

CHAENNE MILENE DOURADO ALVES LIMA

**POSICIONAMENTO POR PONTO PRECISO COM
SOLUÇÃO DE AMBIGUIDADES INTEIRAS NO
CONTEXTO DE REDE GPS**



TESE

Presidente Prudente
2015



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE PRESIDENTE PRUDENTE
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

CHAENNE MILENE DOURADO ALVES LIMA

**POSICIONAMENTO POR PONTO PRECISO COM SOLUÇÃO
DE AMBIGUIDADES INTEIRAS NO CONTEXTO DE REDE
GPS**

Tese de doutorado desenvolvida junto ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP (Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”) - Campus de Presidente Prudente

Orientador: Prof. Dr. João Francisco Galera Monico
Coorientador: Prof. Dr. Haroldo Antonio Marques

Presidente Prudente
2015

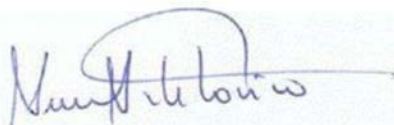
FICHA CATALOGRÁFICA

L697p Lima, Chaenne Milene Dourado Alves.
Posicionamento por ponto preciso com solução de ambiguidades inteiras no contexto de rede GPS / Chaenne Milene Dourado Alves Lima. - Presidente Prudente : [s.n.], 2015
167 f. : il.

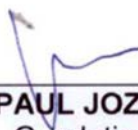
Orientador: João Francisco Galera Monico
Coorientador: Haroldo Antonio Marques
Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia
Inclui bibliografia

1. Solução de ambiguidades inteiras. 2. PPP. 3. Redes GNSS. 4. PPP RTK
I. Monico, João Francisco Galera. II. Marques, Haroldo Antonio. III. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e Tecnologia. IV. Título.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. JOÃO FRANCISCO GALERA MONICO
Orientador



Prof. Dr. PAUL JOZEF DE JONGE
Geodetics Inc



Prof. Dr. MARCELO CARVALHO DOS SANTOS
UNB



Profa. Dra. DANIELE BARROCA MARRA ALVES
UNESP/FCT



Prof. Dr. PAULO DE OLIVEIRA CAMARGO
UNESP/FCT



CHAENNE MILENE DOURADO ALVES LIMA

Presidente Prudente (SP), 02 de outubro de 2015.

Resultado: **APROVADA.**

Dedico este trabalho:

À minha mãe Conceição, sempre presente, a quem eu nunca quero decepcionar.

Ao meu esposo e amigo José Renato, que sempre esteve ao meu lado, na alegria e na tristeza e literalmente na saúde e na doença.

À minha avó Constância (in memoriam), sinônimo de amor. Ela foi a estrela mais linda que brilhou na minha vida e se foi durante o doutorado, antes que eu pudesse comemorar com ela esta conquista.

Ao meu querido filhote, protetor, amigo e amável companheiro Bingo. Meu cachorrinho que esteve na minha vida por 15 anos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus pelas maravilhas que tem feito em minha vida e por me fazer forte nos momentos necessários para que assim eu pudesse passar pelas adversidades da vida.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo financiamento desta pesquisa por meio da concessão de bolsa de estudos durante todo o período.

Ao Prof. Dr. João Francisco Galera Monico que tem todo o meu respeito e admiração. Agradeço pela orientação, dedicação e paciência. Também não posso deixar de agradecer pela confiança depositada, pela parceria e principalmente por toda a compreensão demonstrada nos momentos mais difíceis durante o desenvolvimento do trabalho.

À UNESP, ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas e seu corpo docente, por proporcionarem as condições necessárias para o desenvolvimento da pesquisa. Um agradecimento especial ao Prof. Dr. Paulo Camargo e à Prof.^a Dr.^a Daniele Barroca, pelo apoio e colaboração. Também agradeço carinhosamente à Cinthia, pois seu conselho e apoio foram determinantes para eu conseguir chegar até a defesa.

Ao Grupo de Estudos em Geodésia Espacial pelas agradáveis reuniões com troca de conhecimento e aprendizado. Em especial, aos feras da computação Bruno e Rogério, pela disposição e colaboração. À Tayná, pela colaboração, apoio, conselhos e companhia no entendimento da Geodésia. À Crislaine, pela companhia nos estudos, colaboração e pelas construtivas conversas sobre Ambiguidades GNSS. À Hérica, pela companhia no LGE, colaboração e apoio.

Ao Prof. Dr. Haroldo Antonio Marques pela coorientação e colaboração no desenvolvimento da pesquisa.

À UFPE (Universidade Federal de Pernambuco) e aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, pela recepção e instalações fornecidas durante o período de trabalho de campo, que foi importante para auxiliar no desenvolvimento da pesquisa. Agradeço também aos amigos e amigas que conheci nesse período que passei em Recife. Eles proporcionaram uma temporada mais agradável e menos árdua.

Às minhas amigas cutículas Julia e Dani, pela força, companhia, acolhimento e amizade. Passamos muitos momentos felizes juntas.

Às minhas amigas Tayná, Miriam, Samara, Hérida, Fernanda, Raquel, Crislaine e Heloísa, pela amizade, apoio, conversas, conselhos, hospedagem e pelos maravilhosos momentos de descontração e felicidade. Obrigada por tornarem Presidente Prudente um local alegre nas minhas lembranças. Teria sido tudo mais difícil sem vocês.

Ao meu grande amigo Lineardo Melo, que sempre me apoia em tudo que faço e colabora com meus projetos, sejam pessoais ou profissionais. É muito bom saber que posso contar com ele em todos os momentos.

Aos meus queridos amigos Joaquim Reis, Marinalva Lima e Genesis Lima, pessoas que aprendi a amar como irmãos e sei que estão sempre prontas para me apoiar e ajudar no que for necessário.

À Milene, Valter, Ésio e família, pelo acolhimento, apoio, carinho, amizade, força e por dividirem comigo o peso de um tratamento de saúde em meio a um doutorado. Eles tornaram meus dias mais alegres, minhas dores mais brandas, meus enjoos menos enjoados, meu sofrimento menos sofrido. Um agradecimento carinhoso à Milene e Valter por terem sido como pais para mim e à Eve, Yaya e Pepe, três adoráveis pessoas que iluminaram minha vida quando tudo parecia cinza e sem graça.

À minha mãe Conceição, a estrela que ilumina minha vida. Por ela que eu batalhei para chegar até aqui. Ela é minha base e minha fortaleza. Sempre presente em todos os momentos da minha vida.

Ao meu esposo José Renato, um presente de Deus. Agradeço pelo apoio, incentivo e por não me deixar desistir. Com ele eu pude desabafar chorar e o mais importante que foi dividir todo o peso. Ele fez com que eu me sentisse forte e com coragem para seguir em frente. Com ele divido as tristezas, preocupações, muitas alegrias e momentos felizes. Agradeço também por ter me trazido a minha filha Ana Renata, que tem me ensinado no dia a dia a ser uma pessoa mais paciente e compreensiva.

Ao meu querido irmão Francisco, aos meus familiares das famílias Dourado e Lima, amigos, às pessoas que rezam e rezaram por minha recuperação e a todos que colaboraram para que fosse possível a realização deste trabalho.

*Difficult doesn't mean impossible.
It simply means that you have to work hard!
(Unknown)
O segredo é acreditar em Deus!*

RESUMO

A solução de ambiguidades inteiras é um assunto desafiador e muito pesquisado, principalmente para aplicações GNSS na Geodésia e Geodinâmica. Dos métodos de posicionamento GNSS, o PPP tem-se demonstrado como uma poderosa ferramenta para diversas aplicações e tem sido alvo de interesse, tanto em pesquisas científicas quanto em aplicações práticas. Estudos em nível mundial têm sido realizados no contexto da solução das ambiguidades inteiras no PPP, com a finalidade de melhorar a acurácia em curtos períodos de observação, ou até mesmo de forma instantânea. Esta pesquisa tem como objetivos investigar e adotar uma metodologia para solução de ambiguidades inteiras, além de desenvolver, aperfeiçoar e realizar as alterações necessárias em termos de algoritmos, para que a mesma seja programada computacionalmente de forma que se possa realizar o método PPP com ambiguidades fixas, com base em uma rede de estações GNSS. Após estudos e investigações, a metodologia adotada nesta tese consiste na estimativa das simples diferenças (SD) de ambiguidades WL (*wide-lane*) e NL (*narrow-lane*) para remover os UPDs (*uncalibrated phase delays*) do receptor, presentes nas ambiguidades da fase da onda portadora. Esses valores de SD de ambiguidades foram combinados dentro de uma rede de estações GNSS para calcular os UPDs dos satélites. Os UPDs WL e NL referentes aos satélites, estimados em nível de SD, foram aplicados para fixação inteira das ambiguidades da combinação linear *ion-free* em nível do usuário, onde são introduzidas equações de inunção para as ambiguidades conhecidas visando melhorar a estimativa dos parâmetros no PPP. Para atingir os objetivos da pesquisa, foi desenvolvido um *software*, chamado UPD_NETWORK, para estimativa dos UPDs, para um determinado par de satélites dentro da rede GNSS. Também foram realizadas adaptações no algoritmo do *software* RT_PPP, que realizava PPP com a estimativa de ambiguidades reais para que o mesmo passasse a realizar PPP com solução de ambiguidades inteiras, a partir da implementação da metodologia adotada nesta pesquisa. Os UPDs_WL foram estimados com 24 horas, para sete dias e apresentou estabilidade de aproximadamente 0,05 ciclos, suficiente para a solução das ambiguidades com confiança. Os UPDs_NL apresentaram-se instáveis para estimativas diárias, sendo realizados experimentos para verificar a sua estabilidade temporal. As estimativas de UPD_NL com dados horários foram estáveis e precisas o suficiente para a fixação das ambiguidades. Essas estimativas foram aplicadas no PPP para fixação das ambiguidades em modo estático e cinemático. Os resultados demonstraram que é possível a fixação das ambiguidades com confiança em intervalos de tempo em média de 9 minutos, com acurácia para o modo estático por volta de 5 cm e de 15 cm em modo cinemático. Estudos nesse sentido ainda são muito incipientes no Brasil. Desta forma, esta pesquisa caracteriza um grau de inovação tecnológica e traz uma contribuição para as pesquisas no âmbito do posicionamento geodésico.

Palavras-chave: Solução de Ambiguidades Inteiras, PPP, Redes GNSS, PPP RTK.

ABSTRACT

Integer ambiguity resolution is a challenging theme that has been very much researched, mainly to precise GNSS applications in Geodynamic and Geodesy. Among several GNSS positioning methods, PPP has presented itself as a powerful tool useful for many applications and it has been of interest in scientific as in operational applications. Researches at global level have been carried out in context of PPP integer ambiguity resolution, aiming to improve the accuracy for short observation period, or even instantly. This PhD thesis goal is to investigate and adopt a methodology for PPP integer ambiguity resolution. Additionally, it is intended to develop, improve and perform the necessary changes, in terms of algorithm, to implement a computational program that allows to run the PPP method using fixed ambiguities based on a GNSS network. After some studies and investigations, the adopted methodology in this thesis is based on the estimative of WL (wide-lane) and NL (Narrow-lane) simple difference ambiguity (SD) to remove the receiver UPDs (Uncalibrated phase delays) that are present in the ambiguities of the carrier-phase. SD ambiguities were combined in a GNSS network in order to compute the satellite UPDs. WL e NL UPDs for the satellites, estimated at the level of simple difference, were applied to fix the ambiguities of the ion-free linear combination at the user level, by means of constraints to improve the quality of the parameters estimative based on PPP. In order to reach the main goal of this research, a software called UPD_NETWORK was developed to estimative the UPD of the satellite pair in the GNSS network. Furthermore, adaptations were applied to the RT_PPP software algorithms to allow it performing PPP with integer ambiguity instead of float ambiguity estimative. The UPDs_WL were estimated for 24 hours period, over seven days and presented a stability around 0.05 cycles, that is appropriated to an ambiguity resolution with good confidence level. The UPDs_NL were unstable when estimated daily, and experiments were carried out to check its temporal stability. We found that hourly UPD_NL estimative were stable and precise enough for ambiguity resolution. Those estimative were applied in the PPP to the ambiguity resolution at the static and kinematic mode. Results showed that it is possible to obtain reliable ambiguity resolution at the time range of about 9 minutes, with accuracy of 5 cm when at static mode, and 15 cm in the kinematic one. Studies about PPP Ambiguity Resolution are incipient in Brazil; so this thesis characterizes a certain degree level of technologic innovation and brings great contribution to the Brazilian researches related to geodesic positioning.

Keywords: Integer ambiguity resolution, PPP, GNSS networks, PPP RTK.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Fontes e erros envolvidos nas observeis GNSS	31
Quadro 2- Produtos gerados pelo IGS	53
Quadro 3- Estratégia de Processamento para estimativas UPD.	100
Quadro 4- Estratégia de Processamento para o modo estático	104
Quadro 5- Estratégia de Processamento para o modo cinemático	107

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Efeitos da cintilação ionosférica no posicionamento GNSS.....	36
Figura 2 - Simples diferença entre satélites.....	49
Figura 3 - Dupla diferença entre satélites e receptores	51
Figura 4 - Distribuição das estações da RBMC.....	62
Figura 5 - Distribuição das estações da Rede GNSS-SP.....	63
Figura 6 - Interpretação geométrica das ambiguidades	64
Figura 7 – Esquema de Solução de Ambiguidades.....	70
Figura 8 - Região de decisão de arredondamento para a solução de ambiguidade	83
Figura 9–Fluxograma do UPD_NETWORK.....	92
Figura 10 – Fluxograma do RT_PPP_AR.....	97
Figura 11 – Localização das estações da rede GNSS	99
Figura 12–Localização das estações de teste.....	101
Figura 13 – Índices de cintilação (S4) em amplitude para o dia 012 de 2014	102
Figura 14 – Índices de cintilação (S4) em amplitude para o dia 018 de 2014	102
Figura 15–Localização dos pontos de controle	106
Figura 16 - Estimativas do UPD_WL com relação ao PRN9 para os dias 012 a 018 de 2014 - Estimativas com maior arco de dados contínuo.....	109
Figura 17 - Estimativas do UPD_WL com relação ao PRN9 para os dias 012 a 018 de 2014 - Estimativas com todos os arcos de dados contínuos.....	109
Figura 18 – Desvio Padrão UPD_WL com relação ao PRN09 para os dias 012 a 018 de 2014 – Estimativas com maior arco de dados contínuo.....	110
Figura 19 – Desvio Padrão UPD_WL com relação ao PRN09 para os dias 012 a 018 de 2014 – Estimativas com todos os arcos de dados contínuos	110
Figura 20 - Multicaminho para a estação BRAZ, dia 012 de 2014	111
Figura 21 – Visibilidade dos satélites na estação MTSF, ângulo de elevação de 30 graus ...	112
Figura 22 - Estabilidade diária do UPD_WL para alguns satélites, com respeito ao PRN9..	112
Figura 23 – Visibilidade dos satélites na estação MTSF, ângulo de elevação de 10 graus ...	114
Figura 24 - Estabilidade diária do UPD_NL para alguns satélites, com relação ao PRN9....	114
Figura 25–Desvio padrão UPD_NL para alguns satélites, com relação ao PRN9.....	115
Figura 26– UPD_NL para alguns satélites, com relação ao PRN9, dia 015 de 2014.....	116
Figura 27– Desvio padrão UPD_NL para alguns satélites, com relação ao PRN9	116
Figura 28– EMQ das soluções estimadas com ambiguidades reais e inteiras, com relação às componentes e, n, u e $2D$ – 60 minutos de dados	118
Figura 29– EMQ das soluções estimadas com ambiguidades reais e inteiras, com relação às componentes e, n, u e $2D$ – 45 minutos de dados	120
Figura 30 – Erro em u (a) e ZTD (b) das soluções estimadas com ambiguidades reais e inteiras, para o dia 015 de 2014, estação BRAZ.....	122
Figura 31 – Erro em u (a) e ZTD (b) das soluções estimadas com ambiguidades reais e inteiras, para o dia 016 de 2014, estação BRAZ.....	123
Figura 32– EMQ das soluções estimadas com ambiguidades reais e inteiras, com relação às componentes e, n, u e $2D$ – 30 minutos de dados	124

Figura 33– EMQ das soluções estimadas com ambiguidades reais e inteiras, com relação às componentes e, n, u e $2D$ – 15 minutos de dados.....	126
Figura 34– Desvio Padrão das soluções estimadas com ambiguidades reais e inteiras, para as cinco estações – 15 minutos de dados.....	127
Figura 35 – Média da porcentagem de melhoria do desvio Padrão.....	128
Figura 36– Porcentagem de melhoria do EMQ para a resultante horizontal.....	129
Figura 37– Valor médio do <i>Ratio</i> para os processamentos de 15, 30,45 e 60 minutos.....	130
Figura 38– Erro das soluções estimadas com ambiguidades reais e inteiras, para a resultante horizontal – BRAZ, dia 015 de 2014.....	131
Figura 39– Erro das soluções estimadas com ambiguidades reais e inteiras, para a resultante horizontal – PPTE, dia 015 de 2014.....	131
Figura 40 – Desvio padrão das soluções estimadas com ambiguidades reais e inteiras, para as componentes e, n e u - BRAZ.....	132
Figura 41 – Desvio padrão das soluções estimadas com ambiguidades reais e inteiras, para as componentes e, n e u - PPTE.....	133
Figura 42– Erro das soluções estimadas com ambiguidades reais e inteiras, para a resultante horizontal – BRAZ, dia 016 de 2014.....	134
Figura 43– Erro das soluções estimadas com ambiguidades reais e inteiras, para a resultante horizontal – BRAZ, dia 012 de 2014.....	135
Figura 44 – Visibilidade dos satélites na estação BRAZ, ângulo de elevação de 10 graus...	136
Figura 45– Erro das soluções estimadas no PPP modo cinemático com ambiguidades reais e inteiras, para a resultante horizontal – PPTE, dia 015 de 2014.....	137
Figura 46– Erro das soluções estimadas no PPP modo cinemático com ambiguidades reais para as componentes e, n e u – PPTE, dia 015 de 2014.....	138
Figura 47– Erro das soluções estimadas no PPP modo cinemático com ambiguidades inteiras para as componentes e, n e u – PPTE, dia 015 de 2014.....	139
Figura 48– Erro das soluções estimadas no PPP modo cinemático com ambiguidades reais e inteiras, para a resultante horizontal – RECF, dia 017 de 2014.....	140
Figura 49– Erro das soluções estimadas no PPP modo cinemático com ambiguidades reais e inteiras, para a resultante horizontal – UFPR, 017 de 2014.....	140
Figura 50 – Desvio padrão das soluções estimadas no PPP modo cinemático com ambiguidades reais e inteiras, para as componentes e, n e u – RECF - 017 de 2014.....	142
Figura 51 – Desvio padrão das soluções estimadas no PPP modo cinemático com ambiguidades reais e inteiras, para as componentes e, n e u – UFPR - 017 de 2014.....	143
Figura 52– Ambiguidades estimadas no PPP modo cinemático dia 017 de 2014, UFPR.....	144
Figura 53– Precisoões das ambiguidades estimadas no PPP no modo cinemático no dia 017 de 2014, UFPR.....	145
Figura 54– Precisoões das ambiguidades estimadas no PPP no modo cinemático no dia 017 de 2014, UFPR.....	145
Figura 55– Erro das soluções estimadas no PPP modo cinemático com ambiguidades reais e inteiras, para a resultante horizontal – RECF, dia 017 de 2014.....	146
Figura 56– Erro das soluções estimadas no PPP modo cinemático com ambiguidades reais e inteiras, para a resultante horizontal – UFPR, dia 017 de 2014.....	147
Figura 57– Erro das soluções estimadas no PPP modo cinemático com ambiguidades reais e inteiras, para a resultante horizontal – BRAZ, 016 de 2014.....	147
Figura 58– Índices de cintilação (S_4) em amplitude da estação PRU2 para o dia 022.....	149

Figura 59– Índices de cintilação (S4) em amplitude da estação PRU2 para o dia 023	149
Figura 60– EMQ das soluções estimadas com ambiguidades reais e inteiras, com relação às componentes e, n, u e $2D$, dia 022	150
Figura 61– Desvio padrão das soluções de ambiguidades reais e inteiras para as componentes e, n e u , dia 022	152
Figura 62– Desvio padrão das soluções de ambiguidades reais e inteiras para resultante 3D, dia 022	153
Figura 63– Ambiguidades estimadas no PPP modo cinemático dia 022 de 2015.....	153
Figura 64– Ambiguidades estimadas no PPP modo cinemático dia 022 de 2015.....	154
Figura 65– EMQ das soluções estimadas com ambiguidades reais e inteiras, com relação às componentes e, n, u e $2D$, dia 023	155
Figura 66– Desvio padrão das soluções de ambiguidades reais e inteiras para resultante 3D, dia 023	156
Figura 67– EMQ da resultante 2D das soluções de ambiguidades reais e inteiras para os dias 022 e 023.....	157

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - UPD_WL para os satélites com relação ao PRN9 e seus desvios padrão	113
Tabela 2 - UPD_NL para os satélites com relação ao PRN9 e seus desvios padrão	117
Tabela 3–EMQ para as componentes e, n, u , resultante horizontal, porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras, <i>Ratio</i> e porcentagem de ambiguidades fixas– 60 minutos de dados.....	119
Tabela 4–Desvio Padrão para as componentes e, n, u , resultante horizontal e porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras – 60 minutos de dados....	120
Tabela 5–EMQ para as componentes e, n, u , resultante horizontal, porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras, <i>Ratio</i> e porcentagem de ambiguidades fixas – 45 minutos de dados.....	121
Tabela 6–Desvio Padrão para as componentes e, n, u , resultante horizontal e porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras – 45 minutos de dados....	122
Tabela 7–EMQ para as componentes e, n, u , resultante horizontal, porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras, <i>Ratio</i> e porcentagem de ambiguidades fixas – 30 minutos de dados.....	125
Tabela 8–Desvio Padrão para as componentes e, n, u , resultante horizontal e porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras – 30 minutos de dados....	125
Tabela 9–EMQ para as componentes e, n, u , resultante horizontal, porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras, <i>Ratio</i> e porcentagem de ambiguidades fixas– 15 minutos de dados.....	127
Tabela 10–Desvio Padrão para as componentes e, n, u , resultante horizontal e porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras – 15 minutos de dados....	128
Tabela 11–Erro para as componentes e, n, u , resultante horizontal, porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras e valores de <i>Ratio</i>	132
Tabela 12–Desvio Padrão para as componentes e, n, u , resultante horizontal e porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras	134
Tabela 13 – Erro para as componentes e, n, u , resultante horizontal, porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras e valores de <i>Ratio</i> – Instante de solução	138
Tabela 14 – Erro para as componentes e, n, u , resultante horizontal, porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras – 100 épocas.....	141
Tabela 15 – Erro para as componentes e, n, u , resultante horizontal, porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras – 240 épocas.....	141
Tabela 16 – Desvio Padrão para as componentes e, n, u , e porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras – Instante de solução	142
Tabela 17 – Erro para as componentes e, n, u , resultante horizontal, porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras e valores de <i>Ratio</i>	148
Tabela 18 – Desvio Padrão para as componentes e, n, u , e porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras	148
Tabela 19–EMQ para as componentes e, n, u , resultante horizontal e porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras, dia 022	151
Tabela 20–Desvio Padrão para as componentes e, n, u , e porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras	152
Tabela 21–EMQ para as componentes e, n, u , resultante horizontal e porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras, dia 023	154

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ACs = *IGS Análise Centers*
ARP = *Antenna Reference Point*
BEIDOU = *Beidou Navigation Satellite System*
BNC = *BKG_Ntrip_Client*
CALIBRA = *Countering GNSS high Accuracy applications Limitations due to Ionospheric disturbances in BRAzil*
CDMA = *Code Division Multiple Access*
CIGALA = *Concept for Ionospheric Scintillation Mitigation for Professional GNSS in Latin America*
CODE = *Center for Orbit Determination for Europe*
CORS = *Continuously Operating Reference Station*
CPTEC = *Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos*
DCB = *Differential Code Biases*
DD = *Dupla Diferença*
ECMWF = *European Centre for Medium-Range WeatherForecasts*
EMQ = *Erro Médio Quadrático*
FDMA = *Frequency Division Multiple Acces*
FKE = *Filtro de Kalman Estendido*
GCRS = *Geocentric Celestial Reference System*
GEGE = *Grupo de Estudos em Geodésia Espacial*
GIM = *Global Ionosphere Map*
GIPSY = *GPS Inferred Positioning System*
GLONASS = *GLObal NAVigation Satellite System*
GNSS = *Global Navigation Satellite System*
GPS = *Global Positioning System*
ICAO = *International Civil Aviation Organization*
IERS = *International Earth Rotation and Reference Systems Service*
IfB = *Interfrequency biases*
IGS = *International GNSS Service*
INPE = *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais*
IONEX = *Ionosphere exchange format*
ION-FREE = *ionospheric free observable*
ITRS = *International Terrestrial Reference System*
ITRF = *International Terrestrial Reference Frame*
JPL = *Jet Propulsion Laboratory*
LAMBDA = *Least-squares AMBiguity Decorrelation Adjustment*
MVC = *Matriz de variância e covariância*
NL = *narrow-lane*
NTRIP = *Networked Transport of RTCM via Internet Protoco*
PCV = *Phase Center Variation*
PD = *Pseudodistância*
PNT = *Previsão Numérica do Tempo*
PO = *Phase Offset*
PPP = *Posicionamento por Ponto Preciso - Precise Point Positioning*
REDE GNSS-SP = *Rede GNSS ativa do Estado de São Paulo*
RMBC = *Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo*

