nestes sistemas, a comunicação em campo com os usuários pode ser por satélite ou rádio (rádio frequência VHF ou UHF, telefones GSM/GPRS, *internet wireless*), tornando-se sistemas indispensáveis para o usuário final, a fim de obter a localização, navegação

e posição. Dependendo desses sistemas de rede, as estações CORS fornecem produtos diferentes para os usuários, sendo classificadas em redes passivas ou redes ativas (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER e WASLE, 2008).

As redes passivas geram e disponibilizam produtos de estações permanentes em tempo real ou em um curto intervalo de tempo. Em escala global, o IGS mantém uma rede de controle passivo, sendo a mais conhecida do mundo. Os dados brutos GNSS obtidos em cada uma das estações de monitoramento são disponibilizados através do site do IGS, permitindo o posicionamento relativo no modo pós-processado. Outra rede passiva bem conhecida, porém, em escala regional, é a *European Reference Frame* (EUREF) (OCALAN e TUNALIOGLU, 2010).

As redes ativas transmitem os dados de correção para todos os usuários em tempo real, através dos *links* de dados e sistemas de comunicação. O sistema consiste de um número de estações GNSS de monitoramento que realizam medições da fase e pseudodistância para todos os satélites GNSS em rastreo. As redes *Canadian Active Control System* (CACS) do Canadá, *National Geodetic Survey* (NGS) dos Estados Unidos, *Satellite Positioning Service of the German State Survey* (SAPOS) da Alemanha, *GNSS Earth Observation Network System* (GEONET) do Japão e a *Türkiye Ulusal Sabit GNSS Aktif* (TUSAGA-AKTIF) da Turquia, são exemplos de redes nacionais ativas. Além disso, China, Coreia, Bélgica, Suíça e muitos outros países criaram e vêm implantando melhorias em suas redes (OCALAN e TUNALIOGLU, 2010).

No Brasil, o IBGE mantém a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC), cujas estações desempenham o papel de pontos de coordenadas conhecidas pertencentes ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), eliminando a necessidade de que o usuário imobilize um receptor em um ponto que, muitas vezes, oferece grandes dificuldades de acesso. As observações são organizadas, ainda na memória do receptor, em arquivos diários, correspondendo a sessões iniciando às 00h 01min e encerrando às 24h 00min (UTC), com intervalo de rastreo de 15 seg. Depois do encerramento de uma sessão, os arquivos com as respectivas observações são transferidos do receptor para o centro de controle. A partir deste ponto são criados novos arquivos em formato padrão RINEX2, nos quais é realizado um controle de qualidade das observações. Em seguida, os arquivos de dados RINEX2 e as órbitas transmitidas são compactados e disponibilizados na área de *download* do portal do IBGE (IBGE, 2018).

As estações da RBMC são materializadas através de pinos de centragem forçada cravados em pilares estáveis. A maioria dos receptores da rede possui a capacidade de rastrear satélites GPS e GLONASS, enquanto alguns rastreiam apenas GPS. Esses receptores coletam e armazenam continuamente as observações do código e da fase das ondas portadoras transmitidos pelos satélites das constelações GPS e/ou GLONASS. Cada estação possui um receptor e antena geodésica, conexão de *internet* e fornecimento constante de energia elétrica, que possibilita a operação contínua da estação. Todas as suas estações fazem parte da Rede de Referência SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas), cujas coordenadas finais têm precisão da ordem de ± 5 mm, configurando-se como uma das redes mais precisas do mundo. Outro papel importante da RBMC é que as observações de algumas de suas estações vêm contribuindo, desde 1997, para a densificação regional da rede do IGS, garantindo uma melhor precisão dos produtos, tais como órbitas precisas, sobre o território brasileiro (IBGE, 2018).

Atualmente (conforme consulta realizada em 6 de janeiro de 2018) a rede possui um total de 138 estações. Desse total, 104 disponibilizam também, além dos dados brutos em formato RINEX para pós-processamento, correções em tempo real pela RBMC-IP.

2.4.6.1 Serviço RBMC-IP

Trata-se de um serviço para posicionamento em tempo real a partir das estações da RBMC, para usuários que fazem uso da técnica RTK ou DGPS nos seus levantamentos. Os dados são disponibilizados via protocolo Ntrip, conforme o formato padrão RTCM. A transmissão dos dados é realizada da seguinte forma: um receptor GNSS envia continuamente mensagens RTCM até o servidor, localizado no IBGE. Por sua vez, o usuário com um receptor que esteja conectado à *internet*, acessa ao servidor e escolhe a estação da RBMC-IP cujos dados ou correções diferenciais deseja receber. As correções são recebidas pelo receptor do usuário através de uma porta serial padrão e desta forma obtêm-se as posições corrigidas.

O servidor *Caster* do IBGE pode ser acessado pelo endereço IP 186.228.51.52 e opera na porta 2101. O acesso é gratuito, entretanto o usuário precisa preencher o cadastro e se registrar como usuário do serviço. Algumas

restrições de acesso se fazem necessárias visando evitar congestionamento de tráfego nesse servidor, sendo elas:

- Será permitido somente o acesso a cinco estações por usuário;
- Serão permitidos no máximo 1000 acessos simultâneos ao serviço.

A figura 21 apresenta o esquema de funcionamento da RBMC-IP, cujas partes que compõe o sistema são descritas na seção 2.4.1, sendo elas Ntrip Server, Ntrip Caster e Ntrip Client. A figura 22 apresenta o mapa do território brasileiro com todas as estações pertencentes à RBMC e as que disponibilizam o serviço RBMC-IP.

Figura 21 – Esquema de funcionamento da RBMC-IP

Fonte: Adaptado de Costa *et al* (2008)

Figura 22 – Estações da RBMC-IP

Fonte: IBGE (2018)

2.5. Veículos autônomos

Um veículo autônomo (VAT) é um tipo de veículo de transporte, de passageiros ou bens, dotado de um sistema de controle computacional que integra um conjunto de sensores e atuadores com a função de, a partir de uma missão inicial (local para onde ir) estabelecida pelo usuário, navegar de forma autônoma e segura sobre a superfície terrestre. O processo de navegação combina diversas etapas automatizadas para obter dados do ambiente, determinar a posição do veículo, evitar a colisão com outros elementos do ambiente e executar ações em direção à missão proposta. Pesquisas neste segmento apontam para o que deve ser o futuro das tecnologias associadas aos veículos de transporte terrestres (autônomos e semiautônomos). O principal fundamento associado à construção de VAT's é a possibilidade de substituir a condução humana de veículos, em tempo integral ou parcial, por uma condução automatizada e segura, realizada por um sistema computacional que combine algoritmos e ferramentas de alto desempenho para sensoramento e tomada de decisão adequada para um determinado contexto de navegação. Ou seja, a principal justificativa associada à adoção de VAT's baseia-se na possibilidade de redução de acidentes de trânsito ao eliminar a condução humana. Com a redução de acidentes, é também possível reduzir os custos financeiros e materiais envolvidos que podem incluir serviços médicos para remoção e tratamento de feridos, atendimento policial, correção da infraestrutura de transportes, dano ao mobiliário urbano e à propriedade de terceiros, processos judiciais, entre outros. (PISSARDINI, WEI e FONSECA JUNIOR, 2013).

A figura 23 apresenta como exemplo de VAT o veículo desenvolvido no projeto Carro Robótico Inteligente para Navegação Autônoma (CaRINA 2), pela Universidade de São Paulo (USP), no campus de São Carlos-SP. Consiste de um veículo comercial, idêntico aos que trafegam diariamente pelas ruas, porém, com controle computacional de direção, acelerador e freios. Além de um receptor GNSS integram o sistema um conjunto de câmeras, um sistema inercial, um *Light Detection And Ranging* (LIDAR) 3D e radares. Em outubro de 2013, este veículo realizou uma demonstração pública pelas ruas da cidade de São Carlos. Durante a demonstração, o veículo conseguiu detectar obstáculos como pessoas e outros carros, mantendo-se uma distância segura deles. Até o momento, este é o primeiro experimento de

condução de um veículo autônomo pelas ruas já realizado na América Latina (OLAVERRI, 2017).

