PEDRO LUIZ MARTINEZ FACIN

Análise da acurácia e da precisão do posicionamento RTK utilizando o
receptor u-blox LEA-6T e o software RTKLib

São Paulo

2016

PEDRO LUIZ MARTINEZ FACIN

Análise da acurácia e da precisão do posicionamento RTK utilizando o receptor u-blox LEA-6T e o software RTKLib

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

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Luiz Marte

São Paulo

2016

PEDRO LUIZ MARTINEZ FACIN

Análise da acurácia e da precisão do posicionamento RTK utilizando o receptor u-blox LEA-6T e o software RTKLib

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. Cláudio Luiz Marte

São Paulo

2016

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

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, dede 2016

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

Catálogo da Publicação

Facin, Pedro Luiz Martinez

ANÁLISE DA ACURÁCIA E DA PRECISÃO DO POSICIONAMENTO RTK UTILIZANDO O RECEPTOR U-BLOX LEA-6T E O SOFTWARE RTKLIB/P. L. M. Facin – versão corr. – São Paulo, 2016.

97 p.

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

1.GNSS 2.RTK 3.Posicionamento 4.Acurácia 5.Precisão I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t

AGRADECIMENTOS

À minha família, aos meus pais, à minha irmã e às minhas avós, que mesmo morando distante sempre me incentivaram e me apoiaram em tudo. Acreditaram que seria possível realizar este trabalho o tempo todo.

À Camila, minha companheira de todos os momentos, que me apoiou incondicionalmente em muitas etapas da minha vida não sendo diferente nesta, demonstrando sua paciência nos meus piores momentos, me dando carinho e força para realizar mais este trabalho.

Ao professor Claudio Luiz Marte, pela orientação, apoio e paciência desde antes do início até o final do curso. Por todas as conversas e todo o tempo dedicado.

Aos professores Edvaldo Simões da Fonseca Junior e Ricardo Ernesto Schaal por toda oportunidade de trabalho em conjunto, discussões, apoio, aprendizado e principalmente pela paciência durante toda a condução do projeto.

À toda turma de pós-graduação, amigos e professores, que participaram da minha trajetória acadêmica, e certamente influenciaram na formação do meu repertório.

A todos meus amigos e colegas de trabalho, que me ajudaram direta ou indiretamente durante este tempo e que auxiliaram no meu desenvolvimento acadêmico e pessoal, por meio de discussões extremamente relevantes ou por muitas vezes apenas ouvindo os relatos sobre o andamento desta pesquisa.

RESUMO

Esta pesquisa aborda a aplicação do posicionamento RTK (*Real Time Kinematics*) em modo estático e cinemático, visando representar diferentes usos no cotidiano e comprovar a possibilidade de gerar uma solução de posicionamento RTK de baixo custo. Desde empresas de topografia e locação de obras, passando por empresas geradoras de bases cartográficas, até o segmento do transporte público por ônibus, o uso desta tecnologia, por um valor de aproximadamente R\$ 3000,00, pode viabilizar novas oportunidades, como o georreferenciamento com maior acurácia tanto de imóveis rurais quanto de monitoramento de frotas de veículos e a atualização de mapas viários. Para isso, foi gerada uma solução de posicionamento RTK com um receptor GPS (*Global Positioning System*) móvel, um laptop, um celular com chip GSM (*Global System for Mobile Communication*), conexão 3G ou via *wi-fi* e o software livre RTKLib para correção e fixação do posicionamento, além de conexão com estações da RBMC-IP (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo). O RTKLib se sincroniza com o receptor GPS u-blox (sinal L1 e constelação GPS), o qual compacta as observações de fase para o envio dos dados. Os resultados demonstraram que, dependendo da solução RTK (*fix* ou *float*), o posicionamento atingiu acurácias abaixo de 1 metro e precisão nesta mesma ordem de grandeza para linhas de bases menores que 10 km. Com linhas de base mais longas, o resultado degradou, conforme o esperado. Os testes cinemáticos indicaram acurácia de até 1,5 metro, podendo ser utilizado como produto para estimativas de trajeto. Além dos resultados qualitativos e quantitativos, a principal contribuição desta pesquisa foi o desenvolvimento de uma metodologia específica, na área de soluções de posicionamento RTK, que trouxe, através da utilização de ferramentas estatísticas, ganhos de produtividade significativos em termos de tempo, equipamentos e mão de obra necessária, pois explorou não somente um maior tempo de rastreamento nos testes estáticos, mas cobriu também testes cinemáticos.

PALAVRAS CHAVES: GNSS. Acurácia. Precisão. RTK. Posicionamento Relativo.

ABSTRACT

The present research evaluates the application of Real Time Kinematics (RTK) positioning in static and kinematic mode for different daily activities and verify the potential to generate a RTK positioning solution. The use of this technology with a low cost system may be useful for different segments, since companies engaged with topographic surveys and construction activities, logistic companies and even public transportation, by offering a solution with more accuracy and precision and can also represent a market opportunity for rural properties, fleet monitoring and map databases update. In order to make feasible this purpose, it was generated a RTK positioning solution using a mobile *Global Positioning System* (GPS) receiver, a notebook, an smartphone equipped with Global System for Mobile Communication (GSM) device and provided with 3G or wifi connection, the software RTKLib to fix and obtained a fixed positioning and the monitoring stations of the Continuous Monitoring Brazilian Network (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo - RBMC-IP). The software is connected with the receiver GPS u-blox (L1 signal and GPS constellation) which is the responsible for adjust the phase information in a format and size suitable to the data exchange. The main advantage of this solution is that only one person is required to collect the field data and the feasibility of RTK/GSM technique usage in steep topography areas, consequently increasing productivity during projects execution. The results indicate that, depending on the kind of RTK positioning solution generated, fix or float, the positioning obtained accuracy rates lower than 1 meter, however with some sensitivity and variability and precision in the same magnitude for baseline lower than 10 kilometres; while the results for long baselines (higher than 100 kilometres) did not present the same accuracy/precision, as expected. Kinematics tests showed good accuracy prescribing estimation path usage. Besides quantitative and qualitative results, the main contribution of this research was the development of a specific methodology in the area of RTK positioning solution, that brought by statistical tools productivity gains in terms of time collection, equipment and manpower required, since exploited not only a longer time in static tests but also covered kinematic tests.

KEY WORDS: GNSS. Accuracy. Precision. RTK. Relative Positioning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Erro de posicionamento em função da geometria e erro das medidas	24
Figura 2: Efeito multicaminhamento	25
Figura 3: Conceito básico de posicionamento relativo	26
Figura 4: RTCM SC-104 version 3.0 message frame.....	40
Figura 5: Estações de Referência do IBGE para o processamento em tempo real e o pós-processamento de coordenadas.	42
Figura 6: Equipamentos utilizados para o rastreo realizado no Pilar 1 da raia olímpica da USP	47
Figura 7: Pontos utilizados como base e referência nos testes.....	48
Figura 8: Teste cinemáticos e segmentos de reta analisados.....	49
Figura 9: Circuito eletrônico do receptor GPS u-blox.	52
Figura 10: Interface do RTKLib	53
Figura 11: Modelo da Choke-Ring (2D).....	54
Figura 12: Acurácia e Precisão – Estimador tendencioso	56
Figura 13: A média das observações projetada em direção ao ponto final da curva pode estar desmembrado do resto da curva	62
Figura 14: <i>Boxplot</i> do teste T01	67
Figura 15: <i>Boxplot</i> do teste T02	68
Figura 16: <i>Boxplot</i> do teste T03	69
Figura 17: <i>Boxplot</i> do teste T04	70
Figura 18: <i>Boxplot</i> do teste T05	71
Figura 19: <i>Boxplot</i> do teste T06	72
Figura 20: <i>Boxplot</i> do teste T07	73
Figura 21: Exemplo de configuração de posicionamento da estação base no RTKLib	74

Figura 22: Linha de base entre o rover e a estação SJSP0 com solução fixa	74
Figura 23: <i>Boxplot</i> do teste T08	75
Figura 24: <i>Boxplot</i> do teste T09	76
Figura 25: <i>Boxplot</i> do teste T10	77
Figura 26: Segmentos de retas analisados	78
Figura 27: Curva principal da Análise 1 com pontos RTK	81
Figura 28: Zoom da Curva Principal da Análise 1	82
Figura 29: Início do trajeto da Análise 1 na Avenida Professor Mello de Moraes.....	83
Figura 30: Curva principal da Análise 2 com pontos RTK	86
Figura 31: Zoom da Curva Principal da Análise 2	87
Figura 32: Início do trajeto da Análise 2 na Avenida Professor Lineu Prestes	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais erros envolvidos nas observações GNSS.....	21
Tabela 2: Grupo de mensagens RTK versão RTCM 3.1	39
Tabela 3: Coordenadas UTM oficiais do IBGE (Datum SIRGAS – Época de Referência 2000,4)	46
Tabela 4: Medidas de acurácia de uma componente espacial.....	57
Tabela 5: Lista de testes estáticos realizados	64
Tabela 6: Lista de parâmetros e materiais utilizados nos testes	65
Tabela 7: Testes Cinemáticos realizados para a Análise 1	80
Tabela 8: Testes realizados e porcentagem de solução RTK	85

LISTA DE SIGLAS

BKG: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie.

CDGPS: Canada wide DGPS Service.

CPTEC: Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos.

DD: Duplas Diferenças.

DGPS: Differential Global Positioning Systems.

DOP: Dilution of Precision.

EMBRACE: Programa de Estudo e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial.

GLONASS: Global Navigation Satellite System.

GNSS: Global Navigation Satellite Systems.

GPRS: General Package Radio Service.

GSM: Global System for Mobile Telecommunication.

HTTP: Hypertext Transfer Protocol.

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

INCRA: Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária.

INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

IP: Internet Protocol.

KML: Keyhole Markup Language.

LAMBA: Least-squares Ambiguity Decorrelation Adjust Ment.

MSC: Master Control Station.

NAVSTAR-GPS: Navigation Satellite with Time and Ranging – Global Positioning System.

NrCan: Natural Resources Canada.

NTRIP: Global System for Mobile Telecommunication.

OSM: Open Street Map

OTF: On-The-Fly.

PPP: Precise Pointing Positioning.

RBMC-IP: Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo.

RTCM: Radio Technical Committee for Maritime Service.

RTK: Real Time Kinematics.

SA: Selective Availability.

SBAS: Satellite-based augmentation systems.

SIM: Subscriber Identity Module.

SIPEG: Sistema Integrado de Posicionamento para Estudos Geodinâmicos.

SIRGAS: Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas.

TCP: Transmission Control Protocol.

URSS: União das Repúblicas Socialistas Soviéticas.

USP: Universidade de São Paulo.

UTM: Universal Transverso de Mercator.

VRS: Virtual Reference Station.

WADGPS: Wide Area Differential GPS.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Objetivos	12
1.1.1	Objetivo Geral	12
1.1.2	Objetivos Específicos	12
1.2	Justificativa	12
2	REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1	Caracterização da Tecnologia de Posicionamento por Satélites	15
2.1.1	Observáveis GNSS	17
2.1.2	Erros nas observáveis GNSS	20
2.1.2.1	Erros nos relógios dos satélites	22
2.1.2.2	Geometria dos Satélites	23
2.1.2.3	Efeitos atmosféricos	24
2.1.2.4	Multicaminhamento	24
2.1.3	Posicionamento relativo	26
2.1.3.1	Posicionamento relativo estático	29
2.1.3.2	Posicionamento relativo estático-rápido	30
2.1.3.3	Posicionamento relativo semicinemático	30
2.1.3.4	Posicionamento relativo cinemático	30
2.1.3.5	Posicionamento relativo a partir do código C/A	30
2.1.4	RTK E DGPS	31
2.1.4.1	Posicionamento Cinemático em Tempo Real (RTK)	31
2.1.4.2	Differential GPS (DGPS)	33
2.1.4.3	Método de solução das ambiguidades	33
2.2	Aplicações GNSS/RTK de baixo custo e seus resultados	34

2.3	Caracterização da Transmissão e Recepção de Dados.....	37
3	MATERIAIS E MÉTODOS	46
3.1	Área de Estudo.....	46
3.2	Equipamentos e Aplicativos	50
3.3	Análises de Dados.....	55
3.3.1	Análise Exploratória de Dados	58
3.3.1.1	<i>Box Plot</i>	59
3.3.1.2	Análise da Curva Principal (<i>Principal Curve Analysis</i>).....	60
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
4.1	Testes Estáticos	64
4.2	Testes Cinemáticos	78
5	CONCLUSÕES	89
	REFERÊNCIAS.....	91

1 INTRODUÇÃO

A utilização do sistema *Global Navigation Satellite Systems* (GNSS) é considerada uma das principais tecnologias, juntamente com as telecomunicações, a computação em rede e os bancos de dados geoespaciais, no desenvolvimento de aplicações para navegação e transportes, pois possibilita maior confiabilidade, flexibilidade e velocidade relativas ao posicionamento, além da redução de custos em combinação com posições mais acuradas (MENG *et al.*, 2008).

O posicionamento e o rastreamento de pessoas e veículos popularizaram esse sistema, pois receptores GNSS estão inclusos em muitos dispositivos, como automóveis e aparelhos celulares. Entretanto, os aparelhos celulares fornecem acurácia entre 1 e 10 metros, pois utilizam GNSS em *chipsets* embutidos, que são definidos pela comunidade geodésica como de baixo custo quando comparados aos receptores profissionais de alto nível (e alto custo) e que geralmente fornecem acurácias de alguns centímetros em navegação em tempo real (CALDERA, 2013).

Tendências tecnológicas na miniaturização de componentes e fabricação em grande escala levaram a uma proliferação de componentes de receptores GPS de baixo custo. As aplicações vão desde o fornecimento de uma fonte de tempo de referência para a sincronização de redes de computadores até a orientação de veículos robóticos. O sistema GNSS é utilizado em todo o mundo, com 3,6 bilhões de dispositivos GNSS em uso em 2014. Em 2019, este número está previsto para aumentar para mais de 7 bilhões - para uma média de um dispositivo por pessoa no planeta (GSA, 2015).

Há receptores populares e receptores GPS que são capazes de garantir acurácias sub-métricas, tanto em tempo real quanto em pós-processamento, devido à utilização adequada das observáveis da fase da portadora e a capacidade de receber correções diferenciais de GNSS provindas de Redes de Estações Permanentes e de Satélites. (CINA, 2009).

Os vários satélites em órbita fornecem informações de posicionamento a receptores móveis, as quais relativamente podem se tornar mais precisas utilizando estações de referência, por meio dos métodos *Real Time Kinematics* (RTK) e *Differential Global Positioning Systems* (DGPS), baseados no modo diferencial. O desenvolvimento de

sistemas de acesso à Internet móvel através de GPRS (*General Package Radio Service*), Internet e GSM (*Global System for Mobile Telecommunication*), fornecem um rápido e confiável método para transmitir correções diferenciais (DGPS/RTK) para um receptor GNSS em qualquer área coberta pela telefonia móvel. Essa é a grande vantagem da transmissão das observações de fase pela técnica RTK/GSM com relação à técnica RTK/UHF.

Convencionalmente, mesmo com essa vantagem, a técnica RTK tem sido utilizada quase que limitadamente para aplicações de levantamento geodésico. Porém, nos dias atuais, seu uso vem sendo continuamente ampliado para diversas áreas, como o sistema de mapeamento móvel, navegação precisa de veículos, controle de máquinas de construção e agricultura de precisão. Apesar de ainda pouco difundida no Brasil, o seu vasto uso em outros países demonstra que há um grande potencial de exploração dessa tecnologia para aplicações muito mais amplas no país.

Na técnica RTK/GSM, os dados são transmitidos no protocolo de transporte *Networked Transport of RTCM* (NTRIP) via *Internet Protocol* (IP), em formato definido pelo *Radio Technical Committee for Maritime Service* (RTCM), um protocolo genérico baseado no *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP) que possibilita a transmissão de dados de correção DGPS ou RTK via internet, permitindo conexões simultâneas de computadores PCs, Laptops, tablets e smartphones que possuem acesso à Internet móvel, como por exemplo: GPRS, GSM, 3G e 4G (de terceira e quarta geração).

A partir de 2009, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) passou a disponibilizar dados de algumas estações através da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC-IP), visando a obtenção de coordenadas (latitude, longitude e altitude) em tempo real, proporcionando melhor qualidade, para os usuários que fazem uso da técnica RTK ou DGPS nos seus levantamentos. As correções dos sinais dos satélites GNSS são transmitidas, em tempo real, da estação de referência para uma estação (móvel) a qual se deseja determinar, com melhor qualidade, as suas coordenadas. A revisão literária sobre as técnicas de posicionamento relativo bem como sobre o método de posicionamento RTK e o serviço NTRIP é apresentada no capítulo 2.

O objetivo dessa pesquisa é analisar a precisão das coordenadas bidimensionais de uma solução de posicionamento RTK, em tempo real, com apenas um receptor GNSS

móvel, um laptop, celular com chip GSM (modem 3G ou wireless) e um software gratuito para correção e fixação do posicionamento. A grande diferença em relação a outros métodos, nos quais é utilizado apenas um chip GSM - *Subscriber Identity Module* (SIM) introduzido no receptor GNSS móvel (necessário para a conexão com a estação de referência mais próxima para a obtenção das observações de fase), foi a utilização do receptor GNSS da marca u-blox¹ (cujo valor foi de R\$ 1000,00), conectado ao laptop. Este dispositivo possui configurações básicas como: sinal L1 e recepção apenas de satélites da constelação GPS. A capacidade de gerar e/ou interpretar o protocolo RTCM, o qual compacta as observações de fase em um formato e tamanho adequados para o envio, foi feita por meio do software livre RTKLib, instalado no laptop. Dessa forma, o processamento das observações foi feito no laptop e qualquer estação RBMC-IP pode ser utilizada como estação base de referência.