RT_PPP = *Real Time PPP*
RT_PPP_AR = *Real Time PPP Ambiguity Resolution*
SGB = *Sistema Geodésico Brasileiro*
SIRGAS = *Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas*
SIRGAS-CON = *Rede SIRGAS de funcionamento contínuo*
SP3 = *Standard Product #3*
TBC = *Trimble Business Center*
TEC = *Total Electron Content*
 T_{GD} = *Timing Group Delay*
UHD = *Uncalibrated hardware delays*
UPD = *Uncalibrated phase delays*
UPD_NL = *UPD da NL*
UPD_WL = *UPD da WL*
WL = *wide-lane*
ZTD = *Zenital Tropospheric Delay*

LISTA DE SÍMBOLOS

- PD_r^s - equação de observação da pseudodistância, para o satélite s e receptor r
- ρ_r^s - distância geométrica, para o satélite s e receptor r
- c - velocidade da luz no vácuo
- t_r - instante de recepção do sinal
- t_s - instante de transmissão do sinal
- dt_r - erro do relógio do receptor no instante t_r em relação ao tempo GPS
- dt_s - erro do relógio do satélite no instante t_s em relação ao tempo GPS
- I_r^s - erro causado pela refração ionosférica, para o satélite s e receptor r
- T_r^s - erro causado pela refração troposférica, para o satélite s e receptor r
- dm_r^s - erro causado pelo multicaminhamento, para o satélite s e receptor r
- b_r -atraso de *hardware* para o receptor
- b^s -atraso de *hardware* para o satélite
- φ_r^s - equação de observação da fase da onda portadora, para o satélite s e receptor r
- $\varphi^s(t_0)$ - fase da portadora gerada no satélite s e recebida no receptor r na época de referência t_0
- $\varphi_r(t_0)$ - fase gerada no receptor na época de referência t_0
- δm_r^s - erro causado pelo multicaminhamento, para o satélite s e receptor r
- $PD_{IF_r}^s$ - *Ion-free* da pseudodistância, para o satélite s e receptor r
- $\varphi_{IF_r}^s$ - *Ion-free* da fase da onda portadora, para o satélite s e receptor r
- $\sigma_{\varphi_{IF_r}^s}$ - desvio padrão da fase da onda portadora da *Ion-free*, para o satélite s e receptor r
- $\sigma_{PD_{IF_r}^s}$ - desvio padrão da pseudodistância da *Ion-free*, para o satélite s e receptor r
- $\sigma\varphi$ - desvio padrão da fase da onda portadora
- $D_{TROP_r}^s$ - atraso troposférico total, para o satélite s e receptor r
- D_{ZH} - atraso troposférico na direção zenital para a componente hidrostática
- D_{ZW} - atraso troposférico na direção zenital para a componente úmida
- $mh(E)$ - função de mapeamento para a componente hidrostática
- $mw(E)$ - função de mapeamento para a componente úmida
- φ_w - combinação linear *wide-lane*

λ_w - comprimento de onda da wide-lane

φ_n - combinação linear da narrow-lane

L_0 - sinal livre da ionosfera

L_I - sinal ionosférico

$\Delta PD_r^{s,j}$ - SD entre satélites para a pseudodistância, para o satélite $se j$ e receptor r

$\Delta \rho_r^{s,j}$ - SD da distância geométrica, para o satélite $se j$ e receptor r

$\Delta \varphi_r^{s,j}$ - SD da fase da onda portadora, para o satélite $se j$ e receptor r

$\Delta PD_{r,l}^{s,j}$ - DD da pseudodistância, para os satélites $se j$ e receptores $re l$

$\Delta \varphi_{r,l}^{s,j}$ - DD da distância geométrica, para os satélites $se j$ e receptores $re l$

$\Delta \varphi_{r,l}^{s,j}$ - DD da fase portadora, para os satélites $se j$ e receptores $re l$

ΔPD_{IF}^s - diferença entre a *ion-free* da PD observada e a calculada, para o satélite s e receptor r

$\Delta \lambda_{IF} \varphi_{IF}^s$ - diferença entre a *ion-free* da fase observada e calculada, para o satélite s e receptor r

$(\rho_r^s)^0$ - distância geométrica calculada em função dos parâmetros aproximados

Σ_{Lb} - matriz de variância e covariância das observações

$\sigma_{PD_{IF}^s}^2$ - variâncias da *ion-free* da pseudodistância, para o satélite si

$\sigma_{\varphi_{IF}^s}^2$ - variâncias da *ion-free* da fase da onda portadora, para o satélite si

X_k - vetor estado, na época k

$T_{k,k-1}$ - matriz de transição

W_k -vetor das correções do modelo dinâmico, na época k

L_k^b -vetor das observações, na época k

A_k -matriz dos coeficientes, na época k

V_k - vetor dos resíduos nas medidas, na época k

k_k - matriz de Ganho de Kalman, na época k

$\hat{X}_{0,0}$ - vetor de estado inicial dos parâmetros a serem estimados

$\Sigma_{\hat{X}_{0,0}}$ -matriz de variância e covariância dos parâmetros iniciais

$A(PD_{IFrk}^s)$ – matriz design A para na época k para a *ion-free* da pseudodistância

$A(\varphi_{IFrk}^s)$ – matriz design A para na época k para a *ion-free* da fase da onda portadora

$\Delta \phi_r$ - UPD originado no receptor

$\Delta \phi^s$ - UPD originado no transmissor do satélite

$\Delta\phi_w^r$ - UPD *wide-lane* do receptor

$\Delta\phi_w^s$ - UPD *wide-lane* do satélite

$\Delta\phi_w^{s,j}$ - UPD *wide-lane* da Simples Diferença das ambiguidades

$\delta\phi_w^{s,j}$ - parte fracionária do UPD *wide-lane* da Simples Diferença das ambiguidades

$\Delta\phi_n^{s,j}$ - UPD *narrow-lane* da Simples Diferença das ambiguidades

$\overline{\Delta\phi_n^{s,j}}$ - UPD *narrow-lane* da Simples Diferença das ambiguidades adicionado do ruído da pseudodistância e a parte inteira do UPD da *wide-lane*

$\widehat{\Delta\phi_n^{s,j}}$ - UPD *narrow-lane* da Simples Diferença das ambiguidades estimado

P_0 - função de proximidade e incerteza

C - matriz dos coeficientes de ordem referente ao número de ambiguidades fixas e número de parâmetros

L_w - vetor composto pela diferença das ambiguidades *ion-free* reais e fixas

\check{X}_k - vetor dos parâmetros ajustados com influência da injeção, na época k

\hat{X}_k - vetor dos parâmetros na época k , resultante do PPP com ambiguidades reais

K_k - Matriz de ganho de *Kalman*, na época k

V_k - Vetor dos resíduos preditos, na época k

$L_{IF(float)}$ - vetor da Simples Diferença de ambiguidades IF reais

$L_{IF(fix)}$ - vetor da Simples Diferença de ambiguidades IF fixas

$\Sigma \hat{X}_k$ - Matriz de variância e covariância dos parâmetros na época k , resultante do PPP com ambiguidades reais

ΣV_k - Matriz de variância e covariância dos resíduos preditos, na época k

$\Sigma \check{X}_k$ - Atualização da Matriz de variância e covariância do vetor dos parâmetros, na época k

N_r^s - ambiguidade inteira da fase da onda portadora, para o satélite s e receptor r

\bar{N}_r^s - ambiguidade inteira somada aos UPDs, para o satélite s e receptor r

\overline{N}_{IF} - ambiguidade da *ion-free* contendo os UPDs
 \overline{N}_{IFr}^s - ambiguidade da *ion-free* contendo os UPDs, para o satélite s e receptor r
 N_w - ambiguidade inteira da *wide-lane*
 \overline{N}_{wr}^s - ambiguidades da *wide-lane* contendo os UPDs, para o satélite s e receptor r
 \widehat{N}_{wr}^s - ambiguidade da *wide-lane* contendo os UPDs – resultante da média das épocas
 $\widehat{N}_{wr}^{s,j}$ - Simples Diferença da ambiguidade *wide-lane* contendo o UPD do satélite
 $\widetilde{N}_{wr}^{s,j}$ - Simples Diferença da ambiguidade *wide-lane* fixa
 $\widehat{N}_{IFr}^{s,j}$ - Simples Diferença das ambiguidades *ion-free* - solução de valor real
 $N_{wr}^{s,j}$ - Simples Diferença da ambiguidade inteira da *wide-lane*
 $\overline{N}_r^{s,j}$ - Ambiguidade da Simples Diferença da fase da onda portadora contendo os UPDs
 $\widehat{N}_{nr}^{s,j}$ - Simples Diferença da ambiguidade *narrow-lane* contendo o UPD do satélite
 N_n - ambiguidade inteira da *narrow-lane*
 $\overline{N}_{r,l}^{s,j}$ - ambiguidade da DD contendo os UPDs, para os satélites s e j e receptores r e l
 $\overline{N}_{IFr,l}^{s,j}$ - ambiguidade da *ion-free* da DD contendo os UPDs, para os satélites s e j e receptores r e l
 $\widehat{N}_{IFr,l}^{s,j}$ - valor real da DD da *ion-free* das ambiguidades
 $\overline{N}_{wr,l}^{s,j}$ - Dupla Diferença da ambiguidade *wide-lane*
 $\widehat{N}_{wr,l}^{s,j}$ - Dupla Diferença da ambiguidade *wide-lane* estimada
 $\overline{N}_{nr,l}^{s,j}$ - Dupla Diferença da ambiguidade *narrow-lane*
 $\widehat{N}_{nr,l}^{s,j}$ - Dupla Diferença da ambiguidade *narrow-lane* estimada
 $\widetilde{N}_{wr,l}^{s,j}$ - valor fixo da DD da ambiguidade *wide-lane*
 $\widetilde{N}_{nr,l}^{s,j}$ - valor fixo da DD da ambiguidade *narrow-lane*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	23
1.1 Objetivos	25
1.2 Justificativas	26
1.3 Apresentação da Tese	26
2 POSICIONAMENTO POR PONTO PRECISO	28
2.1 Introdução aos Sistemas GNSS	28
2.2 Equação de Pseudodistância	30
2.3 Equação de Fase da onda Portadora	30
2.4 Erros e efeitos envolvidos no posicionamento GNSS	31
2.4.1 Erros relacionados com os satélites GNSS	32
2.4.2 Erros e efeitos relacionados com a propagação do sinal	34
2.4.3 Erros relacionados com o receptor e antena	43
2.4.4 Erros e efeitos relacionados com a estação	44
2.5 Combinações lineares das observáveis GNSS	46
2.5.1 Combinação Linear Wide-Lane e Narrow-Lane	47
2.5.2 Simples diferença	49
2.5.3 Dupla diferença	50
2.6 Fundamentos do Posicionamento por Ponto Preciso	52
2.7 Filtro de Kalman no PPP	56
2.8 Redes ativas GNSS	60
3 SOLUÇÃO DE AMBIGUIDADES NO PPP	64
3.1 Estado da Arte da solução da ambiguidade no PPP	65
3.2 Métodos de Solução de Ambiguidades inteiras no PPP	67
3.2.1 Método Baseado na Estimativa dos UPDs	69
3.2.1.1 Estimativa dos UPDs	74
3.2.2 Método Baseado na Dupla Diferença das Ambiguidades	76
3.2.3 Método Baseado na Dissociação dos Relógios	78
3.2.4 Método Baseado na Recuperação dos Relógios	80
3.3 Validação do inteiro das ambiguidades	81
3.4 Contribuições referentes ao método proposto na Tese	86
4 DESENVOLVIMENTO E ELABORAÇÃO DE APLICATIVOS PARA A METODOLOGIA PROPOSTA	90
4.1 Experimentos realizados com o <i>software</i> UPD_NETWORK	98
4.2 Experimentos realizados com o <i>software</i> RT_PPP_AR	100
4.2.1 Solução de Ambiguidades no PPP no Modo Estático	101

4.2.2 Solução de Ambiguidades no PPP no Modo Cinemático	104
5 RESULTADOS E ANÁLISES DOS EXPERIMENTOS REALIZADOS COM OS SOFTWARES UPD_NETWORK E RT_PPP_AR.....	108
5.1 Resultados e análises dos experimentos com o software UPD_NETWORK.....	108
5.1.1 Estimativa UPD_WL.....	108
5.1.2 Estimativa do UPD_NL.....	113
5.2 Resultados e análises dos experimentos com o <i>software</i> RT_PPP_AR	117
5.2.1 Solução de Ambiguidades no PPP no modo estático.....	117
5.2.1.1 PPP com 60 minutos de dados.....	118
5.2.1.2 PPP com 45 minutos de dados.....	120
5.2.1.3 PPP com 30 minutos de dados.....	124
5.2.1.4 PPP com 15 minutos de dados.....	125
5.2.1.5 PPP estático rápido.....	130
5.2.2 Solução de Ambiguidades no PPP no Modo Cinemático	136
5.2.2.1 Cinemático Simulado	136
5.2.2.2 Cinemático	148
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	158
REFERÊNCIAS.....	162

1 INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, a obtenção de coordenadas de um ponto é considerada uma tarefa relativamente fácil, mas não foi sempre assim. Durante séculos se procurou uma forma de localização terrestre mais precisa, que substituísse as fontes de orientação proporcionadas pelo sol, estrelas e planetas. A resposta veio com o GNSS (*Global Navigation Satellite System* - Sistema Global de Navegação por Satélite), sistema que revolucionou praticamente todas as atividades que dependiam de determinação de posições. Com a ampla utilização do GNSS, pesquisas têm se intensificado e, conseqüentemente, o desenvolvimento de vários métodos para a obtenção de posicionamento mais acurado. A gama de aplicações vai muito além de fornecer posição instantânea e velocidade de um ponto em um referencial específico, proposta inicial dos sistemas GNSS. Elas se inserem também no contexto ambiental, meteorologia, dentre outras (MONICO, 2008).

O método de posicionamento GNSS por ponto simples, ou posicionamento absoluto, é o método onde somente um receptor ao nível de usuário é utilizado e a posição é determinada de forma instantânea através de observações de pseudodistância, das posições dos satélites e do sistema de tempo transmitidos nas efemérides. Quando se utiliza a fase da onda portadora como observável principal, e se faz uso das efemérides precisas, correções para os relógios dos satélites e os erros envolvidos nas observações do GNSS são adequadamente modelados, o posicionamento por ponto passa a proporcionar acurácia ao nível do centímetro. Esse método é chamado de PPP (Posicionamento por Ponto Preciso - *Precise Point Positioning*), o qual elimina, por parte do usuário, a necessidade de aquisição simultânea de dados de rastreamento a partir de uma estação de referência (base) (ZUMBERGE *et al.*, 1997), característica do posicionamento relativo.

As medições da fase da onda portadora têm de ser exploradas se o interesse for de realizar o posicionamento com nível de acurácia centimétrica. Para que seja utilizada com alta precisão, torna-se necessário conhecer o número de ciclos inteiros da onda portadora entre o satélite e o receptor no instante da primeira observação. Esse número de ciclos inteiros é o termo denominado ambigüidade (SEEBER, 2003). A não ser que ocorram perdas de ciclos, esse número é constante ao longo do rastreamento do satélite. No modelo convencional de PPP, em que as ambigüidades são estimadas como solução real (*float*), a convergência da estimativa dos parâmetros só pode ser alcançada gradualmente com a acumulação de observações e a mudança da geometria dos satélites (SHEN, 2002). Desta forma, para se realizar um posicionamento rápido ou

instantâneo com alta acurácia é necessário que as ambiguidades sejam solucionadas como vetor composto por números inteiros. Considerando que o PPP é um método altamente em evidência e que o intervalo de tempo e a acurácia na obtenção dos parâmetros estão diretamente ligados com a solução das ambiguidades, pode-se dizer que a solução de ambiguidade no PPP representa o estado da arte no contexto das investigações no posicionamento GNSS.

A solução de ambiguidades é um processo que envolve a estimativa de valores reais de ambiguidades, devendo os mesmos ser convertidos para valores inteiros e serem então injuncionados no ajustamento, proporcionando parâmetros estimados com melhor acurácia.

Por volta do ano de 2006 iniciaram ou intensificaram-se as pesquisas com relação à solução de ambiguidades no PPP, sendo, nos tempos atuais, o foco de muitas discussões e investigações, que tem sido abordado em praticamente todos os congressos e eventos de áreas envolvidas com posicionamento e navegação. Alguns trabalhos de pesquisa científica internacional propõem formas de se obter essa solução. Uma dessas propostas metodológicas é baseada na estimativa com antecedência, dentro de uma rede GNSS, dos atrasos de fase não calibrados - UPD (*uncalibrated phase delays*), com a utilização das combinações lineares da SD (Simple Diferença) entre satélites da WL (*wide-lane*) e NL (*narrow-lane*) (GE *et al.*, 2008; GENG *et al.*, 2009; GENG *et al.*, 2011). A solução das ambiguidades no PPP também pode ser realizada com base na formação de DD (Dupla Diferença) das ambiguidades de uma estação de interesse com estações de uma rede GNSS e satélites em comum visualização (BLEWITT, 2006).

Outra forma de solução das ambiguidades inteiras no PPP é pelo método caracterizado pela dissociação dos relógios da pseudodistância e da fase da onda portadora. As ambiguidades NL são fixadas para inteiro antes de estimar os relógios do satélite na rede GNSS. Para um receptor usuário, os relógios estimados são usados para garantir as propriedades inteiras das ambiguidades NL (COLLINS; BISNATH, 2008). De forma similar, foi desenvolvido um método onde, dentro de uma rede GNSS, as ambiguidades NL são absorvidas pelos relógios dos satélites na fase da onda portadora e então produzida uma solução de relógios para solucionar as ambiguidades de um receptor usuário (LAURICHESSE *et al.*, 2008).

Nesta pesquisa tem-se como proposta a investigação e a implementação de uma metodologia para solução de ambiguidades no PPP, levando em consideração o que se já tem desenvolvido no Grupo de Estudos em Geodésia Espacial (GEGE) da FCT/ UNESP, campus de Presidente Prudente (Faculdade de Ciências e Tecnologia /Universidade Estadual Paulista). Para

tal, o *software* RT_PPP (MARQUES, 2012) teve rotinas acrescidas e modificadas para que se pudesse realizar o PPP com solução de ambiguidades inteiras em nível de usuário.

Em todos os métodos de solução de ambiguidades no PPP citados, é necessária a utilização de uma rede GNSS como suporte. Para tal, as estações da RMBC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) e da Rede GNSS-SP (Rede GNSS ativa do Estado de São Paulo) compuseram a Rede GNSS utilizada na pesquisa.

Esta pesquisa, com a abordagem de Solução de Ambiguidades, visa explorar todo o potencial que o método PPP pode proporcionar utilizando a infraestrutura para posicionamento GNSS disponível no Brasil, que possibilita a realização de pesquisas e o desenvolvimento nacional de metodologias adequadas. Desta forma, este trabalho representa um grande avanço no âmbito nacional e traz significativa contribuição no cenário internacional para as investigações no contexto do posicionamento geodésico.

1.1 Objetivos

Esta Tese de doutorado tem por objetivos investigar e adotar uma metodologia para solução de ambiguidades inteiras no método PPP, além de desenvolver, aperfeiçoar e realizar as alterações necessárias, em termos de algoritmos, para que a mesma seja programada computacionalmente de forma que se possa realizar o PPP com ambiguidades fixas com base em uma rede de estações GNSS.

Como objetivos secundários, tem-se:

- Identificar o modelo de solução de ambiguidades adequado para ser integrado com o *software* RT_PPP, já disponível no GEGE;
- Investigar sobre as melhores configurações para se obter resultados satisfatórios na estimativa dos componentes necessários para solução das ambiguidades e criar rotinas para desenvolvimento de um aplicativo voltado para essas estimativas dentro da Rede GNSS;
- Realizar as adaptações e melhorias no *software* RT_PPP para que o mesmo receba como dados de entrada os componentes estimados e seja capaz de solucionar as ambiguidades em nível do usuário;
- Avaliar a eficiência do sistema desenvolvido em termos de melhoria da qualidade posicional por meio de experimentos.

1.2 Justificativas

Muitas das aplicações GNSS requerem acurácia em nível do centímetro ao milímetro. O PPP vem se mostrando muito eficiente para fins de posicionamento com alta acurácia e eficiência operacional, sendo atualmente um método de posicionamento em evidência na área de Geodésia.

Pelo fato do PPP ser um método promissor quanto às suas aplicações e a acurácia que pode ser potencialmente alcançada, pesquisas estão sendo desenvolvidas e intensificadas com relação à solução das ambiguidades no PPP, pois quando as ambiguidades da fase são solucionadas como vetor composto por números inteiros, tem-se a chave para um posicionamento rápido com alta acurácia.

No Brasil, no GEGE da UNESP de Presidente Prudente, foi desenvolvido o *software* RT_PPP. Esse *software*, desenvolvido por meio de trabalho em nível de doutorado, realiza PPP com solução real para as ambiguidades. Este trabalho dá continuidade à execução desse projeto, desenvolvendo um *software* capaz de gerar produtos necessários para a solução de ambiguidades inteiras no PPP e realizando adaptações e desenvolvimento de rotinas no *software* RT_PPP para receber e processar esses produtos com a finalidade de melhorar a acurácia desse posicionamento.

Com os resultados advindos deste trabalho, o Brasil passará a ter um sistema robusto e completo de Posicionamento Geodésico que realiza PPP, desenvolvido por meio de pesquisas científicas realizadas no Brasil. Salienta-se que esse desenvolvimento é pioneiro no País, caracterizando assim uma Tese que pode-se inserir num processo de inovação tecnológica. Desta forma, esta pesquisa representa uma contribuição para o desenvolvimento científico e tecnológico do Brasil ao mesmo tempo em que alinha o GEGE da FCT/UNESP com os maiores centros de pesquisas em posicionamento Geodésico do mundo.

1.3 Apresentação da Tese

Esta tese está organizada em 6 Capítulos, de maneira que, no Capítulo 2 apresenta-se uma abordagem geral do PPP, com introdução ao posicionamento GNSS, descrição das equações de observação, erros e efeitos envolvidos no posicionamento e combinações lineares das observáveis. Também são apresentados os modelos matemáticos para o ajustamento dos dados no modo PPP, Filtro de Kalman, e conceitos envolvendo Redes Ativas GNSS. No Capítulo 3, é realizada uma abordagem geral a respeito da Solução de Ambiguidades utilizando um único

receptor, passando pelo Estado da Arte e a apresentação teórica dos Métodos de Solução de Ambiguidades inteiras no PPP. No Capítulo 4 são apresentadas as etapas do desenvolvimento, otimização e elaboração dos aplicativos UPD_NETWORK e RT_PPP_AR para implementação da metodologia proposta. No Capítulo 5 apresentam-se os experimentos realizados, resultados e análises envolvendo a estimativa dos UPDs e o processamento dos dados no método PPP. E por último, o Capítulo 6 resume os pontos principais da tese, apresenta as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

2 POSICIONAMENTO POR PONTO PRECISO

2.1 Introdução aos Sistemas GNSS

GNSS, termo designado para se referir aos sistemas de navegação por satélite, surgiu em 1991, durante a 10ª Conferência de Navegação Aérea (*10th Air Navigation Conference*). A ICAO (*International Civil Aviation Organization*) reconheceu que o sistema de navegação do século XXI proporcionaria um sistema global de navegação, tendo como principais características: integridade, disponibilidade e o fornecimento de um serviço contínuo aos usuários (SEEBER, 2003).

Atualmente os sistemas GPS (*Global Positioning System*) e o GLONASS (*GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM*) estão operacionais. Alguns sistemas encontram-se em desenvolvimento, como o Galileo e o BEIDOU.

O Galileo é o sistema de navegação por satélite da União Europeia. Ainda em fase de desenvolvimento, quando estiver totalmente operacional terá 30 satélites em Órbita Média da Terra, com altitude de 23.222 km. 10 satélites ocuparão cada um dos 3 planos orbitais com inclinação de 56° com relação ao equador. Serviços iniciais estão disponíveis e novos serviços serão testados e disponibilizados, com conclusão programada do sistema para 2020 (ESA, 2015). Essa estrutura para a constelação Galileo foi definida partindo do propósito de que com 30 satélites em tal altitude, há uma probabilidade muito elevada (superior a 90%) de que qualquer um em qualquer lugar do mundo esteja sempre em vista de, pelo menos, quatro satélites e, portanto, será capaz de determinar a sua posição a partir dos sinais transmitidos pelos satélites. A inclinação das órbitas foi escolhida para garantir uma boa cobertura de latitudes polares. Já com dois satélites experimentais lançados desde 2005, o GIOVE-A e o GIOVE-B, em 21 de outubro de 2011 foram lançados os dois primeiros satélites para validar o Galileo em órbita e em terra (*In-Orbit Validation*). Os outros dois satélites foram lançados em 12 de outubro de 2012. Dois pares de satélites foram lançados em 22 de agosto de 2014 e 27 de Março de 2015 e um par de satélites lançado em 20 de setembro de 2015 (ESA, 2015).