Figura 23 – Veículo CaRINA 2

Fonte: Olaverri (2017)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir são descritos a área de estudo adotada no presente trabalho, os recursos empregados, a sistemática utilizada nos testes e, por fim, a metodologia de análise dos dados obtidos.

3.1. Área de estudo

Os testes realizados compreendem um trajeto de 22.700 m de extensão, o qual iniciava-se na Rua Henrique Nicola Vinet, no Bairro Jardim Ubirajara, na zona sul de São Paulo-SP, e terminava na Rua Voluntários da Pátria, na zona norte da cidade.

A escolha do trajeto se deu devido ao fato deste ser um trecho de grande extensão, conhecido como corredor Norte-Sul, o qual é integrado pelas avenidas Interlagos, Washington Luís, Moreira Guimarães, Rubem Berta, Vinte e Três de Maio, Prestes Maia, Tiradentes e Santos Dumont, região de grande fluxo de veículos (figura 23). Outro motivo para a escolha deve-se à existência de pontes, túneis, viadutos e árvores de grande porte no canteiro central das avenidas, pois tais interferências colocam à prova o desempenho de receptores GPS/GNSS devido à suscetividade de ocorrência de multicaminhamento, perda de sinal de satélites e da conexão de dados.

A distância em relação à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EP-USP), onde está localizada a estação de monitoramento POLI, pertencente à RBMC-IP, destacada à esquerda na figura 24, também contribuiu para a escolha do trajeto. Em relação ao ponto de partida dos testes a distância é de 15.626 m e 11.732 m para o ponto final. Trata-se de uma condição favorável, pois dentro de distâncias como estas entre receptores base e móvel o tempo necessário para a inicialização com a solução da ambiguidade mantém-se abaixo dos 60 segundos.

Figura 24 – Área de estudo: Corredor Norte-Sul de São Paulo

Para a coleta de dados foi utilizado um receptor GNSS de dupla frequência modelo ProMark 220, da marca Spectra Precision (figura 25). A escolha deste receptor levou em conta o fato dele trabalhar com uma antena externa, permitindo que o coletor/receptor ficasse internamente ao automóvel para visualização do estado da coleta e operação.

As especificações técnicas do equipamento, de acordo com o catálogo da fabricante, são as seguintes (SPECTRA PRECISION, 2012):

- Constelações: GPS, GLONASS, SBAS;
- Frequência: L1 / L2;
- Canais: 45;

- Taxa de atualização: 0,05 seg (20 Hz);
- Formato dos dados: ATOM, RTCM 2.3, RTCM 3.1, CMR, CMR+, NMEA;
- Precisões:
 - Pós-processado (estático)
 - Horizontal: 5 mm + 0.5 ppm * d
 - Vertical: 10 mm + 0.5 ppm * d
 - Pós-processado (cinemático)
 - Horizontal: 10 mm + 1 ppm * d
 - Vertical: 20 mm + 1 ppm * d
 - RTK
 - Horizontal: 10 mm + 1 ppm * d
 - Vertical: 20 mm + 1 ppm * d
 - DGPS
 - Horizontal: <25 cm + 1 ppm * d
 - SBAS
 - Horizontal: <50 cm;
- Tempo para a inicialização: < 60 segundos;
- Faixa de Inicialização: Até 40 km;
- Processador: 806 MHz;
- Sistema Operacional: Windows Embedded Handheld 6.5;
- Comunicações: GSM / GPRS / EDGE, Bluetooth, WLAN;
- Tamanho da unidade: 190 x 90 x 43 mm;
- Peso: 0,62 kg;
- Display: 3,5";
- Memória: 256 MB SDRAM / 2 GB Flash / SDHC;
- Temp. de operação: - 20°C a 60°C;
- Proteção: IP65;
- Alimentação (tipo - duração): 6600 mAh Li-Ion / > 8 horas.

Figura 25 – Receptor ProMark 220 da Spectra Precision

Fonte: Spectra Precision (2012)

O *software* instalado no receptor para a coleta e gerenciamento dos dados foi o ProMark Field v3.6.2, do mesmo fabricante.

Os demais materiais utilizados nesta pesquisa foram:

- Automóvel Ford Fiesta ano 2013;
- Suporte com ventosas adaptado para acoplar a antena externa do receptor GNSS;
- Estação Total Nikon Nivo 1C (1" de precisão), para levantamento topográfico das faixas da pista;
- Notebook DELL, processador Intel Core i7, tela de 15,6", 64-bits e sistema operacional Windows 10;
- Software GNSS Solutions v3.8, para o pós-processamento das observações;
- Software GeoOffice V2, para manipulação dos dados do levantamento topográfico;
- Software livre Quantum GIS v2.18.15, para as análises espaciais das coletas;
- Software Microsoft Excel, para as análises estatísticas e geração dos gráficos;
- Chip GSM da operadora Tim com plano de dados móveis.

3.3. Coleta de dados

Para a coleta de dados da pesquisa foram realizadas 29 campanhas, as quais ocorreram entre os dias 13/02/2015 e 21/07/2015.

Antes de iniciar o procedimento de coleta fazia-se a montagem da antena do receptor sobre o teto do veículo utilizando o suporte com ventosas. Afim de garantir a centragem da antena sobre o mesmo ponto em todas as coletas foi feita uma marca no teto do veículo para servir de referência. O receptor/coletor, ligado à antena no teto do veículo por meio de um cabo, era montado em um suporte fixado no para-brisas do veículo, o que permitia a visualização do estado da coleta enquanto o veículo encontrava-se em movimento. A figura 26 mostra o equipamento instalado no veículo.

Figura 26 – Locais onde foram instalados os equipamentos no veículo

Fonte: Autor

Considerando as dimensões presentes no manual do veículo e a altura do suporte com ventosas (8 cm), adotou-se a altura da antena como sendo 1,567 m. A figura 27 mostra as dimensões do veículo, as quais serão também consideradas nas análises dos dados adiante.

Figura 27 – Dimensões do veículo Ford Fiesta

Fonte: Ford Fiesta Rocan Hatch (2012)

Para cada campanha, criou-se um novo projeto no software de coleta, o qual era nomeado com a respectiva data. Na tela de configurações, definiam-se itens como o sistema de referência, fuso e o referencial vertical, os quais foram:

- Sistema de referência: SIRGAS2000;
- Fuso: 23 Sul
- Referencial vertical: Elipsoide *Geodetic Reference System 1980* (GRS80).

Na sequência selecionava-se o modo de coleta como RTK e configurava-se a conexão com a RBMC-IP, inserindo-se o número de IP do serviço, a porta, *login* e senha de acesso.

Em todas as coletas foi utilizada como base a estação POLI, cujas coordenadas oficiais em SIRGAS2000 (época 2000,4) são apresentadas na figura 28.

Figura 28 – Coordenadas oficiais da estação POLI

Coordenadas Geodésicas			
Latitude:	- 23° 33' 20,33228"	Sigma:	0,001 m
Longitude:	- 46° 43' 49,12319"	Sigma:	0,001 m
Alt. Elip.:	730,622 m	Sigma:	0,004 m
Coordenadas Cartesianas			
X:	4.010.099,5048 m	Sigma:	0,003 m
Y:	-4.259.927,3030 m	Sigma:	0,003 m
Z:	-2.533.538,7990 m	Sigma:	0,002 m
Coordenadas Planas (UTM)			
UTM (N):	7.393.902,043 m		
UTM (E):	323.390,708 m		
MC:	-45		

Fonte: IBGE (2007)

Após o estabelecimento da conexão com a estação POLI aguardava-se cerca de 15 segundos para a solução da ambiguidade e, conseqüentemente, a apresentação do *status* fixo na tela do equipamento, e o veículo era colocado em movimento para dar início a coleta de dados.