Para chegar a análise da acurácia e da precisão, foram realizados testes de campo nos modos estático e cinemático, na Cidade Universitária da Universidade de São Paulo (USP), em São Paulo. Os testes estáticos foram observados nos pilares da raia olímpica e em alguns pontos próximos à Estação POLI do IBGE. Já os cinemáticos foram feitos com veículo automotor no perímetro viário da Cidade Universitária. A metodologia utilizada na pesquisa é apresentada no capítulo 3.

No capítulo 4 são feitas as análises e apresentados os resultados processados de duas formas: para os testes estáticos é realizada uma análise descritiva dos dados por meio de *box plots* para uma visualização exploratória da distribuição dos resultados, dos *outliers*, da mediana e do desvio padrão; já para os testes cinemáticos foi utilizado um pacote do software estatístico R, o qual ajustou os pares de coordenadas em uma média, criando um segmento de reta passando pelos valores intermediários de todos os pares gerados, mas ao mesmo tempo, também se utilizando da análise exploratória de dados.

Por fim, no capítulo 5 é abordada a conclusão e as perspectivas de trabalhos futuros em linha com a pesquisa realizada.

¹ u-blox: empresa suíça fabricante de semicondutores e módulos de posicionamento GNSS.

1.1 Objetivos

1.1.1 *Objetivo Geral*

O objetivo geral é analisar a acurácia e a precisão do posicionamento RTK/GNSS (em modo estático e cinemático), com receptor de frequência única (como uma alternativa de baixo custo), em tempo real.

1.1.2 *Objetivos Específicos*

- 1) Atingir uma precisão e uma acurácia com valor inferior a 1 metro;
- 2) Analisar a acurácia e a precisão do posicionamento gerado utilizando o software livre RTKLib; e
- 3) Analisar descritivamente os dados, buscando a variação da precisão e da acurácia em função do comprimento da linha de base².

1.2 Justificativa

O posicionamento exato de objetos estáticos ou em movimento com a acurácia no alcance de alguns poucos centímetros tem sido possível com a utilização de sensores geodésicos por aproximadamente 20 anos. A maior parte das aplicações RTK possuem receptores de dupla ou tripla frequência e se utilizam de várias constelações de satélites.

Comumente, receptores e antenas geodésicas são necessários para atingir uma performance GNSS-RTK, enquanto que receptores de frequência única e antenas de baixo custo não são utilizados devido à baixa performance. No entanto, receptores e

² Linha de base: é a distância entre o receptor base (estação de referência) e o móvel.

antenas geodésicos ainda possuem um valor maior que os receptores GNSS mais populares e de frequência única. Esta é uma das razões pelas quais o GNSS-RTK não se popularizou e não atingiu todos os níveis de consumidores do segmento.

Mas, surgem novas oportunidades de investimentos em áreas como monitoramento de estruturas civis e pesquisa de campo (geociências, mineração, manejo florestal, etc.). Alguns benefícios potenciais do posicionamento RTK, por exemplo relacionados ao setor de transportes incluem: níveis mais elevados de segurança e mobilidade para todos os usuários do sistema de transporte de superfície; determinação mais precisa do posicionamento para proporcionar uma maior informação dos passageiros; monitoramento efetivo para garantir a adesão aos horários e assim criar um sistema de trânsito mais ágil para as necessidades do usuário nos transportes; melhores informações de localização com mapas eletrônicos para fornecer sistemas de navegação em veículos para usuários comerciais e privados em tempo real.

Nos casos em que não houve a fixação do posicionamento RTK, o uso de uma solução flutuante (*float*) de ambiguidade por si só proporcionaria uma importante melhoria sobre algoritmos baseados em pseudodistância³, essencialmente na mitigação do multicaminhamento, com resultados de variação da acurácia e da precisão próximos de 1 metro.

Caso essa técnica esteja disponível para o usuário a preços mais acessíveis, um maior número de consumidores, os quais necessitam de um posicionamento mais acurado, passaria a utilizá-la e, dessa forma, muitas aplicações GNSS-RTK poderiam se tornar possíveis.

Esta pesquisa contribui por apresentar resultados qualitativos e quantitativos, desenvolvendo uma metodologia específica na área de soluções de posicionamento RTK, que podem trazer ganhos de produtividade significativos em termos de tempo, equipamentos e mão de obra necessária. Há uma tendência na diminuição do tempo

³Pseudodistâncias: medida de distância entre a antena do satélite, no instante de transmissão do sinal, e a antena do receptor, no instante de recepção

e da habilidade necessária para a coleta de dados de alta precisão e os projetos consequentemente serão concluídos em um tempo menor.

Além disso, a implementação do posicionamento estático utilizando receptores de baixo custo, de frequência única de GPS, mesmo em linhas de base de dezenas de quilômetros, pode abrir caminho para uma adoção em diferentes setores do mercado (logística, transporte público, rastreamento de frotas e seguradoras).

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Caracterização da Tecnologia de Posicionamento por Satélites

Desde remotas civilizações, o homem se preocupa em saber qual sua localização. Primeiramente para determinar sua área de ocupação e, em seguida, para explorar e desbravar novos territórios. O posicionamento dos objetos na superfície da Terra sempre foi uma busca importante para diversas áreas, especialmente na navegação e em questões de limites entre países.

Com a corrida armamentista entre os Estados Unidos e a extinta União das Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS) surgiu então, com tecnologia americana, o sistema *Navigation Satellite with Time and Ranging – Global Positioning System* (NAVSTAR-GPS), e com tecnologia soviética, o sistema *Global Navigation Satellite System* (GLONASS). Além deles, atualmente o sistema Galileo (europeu) e o sistema Beidou (chinês) completam o quarteto dos GNSS.

O sistema GPS entrou em operação em 1991 e em 1993 a constelação dos satélites utilizados pelo sistema foi concluída. Este sistema foi projetado de forma que em qualquer lugar do mundo e a qualquer momento existam pelo menos quatro satélites acima do plano horizontal do observador (BLITZKOW, 1995).

A posição GPS é baseada na medição de distâncias entre os satélites e os receptores. Os satélites GNSS funcionam como pontos de referência no espaço e assume-se que as posições dos satélites são precisamente conhecidas. Então, um receptor GNSS, com base na medição do intervalo de tempo decorrido entre a transmissão dos sinais pelos satélites e sua recepção, determina a sua distância a três satélites no espaço, usando tais distâncias como raios de três esferas, cada uma delas tendo um satélite como centro.

Este intervalo de tempo, referido como o tempo de propagação do sinal, é depois multiplicado pela velocidade do sinal (por exemplo, velocidade do som ou a velocidade da luz) para se obter a distância do satélite até o receptor. Ao medir o tempo de propagação do sinal de transmissão de múltiplos emissores (ou seja, os instrumentos

de navegação) em locais conhecidos, o receptor pode determinar a sua posição (KAPLAN, 2006).

O sinal do GPS é composto de um código de baixa frequência (código C/A, código P) modulado em uma onda portadora de alta frequência (L1 e L2). Os dois principais tipos de observáveis do GPS são pseudodistância e fase da portadora. A pseudodistância é a medida de distância geométrica entre o satélite e a antena do receptor. É chamada de pseudodistância em função do não sincronismo entre os relógios (osciladores) responsáveis pela geração do código no satélite e sua réplica no receptor (MONICO, 2008).

O posicionamento por GNSS pode ser realizado por diferentes técnicas e observáveis, as quais fornecem níveis de precisão que variam desde algumas dezenas de metros até poucos milímetros. Ressalta-se que a observável utilizada no processo de estimação das coordenadas é um dos principais fatores que influenciam os níveis de precisão alcançados. Devido à precisão da medida da fase da onda portadora ser da ordem de milímetros, ela é a observável indispensável na obtenção de posicionamentos que requeiram melhor precisão.

Os receptores, de uma forma geral, podem ser classificados segundo as aplicações a que se destinam. E como as aplicações estão intimamente ligadas ao tipo de sinal GPS utilizado, os tipos de receptores diferenciam-se segundo a(s) componente(s) do sinal que é (são) rastreada(s).

Basicamente, existem aqueles que se destinam às aplicações de posicionamento em tempo real (navegação), caracterizando-se pela observação do(s) código(s) C/A e P; e os que são utilizados em aplicações estáticas, que observam principalmente a fase da(s) portadora(s) L1 e L2. Naturalmente, são muitas as alternativas existentes no mercado em relação aos tipos de equipamentos disponíveis e em desenvolvimento. E esta situação ainda está longe de alcançar uma estabilidade, de forma que a descrição detalhada de todas as opções se mostra inadequada.

Os segredos que fazem do receptor GPS um dispositivo de posicionamento poderoso pode ser explicado pela capacidade de medir fases de onda da portadora para cerca de 1/100 de um ciclo, o que equivale a cerca de 2 mm de distância linear. As altas frequências (L1 e L2) penetram na ionosfera relativamente bem, já que o tempo de atraso causado pela ionosfera é inversamente proporcional ao quadrado da

frequência. Observações da fase de onda da portadora em ambas as frequências podem ser usadas para modelar e, assim, eliminar a maioria dos efeitos ionosféricos. Observações de dupla frequência são úteis especificamente quando a linha de base entre as estações é grande e quando a diminuição do tempo de observação é importante (LEICK, 2004).

2.1.1 Observáveis GNSS

Em teoria, as observáveis de navegação por satélite são faixas que são deduzidas a partir do tempo medido ou diferenças de fase com base numa comparação entre os sinais recebidos e os sinais gerados pelo receptor. Ao contrário das medições eletrônicas de distâncias terrestres, a navegação por satélite utiliza o *one-way concept*, no qual dois relógios estão envolvidos, ou seja, um no satélite e outro no receptor. Assim, os intervalos são tendenciosos por erros do relógio do satélite e do relógio do receptor, e, conseqüentemente, eles são expressos como pseudodistância (HOFMANN-WELLENHOF, LICHTENEGGER e WASLE, 2008). O desempenho do receptor GNSS depende da qualidade das medições do código (pseudodistância) e da fase de onda da portadora.

Na medida de pseudodistância, o receptor gera internamente uma réplica do código do satélite ao qual está sintonizado. Para alinhar exatamente os dois códigos, o receptor tem que introduzir um atraso no seu sinal. É esse deslocamento no tempo que é convertido em uma medida da distância entre o receptor e aquele satélite em particular. Isso introduz uma primeira limitação de resolução, que se reflete na precisão final do posicionamento. A resolução de medida da distância é de um centésimo do comprimento da onda. Portanto, a resolução da medida da distância indireta, a partir do código P, é de 30 cm, enquanto que para o código C/A é de 3 metros.

A definição de pseudodistância ρ_i , na qual i é o número do satélite com o código da pseudodistância é apresentada na equação (1) a seguir (KAPLAN, 2006):

$$\rho_i(n) = c[T_r(n) - T_{Ti}(n)](m) \quad (1)$$

onde:

c = velocidade da luz (299,792,458 m/s)

$T_r(n)$ = tempo de recebimento correspondente à época n do relógio do satélite (segundos)

$T_{Ti}(n)$ = tempo de transmissão do satélite (segundos)

A fase da onda portadora é a diferença de fase entre o sinal de frequência variável, devido ao movimento do satélite (efeito Doppler), e o sinal de frequência constante do receptor. O receptor mede a parte fracionária da fase da portadora, e a partir de então realiza a contagem do número inteiro de ciclos, à medida que a distância receptor-satélite varia. A medida desta distância tem uma resolução de cerca de 2 mm.

O posicionamento com precisão da ordem de centímetros é possível utilizando as medidas de fase da portadora. Esta é a medida mais precisa fornecida pelo GPS, com resolução da ordem de 1 mm (1σ). O receptor acumula o número de ciclos que chegam, resultando em uma medida contínua. Uma vez que a medida de fase somente pode ser obtida após a aquisição do sinal, o número inteiro de ciclos entre o satélite e o receptor permanece desconhecido. Este valor, conhecido como ambiguidade inicial de ciclos, ou apenas ambiguidade, precisa ser determinado antes de se usar as medidas de fase no posicionamento. Após a resolução das ambiguidades, a medida de fase pode ser convertida a uma medida precisa de distância entre o satélite e o receptor. Sendo assim, uma vez que as ambiguidades são resolvidas corretamente, o posicionamento com precisão de centímetros pode ser alcançado (BARONI, 2009).

Desde 1990 são desenvolvidas pesquisas buscando soluções para o cálculo das ambiguidades em tempo real. Isto deu origem aos métodos OTF (*On-The-Fly*), baseados em estimativas de mínimos quadrados, algoritmos de busca e de tratamento de perdas de ciclos. A fase da onda portadora observada (ϕ_r^s), em unidades de ciclos, é dada pela equação (2), apresentada (MONICO, 2008):

$$\phi_r^s(t) = \phi_r(t) - \phi^s(t) + N_r^s + \varepsilon_{\phi r}^s \quad (2)$$

onde:

t – instante de recepção do sinal na estação r

$\phi^s(t)$ – fase da portadora gerada no satélite (s) e recebida na estação (r) no instante da recepção

$\phi_r(t)$ – fase gerada no receptor no instante de recepção

N_r^s – ambiguidade da fase

$\varepsilon_{\phi r}^s$ – resíduos não modelados na fase da onda portadora.

Entretanto, o processo de resolução das ambiguidades não está completo sem a validação da solução. Assim, as ambiguidades resolvidas só devem ser usadas se as correções obtidas forem confiáveis. A probabilidade da estimação correta das ambiguidades pode ser calculada a priori, a partir da matriz de covariâncias e previamente ao processo de resolução (TEUNISSEN et al., 1998). Esta probabilidade, chamada taxa de sucesso, deve ser próxima de um para que as ambiguidades resolvidas possam ser aplicadas. Ainda assim, é necessário um teste para validar esta solução. Entre os testes mais comuns, que buscam minimizar a soma da forma quadrática dos resíduos, pode-se citar o teste baseado na relação entre a mínima e a segunda mínima forma quadrática dos resíduos (HAN; RIZOS, 1996; VERHAGEN, 2004 *apud* BARONI, 2009) e o teste baseado na diferença entre essas duas formas quadráticas dos resíduos e seu desvio padrão (WANG et al., 1998).

As duas medidas de fase do processo relativo resultam em observações que podem ser combinadas linearmente, para formarem equações que reduzam ou eliminam os erros inerentes ao sistema GNSS.

A acurácia com a qual cada receptor pode determinar sua posição ou velocidade, ou sincronizar no tempo GPS, depende de uma complicada interação de vários fatores. Em geral, a performance da acurácia do receptor depende da qualidade das pseudodistâncias e da fase da onda portadora, bem como da transmissão dos dados

de navegação e do número de satélites visíveis, visto que em casos de obstrução do campo de visão há uma diminuição na precisão do posicionamento devido a uma geometria menos favorável. No caso do posicionamento utilizando medidas de fase, tal diminuição pode prejudicar o resultado final, pois produz saltos no rastreamento do sinal e essas perdas de ciclos comprometem o processo de resolução das ambiguidades. Portanto, o processo de identificação e correção das perdas de ciclos é de extrema importância para o posicionamento preciso.

2.1.2 Erros nas observáveis GNSS

Existem várias fontes de erros que corrompem as medições, e estes erros podem ser divididos em grosseiros, aleatórios e sistemáticos. Estes erros devem ser bem conhecidos para a obtenção de resultados precisos. Através de técnicas de observação e processamento os erros sistemáticos podem ser modelados e eliminados. Os erros aleatórios são de natureza desconhecida, envolvendo as discrepâncias remanescentes nas observações, após a minimização ou eliminação dos erros grosseiros e sistemáticos. Os erros grosseiros são aqueles causados pelo observador, devido à falta de cuidado no momento das observações.

Segundo Camargo (1999), os erros sistemáticos que afetam o posicionamento de pontos com receptores GNSS estão relacionados com as órbitas dos satélites, erros dos relógios dos satélites e receptores; a propagação do sinal na atmosfera (refração ionosférica e troposférica), multicaminhamento do sinal, perdas de ciclo da portadora (*cycle slips*) e a SA (*Selective Availability*). Todos os erros mencionados deterioram a qualidade das observáveis GNSS e precisam ser tratados adequadamente, para que seja possível realizar um posicionamento com maior acurácia. A maioria destes erros pode ser minimizada no posicionamento relativo através de combinações lineares na modelagem funcional.

No geral, os componentes de erros são diferentes para a fase de onda da portadora, pois ela inclui a solução das ambiguidades, que é um múltiplo inteiro de um comprimento de onda (KAPLAN, 2006).