O BEIDOU (*Beidou Navigation Satellite System*) é o sistema de navegação por satélite Chinês. O primeiro satélite de navegação entrou em órbita no final de 2000. O sistema deverá estar totalmente operacional com 35 satélites, no ano de 2020, para oferecer serviços de navegação e comunicação pelo mundo. Destes 35 satélites, 5 são de órbita geostacionária e dos outros 30 satélites, 27 estarão em três planos orbitais a 21.500 km de altitude, com inclinação de 55° em relação ao equador e 3 estarão em três planos orbitais a

36.000 km de altitude, com inclinação de 55°. Em 1994, a China iniciou a construção do sistema de navegação BEIDOU. Em 2000, os primeiros 2 satélites foram lançados, e o sistema foi estabelecido, o que tornou a China a terceira nação no mundo em posse de um sistema independente de navegação por satélite. Em 2003, o terceiro experimento de satélite foi lançado, o que aumentou ainda mais o desempenho do sistema. Até o final de 2012, o sistema estava composto por 14 satélites operacionais em órbita, possuindo completa capacidade operacional para a China e as áreas circundantes. Em 25 de junho de 2015 foram lançados dois novos satélites, totalizando 19 satélites no espaço pertencentes a esse sistema (BEIDOU, 2015).

O GLONASS em 1982 foi projetado para conter no mínimo 24 satélites em órbita. Possui 3 planos orbitais separados por 120° e os satélites são espaçados em cada plano com inclinação nominal de 64,8°, em 19.100 km de altitude, com período orbital de 11 horas e 15 minutos. Cada satélite GLONASS transmite sua própria frequência com a técnica FDMA (*Frequency Division Multiple Acces*). O GLONASS encontra-se em fase de modernização e lançou em 2011 o primeiro satélite que transmite dados utilizando a técnica CDMA (*Code Division Multiple Access*), semelhante ao GPS. A constelação GLONASS, em 23 de agosto de 2015, estava com 28 satélites, dos quais 24 se encontravam operacionais (IAC, 2015).

A constelação de satélites GPS foi projetada inicialmente para 24 satélites divididos em seis planos orbitais igualmente espaçados, com período orbital de 12 horas siderais e 20.200 km de altitude. As órbitas são aproximadamente circulares, com inclinação de 55° em relação ao equador. Este arranjo garante que os usuários possam ver pelo menos quatro satélites a partir de praticamente qualquer ponto do planeta. A constelação GPS é uma mistura de antigos e novos satélites. Em de 17 de agosto de 2015 havia 31 satélites operacionais da constelação GPS. Isso não inclui os satélites desativados mantidos em órbita, para o caso haja a necessidade de reativá-los (GPS, 2015).

Como os dados de observações utilizados nesta pesquisa foram obtidos por meio do sistema GPS, a seguir é realizado um relato sobre as observáveis básicas GPS, pseudodistância e fase da onda portadora, que permitem determinar a posição, velocidade e o tempo, para qualquer ponto da Terra, em relação a um sistema de referência definido e realizado.

2.2 Equação de Pseudodistância

A pseudodistância, a partir de medições de código, é obtida do tempo de correlação entre o código gerado pelo satélite no instante de transmissão e sua réplica gerada no receptor no instante de recepção, multiplicado pela velocidade da luz (SEEBER, 2003). É a medida da distância entre o satélite e a antena do receptor referido as épocas de emissão e recepção de códigos (LEICK, 1994). A equação de observação da pseudodistância (PD) é descrita por:

$$PD_r^s = \rho_r^s + c[dt_r - dt^s] + I_r^s + T_r^s + dm_r^s + b_r + b^s + \varepsilon_{PD_r}^s \quad (1)$$

onde:

ρ_r^s é a distância geométrica entre o centro de fase da antena do receptor r , no instante de recepção do sinal, e do centro de fase da antena do satélite s , no instante de transmissão do sinal;

c é a velocidade da luz no vácuo;

t_r é o instante de recepção do sinal;

t_s é o instante de transmissão do sinal;

dt_r é o erro do relógio do receptor no instante t_r em relação ao tempo GPS;

dt_s é o erro do relógio do satélite no instante t_s em relação ao tempo GPS;

I_r^s é o erro causado pela refração ionosférica;

T_r^s é o erro causado pela refração troposférica;

dm_r^s é o erro causado pelo multicaminhamento;

b_r é o atraso de *hardware* para o receptor;

b^s é o atraso de *hardware* para o satélite;

$\varepsilon_{PD_r}^s$ é o resíduo da pseudodistância contendo os erros não modelados.

2.3 Equação de Fase da onda Portadora

A fase da onda portadora é igual à diferença da fase do sinal do satélite, recebido no receptor, e a fase do sinal gerada no receptor, ambas no instante de recepção do sinal. Os receptores medem a parte fracional da portadora e a partir daí efetuam a contagem do

número de ciclos, o que resulta em uma medida contínua. A equação de observação da fase da onda portadora pode ser escrita como (MONICO, 2008):

$$\varphi_r^s(t) = f \left(\frac{\rho_r^s - I_r^s + T_r^s + \delta m_r^s + b_r + b^s}{c} \right) + f(dt_r - dt^s) + (\varphi^s(t_0) - \varphi_r(t_0)) + \bar{N}_r^s + \varepsilon_{\varphi_r}^s \quad (2)$$

onde:

$\varphi^s(t_0)$ é a fase da portadora gerada no satélite s e recebida no receptor r na época de referência t_0 ;

$\varphi_r(t_0)$ é a fase gerada no receptor na época de referência t_0 ;

δm_r^s é o erro causado pelo multicaminhamento;

\bar{N}_r^s é a ambiguidade inteira contendo os componentes não calibrados do atraso da fase ($N_r^s + \Delta\phi_r - \Delta\phi^s$);

$\varepsilon_{\varphi_r}^s$ representa outros erros não modelados na fase da onda portadora.

2.4 Erros e efeitos envolvidos no posicionamento GNSS

As observáveis GNSS estão sujeitas a erros aleatórios, sistemáticos e grosseiros. No posicionamento absoluto ou posicionamento por ponto, os erros originados de várias fontes, como satélites, propagação do sinal e do receptor se propagam para as coordenadas finais do ponto. Dessa forma, para obter resultados confiáveis, o modelo matemático estabelecido deve ser válido para a realidade física que se tenta descrever, e capaz de detectar problemas. O Quadro 1 apresenta diversos erros envolvidos nas observáveis GNSS, agrupados segundo as possíveis fontes. Eles serão brevemente relatados adiante.

Quadro 1- Fontes e erros envolvidos nas observeis GNSS

Fontes	Erros
Satélites	Erro da órbita
	Erro do relógio
	Atraso entre as duas portadoras no <i>hardware</i> do satélite
	Centro de fase da antena do satélite
	Fase <i>Windup</i>
Propagação do sinal	Refração ionosférica
	Refração troposférica
	Perdas de ciclos
	Multicaminho
	Rotação da Terra

Receptor e Antena	Erro do relógio
	Atraso entre as duas portadoras no <i>hardware</i> do receptor
	Centro de fase da antena do receptor
	Fase <i>Windup</i>
Estação	Multicaminho
	Marés terrestres
	Carga de marés oceânicas
	Movimento do Polo
	Carga atmosférica

Fonte: Adaptada (MONICO, 2008).

2.4.1 Erros relacionados com os satélites GNSS

Nessa seção serão descritos alguns erros que ocorrem no posicionamento relacionados com os Satélites GNSS. Serão descritos os erros relacionados às órbitas, aos relógios dos satélites, ao atraso entre as portadoras e ao centro de fase da antena.

- **Erro da órbita**

As informações orbitais podem ser obtidas a partir das efemérides. Estas, quando são obtidas a partir dos satélites, são chamadas de efemérides transmitidas e, quando são pós-processadas, são chamadas de efemérides precisas.

As coordenadas dos satélites são calculadas a partir das efemérides transmitidas ou precisas. No geral, são injuncionadas como valores fixos durante o processo de ajustamento dos dados dos satélites. Desta forma, erros nas coordenadas dos satélites se propagarão para a posição do usuário. No PPP as coordenadas dos satélites são obtidas a partir das efemérides precisas e os erros orbitais serão propagados quase diretamente para a posição do usuário (MONICO, 2008).

As efemérides precisas são produzidas pelos centros integradores de órbitas. Estes centros estimam esses produtos e também os erros dos relógios dos satélites e os disponibilizam sem custo algum (IGS, 2015).

As órbitas IGS (*International GNSS Service*), por exemplo, são as atualmente mais utilizadas. São referenciadas a um dos ITRFs (*International Terrestrial Reference Frame*), atualmente o ITRF2008. Os produtos IGS são formados a partir de uma combinação dos resultados apresentados pelos ACs (*IGS Analysis Centers*), como por exemplo, o JPL (*Jet*

Propulsion Laboratory) que contribui com o IGS fornecendo suas efemérides precisas rápidas e finais no formato dos produtos IGS SP3 -(*Standard Product #3*).

- **Erro do relógio**

Os satélites GNSS têm a bordo relógios atômicos para geração do tempo nos satélites. Os relógios atômicos dos satélites, mesmo sendo altamente precisos e estáveis não acompanham o sistema de tempo dos sistemas de navegação por satélite como GPS, GLONASS e Galileo, por exemplo.

Os relógios são monitorados pelo segmento de controle, que determinam esse erro e enviam aos satélites na forma de polinômio de segunda ordem juntamente com as mensagens de navegação. A qualidade desse produto é da ordem de 5 ns de RMS e 2,5 ns em desvio padrão (IGS, 2015).

O IGS também fornece correções para os relógios dos satélites. Essas correções fornecidas pelo IGS possuem RMS de aproximadamente 75 ps e desvio padrão da ordem de 20 ps, isso para os produtos finais disponibilizados com 12 a 18 dias de latência (IGS, 2015). Para utilização em tempo real tem-se disponível as correções dos relógios preditas IGS, que possuem a ordem de 3 ns de RMS e desvio padrão de 1,5 ns (IGS, 2015).

Uma forma de minimizar o erro do relógio do satélite é coma utilização das combinações lineares como a SD entre receptores ou DD. No PPP geralmente se utilizam as efemérides precisas, como as disponibilizadas pelo IGS, que são as mais utilizadas atualmente.

- **Atraso entre as duas portadoras no hardware do satélite e do receptor**

O atraso entre as duas portadoras no *hardware* do satélite é denominado como *Interfrequency biases* (IfB) ou *Differential Code Biases* (DCB). Esse erro ocorre devido aos sinais das portadoras L1 e L2 percorrerem diferentes caminhos no *hardware*. O mesmo também acontece no receptor, durante o rastreamento do sinal do satélite. A magnitude do atraso no *hardware* do satélite é determinada de forma relativa durante a fase de testes dos satélites e introduzida como parte das mensagens de navegação designada por T_{GD} (*Timing Group Delay*) e distinto para cada satélite. Os valores de T_{GD} são estimados com base em estações terrestres pelo fato de se alterarem com o tempo. Para o receptor, os valores de DCB são importantes para o cálculo do valor absoluto do TEC (*Total Electron Content*) a partir de receptores de

dupla frequência. Esses valores devem ser estimados durante o processamento ou calibrados de forma independente (DACH, R. *etal.*,2007).

- **Centro de fase da antena do satélite**

O centro de fase da antena do satélite é ponto de referência da emissão dos sinais. Este, por sua vez difere do centro de massa que é o ponto de referência para as coordenadas. Os deslocamentos do centro de fase são calculados por alguns centros de análises do IGS. São dados em um sistema de coordenadas fixo no satélite, com origem no seu centro de massa e convertidos para o sistema fixo na Terra, o ITRF2008, a atual realização do ITRS (*International Terrestrial Reference System*). Essas correções estão disponíveis, no formato ANTEX, com extensão .atx, em <<http://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/station/general/>> - Acesso em 11 fev. 2015).

2.4.2 Erros e efeitos relacionados com a propagação do sinal

Os sinais propagam-se através da atmosfera no trajeto entre os satélites e estações terrestres e assim sofrem diferentes tipos de influência. Os impactos nas observáveis são, em muitos casos, maiores do que a acurácia requerida pelo posicionamento por satélite (SEEBER, 2003). Dos erros decorrentes da propagação do sinal podem-se citar a refração ionosférica e troposférica, perdas de ciclo, rotação da terra e multicaminho. Quanto a este último, de acordo com o Quadro1, também tem a estação como possível fonte, mas será relatado apenas no contexto da propagação do sinal.

- **Refração ionosférica**

A Ionosfera da Terra é a fonte de um dos efeitos que mais contribuem para os erros GNSS. Ela abrange aproximadamente a região que compreende entre 50 até 1.000 km acima da superfície terrestre. É um meio dispersivo, depende da quantidade de elétrons (TEC) presentes ao longo do caminho percorrido pelo sinal entre o satélite e o receptor e da frequência do sinal. Isso significa que a fase da portadora e a modulação sobre ela são afetadas de formas diferentes, isto é, enquanto a portadora sofre um avanço, a modulação sobre ela sofre um retardo (SEEBER, 2003).

É difícil modelar os efeitos da ionosfera devido à complexa interação física entre o campo geomagnético e a atividade solar (XU, 2007). Para receptores com capacidade

de rastreamento de dupla frequência, uma das possíveis combinações de serem realizadas entre observáveis coletadas em uma única estação, das equações da pseudodistância e da fase da onda portadora, é a da observável *ion-free* (*ionospheric free observable*), tanto para a pseudodistância, como para a fase da onda portadora. Com essa combinação os efeitos de primeira ordem da ionosfera são reduzidos consideravelmente. Para os erros de ordem superior podem ser adotadas metodologias para mitigar esse efeito (MARQUES, 2008).

O índice de refração ionosférica é proporcional ao quadrado da frequência. Desta forma, frequências mais altas são menos afetadas com o efeito da Ionosfera. Assim sendo, o comprimento da observável *ion-free* é normalmente condicionado a ser igual ao da portadora L1, menos afetadas do que as outras frequências. A combinação linear da *ion-free* para a pseudodistância (PD_{IF}) e fase da onda portadora (φ_{IF}) pode ser dada por (SEEBER, 2003):

$$PD_{IF_r}^s = m_1 PD_r^s + m_2 PD_r^s \quad (3)$$

$$\varphi_{IF_r}^s = m_1 \varphi L1_r^s + m_2 \varphi L2_r^s \quad (4)$$

onde:

$$\text{Para } PD_{IF_r}^s \rightarrow m_1 = (f_1^2 / (f_1^2 - f_2^2)) \text{ e } m_2 = -(f_2^2 / (f_1^2 - f_2^2)); \quad (5)$$

$$\text{Para } \varphi_{IF_r}^s \rightarrow m_1 = (f_1^2 / (f_1^2 - f_2^2)) \text{ e } m_2 = -(f_1 f_2 / (f_1^2 - f_2^2)). \quad (6)$$

O desvio padrão é dado por:

$$\sigma_{\varphi_{IF_r}^s} = \sqrt{m_1^2 \varphi L1_r^s + m_2^2 \varphi L2_r^s}, \quad (7)$$

$$\sigma_{PD_{IF_r}^s} = \sqrt{m_1^2 PD_r^s + m_2^2 PD_r^s}. \quad (8)$$

Com relação aos usuários com receptores de frequência simples, a DD no posicionamento relativo é uma solução para eliminar os efeitos da ionosfera, mas no posicionamento com apenas uma estação, como é o caso do PPP, é comum empregar algum modelo para reduzir esses efeitos. Nesses modelos, medidas de fase coletadas com receptores de dupla frequência são usadas para estimar as correções a serem utilizadas pelos usuários de frequência simples operando na área (MONICO, 2008).

O IGS disponibiliza os valores do TEC, numa grade com dimensões de 2,5 graus de latitude por 5 de longitude com intervalo de tempo de duas horas e latência de 11 dias,

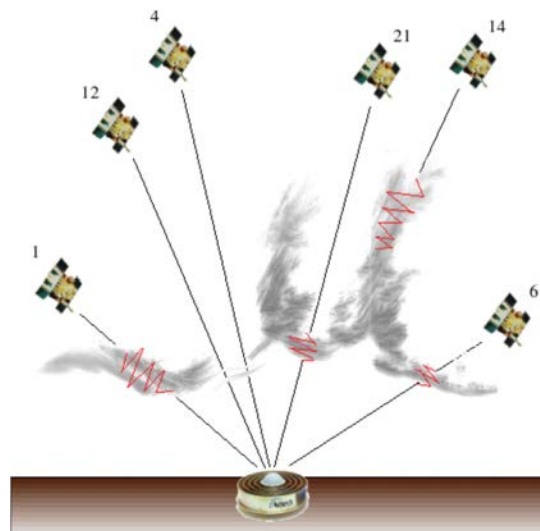
no formato denominado IONEX (*Ionosphere exchange format*). Com relação aos Mapas Globais da Ionosfera (*GIM – Global Ionosphere Map*), os mesmos são disponibilizados por vários centros de processamento, como por exemplo, o CODE (*Center for Orbit Determination for Europe*).

As irregularidades das condições ionosféricas podem causar grave degradação no desempenho do posicionamento e navegação GNSS. Quando o sinal GNSS atravessa a região ionosférica com densidade irregular de elétrons, ele sofre variações de amplitude, fase, polarização e no ângulo. A cintilação ionosférica pode ser definida como uma variação na amplitude e fase dos sinais de ondas de rádio e ocorrem quando estes sinais atravessam irregularidades ionosféricas como bolhas de plasma. A cintilação ionosférica é mais intensa nas regiões de altas latitudes da ionosfera e na região equatorial durante as noites e próximos aos equinócios (DAVIES, 1990).

As irregularidades das condições ionosféricas, como as cintilações, dependem da hora local, estação do ano, fluxo solar, posição geográfica (latitude e longitude), ionização e condições geomagnéticas. Na região equatorial, a cintilação ionosférica se dá, principalmente, devido a algumas características da anomalia equatorial, relacionada com a densidade do plasma e da frequente ocorrência das bolhas ionosféricas, que podem ter dimensões variando de poucos metros até centenas de quilômetros (SBAS, 2012).

A Figura 1 que é uma ilustração de como a cintilação ionosférica pode ter impacto no posicionamento GNSS.

Figura 1- Efeitos da cintilação ionosférica no posicionamento GNSS



Fonte: (SBAS, 2012).

Os efeitos de cintilação podem ser caracterizados pelos índices S4 e Phi60. O índice S4, relacionado com a amplitude, fornece uma visão de como a intensidade do sinal que chega ao receptor está variando. A intensidade do sinal é a potência do sinal recebido, que é medido num caminho em que seu valor não flutua com a potência do ruído. O índice de cintilação da fase, em particular a sua versão 60 denominada Phi60, está relacionado com a variação da medida de fase da onda portadora no receptor nos últimos 60 segundos. Ele também é conhecido como desvio padrão da fase ($\sigma\phi$) (TIWARI *et al.*, 2012).

Os níveis de cintilação são classificados em três categorias: Forte cintilação (amplitude [$S4 \geq 1.0$]; fase [$\sigma\phi > 0.8$]), moderada cintilação (amplitude [$0.5 < S4 < 1.0$]; fase [$0.4 \leq \sigma\phi \leq 0.8$]), e fraca cintilação (amplitude [$S4 \leq 0.5$]; fase [$\sigma\phi < 0.4$]) (TIWARI *et al.*, 2012).

O Brasil, por estar na região equatorial, possui forte influência de cintilação ionosférica e outros efeitos relacionados à ionosfera. A cintilação ionosférica pode causar o aumento do ruído e perda do sinal GNSS, perdas de ciclos e em consequência dificuldade na solução das ambiguidades da fase da onda portadora.

Vários estudos vêm sendo realizados com relação aos efeitos da cintilação ionosférica. Exemplos disso são os Projetos CIGALA (*Concept for Ionospheric Scintillation Mitigation for Professional GNSS in Latin America*) e CALIBRA (*Countering GNSS high Accuracy applications Limitations due to Ionospheric disturbances in BRAzil*), financiados pela Comunidade Europeia, com o objetivo de analisar os efeitos da cintilação, compreender suas causas e desenvolver novas técnicas de contra medidas a serem implementadas em receptores para atenuação das limitações nas aplicações GNSS. As equipes desses projetos foram formadas por membros de diversas instituições do mundo, dentre as quais esteve inserida a FCT/UNESP (<http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br/is/cigala/index.php> - Acesso em: 15ago. de 2015).

Durante o período de realização do projeto CIGALA, foram instaladas oito estações com a finalidade de monitorar continuamente a cintilação ionosférica no Brasil. Estas estações, compostas por receptores GNSS Polar RX-PRO - *Septentrio*, coletam dados a uma taxa de até 100 Hz, produzindo parâmetros específicos da ionosfera a cada minuto. Neste contexto, foi criada a ferramenta *ISMR Query Tool*, um banco de dados que permite realizar consultas e análises sobre estes dados (<http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br/is/ismrtool/index.php> - Acesso em: 15ago. de 2015). A ferramenta *ISMR Query Tool* foi utilizada nesta pesquisa para

seleção de períodos com maior e menor influência de cintilação ionosférica. Mais detalhes serão apresentados nos Capítulos 4 e 5.

- **Refração troposférica**

A troposfera, para frequências abaixo de 30 GHz, comporta-se como um meio não dispersivo, ou seja, a refração independe da frequência do sinal transmitido, dependendo apenas das propriedades termodinâmicas do ar. Ela estende-se da superfície terrestre até aproximadamente 50 km (MONICO, 2008).

O gradiente de concentração dos gases presentes na troposfera é um dos fatores que influencia a qualidade obtida no posicionamento geodésico utilizando satélites artificiais. Essa influência gera um atraso no sinal, que ao ser projetado na direção zenital é denominado *ZTD (Zenital Tropospheric Delay - Atraso Zenital Troposférico)* (SAPUCCI, 2001). O efeito troposférico pode chegar a valores maiores que 30 metros, dependendo da densidade atmosférica e do ângulo de elevação do satélite (MONICO, 2008).

Desde o início da determinação das distâncias a partir da utilização das ondas eletromagnéticas já se estudava a influência da troposfera na propagação dos sinais e as formas de redução do seu efeito. A partir daí, vários efeitos causados pela troposfera sobre os sinais GNSS tornaram-se conhecidos, dentre os quais se podem citar a atenuação troposférica, cintilação troposférica e atraso troposférico (SAPUCCI, 2001).

A atenuação é a diminuição da potência da onda eletromagnética, exercida pelos elementos que constituem a atmosfera, sendo diferente para cada frequência. No posicionamento GNSS recomenda-se não utilizar observações abaixo do ângulo de elevação de 5 graus. A cintilação é uma oscilação na amplitude da onda eletromagnética, causada por irregularidades e variações bruscas no índice de refatividade atmosférica. Na frequência empregada pelo GNSS, esses efeitos são, em geral, relativamente pequenos, exceto para pequenos ângulos de elevação (MONICO, 2008).

O atraso troposférico gera erros nas observáveis GNSS em escalas maiores e, por isso, deve ser tratado de forma adequada. Esse efeito pode ser dividido em duas componentes: hidrostática e úmida. Com relação à primeira, o efeito ocorre principalmente pela influência do nitrogênio e oxigênio. Esse atraso corresponde cerca de 2,3 m no zênite e varia com a temperatura e pressão atmosférica local, sendo predito com razoável precisão, por ter a variação pequena de 1% durante várias horas. O segundo efeito é ocasionado pela atmosfera

úmida, ou seja, pela influência do vapor d'água na atmosfera. Esse atraso é pequeno se comparado ao outro, 1 a 35 cm no zênite, porém sua variação é cerca de 20% em poucas horas o que torna impossível sua predição com precisão (SAPUCCI, 2001; SEEBER, 2003; MONICO, 2008).

Como a espessura da camada troposférica, que a trajetória do sinal atravessa, é proporcional ao ângulo de elevação do satélite, ocorre à necessidade de relacionar o atraso zenital das diferentes componentes da atmosfera com o ângulo de elevação do satélite observado. Portanto, o atraso troposférico é aproximado como a soma dos efeitos das componentes hidrostática e úmida, multiplicadas por suas respectivas funções de mapeamento. De forma simplificada tem-se (SAPUCCI, 2001):

$$D_{TROP_r}^s = D_{ZH} \cdot mh(E) + D_{ZW} \cdot mw(E) \quad (9)$$

onde:

$D_{TROP_r}^s$ representa o atraso troposférico total para um ângulo de elevação (E) entre o satélite s e o receptor r ;

D_{ZH} representa o atraso troposférico na direção zenital para a componente hidrostática;

D_{ZW} representa o atraso troposférico na direção zenital para a componente úmida;

$mh(E)$ e $mw(E)$ são as funções de mapeamento que relacionam o atraso das componentes hidrostática e úmida, respectivamente, com o ângulo de elevação (E) do satélite.

Para a determinação do atraso troposférico é comum o uso de modelos específicos. Os modelos troposféricos representam a simplificação da própria atmosfera neutra da Terra, pois se baseiam no comportamento da refratividade do ar assumindo que seus constituintes obedecem a leis que já se configuram como modelos (SILVA *et al.*, 1999). Existem vários modelos empíricos que procuram estimar o atraso troposférico, como por exemplo, o de Hopfield, o de Saastamoinen e o de Lanyi (SEEBER, 2003). Quando se requer um posicionamento com poucos centímetros de erro, a modelagem troposférica com esses modelos pode não ser adequada. Nesse caso uma opção são os modelos de PNT (Previsão Numérica do Tempo), onde os valores de previsão para os pontos de uma grade são gerados e aplicados para obter os valores do ZTD. No Brasil, pesquisas relacionadas com relação à predição da troposfera com base em modelos de PNT são realizadas pelo CPTEC/INPE (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos / Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). Os

dados dos modelos de PNT, válidos para a América do Sul, podem ser obtidos na internet no site do CPTEC <<http://www.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: 15 ago. 2015). Os dados de modelos de PNT também podem ser obtidos a partir do modelo global Europeu ECMWF (*European Centre for Medium-Range WeatherForecasts*)(BOEHM; SCHUH, 2004).