O serviço RBMC-IP permite um número de 1000 acessos simultâneos em todo o território nacional. Como os testes iniciavam por volta das 6:30h não foram encontrados problemas para conexão com o *caster*, entretanto, usuários relatam que no período da tarde torna-se um pouco mais difícil essa conexão.

O receptor GNSS ProMark 220 foi configurado para coletar automaticamente pontos a cada 10 metros e, juntamente com o levantamento na técnica RTK via Ntrip, foram gravados os dados brutos para pós-processamento, com taxa de gravação de 1 segundo.

Ao fim de cada campanha os dados da obra eram exportados do equipamento para o computador. O software de coleta gerava um arquivo de extensão TXT (figura 29), o qual continha as informações necessárias para as análises. Os itens presentes no arquivo eram: número do ponto, coordenadas este, norte e altura, precisão horizontal (*Horizontal Root Mean Square* - HRMS), precisão vertical (*Vertical Root Mean Square* - VRMS), número de satélites, PDOP, solução da posição e horário da coleta (UTC). Exportava-se também um arquivo no formato ATOM, desenvolvido pela fabricante para os receptores da marca, o qual continha as observações relativas à coleta de dados brutos para pós-processamento. Estes dois arquivos gerados nas coletas diárias serviram de matéria prima para as análises realizadas e forneceram os resultados apresentados no capítulo 4.

Figura 29 – Trecho do arquivo de extensão TXT gerado na coleta

Fonte: Autor

Os possíveis tipos de solução da ambiguidade fornecidos pelo receptor no software de coleta ProMark Field v3.6.2 são descritos na tabela 3, conforme informações do catálogo da fabricante (SPECTRA PRECISION, 2013).

Tabela 3 – Tipos de solução da ambiguidade no software ProMark Field v3.6.2

<i>Estado</i>	<i>Modo de operação</i>
AUTONOMOUS	Autônomo, sem correções
DGPS	Posicionamento diferencial GPS
SDGPS	Posicionamento diferencial via SBAS
FLOAT	RTK, precisão abaixo de 30 cm
FIXED	RTK, precisão centimétrica

3.4. Análise dos dados

A partir dos arquivos obtidos como produto das coletas de campo estabeleceu-se uma sistemática para análise. Para isto foram utilizadas três situações: a primeira, abrangendo o trajeto do corredor Norte-Sul como um todo; a segunda, considerando apenas um trecho do percurso sem interferências; e a terceira, abrangendo um trecho com interferências, após um viaduto. Assim, para cada situação, foram realizados os seguintes procedimentos descritos a seguir.

3.4.1. Análise 1: Trajeto completo

Para os dados resultantes das coletas na técnica RTK via Ntrip, tomando como referência (base) a estação POLI da RBMC-IP e o trecho descrito na figura 23, foi realizada uma análise estatística para cada dia de coleta, obtendo-se os seguintes dados:

- Média do número de satélites observados;
- Média do valor de PDOP;
- Média, desvio-padrão e distribuição normal das precisões horizontais e verticais;
- Quantidade de pontos para cada tipo de estado da solução da ambiguidade;
- Porcentagem por intervalos de precisão; e
- Porcentagem total (considerando as 29 campanhas de coleta de dados) de pontos de acordo com o estado da solução da ambiguidade.

Visando estabelecer ainda uma comparação com a precisão obtida, realizou-se também o pós-processamento dos dados obtidos nas coletas em modo cinemático, considerando o mesmo trecho. Utilizando-se o software *GNSS Solutions*, do mesmo fabricante do equipamento e, considerando como referência a estação POLI da RBMC, obteve-se para cada dia de coleta as coordenadas corrigidas dos pontos do trajeto e suas precisões, horizontais e verticais. A partir disso foi feita uma análise estatística dos resultados do pós-processamento, obtendo-se a média das precisões e o desvio-padrão para cada dia de coleta e geral. A figura 30 mostra a tela do software de processamento *GNSS Solutions* no momento do processamento de uma das coletas.

Figura 30 – Software *GNSS Solutions*: Processamento dos dados brutos

Fonte: Autor

3.4.2. Análise 2: Trecho sem interferências

Para a segunda análise aplicou-se o método adotado por Stephenson *et al* (2013). O local utilizado compreende apenas o trecho da avenida Moreira Guimarães entre os viadutos João Julião da Costa Aguiar e República Árabe Síria, na pista sentido zona norte, totalizando 1.330 metros de extensão.

A escolha se deve ao fato de o mesmo ser plano, sem pontes, túneis ou árvores que possam interferir na recepção do sinal de satélites. Visto que a primeira

análise engloba todo o percurso realizado e as interferências nele presentes, nesta segunda análise pretendia-se observar os resultados possíveis de serem obtidos sem tais interferências de sinal, ou seja, sob condições ideais para uso de receptores GNSS. A figura 31 destaca o trecho em questão.

Figura 31 – Trecho da Análise 2: Avenida Moreira Guimarães

Fonte: Google Maps (2018)

Para servir de referência às análises, utilizou-se a base cartográfica do município de São Paulo, conhecida como Mapa Digital da Cidade (MDC), em escala 1:1000. Arquivos com dados vetoriais contendo o eixo de logradouros e as quadras viárias foram obtidos e utilizados para extrair os trechos de interesse ao trabalho.

O MDC é resultado de um levantamento aerofotogramétrico realizado no ano de 2004 e está apoiada na Rede Básica de Referência Geodésica do Município de São Paulo, o qual conta com 302 marcos. Disponível desde dezembro de 2014, esses dados são abertos ao público e podem ser obtidos pelo Portal GeoSampa através do endereço <http://geosampa.prefeitura.sp.gov.br/PaginasPublicas/SBC.aspx>. A figura 32 mostra o Portal GeoSampa.

Figura 32 – Portal GeoSampa: obtenção da base cartográfica do município de São Paulo

Fonte: Autor

Obtida a base cartográfica foi utilizado o software livre Quantum GIS v2.18.15, ou QGIS como é mais conhecido, para a extração das informações. Na figura 33 é apresentado um recorte da base cartográfica do MDC carregada no software QGIS, na qual é possível ver os eixos dos logradouros na cor vermelha, as quadras na cor amarela e os pontos de um dia de coleta na cor verde.

Figura 33 – Trecho do MDC: Feições eixo de logradouro, quadra viária e pontos coletados

Fonte: Autor

Com o complemento do *plug-in* GRASS para o QGIS foram extraídas as distâncias ortogonais de cada ponto registrado na coleta até o canteiro central, considerando apenas pontos paralelos ao canteiro tomado como referência dentro do trecho descrito na figura 31, para cada dia, fazendo-se o uso da técnica RTK via Ntrip. A figura 34 mostra a tela do software QGIS no momento da extração das distâncias descritas. A seta na cor vermelha destaca a coluna na qual estas se encontram dentro da tabela de atributos.

Figura 34 – Software QGIS: Extração das distâncias em relação ao canteiro central

Fonte: Autor

Foram obtidos valores de média e desvio-padrão da distância entre o veículo e o canteiro central, lembrando que o veículo ocupou em todos os dias de coleta a mesma faixa, localizada mais à esquerda. O motivo de escolha dessa faixa reside no fato do percurso não possuir um número constante de faixas, variando de 2 a 5, dependendo do trecho. Dessa forma, o tráfego pela faixa mais à esquerda possibilitou estabelecer um padrão ao percurso.