Os principais erros envolvidos nas observações GNSS estão listados na Tabela 1:

Tabela 1: Principais erros envolvidos nas observações GNSS

Fonte de Erro	Erro médio quadrático (intervalo de erro)		
	GNSS Autônomo	DGNSS	GNSS-RTK
Satélite			
órbita	1 - 2 m	removido	removido
relógio	1 - 2 m	removido	removido
Propagação do sinal (erros atmosféricos)			
ionosfera (dupla-frequência)	cm - dm		
ionosfera (melhor modelo)	1 - 2 m	quase removido	quase todo removido
ionosfera (modelo mediano)	5 - 10 m		
ionosfera (pior modelo)	10 - 50 m		
troposfera (modelo)	dm	removido	removido
<i>Subtotal*</i>	1.7 - 7 m	0.2 - 2 m	
multicaminhamento	0 - 10 m	0 - 10 m	muito reduzido
Receptor			
ruído do observador	0.2 - 1 m	0.1 - 3 m	quase todo removido
atrasos no <i>hardware</i>	dm - m		
centro de fase da antena	mm - cm		

*Os valores utilizados para o erro ionosférico médio foram entre 0.5m a 5m

Fonte: Tabela adaptada utilizando Trimble (2007) e Seeber (1993).

2.1.2.1 Erros nos relógios dos satélites

Os satélites contêm relógios atômicos que controlam toda temporização das operações a bordo, incluindo a geração de sinais de transmissão. Embora estes relógios sejam altamente estáveis, os campos de correção de relógio na mensagem de dados de navegação são dimensionados de tal modo que o desvio entre o tempo do satélite e o tempo do receptor GNSS pode ser tão grande quanto 1 milissegundo (um deslocamento de 1 milissegundo se traduz em um erro de pseudodistância de 300 km). A MCS (*Master Control Station*) determina e transmite parâmetros de correção do relógio para os satélites, para retransmissão da mensagem de navegação. Estes parâmetros de correção são implementados pelo receptor usando uma polinomial de segunda ordem, como apresentado na equação (3) a seguir (KAPLAN, 2006):

$$\delta t_{clk} = \alpha_{f0} + \alpha_{f1}(t - t_{oc}) + \alpha_{f2}(t - t_{oc})^2 + \Delta t_r \quad (3)$$

na qual:

α_{f0} = ajuste do relógio (s)

α_{f2} = deriva do relógio (s/s)

t_{oc} = frequência da deriva (s/s²)

t = referência de tempo do relógio (s)

Δt_r = época de tempo atual (s)

A correção do Δt_r compensa um dos três efeitos relativísticos (o do tempo fornecido pelos relógios dos satélites). Desde que estes parâmetros são computados utilizando uma curva logística para prever estimativas dos erros de satélites atuais, alguns resíduos de erros permanecem. Este erro residual do relógio δt resulta numa variação de erro tipicamente entre 0.3-4m, dependendo do tipo do satélite e da época de transmissão de dados (KAPLAN, 2006).

2.1.2.2 Geometria dos Satélites

As informações orbitais podem ser obtidas através das efemérides transmitidas ou das efemérides precisas. Esta última resulta de um processamento de dados coletados pelas estações rastreadoras, atingindo uma precisão de 10 partes por bilhão (MONICO, 1996). A disponibilidade destas efemérides aos usuários, porém, só ocorre uma semana após a coleta de dados. Enquanto, as efemérides transmitidas são utilizadas, principalmente, no posicionamento em tempo real. A exatidão desta medida, porém, não é suficiente nas situações em que a precisão deve estar associada a grandes distâncias (SEEBER, 1993). Logo, os erros orbitais ocorrem devido às discrepâncias entre as efemérides transmitidas pelos satélites e sua posição orbital verdadeira, afetando diretamente a medida de posicionamento do receptor.

A medida instantânea da geometria é a diluição da precisão (*Dilution of Precision - DOP*). Quanto maior o número de satélites possíveis de serem captados no horizonte da antena receptora, maior será a precisão das coordenadas do ponto medido. O fator DOP descreve o efeito da distribuição geométrica dos satélites no espaço sobre a acurácia obtida na solução de navegação, conforme a Figura 1. Quanto menores forem os valores dos diferentes DOPs, melhor será a situação de configuração de satélites para a realização da sessão de observação, sendo divididos em diferentes diluições de precisão (KAPLAN, 2006):

- GDOP – acurácia da geometria no posicionamento e no tempo;
- PDOP – acurácia no posicionamento;
- TDOP – acurácia no tempo;
- HDOP – acurácia no posicionamento horizontal;
- VDOP – acurácia na direção vertical.

Figura 1: Erro de posicionamento em função da geometria e erro das medidas

Fonte: Traduzido de HOFMANN-WELLENHOF, LICHTENEGGER e WASLE (2008).

2.1.2.3 Efeitos atmosféricos

A velocidade de propagação de uma onda em um meio pode ser expressa pelo índice de refração do meio. O índice de refração é definido como uma relação da velocidade de propagação da onda no espaço livre para o meio pela Equação (4):

$$n = \frac{c}{v} \quad (4)$$

onde c é a velocidade da luz igual a 299.792.458 m/s do mesmo modo que é definida dentro do sistema WGS-84. O meio é dispersivo se a velocidade de propagação (ou, equivalentemente, o índice de refração) é a função da onda da frequência. Em um meio dispersivo, a velocidade da propagação v_p do sinal de fase da onda da portadora difere da velocidade v_g associada com as ondas que carregam o sinal da informação. Os aspectos de carregamento da informação podem ser pensados como um grupo de ondas viajando por frequências ligeiramente diferentes (KAPLAN, 2006).

2.1.2.4 Multicaminhamento

Multicaminhamento é a recepção da réplica do desvio ou da reflexão do sinal desejado, conforme o exemplo na Figura 2. Desde que o caminho viajado por uma

reflexão seja sempre maior do que o caminho direto, o multicaminhamento chegará com atraso em relação ao caminho direto. Quanto mais o receptor rastreia o caminho direto, mais multicaminhos podem ser resolvidos e pouco afetam a performance.

Não há um modelo geral do efeito de multicaminhamento, por conta da dependência da situação geométrica no tempo-espaço. No entanto, a influência do multicaminhamento pode ser estimada pelo uso da combinação da dupla frequência das medidas do código e da fase da onda portadora.

Figura 2: Efeito multicaminhamento

Fonte: Traduzido de HOFMANN-WELLENHOF, LICHTENEGGER e WASLE (2008).

2.1.3 Posicionamento relativo

O objetivo do posicionamento relativo é determinar as coordenadas de um ponto desconhecido em relação a um ponto conhecido, reduzir ou mesmo eliminar as fontes de erro por medições diferenciais GNSS obtidas em diferentes estações na mesma época. Em outras palavras, o posicionamento relativo tem por finalidade a determinação do vetor entre os dois pontos, o que é muitas vezes chamado de vetor de linha de base ou simplesmente linha de base, como ilustrado na Figura 3 (HOFMANN-WELLENHOF, LICHTENEGGER e WASLE, 2008):

Figura 3: Conceito básico de posicionamento relativo

Fonte: Traduzido de KAPLAN (2006).

Sendo A o ponto de referência, B o ponto desconhecido e b_{AB} o vetor da linha de base. Introduzindo a posição correspondente dos vetores X_A , X_B , na equação (5):

$$X_B = X_A + b_{AB} \quad (5)$$

pode ser formulada e os componentes da linha de base são descritos pela equação (6):

$$\mathbf{b}_{AB} = \begin{bmatrix} X_B - X_A \\ Y_B - Y_A \\ Z_B - Z_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_{AB} \\ \Delta Y_{AB} \\ \Delta Z_{AB} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Originalmente, o posicionamento relativo foi concebido para o pós-processamento. Assim, este método foi e ainda é utilizado especialmente para levantamentos geodésicos. Atualmente, a transferência de dados em tempo real é rotineiramente aplicada, o que permite o cálculo em tempo real de vetores de referência, proporcionando o RTK (HOFMANN-WELLENHOF, LICHTENEGGER e WASLE, 2008).

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 colem dados de, no mínimo, dois satélites simultaneamente, onde um dos receptores deve estar na estação com coordenadas conhecidas, denominada de estação de referência ou estação base (IBGE, 2009).

A fase da onda portadora é indispensável para se conseguir resultados precisos com esta técnica de posicionamento. No entanto, a pseudodistância pode ser utilizada conjuntamente com a fase ou, até mesmo, isoladamente. O princípio básico desta técnica de posicionamento é minimizar as fontes de erro através da diferença entre observações recebidas simultaneamente por receptores que ocupam duas estações (IBGE, 2008).

O posicionamento relativo por satélite GPS com nível de precisão milimétrica está baseado na medida de alta precisão da fase de batimento da onda portadora, $\varphi_r^s(t)$. Essa medida é realizada a partir da diferença entre a fase gerada pelo satélite φ_r^s , no instante de transmissão do sinal, e sua réplica gerada pelo receptor φ_r^s , no instante de recepção do sinal (MONICO *et al.* 2009). Apenas uma medida fracionária é obtida, restando um número inteiro de ciclos no instante inicial do rastreo, denominado de ambiguidade (N_r^s). Embora a medida de fase da onda portadora seja precisa, ela está sujeita a diversos erros, tais como os atmosféricos, orbitais etc. Para redução desses erros no posicionamento relativo GPS envolvendo linhas de base curtas, é muito usual o emprego das duplas diferenças de fase da onda portadora. Uma dupla diferença

envolve dois receptores (i e j) e dois satélites (p e q) da maneira apresentada pela equação (7) (MONICO, 2008):

$$\Delta \nabla \varphi_{i,j}^{p,q} = (\varphi_i^p - \varphi_j^p) - (\varphi_i^q - \varphi_j^q) = (\Delta \nabla \varphi_{i,j}^{p,q} + \Delta \nabla dm_{\varphi_{i,j}}^{p,q})/\lambda + \Delta \nabla N_{i,j}^{p,q} + v_{\varphi DD} \quad (7)$$

na qual:

- $\nabla \Delta$ é o operador que representa as duplas diferenças (DD);
- ρ_r^s é a distância geométrica, em metros, entre o satélite s , no instante de transmissão do sinal, e o receptor r , no instante de recepção;
- λ é o comprimento de onda da portadora L1;
- dm_{φ}^s é o erro de multicaminho da fase, em metros;
- ε_{φ}^s é o erro residual da fase da portadora em ciclos.

A solução de processamento dos dados mais utilizada para a determinação do posicionamento é a dupla diferença de fase, pois elimina os dos relógios dos satélites e do receptor, e ainda reduz a influência das refrações ionosféricas e troposféricas. Se os erros residuais são pequenos a dupla diferença das ambiguidades pode ser solucionada como um valor inteiro (RAY,2000).

Em condições de ionosfera “calma”, os erros atmosféricos e de órbita dos satélites são praticamente eliminados em levantamentos envolvendo linhas de base com até 10 km, proporcionando inclusive a solução das ambiguidades (IBGE, 2008). O método de solução de ambiguidades utilizado pelo receptor GNSS u-blox (receptor testado nesta pesquisa) foi o método LAMBDA, que será descrito no capítulo 3.

Nos casos de linhas de base com mais de 10 km de comprimento, recomenda-se a utilização de receptores de dupla frequência para reduzir os efeitos da ionosfera. Os efeitos residuais da troposfera, após a aplicação de um determinado modelo, podem ser estimados através de parâmetros adicionais que alguns softwares calculam. Para posicionamentos onde se busca maior precisão, as efemérides e o erro do relógio dos satélites devem ser adquiridos de fontes externas, similarmente ao Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) (IBGE, 2008).

No passado o posicionamento por ponto ou absoluto era associado com a navegação e o posicionamento relativo com levantamentos e pesquisa. O termo “relativo” era utilizado para observações de fase de onda da portadora enquanto o termo “diferencial” era utilizado para observações do código. Na prática, no entanto, não há um acordo universal sobre esses termos (KAPLAN, 2006).

2.1.3.1 Posicionamento relativo estático

No método de posicionamento relativo estático, dois ou mais receptores rastreiam os satélites visíveis por um período de tempo que pode variar de acordo com o comprimento da linha de base e a precisão requerida (INCRA, 2013). A observável normalmente usada é a dupla diferença da fase da portadora, por apresentar melhores resultados em termos de acurácia. Trata-se da técnica mais utilizada em posicionamento geodésico. Como a acurácia da fase da portadora é muito superior que a da pseudodistância, esta última não melhora os resultados significativamente quando o período de coleta de dados for longo. Apesar disso, as pseudodistâncias devem estar disponíveis, pois elas são utilizadas no pré-processamento para estimar o erro do relógio do receptor (MONICO, 2008).

Podem-se utilizar dois receptores de simples (L1) ou dupla frequência (L1 e L2). Em campo deve-se ter um receptor fixo servindo de base, coletando dados continuamente, enquanto o outro receptor percorre as áreas e pontos de interesse para coleta de dados. Não é necessária a continuidade do rastreamento durante as mudanças de pontos de interesses, nem do receptor permanentemente ligado durante o percurso. Os dados coletados dos dois receptores são processados para que se solucione o vetor de ambiguidade e se consiga uma melhor precisão.

2.1.3.2 Posicionamento relativo estático-rápido

O posicionamento relativo estático-rápido é similar ao relativo estático, porém, a diferença básica é a duração da sessão de rastreamento, que neste caso, em geral é inferior a 20 minutos. Por não haver necessidade de manter o receptor coletando dados no deslocamento entre os vértices de interesse, esse método é uma alternativa para os casos onde ocorram obstruções no intervalo entre os vértices de interesse.

2.1.3.3 Posicionamento relativo semicinemático

O posicionamento relativo semicinemático baseia-se no fato de que a solução do vetor de ambiguidades, presente numa linha de base a determinar, requer que a geometria envolvida entre as estações e os satélites se altere (MONICO, 2009). Portanto, devem-se coletar ao menos duas vezes em curtos períodos na mesma estação. As duas coletas devem estar separadas por um intervalo de tempo em torno de 20 a 30 minutos para proporcionar a alteração de geometria dos satélites.

2.1.3.4 Posicionamento relativo cinemático

No posicionamento relativo cinemático, enquanto um ou mais receptores estão estacionados no(s) vértice(s) de referência, o(s) receptor(es) que coleta(m) dados dos vértices de interesse permanece(m) em movimento. A cada instante de observação, que coincide com o intervalo de gravação, é determinado um conjunto de coordenadas.

2.1.3.5 Posicionamento relativo a partir do código C/A

Os diferentes métodos de posicionamento relativo apresentados anteriormente pressupõem a utilização da observável fase da onda portadora. O método contemplado neste tópico refere-se ao posicionamento relativo com a utilização da

observável pseudodistância a partir do código C/A e a disponibilidade de coordenadas se dá por meio de pós-processamento. Neste método também há necessidade de um ou mais receptores ocuparem vértices de coordenadas conhecidas, enquanto outro(s) coleta(m) dados dos vértices de interesse, visto que há uma precisão menor proporcionada pela pseudodistância a partir do código C/A.

2.1.4 RTK E DGPS

O conceito de posicionamento pelo RTK e pelo DGPS baseia-se na transmissão instantânea de dados de correções dos sinais de satélites, do(s) receptor(es) instalado(s) no(s) vértice(s) de referência ao(s) receptor(es) que percorre(m) os vértices de interesse. Desta forma, é proporcionado o conhecimento instantâneo (em tempo real) de coordenadas precisas dos vértices levantados.

Segundo Kaplan (2006), o RTK também é parte de um sistema GPS diferencial, já que melhora o posicionamento ou performance de tempo do GPS usando uma ou mais estações de referências, em locais conhecidos, com no mínimo um receptor GPS capaz de prover aprimoramento da acurácia, integridade ou outros dados para outros receptores (usuários) por um *link* de dados.

O DGPS usa a medida de fase da portadora no modo de posicionamento diferencial, de preferência a partir de uma única época. Na prática, múltiplas épocas ou um pequeno intervalo de tempo nas observações são frequentemente envolvidas para alcançar uma solução das ambiguidades de forma confiável, enquanto as soluções RTK são derivadas das épocas atuais.

2.1.4.1 Posicionamento Cinemático em Tempo Real (RTK)

Por se tratar de um posicionamento com o objetivo de atingir uma precisão de poucos centímetros deve ser feito um trabalho minucioso para caracterizar a performance e para abordar os processos, tais como levantamento, aquisições de dados, automação de máquinas na agricultura de precisão, mineração, construção e locação de obras, navegação e segurança veicular.

Em muitas aplicações, os usuários não estão preocupados apenas com a acurácia, mas também com a disponibilidade e integridade das soluções. Por exemplo, em uma mina a céu aberto, o custo de uma hora de interrupção do serviço RTK para a produção alcançaria o nível de um milhão de dólares (HIGGINS, 2007).

Neste tipo de posicionamento são utilizados dois receptores, um receptor base (de referência) posicionado fixamente em um ponto de coordenadas conhecidas e outro receptor móvel (*rover*) responsável por coletar os pontos de interesse do usuário para a determinação da posição em tempo real.

Segundo Seeber (1993) a tecnologia RTK é baseada nas seguintes características:

- transmissão em tempo real dos dados de fase da onda portadora e pseudodistância da estação base para a estação móvel ou as correções das mesmas;
- resolução da ambiguidade para a estação móvel com solução quase que em tempo real: *on the way* ou *on the fly*; para que haja a fixação da solução, permitindo que a acurácia chegue ao nível centimétrico no RTK;
- determinação confiável do vetor da linha de base em tempo real ou quase em tempo real.

O movimento constante da constelação de satélites GPS requer que o receptor GPS, em geral, seja capaz de suportar a mudança de frequência Doppler em L1.