A função de mapeamento relaciona o atraso vertical com o atraso para outros ângulos de elevação. Ela é distintamente tratada para as componentes hidrostática e úmida. Como algumas funções de mapeamento pode-se citar a de Chao, Davis, Herring, Niell e a VMF (MONICO, 2008; SEEBER, 2003; BOEHM e SCHUH, 2004).

- **Perdas de ciclos**

Quando ocorre a obstrução do sinal de um ou mais satélites, impedindo que este chegue até a antena do receptor é ocasionada uma perda na contagem do número inteiro de ciclos medidos no receptor, sendo chamada de perdas de ciclos (*cycle slips*). Esse bloqueio pode estar relacionado a fontes como construções, árvores, montanhas etc. A aceleração da antena, variações bruscas na atmosfera, interferências de outras fontes de rádio e problemas com o receptor e *software* também podem ser fontes causadoras das perdas de ciclos (MONICO, 2008).

Quando ocorrem perdas de ciclos a fase da onda portadora apresenta um salto por um número inteiro de ciclos afetando a estimativa e solução das ambiguidades. A correção exige que se localize o instante em que ocorreu o salto, bem como sua dimensão. Pode-se também introduzir uma nova ambiguidade como incógnita no modelo de ajustamento (MONICO, 2008).

A perda de ciclos pode ser detectada através de duplas e triplas diferenças no posicionamento relativo, o que não é possível no PPP. Contudo, existem alternativas para a detecção da perda de ciclos, como o uso de combinações lineares entre as observáveis. Nesse contexto, técnicas têm sido desenvolvidas para detecção e correção das perdas de ciclos, dentre as quais se pode citar a desenvolvida por Blewitt (1990), que foi utilizada nesta tese. Essa estratégia é baseada na combinação da *wide-lane* (*WL*) envolvendo a pseudodistância e a fase da onda portadora. A ambiguidade da *wide-lane* (N_w) é estimada recursivamente e a perda de ciclos é encontrada com base na combinação das ambiguidades da L1 e L2(BLEWITT, 1990):

$$N_w = \varphi_w - \frac{1}{\lambda_w} \frac{f_1 PD_1 + f_2 PD_2}{(f_1 + f_2)} \quad (10)$$

onde:

φ_w é a combinação linear *wide-lane*;

λ_w é o comprimento de onda da *wide-lane* $\cong 86,2$ cm.

Para cada época é realizado um cálculo recursivo da média entre as épocas, a fim de se analisar a ambiguidade da *wide-lane* independentemente, verificando-se a perda de ciclos (BLEWITT, 1990):

$$\langle N_w \rangle_k = \langle N_w \rangle_{k-1} + \frac{1}{n} (N_{w,k} - \langle N_w \rangle_{k-1}) \quad (11)$$

$$\sigma_k^2 = \sigma_{k-1}^2 + \frac{1}{n} \left\{ (N_{w,k} - \langle N_w \rangle_{k-1})^2 - \sigma_{k-1}^2 \right\} \quad (12)$$

onde:

$\langle N_w \rangle_k$ e σ_k^2 é a média atual da ambiguidade da *wide-lane* e o seu desvio padrão. Um valor *a priori* para o desvio padrão pode ser adotado. O valor de 0,5 ciclos tem sido uma boa opção na maioria dos casos (BLEWITT, 1990).

O desvio padrão diminui em função do tempo por um termo de ordem $\frac{1}{n^2}$, onde n é o número corrente de pontos observados da fase. Na época seguinte estimada $N_{w,k+1}$ deve ficar dentro do intervalo de $4\sigma_k$ da média atual $\langle N_w \rangle_k$. Desta forma, os erros grosseiros são identificados e a ocorrência de dois erros grosseiros seguidos dentro de 1 ciclo é o indicativo de perda de ciclos (BLEWITT, 1990).

- **Multicaminho**

Durante a propagação do sinal entre as antenas do satélite e do receptor pode ocorrer um desvio, fazendo com que o sinal chegue à antena do receptor por dois caminhos distintos, um que é direto do satélite e outro que foi “desviado” por algumas superfícies vizinhas (COSTA *et al.*, 2008). Em resumo, o receptor pode em algumas circunstâncias, receber além do sinal que chega diretamente à antena, sinais refletidos em superfícies vizinhas a ela, tais como construções, carros, árvores, corpos d’água, cercas, chapas metálicas etc. e podem estar dispostas de forma horizontal, vertical ou inclinadas (MONICO, 2008). Desta

forma a ocorrência destes efeitos depende do local e das superfícies no entorno da antena GNSS.

O Multicaminho, além de influenciar na acurácia do posicionamento pode fazer com que haja perdas de ciclo na fase da portadora. As perdas de ciclos e/ou aumento do ruído do sinal, fazem com que o multicaminho seja um importante fator a ser levado em consideração no posicionamento GNSS. A ocorrência do multicaminho depende da refratividade do meio onde se posiciona a antena, das características da antena e das técnicas empregadas nos receptores para reduzir os sinais refletidos (MONICO, 2008).

O problema do multicaminho pode ser minimizado evitando, se possível, locais onde a ocorrência é mais propícia. Antenas que propiciam uma redução deste efeito podem ser usadas, como por exemplo, *Choke ring* e *pinwheel*, que são projetadas com base na polarização de sinais (COSTA *et al.*, 2008).

- **Rotação da Terra**

O eixo de rotação da terra e seu plano equatorial não estão fixos no espaço, e rotacionam com respeito a um sistema inercial como o GCRS (*Geocentric Celestial Reference System*). Em virtude do cálculo das coordenadas do satélite no instante de transmissão ser efetuado em um sistema de coordenadas fixo à Terra, torna-se necessário corrigir estas coordenadas do movimento de rotação da Terra, já que durante a propagação do sinal o sistema de coordenadas terrestre rotaciona com relação ao satélite, alterando suas coordenadas (SEEBER, 2003). Existem diversas formas de resolver o problema de rotação da Terra, uma delas é aplicar rotações quando as coordenadas dos satélites estão no sistema terrestre, conforme mostra a equação (13):

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \alpha & 0 \\ -\alpha & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} \quad (13)$$

onde:

X', Y', Z' - coordenadas originais dos satélites;

X, Y, Z - coordenadas corrigidas dos satélites;

α - ângulo em radianos ($\cong 1,25''$)

2.4.3 Erros relacionados com o receptor e antena

Dos erros cujas possíveis fontes são o receptor e antena GNSS pode-se citar os ocasionados pelo relógio, atraso entre as duas portadoras no hardware do receptor, o centro de fase da antena do receptor e Fase *windup*.

- **Erro do relógio do receptor**

Os receptores GNSS são normalmente equipados com osciladores de cristal de quartzo. As vantagens desses osciladores é que eles são pequenos, consomem pouca energia e são relativamente baratos. Além disso, também possuem boa estabilidade interna, mas se comparados aos relógios dos satélites possuem baixa qualidade (SHEN, 2002).

Por conta do não sincronismo dos relógios dos receptores com relação ao sistema de tempo GNSS ocorre à necessidade de se rastrear no mínimo 4 satélites para que se possa solucionar, de forma simultânea, a posição da antena e o erro do relógio do receptor. No método de posicionamento relativo, este erro é praticamente eliminado. No PPP o erro do relógio do receptor é uma das incógnitas do modelo, sendo estimado no ajustamento juntamente com as outras componentes da estação. As redes de alta precisão utilizam receptores GNSS com osciladores altamente estáveis, porém de custo bastante elevado (MONICO, 2008).

- **Centro de fase da antena do receptor**

O centro de fase eletrônico da antena na qual as medidas dos sinais são referenciadas geralmente não coincide com centro mecânico da antena. O centro de fase, por ser virtual, não pode ser acessado diretamente por medidas, logo é necessário que se conheça a relação entre o centro de fase e um ponto físico de referência na antena que seja acessível às medidas. Esse ponto de referência é denominado de ARP (*Antenna Reference Point*) e o deslocamento do centro de fase em relação ao ARP é denominado PO (*Phase Offset*) (MONICO, 2008).

O centro de fase da antena sofre variações, pois é dependente da intensidade e do ângulo de incidência dos sinais, ou seja, do azimute e ângulo de elevação dos satélites. Essas variações são denominadas de PCV (*Phase Center Variation*).

Em levantamentos de alta precisão, as antenas envolvidas devem ser calibradas. Os parâmetros de calibração relacionam o ARP e o centro de fase. Essa relação é usualmente parametrizada segundo o PO e o PCV (MONICO, 2008).

O método de calibração das antenas pode ser definido como relativo ou absoluto. Na calibração relativa todas as antenas são calibradas com relação a uma única antena. O IGS realizava calibração relativa utilizando a antena *Dorne Margolin*. As correções absolutas passaram a ser recomendadas desde a adoção do ITRF 2005 pelo IGS. Para realizar a calibração absoluta das antenas dos receptores é necessária a calibração das antenas dos satélites. As correções absolutas do centro de fase das antenas GNSS dos receptores e satélites se encontram disponíveis no endereço < <ftp://igs.cb.jpl.nasa.gov/pub/station/general/> > - Acesso em 20 ago. de 2015.

- **Fase *windup***

A polarização de uma onda eletromagnética é o modo de vibração constante da fase no plano, no qual uma onda não polarizada, tal como a luz natural, vibra em todas as direções. A fase de uma antena polarizada circularmente à direita, como é o caso do GPS, depende da orientação da antena com respeito à fonte que gera o sinal. A medida da fase depende da orientação relativa entre as antenas que transmitem e recebem o sinal e da direção da linha de visada entre elas. À medida que as antenas rotacionam, seja do receptor ou do satélite, a mudança na observação da fase se acumula, sendo denominada de fase *windup* (LEICK, 2004).

Desde 1994, a maioria dos centros de análises do IGS aplica essa correção na determinação de órbitas, erro dos relógios dos satélites e produtos combinados. A negligência da correção da fase *windup* para o PPP ao se fixar as órbitas e erro dos relógios dos satélites pode resultar em erros da ordem de decímetros no posicionamento (KOUBA, 2015).

2.4.4 Erros e efeitos relacionados com a estação

Dos erros relacionados com a estação podem-se citar os ocasionados pelo movimento do polo e o multicaminho. Quanto ao multicaminho, este já foi apresentado no contexto da propagação do sinal e embora também tenha a estação como possível fonte, pois também é influenciado localização da mesma, não será mais abordado. No PPP como se busca um posicionamento de alta precisão os efeitos de marés terrestres, carga de marés oceânicas e

carga da atmosfera devem ser considerados. Esses efeitos não são erros, mas variações de fenômenos geofísicos que afetam as observações.

- **Marés terrestres**

As deformações da crosta terrestre, sob a ação gravitacional do Sol e da Lua, são denominadas de marés terrestres (*Earth body tides*). Próximo ao equador a superfície desloca-se quase 40 cm durante um período de 6 horas. As marés terrestres e as cargas oceânicas poderiam estar inseridas no contexto de fonte de erros relacionadas com os satélites, pois alteram o potencial gravitacional da terra e podem causar acelerações adicionais que atuam sobre os satélites, alterando suas órbitas. Porém essa aceleração é bastante pequena, sendo $2 \times 10^{-9} \text{ m/s}^2$ (SEEBER, 2003).

Após a realização da convenção de 2003 o IERS (*International Earth Rotation and Reference Systems Service*) apresentou o documento que se destina a definir o sistema de referência realizado pelo IERS e os modelos e procedimentos utilizados para esta finalidade (<http://tai.bipm.org/iers/conv2003/conv2003.html> - Acesso em 15 jan. 2015). Neste documento é apresentado um modelo convencional para cálculo das variações das coordenadas da estação devido às marés terrestres. Este modelo é baseado nos referenciais do modelo geopotencial, referenciais terrestres e em harmônicos esféricos de grau (n) e ordem (m), que são caracterizados por números (*Love e Shida*) que se referem a forças distribuídas na Terra que refletem no campo da Terra devido à força das marés. Os valores eficazes desses números dependem da latitude da estação e da frequência da maré e devem ser levados em consideração para posicionamento com precisão da ordem de 1mm.

- **Carga de marés oceânicas**

As marés oceânicas exercem carga sobre a crosta terrestre produzindo deslocamentos periódicos sobre a superfície. As mudanças devido à carga de maré oceânica são pelo menos uma ordem de magnitude menor que as mudanças devido às marés de corpos terrestres. Para posicionamento com precisão requerida da ordem de 5 cm durante um período de 24 h ou para estações longe dos oceanos a carga oceânica pode ser negligenciada. Para PPP cinemático ou estático próximo de regiões costeiras, considerando intervalos menores que 24 h, esse efeito deve ser considerado (KOUBA, 2015).

- **Movimento do Polo**

O movimento do polo refere-se ao movimento de rotação do polo celeste verdadeiro em relação ao polo de um sistema de referência convencional fixo a Terra. O movimento do polo causa uma variação das coordenadas da estação (SEEBER, 2003). A variação causada nas coordenadas pelo movimento do polo pode ser corrigida com base nas informações disponibilizadas pelo IERS em seus boletins A e B. Os boletins da IERS podem ser encontrados no endereço de internet <<http://www.iers.org>>.

- **Carga atmosférica**

O efeito da carga atmosférica pode ser considerado como uma resposta elástica da crosta terrestre a uma massa atmosférica distribuída sobre a superfície terrestre e variante no tempo. Variações da distribuição da massa atmosférica, que podem ser inferidas com base na medida de pressão atmosférica, induzem deformações sobre a crosta, sobretudo na direção vertical (MONICO, 2008).

No documento referente à convenção de 1996 do IERS encontram-se formulações matemáticas que permitem, de forma simplificada, o cálculo destes deslocamentos. Maiores informações podem ser encontradas no endereço de internet <<http://www.iers.org>>.

2.5 Combinações lineares das observáveis GNSS

Em princípio, existe um número grande de possibilidades para combinar as diferentes observáveis formando observáveis derivadas, mas apenas algumas combinações são significativas no contexto do posicionamento geodésico. Uma vantagem nas observações derivadas é que os erros presentes nas observações originais são eliminados ou reduzidos quando as diferenças são formadas entre as observáveis. Podem ser destacadas as combinações (SEEBER, 2003):

- Entre as observações em diferentes estações;
- Entre as observações de diferentes satélites;
- Entre as observações em diferentes épocas;
- Entre as observações do mesmo tipo;
- Entre as observações de tipo diferente.

Em alguns casos, as ambiguidades de observações derivadas são mais fáceis de resolver do que para aquelas das observações originais. Por outro lado, o nível de ruído pode ser aumentado consideravelmente. O uso de combinações lineares no processo de estimação de parâmetros, portanto, deve ser cuidadosamente estudado (SEEBER, 2003).

Combinações lineares entre as observações do mesmo tipo podem ser formadas entre a fase da onda portadora e entre os códigos da fase. Os principais usos dessas combinações lineares são para eliminação do atraso ionosférico, exemplifica-se a *ion-free*, e para a solução de ambiguidades de fase da portadora (SEEBER, 2003).

O processamento envolvendo a *ion-free* e a combinação da *wide-lane* é muito útil na etapa de detecção de perdas de ciclos e de erros grosseiros (seção 2.4.2). Isso se dá devido à primeira ter efeitos ionosféricos praticamente nulos e a segunda com comprimento de onda longo (~86cm). Já a combinação *narrow-lane* apresenta um ruído baixo em todas as combinações lineares apresentadas, mas seu curto comprimento de onda (~10,7 cm) dificulta o processo de solução de ambiguidades.

2.5.1 Combinação Linear Wide-Lane e Narrow-Lane

As combinações lineares da *wide-lane* (φ_w) e *narrow-lane* (φ_n) são combinações que envolvem as medidas de fase da onda portadoras e são dadas por (SEEBER, 2003):

$$\varphi_w = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (14)$$

$$\varphi_n = \varphi_1 + \varphi_2 \quad (15)$$

As ambiguidades das combinações φ_w e φ_n são dependentes e são dadas por:

$$N_w = N_1 - N_2 \quad (16)$$

$$N_n = N_1 + N_2 \quad (17)$$

onde:

N_w - ambiguidade da *wide-lane*

N_n - ambiguidade da *narrow-lane*

A vantagem da combinação φ_w , em comparação com a observação original, é que a ambiguidade é resolvida para um sinal com um comprimento de onda quatro vezes maior. O ruído, no entanto, é aproximadamente seis vezes maior. A φ_n tem o menor nível de ruído de

todas as combinações lineares e, portanto, produz os melhores resultados, mas sua ambiguidade é, no entanto, difícil de resolver. A magnitude do efeito ionosférico na φ_w e na φ_n é igual, mas com um sinal oposto. Em função disso, a média da φ_w e da φ_n é o sinal livre da ionosfera (SEEBER, 2003):

$$L_0 = \frac{\varphi_w + \varphi_n}{2} \quad (18)$$

onde:

L_0 - sinal livre da ionosfera, não possui característica de inteiro e o ruído dessa combinação é muito elevado.

O sinal ionosférico (L_1) é formado a partir da diferença entre a φ_w e φ_n . Ele permite uma análise detalhada do comportamento da ionosfera e é útil nas estratégias de solução de ambiguidades (SEEBER, 2003):

$$L_1 = \varphi_w - \varphi_n \quad (19)$$

A relação de dependência indica que quando N_w é dada por um número par, N_n também será par. Quando N_w for ímpar, N_n também será (*even-odd condition*). Esta condição par-ímpar implica que, quando a ambiguidade é resolvida por uma das duas combinações o comprimento de onda do sinal da outra combinação é aumentado por um fator dois. Por exemplo, quando N_w é resolvida, o comprimento de onda da N_n é 21,4 centímetros e então pode ser resolvida mais facilmente (SEEBER, 2003).

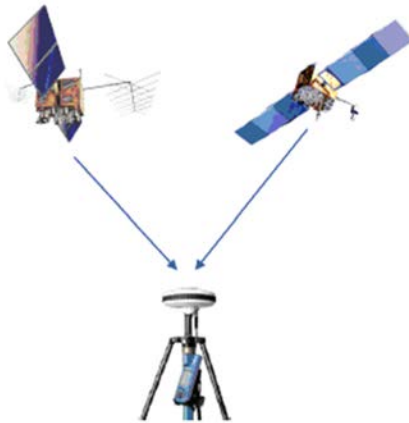
Usam-se as combinações lineares de observáveis de tipo diferente, por exemplo, como forma de melhorar a qualidade da pseudodistância do código C/A, combinando as medidas da pseudodistância com as da fase da onda portadora (SEEBER, 2003).

Uma combinação linear envolvendo código e fase é denominada *Melbourne-Wübbena* (MELBOURNE, 1985; WÜBBENA, 1985). Essa combinação elimina os efeitos da ionosfera, relógio, troposfera, geometria e pode ser útil na identificação de perdas de ciclos (MONICO, 2008). Também pode ser usada na estimativa de ambiguidades da fase da onda portadora.

2.5.2 Simples diferença

A SD pode ser formada ente dois receptores, entre dois satélites, ou entre duas épocas. A diferenciação para um par de receptores observando simultaneamente um satélite é chamada de SD entre receptores. Na diferenciação entre duas épocas tem-se a SD entre épocas. A diferenciação das observações de dois satélites medidas simultaneamente em uma única estação é chamada de SD entre satélites, conforme mostra a figura 2(WELLS *et al.*, 1986). A combinação da SD entre satélites é utilizada nesta tese como etapa do processo de solução das ambiguidades.

Figura 2 - Simples diferença entre satélites



Fonte: Adaptada (GENG *et al.*, 2012).

Sendo n o número de satélites, o número de SD possíveis é igual a $(n * (n - 1)/2)$ e o número de SD independentes é igual a $(n - 1)$. Desta forma, para 32 satélites existem 496 SD possíveis. Desse conjunto, 31 SD formam um conjunto independente. Isso significa que as SD restantes podem ser formadas a partir de combinações lineares do conjunto independente.

Se as SD entre satélites são formadas, ou seja, as diferenças das observações de dois satélites gravadas simultaneamente em uma única estação, o erro do relógio do receptor e a parte fracional dos componentes do atraso do hardware são cancelados(SEEGER, 2003; GE *et al.*, 2008). Os demais erros não são cancelados porque o caminho de propagação do sinal de dois satélites, até um mesmo receptor, é bastante diferente (GARNÉS, 2001).

A equação de observação da SD entre satélites para a pseudodistância é definida de forma simplificada por:

$$\Delta PD_r^{s,j} = \Delta \rho_r^{s,j} - \varepsilon_{PD} \quad (20)$$

onde:

$\Delta PD_r^{s,j} = (PD_r^s - PD_r^j)$ - SD da pseudodistância;

$\Delta \rho_r^{s,j} = (\rho_r^s - \rho_r^j)$ - SD da distância geométrica;

ε_{PD} - erros sistemáticos não modelados e resíduos aleatórios da $\Delta PD_r^{s,j}$.

A equação de observação para a SD da fase da onda portadora é definida simplificada por:

$$\Delta \varphi_r^{s,j} = \frac{f}{c} (\Delta \rho_r^{s,j}) + \overline{N}_r^{s,j} + \varepsilon_\varphi \quad (21)$$

onde:

$\Delta \varphi_r^{s,j} = (\varphi_r^s - \varphi_r^j)$ - SD da fase da onda portadora;

$\overline{N}_r^{s,j} = \overline{N}_r^s - \overline{N}_r^j$ - ambiguidade da SD da fase da onda portadora;

ε_φ - erros sistemáticos não modelados e resíduos aleatórios da $\Delta \varphi_r^{s,j}$.

Com a SD entre as duas épocas para o mesmo satélite a ambiguidade é cancelada. Isso ocorre porque a ambiguidade da fase inicial não muda com o tempo, desde que não ocorram perdas de ciclos (SEEBER, 2003).

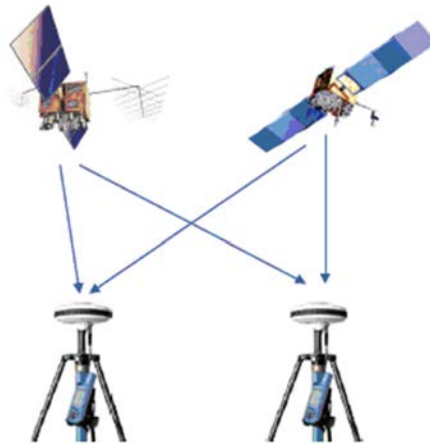
2.5.3 Dupla diferença

Considerando dois receptores e dois satélites na mesma época, há as possibilidades de operações (WELLS *et al.*, 1986).

- Duas simples diferenças entre receptores, cada uma envolvendo um satélite diferente;
- Duas simples diferenças entre satélites, cada uma envolvendo um receptor diferente;
- Uma dupla diferença entre o receptor e o satélite, envolvendo ambos receptores e satélites.

A DD entre o receptor e o satélite pode ser construída por duas SDs entre receptores e diferenciação entre dois satélites ou por duas SDs entre satélites e a diferenciação entre dois receptores. As DD estão livres dos erros dos relógios do satélite e do receptor e os erros de propagação e órbita são reduzidos(SEEBER, 2003). A figura 3 ilustra a combinação linear da DD entre satélites e receptores.

Figura 3 - Dupla diferença entre satélites e receptores



Fonte: Adaptada(GENG *et al.*, 2012).

Se n satélites estão sendo rastreados simultaneamente por dois receptores, é possível calcular $n-1$ DDs independentes para cada tipo de observação, pseudodistância e/ou fase, por instante (MARQUES, 2008). A equação de observação da DD para a pseudodistância é definida por (MONICO, 2008):

$$\Delta PD_{r,l}^{s,j} = \Delta \rho_{r,l}^{s,j} - \varepsilon_{PD} \quad (22)$$

onde:

$$\Delta PD_{r,l}^{s,j} = (PD_r^s - PD_l^s) - (PD_r^j - PD_l^j) \text{ - DD da pseudodistância;}$$

$$\Delta \rho_{r,l}^{s,j} = (\rho_r^s - \rho_l^s) - (\rho_r^j - \rho_l^j) \text{ - DD da distância geométrica;}$$

$$\varepsilon_{PD} \text{ - erros não modelados e resíduos aleatórios da } \Delta PD_{r,l}^{s,j}.$$

A equação de observação para a DD da fase da onda portadora é definida com (MONICO, 2008):

$$\Delta\varphi_{r,l}^{s,j} = \frac{f}{c} (\Delta\rho_{r,l}^{s,j}) + \bar{N}_{r,l}^{s,j} + \varepsilon_{\varphi} \quad (23)$$

onde:

$\Delta\varphi_{r,l}^{s,j} = (\varphi_r^s - \varphi_l^s) - (\varphi_r^j - \varphi_l^j)$ - DD da fase portadora;

$\bar{N}_{r,l}^{s,j}$ - ambiguidade da DD;

ε_{φ} - erros não modelados e resíduos aleatórios da $\Delta\varphi_{r,l}^{s,j}$.