Afim de avaliar a acurácia do posicionamento cinemático em tempo real estabeleceu-se uma linha imaginária paralela ao canteiro como ideal, sobre a qual o veículo deveria passar todos os dias. A figura 35 exemplifica a posição do veículo no instante das coletas.

Figura 35 – Esquema de coleta de dados na faixa da esquerda

Fonte: Autor

Para a obtenção dessa linha, calculada a partir da distância do canteiro central, foi realizado um levantamento topográfico com uma estação total de alto nível de precisão (1") e capacidade de medição sem prisma. Com ela foram medidas as faixas para determinar sua largura. O equipamento foi estacionado sobre o viaduto República Árabe Síria, como mostra a figura 36, e as medições realizadas sem a necessidade de utilização de um bastão com prisma sobre os pontos de interesse, o que exigiria a interrupção do tráfego na via. A figura 37 apresenta o croqui gerado com o software GeoOffice V2 a partir dos pontos registrados no levantamento topográfico. Utilizando-se apenas a planimetria, adotou-se um sistema topográfico arbitrário, cuja a estação E1 possuía coordenadas $N = 5.000,000 \text{ m}$ e $E = 2.000,000 \text{ m}$.

Figura 36 – Levantamento topográfico com estação total

Fonte: Autor

Figura 37 – Croqui do levantamento topográfico

Fonte: Autor

3.4.3. Análise 3: Trecho após o viaduto

Com o objetivo de mensurar o tempo e a distância necessários para a restauração da solução da ambiguidade foi selecionado o trecho após o viaduto República Árabe Síria, agora na avenida Rubem Berta, na pista sentido zona norte,

sob o qual o receptor ficava com bloqueio total de rastreo de satélites por alguns instantes (figura 38). Para este trecho, pós viaduto, obteve-se a média do tempo e da distância para resolução da ambiguidade e obtenção do estado fixo.

Figura 38 – Trecho após o viaduto República Árabe Síria

Fonte: Google Maps (2018)

Ao passar sob construções como estas o receptor tinha a recepção de sinais interrompida e, conseqüentemente, ocorria uma pausa na coleta de pontos na técnica RTK, perda da conexão de *internet* e ausência de dados de observação no arquivo bruto para pós-processamento, criando uma lacuna no trajeto. Todavia, essa condição era reestabelecida alguns instantes após a saída desses túneis e o registro de pontos automaticamente retomado. Este tipo de análise pode ser considerado como essencial, principalmente quando se deseja analisar o comportamento de receptores GNSS em cenários urbanos.

De acordo com o fabricante do equipamento o receptor GNSS utilizado possui um diferencial técnico conhecido como Z-Blade, que permite que o receptor efetue o cálculo de uma posição mais rápido que os demais devido à combinação de constelações. Ele otimiza a recepção dos sinais GNSS oferecendo posições em RTK mesmo quando a cobertura dos sinais GPS é insuficiente, mas outras constelações, como o GLONASS, estão disponíveis, conforme ilustra a figura 39. Os demais receptores necessitam de, ao menos, 4, 5 ou 6 satélites da constelação GPS no

momento da inicialização, para daí então, ir acrescentando as observações dos demais ao cálculo da posição (SPECTRA PRECISION, 2013).

Figura 39 – Esquema de posicionamento com receptor sem tecnologia Z-Blade e com a mesma.

Fonte: Spectra Precision (2013)

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após o tratamento dos dados obteve-se um conjunto de gráficos e tabelas para cada uma das três análises descritas no capítulo anterior, os quais serão apresentados adiante.

4.1. Análise 1: Trajeto completo

Durante os 29 dias de coleta foram registrados um total de 48.619 pontos em RTK, o que resultou em uma média de 1677 pontos por dia. O gráfico com o número total de pontos para cada dia de coleta é apresentado no gráfico da figura 40.

Figura 40 – Análise 1: Número total de pontos por dia de coleta

Fonte: Autor

A média geral do número de satélites observados obtida durante o percurso total, considerando as 29 campanhas de coletas de dados, foi de 12 satélites (valor arredondado). A figura 41 mostra o gráfico com esses valores diários.

Figura 41 – Análise 1: Média do número de satélites

Fonte: Autor

Quanto ao PDOP, a média geral obtida foi de 1,9. A figura 42 traz o gráfico com os valores médios obtidos diariamente.

Figura 42 – Análise 1: Média do PDOP

Fonte: Autor

Em relação aos valores de precisão horizontal e vertical obtidos para as coletas com a técnica RTK via Ntrip, a figura 43 apresenta o gráfico com as médias diárias para cada componente.

Figura 43 – Análise 1: Média das precisões horizontais e verticais - RTK

Fonte: Autor

Classificando os valores médios de precisão horizontal por intervalos é possível apresentá-los conforme visto na tabela 4, a seguir. Nela são apresentados a quantidade de dias nos quais obteve-se valores médios dentro de um respectivo intervalo. Observa-se que na maioria dos dias a precisão horizontal média esteve entre 0,5 e 0,6 metros.

Tabela 4 – Análise 1: Ocorrência por intervalos de precisão média - RTK (Horiz.)

Precisão	Dias
< 0,5m	2
≥ 0,5m e <0,6m	10
≥ 0,6m e <0,7m	6
≥ 0,7m e <0,8m	2
≥ 0,8m e <0,9m	4
≥ 0,9m e <1,0m	4
≥1,0m	1

O mesmo se encaixa para a precisão vertical, mostrada na tabela 5. Porém, neste caso, não há um intervalo que se destaque dos demais, mas sim três, que apresentam 5 dias de ocorrência, cada.

Tabela 5 – Análise 1: Ocorrência por intervalos de precisão média - RTK (Vert.)

Precisão	Dias
< 0,7m	3
≥ 0,7m e <0,8m	2
≥ 0,8m e <0,9m	5
≥ 0,9m e <1,0m	5
≥ 1,0m e <1,1m	2
≥ 1,1m e <1,2m	5
≥ 1,2m e <1,3m	3
≥ 1,3m e <1,4m	1
≥ 1,4m e <1,5m	1
≥1,5m	2

Encontrou-se ainda, para cada dia de coleta, a quantidade de pontos observados com os cinco tipos possíveis de solução da ambiguidade presente no software de coleta do receptor: Fixo, Flutuante, DGPS, SDGPS e Autônomo. A figura 44 apresenta o gráfico com esses valores.

Figura 44 – Análise 1: Número de pontos por tipo de solução da ambiguidade

Fonte: Autor

Com relação à figura 44, o ponto na linha em azul quando posicionado abaixo do ponto na linha de cor laranja, para uma mesma data, indica um dia no qual o número de pontos registrados em estado flutuante é superior ao de pontos em estado fixo. Entretanto, comparando as datas com a da figura 43, este resultado não esteve diretamente ligado à piora da média da precisão, como pode ser visto tomando como exemplo os dias 26 de março e 11 de junho.

A figura 45 apresenta o gráfico com os valores percentuais, por dia, correspondentes a cada tipo de solução da ambiguidade. Nele é possível verificar que o dia 11 de junho foi o que apresentou maiores mudanças, devido à grande presença de pontos registrados com estado SDGPS.

Analisando os possíveis tipos de solução da ambiguidade descritos na tabela 3 percebe-se que a solução SDGPS está ligada ao posicionamento cujas correções são provenientes de sistemas de aumento do tipo SBAS. Tal critério ocorre quando o recebimento de correções diferenciais é interrompido, não gerando soluções dos tipos fixas, flutuantes e nem DGPS. Isso indica que nesta data ocorreu algum problema com o recebimento das correções da RBMC-IP, seja por problemas com o servidor do IBGE, problemas com a base utilizada (POLI) ou com a conexão de dados móveis da operadora.