Quando são utilizados receptores de frequência dupla, ambas L1 e L2 são rastreadas. A mudança na frequência surge devido ao movimento relativo entre os satélites e o receptor(es). O movimento do satélite típico em relação a um observador fixo na Terra pode resultar numa gama máxima de frequências de Doppler de ± 4000 Hz com respeito aos transportadores L1 e L2. A integração das mudanças de frequência Doppler resultam em medições extremamente precisas do avanço do sinal na fase da portadora entre as épocas de tempo. Técnicas de interferometria podem aproveitar estas medições precisas de fase e, assumindo que as fontes de erro podem ser mitigadas, posicionamentos em tempo real com acurácias centimétricas são alcançáveis. Embora as alterações no sinal da fase de uma época a outra possam ser medidas com precisão extrema, o número de ciclos de suporte integrais ao longo do caminho de propagação do satélite para o receptor continua a ser ambígua (SEEBER, 1993).

Para a transmissão de dados RTK, novos tipos de mensagens foram definidos no RTCM SC-104 versão 2.1, em 1994. Nesta versão o RTCM contém as mensagens 18 e 19 com os dados brutos de fase da onda portadora e pseudodistância. Alternativamente tem-se as mensagens 20 e 21, destinadas à serem usadas com as correções das medições feitas na estação de referência (SEEBER, 1993)

O IBGE fornece gratuitamente um serviço de RTK em rede, o qual disponibiliza dados de correção via protocolo NTRIP, em formato RTCM.

2.1.4.2 Differential GPS (DGPS)

O DGPS tem fundamento análogo ao RTK, porém a observável usada é a pseudodistância a partir do código C/A. Ele é baseado na medição da distância receptor-satélite com a observação do código e resultados instantâneos, porém não precisos.

Este método consiste no posicionamento de um receptor usuário DGPS em tempo real, o qual pode ser fixo ou móvel, com o uso das correções (diferenciais) geradas em uma estação de referência (MONICO, 2008).

2.1.4.3 Método de solução das ambiguidades

Trata-se de uma área de investigação ativa dentro do posicionamento relativo. Como regra geral, a resolução das ambiguidades é bem-sucedida para aplicações de pós-processamento, no qual o tempo não é um limitante. Para aplicações em movimento e em tempo real é fundamental uma rápida resolução das ambiguidades (*on the fly*), o que possibilita a estimativa rápida dos números inteiros de ciclos.

Não há dependência do tempo, desde que não haja interrupção do sinal durante o rastreamento, pois a ambiguidade inerente as medidas de fase da onda portadora dependem do receptor e do satélite (KAPLAN, 2006).

Em geral, a fixação de ambiguidade fortalece a solução da linha de base. A diferença entre a solução *fixed* e a *float* é que a primeira resolve as ambiguidades do satélite

para valores inteiros, obtendo-se assim acurácia elevada (de poucos centímetros), desde que os conjuntos de ambiguidades corretas forem resolvidos. A solução *float* não força as ambiguidades para valores inteiros, mas após algum tempo de tentativas em convergir para valores inteiros, provavelmente o fará e se aproximará de uma solução *fixed* (WAYPOINT, 2005).

2.2 Aplicações GNSS/RTK de baixo custo e seus resultados

Atualmente existem poucos trabalhos referentes ao posicionamento GNSS de baixo custo habilitados a processar dados em tempo real.

Masella et al. (1997) utilizaram-se do receptor RToStar, introduzido no mercado da época pela empresa Marconi. O principal objetivo do estudo era testar o produto e atender à demanda, existente desde então, por uma solução RTK de baixo custo em um receptor de frequência única. O receptor testado possuía saída de dados na taxa de 10 Hz e compatibilidade com antenas ativas e passivas. Contudo, não havia sido desenvolvido ainda o link para transmissão das correções via internet, logo o link era feito via rádio (formato RTCM-104). A comunicação com um computador externo era feita via porta serial (RS-232). Repetitividade e tempo de convergência foram testados a cada 20 minutos num período de 24h e o erro médio quadrático atingiu o valor de 20 cm após 7 minutos de coleta de dados em tempo real.

Krueger et al. (2006) verificaram a possibilidade do uso de receptores de navegação, apenas com o uso da onda portadora L1 no georreferenciamento de imóveis rurais levantando as acurácias alcançadas nas linhas de base com comprimentos entre 10 km e 125 km. Para a coleta dos dados brutos GNSS empregou-se um receptor de navegação Garmin GPS III Plus, conectado a uma antena externa do receptor Ashtech ProMark 2, acoplado a um notebook. Os dados brutos foram pós-processados e a solução oferecida atendeu às exigências do regulamento do Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA) com um custo 30% menor em relação aos equipamentos usualmente utilizados. Como trabalho futuro, foi indicado o uso de *palm-tops* para o levantamento cinemático.

Cina et al. (2009) fizeram testes na Itália com receptores GIS: u-blox LEA 4H, Garmin GPSMap 76 e Garmin 12-xl (utilizados no mercado de mapeamento e na agricultura

de precisão); e receptores de navegação de baixo custo: Magellan DG14, Magellan Mobile Mapper CE, Leica GS20, Topcon GMS2, Trimble ProXT. Foram utilizadas correções diferenciais de estações GNSS. Os trabalhos conseguiram alcançar a acurácia e a precisão dos receptores pós-processados e concluíram que tanto os receptores populares como os receptores GIS podem ser utilizados com correções de redes GNSS, já que as correções aumentam a confiabilidade e a acurácia destes equipamentos. No entanto, os receptores GIS tiveram melhor resultado que os de navegação. Alguns testes com os receptores GIS se utilizaram de antenas externas e os resultados de acurácia ficaram menores que 1 metro. O grau de precisão declarado dos receptores GIS está relacionado com as condições operacionais.

Com a utilização de mensagens RTCM a qualidade foi aperfeiçoada. Além disso, constataram que: a constelação GLONASS não trouxe nenhuma vantagem efetiva; quando o *rover* está acima de 25 km de distância da base e assim concluíram que o ideal seria utilizar uma *Virtual Reference Station* (VRS) ao invés de uma estação permanente. Se os dois tipos de receptores forem utilizados em conjunto com correções das estações GNSS, eles estão aptos para atingir um nível decimétrico de acurácia e podem ser utilizados para fins cadastrais e topográficos.

Stempfhuber e Buchholz (2011) pesquisaram na Alemanha a utilização de um receptor de frequência única de baixo custo com processamento RTK para objetos em movimento. Para o cálculo do RTK foi utilizado o software RTKLib (TAKASU, 2009). Por meio destas ferramentas e uso de um drone, ao qual foi acoplado o receptor e integrada a solução RTK, eles concluíram que é possível controlar objetos aéreos e terrestres em movimento em tempo real. A priori, apenas a informação de velocidade do ar e planejamento de voo são necessárias. Alguns distúrbios do sistema modular (placas GNSS, serviço de correções e antenas GNSS) podem ser minimizados para cada aplicação individual, otimizando o sistema em geral.

Segundo Pesyna *et al.* (2015) um posicionamento com acurácia centimétrica foi atingido baseado na coleta de dados a partir de uma antena GNSS de qualidade em um *smartphone*. Uma análise empírica revelou que a supressão extremamente pobre de multicaminhamento destas antenas é o impedimento principal à rápida resolução das ambiguidades inteiras que surgem no processamento diferencial de fase da portadora utilizada para obter a precisão centimétrica. Foi demonstrado que, devido à baixa qualidade das antenas GNSS dos *smartphones*, o movimento aleatório da

escala do comprimento de onda da antena reduz substancialmente o tempo de resolução de ambiguidade. Dessa forma, eles demonstraram que o tempo para a resolução da ambiguidade inteira e para a fixação de uma acurácia centimétrica é significativamente reduzido quando mais sinais GNSS são rastreados ou quando o *smartphone* consegue suavizar o movimento aleatório da escala do comprimento de onda.

Já Andrei (2012) demonstrou que é possível alcançar acurácia centimétrica usando receptores GNSS de navegação desde que ele consiga dar saída aos dados da fase da onda portadora. Este nível de acurácia pode ser atrativo para várias aplicações, como levantamentos cadastrais, topografia, navegação marítima, levantamentos aéreos, monitoramento de estruturas e sistemas de alertas. Foram feitos alguns testes estatísticos em diferentes intervalos de tempo com vários comprimentos de linhas de base em diferentes bases. Os resultados dos posicionamentos alcançados são comparáveis às mesmas observações realizadas com receptores e equipamentos profissionais. O receptor u-blox LEA-6T foi utilizado, assim como o software RTKLib para o processamento dos dados. Tal receptor pode tratar dados de código e de fase da onda portadora. Em ambientes com céu aberto, foi atingida a acurácia de 2 cm, no entanto ela decresce em ambientes mais desafiadores (com árvores e outros obstáculos), sendo necessário a aplicação de algoritmos mais robustos.

Além disso, a pesquisa de Andrei (2012) indicou que altos índices de acurácia foram atingidos mesmo quando surgiram erros sistemáticos. Tal performance em conjunto com os dispositivos economicamente acessíveis utilizados no trabalho, apoiam a atual tendência para soluções de baixo custo para determinação exata ou precisa de posicionamento. Como resultado, novas áreas de mercado podem estar se abrindo para várias aplicações, tais como sistemas de alerta de desastres, levantamentos aéreos, aplicações GIS, monitoramento estrutural e outros.

Cuk (2014) realizou um experimento para aferição de velocidade utilizando diferentes receptores GNSS, examinando condições dinâmicas para análise dos dados cinemáticos. Os objetivos eram verificar tecnologicamente como é a acurácia da velocidade para cada receptor e a largura da latência nas medições de velocidade em aplicações em tempo real. Neste caso, os receptores de navegação não se mostraram adequados nas medições de velocidade. Receptores GNSS de baixo custo, operando com uma amostragem de 1 Hz, tiveram alta latência (maior que 2.16 s) e não são

apropriados para rastrear a velocidade em tempo real, especialmente durante movimentos dinâmicos.

Guimarães (2014) explorou a potencialidade de um receptor GPS de navegação utilizando softwares livres para o pós-processamento dos dados. A partir de dois experimentos, analisando o posicionamento relativo estático, ele chegou a um índice de 98,9% de dados com acurácia planimétrica melhor que 0,50 m e no outro experimento a acurácia ficou maior ou igual a 0,50 m. Em termos de precisão, os valores não ultrapassaram 0,30 m.

2.3 Caracterização da Transmissão e Recepção de Dados

A necessidade prática de mais flexibilidade e eficiência no envio das observações de fase do receptor base para o móvel fez com que se desenvolvesse a tecnologia integrada ao sistema de comunicação móvel (como, por exemplo, a conexão GSM, a padronização GPRS e a conexão 3G) e a Internet (ROGOWSKI et al. 2004).

A Agência Federal de Cartografia e Geodésia da Alemanha (*Bundesamt für Kartographie und Geodäsie - BKG*) apresentou em 2003 um novo método para a provisão de correções diferenciais em tempo real, o NTRIP, um protocolo genérico que possibilita a transmissão de dados de correção DGPS ou RTK via internet, a qual pode ser acessada em campo por telefone celular pelo sistema GPRS ou outras tecnologias (GEBHARD e WEBER, 2003).

Dessa forma, foi possível a entrega de correções RTCM para diferentes usuários simultaneamente. O objetivo principal da RTCM (organização científica internacional sem fins lucrativos) é o de produzir documentos na forma de padrões. Os dados RTCM SC-104 (*Special Comitee on Differential GNSS*) são transmitidos na forma de um fluxo binário de dados, tipicamente, um registro completo de dados (quadros) RTCM é transmitido a cada segundo.

Cada registro de dados RTCM é composto por diversas mensagens. O conteúdo de cada mensagem tem um número identificador e campos de dados normalmente predefinidos. Cada quadro de mensagem, dentro de um registro de dados,

compreende duas palavras de cabeçalho da mensagem e um número variável de palavras que formam o corpo da mensagem.

No caso do RTCM 3, padrão utilizado atualmente pela RBMC-IP, cada mensagem é formada por palavras de 30 bits, compostas por 24 bits de dados e 6 bits de paridade (para verificação de erro). O padrão RTCM 3 possui algumas vantagens sobre o padrão RTCM 2 (SAATKAMP, 2013):

- alternativa de largura de banda de transmissão mais eficiente que a versão 2;
- usa byte padrão sem reversão de bits;
- maior integridade e menos problemas de sincronização;
- desenvolvido prioritariamente para suportar operações cinemáticas em tempo real (RTK);
- envolve a transmissão de uma grande quantidade de informações e, portanto, beneficia, de forma eficiente, mais de um formato de dados.

O desenvolvimento da SC-104 versão 3.0 foi impulsionado principalmente por uma necessidade de tratar as operações de fase da portadora RTK. O formato é radicalmente diferente da versão 2.3, em parte para fornecer um esquema de paridade mais eficiente para se proteger de erros grosseiros, bem como erros de *bits* aleatórios e em parte para superar as limitações do formato da versão 2.3, incluindo uma maior eficiência que permitirá mais transmissões em tempo hábil para operações RTK (SPECIAL COMMITTEE 104, 2004).

No caso da versão 3.0, as mensagens são padronizadas em diferentes grupos, divididos de acordo com a realização de uma determinada operação/serviço e os emissores devem transmitir pelo menos uma mensagem de cada um dos vários grupos como apresentado na Tabela 2:

Tabela 2: Grupo de mensagens RTK versão RTCM 3.1

Nome do grupo	Nome do sub-grupo	Tipo da mensagem
Observações	GPS L1 RTK	1001 1002
	GPS L1/L2 RTK	1003 1004
	GLONASS L1 RTK	1009 1010
	GLONASS L1/L2 RTK	1011 1012
	Referência RTK	1005 1006
	-	1007 1008
	Dados auxiliares das estações em rede	1014
	Diferenças de correções ionosféricas	1015
Correções RTK em rede	Diferenças de correções geométricas	1016
	Diferenças de correções ionosféricas e geométricas combinadas	1017
	Parâmetros do sistema	1013
Informações auxiliares	Efemérides GPS	1019
	Efemérides GLONASS	1020
	String de texto	1029
	Descrições do receptor e da antena	1033
Informações proprietárias	-	4001 a 4095

Fonte: Traduzido e adaptado de RTCM (2009)

As mensagens da versão 3.0 são transmitidas em quadros de comprimento variável mostradas na Figura 4. Cada quadro começa com um preâmbulo de 8 *bits*, seguido de seis *bits* reservados e um campo de comprimento de mensagem de 10 *bits*. A mensagem de dados, que varia de 0 a 1023 *bytes*, e é então transmitida seguidos por

24 *bits* de paridade para a detecção de erros referido como um código de verificação de redundância cíclica (CRC). Este formato de mensagem é muito mais eficiente do que a versão 2.3, que dedica mais de 20% apenas para a taxa de upload. Além disso, o esquema de paridade versão 3.0 é mais robusto do que o utilizado para a versão 2.3 (KAPLAN, 2006).

Figura 4: RTCM SC-104 version 3.0 message frame

Fonte: KAPLAN, 2006.

O protocolo de correção NTRIP foi desenvolvido para ser um protocolo de dados aberto a todos os usuários de tecnologia de posicionamento GPS e suas características técnicas de transmissão são definidas:

- está baseado na popular mensagem padrão HTTP, de fácil implementação quando há clientes limitados e recursos de plataformas de servidor disponíveis;
- além do HTTP, utiliza TCP (*Transmission Control Protocol*) como camada de transporte;
- a aplicação não é limitada a um plano particular ou a um conteúdo de mensagens codificadas, ele tem capacidade de distribuir qualquer tipo de dados GNSS;
- tem potencial para suportar grande quantidade de usuários, disseminando qualquer tipo de dado pela internet para até milhares de usuários;
- possibilita segurança na transmissão dos dados de correção diferencial, pois para ter acesso aos provedores e as *source tables* (lista de estações de referência), os clientes necessitam solicitar a liberação de um usuário e senha cadastrados num servidor, pois todos estes dados são bloqueados por *firewalls* ou *proxyservers* de proteção de rede local;
- a maior parte dos receptores GNSS recentes são produzidos com o recurso NTRIP embutido e habilitado.

No caso do IBGE a transmissão dos dados é realizada da seguinte forma: um receptor GNSS envia continuamente mensagens RTCM até um servidor *caster* localizado no IBGE. Um usuário, com um aplicativo *client*, tal como o RTKLib e com uma conexão Internet, se conecta ao servidor do IBGE e escolhe a(s) estação(ões) da RBMC-IP (Figura 5) cujos dados ou correções diferenciais deseja receber. As correções são recebidas pelo GPS do usuário (*rover*) através de uma porta serial padrão e desta forma obtêm-se as posições corrigidas.

A Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) dos Sistemas GNSS passou a contar, em março de 2014, com 101 estações, após a integração de cinco novas estações, localizadas em Araquari e Florianópolis/SC (SCAQ e SCFL), Bacabal/MA (MABB), Sobral/CE (CESB), Afogados da Ingazeira/PE (PEAF). Das 101 estações que atualmente compõem a RBMC, 63 operam em tempo real, e o restante, para pós-processamento (Figura 5). Todas as capitais do Brasil contam com pelo menos uma estação da rede e, em todas elas, os dados são disponibilizados em tempo real e para pós-processamento. Em comparação com o estado da Califórnia nos Estados Unidos, o Brasil fica consideravelmente para trás, pois existem mais de 330 estações públicas que operam em tempo real oferecendo o serviço RTK (*California Realtime Network*).