A equação da DD proporciona melhor relação entre o ruído resultante da combinação linear e a eliminação de erros sistemáticos envolvidos nas observáveis de origem. É a observável mais utilizada no processamento de dados GNSS envolvendo a fase da onda portadora (MONICO, 2008).

Embora algumas das combinações lineares descritas não sejam diretamente utilizadas na abordagem deste trabalho no âmbito do PPP, os seus conceitos são importantes para a contextualização do mesmo.

2.6 Fundamentos do Posicionamento por Ponto Preciso

O posicionamento absoluto ou posicionamento por ponto é o método de posicionamento GNSS em que se obtêm as coordenadas de um ponto utilizando apenas um receptor. Para tal, o receptor coleta medidas da pseudodistância derivada do código C/A. Esse código é modulado na portadora L1. As órbitas e correções para os relógios dos satélites são obtidos a partir das efemérides transmitidas (NRCAN, 2015).

No PPP a posição pode ser obtida com acurácia centimétrica, tanto com a estimativa em tempo real (ou quase real, referente à latência de alguns segundos) ou no modo pós-processado. Para tal, são utilizadas efemérides precisas, correções para os relógios dos satélites e deve ser realizada a modelagem dos erros e efeitos que envolvem as observáveis GNSS. Para o PPP em tempo real, é necessário dispor de órbitas e correções para os erros dos relógios dos satélites precisos em tempo real.

Tendo estações de monitoramento contínuo distribuídas no mundo e vários centros de análises, o IGS tem fornecido, sem custo algum, produtos como órbitas pós-

processadas e correções para os relógios dos satélites, bem como modelo global para erros provenientes da ionosfera e modelo para correção residual da troposfera.

O IGS produz três tipos de efemérides e correções para os relógios: IGS final, disponíveis com doze dias de latência, IGS rápida com 17 horas de latência, IGS ultrarrápidas disponíveis quatro vezes por dia, podendo essa ser predita (em tempo real) ou observada, com latência de 3 horas. O Quadro 2 apresenta a relação dos produtos gerados pelo IGS. Mais informações podem ser encontradas na página do IGS na internet, onde é feita uma descrição de cada produto disponibilizado e suas respectivas acurácias (<http://igsb.jpl.nasa.gov/components/prods.html> - Acesso em jan. 2015).

Quadro 2- Produtos gerados pelo IGS

		Acurácia	Latência	Atualização	Intervalo
Transmitida	Órbita	~100 cm	Tempo real	-	10 seg.
	Relógio	~5 ns			
Ultrarrápida IGU Predita	Órbita	~5 cm	Tempo real	03, 09, 15, 21 UTC	15 min.
	Relógio	~3 ns			
Ultrarrápida IGU Observada	Órbita	~3 cm	3 - 9 horas	03, 09, 15, 21 UTC	15 min.
	Relógio	~ 150 ps			
Rápida IGR	Órbita	~2,5 cm	17 - 41 horas	Diária (às 17 UTC)	15 min.
	Relógio	~75 ps			5 min.
Final IGS	Órbita	~2,5 cm	12 - 18 dias	Semanal (Quinta-feira)	15 min.
	Relógio	~75 ps			5 min. / 30 seg.

Fonte: IGS (2015)

No modelo funcional do PPP pode-se utilizar a observável *ion-free* para tratar o efeito ionosférico de primeira ordem. Essa estratégia foi utilizada nesta tese. Porém, outra estratégia pode ser adotada para tratar os efeitos da ionosfera, como por exemplo, a estimativa estocástica da ionosfera juntamente com os outros parâmetros incógnitos (MARQUES, 2008).

Com relação aos efeitos ionosféricos de ordem superior, estes podem ser corrigidos a partir de modelos matemáticos (HERNÁNDEZ-PAJARES et al., 2007). Na FCT/UNESP encontra-se disponível um aplicativo desenvolvido em trabalho de mestrado, o qual permite aplicar tais correções nas medidas GPS (MARQUES, 2008).

As equações da combinação linear *ion-free*, em metros, para a pseudodistância e fase da onda portadora, podem ser expressa por:

$$PD_{rIF}^s = \rho_r^s + c[dt_r - dt^s] + T_r^s + \varepsilon_{PDIF_r}^s \quad (24)$$

$$\lambda_{IF} \varphi_{IF_r}^s = \rho_r^s + c[dt_r - dt^s] + \lambda_{IF} \bar{N}_{IF} + T_r^s + \varepsilon_{\varphi_{IF_r}^s} \quad (25)$$

onde:

\bar{N}_{IF} é a ambiguidade da *ion-free* e os outros termos já foram descritos anteriormente.

Nas equações (24) e (25), o erro do relógio do receptor deve ser estimado com os outros parâmetros no ajustamento dos dados. A distância geométrica entre o satélite e o receptor ρ_r^s é calculada a partir da diferença das coordenadas do satélite (no instante de transmissão t^s) e do receptor:

$$\rho_r^s = \sqrt{(X^s(t^s) - X_r)^2 + (Y^s(t^s) - Y_r)^2 + (Z^s(t^s) - Z_r)^2} \quad (26)$$

As observáveis GNSS são não lineares com relação às coordenadas das estações e dos satélites. As coordenadas dos satélites são normalmente injuncionadas a partir dos valores obtidos nas efemérides precisas e são consideradas constantes no ajustamento. A linearização da equação da pseudodistância e da fase da onda portadora é apresentada a seguir (MARQUES, 2012):

$$E\{\Delta PD_{rIF}^s\} = -\frac{X^s - X_r^0}{(\rho_r^s)^0} \Delta X_r - \frac{Y^s - Y_r^0}{(\rho_r^s)^0} \Delta Y_r - \frac{Z^s - Z_r^0}{(\rho_r^s)^0} \Delta Z_r + c(dt_r) + m_f Zwd \quad (27)$$

$$E\{\Delta \lambda_{IF} \varphi_{IF_r}^s\} = -\frac{X^s - X_r^0}{(\rho_r^s)^0} \Delta X_r - \frac{Y^s - Y_r^0}{(\rho_r^s)^0} \Delta Y_r - \frac{Z^s - Z_r^0}{(\rho_r^s)^0} \Delta Z_r + c(dt_r) + m_f Zwd + \lambda_1 N_{IF} \quad (28)$$

onde:

$E\{.\}$ é o operador de esperança matemática;

ΔPD_{rIF}^s é a diferença entre a pseudodistância observada e a calculada;

$\Delta \lambda_{IF} \varphi_{IF_r}^s$ é a diferença entre a fase observada e calculada;

$(\rho_r^s)^0$ é a distância geométrica calculada em função dos parâmetros aproximados.

De forma matricial tem-se:

$$E \left\{ \begin{bmatrix} \Delta PD_{rIF}^s \\ \Delta \lambda_{IF} \phi_{IF_r}^s \end{bmatrix} \right\} = AX = \begin{bmatrix} -\frac{X^s - X_r^0}{(\rho_r^s)^0} & -\frac{Y^s - Y_r^0}{(\rho_r^s)^0} & -\frac{Z^s - Z_r^0}{(\rho_r^s)^0} 1 & m_f & 0 \\ -\frac{X^s - X_r^0}{(\rho_r^s)^0} & -\frac{Y^s - Y_r^0}{(\rho_r^s)^0} & -\frac{Z^s - Z_r^0} {(\rho_r^s)^0} 1 & m_f & \lambda_{IF} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_r \\ \Delta Y_r \\ \Delta Z_r \\ dt_r \\ Zwd \\ N_{IF} \end{bmatrix} \quad (29)$$

A diferença entre a pseudodistância observada e a calculada, vetor $L = L^0 - L_b$, pode ser representada pelo termo ΔPD_{rIF}^s . E da mesma forma para a fase, $\Delta \lambda_{IF} \phi_{IF_r}^s$. Os termos ΔX_r , ΔY_r , ΔZ_r , dt_r , Zwd , N_{IF} são as correções para as coordenadas da estação, erro do relógio do receptor, troposfera e ambiguidade, que são os parâmetros incógnitos.

No modelo estocástico, considerando que no PPP não se considera correlações entre as medidas, a MVC (Matriz de variância e covariância) das observações é uma matriz diagonal (Σ_{Lb}):

$$\Sigma_{Lb} = \begin{bmatrix} \sigma_{PD_{IF}^{s_1}}^2 & & & & & & & & 0 \\ & \sigma_{PD_{IF}^{s_2}}^2 & & & & & & & \\ & & \dots & & & & & & \\ & & & \sigma_{PD_{IF}^{s_n}}^2 & & & & & \\ & & & & \sigma_{\phi_{IF}^{s_1}}^2 & & & & \\ & & & & & \sigma_{\phi_{IF}^{s_2}}^2 & & & \\ & & & & & & \dots & & \\ & & & & & & & \sigma_{\phi_{IF}^{s_n}}^2 & \\ 0 & & & & & & & & & & \end{bmatrix} \quad (30)$$

onde:

$\sigma_{PD_{IF}^{s_i}}^2$ e $\sigma_{\phi_{IF}^{s_i}}^2$ representam as variâncias para a *ion-free* para a pseudodistância e da fase da onda portadora, respectivamente, para cada satélite i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) e podem ser calculadas de acordo com as equações (7) e (8).

Com relação à disponibilização do método PPP, a forma mais acessível para a comunidade em geral, são os serviços oferecidos de PPP on-line (pós-processado). Os usuários deste tipo de serviço conseguem obter acurácia ao nível do decímetro ao centímetro, dependendo da quantidade e qualidade de dados, bastando somente enviar o arquivo RINEX através da página do serviço PPP on-line para obter sua solução em poucos segundos.

Alguns *softwares* para PPP em tempo real estão disponíveis ao usuário, dentre os quais estão o BNC (*BKG_Ntrip_Client*) e o RTKLib (BNC, 2015; TAKASU, 2015). Eles utilizam o protocolo NTRIP (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*) para o transporte dos dados GNSS. Uma característica do BNC é que os dados de observação, navegação e as correções obtidas por meio do NTRIP, podem ser armazenados em arquivo no formato RINEX.

No PPP do BNC podem-se utilizar observações da pseudodistância ou pseudodistância e fase através da combinação *ion-free*. Também é opção o modo cinemático ou estático, somente com dados GPS ou GPS e GLONASS. Também se pode optar por estimar ou não o atraso zenital troposférico (BNC, 2015).

O RTKLib é composto por alguns módulos para diversas aplicações e uma biblioteca que pode ser utilizada no desenvolvimento de programas para o processamento de dados GNSS. As opções de configuração para o PPP em tempo real inclui a utilização de dados GPS, GLONASS, utilização da frequência L1, L1 & L2 ou L1, L2 & L5 e o posicionamento pode ser feito no modo estático ou cinemático (TAKASU, 2015).

Outra alternativa é o *software* RT_PPP que realiza PPP pós-processado e também em tempo real, no modo estático ou cinemático utilizando o Filtro de *Kalman*. O mesmo permite a utilização de arquivos de efemérides precisas do IGS (IGS final) ou de efemérides preditas IGU. Também se podem utilizar as correções para os relógios dos satélites estimadas pelo IGS ou pelo *software* RT_SAT_CLOCK, o qual foi desenvolvido em trabalho de doutorado no Brasil (MARQUES, 2012).

2.7 Filtro de Kalman no PPP

O Filtro de Kalman é um método para estimar o vetor estado, que na comunidade geodésica é conhecido como vetor dos parâmetros com variação temporal, de um sistema dinâmico estocástico a partir de observações com flutuações probabilísticas. É um estimador recursivo ótimo (de variância mínima) e não tendencioso. Recursivo significa que não há necessidade de se armazenar todas as informações recebidas, trabalhando somente com as últimas estimativas e medições recentes, sendo bastante indicado para processamentos em tempo real (CAMARGO, 1992).

Nos problemas de estimação, com t sendo o período disponível de observações, para uma época t_k tem-se para $t < t_k$ a estimativa predita, para $t = t_k$ a estimativa filtrada e $t > t_k$ tem-se estimativa suavizada (KALMAN, 1960). Na predição, utiliza-se na estimativa dados

anteriores à época t_k ; na filtragem utilizam-se dados desde épocas anteriores até à época t_k e na suavização utiliza-se na estimativa dados anteriores e posteriores a t_k .

O Filtro de Kalman pode ser encontrado em diversas versões: Discreto (modelo dinâmico e de medidas considerados discretos), Contínuo (ambos contínuos no tempo), Contínuo-Discreto (modelo dinâmico é contínuo e de medidas discreto) e Discreto-Contínuo (modelo dinâmico é discreto e de medidas contínuo). Essas versões podem ser encontradas para modelos lineares, linearizados ou estendidos (CAMARGO, 1992).

Os modelos matemáticos envolvidos no posicionamento GNSS são geralmente não lineares. Para esses modelos pode-se adotar o filtro linearizado ou estendido. Se no cálculo da estimativa predita e filtrada for empregado um valor próximo ao da estimativa do estado, é o Filtro de Kalman linearizado, mas se for a estimativa da época corrente tem-se o FKE (Filtro de Kalman Estendido) (CAMARGO, 1992). O FKE é empregado quando não se conhece a trajetória, quando as observações são integradas para corrigir a estimativa predita de estado e sua MVC. É ideal para PPP em tempo real, pois o cálculo é realizado em tempo real, à medida que os dados tornam-se disponíveis.

Considerando o sistema dinâmico e o modelo de medida constituído por um sistema discreto não linear, representado por (CAMARGO, 1992):

$$X_k = T_{k,k-1} X_{k-1} + W_k \quad (31)$$

$$L_k^b = A_k X_k + V_k \quad (32)$$

onde:

X_k é o vetor estado na época k , de dimensão $(u \times 1)$ (u = número de parâmetros incógnitos);

$T_{k,k-1}$ é a matriz de transição $(u \times u)$;

W_k é o vetor das correções do modelo dinâmico ou vetor dos ruídos $(u \times 1)$, ou seja, é o vetor dos ruídos brancos e é assumido que $E\{W_k\} = 0$, sendo $\{.\}$ a esperança matemática;

L_k^b é o vetor das observações ou medidas $(n \times 1)$ (n = número de observações coletadas na época k);

A_k é a matriz dos coeficientes $(n \times u)$ (relaciona as observações ao estado);

V_k é o vetor dos resíduos nas medidas.

A matriz de transição possui as seguintes propriedades(KALMAN, 1960):

$$\begin{aligned} T_{k,k} &= I \\ T_{k,s}T_{s,r} &= T_{k,r} \\ T_{k,s}^{-1} &= T_{s,k} \end{aligned} \quad (33)$$

onde:

k,s,r são inteiros e indicam épocas. Se o modelo for estacionário tem-se:

$$T_{k+1,k} = T_{k+1-k} = T_1 = \text{constante}. \quad (34)$$

Para aplicações com o Filtro de Kalman utiliza-se a etapas de Predição ou Ciclo de Propagação e a Filtragem ou Ciclo de Atualização. Na Predição a estimativa do vetor estado e a MVC é baseada em informações anteriores a época t_k . A estimativa predita do vetor estado e sua MVC são dadas por (CAMARGO, 1992):

$$\hat{X}_{k/k-1} = X_{k/k-1}^0 \quad (35)$$

$$\Sigma_{\hat{X}_{k/k-1}} = T_{k,k-1}\Sigma_{\hat{X}_{k-1/k-1}}T_{k,k-1}^T + \Sigma_{w_k} \quad (36)$$

onde:

$$X_{k/k-1}^0 = f_{k,k-1}(\hat{X}_{k-1/k-1})$$

$$T_{k,k-1} = \left. \frac{\partial f_{k,k-1}(X_{k-1})}{\partial X_{k-1}} \right|_{X_{k-1}=\hat{X}_{k-1/k-1}}$$

Na etapa de Filtragem se estima o vetor estado e a MVC no instante t_k utilizando medidas L_k^b (CAMARGO, 1992).

$$\hat{X}_{k/k} = \hat{X}_{k/k-1} + k_k(L_k^b - L_k^0) \quad (37)$$

$$\Sigma_{\hat{X}_{k/k}} = (I - k_k A_k)\Sigma_{\hat{X}_{k/k-1}} \quad (38)$$

onde:

$$L_k^0 = g_k(\hat{X}_{k/k-1})$$

$$A_k = \left. \frac{\partial g_k(X_k)}{\partial X_k} \right|_{X_k = \hat{X}_{k/k-1}}$$

k_k é a matriz de Ganho de Kalman e é dada por:

$$K_k = \sum_{\hat{X}_{k/k-1}} A_k^T (A_k \sum_{\hat{X}_{k/k-1}} A_k^T + \sum_{L_k^b})^{-1}. \quad (39)$$

Para a aplicação do Filtro de Kalman no PPP é necessário conhecer o vetor de estado inicial, bem como a sua precisão:

$$\hat{X}_{0,0} = [X_r Y_r Z_r dt_r \quad Zw d \quad N_{IF1} N_{IF2} \quad \dots \quad N_{IFn}] \quad (40)$$

$$\sum_{\hat{X}_{0,0}} = \begin{bmatrix} \sigma_{X_r}^2 & & & & & & & & & & & & & & & & & & & 0 \\ & \sigma_{Y_r}^2 & & & & & & & & & & & & & & & & & & & \\ & & \sigma_{Z_r}^2 & & & & & & & & & & & & & & & & & \\ & & & \sigma_{N_{IF1}}^2 & & & & & & & & & & & & & & & & \\ & & & & \sigma_{N_{IF2}}^2 & & & & & & & & & & & & & & & \\ & & & & & \dots & & & & & & & & & & & & & & \\ & & & & & & \sigma_{N_{IFn}}^2 & & & & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & \sigma_{Zwd}^2 & & & & & & & & & & & & \\ 0 & & & & & & & & \sigma_{dt_r}^2 & & & & & & & & & & & \end{bmatrix} \quad (41)$$

onde:

$\hat{X}_{0,0}$ é o vetor de estado inicial ($t_k=0$) dos parâmetros a serem estimados;

$\sum_{\hat{X}_{0,0}}$ é a MVC dos parâmetros iniciais;

X_r, Y_r, Z_r são as coordenadas estimadas para o receptor;

N_{IFi} são as ambiguidades da *ion-free* ($i = 1, \dots, n$, onde n é o número de satélites).

A matriz design A para n satélites na época k para a pseudodistância e fase da onda portadora da *ion-free* é dada por:

$$A(PD_{IFrk}^s) = \begin{bmatrix} \frac{X_{rk}-X_k^{s1} Y_{rk}-Y_k^{s1} Z_{rk}-Z_k^{s1}}{\rho_{rk}^s} & \rho_{rk}^s & \rho_{rk}^s & 1 & mf & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \frac{X_{rk}-X_k^{s2} Y_{rk}-Y_k^{s2} Z_{rk}-Z_k^{s2}}{\rho_{rk}^s} & \rho_{rk}^s & \rho_{rk}^s & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{X_{rk}-X_k^{sn} Y_{rk}-Y_k^{sn} Z_{rk}-Z_k^{sn}}{\rho_{rk}^s} & \rho_{rk}^s & \rho_{rk}^s & 1 & mf & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (42)$$

$$A(\varphi_{IFrk}^s) = \begin{bmatrix} \frac{X_{rk}-X_k^{s1} Y_{rk}-Y_k^{s1} Z_{rk}-Z_k^{s1}}{\rho_{rk}^s} & \rho_{rk}^s & \rho_{rk}^s & 1 & mf & \lambda_{IF} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \frac{X_{rk}-X_k^{s2} Y_{rk}-Y_k^{s2} Z_{rk}-Z_k^{s2}}{\rho_{rk}^s} & \rho_{rk}^s & \rho_{rk}^s & \vdots & \vdots & 0 & \lambda_{IF} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{X_{rk}-X_k^{sn} Y_{rk}-Y_k^{sn} Z_{rk}-Z_k^{sn}}{\rho_{rk}^s} & \rho_{rk}^s & \rho_{rk}^s & 1 & mf & 0 & 0 & 0 & \dots & \lambda_{IF} \end{bmatrix} \quad (43)$$

Para esse modelo, a matriz de transição T é igual a matriz Identidade ($T = I$). O vetor de observações L_k^b é composto da combinação linear *ion-free* das observáveis e a sua MVC ($\sum L_k^b$), cujas variâncias são distintas para a fase de batimento da onda portadora e pseudodistância.

2.8 Redes ativas GNSS

Por redes ativas GNSS, define-se o conjunto de estações geodésicas estabelecidas em locais estáveis da superfície terrestre ou litosfera, materializadas por uma estrutura rígida, nas quais são instalados receptores GNSS de dupla-frequência, os quais coletam dados continuamente (COSTA *et al.*, 2009). A rede IGS, por exemplo, é uma rede com estações de referência GNSS de operação contínua - CORS (*Continuously Operating Reference Station*), na qual em 31 de agosto de 2015 contava com 478 estações, onde 394 estavam ativas, operando continuamente (<http://igsceb.jpl.nasa.gov/network/list.html> - Acesso em: 21ago. de 2015).

Com o advento dos GNSS, tornou-se necessário para o Brasil, a adoção de um novo sistema de referência, geocêntrico e compatível com a precisão dos métodos de posicionamento correspondentes e também com os sistemas adotados no restante do globo terrestre. Diante disso, após a resolução 01/2005 do IBGE, ficou estabelecido o SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas), em sua realização do ano de 2000 e época de referência 2000,4, como novo sistema de referência geodésico para o SGB (Sistema Geodésico Brasileiro) e para o Sistema Cartográfico Nacional (IBGE, 2015a).

O SIRGAS é definido como sendo idêntico ao ITRS e sua realização é a densificação do ITRF. As coordenadas SIRGAS estão associadas a uma época específica de referência e suas variações no tempo são tomadas quer seja pelas velocidades individuais das estações SIRGAS ou mediante um modelo contínuo de velocidades que cobre todo o continente (SIRGAS, 2015).

Atualmente o SIRGAS está materializado por uma rede de estações GNSS de funcionamento contínuo com coordenadas de alta precisão e velocidades, associadas a uma época específica de referência - a SIRGAS-CON (Rede SIRGAS de funcionamento contínuo). Essa rede, em 31 de agosto de 2015, estava composta por mais de 400 estações, das quais 59 pertencentes à rede global do IGS (SIRGAS, 2015).

As coordenadas semanais das estações da Rede SIRGAS-CON se referem à época de observação e a mesma referência utilizada pelo IGS para calcular órbitas finais GNSS, atualmente o IGS08 (<<https://igscb.jpl.nasa.gov/pipermail/igsmail/2012/006655.html>>. Acesso em: 21 ago. 2015). As coordenadas das soluções multianuais se referem ao ITRF vigente e a uma época específica, por exemplo, a solução SIR11P01 é dada no ITRF2008, época 2005.0.

As redes com características globais implicam numa distribuição de pontos separados por centenas e até milhares de quilômetros. As necessidades práticas, bem como as técnicas de obtenção de coordenadas vinculadas a uma referência global, exigem o estabelecimento de redes com um espaçamento menor entre os pontos materializados. Isto implica na implantação de pontos de densificação, os quais compõem as redes de referência continentais, como por exemplo, a Rede SIRGAS, nacionais ou regionais (BLITZKOW;MATOS, 2005).

No Brasil, no contexto de redes nacionais tem-se disponível a RBMC. A operacionalização da RBMC em 1996 implantou, em âmbito nacional, o conceito de redes ativas através do monitoramento contínuo de satélites GNSS. Diariamente todos os dados coletados nas estações da RBMC são transferidos automaticamente e disponibilizados aos usuários em formato RINEX (IBGE, 2015b).

A partir da operacionalização da RBMC, o desenvolvimento de pesquisas geodésicas nacionais foi ampliado e alguns métodos de posicionamento se tornaram possíveis no Brasil, como é o caso do tema abordado por esta pesquisa onde a solução de ambiguidades no PPP é realizada com o auxílio de uma rede GNSS.

Outra característica importante da RBMC é que suas observações vêm contribuindo, desde 1997, para a densificação regional da rede do IGS, garantindo uma maior precisão dos produtos IGS sobre o território brasileiro. Em agosto de 2015 a RBMC estava composta por 118 estações, com 92 estações com capacidade de transmissão de dados em tempo real pelo protocolo NTRIP. A figura 4 apresenta a distribuição das estações da RBMC.