Ao analisar o intervalo de pontos entre os quais a solução SDGPS esteve presente verifica-se que tal situação ocorreu em um trecho sem interferências, coincidentemente o mesmo adotado na análise 2.

Figura 45 – Análise 1: Porcentagem diária de cada tipo de solução da ambiguidade

Fonte: Autor

Considerando o total de pontos registrados na técnica RTK via Ntrip nos 29 dias de coleta, mais da metade deles obtiveram a solução de ambiguidade fixa. A figura 46 apresenta essas porcentagens de acordo com os diferentes tipos de solução.

Figura 46 – Análise 1: Porcentagem total de pontos de acordo com o tipo de solução da ambiguidade

Fonte: Autor

Com isto é possível concluir que em apenas 0,27% dos pontos registrados a conexão de dados foi interrompida, fazendo com que o receptor entrasse em modo Autônomo (RAW) ou SDGPS. As categorias Fixo e Flutuante são a grande maioria, somando juntas 93,4% das leituras.

Com auxílio do software QGis e dos dados vetoriais de quadra viária obtidos do MDC, foi possível obter a seguinte informação: dos 22.700 m de extensão do trajeto, 4,42%, ou seja, 1.005 m, possuem bloqueio total do sinal. Apesar de ser um valor relativamente pequeno, em alguns momentos essas interferências estavam seguidas uma da outra. O receptor não conseguia ao menos fixar a ambiguidade após passar sob uma construção dessas e já tinha o sinal de satélites bloqueado novamente, como é o caso do trecho entre o túnel Papa João Paulo II e o viaduto Tom Jobim, na Avenida Prestes Maia, presente na figura 47, distantes um do outro por 450 metros.

Figura 47 – Análise 1: Trecho com interferências seguidas

Fonte: Google Maps (2018)

A tabela 6 apresenta, também considerando a amostra total com todas as leituras nos 29 dias de coleta, a média e desvio-padrão obtidos para a componente horizontal.

Tabela 6 – Análise 1: Média e desvio-padrão geral - RTK (Horiz.)

Análise	Precisão (m)
Média	0,686
Desvio-padrão	2,467

Na tabela 7, apresenta-se a porcentagem de ocorrência registrada de acordo com os intervalos de precisão estipulados, também para a componente horizontal.

Tabela 7 – Análise 1: Porcentagem por intervalos de precisão - RTK (Horiz.)

Precisão	Porcentagem
$\leq 0,01$ m	3%
$> 0,010$ m e $\leq 0,050$ m	45%
$> 0,050$ m e $\leq 0,100$ m	6%
$> 0,100$ m e $\leq 0,150$ m	3%
$> 0,150$ m e $\leq 0,200$ m	1%
$> 0,200$ m e $\leq 0,250$ m	1%
$> 0,250$ m e $\leq 0,300$ m	1%
$> 0,300$ m e $\leq 0,350$ m	1%
$> 0,350$ m e $\leq 0,400$ m	2%
$> 0,400$ m e $\leq 0,450$ m	2%
$> 0,450$ m e $\leq 0,500$ m	2%
$> 0,500$ m e $\leq 1,000$ m	13%
$> 1,000$ m	19%

Da mesma forma, agora para a componente vertical, as tabelas 8 e 9 apresentam, respectivamente, a análise estatística e porcentagens de ocorrência de cada valor de precisão, de acordo com os intervalos estipulados.

Tabela 8 – Análise 1: Média e desvio-padrão geral - RTK (Vert.)

Análise	Precisão (m)
Média	1,037
Desvio-padrão	3,278

Tabela 9 – Análise 1: Porcentagem por intervalos de precisão - RTK (Vert.)

Precisão	Porcentagem
$\leq 0,020$ m	7%
$> 0,020$ m e $\leq 0,050$ m	31%
$> 0,050$ m e $\leq 0,100$ m	12%
$> 0,100$ m e $\leq 0,150$ m	4%
$> 0,150$ m e $\leq 0,200$ m	2%
$> 0,200$ m e $\leq 0,250$ m	2%
$> 0,250$ m e $\leq 0,300$ m	2%
$> 0,300$ m e $\leq 0,350$ m	2%
$> 0,350$ m e $\leq 0,400$ m	2%
$> 0,400$ m e $\leq 0,450$ m	1%
$> 0,450$ m e $\leq 0,500$ m	1%
$> 0,500$ m e $\leq 1,000$ m	9%
$> 1,000$ m	25%

Ao aplicar a distribuição normal nos valores de precisão horizontal e vertical obtidos, considerando a amostra total de 48.619 pontos, obtém-se o gráfico presente na figura 48.

Figura 48 – Análise 1: Distribuição normal das precisões horizontais e verticais - RTK

Fonte: Autor

Ao avaliar estes resultados deve-se resgatar o que está contido no catálogo do equipamento, o qual assegura que o receptor tem as seguintes precisões em RTK e cinemático pós-processado:

- Horizontal: $10 \text{ mm} + 1 \text{ ppm} * d$
- Vertical: $20 \text{ mm} + 1 \text{ ppm} * d$

A considerar que a maior distância que o receptor móvel esteve distante da base foi no início de cada coleta, com aproximadamente 15 km, os valores aceitáveis para a precisão passam a ser abaixo do seguinte limiar:

- Horizontal: 25 mm
- Vertical: 35 mm

Analizando o conjunto de dados das 29 campanhas, visando encontrar a porcentagem de pontos nos quais os limites de precisão horizontal e vertical foram atendidos, obtém-se um resultado de 37% para a componente horizontal e 26% para a vertical. A porcentagem de pontos nos quais ambas as condições foram atendidas foi também de 26%. Ou seja, para o trajeto urbano adotado nos testes, 26% dos pontos registrados cumpriram com a precisão estipulada em catálogo.

Quanto ao pós-processamento (PP) das observações obteve-se valores mais degradados em relação às precisões horizontal e vertical, quando comparados com os obtidos na técnica RTK. A figura 49 traz as precisões horizontais e verticais médias por dia. Pode-se verificar que o dia 06 de abril foi o que obteve melhores resultados e, por sua vez, o dia 13 de fevereiro os piores. Entretanto, ao comparar as mesmas datas com o gráfico da figura 43, o qual apresenta as precisões horizontais e verticais para o levantamento em RTK, não se pode estabelecer um parâmetro comum entre ambos, pois tais datas não apresentaram equivalência na piora das precisões.

Figura 49 – Análise 1: Média das precisões horizontais e verticais - PP

Fonte: Autor

A título de esclarecimento, no gráfico da figura 49 as datas de 19/03, 14/04, 15/05 e 21/07 não estão presentes. Isto se deve a um problema técnico que ocorreu com o equipamento, corrompendo o arquivo bruto de dados para pós-processamento para estas datas.

A tabela 10 traz a distribuição percentual do total de 102.456 pontos registrados na coleta cinemática de dados brutos de acordo com os intervalos de precisão, considerando a componente horizontal. Na tabela 11 são apresentados média e desvio-padrão para a mesma componente.

Tabela 10 – Análise 1: Porcentagem por intervalos de precisão - PP (Horiz.)

Precisão	Porcentagem
$\leq 0,01$ m	0%
$> 0,010$ m e $\leq 0,050$ m	0%
$> 0,050$ m e $\leq 0,100$ m	9%
$> 0,100$ m e $\leq 0,150$ m	6%
$> 0,150$ m e $\leq 0,200$ m	12%
$> 0,200$ m e $\leq 0,250$ m	3%
$> 0,250$ m e $\leq 0,300$ m	5%
$> 0,300$ m e $\leq 0,350$ m	6%
$> 0,350$ m e $\leq 0,400$ m	7%
$> 0,400$ m e $\leq 0,450$ m	5%
$> 0,450$ m e $\leq 0,500$ m	5%
$> 0,500$ m e $\leq 1,000$ m	21%
$> 1,000$ m	21%

Tabela 11 – Análise 1: Média e desvio-padrão geral - PP (Horiz.)