Figura 5: Estações de Referência do IBGE para o processamento em tempo real e o pós-processamento de coordenadas.

Fonte: IBGE, 2014.

Os processos de coleta e disponibilização dos dados são automáticos, fazendo com que os arquivos diários para pós-processamento sejam liberados nas primeiras horas do dia seguinte. Mensalmente são realizados mais de 40 mil downloads no portal do

IBGE e mais de 4 mil usuários já foram cadastrados para o acesso em tempo real (IBGE, 2014).

Mesmo com este expressivo número de estações, a RBMC ainda precisa ser densificada nas regiões Norte e Centro-Oeste do país, onde ainda é necessária uma melhor cobertura em áreas importantes.

Cada estação da RBMC é equipada com um receptor GNSS, conectado a um link de internet, através do qual os dados são disponibilizados gratuitamente no portal do IBGE.

Através das informações geradas pela RBMC podem-se obter coordenadas (latitude, longitude e altitude) com precisão de poucos centímetros. Esta precisão é necessária para diversas aplicações e atividades profissionais que são realizadas em diferentes áreas, por exemplo, na engenharia, na navegação aérea e marítima, nos cadastros rural e urbano, agricultura de precisão, entre outras. Por isso, a rede, em operação desde 1996, tem sido uma importante ferramenta para o desenvolvimento das geotecnologias no Brasil.

Apesar de ter partido de uma iniciativa do IBGE, a RBMC é hoje um grande esforço de dezenas de instituições públicas de todo o país, que contribuem com alguma infraestrutura para a operação dessas estações. Dentre estas instituições, destacam-se: o INCRA e, mais recentemente, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), que utiliza os dados da RBMC, por exemplo, no Programa de Estudo e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial (Embrace), no Sistema Integrado de Posicionamento para Estudos Geodinâmicos (SIPEG) e no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), para o cálculo dos modelos de previsão de tempo.

A RBMC contribui também no desenvolvimento das atividades de projetos internacionais como o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS), que realiza estudos de geodinâmica da placa sul-americana, através das séries temporais das coordenadas das estações GNSS.

O servidor *caster* do serviço RBMC-IP pode ser acessado pelo endereço IP 186.228.51.52 e opera na porta 2101. Acessando-o de qualquer navegador de Internet através do link <http://186.228.51.52:2101>, é possível visualizar as informações sobre as estações.

O acesso ao servidor do IBGE é gratuito, entretanto o usuário precisa preencher o cadastro e se registrar como usuário do serviço. A solicitação é avaliada e uma identificação e uma senha de acesso são enviadas por e-mail. A fim de evitar o congestionamento de tráfego no servidor do IBGE, algumas restrições foram criadas (IBGE, 2014):

- É permitido somente o acesso a cinco estações por usuário;
- A identificação e senha de acesso são válidos por um período máximo de seis meses;
- São permitidos no máximo 1000 acessos simultâneos ao serviço.

Houve uma grande evolução no serviço, visto que há pouco tempo o acesso era permitido a apenas três estações, a identificação e a senha de acesso eram válidos por um período máximo de 90 dias e apenas 50 acessos simultâneos eram permitidos ao serviço.

O dispositivo que o usuário estiver usando não poderá estar limitado por uma rede ou sistema de comunicação com a internet que possua proteção de *firewalls* ou *proxy*, já que o serviço RBMC-IP não suporta transações com estas instâncias de proteção de redes de comunicação. Existem vários receptores GNSS que possuem integrada a opção de acesso à Internet e funções que permitem o uso do protocolo NTRIP.

Entre as perspectivas futuras da RBMC, está a disponibilização de correções visando atender os posicionamentos em tempo real via link de satélite e/ou Internet, com a mesma precisão sobre todo o território nacional, por meio da *Wide Area Differential GPS* (WADGPS). A base deste serviço é um sistema desenvolvido no Canadá pelo *Natural Resources Canada* (NrCan), denominado de *The real-time Canada wide DGPS Service* (CDGPS). A precisão esperada com a disponibilização deste serviço é da ordem de 1 metro (95%) na componente horizontal para usuários de receptores de uma frequência e 0,5 metro (95%) para usuários de receptores de dupla frequência (IBGE, 2014).

A vantagem mais significativa à utilização NTRIP para a transmissão de correções é o aumento da área geográfica em torno de uma única estação de referência, em que correções DGPS e RTK podem ser recebidas e aplicadas para se obter posições com elevadas precisões. Contudo, correções baseadas em IP não aumentam o comprimento da linha de base RTK, ou seja, erros posicionais aumentam à medida

que a distância entre receptor móvel e a sua estação de referência (base) selecionada aumenta. É necessário o gerenciamento destes erros e da distância da linha de base a fim de assegurar que a qualidade na precisão seja mantida.

Um usuário pode em campo, teoricamente, receber correções de uma estação de referência selecionada a partir de qualquer parte do mundo. Esta é uma vantagem óbvia para sistemas DGPS e RTK comparado ao uso de rádios UHF para a transmissão de correções. Um sistema RTK usando um rádio UHF 35W geralmente pode manter uma solução de pesquisa de nível posicional em um raio de 10 km de uma única estação de referência antes da intensidade do sinal da transmissão de rádio recebido tornar-se muito fraco e as correções tornarem-se indisponíveis.

Um sistema RTK usando internet móvel pode geralmente manter uma solução posicional em um raio de 30 km ou mais a partir de uma única estação de referência (embora exista uma variação, dependendo da atividade da ionosfera e da troposfera). Porém, vale lembrar que existem também os erros residuais dentro dos algoritmos de posicionamento. O RTK/GSM pode ser um ótimo complemento para práticas GNSS em empresas de topografia e locação de obras (BRAZEAL, 2013).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Área de Estudo

Para a realização dos experimentos estáticos foram utilizados os marcos das estações planimétricas GPS do Sistema Geodésico Brasileiro, homologados pelo IBGE (método estático). Entre os marcos disponíveis, optou-se pelos pilares posicionados ao longo da raia olímpica da Universidade de São Paulo, na Cidade Universitária, no município de São Paulo. Na Tabela 3 é possível visualizar as coordenadas dos 4 (quatro) marcos de referência (IBGE), em que os testes foram realizados.

Tabela 3: Coordenadas UTM oficiais do IBGE (Datum SIRGAS – Época de Referência 2000,4)

Pilar	Nome da Estação	Este (m)	Norte (m)	Altitude (m)
P1	SAT91607	323255,082	7394432,170	718,14
P1A	SAT91625	323242,048	7394438,855	718,20
P2A	SAT91626	323264,150	7394427,523	718,12
P5	SAT91622	323983,968	7394058,291	718,61

Fonte: IBGE (2014)

Estes marcos foram utilizados devido a curta distância que se encontram da Estação RBMC-IP mais próxima (POLI0), em torno de 500 metros, além de estarem numa área com cobertura GSM. O local possui algumas árvores e arbustos próximos, os quais não interferem no ângulo de visada dos satélites e não afetam diretamente os resultados da pesquisa. A Figura 6 indica o P1, onde foram realizados os testes.

Figura 6: Equipamentos utilizados para o rastreo realizado no Pilar 1 da raia olímpica da USP

Fonte: Autor (2015)

Num segundo momento, os testes estáticos foram realizados no telhado do prédio da Engenharia Civil da Cidade Universitária (Figura 7)

Figura 7: Pontos utilizados como base e referência nos testes

Fonte: Autor (2015)

Para a realização dos experimentos RTK cinemáticos, foi utilizado um veículo automotor, um receptor GPS, um telefone móvel (para a comunicação por 3G com o servidor RBMC-IP do IBGE) e um laptop para o processamento e armazenamento dos dados.

O carro foi conduzido pelas vias da Cidade Universitária (ver Figura 8) e na primeira fase dos testes, foi percorrido o perímetro viário do campus, Rota 1 (cor verde) no sentido anti-horário e na segunda fase foi feito um trajeto um pouco menor, a Rota 2 (cor vermelha) no sentido horário.

Figura 8: Teste cinemáticos e segmentos de reta analisados

Fonte: Autor (2015)

Os dois trechos de análise (Análise 1, cor azul e Análise 2, cor amarela) ficaram restritos a estes dois segmentos de reta por abrangerem partes das duas voltas realizadas durante a pesquisa. O mapa base utilizado foi o do projeto de mapeamento cartográfico chamado *OpenStreetMaps* (OSM).

Na Análise 1 (Avenida Professor Mello de Moraes) foram realizadas 20 voltas, dentre as quais apenas 8 foram utilizadas, pois nestas a solução RTK foi escolhida para obtenção dos dados e por seguirem os mesmos parâmetros e especificações durante o teste. Nas demais voltas diferentes parâmetros foram utilizados e elas não puderam ser analisadas.

Na Análise 2 (Avenida Professor Luciano Gualberto) foram realizadas 14 voltas, dentre as quais apenas 9 foram utilizadas, pois nestas a solução RTK foi escolhida para obtenção dos dados, enquanto nas demais foi utilizada a solução DGPS.

3.2 Equipamentos e Aplicativos

Os produtos comerciais GNSS RTK estão, quase na maioria das vezes, disponíveis como um sistema completo. Nesta pesquisa foram utilizados diferentes equipamentos para que a solução RTK fosse alcançada, o que permitiu a investigação sobre seu modo de funcionamento.

O RTKLIB é um pacote de software livre para o posicionamento GNSS. Com este programa pode-se processar e armazenar dados GNSS em tempo real, bem como no pós-processamento. O pacote do software possui vários componentes parcialmente independentes do programa, que podem ser utilizados apenas para pós-processar ou visualizar dados, por exemplo. Os módulos abaixo fazem parte do software:

- RTKNav – cálculo GNSS em tempo real e saída de dados NMEA (*National Marine Electronics Association*);
- RTKPost – módulo de pós processamento;
- RTKPlot – módulo de visualização;
- RTKConv – conversão para dados RINEX e para arquivos KML (*Keyhole Markup Language*).

A solução das ambiguidades da fase de onda da portadora L1 se utiliza dos estudos de TEUNISSEN (1995) e CHANG (2005). A biblioteca do software implementa funções de navegação fundamentais e algoritmos relativos à fase da onda portadora. As duplas diferenças inteiras da ambiguidade são determinadas pelo método LAMBDA (*Least-squares Ambiguity Decorrelation*). Este método é utilizado pelo RTKLib para resolver o problema dos mínimos quadrados, pois oferece a transformação linear para diminuir o espaço de busca do vetor inteiro e um procedimento árvore de busca no espaço transformado. A solução inteira do vetor por estes procedimentos é validada pelo *Ratio-test*, conforme indicado na fórmula (8). No *Ratio-test* o fator *ratio* R é definido como a relação da soma dos pesos residuais dos quadrados pela segunda melhor solução ($\tilde{N}_2$) por uma melhor ($\tilde{N}$). Ele é usado para checar a confiança da solução. O limite da validação *Rthres* pode ser estabelecido pela opção de processamento *Min Ratio to Fix Ambiguity*. A versão atual suporta somente um valor limite fixo (TAKASU, 2007).

$$R = \frac{(\tilde{N}_2 - \widehat{N})^T Q_N^{-1} (\tilde{N}_2 - \widehat{N})}{(\tilde{N} - \widehat{N})^T Q_N^{-1} (\tilde{N} - \widehat{N})} > R_{thres} \quad (8)$$

Depois da validação, a solução Fixa da posição $\check{r}_r$ e da velocidade $\check{v}_r$ da antena rover são obtidas pela resolução da equação (9). Caso a validação falhe, o RTKLib libera a solução *Float* ($\hat{r}_r$ e $\hat{v}_r$) (TAKASU, 2007).

$$\begin{pmatrix} \check{r}_r \\ \check{v}_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{r}_r \\ \hat{v}_r \end{pmatrix} - Q_{RN} Q_n^{-1} (\widehat{N} - \tilde{N}) \quad (9)$$

O receptor GPS utilizado na pesquisa foi o modelo LEA-6T, da marca u-blox, de frequência única (L1) e 50 canais. O kit receptor possui cabo USB, o qual proporciona fornecimento de energia, transferência de dados em alta velocidade e elimina a necessidade de uma fonte de alimentação externa, podendo ser usado com um PDA ou PC notebook. Os sistemas operacionais compatíveis são: Microsoft Windows 7, Windows Vista e Windows XP. É necessária a instalação do software u-blox para que mudanças nas configurações possam ser feitas de acordo com o uso. Além disso, existe uma porta RS232 adicional disponível, uma antena magnética ANN-MS com conector SMA fêmea, com amplificador de baixo ruído integrado e base magnética adequada para a montagem no teto de veículos. Um dos diferenciais do receptor u-blox LEA 6T é a utilização das pseudodistâncias e da fase da portadora. A Figura 9 apresenta o circuito eletrônico interno do receptor.

Figura 9: Circuito eletrônico do receptor GPS u-blox.

Fonte: Manual u-blox 6 GPS Modules (2011).

Existem alguns softwares gratuitos para o processamento de dados GNSS disponíveis, que podem ter eficiência semelhante aos softwares privados, pois são pacotes de programas disponibilizados pelos seus desenvolvedores, executáveis e de código aberto. Geralmente eles são para os usuários mais especializados, entre outros: o BKG NTRIP Client, desenvolvido pela Agência Federal de Cartografia e Geodésia da Alemanha; o NTRIP Client, desenvolvido por Lefebure Design; e o RTKLib, desenvolvido por Tomoji Takasu. Além de gratuitos, todos são de código aberto.

O RTKLib foi utilizado nesta pesquisa devido à possibilidade de conexão com os receptores u-blox e também por já ter sido objeto de estudos de outras pesquisas correlatas. Este pacote é composto por alguns softwares de aplicações e uma biblioteca que pode ser utilizada no desenvolvimento de programas para o processamento de dados GNSS, visto que os códigos escritos estão na linguagem C e C++.

O aplicativo *RTKnavi* foi o escolhido para realizar os testes de campo. Este software possibilita a utilização dos sistemas GNSS: GPS, GLONASS e SBAS (*Satellite-based augmentation systems*). E com diferentes possibilidades de frequências: L1, L1+L2, L1+L2+L5. Além disso, é possível configurar os levantamentos com diversos parâmetros, como as informações sobre a precisão das observáveis.

A versão mais recente do software (2.4.2), a qual foi utilizada na pesquisa, suporta alguns receptores GNSS capazes de enviar informações de dados brutos. Com o RTKLIB e tais receptores, os usuários podem construir e operar seus sistemas originais RTK. No entanto, receptores de frequência dupla mais caros têm uma vantagem de tempo, sendo esse mais curto para a resolução de ambigüidade. Com um receptor de frequência única, pelo menos alguns minutos são necessários para se fixar a solução. Na Figura 10 é possível ver a tela de entrada do RTKLib ao fundo e a tela de configuração da entrada de dados.

Figura 10: Interface do RTKLib

Fonte: Autor (2014)

A sensibilidade e o ganho da antena devem ser suficientes para permitir a recepção do sinal (fraco) em todas as elevações e azimutes visíveis (SOUZA, 2005).

Para aplicações que exigem alta precisão (aplicações geodésicas) são requeridas antenas que apresentem maior estabilidade no centro de fase e proteção contra multicaminho como, por exemplo, a *Choke Ring* (YUNK et al., 1989 apud SOUZA, 2005). A antena *Choke Ring* (Figura 11) possui um plano de terra que contém uma série de círculos concêntricos com depressões de um quarto de onda. Estas

depressões atuam como linhas de transmissão curtas e seus topos apresentam uma alta impedância (quociente entre a amplitude de uma tensão alternada e a amplitude da corrente que ela provoca em um circuito) na frequência do sinal GPS. Pelo fato das ondas de superfície não terem forma, a antena ganha uma importância na proteção de reflexões do solo e de sinais de multicaminho que chegam de direções aproximadamente horizontais. Porém, a antena *Choke Ring* possui algumas desvantagens: o tamanho avantajado, o peso e o custo (ISHIKAWA e ITAME, 2000; *apud* KRUEGER, 2010).

Figura 11: Modelo da Choke-Ring (2D)

Fonte: UNAVCO (2014).

A instalação do software foi feita em um notebook com o sistema operacional Windows 7. A conexão de internet foi feita através de um Chip Celular/GSM com serviço de dados contratado da operadora de telefonia celular (TIM). Dessa maneira, o celular tornou-se um roteador e o notebook foi conectado a ele.

Logo, o RTKLib recebe as observações de fase em tempo real da estação de referência escolhida, processa os dados e gera a solução de posicionamento RTK. Dependendo da geometria de satélites disponível e do sinal GSM, o qual proporciona a conexão à internet, a solução pode falhar. Durante o rastreamento de pontos utilizando o RTKLib, os resultados podem retornar em três modos: ponto absoluto, RTK *float* e RTK *fix*.

O ponto absoluto significa que o receptor não está recebendo nenhuma correção da estação de referência, por problemas na estação de referência ou de conexão GSM. No modo RTK *float*, enquanto o receptor está recebendo correções da estação de referência, ele pode não ter o número de satélites suficientes para fazer um cálculo preciso ou não tem satélites suficientes em comum com a estação de referência para que o termo de correção seja válido. Normalmente esta solução garante a precisão submétrica e um nível decimétrico após algumas dezenas de minutos, dependendo diretamente das condições ambientais do local (sombreamento e

multicaminhamento), do comprimento da linha de base e do algoritmo utilizado na solução (KEVIN, 2008).