Figura 4 - Distribuição das estações da RBMC



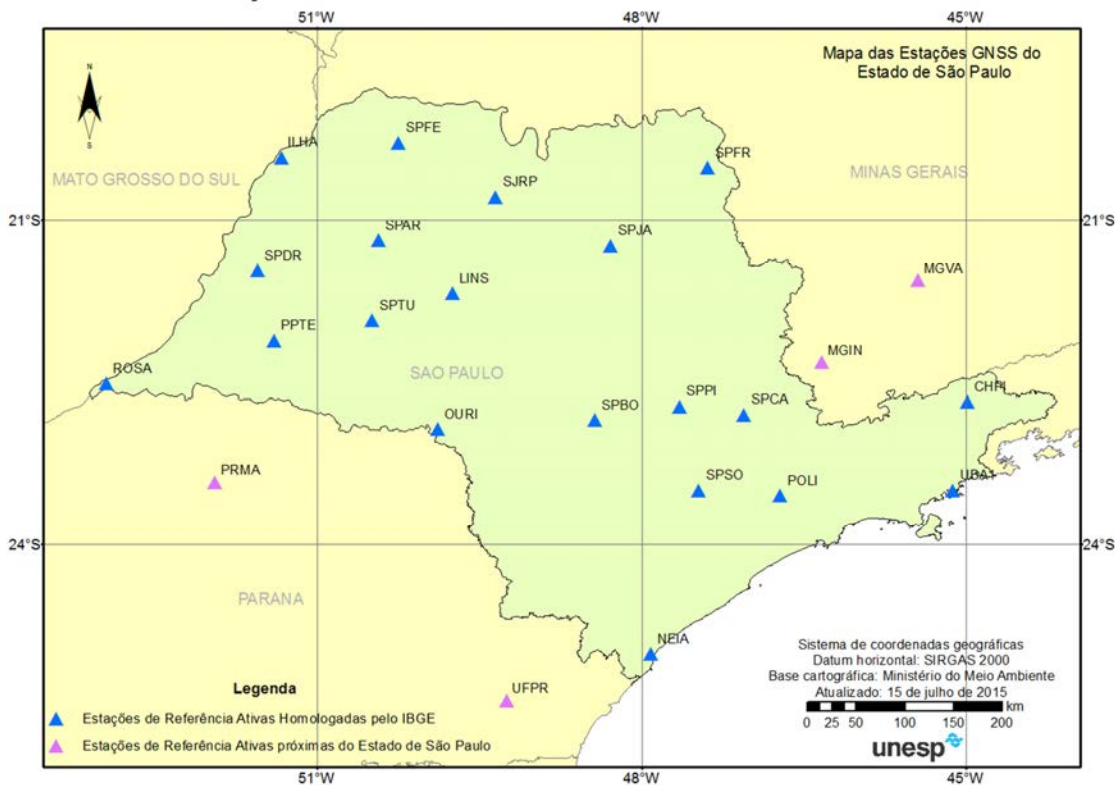
Fonte: IBGE, 2015b.

No contexto de rede regional pode-se citar a Rede GNSS-SP, na região sudeste do país. A Rede GNSS-SP apresenta uma densidade maior do que outras redes nas demais regiões do país, representando uma situação diferenciada na região equatorial e mesmo no

hemisfério sul. A Rede GNSS-SP apresenta boa configuração e densidade para a realização de vários experimentos na região sudeste, para propósitos operacionais e atua como suporte ao posicionamento geodésico e estudos atmosféricos. Trata-se de uma região com a rede GNSS ativa mais densa do País (GEGE, 2015).

A Rede GNSS-SP é mantida pela FCT/UNESP. Os receptores das estações possuem tecnologia que possibilita a sua conexão direta à Internet, e os dados coletados são enviados diretamente a um computador central, responsável pelo gerenciamento e armazenamento dos mesmos, bem como de sua conversão para o formato RINEX e *Hatanaka*, o qual é de uso geral. Em agosto de 2015, a Rede estava composta por 20 estações ativas, conforme mostra a figura 5, que apresenta a distribuição das estações da Rede GNSS-SP.

Figura 5 - Distribuição das estações da Rede GNSS-SP



Fonte: GEGE, 2015.

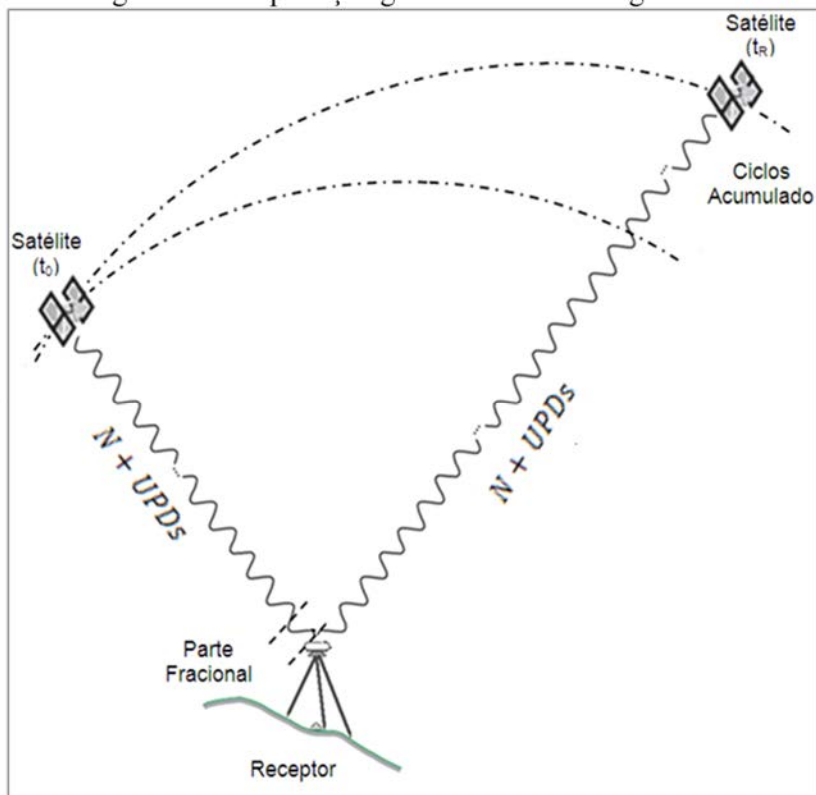
A Rede GNSS-SP encontra-se com grande parte de suas estações integradas a RBMC. Essas redes caracterizam a estrutura geodésica de referência mais precisa do país, cujas informações atendem tanto a comunidade científica quanto a prática.

3 SOLUÇÃO DE AMBIGUIDADES NO PPP

Conforme já citado, chama-se ambiguidade o termo N presente na equação da fase da onda portadora (equações (2) e (25)). Ela representa o número inteiro de ciclos entre o satélite e o receptor no instante da primeira observação. A problemática da solução de ambiguidades está relacionada com o início do posicionamento. Quando um receptor GNSS é ligado, ele calcula a diferença entre a fase emitida pelo satélite e sua réplica gerada no receptor, resultando em uma parte fracionária, e um contador de ciclos inteiros é inicializado. Durante o período de rastreamento, o contador é incrementado por um ciclo sempre que a fase fracionária muda de 2π para 0.

Em um determinado instante, a fase instantânea acumulada será a soma da parte fracionária medida com o número inteiro de ciclos contados desde o início do rastreamento. O problema então, é que o número de ciclos inteiros do instante da primeira observação é desconhecido (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2001). A interpretação geométrica da ambiguidade está ilustrada na figura 6.

Figura 6 - Interpretação geométrica das ambiguidades



Fonte: o autor (2015)

Na figura 6, nas ambiguidades estão incorporados os componentes não calibrados do atraso da fase originados no receptor e no satélite, conforme mostrado na equação (2) ($N + \text{UPDs}$). Algumas denominações para esses componentes foram dadas na literatura, como componentes de atrasos da fase não calibrados (BLEWITT, 1989) e em outro trabalho, seguindo a mesma denominação, foram citados com a sigla UPD (*uncalibrated phase delays*) (GE *et al.*, 2008). Também foi apresentada para os mesmos componentes a denominação de UHD (*uncalibrated hardware delays*) (GENG *et al.*, 2009).

3.1 Estado da Arte da solução da ambiguidade no PPP

Nesta seção é apresentado de forma resumida o estado da arte relacionado com a solução de ambiguidades GPS no PPP. De uma forma geral, pode-se dizer que o sistema GPS permite que qualquer pessoa possa se localizar no planeta com uma determinada precisão. O GPS pode ser usado em quaisquer condições meteorológicas satisfazendo as necessidades das forças militares, de modo a determinar a posição, velocidade e tempo em relação a um sistema de referência definido para qualquer ponto da Terra (MONICO, 2005).

Os receptores GPS capazes de trabalhar com dupla frequência atualmente podem proporcionar precisão da ordem de poucos milímetros na horizontal e vertical, dependendo do método de posicionamento utilizado. Como mencionado anteriormente, o método estudado nesta pesquisa é o PPP, que se utiliza apenas um receptor e as observáveis Pseudodistância e Fase da onda portadora.

Os primeiros trabalhos sobre o PPP foram apresentados no ano de 1997 (ZUMBERGE *et al.*, 1997) e a sua realização só se tornou possível com a disponibilização das efemérides precisas e os erros dos relógios dos satélites obtidos por meio do tratamento dos dados de uma rede global. O principal fornecedor desses produtos é o IGS, uma federação voluntária de mais de 200 agências em todo o mundo, empenhada em disponibilizar os dados e produtos da mais alta qualidade em apoio à pesquisa científica da Terra e aplicações multidisciplinares em benefício da sociedade (IGS, 2015).

A partir do ano de 2006, a solução de ambiguidades para uma simples estação passou a ser o alvo das investigações diretamente relacionadas com a obtenção de alta acurácia em pouco tempo de rastreamento. Estudos iniciais mostraram que os UPDs, que são *bias* da fase do satélite e do receptor, são absorvidos pelas ambiguidades e destroem sua característica de inteiro (BLEWITT, 1989). Desta forma, uma nova abordagem foi introduzida, com o objetivo de estimar

os UPDs a partir de uma rede de receptores GNSS. Um filtro foi desenvolvido para separar as ambiguidades e os UPDs. Experimentos foram realizados e os UPDs determinados para cada passagem do satélite (LEANDRO;SANTOS, 2006).

No mesmo ano, também utilizando o contexto de uma rede de estações, DD das ambiguidades foram formadas e posteriormente fixadas. Esse método se baseou no princípio da eliminação dos UPDs, a partir da DD das ambiguidades entre estações. O método foi aplicado para soluções de rede com dados de 24 horas (BLEWITT, 2006). Alguns anos depois, em 2010, essa metodologia foi testada com demonstrações de acurácia e tempo de processamento de dados para arquivos horários e janelas de 20 a 50 minutos, mostrando melhoria posicional com a solução de ambiguidades de conjuntos de dados de no mínimo 30 minutos (ALVES, 2010). No ano de 2008 foi desenvolvido um método baseado na estimação com antecedência dos UPDs dos satélites, dentro de uma rede de estações, para posterior solução de ambiguidades (GE *et al.*, 2008). Esse método foi aplicado para o PPP inicialmente para dados diários, e um pouco mais tarde, em 2010, para dados horários (GENG *et al.*, 2010). Nesse método as ambiguidades da combinação *ion-free* são decompostas em *Wide-Lane* e *Narrow-Lane* e aplica-se a SD entre satélites para remover os UPDs dependentes do receptor. Utilizando uma rede de estações de referência, os UPDs da WL (UPD_WL) são determinados por meio da combinação *Melbourne–Wübbena*. A partir das ambiguidades WL fixas, os UPDs da NL (UPD_NL) e seu respectivo desvio padrão são calculados com base na solução real da *ion-free* e o número inteiro de ambiguidades WL (GENG *et al.*, 2009; GENG *et al.*, 2011).

Laurichesse *et al.* (2008) fixaram as ambiguidades WL e NL diretamente para inteiro. Assim, um valor arbitrário teve que ser atribuído para o UPD de um receptor específico para obter o UPD do satélite. A determinação dos UPDs_WL foi realizada por meio da combinação *Melbourne–Wübbena*. Os UPDs_NL não foram estimados, mas assimilados nas estimativas dos relógios dos satélites. Para tal, as ambiguidades NL foram fixas como inteiros, antes de se estimar os erros dos relógios dos satélites por meio da Rede de referência GNSS.

Collins e Bisnath (2008) desenvolveram um modelo dissociado de relógio (*decoupled clock model*), caracterizado por relógios dos satélites diferentes para pseudodistância e fase da onda portadora. Da mesma forma que foi desenvolvido por Laurichesse *et al.* (2008), as ambiguidades NL foram fixadas para inteiros antes de estimar os erros dos relógios. Para um receptor de usuário, os relógios estimados foram usados para garantir as propriedades inteiras das ambiguidades NL.

No ano de 2010, o *software* científico GIPSY (*GPS Inferred Positioning System*) que até então só realizava PPP com solução de ambiguidades reais, teve implementado a solução de ambiguidades inteiras no PPP. A solução de ambiguidades do receptor do usuário foi realizada a partir de uma solução de Rede GNSS baseada no PPP, onde a partir da rede GNSS são estimados UPDs_WL dos satélites para fixação das ambiguidades WL e obtidas informações de *bias* da fase para fixação das ambiguidades NL por meio das DD (BERTIGER et al., 2010).

Os métodos citados diferem nos modelos utilizados, nas correções aplicadas e/ou nos métodos de estimação utilizados. Um ponto importante é que as abordagens referentes a cada método estão de acordo com as necessidades de aplicação, como por exemplo, para solução com dados diários, horários ou solução em curtos períodos, tentando-se alcançar a solução instantânea das ambiguidades.

A partir de ano de 2011, grande parte dos trabalhos referentes à solução de ambiguidades inteiras no PPP tratam da adaptação, melhorias e otimização dos métodos citados. Geng e Bock (2013) aperfeiçoaram o método de estimativas UPD utilizando Tripla frequência de dados GPS para rápida solução de ambiguidades no PPP. Li et al. (2014) apresentam um sistema de estimativa do vapor de água atmosférico por GPS em tempo real utilizando o modo PPP, com órbitas e relógios dos satélites em tempo real, e correções de UPD para solução das ambiguidades inteiras. Alguns estudos também foram realizados no sentido de realizar o comparativo entre alguns desses métodos, como Geng et al. (2010b); Shi e Gao (2013) e Teunissen e Khodabandeh (2015) que apresentaram os princípios, comparativo e comentários sobre os métodos de solução de ambiguidades inteiras no PPP. Os métodos de solução de ambiguidades inteiras no PPP são apresentados de forma mais detalhada a seguir.

3.2 Métodos de Solução de Ambiguidades inteiras no PPP

O processo de solução de ambiguidades, de uma forma geral, pode ser dividido em três etapas. Na primeira, as ambiguidades são estimadas, juntamente com os outros parâmetros, como números reais. Na segunda etapa, algum método é utilizado para estimar as ambiguidades inteiras e na terceira etapa uma solução melhorada é calculada com a influência da junção das ambiguidades inteiras sobre os outros parâmetros (DE JONGE;TIBERIUS, 1996). O processo de validação da solução encontrada é uma parte importante do processo de solução das ambiguidades e se insere na segunda etapa.

No processo de solução de ambiguidades, a menos que seja aplicada uma estratégia da natureza que recupere o número inteiro de comprimentos de onda (segunda etapa), as soluções dos parâmetros geodésicos são consideravelmente enfraquecidas por sua correlação com a ambiguidade envolvida na medida fase. O problema de solucionar essas ambiguidades é conhecido como solução de ambiguidades (*ambiguity resolution*) ou fixação das ambiguidades (*ambiguity fixing*) (BLEWITT, 1989).

Os algoritmos de solução de ambiguidades utilizam geralmente a DD de observáveis, que possibilita alcançar o número inteiro de ciclos das ambiguidades. Para o PPP, por se tratar de apenas um receptor, a DD de observáveis não pode ser realizada, o que dificulta o processo de solução das ambiguidades. O problema da fixação das ambiguidades no PPP é que as observáveis sem diferenciação ou a SD é naturalmente um valor não inteiro devido à presença dos componentes não calibrados do atraso da fase originados no satélite e receptor (BLEWITT, 1989). Conforme mostrado na equação (2), o termo de ambiguidade \bar{N}_r^s , é composto por:

$$\bar{N}_r^s = N_r^s + \Delta\phi_r - \Delta\phi^s \quad (44)$$

onde:

N_r^s é a ambiguidade inteira da fase da onda portadora;

$\Delta\phi_r$ é o UPD originado no receptor, assumido como sendo comum a todos os canais por satélite;

$\Delta\phi^s$ é o UPD originado no transmissor do satélite.

A equação (45) mostra a SD de ambiguidades ($\bar{N}_r^{s,j}$), para um receptor r e um par de satélites s e j , onde os componentes não calibrados do atraso da fase originados no receptor são cancelados, mas as ambiguidades ainda permanecem compostas pelos componentes originados no satélite.

$$\begin{aligned} \bar{N}_r^{s,j} &= (\bar{N}_r^s - \bar{N}_r^j) \\ \bar{N}_r^{s,j} &= (N_r^s + \Delta\phi_r - \Delta\phi^s) - (N_r^j + \Delta\phi_r - \Delta\phi^j) \\ \bar{N}_r^{s,j} &= (N_r^s - \Delta\phi^s) - (N_r^j - \Delta\phi^j) \\ \bar{N}_r^{s,j} &= N_r^{s,j} - \Delta\phi^s + \Delta\phi^j \end{aligned} \quad (45)$$

onde:

$N_r^{s,j}$ é a ambiguidade inteira da SD da fase da onda portadora

Estudos revelaram que a solução das ambiguidades em uma única estação é possível se os UPDs forem eliminados ou estimados com uma rede de estações (BLEWITT, 2006; BERTIGER *et al.*, 2010; GENG *et al.*, 2011).

As propriedades desses UPD não são exatamente conhecidas. Empiricamente, por meio da plotagem de combinação linear de dados, sabe-se que eles são estáveis no nível de um nanosegundo, mas como não são inteiros e difíceis de separar das ambiguidades, a sua presença impede a resolução dos ciclos inteiros da fase da onda portadora (BLEWITT, 1989). Gabor (1999) observou que eles mudavam sistematicamente com o tempo.

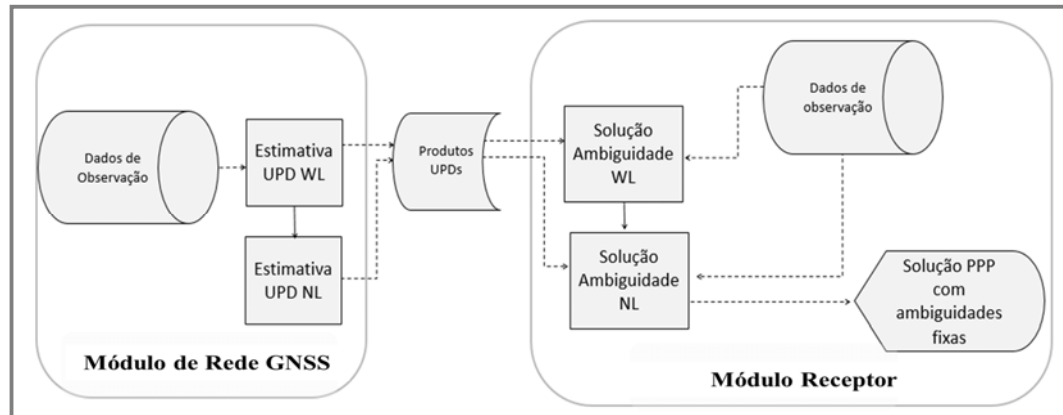
Também é importante ressaltar que algumas combinações lineares das observáveis GNSS têm papel importante na solução de ambiguidades. Nesse processo, é conveniente utilizar combinações que possuem comprimentos de onda maiores e com ruído baixo. Nesse sentido, na solução de ambiguidade no PPP a combinação linear da WL é bastante utilizada. A combinação linear de *Melbourne–Wübbena* (MELBOURNE, 1985; WÜBBENA, 1985) é um exemplo disso, envolve o código e a fase facilitando a solução de ambiguidade por meio da eliminação dos efeitos da ionosfera, relógio, troposfera e geometria.

Nos tópicos seguintes, são apresentados alguns métodos de solução de ambiguidades no PPP.

3.2.1 Método Baseado na Estimativa dos UPDs

O método baseado na Estimativa dos UPDs, apresentado por Ge *et al.* (2008), tem como base a estimativa precisa dos UPDs e a aplicação dos mesmos para posterior solução das ambiguidades de uma única estação. Essa estimativa é realizada por meio da SD de ambiguidades entre satélites, a partir de uma rede de referência global. O método consiste em dois módulos, contendo quatro etapas principais (figura 7). O Módulo da Rede contém a estimativa do UPD_WL e estimativa do UPD_NL. No módulo do Receptor os UPDs estimados são usados para recuperar a propriedade de inteiro das ambiguidades da *Wide-Lane* e *Narrow-Lane*.

Figura 7 – Esquema de Solução de Ambiguidades



Fonte: Ge *et al.* (2008).

Na realização do PPP com solução de ambiguidades no módulo de receptor, utiliza-se a combinação linear *ion-free* para remover os efeitos de primeira ordem da ionosfera:

$$\varphi_{IF_r}^s = (f_1^2 / (f_1^2 - f_2^2)) \varphi_{L1_r}^s - (f_1 f_2 / (f_1^2 - f_2^2)) \varphi_{L2_r}^s = \rho_r^s + \lambda_1 \bar{N}_{IF_r}^s \quad (46)$$

$$\bar{N}_{IF_r}^s = (f_1^2 / (f_1^2 - f_2^2)) \bar{N}_{1_r}^s - (f_1 f_2 / (f_1^2 - f_2^2)) \bar{N}_{2_r}^s \quad (47)$$

onde:

ρ_r^s representa os atrasos não dispersivos.

$\bar{N}_{IF_r}^s$ é a ambiguidade da *ion-free* contendo os UPDs

As ambiguidades da *ion-free* podem ser expressas como combinação linear *wide-lane* e *narrow-lane*:

$$\bar{N}_{IF_r}^s = (f_1 / (f_1 + f_2)) \bar{N}_{nr}^s + (f_1 f_2 / (f_1^2 - f_2^2)) \bar{N}_{wr}^s \quad (48)$$

Ge *et al.* (2008) propôs a utilização da SD de ambiguidades entre satélites para eliminar o UPD do receptor, conforme equação (45). Salienta-se que a SD entre satélites é realizada somente para as ambiguidades estimadas e não para as observáveis. Desta forma, a SD entre satélites é formada e define-se a *ion-free* das ambiguidades dessa combinação linear, considerando os UPDs.

$$\bar{N}_{IF_r}^{s,j} = (f_1 / (f_1 + f_2)) \bar{N}_{n_r}^{s,j} + (f_1 f_2 / (f_1^2 - f_2^2)) \bar{N}_{w_r}^{s,j} \quad (49)$$

$$\bar{N}_{IF_r}^{s,j} = \frac{f_1}{f_1 + f_2} (N_{n_r}^{s,j} + \Delta\phi_n^{s,j}) + \frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} (N_{w_r}^{s,j} + \Delta\phi_w^{s,j}) \quad (50)$$

onde:

$\Delta\phi_w^{s,j}$ é o UPD_WL da SD das ambiguidades (UPD_WL_SD);

$\Delta\phi_n^{s,j}$ é o UPD_NL da SD das ambiguidades (UPD_NL_SD).

As ambiguidades da WL e NL não podem ser estimadas e fixadas simultaneamente devido à deficiência de característica (deficiência de *rank*) do sistema de equações normais. A SD das ambiguidades da *ion-free* é fixada como inteira somente quando as ambiguidades WL e NL também são fixadas. A estimativa das ambiguidades da WL é realizada utilizando a combinação linear *Melbourne–Wübbena* (L_{MW}) envolvendo código e fase (MELBOURNE, 1985; WÜBBENA, 1985).

$$L_{w_r}^s = \frac{f_1}{f_1 - f_2} L_{1_r}^s - \frac{f_2}{f_1 - f_2} L_{2_r}^s$$

$$PD_{w_r}^s = \frac{f_1}{f_1 + f_2} PD_{1_r}^s + \frac{f_2}{f_1 + f_2} PD_{2_r}^s$$

$$\Downarrow$$

$$L_{MW_r}^s = (L_{w_r}^s - PD_{w_r}^s)$$

$$\bar{N}_{w_r}^s = L_{MW_r}^s / \lambda_w \quad (51)$$

onde $\lambda_w = \frac{c}{f_1 - f_2} \approx 86,2 \text{ cm}$

Desta forma, considerando cada época (k) com dados, ($\bar{N}_{w_r}^s(k_1), \bar{N}_{w_r}^s(k_2), \dots, \bar{N}_{w_r}^s(k_n)$), obtém-se a média de todas as épocas:

$$\hat{N}_{w_r}^s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{N}_{w_r}^s(k_i) \quad (52)$$

O desvio padrão de $\widehat{N}_{w_r}^s$ é dado por:

$$\sigma_{\widehat{N}_{w_r}^s} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{N}_{w_r}^s - \widehat{N}_{w_r}^s)^2}{n(n-1)}} \quad (53)$$

onde:

n é o número de observações.

A ambiguidade *float* WL ($\widehat{N}_{w_r}^s$) é composta pelas ambiguidades WL e UPDs do satélite s e receptor r . A estimativa e o desvio padrão da SD das ambiguidades WL podem ser calculados por meio da seguinte forma:

$$\widehat{N}_{w_r}^{s,j} = \widehat{N}_{w_r}^s - \widehat{N}_{w_r}^j \quad (54)$$

$$\sigma_{\widehat{N}_{w_r}^{s,j}} = \sqrt{\sigma_{\widehat{N}_{w_r}^s}^2 + \sigma_{\widehat{N}_{w_r}^j}^2} \quad (55)$$

Na SD das ambiguidades da WL, o UPD do receptor é eliminado, permanecendo o UPD correspondente aos satélites.

$$\widehat{N}_{w_r}^{s,j} = N_{w_r}^{s,j} + \Delta\phi_w^{s,j} \quad (56)$$

Cada UPD tem uma parte inteira e uma fracionária. Para recuperar a natureza inteira da SD das ambiguidades, somente a parte fracionária é crítica, considerando que a parte inteira é de qualquer maneira inseparável da parte inteira das ambiguidades (GE *et al.*, 2008).