Análise	Precisão (m)
Média	4,371
Desvio-padrão	15,841

As tabelas 12 e 13 apresentam, respectivamente, os percentuais por intervalos e análises estatísticas para a componente vertical.

Tabela 12 – Análise 1: Porcentagem por intervalos de precisão - PP (Vert.)

Precisão	Porcentagem
$\leq 0,020$ m	0%
$> 0,020$ m e $\leq 0,050$ m	0%
$> 0,050$ m e $\leq 0,100$ m	2%
$> 0,100$ m e $\leq 0,150$ m	5%
$> 0,150$ m e $\leq 0,200$ m	6%
$> 0,200$ m e $\leq 0,250$ m	7%
$> 0,250$ m e $\leq 0,300$ m	5%
$> 0,300$ m e $\leq 0,350$ m	4%
$> 0,350$ m e $\leq 0,400$ m	6%
$> 0,400$ m e $\leq 0,450$ m	5%
$> 0,450$ m e $\leq 0,500$ m	4%
$> 0,500$ m e $\leq 1,000$ m	27%
$> 1,000$ m	29%

Tabela 13 – Análise 1: Média e desvio-padrão geral – PP. (Vert.)

Análise	Precisão (m)
Média	3,234
Desvio-padrão	9,915

Assim como no RTK, a precisão mínima estipulada para o posicionamento cinemático pós-processado encontrava-se abaixo de 25 mm na horizontal e 35 mm na vertical, conforme os valores presentes no catálogo do equipamento. Entretanto, a análise dos resultados obtidos mostra que tanto para a horizontal quanto na vertical este quesito não foi atendido. Conforme as tabelas 10 e 12 trazem os pontos registrados com melhores valores de precisão no pós-processamento encontram-se no intervalo a partir 5 cm, estando a maior parte acima dos 50 cm, tanto para vertical quanto para horizontal. Portanto, para este teste a precisão dada pela fabricante não foi atendida.

Com isso, é possível indicar que as precisões obtidas no pós-processamento das observáveis para uma coleta em modo cinemático são piores que as obtidas no posicionamento com a técnica RTK.

4.2. Análise 2: Trecho sem interferências

Para esta análise, que considera o trecho sem interferências da avenida Moreira Guimarães e o canteiro central à esquerda do veículo como referência, foram obtidos os valores presentes na tabela 14. A figura 50 traz as médias dos valores por dia, assim como o desvio-padrão em relação ao canteiro central.

Tabela 14 – Análise 2: Média e desvio-padrão geral

Análise	Distância (m)
Média	1,303
Desvio-padrão	0,509

Figura 50 – Análise 2: Média e desvio-padrão das distâncias do veículo até o canteiro central

Fonte: Autor

Ao analisar os dados da coleta do dia 15 de maio, o qual obteve os valores mais distantes do esperado, percebeu-se que todos os pontos coletados no trecho estavam em modo flutuante, conforme mostra um trecho do arquivo resultante da coleta, na figura 51. O mesmo foi descrito anteriormente para o dia 11 de junho, que apresentou todos os pontos com solução SDGPS para o trecho. Além disso, a média de 8 satélites para a data de 15 de maio estava abaixo da média geral de 12 satélites, presentes nos outros dias para o mesmo trecho.

Considerando a distância média de 1,303 m e a largura do veículo que é de 1,905 m sua posição em relação à faixa fica conforme mostrado na figura 52.

Figura 52 – Análise 2: Posição do veículo na faixa

Fonte: Autor

Como se pode verificar a média da distância entre o veículo e o canteiro central não o coloca no centro da faixa. Ao longo dos testes percebeu-se que este resultado poderia ocorrer graças à uma intercorrência para a qual não se atentou inicialmente: o tráfego de motocicletas.

Assim como em outras vias da cidade, os motociclistas costumam trafegar por este corredor entre as duas faixas mais à esquerda. Trata-se de um trecho no qual as faixas não são tão largas, o que obriga o motorista que dirige pela faixa mais à esquerda conduzir de maneira mais próxima ao canteiro central para ceder a passagem às motocicletas. Diante disso, pode-se considerar que o trajeto médio executado revelou certa conformidade, ou seja, esteve próximo da linha tomada como referência.

4.3. Análise 3: Trecho após o viaduto

Para a terceira análise realizada, a figura 53 apresenta o gráfico que compara o tempo e a distância necessários para a restauração da solução da ambiguidade pelo receptor GNSS, ao longo dos dias de coleta de dados.

Figura 53 – Análise 3: Médias de distância e tempo

Fonte: Autor

Para que estes valores fossem obtidos, foram calculadas as distâncias, pela diferença das coordenadas, e o tempo, pela diferença entre a hora de coleta do primeiro ponto registrado após o veículo sair do viaduto e o primeiro no qual reestabeleceu-se o estado fixo.

A média geral de distância, considerando as 29 campanhas de coletas, foi de 268,851 m. O tempo médio encontrado para a restauração da solução da ambiguidade pelo receptor e obtenção do estado fixo foi de 50 segundos. A tabela 15 apresenta esses valores por dia, incluindo o número de pontos registrados até o reestabelecimento da condição ideal.

Tabela 15 – Análise 3: Número de pontos, distância e tempo por dia

<i>Data</i>	<i>Qtd. pontos</i>	<i>Distância (m)</i>	<i>Tempo (seg.)</i>
13/fev	7	78,473	51
23/fev	13	151,676	59
25/fev	8	63,559	56
26/fev	9	104,689	18
27/fev	25	284,165	65
02/mar	14	148,682	67
03/mar	18	160,087	44
06/mar	17	209,235	19
10/mar	13	169,903	16
12/mar	20	234,842	37
13/mar	10	100,103	82
19/mar	26	297,105	61
23/mar	15	166,983	42
24/mar	24	296,789	31
26/mar	72	878,462	90
30/mar	32	388,749	76
06/abr	30	363,982	41
10/abr	20	234,042	24
14/abr	12	129,086	34
16/abr	48	616,913	73
15/mai	16	188,294	36
22/mai	41	471,225	155
29/mai	8	88,697	17
01/jun	22	248,309	70
11/jun	17	179,954	42
12/jun	5	53,627	16
18/jun	38	518,841	37
19/jun	8	65,279	44
21/jul	55	904,928	55
Média	22	268,851	50

Observou-se, nesta análise, para alguns dias, dois tipos de situações peculiares: a primeira, quando o tempo foi baixo, mas a distância relativamente grande (Ex: 21/jul), e a segunda, quando o tempo foi alto e a distância pequena (Ex: 13/mar). Para a primeira situação, avaliou-se que esta ocorreu quando o trânsito estava menos congestionado, permitindo com que o veículo executasse o percurso em uma velocidade um pouco mais alta. O dia 21 de julho, por exemplo, foi um dia no qual havia férias escolares, o que diminui consideravelmente o número de veículos na cidade. A segunda situação, tomando como exemplo o dia 13 de março, representa um dia no qual havia congestionamento na via, fazendo com que o veículo avançasse muito lentamente, indicando, possivelmente, que o veículo ficou

parado na saída do túnel por certo tempo, sem se deslocar para uma condição melhor à geometria dos satélites.

Para respaldar tais afirmações, a partir da distância e do tempo necessários para a solução da ambiguidade, foi calculada a velocidade média em km/h desenvolvida pelo veículo no trecho, após a saída do túnel. A figura 54 apresenta um gráfico com esses valores, ao longo dos dias.