Para que o modo RTK *fix* funcione, o receptor GPS e a estação de referência devem receber sinal de pelo menos cinco satélites em comum, com o receptor recebendo correções da estação de referência. O objetivo do RTK *fix* é o de alcançar uma precisão de poucos centímetros, o mais rápido possível, logo após o início do rastreamento, garantindo uma confiança predefinida. A parte vital do RTK *fix* é a determinação correta da ambigüidade da fase da portadora, sem a qual a precisão de centímetros não seria alcançada (KEVIN, 2008).

O software RTKLib possui várias opções de saída de dados: Lat/Long/Height, NMEA0183, X/Y/Z-ECEF e E/N/U-Baseline. Nos testes, a opção Lat/Long/Height foi utilizada e os resultados foram transformados para o sistema de coordenadas Universal Transverso de Mercator (UTM) utilizando o software ProGrid, disponível no site do IBGE. Entre os valores gerados pelo software e direcionados ao computador estão: data, GPST (tempo GPS), latitude, longitude, altitude, variações da latitude, longitude e altitude (em metros), *age* (época) e *ratio*.

As informações foram transferidas para uma planilha eletrônica com o auxílio do *software* computacional Microsoft Excel 2013, no qual houve a transformação para coordenadas planas no sistema de projeção UTM, que apresenta resolução na ordem de milímetros, sendo mantido o referencial WGS-84 para possibilitar a representação gráfica dos pontos experimentais.

3.3 Análises de Dados

De acordo com os objetivos desta pesquisa, o foco das análises de dados foi a avaliação da acurácia e da precisão das coordenadas obtidas nas diferentes formas já mencionadas no item 3.2.

Mikhail e Ackermann (1976) apresentam acurácia como sendo o grau de proximidade de uma estimativa com seu parâmetro (ou valor verdadeiro) e considera não apenas efeitos aleatórios, mas também os sistemáticos, enquanto precisão expressa o grau de consistência da grandeza medida com sua média e considera apenas os efeitos

aleatórios. Esses autores acrescentam que acurácia reflete a proximidade de uma grandeza estatística ao valor do parâmetro para o qual ela foi estimada e que precisão está diretamente ligada com a dispersão da distribuição das observações, como demonstrado na Figura 12.

Figura 12: Acurácia e Precisão – Estimador tendencioso

Fonte: MIKHAIL ACKERMAN (1976)

Observa-se que a acurácia é tomada como sendo o afastamento entre o valor de referência e o valor estimado, enquanto que a precisão é a dispersão do valor estimado (MONICO *et al.*, 2009).

Ainda na mesma figura, Mikhail e Ackermann (1976) afirmam que a estimativa p_2 é a menos precisa e que a estimativa p_3 é a mais precisa. Tratando-se de acurácia, p_1 e p_2 são igualmente acurados, visto que estão assumindo p como referência, no entanto nenhum deles é tão preciso quanto p_3 .

Partindo do significado estatístico da precisão, ela deve ser gerada apenas em função dos dados coletados, sem qualquer relação com uma coordenada verdadeira, quanto maior o número de épocas coletadas menor será o desvio padrão do levantamento, não implicando, no entanto, em uma maior veracidade da coordenada final.

A precisão se refere à proximidade de uma estimativa ou observação está da sua média, estando vinculada apenas aos erros aleatórios. O desvio padrão representado pelo símbolo σ , é usado para quantificar a dispersão em torno da média das observações. Ele é a medida de precisão mais utilizada, mas devido ao grande

número de observações em um sistema de equações de uma solução GNSS ele se torna um indicador muito otimista (IBGE, 2013).

A acurácia pode ser quantificada por múltiplos do desvio padrão ou por uma determinada função de probabilidade de distribuição das observações. A função de probabilidade de distribuição normal fornece o relacionamento entre a observação e o modelo matemático de distribuição, como por exemplo, uma observação qualquer dentro de um conjunto tem 95,45% de probabilidade de estar contida em $\pm 2\sigma$ da média (IBGE, 2013). A Tabela 4 indica a significância estatística e os valores de confiança para se chegar a determinadas probabilidades da acurácia.

Tabela 4: Medidas de acurácia de uma componente espacial

α	Probabilidade (%)	Notação
0.67	50.0	Provável erro linear
1.00	68.3	1σ nível ou erro médio quadrático
1.96	95.0	95% índice de confiança
2.00	95.4	2σ nível
3.00	99.7	3σ nível

Fonte: Adaptado e traduzido de KAPLAN (2006)

Nos dados em que havia uma coordenada de referência como comparação, o erro de posicionamento planimétrico foi calculado a partir da equação (10):

$$Ep = \sqrt{\Delta E^2 + \Delta N^2} \quad (10)$$

Onde:

Ep é erro planimétrico do posicionamento ou acurácia horizontal;

ΔE é a diferença entre a coordenada E (Este) determinada pelo receptor em relação a coordenada de referência E;

ΔN é a diferença entre a coordenada N (Norte) determinada pelo receptor em relação a coordenada de referência N.

Os testes foram feitos não só para avaliar a precisão do receptor, mas também para simular um usuário comum utilizando destes equipamentos e tecnologias para atender às suas demandas.

Este estudo propôs duas formas de análises estatísticas para os dois tipos de testes realizados. Num primeiro momento foram analisados os resultados dos testes estáticos, tanto os dados com solução fixa, flutuante e sem solução (posicionamento absoluto) foram analisados. Para tais resultados o *box plot* foi utilizado graficamente para representar a distribuição dos dados e outras medidas, conforme descrito no item 3.3.1.1. Na segunda etapa, foram analisados os testes cinemáticos com o algoritmo *Principal Curves Analysis*, apresentado no item 3.3.1.2.

3.3.1 Análise Exploratória de Dados

A Análise Exploratória de Dados é uma abordagem e ou filosofia para análise de dados que emprega uma variedade de técnicas (principalmente gráfica) para (NIST/SEMATECH, 2013):

- maximizar o discernimento em um conjunto de dados;
- descobrir estruturas subjacentes;
- detectar *outliers* e anomalias;
- extrair variáveis importantes;
- desenvolver modelos parcimoniosos; e
- determinar configurações de fatores ideais.

A finalidade da Análise Exploratória de Dados (AED) é examinar os dados previamente à aplicação de qualquer técnica estatística, para que se tenha um entendimento básico de seus dados e das relações existentes entre as variáveis analisadas. Trata-se da etapa inicial da análise, destinada a obter informações através de gráficos, tabelas e medidas descritivas como ferramentas.

Para explorar o comportamento e a relação entre as variáveis através de gráficos, foi utilizado o *box plot* e para a análise numérica, computando estatísticas descritivas, foi utilizado o algoritmo de análise da componente principal *pcurve*, o qual será descrito no item 3.3.1.2.

3.3.1.1 Box Plot

Uma das formas de explorar dados é utilizando o *box plot*. Esse diagrama de caixa foi introduzido pelo estatístico americano John Tukey em 1977. É a forma de representar graficamente os dados da distribuição de uma variável quantitativa em função de seus parâmetros. Ele permite avaliar a simetria dos dados e a sua dispersão. Na sua construção são considerados os quartis e os limites da distribuição, permitindo uma visualização do posicionamento da dispersão na escala da variável.

Ele foi utilizado para auxiliar na visualização das análises da distribuição dos erros encontradas nas componentes Norte e Este (coordenadas UTM) e apresenta de forma bastante simplificada as seguintes variáveis:

- *Count* – número de pontos da amostra
- *Max* – valor máximo da amostra
- *Min* – valor mínimo da amostra
- *Median* - a mediana da distribuição, que é o valor que aparece no meio da lista quando a distribuição é classificada. Caso o número de valores seja par, a mediana é computada pela média dos dois valores centrais.
- *Outlier* - usualmente, um valor maior/menor do que $1.5 \times \text{IQR}$ (*Interquartile Range*)
- *Var* - a variância da amostragem, s^2 , é a indicação de como a distribuição da probabilidade é dispersa em relação à média, sendo o desvio quadrático médio da média. Ela é calculada utilizando a fórmula (11) a seguir:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (11)$$

Onde:

$\bar{x}$ é o valor médio do grupo

n é o número de valores do grupo (*Count*)

- *StdDev* – o desvio padrão, s , assim como a variância, indica como a distribuição da probabilidade é dispersa em relação à média, sendo a raiz quadrada da variância e é medida nas mesmas unidades dos dados originais. O desvio padrão é calculado com a fórmula (12) apresentada a seguir:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (12)$$

no qual:

$\bar{x}$ é o valor médio do conjunto

n é o número de valores no conjunto (*Count*)

3.3.1.2 Análise da Curva Principal (*Principal Curve Analysis*)

Por se tratar da aquisição de dados GNSS em movimento e com o objetivo de alcançar uma análise da acurácia e da precisão destes, foi utilizado o algoritmo *Principal Curve Analysis*, do estudo de Hastie e Stuetzle (1989). A partir dele é possível identificar trajetórias dos pontos GNSS e estimar o melhor caminho entre estes.

Para executar o algoritmo, foi utilizado o pacote *pcurve*, o qual foi elaborado por Hastie e Stuetzle (1989) e adaptado por Brunsdon (2005). Ele tem como finalidade ajustar a

curva principal a um conjunto de dados numéricos multivariados em dimensões arbitrárias e traçar gráficos com o diagnóstico dos resultados. Para processar o algoritmo, foi utilizado o software estatístico R (R CORE TEAM, 2014).

A análise de componentes principais (do inglês PCA – *Principal Component Analysis*) encontra-se entre as mais importantes ferramentas da análise multivariada, inclusive por constituir a base onde se fundamentam a maioria dos outros métodos multivariados de análise de dados. Como uma ferramenta de análise exploratória a PCA permite revelar a existência ou não de amostras anômalas, de relações entre as variáveis medidas e de relações ou agrupamentos entre amostras. Segundo Jolliffe (2002), a PCA é matematicamente definida como uma transformação linear ortogonal que transforma os dados para um novo sistema de coordenadas de forma que a maior variância por qualquer projeção dos dados fica ao longo da primeira coordenada (denominada de primeiro componente), a segunda maior variância fica ao longo da segunda coordenada, e assim por diante.

A ideia original da análise é tomar uma reta (ou plano) que seja o "melhor ajuste" a um conjunto de dados. Além disso, calcular outras retas e analisar a precisão entre elas e a acurácia em relação a uma reta de referência (base do *OpenStreetMap*).

Hastie e Stuetzle (1989) relatam que, ao invés de resumir os dados com uma linha reta, eles utilizam a curva suave. Tal curva passa no centro dos dados de uma forma suavizada, podendo o centro dos dados ser ou não uma linha reta, pois eles trataram as duas variáveis simetricamente. Assim como a componente principal, estas curvas focam na menor distância dos pontos. Eles definem as curvas principais como sendo curvas suaves que são auto-consistentes para a distribuição ou para o conjunto de dados.

Por analogia a análise linear das componentes principais, eles se interessaram em encontrar curvas suaves que correspondessem à espaços mínimos da função de distância. A ideia foi de começar com uma curva suave, como a maior componente principal linear e checar se ela é uma curva principal. Isto envolve projetar os dados na curva e depois avaliar a expectativa condicional em que ele projeta. Ou esta coincide com a curva, ou se terá uma nova curva por produto. Então, checa-se se esta nova curva é consistente, e assim por diante. Se a condição da auto-consistência for

encontrada, chega-se a curva principal. Segue abaixo a descrição das iterações do algoritmo, extraído e traduzido de HASTIE e STUETZLE (1989):

Inicialização: Ajustar $f^0(\lambda) = \bar{x} + a\lambda$, onde a é primeiro componente linear principal de h . Ajuste $\lambda^0(x) = \lambda_{f^0}(x)$

Repetir: Cada iteração no contador j

1. Ajustar $f^{(j)}(\cdot) = E(X \mid \lambda_{f^{(j-1)}}(X) = \cdot)$
2. Definir $\lambda^j(x) = \lambda_{f^{(j)}}(x) \forall x \in h$; transformar λ^j para que $f^{(j)}$ seja a unidade de velocidade.
3. Avaliar $D^2(h, f^{(j)}) = E_{\lambda^{(j)}} E[\|X - f(\lambda^{(j)}(X))\|^2 \mid \lambda^{(j)}(X)]$

Até: A mudança em $D^2(h, f^{(j)})$ esteja abaixo do valor limite.

No entanto, existem potenciais problemas com esse algoritmo. Embora curvas principais sejam por definição diferenciáveis, não há garantias que as curvas produzidas pelo passo da expectativa condicional do algoritmo tenha essa propriedade. Descontinuidades podem certamente ocorrer nos pontos finais da curva, como se observa na Figura 13.

Figura 13: A média das observações projetada em direção ao ponto final da curva pode estar desmembrado do resto da curva

Fonte: Traduzido de Hastie e Stuetzle (1989)

Brunsdon (2005), adaptou o algoritmo e abordou a análise da acurácia e da precisão que as curvas principais podem chegar em relação a uma nuvem de pontos GNSS a partir de trajetos viários. Segundo ele, a acurácia é a habilidade da curva de reproduzir o real (verdadeiro) caminho do trajeto e a precisão é essencialmente a medida da confiabilidade da estimativa dos caminhos, visto que os trajetos GNSS são exemplos de locais sobre os caminhos reais que contenham algum erro aleatório. Esta medida baseia-se na abordagem *bootstrapping* (EFFRON, 1982) para estimar faixas entre os caminhos. Brevemente, este método estima a distribuição da amostragem de uma estatística arbitrária s de um conjunto de dados $\{X_i: i = 1 \dots n\}$ amostrando aleatoriamente n itens do conjunto de dados com substituição por várias vezes. Efetivamente, estima-se a distribuição verdadeira dos X_i como uma distribuição de massa de pontos, na qual cada valor individual X_i tem a probabilidade $\frac{1}{n}$ de ocorrer.

Foi baseada nesta adaptação do algoritmo que os dados cinemáticos foram analisados e apresentados juntamente com os testes estáticos no Capítulo 4.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram realizadas duas etapas de aquisição de dados GNSS em campo, uma utilizando o método estático e outra o cinemático, com taxas de observação de 1 Hz (uma observação por segundo). Primeiramente serão apresentados os resultados dos testes estáticos e em seguida os testes de trajeto (cinemático).

4.1 Testes Estáticos

Os primeiros 24 ensaios foram realizados no P1 da raia olímpica e no telhado do prédio da Engenharia Civil, também da USP. Eles tiveram duração entre 0,2 e 140 horas, totalizando 589 horas de levantamento. Durante os oito primeiros testes, não houve fixação de nenhuma solução (RTK, PPP ou DGPS), apenas o posicionamento por ponto absoluto foi alcançado. Em três testes, não foi possível conectar-se a estação POLI, visto que descargas de energia afetaram o funcionamento adequado da estação e a deixaram inoperante durante mais de uma semana. Apenas 10 testes foram aproveitados pelo método estático, descritos na Tabela 5:

Tabela 5: Lista de testes estáticos realizados

Teste	Modo	Data inicial	Data final	Número de Observações	Comprimento linha de base (km)	Duração (horas)	Estação Base
T01	Estático	04/12/2013	04/12/2013	1.310	0,54	0,4	POLI0
T02	Estático	08/02/2014	08/02/2014	1.754	0,54	0,5	POLI0
T03	Estático	09/02/2014	09/02/2014	742	0,54	0,2	POLI0
T04	Estático	26/05/2015	01/06/2015	503.317	0,15	139,8	POLI0
T05	Estático	26/05/2015	01/06/2015	503.769	0,15	139,9	POLI0
T06	Estático	14/05/2015	18/05/2015	348.865	0,15	96,9	POLI0
T07	Estático	14/05/2015	18/05/2015	348.473	0,15	96,8	POLI0
T08	Estático	04/06/2015	05/06/2015	96.630	96,95	26,8	SJSP0
T09	Estático	03/06/2015	06/06/2015	237.394	209,40	65,9	EESC0
T10	Estático	08/06/2015	09/06/2015	78.312	505,55	21,8	PPTE0

Os três primeiros testes foram realizados no pilar P1 da raia olímpica utilizando toda a estrutura do receptor u-blox, inclusive a antena, diferentemente dos demais testes que foram medidos com a antena *choke ring*, conforme a Tabela 6.

Tabela 6: Lista de parâmetros e materiais utilizados nos testes

Testes	T01, T02 e T03	T04, T05, T06, T07, T08, T09 e T10
Antena	u-blox LEA-6T ANN-MS-0-005	Choke ring TRIMBLE TRM 59800.000
Ângulo de máscara de elevação	10	10
Ratio Mínimo para fixação das ambiguidades	3.0	2.5

Fonte: Autor (2015)

Além disso, nos testes T04, T05, T06, T07, T09, T09 e T10, foram utilizadas diferentes estações, buscando simular diferentes raios de distância na qual um usuário comum poderia se conectar à alguma estação na RBMC-IP no país.

O ângulo de máscara de elevação aplicado foi o de 10° com o intuito de reduzir *outliers* e assegurar uma melhor constelação de satélites.

O teste T01 foi realizado no dia 4 de dezembro de 2013. A duração foi de aproximadamente 21 minutos, durante os quais foram obtidas 868 medições de solução fixas e 420 soluções flutuantes.