Se o UPDWL ($\Delta\phi_w^{s,j}$) ou sua parte fracionária ($\delta\phi_w^{s,j}$) podem ser estimados, pode-se recuperar a característica natural de inteiro das SD das ambiguidades WL (GE *et al.*, 2008):

$$\widetilde{N}_{w_r}^{s,j} = \widehat{N}_{w_r}^{s,j} - \delta\phi_w^{s,j} \quad (57)$$

$$\sigma_{\widetilde{N}_{w_r}^{s,j}} = \sqrt{\sigma_{\widehat{N}_{w_r}^{s,j}}^2 + \sigma_{\delta\phi_w^{s,j}}^2} \quad (58)$$

A fixação da $\tilde{N}_{w_r}^{s,j}$ pode ser realizada por arredondamento para o inteiro mais próximo. Considerando a fixação das SD das ambiguidades WL, as SD das ambiguidades NL podem ser obtidas com a seguinte equação, desenvolvida a partir da equação (50) (GE *et al.*, 2008):

$$\begin{aligned} \hat{N}_{n_r}^{s,j} = N_{n_r}^{s,j} + \Delta\phi_n^{s,j} + \frac{f_2}{f_1-f_2} \left(N_{w_r}^{s,j} - \tilde{N}_{w_r}^{s,j} + \Delta\phi_w^{s,j} \right) = \\ \frac{f_1+f_2}{f_1} \hat{N}_{IF_r}^{s,j} - \frac{f_2}{f_1-f_2} \tilde{N}_{w_r}^{s,j} \end{aligned} \quad (59)$$

O respectivo desvio padrão é dado por:

$$\sigma_{\hat{N}_{n_r}^{s,j}} = \frac{f_1+f_2}{f_1} \sigma_{\hat{N}_{IF_r}^{s,j}} \quad (60)$$

onde:

$\tilde{N}_{w_r}^{s,j}$ é o valor inteiro fixo da WL;

$\hat{N}_{IF_r}^{s,j}, \sigma_{\hat{N}_{IF_r}^{s,j}}$ é a solução de valor real da *ion-free* das ambiguidades.

A diferença entre $N_{w_r}^{s,j}$ e $\tilde{N}_{w_r}^{s,j}$ é causada principalmente pelo ruído da pseudodistância e a parte inteira $\Delta\phi_w^{s,j}$. Consequentemente o termo $\frac{f_2}{f_1-f_2} \left(N_{w_r}^{s,j} - \tilde{N}_{w_r}^{s,j} + \Delta\phi_w^{s,j} \right)$ é constante para um par de satélites e pode ser incorporado dentro do UPD_NL. Essa incorporação é um fator que pode explicar a instabilidade do UPD_NL. Por meio da equação (59) verifica-se que o bom resultado na fixação das ambiguidades NL é dependente da estimativa das ambiguidades WL e consequentemente da qualidade da pseudodistância (GE *et al.*, 2008).

Desta forma, o UPD_NL da simples diferença das ambiguidades é dado por:

$$\overline{\Delta\phi_n^{s,j}} = \Delta\phi_n^{s,j} + \frac{f_2}{f_1-f_2} \left(N_{w_r}^{s,j} - \tilde{N}_{w_r}^{s,j} + \Delta\phi_w^{s,j} \right) \quad (61)$$

As SD das ambiguidades NL podem recuperar sua característica de inteiro, se o UPD_NL ($\overline{\Delta\phi_n^{s,j}}$) for estimado com precisão, conforme segue:

$$\widehat{N}_{n_r}^{s,j} = N_{n_r}^{s,j} + \overline{\Delta\phi_n}^{s,j} \quad (62)$$

$$\widetilde{N}_{n_r}^{s,j} = \widehat{N}_{n_r}^{s,j} - \overline{\Delta\phi_n}^{s,j} \quad (63)$$

$$\sigma_{\widetilde{N}_{n_r}^{s,j}} = \sqrt{\sigma_{N_{n_r}^{s,j}}^2 + \sigma_{\overline{\Delta\phi_n}^{s,j}}^2} \quad (64)$$

A fixação da $\widetilde{N}_{n_r}^{s,j}$ pode ser realizada por arredondamento para o inteiro mais próximo. Se a estimativa do UPD_WL é tendenciosa, o que é inevitável porque as partes inteiras UPD não são separáveis das ambiguidades, os valores fixos para todas as ambiguidades dos mesmos pares de satélites serão “contaminados” por um valor inteiro comum. Tal desvio comum nas ambiguidades da WL irá resultar em uma mudança constante nas suas respectivas ambiguidades NL e pode ser absorvido pelos UPDs_NL. Portanto, para fixação das ambiguidades o conhecimento das partes fracionárias UPD é suficiente (GE *et al.*, 2008).

Então, depois de estimados, os UPDs devem ser aplicados como correções para a SD de ambiguidades WL e NL, passando estas a ter uma característica inteira, podendo, portanto, ser fixada com valores inteiros de forma semelhante à DD de ambiguidades (GE *et al.*, 2008). Após a fixação das ambiguidades WL e NL, as ambiguidades *ion-free* (equação (49)) podem ser fixadas e inseridas no ajustamento como injunção.

3.2.1.1 Estimativa dos UPDs

A estimativa dos UPDs é realizada a partir do processamento de dados de uma rede GNSS. O UPD_WL para o par de satélites (s,j) a partir de n estações, pode ser calculado através da média das partes fracionárias de todas as SD WL das ambiguidades envolvidas dentro de uma rede GNSS. Isso significa que teoricamente, para cada estação da rede, terá pelo menos uma simples diferença para um determinado par de satélites. Desta forma, o UPD_WL($\delta\phi_w^{s,j}$) e seu desvio padrão ($\sigma_{\delta\phi_w^{s,j}}$) é determinado por (GE *et al.*, 2008):

$$\delta\phi_w^{s,j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\text{frac} \left(\widehat{N}_{w_i}^s - \widehat{N}_{w_i}^j \right) \right] \quad (65)$$

$$\sigma_{\delta\phi_w^{s,j}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left\{ \left[\text{frac} \left(\widehat{N}_{w_i}^s - \widehat{N}_{w_i}^j \right) \right] - \delta\phi_w^{s,j} \right\}^2}{n(n-1)}} \quad (66)$$

onde:

n é o número de ambiguidades para a estimativa do UPD_WL para o par de satélites (s,j) , com relação a todas as estações envolvidas;

$frac()$ é uma função que retorna a parte fracional positiva das variáveis de entrada.

Depois de estimados os UPDs_WL inicia-se o processo para se obter as ambiguidades WL fixas $(\tilde{N}_{wr}^{s,j})$, conforme equação (57).

Somente depois de estimados os UPDs_WL e tendo-se obtido $\tilde{N}_{wr}^{s,j}$, é que os UPDs_NL podem ser estimados. Para o par de satélites (s,j) a partir de n estações, pode-se calcular o UPD_NL $(\widehat{\Delta\phi}_n^{s,j})$ e seu desvio padrão $(\sigma_{\widehat{\Delta\phi}_n^{s,j}})$ da seguinte forma:

$$\widehat{\Delta\phi}_n^{s,j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[frac \left(\widehat{N}_{n_i}^{s,j} \right) \right] \quad (67)$$

$$\sigma_{\widehat{\Delta\phi}_n^{s,j}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left\{ \left[frac \left(\widehat{N}_{n_i}^{s,j} \right) \right] - \widehat{\Delta\phi}_n^{s,j} \right\}^2}{n(n-1)}} \quad (68)$$

onde:

$\widehat{N}_{n_i}^{s,j}$ é estimado conforme equação (59).

Quanto maior o número de estações envolvidas, melhor será a precisão do UPD. Com relação ao intervalo de tempo de dados utilizados para as estimativas, Ge *et al.* (2008), ao apresentar este método, estimou para cada par de satélites os UPDs_WL com 24 horas de dados. Por serem menos estáveis, os UPDs_NL foram estimados a cada 15 minutos, o que foi suficientemente preciso, a nível de usuário, para a solução das ambiguidades do PPP com 24 horas de dados. Geng *et al.* (2009) utilizou este mesmo método estimando os UPDs_NL a cada 12 horas, obtendo precisão adequada para solução das ambiguidades PPP com dados horários. Para aplicações em tempo real, segundo Geng *et al.* (2011), independente do período utilizado para estimar os UPDs_NL, os mesmos após estabilizarem devem ser atualizados a cada 5 s, por exemplo, devido à variação relativamente rápida da estimativa UPD_NL durante as fases iniciais.

3.2.2 Método Baseado na Dupla Diferença das Ambiguidades

A DD de observáveis é uma combinação linear muito utilizada no posicionamento relativo. No processo de diferenciação ocorre a eliminação de alguns erros que envolvem as observáveis e as ambiguidades são teoricamente números inteiros.

No PPP, como se utiliza apenas um receptor, a DD de observáveis não é possível de ser realizada. Ao combinar as soluções de PPP em simultâneas estações observadas, a DD de ambiguidades podem ser definidas e fixadas de forma semelhante como acontece para uma solução de rede (ZUMBERGE *et al.*, 1997).

A DD de ambiguidades entre dois receptores (r, l) e dois satélites (s, j) é dada por (BLEWITT, 1989):

$$\begin{aligned}\bar{N}_{r,l}^{s,j} &= (\bar{N}_r^s - \bar{N}_r^j) - (\bar{N}_l^s - \bar{N}_l^j) \\ \bar{N}_{r,l}^{s,j} &= (N_r^s + \Delta\phi_r - \Delta\phi^s) - (N_r^j + \Delta\phi_r - \Delta\phi^j) - (N_l^s + \Delta\phi_l - \Delta\phi^s) + (N_l^j + \Delta\phi_l - \Delta\phi^j) \\ \bar{N}_{r,l}^{s,j} &= (N_r^s - N_r^j) - (N_l^s - N_l^j) \\ \bar{N}_{r,l}^{s,j} &= N_{r,l}^{s,j}\end{aligned}\quad (69)$$

Blewitt (1989) apresentou um método para solução de ambiguidades baseado na eliminação dos UPDs por meio da DD de ambiguidades. Nesse método, a DD envolve o receptor local e um receptor dentro de uma rede GNSS, ambos coletando dados simultaneamente para os mesmos satélites. Para se remover os efeitos de primeira ordem da ionosfera a combinação linear *ion-free* é utilizada e as ambiguidades expressas em função da WL e NL em formato de DD, de forma similar a equação (48):

$$\bar{N}_{IFR,l}^{s,j} = (f_1 / (f_1 + f_2)) \bar{N}_{nr,l}^{s,j} + (f_1 f_2 / (f_1^2 - f_2^2)) \bar{N}_{wr,l}^{s,j} \quad (70)$$

onde:

$\bar{N}_{nr,l}^{s,j} = \bar{N}_{nr}^s - \bar{N}_{nr}^j - (\bar{N}_{nl}^s - \bar{N}_{nl}^j)$ e $\bar{N}_{wr,l}^{s,j} = \bar{N}_{wr}^s - \bar{N}_{wr}^j - (\bar{N}_{wl}^s - \bar{N}_{wl}^j)$ representam as ambiguidades da DD NL e WL, respectivamente.

A DD das ambiguidades da *ion-free* é fixada somente quando as ambiguidades WL e NL são fixadas. As ambiguidades da WL para um determinado satélite e receptor ($\hat{N}_{w_r}^s$) são estimadas utilizando a combinação linear L_{MW} conforme equações (51) a (53).

A estimativa e o desvio padrão da DD das ambiguidades WL podem ser calculadas posteriormente e fixadas para inteiro (BLEWITT, 1989).

$$\hat{N}_{w_r,l}^{s,j} = \hat{N}_{w_r}^s - \hat{N}_{w_r}^j - (\hat{N}_{w_l}^s - \hat{N}_{w_l}^j) \quad (71)$$

$$\sigma_{\hat{N}_{w_r,l}^{s,j}} = \sqrt{\sigma^2_{\hat{N}_{w_r}^s} + \sigma^2_{\hat{N}_{w_r}^j} + \sigma^2_{\hat{N}_{w_l}^s} + \sigma^2_{\hat{N}_{w_l}^j}} \quad (72)$$

A NL pode ser derivada de acordo com a formulação abaixo e fixada, conforme como acontece com a WL.

$$\hat{N}_{n_r,l}^{s,j} = \frac{f_1+f_2}{f_1} \hat{N}_{IFr,l}^{s,j} - \frac{f_2}{f_1+f_2} \tilde{N}_{w_r,l}^{s,j} \quad (73)$$

$$\sigma_{\hat{N}_{n_r,l}^{s,j}} = \frac{f_1+f_2}{f_1} \sigma_{\hat{N}_{IFr,l}^{s,j}} \quad (74)$$

onde:

$\tilde{N}_{w_r,l}^{s,j}$ é o valor fixo da DD da ambiguidade WL;

$\hat{N}_{IFr,l}^{s,j}, \sigma_{\hat{N}_{IFr,l}^{s,j}}$ é a solução de valor real da DD da *ion-free* das ambiguidades.

Após a fixação das ambiguidades da WL ($\tilde{N}_{w_r,l}^{s,j}$) e NL ($\tilde{N}_{n_r,l}^{s,j}$), o inteiro das ambiguidades IF pode ser recuperado por meio da equação (70) e inserida no ajustamento como conhecida dentro do sistema de equações normais com DD de ambiguidades, ou como restrição imposta para o sistema de equações normais com ambiguidades sem diferenciação (GE *et al.*, 2005).

O método da DD de ambiguidades descrito, foi implementado no *software* científico GIPSY, com algumas alterações, e se encontra operacional em modo pós-processado a partir da versão 6.0 (<https://gipsy-oasis.jpl.nasa.gov/> - Acesso em: 05 jan. de 2013). O PPP é realizado com o módulo gd2p.pl (GPS Data 2Position) e é necessária a utilização das efemérides precisas JPL (ftp://sideshow.jpl.nasa.gov/pub/JPL_GPS_Products - Acesso em: 05 jan. de 2015).

3.2.3 Método Baseado na Dissociação dos Relógios

Ao contrário do modelo convencional do PPP, no qual se utiliza o erro do relógio do satélite estimado a partir do código, tanto para as observações de fase quanto para o código, o método baseado na dissociação dos relógios considera os erros dos relógios do satélite do código e da fase separadamente. Esse método foi proposto por Collins e Bisnath (2008) e é chamado de modelo dissociado do relógio (*decoupled clock model*).

As formulações apresentadas a seguir foram adaptadas a partir de Collins e Bisnath (2008). Desta forma, as equações da observável *ion-free*, em metros, da pseudodistância e fase da onda portadora, apresentadas nas equações (24) e (25), passam a ser da seguinte forma:

$$PD_{rIF}^s = \rho_r^s + c[dt_{r(PDIF)} - dt^s_{(PDIF)}] + T_r^s + \varepsilon_{PDIF_r}^s \quad (75)$$

$$\lambda_{IF} \varphi_{IF_r}^s = \rho_r^s + c[dt_{r(\phi IF)} - dt^s_{(\phi IF)}] + \lambda_{IF} N_{rIF}^s + T_r^s + \varepsilon_{\phi IF_r}^s \quad (76)$$

onde:

$N_{IF_r}^s$ é expressa em função das ambiguidades WL e NL de forma similar a Eq. (48); $dt_{r(PDIF)} = dt_r + \Delta\phi_{r(PDIF)}$ é o erro do relógio do receptor acrescido do UPD do receptor da observável *ion-free* da pseudodistância; $dt^s_{(PDIF)} = dt^s + \Delta\phi^s_{(PDIF)}$ é o erro do relógio do satélite acrescido do UPD do satélite da observável *ion-free* da pseudodistância; $dt_{r(\phi IF)} = dt_r + \Delta\phi_{r(\phi IF)}$ é o erro do relógio do receptor acrescido do UPD do receptor da observável *ion-free* da fase; $dt^s_{(\phi IF)} = dt^s + \Delta\phi^s_{(\phi IF)}$ é o erro do relógio do satélite acrescido do UPD do satélite da observável *ion-free* da fase.

Similar a equação (44), a ambiguidade da WL acrescida dos UPDs_WL do satélite e receptor é dada por:

$$\bar{N}_{w_r}^s = N_{w_r}^s + \Delta\phi_{w_r} - \Delta\phi_w^s \quad (77)$$

onde:

$N_{w_r}^s$ é a ambiguidade inteira da WL;

$\Delta\phi_{w_r}$ é o UPD_WL do receptor;

$\Delta\phi_w^s$ é o UPD_WL do satélite.

As equações (75), (76) e (77) consistem no modelo dissociado dos relógios. Os termos $dt_{r(PDIF)}$, $dt_{r(\phi IF)}$, $\Delta\phi_{w_r}$, $dt^s_{(PDIF)}$, $dt^s_{(\phi IF)}$, $\Delta\phi_w^s$, são chamados de parâmetros dissociados dos relógios.

Se todos os parâmetros, ou seja, as coordenadas, os termos dissociados dos relógios, o atraso troposférico, e as ambiguidades inteiras fossem estimados utilizando os três equações do modelo (75,76 e 77), o número de parâmetros desconhecidos seria maior do que o número de observações, resultando numa solução singular. Além disso, não se teria como estimar ou eliminar os parâmetros dissociados dos relógios do receptor sem realizar a SD entre satélites. A solução desses problemas é fixar um número mínimo de parâmetros (chamado neste método de *datum* ou parâmetro de referência).

Primeiro escolhe-se um receptor de referência e define-se um *datum* do relógio para a rede, atribuindo zero aos parâmetros dissociados dos relógios do receptor $dt_{r(PDIF)}$, $dt_{r(\phi IF)}$ e $\Delta\phi_{wr}$.

Em seguida, as ambiguidades N_n e N_w de todos os satélites observados no receptor são arbitradas para valores inteiros. Isso define o *datum* das ambiguidades para o receptor de referência.

Na terceira etapa, adiciona-se um receptor na rede (não o de referência) e escolhe-se um satélite de referência para este receptor. As ambiguidades N_n e N_w do satélite de referência são determinadas como inteiros arbitrários. Neste caso, as outras ambiguidades desse receptor são estimadas com respeito às ambiguidades do satélite de referência escolhido. Isso define o *datum* das ambiguidades para o receptor adicionado na rede.

A terceira etapa é repetida para todos os outros receptores que não sejam o de referência na rede. Deve notar-se que o satélite referência selecionado para o receptor na terceira etapa pode ser diferente para os demais. Em outras palavras, cada receptor tem o seu próprio *datum* das ambiguidades.

Ao realizar os procedimentos acima para definir o *datum* do relógio e da ambiguidade na rede, podem-se resolver os problemas referentes aos parâmetros dissociados do relógio do receptor e à singularidade nos sistema das equações (75) a (77). Para a solução em rede, são estimados as 3 coordenadas, o atraso troposférico e os 3 parâmetros dissociados dos relógios dos satélites.

Para o usuário, é necessário dispor de uma rede GNSS que forneça os parâmetros dissociados dos relógios dos satélites $dt^s_{(PDIF)}$, $dt^s_{(\phi IF)}$ e $\Delta\phi_w^s$.

O *datum* do relógio definido para o receptor de referência pode ser mantido, o que significa que não se requer *datum* adicional do relógio para a solução do usuário. No entanto, um *datum* de ambiguidade deve ser definido pela escolha de um satélite de referência e

as ambiguidades N_n e N_w desse satélite definidas para valores inteiros arbitrários. O satélite de referência da solução do usuário pode diferir daquele escolhido na solução de rede.

Ao aplicar os parâmetros dissociados dos relógios dos satélites e definir-se o *datum* da ambiguidade, os parâmetros desconhecidos podem ser estimados. Mais especificamente, as ambiguidades inteiras N_w e N_n podem ser diretamente estimadas no modelo.

3.2.4 Método Baseado na Recuperação dos Relógios

O método baseado na Recuperação dos Relógios da Fase (*Integer phase clock model*) foi proposto por Laurichesse et al. (2008). Esse método é baseado nas equações da *ion-free* e WL conforme equações (75), (76) e (77).

As ambiguidades N_w da equação (77) são estimadas por meio da combinação linear *Melbourne–Wübbena*. Similar ao método de dissociação dos relógios, um receptor é selecionado como de referência e seu UPD_WL ($\Delta\phi_{w,r}$) é definido como sendo, por exemplo, nulo. O valor inteiro da ambiguidade N_w é calculado por arredondamento para o inteiro mais próximo para cada satélite e a parte fracionária restante é atribuída ao UPD_WL do satélite ($\Delta\phi_w^s$). Os UPDs_WL dos satélites são usados para calcular os UPD_WL do receptor ($\Delta\phi_{w,r}$) na solução de rede. Um conjunto de UPD_WL dos satélites é determinado e enviado para o usuário. Tendo-se as ambiguidades WL fixadas para cada receptor, as ambiguidades NL são fixadas para a rede e os relógios com propriedade inteira são gerados, conforme apresentado a seguir (LAURICHESSE et al., 2008):

Primeiro, o mesmo receptor de referência selecionado na etapa de estimativa da WL é utilizado e o erro relógio deste receptor ($cdt_{r(\phi F)}$) é fixado como zero, por exemplo. Depois, o *datum* de ambiguidade do receptor de referência é definido determinando-se todas as ambiguidades NL dos satélites observados para valores arbitrários inteiros. Salienta-se que N_{IF} , na Eq.(76), é expressa em função das ambiguidades N_w e N_n . No terceiro passo, as estimativas iniciais de relógios inteiros dos satélites observados $cdt_{(\phi F)}^s$ podem ser derivados como parte fracional da diferença entre N_n e todos os outros temos já estimados na Eq.(76).

Quarto, um novo receptor é adicionado e tendo-se as estimativas iniciais dos relógios dos satélites obtidos no terceiro passo, a diferença entre essas estimativas $cdt_{(\phi F)}^s$ e os outros temos estimados na Eq.(76) para esse receptor, pode ser calculada. Aplicando

arredondamento para o inteiro mais próximo, a parte inteira dessa diferença é atribuída às ambiguidades N_n e a parte fracional para o erro relógio do receptor $cdt_{r(\phi F)}$. Além disso, os $cdt^s_{(\phi F)}$ para os satélites que não foram observados na terceira etapa podem ser obtidos uma vez que o inteiro das ambiguidades N_n e o $cdt_{r(\phi F)}$ são conhecidos. Na quinta etapa outro receptor é adicionado e a quarta etapa repetida até que o conjunto completo de $cdt^s_{(\phi F)}$ com característica inteira seja obtido e possam ser disseminados para o usuário (LAURICHESSE et al., 2008).

Para a solução do usuário, as correções requeridas são UPD_WL do satélite, erro dos relógios dos satélites IGS para o código $cdt^s_{(PDF)}$ e erro dos relógios dos satélites com característica inteira para a fase $cdt^s_{(\phi F)}$. Primeiro aplica-se os UPDs_WL dos satélites nas ambiguidades WL. Como o UPD_WL do receptor é comum para todos os satélites, o mesmo é obtido por meio da média da parte fracionária das ambiguidades WL de todos os satélites. Desta forma, as ambiguidades WL podem ser fixadas. Juntamente com as coordenadas do usuário, o erro do relógio do receptor ($cdt_{r(\phi F)}$), o atraso troposférico e o inteiro das ambiguidades N_n podem ser diretamente estimados (LAURICHESSE et al., 2008).

3.3 Validação do inteiro das ambiguidades

Dentro do processo de solução de ambiguidades uma etapa importante é a validação da solução inteira. Essa etapa é tão importante quanto à etapa da estimação, pois mesmo quando se utiliza um estimador ótimo pode-se obter uma solução incorreta.

No geral, para uma ambiguidade real estimada com baixo desvio padrão, é muito provável que o valor inteiro mais próximo seja o correto. Porém, utilizar somente a estratégia de arredondamento para o inteiro mais próximo é uma estratégia de alto risco. Isso pode degradar a solução geodésica se houver uma chance significativa da ambiguidade ser fixada para um valor incorreto (BLEWITT, 1990).

Para um valor real estimado de ambiguidades, define-se para seu valor inteiro mais próximo uma região de decisão de arredondamento bidimensional como uma função de proximidade e incerteza (P_0). O procedimento de arredondamento é baseado na premissa de que o valor real estimado de uma ambiguidade está próximo ao inteiro e tem baixo desvio padrão. Desta forma, existe uma alta probabilidade de que aquele inteiro seja o correto,

podendo ser fixado com alta confiança, ou seja, se o nível de confiança dessas determinações é suficientemente alto, as ambiguidades podem ser fixas para o inteiro (DONG e BOCK, 1989).

Para se definir um critério de arredondamento para solução de ambiguidades, considera-se \hat{N} o valor real estimado, σ seu desvio padrão, \tilde{N} o valor inteiro mais próximo de \hat{N} e P_0 igual a (AGNEW, personal communication, 1988 citado por DONG e BOCK, 1989):

$$P_0 = 1 - \sum_{i=1}^{\infty} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{i - |\hat{N} - \tilde{N}|}{\sqrt{2}\sigma} \right) - \operatorname{erfc} \left(\frac{i + |\hat{N} - \tilde{N}|}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right] \quad (78)$$

onde:

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt.$$

O seguinte teste de hipótese é estabelecido:

- H0: o valor verdadeiro de N é diferente de 0 (a ambiguidade estimada é outro inteiro, não o mais próximo);
- H1: o valor verdadeiro de N é igual a 0 (a ambiguidade estimada pode ser arredonda para o inteiro mais próximo e não para algum outro inteiro).

Assim sendo, podem-se ter dois erros possíveis:

Erro do tipo 1: é aquele onde Ho é verdadeiro, mas escolhe-se H1. Este é um erro sério, uma vez que a ambiguidade estimada é arredondada incorretamente para o inteiro mais próximo.