Do total de 29 campanhas de coleta de dados, apenas em 13 delas os valores de quantidade de pontos, distância e tempo foram inferiores às respectivas médias, ou seja, em menos da metade dos 29 dias, aproximadamente 45%.

Figura 54 – Análise 3: Velocidades médias desenvolvidas pelo veículo

Fonte: Autor

O dia 12 de junho pode ser considerado como o melhor de todos os dias de coleta, pois apresentou a melhor combinação dos três fatores (quantidade de pontos, distância e tempo). Por sua vez o dia 26 de março foi o que apresentou a pior combinação. Essas duas datas foram representadas em um mapa (figura 55) no qual os pontos na cor vermelha são atribuídos ao *status* DGPS, amarelo ao flutuante e verde ao *status* fixo.

Figura 55 – Análise 3: Melhor dia (12/06) à esquerda, e pior dia (26/03) à direita

Fonte: Autor

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Diante do exposto, avalia-se que a metodologia utilizada e dividida nas três análises descritas cumpriu o objetivo principal do trabalho, que era analisar a precisão e acurácia do posicionamento RTK via Ntrip, no modo cinemático, em ambiente urbano, fazendo uso de um receptor de dupla frequência.

Para a abordagem que considera o trajeto como um todo, incluindo os pontos com bloqueio do sinal, obteve-se uma média da precisão horizontal de 0,686 m e vertical de 1,037 m. Apesar disso, do total de 48.619 pontos registrados 50,72% obtiveram o *status* fixo e 42,68% o *status* flutuante. Em relação ao limiar de precisão presente nas especificações do equipamento, que era de 0,025 m para a horizontal e 0,035 m para a vertical, 26% dos pontos coletados atenderam ambos os quesitos.

Considerando o trajeto sem interferências, com o qual foi possível analisar a acurácia dos levantamentos, o valor médio de 1,303 m para a distância do centro do veículo até o canteiro central foi condizente com o resultado do levantamento topográfico das faixas. O fato do trajeto médio não colocar o veículo no centro da faixa ocorreu devido ao tráfego de motocicletas no corredor entre as faixas, que obrigava o veículo a se aproximar mais do canteiro central durante as coletas.

Com a análise feita a respeito do tempo e distância necessários para restauração da solução da ambiguidade encontrou-se os valores médios de 50 segundos e 268,851 m, respectivamente. Conclui-se aqui que a movimentação mais lenta do veículo favorece a uma solução da ambiguidade mais rápida, após o veículo sair de uma situação de bloqueio total dos sinais de satélites.

O pós-processamento das observações registradas no levantamento cinemático com taxa de gravação de 1 segundo não apresentou resultados satisfatórios, não atendendo em nenhum momento a precisão estipulada no catálogo da fabricante, que era a mesma do posicionamento em RTK. Para a componente horizontal obteve-se uma precisão média de 4,371 m e para a vertical 3,234 m. Com isso percebe-se que o cenário urbano se colocou de forma mais prejudicial ao posicionamento relativo cinemático pós-processado que ao posicionamento relativo em tempo real. Tal situação está ligada à perda de ciclos por parte do receptor móvel durante o trajeto.

Mostrou-se, também, que a RMBC-IP constitui um serviço confiável e passível de ser empregado em levantamentos geodésicos pela comunidade usuária. Esta afirmação, já apresentadas em outras publicações de periódicos e dissertações para

o caso estático, vem com o presente trabalho, ratificar seu uso também em levantamentos cinemáticos. Porém, cabe a ressalva de que a qualidade das precisões obtidas no levantamento com a técnica RTK em ambiente urbano estará diretamente ligada ao número de interferências sob o qual o receptor estará sujeito.

Entre as dificuldades para a realização deste trabalho, pode-se citar a necessidade de manter o trajeto pela mesma faixa, visto que não é possível assegurar com exatidão o cumprimento da mesma distância em relação ao canteiro central por todo o tempo e em todos os dias. Além disso, ocorrências como acidentes ou veículo parado por problemas mecânicos na via podem ocorrer, o que requer a aplicação de pequenos desvios.

Os resultados apontam, também, para o que Meng *et al* (2008) e Uradzinski; Kim e Langley (2008) apresentaram, ou seja, o uso da técnica RTK via Ntrip pode ser perfeitamente empregada na navegação veicular. Contudo, para os casos de haver falta de solução inteira para as ambiguidades, resultando em posições autônomas, principalmente devido à ausência do sinal de satélites, o uso de sensores inerciais combinados deve auxiliar na navegação.

Vale ressaltar, ainda, que os resultados obtidos não desqualificam, de nenhuma forma, o equipamento e sua fabricante, mas sim, apenas mostram que para a situação testada, a qual era muito desafiadora devido ao fato do deslocamento do automóvel ter se dado velocidade muito superior àquela que um usuário emprega caminhando com o equipamento montado em um bastão, tal receptor não conseguiu fornecer resultados semelhantes àqueles alcançados em seu uso comum.

Como recomendação para trabalhos futuros coloca-se o emprego da técnica de RTK em Rede, fazendo uso de estação virtuais (VRS) mais próximas ao veículo. O uso de outros tipos de conexão mais estáveis, como por exemplo *wi-fi*, também contribuirá para a obtenção de melhores resultados. Aplicação dos testes em trajetos controlados, como por exemplo um circuito com trilhos construído a céu aberto, sobre o qual tráfegará um veículo com velocidade controlada e com um receptor GNSS instalado a bordo, também pode contribuir para a execução de uma rota mais comum entre as coletas, oferecendo maior precisão e acurácia, além de ser passível de checagem por pontos de controle.

Da mesma forma, uma análise separada por constelações poderá dar uma melhor visão da integridade de cada uma delas, principalmente quando estiverem

todas em pleno funcionamento. Uma análise somente com GPS, com GLONASS, ou Galileo e BeiDou, quando estes últimos estiverem plenamente operacionais aos usuários civis, permitirá comparar as precisões obtidas em cada uma e apontar qual o mais indicado para a região.

REFERÊNCIAS

ANSARI, K.; FENG, Y.; TANG, M. A Runtime Integrity Monitoring Framework for Real-Time Relative Positioning Systems Based on GPS and DSRC. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 16, Abril 2015.

APONTE, J. et al. Assessing network RTK wireless delivery. **GPS World**, p. 14-27, Fevereiro 2009.

BARBOSA, E. D. M. et al. Integridade no posicionamento RTK e RTK em rede. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, 16, out-dez 2010. 589-605.

BEIDOU. **Beidou Navigation Satellite System**. Disponível em: <<http://www.beidou.gov.cn/>>. Acesso em: 8 Fevereiro 2018.

BEIDOU. **BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space - Interface Control Document**. China Satellite Navigation Office. 82. 2013. (BDS-SIS-ICD-2.0).

CHEN, R.; LI, X.; WEBER, X. L. F. G. I. **Test Results of an Internet RTK System Based on the Ntrip Protocol**. Masala. 2004.

CINTRA, J. P.; NERO, M. A.; RODRIGUES, D. GNSS/Ntrip service and technique: accuracy test. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, abr-jun 2011. 257-271.

COSTA, S. M. A. et al. **RBMC em tempo real, via Ntrip, e seus benefícios nos levantamentos RTK e DGPS**. II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife: [s.n.]. 2008.

DAMMALAGE, T. L.; SAMARAKOON, L. Test results of RTK and Real-Time DGPS corrected observations based on Ntrip protocol. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Beijing, XXXVII, 2008. 1119-1123.

EL-RABBANY, A. **Introduction to GPS: the Global Positioning System**. Norwood: Artech House, 2002.