Apenas em 22 medições nenhuma solução foi alcançada. O *boxplot* da Figura 14 representa a distribuição dos erros encontrados na componente E e na componente N, e também é apresentada a solução Q. De acordo com o manual do software RTKLib, os resultados da solução (Q), podem ser:

- 0= inválido
- 1= RTK *fix*,
- 2= RTK *float*,

- 4= DGPS,
- 5= autônomo

Apenas os valores 1, 2 e 5 de Q foram gerados e todos foram analisados para observar não só a solução fixa do RTK como também a flutuante e o comportamento do receptor sem solução, apenas no posicionamento autônomo.

Nos *box plots* em que são apresentados os resultados, os valores Q são apresentados por componente (N e E). Quando eles não ocorrem, eles não são apresentados, pois aquele determinado valor não foi encontrado durante o teste.

Os valores *Max*, *Min*, *Median* e *StdDev* tem como unidade o metro, já as demais estatísticas descritivas encontradas não possuem unidade.

O desvio padrão dos erros da componente Norte foi de 0,015 m e de 0,052 m na componente Este nas soluções fixas, um valor quase 10 vezes menor do que os valores encontrados nas soluções flutuantes. Estas soluções se mostraram relativamente melhor do que os pontos sem solução (autônomo). A acurácia na componente N atingiu 0,3 m enquanto na componente E foi de 1,5 m. Para facilitar a visualização a linha tracejada vermelha representa a média, enquanto a mediana pode ser identificada pela linha branca entre os blocos ou entre os pontos.

Figura 14: Boxplot do teste T01

Fonte: Autor (2015)

O teste T02 foi realizado no dia 8 de fevereiro de 2014, quando por aproximadamente 30 minutos foram coletados 1754 pontos entre os quais 645 com soluções fixa e 1109 com soluções flutuantes. A acurácia manteve o mesmo padrão na comparação entre os dois tipos de solução. Na fixa, apresentou acurácia de 0,34 m na componente N e 0,71 m na componente E. Na Figura 15, é possível identificar que a precisão

apresentou mais uma vez baixa dispersão, com desvios da ordem 0,012 m para N e 0,004 para E.

Figura 15: *Boxplot* do teste T02

Fonte: Autor (2015)

O terceiro teste (T03) realizado no pilar P1 da raia olímpica foi realizado no dia 9 de fevereiro de 2014, com 742 observações, sendo 63% destas com soluções fixa. Os resultados da acurácia e da precisão ficaram muito próximos do teste T02, como apontado na Figura 16, visto que a acurácia de N foi de 0,29 m e a de E foi de 0,73 m. A precisão, por sua vez, também manteve quase os mesmos desvios, 0,008 para N e 0,012 para E.

Figura 16: Boxplot do teste T03

Fonte: Autor (2015)

Nestes três primeiros testes, diversas vezes foram encontradas variações acentuadas do *ratio* (valor da razão pela qual a solução fixa ou não), demonstrando possíveis satélites surgindo entre os demais visíveis, já que o novo satélite possui ângulo de elevação baixo, podendo trazer um certo risco de sinal de ruído, prejudicando o valor do *ratio*, além de elevar o multicaminhamento.

Os testes T04 e T05 foram realizados com configurações semelhantes, dentre elas antena *choke ring*, ângulo de máscara de elevação (10°), um receptor u-blox LEA-6T para cada teste, estação de referência (POLI0) e coletaram dados simultaneamente. Nesses, a única diferença foi o valor do *ratio* (2.5 para o T04 e 3.0 para o T05) e a partir destes testes, se utilizou um tempo de coleta muito maior, pois em alguns determinados testes com várias horas de duração, os resultados identificaram erros além do esperado (acurácia inferior a 10 metros). Esta pode ter sido a maior influenciadora de um valor quase 3,5 vezes maior de fixação do teste T04 em relação

ao T05. No entanto, outro ponto verificado foi que quase metade (225.521) das 503.317 observações do teste T04 não tiveram solução, devido a indisponibilidade de rede (internet) no momento da coleta.

Quando a solução fixa foi alcançada no teste T04 (Figura 17), após 121.618 observações (mais de 33 horas), a acurácia ficou em 0,51 m para N e 0,35 m para E. Na solução flutuante, a acurácia atingiu 0,71 para N e 0,92 para E com um número inferior de observações (1.334). A precisão em T04 repete os valores aproximados dos desvios encontrados em T01, T02 e T03, sendo de 0,008 para N e 0,005 para E.

Figura 17: *Boxplot* do teste T04

Fonte: Autor (2015)

Já no teste T05, a análise de acurácia e de precisão identificou alguns erros fora dos padrões dos outros testes, pois a acurácia com a solução fixa atingiu picos de 10 metros para N e 11 metros para E. Dados RINEX foram processados com as

observações da estação de referência, porém, nenhuma tendência ou erro dessa grandeza foi encontrado.

Na Figura 18, os resultados que ficaram sem solução apresentaram melhor acurácia e precisão que os com solução. Neste teste houve uma degradação do posicionamento quando as ambiguidades foram resolvidas, contudo as avaliações não foram suficientes para identificar sua fonte.

Figura 18: *Boxplot* do teste T05

Fonte: Autor (2015)

Os testes T06 e T07 foram coletados simultaneamente, com os mesmos ângulos de elevação (10°), antena *choke ring*, um receptor u-blox LEA-6T para cada teste, estação de referência (POLI0) e coletaram observações por mais de 96 horas, gerando 348.865 (T06) e 348.473 (T07) observações.

O teste T06 utilizou o *ratio* 2.5 como referência mínima para a solução fixa das ambiguidades e obteve melhores acurácias em relação ao teste T07, que utilizou *ratio* 3.0. A acurácia de N foi de 0,50 m e de E foi 0,35 m no teste T06 com as soluções fixa.

O valor da acurácia é nitidamente diferenciado de acordo com a solução (Q), e os desvios possuem esta mesma diferenciação, diminuindo a precisão com a solução flutuante e aumentando ainda mais essa diferença quando não há solução, como é observado na Figura 19 e na Figura 20

Figura 19: Boxplot do teste T06

Fonte: Autor (2015)

Apesar dos resultados encontrados em T06 e T07 terem bastante similaridade, algumas discrepâncias foram encontradas, contudo a sensibilidade da solução de

posicionamento RTK dificulta afirmar como os erros aleatórios agiram para distorcer um resultado em relação ao outro.

Figura 20: *Boxplot do teste T07*

Fonte: Autor (2015)

Para cumprir o objetivo de analisar a acurácia do receptor em diferentes linhas de bases, foi utilizado o mesmo ponto no telhado do prédio da Engenharia Civil. As estações de referência utilizadas foram: São José dos Campos (SJSP0), São Carlos (EESC0) e Presidente Prudente (PPTE0). Os descritivos das estações fornecidos pelo IBGE foram usados na entrada de dados no software RTKLib (Figura 21 e Figura 22)

Figura 21: Exemplo de configuração de posicionamento da estação base no RTKLib

Fonte: Autor (2015)

Figura 22: Linha de base entre o rover e a estação SJSP0 com solução fixa

Fonte: Autor (2015)

O teste T08 foi conduzido usando a estação base de São José dos Campos, com um vetor de linha de base de 96.953 metros (Figura 23).

Figura 23: Boxplot do teste T08

Fonte: Autor (2015)

O resultado dos três testes se comportou conforme o esperado, pois segundo SEEGER (1993), a solução fixa é função da linha de base entre receptores e tempo de rastreamento nos pontos, sendo que a observação de tempos entre 15 e 30 minutos para distância entre antenas receptoras de 10 km deveria ser seguida.

No teste T08, o de menor linha de base, 4% dos dados tiveram solução fixa e o restante, solução flutuante. A acurácia de N ficou em 1,3 m e de E em 2,0 m e a dispersão dos pontos de 0,2 m em N e 0,4 m em E.

Nos dados do teste T09, da estação de base de São Carlos, aproximadamente 1% dos dados tiveram solução fixa e também 1% dos dados ficaram sem solução. A acurácia de N atingiu 1,4 m e a de E 3,1 m, mostrando certa degradação nesta componente. Assim como nos outros testes deste trabalho, os *outliers* representaram 10% dos resultados, todavia, todos fizeram parte das análises (Figura 24).

Figura 24: *Boxplot* do teste T09

Fonte: Autor (2015)

Os resultados da maior linha de base testada (T10), de 505.555 metros, com a estação de Presidente Prudente, teve o resultado mais discrepante em relação aos outros dois testes. A acurácia de N atingiu 4,2 m e o desvio ficou em 0,4 m. Já a componente N chegou a 2,3 m de acurácia e a precisão se manteve no mesmo patamar da outra componente (Figura 25).

Figura 25: Boxplot do teste T10

Fonte: Autor (2015)

Dessa forma, os testes estáticos demonstraram uma precisão constante e com resultados inferiores a 1 metro, enquanto a acurácia mostrou certa inconstância e fragilidade da solução RTK, variando a performance do posicionamento em instantes específicos e chegando a 11 metros. Enquanto os testes estavam restritos a poucas horas e menores que um dia, os resultados estavam excelentes, sempre com precisão e acurácia menores que 0,5 metro.

4.2 Testes Cinemáticos

Os testes cinemáticos foram realizados dentro de um automóvel com todos os equipamentos na parte interna e a antena posicionada externamente com a ajuda do imã presente na sua base.

Em relação aos testes estáticos, o diferencial foi que apenas a antena do kit u-blox LEA6T foi utilizada e a conexão 3G era proveniente de um smartphone Nokia Lumia, com a rede de dados fornecida pela operadora TIM. Na Figura 26 é possível visualizar a localização da Análise 1 (em azul) e da Análise 2 (em amarelo). Lembrando que o trajeto da Análise 1 tem sentido anti-horário e o da Análise 2 sentido horário.

Figura 26: Segmentos de retas analisados

Fonte: Autor (2015)

Das 20 voltas internas para a realização da Análise 1, no trecho da Avenida Professor Mello de Moraes da Cidade Universitária da USP com 2.592 metros, apenas 11 delas foram utilizadas, das quais 8 coletou-se pontos no modo RTK (no entanto, a grande maioria das observações não fixaram a solução RTK) e em 3 delas coletou-se dados

no modo absoluto (autônomo, sem solução). O *ratio* para a fixação das soluções das ambiguidades foi 3.

Na tabela 7 está presente a descrição dos testes o número de observações e a porcentagem de fixação para cada uma delas.

Tabela 7: Testes Cinemáticos realizados para a Análise 1

Teste	Modo	Data inicial	Data final	Número de Observações	Observações fixas (%)	Observações flutuantes (%)	Observações autônomas (%)	Estação Base
T11	Cinemático	01/02/2014	01/02/2014	232	0,9	99,1	0,0	POLI0
T12	Cinemático	01/02/2014	01/02/2014	212	0,0	100	0,0	POLI0
T13	Cinemático	06/02/2014	06/02/2014	225	1,7	98,3	0,0	POLI0
T14	Cinemático	06/02/2014	06/02/2014	250	2,4	97,6	0,0	POLI0
T15	Cinemático	06/02/2014	06/02/2014	233	0,7	99,3	0,0	POLI0
T16	Cinemático	11/02/2014	11/02/2014	256	1,9	98,1	0,0	POLI0
T17	Cinemático	15/02/2014	15/02/2014	266	0,0	100	0,0	POLI0
T18	Cinemático	16/02/2014	16/02/2014	249	0,0	100	0,0	POLI0
T19	Cinemático	11/02/2014	11/02/2014	259	0,0	0,0	100	-
T20	Cinemático	15/02/2014	15/02/2014	255	0,0	0,0	100	-
T21	Cinemático	16/02/2014	16/02/2014	262	0,0	0,0	100	-

Fonte: Autor (2015)

Durante os testes as velocidades estiveram entre 20 km/h e 40km/h. A linha de base não ultrapassou os 2.000 metros de distância.

Muitos obstáculos, como árvores nos dois lados das vias, postes elétricos e alguns prédios reduziram a qualidade do sinal GPS recebido. Além disso, a escolha dos trajetos analisados levou em conta uma curva em cada um deles, para que o posicionamento fosse testado em diferentes condições cotidianas.

A Figura 27 representa a curva ajustada aos pontos da Análise 1. Foram utilizadas 8 bases de dados, num total de 1923 observações de dados RTK. Este resultado mostra como o algoritmo (*software* R: pcurve) traz as duas dimensões, *Dim1* e *Dim2* (neste caso, invertidas) e o número de interações necessárias (*Iter # 3*) que ele realizou para alcançar a curva principal. Na figura 27 é possível identificar o número da última iteração realizada que foi necessária para alcançar 100% das componentes principais, dada a alta correlação e proximidade entre as variáveis simuladas.

Figura 27: Curva principal da Análise 1 com pontos RTK

Iter # 3 % d² explained = 100

Fonte: Autor (2015)

A Figura 28 traz a mesma imagem da figura acima, com um zoom especificamente na curva. A linha vermelha representa a curva, na qual os pontos (traço preto) foram ajustados na menor distância possível (traços verdes), ou seja, cada ponto dos 1923 representados (pelo traço preto) geraram outro ponto, formando uma reta ajustada a média das coordenadas.

Figura 28: Zoom da Curva Principal da Análise 1

Fonte: Autor (2015)

Na Análise 1, além dos pontos RTK mencionados acima, foram utilizados também 3 trajetos com dados absolutos do receptor GPS. A Figura 29 é um recorte do trecho, logo no início da Avenida Professor Mello de Moraes e ela sintetiza a análise da acurácia e precisão da Análise 1.

A ideia de acurácia aplicada na Análise 1 se refere a capacidade das curvas de reproduzirem o caminho real da via, que neste caso foi utilizada a base cartográfica do *OpenStreetMaps*.

Nota-se, não apenas no início do trajeto, mas também durante todo o percurso, que os pontos RTK estavam mais concentrados (maior precisão), em relação aos pontos do modo autônomo. Ambos se revezaram na proximidade da via de referência, alcançando uma acurácia de 1,2 metro para a curva RTK e 1,6 metro para curva absoluta (não foi incluída a incerteza da base OSM na análise). Baseado nas nuvens de pontos coletadas, as retas ajustadas dos dois modos de posicionamento demonstraram que ambos podem ser utilizados para a estimativa de trajeto viário a partir das nuvens de pontos, pois demonstraram uma precisão de menor que 1 metro, assim como já havia sido demonstrado nos testes estáticos.

Figura 29: Início do trajeto da Análise 1 na Avenida Professor Mello de Moraes

Fonte: Autor (2015)

Das 9 voltas internas para a realização da Análise 2, no trecho da Avenida Professor Luciano Gualberto e da Avenida Professor Lineu Prestes na Cidade Universitária da

USP com 1.053 metros, apenas 6 delas foram utilizadas, pois as demais não seguiram a mesma metodologia de coleta (trajeto comum, solução RTK com *ratio* 3 e velocidade entre 20 km/h e 40 km/h). Na Tabela 8 estão descritos os testes e especificada a porcentagem de solução RTK alcançada em cada um deles.

Tabela 8: Testes realizados e porcentagem de solução RTK

Teste	Modo	Data inicial	Data final	Número de Observações	Observações fixas (%)	Observações flutuantes (%)	Observações autônomas (%)	Estação Base
T22	Cinemático	05/06/2014	05/06/2014	101	7,2	82,8	0,0	POLI0
T23	Cinemático	01/02/2014	01/02/2014	104	0,0	88,4	11,6	POLI0
T24	Cinemático	06/02/2014	06/02/2014	107	0,0	100	0,0	POLI0
T25	Cinemático	06/02/2014	06/02/2014	104	0,0	24,1	75,9	POLI0
T26	Cinemático	06/02/2014	06/02/2014	109	20,1	79,9	0,0	POLI0
T27	Cinemático	11/02/2014	11/02/2014	100	5,0	95,0	0,0	POLI0

Fonte: Autor (2015)

A Figura 30 representa a curva ajustada aos pontos da Análise 2. Foram utilizadas 6 bases de dados, num total de 625 observações de dados. Este resultado mostra como o algoritmo traz as duas dimensões (neste caso, invertidas) e o número de interações necessárias (apenas 4) que ele realizou para alcançar a curva principal. Na primeira interação ele já atingiu um ajuste no valor de 100, indicando uma precisão dos dados muito elevada.

Assim como na Análise 1, a Figura 31 apresenta um zoom da Figura 30. A linha vermelha representa a curva, na qual os pontos (círculo preto) foram ajustados na menor distância possível (traços verdes), ou seja, cada ponto dos 625 representados geraram outro ponto, formando uma reta ajustada a média das coordenadas.

Figura 31: Zoom da Curva Principal da Análise 2

Fonte: Autor (2015)

Para a Análise 2, a acurácia é a relação da distância entre a curva principal e a base cartográfica do *OpenStreetMaps*.

A Figura 32 representa o início do trajeto (Avenida Professor Lineu Prestes). Identifica-se uma distância variando entre 0 e 1,75 metros de acurácia da curva principal para a base cartográfica. A nuvem de pontos coletada se concentrou sempre próxima a base cartográfica e a curva principal gerada a partir dela demonstra um resultado similar ao da Análise 1, na qual a precisão final encontrada foi satisfatória, assim como nos testes estáticos. Na Análise 2, as 6 bases de dados analisadas com o *software R* deram um respaldo maior na estimativa de trajeto do que as bases (cinemáticas) analisadas separadamente, alcançando precisão menor que 1 metro. O algoritmo *pcurve* se mostrou muito eficaz em ambas as análises para a estimativa de trajeto a partir de pontos GPS.

Figura 32: Início do trajeto da Análise 2 na Avenida Professor Lineu Prestes

Fonte: Autor (2015)

5 CONCLUSÕES

O uso do receptor u-blox LEA-6T em conjunto com o software RTKLib para a solução das ambiguidades e fixação do posicionamento RTK, a partir de testes estáticos, atingiu acurácia de 1 metro e precisão da mesma ordem. Porém, houve uma variação da acurácia por alguns instantes nos testes estáticos longos (mais de um dia de duração) que chegou a 11 metros. Esperava-se um resultado relativamente superior com a utilização da antena *choke ring*, pelo fato de outros trabalhos da área (PESYNA, 2014) afirmarem que a antena é determinante na melhoria da fixação das ambiguidades. No entanto, o uso desta antena não trouxe melhoras significativas.

Em relação aos testes estáticos T01, T02 e T03, os quais tiveram duração menor que uma hora e comprimento de linha de base menor que 1 km, os resultados tiveram uma performance abaixo, porém comparáveis, da encontrada por Andrei (2012). Nestes três testes, a acurácia foi de 35 cm, enquanto que Andrei (2012), utilizando metodologia e equipamentos semelhantes obteve acurácia de 10 cm.

Nos dois modelos de testes cinemáticos realizados, os resultados tiveram uma acurácia entre 1,2 e 1,7 metros. No entanto, não houve uma diferença significativa entre a solução de posicionamento RTK e o modo autônomo do receptor, sendo necessária uma maior investigação, com um maior número de testes e utilizando a metodologia proposta nesta e outras pesquisas, para confirmar se existe uma diferença entre as duas soluções de posicionamento.

O software RTKLib demonstrou que permite um rápido e fácil posicionamento na ordem de centímetros usando o modo RTK próximo à uma estação de referência. Em linhas de base mais longas a acurácia e a precisão sofrem considerável degradação, porém podem ser úteis em determinadas aplicações.

Ao contrário do resultado do posicionamento relativo pós-processado, que descarta valores que não estão dentro do esperado e o tempo de rastreamento maior traz resultados mais acurados, o RTK “em tempo real” não descarta os valores e em determinados momentos, com monitoramento contínuo, notou-se que ele desloca alguns metros por poucos segundos ou minutos. A característica da solução de posicionamento RTK dificulta o apontamento de como os erros aleatórios interferem nos valores encontrados.

Além dos resultados qualitativos e quantitativos, uma contribuição importante, desta pesquisa, foi o desenvolvimento de uma metodologia específica, na área de soluções de posicionamento RTK, que trouxe, através da utilização de ferramentas estatísticas, ganhos de produtividade significativos em termos de tempo, equipamentos e mão de obra necessária, pois explorou não somente um maior tempo de rastreamento nos testes estáticos, mas cobriu também testes cinemáticos.

Há uma tendência na diminuição do tempo e da habilidade necessária para a coleta de dados de alta precisão e os projetos consequentemente serão concluídos em um tempo menor.

A utilização da conexão GSM para a transmissão das observações de fase vem crescendo no Brasil, assim como a cobertura 3G de internet móvel. A conexão GSM usa a mesma rede repetidora da telefonia celular, portanto, com maior área de cobertura e com a possibilidade de aumento da distância entre os receptores base e móvel, sem as restrições das transmissões via rádio. Como mostrado nesta pesquisa, utilizou-se nos experimentos um receptor GNSS móvel (GPS/L1) com um chip GSM-SIM para a conexão GSM integrado, recebendo as observações de fase em tempo real da estação de referência mais próxima, sendo os dados processados através de software instalado em um laptop. Entretanto, há softwares disponíveis para outras plataformas como *tablets* e *smartphones*, e esta deve ser a tendência para execução não somente de levantamentos topográficos, quanto estes deverão ser utilizados em outras áreas de aplicação nos próximos anos.

Em trabalhos futuros, seria oportuno trazer mais análises de acurácia e precisão para o modo cinemático (com maior número de dados), relacionando o posicionamento cotidiano das pessoas e os desvios e discrepâncias em relação a outras bases de referência de posicionamento.

REFERÊNCIAS

REFERÊNCIAS UTILIZADAS

ANDREI, C. O. **Cost-effective Precise Positioning using Carrier Phase Navigation-Grade Receiver**. International Conference on Localization and GNSS, Stamberg, Alemanha, 2012.

BARONI, L. **Algoritmos de navegação em tempo real para um sistema GPS de posicionamento relativo de precisão**. São José dos Campos: INPE, 2009

BLITZKOW, D. **Navstar/GPS: um desafio tornado realidade**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOPROCESSAMENTO, 3, 1995, São Paulo. Anais. São Paulo, 1995.

BRAZEAL, R. **GNSS Next: Do it yourserlf Internet RTK**. Professional Surveyor Magazine, Março/2013.

BRUNSDON, C. **Path Estimation from GPS Tracks**. Proceedings of the 9th International Conference on GeoComputation National Centre for Geocomputation, National University of Ireland, Maynooth, Eire, September 2007.

CALDERA, S., GATTI A., PERTUSINI L., REALINI E., REGUZZONI M., SAMPIETRO D., **Using goGPS software with a multi-antenna GPS system to improve navigation with low-cost receivers**, EGU 2013, Vienna, Austria, 7-12 April 2013.

CAMARGO, P. O. **Modelo Regional da Ionosfera para Uso em Posicionamento com Receptores GPS de Uma Frequência**. 1999. 191f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

CUK, I; SUPEJ, M. **Comparison of Global Navigation Satellite System Devices on Speed Tracking in Road (Tran)SPORT Applications**. Sensors 2014, 14, 23490-23508; doi:10.3390/s141223490.

CHANGH, X, W.; YANG, X.; ZHOU, T. **MLAMBDA - A modified LAMBDA method for integer least-squares estimation**. J. Geodesy, vol.79, 2005.

CINA, A.; DE AGOSTINO, M.; MANZINO, A.; PORPORATO, C. **Merging Low-cost Receivers in a GNSS Network of Permanent Stations**. Institute of Navigation, 2009. ION GPS GNSS; 5; 3076-3084.

EFFRON, B. **The Jackknife, the Bootstrap and Other Resampling Plans**. Philadelphia, Pennsylvania: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1982.

GUIMARAES, Gabriel do N.; CAMARGO, Paulo de O.. **Garmin 12 xl gps navigation potentiality using a low cost system**. Eng. Agríc., Jaboticabal, v. 34, n. 2, p. 300-310, abr. 2014.

GEBHARD, H.; WEBER, G. **Network Transport of RTCM via Internet Protocol. Design-Protocol-Software**. Federal Agency for Cartography and Geodesy, 2003.

GSA, European GNSS Agency. **GNSS Market Report**. Issue 4. Luxembourg: Publications Office of the European Union, March 2015.

HASTIE, T, J.; STUETZLE, W. **Principal curves**. Journal of the American Statistical Association, 1989, 502–516 p.

HIGGINS, M. **GNSS, CORS and Positioning Infrastructure: Business and the future**. Presentation at FIG Regional Conference Costa Rica, 2007.

HOFMANN-WELLENHOF, B., LICHTENEGGER, H. e COLLINS, J. 1997. **Global Positioning System: theory and practice**. Springer Wien New York. 386p.

IBGE. **Resolução PR nº 5 (31/03/1993) - Especificações e Normas Gerais para Levantamentos GPS (versão preliminar)**. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/default_normas.shtm. Acesso em: 12 jul. 2014.

INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA (INCRA). Diretoria de Ordenamento da Estrutura Fundiária Coordenação Geral de Cartografia. **Manual Técnico de Posicionamento - Georreferenciamento de Imóveis Rurais**. 1ª Edição, INCRA. Brasília, 2013.

JOLLIFE I.T. **Principal Component Analysis**. Series: Springer Series in Statistics, 2nd ed., Springer, NY, 2002, XXIX, 487 p. 28 illus. ISBN 978-0-387-95442-4

KEVIN, W.; HALL, K.W.; COOPER, J.K.; LAWTON, D.C. **GPS accuracy: Hand-held versus RTK**. Crewes Research Report, 20, 2008.

KAPLAN, E.; HEGARTY, C. **Understanding GPS: principles and applications**. 2ed. Artech House, 2006, 702p.

KRUEGER, C.P.; TRANCHES, S. 2006. **Verificação da Possibilidade em se realizar Georreferenciamento de Imóveis Rurais através de Observações da Onda Portadora L1 coletadas por Meio de Receptores GPS de Navegação**. COBRAC 2006 – CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALIÁRIO, Florianópolis. Anais (CD-ROM), p.1-7.

KRUEGER, C.P.; HUINCA, S, C, M. **Apostila – Procedimentos de Calibração de Antenas GNSS**. Laboratório de Geodésia Espacial, UFPR. Julho de 2010. Disponível em: http://www.lage.ufpr.br/downloads/Apostila_calibracao.pdf (Acesso em 30/05/2015).

LEICK, A. **GPS – satellite surveying**. 3.ed. Hoboken, John Wiley & Sons, 2004. 431p

MASELLA, E. M.; GONTHIER, M.; DUMAINE, N. **The RT-STAR: Features and Performance of a Low-Cost RTK OEM Sensor**. Proceedings of the 10th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1997), Kansas City, MO, Sep. 16–19, 1997, pp. 53–59.

MENG, X; YANG, L; APONTE, J; HILL, C; MOORE, T; DODSON, A, H. **Development of Satellite Based Positioning and Navigation Facilities for Precise ITS Applications**. Proceedings of the 11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems Beijing, China, October 12-15, 2008.

MIKHAIL, E.; ACKERMAN, F. **Observations and Least Squares**. University Press of America, 1976. 497 p.

MONICO, J.F.M.; PÓZ, A.P.D.; GALO, M.; SANTOS, M.C.; OLIVEIRA, L.C. **Acúrcia e Precisão: Revendo os conceitos de forma acurada**. Bol. Ciênc. Geod., séc. Comunicações, Curitiba, vol. 15, nº 3, p.469-483, jul-set, 2009.

MONICO, J.F.G. **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações**. 2 ed. São Paulo: Editora UNESP, 2008, 473p.

NIST/SEMATECH. **E-Handbook of Statistical Methods**. U.S. Department of Commerce. <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>, 2013.

PESYNA, K. M.; HEATH, R. W.; HUMPHREYS, T. E. **Centimeter Positioning with a Smart-Quality GNSS Antenna**. GPS World, Fevereiro de 2015.

RAY, J.K. **Mitigation of GPS Code and Carrier Phase Multipath Effects Using a Multi-Antenna System**. 2000. 260f. PhD Thesis - University of Calgary, Calgary.

RIZOS, C. **Principles and practice of GPS surveying**. Sydney: Satellite Navigation and Positioning Laboratory, 1999. Disponível em: <<http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/gps/gps-survey/principles-gps.htm>>. Acesso em: 25 de maio de 2015.

ROGOWSKI, J.B.; KUJAWA, L.; LESZCZYNSKI, M.; ROGOWSKI, A. **Some Experiences In Rtk And Dgps Measurements Using Internet And Gsm Mobile-Phone Some Experiences In Rtk And Dgps Measurements Using Internet And Gsm Mobile**. In: The EUREF 2004 Symposium of the IAG Subcommittee for Europe (EUREF) 2-5 June 2004 Bratislava, Slovakia Disponível em: <http://www.euref-iag.net/symposia/book2004/P-10.pdf> Acesso em: 20/02/2013.

RTCM. **RTCM Recommended standards for differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems Service)**. Version 3.0. Radio technical commission for maritime services, Virginia. 2007.

RTCM. **Radio Technical Commission for Maritime Services: Special Committee nº 104. RTCM STANDARD 10403.2: Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Services – Version 3**. Virginia, USA, 2013.

SAATKAMP, Eno, D. **Protocolos RTCM-SC104: desenvolvimento histórico e características das versões, aspectos de codificação e decodificação**. Apresentação realizada no MundoGEO Connect, 19 de junho de 2013. UFSM/IBGE.

SEEBER, G. **Satellite geodesy: foundations, methods and applications**. Berlin: Walter de Gruyter, 1993. 529p.

SOUZA, C. R. M. **Interferidores de GPS: Análise do Sistema e de Potenciais Fontes de Interferência**. 90 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica.) – IME - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2005.

SPECIAL COMMITTEE 104. **RTCM Recommended Standards for Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Service**, Version 3.0, Radio Technical Commission for Maritime Services, Alexandria, VA, February 10, 2004.

STEMPFHUBER, W; BUCHHOLZ, M. **A precise, low-cost rtk gnss system for uav applications.** In: **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Vol. XXXVIII (1-C22), ISPRS Zurich 2011 Workshop, Zurich, Switzerland, pp. 289–293.

TAKASU, T; YASUDA, A., **Development of the low-cost RTK-GPS receiver with an open source program package RTKLIB**, GPS/GNSS symposium 2009, Tokyo, Japan, 20-22 November.

TAKASU, T. 2007. **RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning.** <http://www.rtklib.com/> . Acesso em Outubro de 2013.

TAKASU, T. 2013. **RTKLIB ver. 2.4.2 Manual.** http://www.rtklib.com/prog/manual_2.4.2.pdf. Acesso em Novembro de 2013.

TEUNISSEN, P. J. G. **The least-square ambiguity decorrelation adjustment: a method for fast GPS ambiguity estimation.** J. Geodesy, vol.70, 1995.

TEUNISSEN, P. J. G.; ODIJK, D.; JOOSTEN, P. **A probabilistic evaluation of correct GPS ambiguity resolution.** In: International Technical Meeting of Satellite Division of the Institute of Navigation, 11., 1998, Nashville, Tennessee. Proceedings... Nashville: ION, 1998. p. 1315–1323. 3, 8.

UNAVCO. **Choke Ring Antenna Calibrations.** Disponível em: <http://facility.unavco.org/kb/questions/311/Choke+Ring+Antenna+Calibrations>. Acesso em: 24 agosto 2014.

WANG, J.; STEWART, M. P.; TSAKIRI, M. **A discrimination test procedure for ambiguity resolution on-the-fly.** Journal of Geodesy, v. 72, p. 644–653, 1998

WAYPOINT, 2005. **Static Baseline Accuracies as a Function of Baseline Length, Observation Time and the Effect of using the Precise Ephemeris.** Disponível em: http://www.novatel.com/assets/Documents/Waypoint/Reports/Static_Accuracies.pdf. Acesso em: 30 março 2015.

REFERÊNCIAS CONSULTADAS

CAPPELI, N.L.; UMEZU, C.K.; SILVEIRA, A.C. **Desempenho comparativo dos aparelhos GPS ETREX, III Plus e AgGPS132 quanto a acurácia e precisão.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2004, Piracicaba. Anais... Piracicaba: ESALQ/USP, 2004. CD 1.

DOW, J.M., NEILAN, R. E., e RIZOS, C., **The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems**, Journal of Geodesy (2009) 83:191–198, DOI: 10.1007/s00190-008-0300-3.

GUANDALINI, M. **Análise metodológica do posicionamento relativo através do GNSS e suas aplicações na engenharia: uso da técnica RTK/GSM**. Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo/USP - Engenharia de Transportes, Agosto/2012.

GPS World. **Receiver Survey**. Disponível em: http://gpsworld.com/wp-content/uploads/2015/01/GPSWorld_2015ReceiverSurvey.pdf. Acesso em: 19 de abr. 2015.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. **GNSS – Global navigation satellite systems, GPS, GLONASS, Galileo and more**. Springer-Verlage Wien, 2008. 501p.

IBGE. **Manual do Usuário: Aplicativo On-line Versão 2013**. Coordenação de Geodésia, Departamento de Geociências, Brasília, 2013.

IBGE. **RBMC-IP - Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS em tempo real**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc/ntrip/>. Acesso em: 10 out. 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA (INCRA). Diretoria de Ordenamento da Estrutura Fundiária Coordenação Geral de Cartografia. **Norma Técnica para Georreferenciamento de Imóveis Rurais**. 3a Edição, INCRA. Brasília, 2013.

NASA Builds GPS-Based System For Detecting Natural Disasters. Disponível em: <http://www.redorbit.com/news/science/1113025581/nasa-gps-system-detects-natural-disasters-121113/>. Acesso em 20 jan 2014.

NORMA ABNT INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Sistema IBGE de Recuperação Eletrônica (SIDRA)**. 2001. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br>. Acesso em: 06 mar. 2014.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Geographic Information System**. Open Source Geospatial Foundation, Versão 2.2, 2014. URL: <http://qgis.osgeo.org>. Acesso em 25 de Fevereiro de 2014.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna Áustria: R Foundation for Statistical Computing; 2014. Disponível: <http://www.R-project.org/>. Acesso em: 15 Mar 2015.

TIBCO SOFTWARE. **TIBCO® Spotfire® Desktop 6.5.1**. Covered by US. Pat. No. 6,014,661 and 7,216,116 other patents pending. Build version: 6.5.1.7. Acessado em 31 de Outubro de 2014.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **World report on road traffic injury prevention: summary**. WHO, 2004. Disponível em: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs358/en>. Acesso em 25 fev. 2014.