FENG, Y.; WANG, J. GPS RTK Performance Characteristics and Analysis. **Journal of Global Positioning Systems**, v. 7, n. 1, p. 1-8, 2008.

FORD Fiesta Rocam Hatch. **Dimensões do Fiesta Rocam Hatch**, 2012. Disponível em: <<http://fiesta-rocam-hatch.blogspot.com.br/2012/11/dimensoes-do-fiesta-rocam-hatch.html>>. Acesso em: 10 Outubro 2017.

GLONASS. **INFORMATION AND ANALYSIS CENTER FOR POSITIONING, NAVIGATION AND TIMING.** Disponível em: <<https://www.glonass-iac.ru/en/index.php>>. Acesso em: 8 Fevereiro 2018.

GPS. **Official U.S. government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics.** Disponível em: <<https://www.gps.gov/>>. Acesso em: 6 Fevereiro 2018.

GROVES, P. D. **Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems.** Norwood: Artech House, 2008.

GSA. **European GNSS Agency.** Disponível em: <<https://www.gsa.europa.eu/>>. Acesso em: 8 Fevereiro 2018.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. **GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more.** Wien: Springer, 2008.

IBGE. **Intituto Brasileiro de Geografia e Estatística.** Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 6 Fevereiro 2018.

IBGE. **Relatório de Informação da Estação POLI - São Paulo.** RBMC - Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS. São Paulo, p. 3. 2007.

IBGE. **Recomendações para levantamentos relativos estáticos - GPS.** Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro. 2008.

KAPLAN, E. D.; HEGARTY, C. J. **Understanding GPS: principles and applications.** 2. ed. Norwood: Artech House, 2006.

LANGLEY, R. B. RTK GPS. **GPS World**, p. 70-76, September 1998.

LEICK, A.; RAPOPORT, L.; TATARNIKOV, D. **GPS satellite surveying.** 4. ed. Hoboken: John Wiley&Sons, Inc., 2015.

LENZ, E. **Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (Ntrip) – Application and Benefit in Modern Surveying Systems.** FIG Working Week. Athens: [s.n.]. 2004.

MENG, X. et al. **Development of Satellite Based Positioning and Navigation Facilities for Precise ITS Applications.** IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC. [S.l.]: [s.n.]. 2008. p. 962-967.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Editora Unesp, 2008.

MONICO, J. F. G. et al. Acurácia e precisão: Revendo os conceitos de forma acurada. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, jul-set 2009. 469-483.

O Agrimensor do Futuro. **Alezi Teodolini**. Disponível em: <<http://www.agrimensordofuturo.com/>>. Acesso em: 1 Outubro 2017.

OCALAN, T.; TUNALIOGLU, N. Data communication for real-time positioning and navigation in global navigation satellite systems (GNSS)/continuously operating reference stations (CORS) networks. **Scientific Research and Essays**, 18 September 2010. 2630-2639.

OGUTCU, S.; KALAYCI, I. Investigation of network-based RTK techniques: a case study in urban area. **Arabian Journal of Geosciences**, 10 March 2016.

OLAVERRI, C. Intelligent Vehicles at the Mobile Robotics Laboratory, University of Sao Paulo, Brazil. **IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine**, p. 136-139, Janeiro 2017.

PEYRAUD, S. et al. Collaborative Methods for Real-time Localization in Urban Centers. **International Journal of Advanced Robotic Systems**, 25 August 2015.

PISSARDINI, R. D. S. et al. O problema do posicionamento para transporte terrestre no ambiente urbano. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 5, n. 3, p. 380-403, jul/set 2017. ISSN: 2317-4285.

PISSARDINI, R. D. S.; WEI, D. C. M.; FONSECA JUNIOR, E. S. D. **Veículos autômos: Conceitos, histórico e estado-da-arte**. XXVII ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. Belém: [s.n.]. 2013.

PIVARO, G. F. **Redução de taxa de queda de chamada em rede celular GSM por meio de ajustes dos parâmetros de cobertura**. EESC-USP. São Carlos. Dissertação (mestrado). 2008.

RIZOS, C. Alternatives to current GPS-RTK services and some implications for CORS infrastructure and operations. **GPS Solutions**, 22 February 2007. 151-158.

RIZOS, C.; HAN, S. Reference Station Network Based RTK Systems - Concepts and Progress. **Wuhan University Journal Of Natural Sciences**, 2003. 566-674.

RTCM. **RTCM STANDARD 10403.1 FOR DIFFERENTIAL GNSS (GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS) SERVICES – VERSION 3**. RTCM SPECIAL COMMITTEE NO. 104. Arlington: [s.n.]. 2006. p. 98.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy**. 2. ed. Berlin: Walter de Gruyter, 2003.

SILVA, H. D. R.; MONICO, J. F. G.; ALVES, D. B. M. Análise do Desempenho do RTK em Rede no Brasil sob Efeito da Cintilação Ionosférica. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, p. 2083-2102, nov/dez 2016. ISSN 1808-0936.

SOUZA, A. D. N.; GARNÉS, S. J. D. A.; MARQUES, H. A. Avaliação do Posicionamento GNSS Obtido Pelos Métodos Cinemático RTK/Ntrip e PPP. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, p. 1117-1133, set/out 2014. ISSN 1808-0936.

SPECTRA PRECISION. **ProMark 220 Brochure**. Trimble Navigation Limited. Westminster, p. 4. 2012.

SPECTRA PRECISION. **Increased Productivity in Harsh Environments with Spectra Precision Z-Blade Technology**. Trimble Navigation Limited. Westminster, p. 7. 2013.

SPECTRA PRECISION. **ProMark Field Software - Getting Started Guide From V3.5.3**. Trimble Navigation Limited. Westminster, p. 72. 2013.

STEPHENSON, S. et al. Network RTK for intelligent vehicles: Accurate, reliable, available, continuous positioning for cooperative driving. **GPS World**, p. 61-67, February 2013.

SUPERGEO. **Supergeo Technologies Inc.** Disponível em: <<http://www.supergeotek.com/>>. Acesso em: 03 dez. 2017.

TEUNISSEN, P. J. G. GPS carrier phase ambiguity fixing concepts. **GPS for Geodesy**, v. 60, 1996. ISSN 978-3-540-60785-4.

TEUNISSEN, P. J. G. Theory of Carrier Phase Ambiguity Resolution. **Wuhan Journal of Natural Sciences**, 2003. 471-484.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Diretrizes para apresentação de dissertações e teses**. 4. ed. São Paulo: Divisão de Biblioteca da Epusp, 2013.

URADZINSKI, M.; KIM, D.; LANGLEY, R. B. **The Usefulness of Internet-based (Ntrip) RTK for Navigation and Intelligent Transportation Systems**. ION GNSS 21st. International Technical Meeting of the Satellite Division. Savannah: [s.n.]. 2008. p. 1437-1445.

VAZ, J. A.; PISSARDINI, R. D. S.; FONSECA JUNIOR, E. S. D. Comparação da cobertura e acurácia entre os sistemas GLONASS e GPS obtidas dos dados de observação de uma estação da RBMC. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, n. 65, p. 529-539, 2013. ISSN 1808-0936.

VE6XL. **Radio Station VE6XL**. Disponível em: <<http://www.ve6xl.ca/index.htm?propagationinfo.htm>>. Acesso em: 6 Fevereiro 2018.

WEBER, G.; DETTMERING, D.; GEBHARD, H. Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (Ntrip). **A Window on the Future of Geodesy**, 2005. 60-64.

WILLIAMS, T. et al. Evaluation of GPS-based methods of relative positioning for automotive safety applications. **Transportation Research Part C**, 2012. 98-108.

ZHAO, S. et al. **Application of BeiDou Navigation Satellite System on Attitude Determination for Chinese Space Station**. China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2015. [S.l.]: Springer. 2015. p. 14.