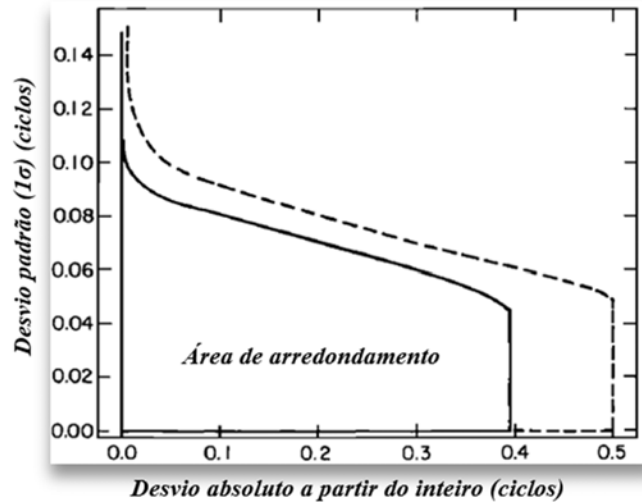
Erro do tipo 2: é aquele onde H1 é verdadeiro, mas escolhe-se Ho. Este é um erro menos prejudicial, uma vez que, neste caso, nunca se arredonda uma ambiguidade para um inteiro qualquer que não o mais próximo. Na prática, deixa-se a ambiguidade com seu valor real estimado. A única consequência negativa é que a solução dos parâmetros ajustados será menos precisa do que se o valor do inteiro mais próximo fosse escolhido.

Para um dado nível de significância (α), geralmente 0,1%, a ambiguidade só pode ser fixada para o seu inteiro mais próximo com o critério de arredondamento de P_0 maior que $1 - \alpha$. Se qualquer ambiguidade não puder ser fixada com confiança para o inteiro, seu valor continua a ser real.

A figura 8 mostra a região de decisão de arredondamento para a solução de ambiguidade. O tamanho dessa região é determinado tal que se um valor real de ambiguidade

cair nessa região existe uma alta probabilidade (maior que 99,9%) de que o inteiro mais próximo seja o valor verdadeiro de ambiguidade (DONG e BOCK, 1989).

Figura 8 - Região de decisão de arredondamento para a solução de ambiguidade



Fonte: (DONG eBOCK, 1989).

Na figura 8, se um valor estimado de ambiguidade real cair na região coberta pela linha sólida, ele será arredondado para o inteiro mais próximo. Se ele cair fora dessa região, permanecerá real. A região coberta pela linha tracejada é a região na qual a probabilidade de incorrer no erro de tipo 1 é menor que 0,1% e a probabilidade de incorrer no erro de tipo 2 é minimizada. A validação da solução inteira utilizando o critério de arredondamento considera que se uma estimativa de ambiguidade real está próxima a um inteiro e tem uma alta precisão, este inteiro é aparentemente o valor correto.

A fixação das ambiguidades também pode ser realizada pelo método LAMBDA (*Least-squares AMBiguity Decorrelation Adjustment*), desenvolvido por Teunissen (1993). O método consiste em transformar valores de ambiguidades reais, altamente correlacionadas, em valores de ambiguidades reais com menor correlação a partir da transformação Z. A decorrelação das ambiguidades reais é um passo essencial, de tal modo que as estimativas do número inteiro podem ser calculadas de forma muito rápida e eficiente. Dessa maneira, o número de candidatos é reduzido consideravelmente e o espaço de procura que é altamente alongado é transformado em espaço tipo esfera com o mesmo volume, o que permite a identificação eficiente das ambiguidades inteiras. O método é uma extensão rígida dos mínimos quadrados padrão para o domínio inteiro, conforme segue (JOOSTEN e TIBERIUS, 2002):

$$(\hat{N} - \check{N})^T Q_{\hat{N}}^{-1} (\hat{N} - \check{N}) = \text{Mínimo} \quad (79)$$

onde:

\hat{N} é vetor m-dimensional de ambiguidades reais estimadas;

\check{N} é o correspondente vetor inteiro;

$Q_{\hat{N}}^{-1}$ é aMVC de \hat{N} .

A equação (79) tem que ser resolvida através de uma pesquisa. Entretanto, esta busca não é uma tarefa fácil porque ele é feita ao longo de todo o espaço m-dimensional dos inteiros. No sentido de simplificar este problema, o espaço dos inteiros completo precisa ser substituído por um conjunto de inteiros menores, o que é então chamado de espaço de busca da ambiguidade. Este espaço está localizado em \hat{N} e sua forma e orientação são governadas por $Q_{\hat{N}}$. É nesse espaço local que a busca da solução dos mínimos quadrados inteiros é realizada. Teunissen (1994) definiu o espaço de busca das ambiguidades como um conjunto de pontos de grade N que satisfaça:

$$(\hat{N} - \check{N})^T Q_{\hat{N}}^{-1} (\hat{N} - \check{N}) \leq X^2 \quad (80)$$

Na equação (80), a constante X^2 garante que o espaço de busca contenha o candidato correto a inteiro. Vale enfatizar que o volume de um espaço de busca de ambiguidade é governado por ambos: X^2 e $Q_{\hat{N}}$. Devido à alta correlação entre as ambiguidades estimadas reais num cenário de período de observação muito curto, o espaço de busca resultante é normalmente severamente alongado e forçado sobre uma faixa considerável de ciclos e conseqüentemente, uma busca em tal espaço é extremamente ineficiente (JOOSTEN e TIBERIUS, 2002). Desta forma, Teunissen (1994) propôs uma matriz inteira Z invisível de volume preservado para transformar o espaço de busca original em um espaço em forma de esfera, conforme segue:

$$\hat{N}' = Z\hat{N}, \check{N}' = Z\check{N}, Q_{\hat{N}'} = ZQ_{\hat{N}}Z^T \quad (81)$$

Conforme mostra equação (80), a busca é realizada nesse espaço transformado e os resultados são finalmente transformados de volta. Esta transformação pode ser reconhecida com a descorrelação da ambiguidade estimada após a qual a matriz $Q_{\hat{N}}$

correspondente torna-se mais diagonal. Note que Z transforma somente a forma e a orientação do espaço de busca da ambiguidade e não seu volume (DE JONGE; TIBERIUS 1996).

Os números inteiros identificados pelo método LAMBDA devem ser validados antes de serem aceitos como valores corretos. Os testes de discriminação neste caso podem ser usados para inferir se a solução encontrada pode ser aceita ou não.

Os testes de discriminação visam comparar a probabilidade da solução fixa que foi considerada correta com outros conjuntos de solução dos vetores de ambiguidades inteiras. Se o teste for aceito então o vetor das ambiguidades tem a mais alta probabilidade entre todos os candidatos de ser o correto (MONICO, 2008).

Um dos primeiros e mais famoso método de discriminação é teste *Ratio (ratio test)*, o qual é definido pela razão entre a norma ao quadrado do segundo melhor e o melhor vetor de resíduos das ambiguidades (SOUZA;MONICO, 2005).

O teste *Ratio* é dado por:

$$\frac{\|\hat{N} - \check{N}_2\|_{\Sigma_{\hat{N}}}^2}{\|\hat{N} - \check{N}_1\|_{\Sigma_{\hat{N}}}^2} = \frac{R_2}{R_1} \geq c \quad (82)$$

onde:

- R_2 e R_1 são usados para representar, respectivamente, a forma quadrática dos resíduos do vetor das ambiguidades \check{N}_2 e \check{N}_1 ;
- C representa um valor crítico ($c > 1$) que pode ser definido empiricamente;

A validação baseada no teste *Ratio* geralmente é satisfatória. Isto ocorre, pois a estocasticidade de \check{N} pode realmente ser negligenciada se existe probabilidade suficiente de que a solução seja correta, ou seja, se a taxa de sucesso é muito próxima de 1. Logo, valores críticos determinados empiricamente podem expressar bons resultados, tanto que em muitos *softwares* o valor empírico $c = 3$ é utilizado (SOUZA;MONICO, 2005).

3.4 Contribuições referentes ao método proposto na Tese

Conforme objetivo da pesquisa, os métodos de solução de ambiguidades foram investigados e uma metodologia selecionada para ser adaptada, melhorada, implementada e testada nesta tese. Para tal, foram propostas adaptações e desenvolvimento de rotinas no *software* RT_PPP de forma que ele possa realizar o PPP com solução de ambiguidades inteiras. Dentre os métodos de solução de ambiguidades inteiras apresentados na seção 3.2, o método de estimativa dos UPDs é o mais compatível para ser implementado no *software* RT_PPP. Com modificações nem tanto significativas em termos de estrutura no *software* RT_PPP, o mesmo pode incorporar a solução com ambiguidades inteiras. Desta forma, o método de estimativas dos UPDs é o proposto nesta tese.

Com base no exposto, é notório que os UPDs são elementos essenciais para alcançar a solução fixa das ambiguidades. Pode-se dizer que a chave para fixação das ambiguidades de um único receptor é saber se e como os UPDs podem ser estimados com acurácia adequada. Conforme apresentado na seção 3.2.1.1, Ge *et al.* (2008), para posicionamento com dados diários, estimou os UPDs da WL com dados de 24 horas e os UPDs da NL a cada 15 minutos. Geng *et al.* (2009) estimou os UPDs da NL a cada 12 horas, para o PPP com dados horários. Essa metodologia de estimativa dos UPDs não foi testada para PPP em modo estático e cinemático com menos de uma hora de dados de observação. Essa abordagem é realizada nesta tese. Para tal, a estabilidade e precisão dos UPDs_NL foram analisados. Os resultados dessas análises são apresentados na seção 5.1.2. Além disso, experimentos de PPP com fixação de ambiguidades foram realizados com os UPDs_NL estimados com dados de uma hora, duas horas e três horas. A fixação das ambiguidades só ocorreu com os UPDs_NL estimados com uma hora de dados, mostrando que, dentro das condições em que as estimativas foram realizadas, esse foi o tempo necessário para que os mesmos tivessem estabilidade e precisão suficientes para fixação das ambiguidades no posicionamento com menos de 60 minutos de dados.

No método apresentado por Ge *et al.* (2008), a decisão de fixação das ambiguidades WL e NL é realizada conforme critério de probabilidade apresentado na equação (78). No método proposto nesta Tese, as ambiguidades NL são fixadas com a utilização do método LAMBDA e a validação realizada por meio do Teste *Ratio* (seção 3.3).

Conforme demonstrado na seção 3.2.1.1, as estimativas UPD são realizadas a partir da média das partes fracionais de todas as estimativas de SD de ambiguidades envolvidas

nas estações de referência. Todavia, como os UPDs são de natureza cíclica, isso significa que -0,5 ciclos é na verdade idêntico a +0,5 ciclos. Por exemplo, um inteiro de ambiguidade de 1 ciclo e fracional de 0,5 é equivalente a um inteiro de ambiguidade de 2 ciclos e parte fracional de -0,5. Para um UPD na qual o valor verdadeiro é parte de um ciclo, o ruído das medidas pode causar uma discrepância de aproximadamente 1 ciclo entre as partes fracionais de algumas ambiguidades estimadas (GABOR, 1999). Para contornar essa limitação e melhorar o desempenho do UPD_NETWORK, programou-se uma técnica de calcular médias, para se alcançar a estimativa correta UPD:

$$UPD^{s,j} = \frac{\arctan2\left(\frac{\sum_{i=1}^n [\text{sen}(2\pi\hat{N}^{s,j})]}{\sum_{i=1}^n [\text{cos}(2\pi\hat{N}^{s,j})]}\right)}{2\pi} \quad (83)$$

onde:

$UPD^{s,j}$ representa o UPD referente a SD entre os satélites s e j ;

$\hat{N}^{s,j}$ representa a estimativa da ambiguidade real da SD entre os satélites s e j ; e

2π converte entre unidades de ciclos e radianos e n é o número de ambiguidades para o par de satélites s,j .

Na Equação (83), ao invés de usar funções simples de trigonometria para remover a ambiguidade, é definida uma função combinando duas funções trigonométricas e uma função trigonométrica inversa. A função arco tangente chamada de ARCTAN2 é usualmente assim referida na linguagem de programação e é diferente do argumento ARCTAN (arco tangente). A função ARCTAN2 garante o quadrante do UPD. Assim sendo, a equação (86) fornece a correta magnitude e quadrante dos UPDs na faixa de -0,5 e 0,5 ciclos e como N é um inteiro em unidades de ciclos, as funções trigonométricas removem o número de ciclos inteiros.

Uma vez que o vetor de ambiguidades no espaço dos números reais (\hat{N}) é estimado e o vetor fixo (\tilde{N}) correspondente resolvido após a aplicação do método de solução das ambiguidades inteiras, pode-se introduzir a injeção no ajustamento numa determinada época k . O *software* RT_PPP realiza PPP com as equações da observável *ion-free*, para a pseudodistância e fase da onda portadora (equações (24) e (25)), sem diferenciação. No método de estimativa dos UPDs a SD entre satélites é realizada somente para as ambiguidades

estimadas e não para as observáveis. Desta forma, formulações foram adaptadas de forma a ser realizada, por meio de injunções, a influência da SD das ambiguidades inteiras na estimativa dos parâmetros no PPP (3 coordenadas, o erro do relógio do receptor, o atraso troposférico e as ambiguidades IF para cada satélite).

As injunções são informações extras sobre os parâmetros, como funções ou condições que os relacionam, resultados de um prévio ajustamento. Desta forma, dispõe-se de informações adicionais sobre os parâmetros (MONICO, 2008):

$$E\{L_w\} = CX \quad (84)$$

$$D\{L_w\} = \Sigma_{L_w} \quad (85)$$

Na equação (84), C é uma matriz de ordem (rxu) dos coeficientes, onde r representa o número de observações ou número de equações adicionais (ambiguidades fixas), u representa o número de parâmetros e L_w é um vetor de ordem $(rx1)$ composto pela diferença das ambiguidades IF reais e fixas $(\hat{N} - \check{N})$.

O vetor dos parâmetros ajustados (\check{X}_k) com a influência da injunção em que as ambiguidades são fixadas para determinada época k é dada pela expressão:

$$\check{X}_k = \hat{X}_k + K_k V_k \quad (86)$$

$$V_k = L_{IF(float)} - L_{IF(fix)} \quad (87)$$

onde:

\hat{X}_k é o vetor dos parâmetros na época k , resultante do PPP com ambiguidades reais;

K_k é a Matriz de ganho de *Kalman*;

V_k é o Vetor dos resíduos preditos;

$L_{IF(float)}$ é o vetor da SD de ambiguidades IF reais;

$L_{IF(fix)}$ é o vetor da SD de ambiguidades IF fixas.

Na matriz C (equação (84)) o número de observações em cada época é menor que o número de parâmetros. Desta forma, adota-se um procedimento em que a ordem da matriz a ser invertida (ΣV_k) é igual ao número de observações (ambiguidades inteiras), de forma que na expressão 86 a Matriz de ganho de *Kalman* é composta por:

$$K_k = \Sigma \hat{X}_k C_k^T \Sigma V_k^{-1} \quad (88)$$

onde:

$\Sigma \hat{X}_k$ é a MVC dos parâmetros na época k , resultante do PPP com ambiguidades reais;

ΣV_k é a MVC dos resíduos preditos e é dada por:

$$\Sigma V_k = [\Sigma IF_{Fix} + C_k \Sigma \hat{X}_k C_k^T] \quad (89)$$

ΣIF_{Fix} é a MVC das ambiguidades da IF fixas e é nula.

A equação (90) apresenta a atualização da MVC do vetor dos parâmetros com influência da injeção na época k :

$$\Sigma \check{X}_k = [I - K_k C_k] \Sigma \hat{X}_k \quad (90)$$

4 DESENVOLVIMENTO E ELABORAÇÃO DE APLICATIVOS PARA A METODOLOGIA PROPOSTA

Este capítulo apresenta os detalhes do desenvolvimento e alterações realizadas em termos de algoritmos para a implementação computacional da metodologia para Solução das ambiguidades inteiras. O método proposto nesta tese se refere à solução de ambiguidades no PPP com base na estimativa de UPDs, descrita na seção 3.2.1.1. Esse modelo de PPP com solução de ambiguidades inteiras consiste de duas etapas: um módulo do servidor fornecendo produtos UPDs e um módulo do usuário capaz de proporcionar soluções fixas. É importante salientar que a concepção do algoritmo e o desenvolvimento de programas também são contribuições importantes desta tese, pois são etapas necessárias para a análise da eficiência da metodologia proposta. Comparando com os modelos correntes de PPP com ambiguidades reais, a diferença é que o modelo implementado nesta tese gera produtos UPDs para o módulo usuário, visando proporcionar a solução de ambiguidades de um único receptor.

Conforme o exposto, salienta-se que esta tese tem foco na adaptação e implementação do método das estimativas dos UPDs no módulo do servidor de forma que o sistema funcione e se alcance a solução de ambiguidades inteiras para o receptor do usuário. A princípio os *softwares* foram testados com produtos de órbitas e relógios finais do IGS, caracterizando assim modo pós-processado. A implementação foi realizada para que se possa obter uma solução a cada época com estimativa com base filtro de *Kalman*, desta forma, deixa-se claro que todo o sistema foi implantado de forma que a aplicação em tempo real possa ser realizada somente com a alteração dos produtos de entrada de pós-processados, para tempo real, como órbitas e correções para relógios dos satélites obtidos em tempo real, além da estimativa dos UPDs com a taxa de atualização e precisão necessárias para se realizar essa aplicação.

Os detalhes da implementação dos *softwares* desenvolvidos para alcançar os objetivos da pesquisa e a metodologia utilizada para teste dos mesmos, são apresentados a seguir.

- **Módulo do servidor**

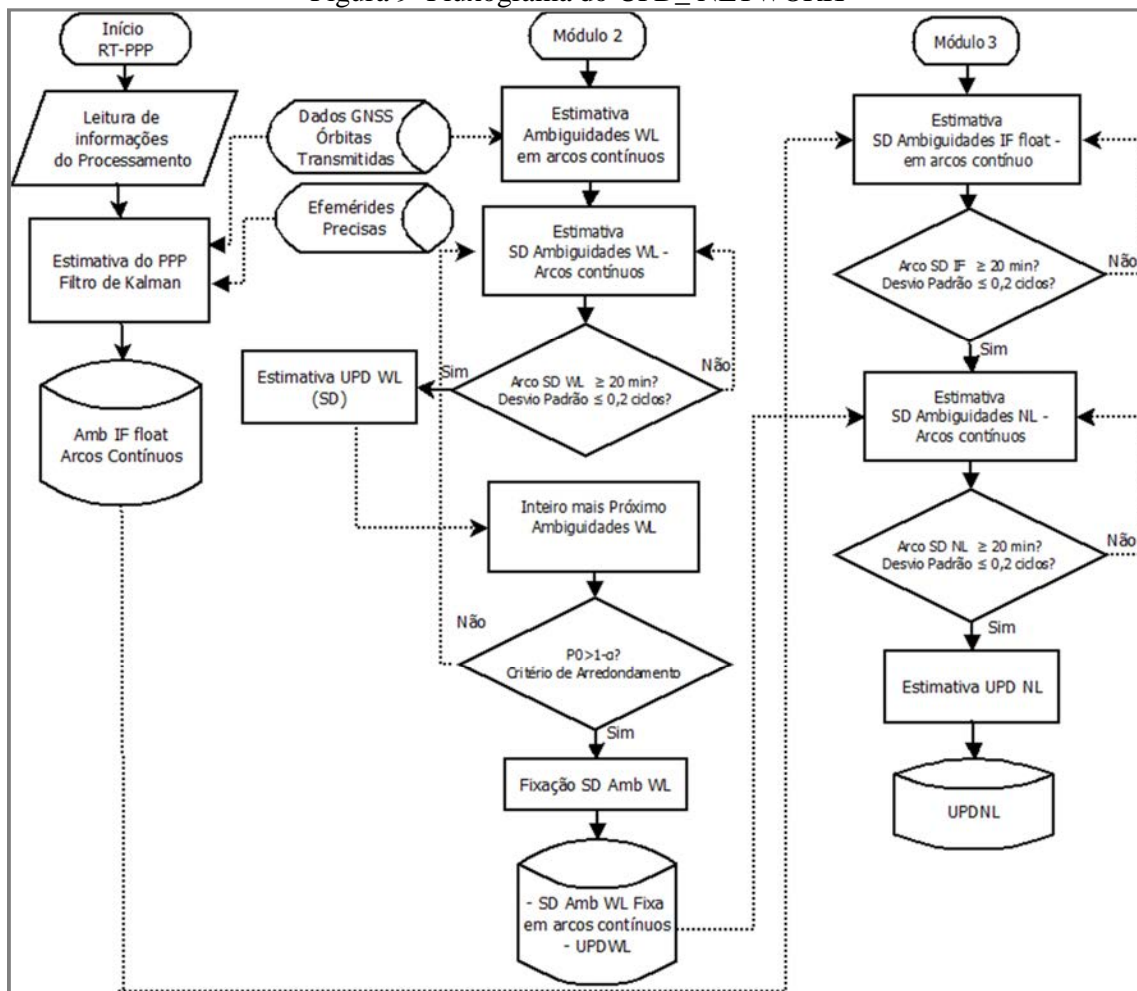
Para o módulo do servidor foi desenvolvido um *software* denominado UPD_NETWORK, capaz de gerar os produtos UPDs para serem aplicados no processamento PPP do usuário. A linguagem de programação utilizada foi a C/C++ e o *software* funciona no sistema operacional Windows.

A figura 9 apresenta o fluxograma do UPD_NETWORK. O módulo 1 - RT_PPP - é uma adaptação do *software* RT_PPP (*Real Time PPP*) desenvolvido por (MARQUES, 2012). O *software* RT_PPP permite realizar o PPP no modo pós-processado e também em tempo real, possibilitando a obtenção de ambiguidades reais *ion-free* para uma estação. Esse *software* foi modificado, ao longo desta pesquisa, para que as estimativas das ambiguidades reais *ion-free* fossem geradas em arcos contínuos para uma rede de estações GNSS, conforme equação (47). Um arco de fase contínuo é um arco de dados sem interrupções ou perdas de ciclos.

O *software* RT_PPP, nesse módulo 1 (figura 9), também foi modificado para permitir que as coordenadas das estações da rede GNSS pudessem ser injuncionadas, considerando-se suas respectivas incertezas, durante as estimativas das ambiguidades IF.

As ambiguidades IF obtidas por meio do RT_PPP são utilizadas no módulo 3, para estimativa das ambiguidades NL. Os módulos 2 e 3 são cruciais para solução de ambiguidades, pois são os módulos responsáveis pela estimativa dos UPDs WL e NL.

Figura 9–Fluxograma do UPD_NETWORK



O módulo 2 do UPD_NETWORK, figura 9, tem a função de estimar os UPDs_WL e fixar as ambiguidades WL para serem utilizadas na estimativa das ambiguidades NL. Somente as ambiguidades WL que foram fixas no módulo 2 são utilizadas para as estimativas das ambiguidades NL no módulo seguinte. Os dados de entrada no módulo 2 são os dados de observação e navegação. O *software* faz a leitura e armazenamento dos dados de observação GPS P1, P2, L1 e L2; porém, quando P1 ou P2 não estão disponíveis devido a configurações ou restrições dos receptores, utiliza-se C1 ou L2C, aplicando as correções de DCB (seção 2.4.1) para compatibilizar as medidas com P1 e P2. A detecção de perdas de ciclos e erros grosseiros foi implementada de acordo com a estratégia descrita no tópico 2.4.2.

No UPD_NETWORK, as ambiguidades WL são calculadas por meio da equação (51) (p.71) e um arco de dados é formado por meio da média das medidas contínuas, conforme equação (52) (p.71).

Um satélite base é selecionado para as estimativas das SD das ambiguidades WL, para todas as estações da rede. O critério de seleção adotado para a seleção do satélite base é o de maior arco contínuo de dados. A verificação é realizada em todos os arcos contínuos de todos os satélites e em todas as estações da rede.

Durante a implementação do módulo 2 do UPD_NETWORK, para a estimativa da SD de ambiguidades WL, foram testadas duas metodologias:

- A primeira metodologia foi a estimativa da SD de ambiguidades WL somente com o maior arco de dados contínuos de cada satélite. Desta forma, a quantidade de informações para a estimativa dos UPDs_WL foi relativamente pequena, tendo somente uma SD de ambiguidades WL para cada par de satélites em cada estação da rede GNSS;
- A segunda metodologia foi a estimativa da SD de ambiguidades WL com todos os arcos de dados contínuos de cada satélite. Assim sendo, a quantidade de informações para a estimativa dos UPDs_WL aumentou significativamente, tendo várias SD de ambiguidades WL para cada par de satélites em cada estação GNSS.

Após análise da qualidade das SD de ambiguidades WL estimadas, selecionou-se a segunda metodologia para dar continuidade ao módulo. Os resultados dessa análise são apresentados no Capítulo 5.

Com a finalidade de evitar influências externas, as SD de ambiguidades WL utilizadas no cálculo dos UPDs com tempo de observações menor que 20 minutos foram ignoradas, como por exemplo, os grandes efeitos de multicaminho, pois para receptores em modo estático a geometria de propagação muda lentamente, fazendo com que os parâmetros de multicaminhos sejam essencialmente constantes por vários minutos (WEILL, 1997). Desta forma, utilizando de maneira estratégica a variação na geometria do satélite, o problema do multicaminho pode ser minimizado com a realização de um rastreamento por um período de tempo maior (COSTA *et al.*, 2008). As SD de ambiguidades WL com desvio padrão maior que 0,2 ciclos também não foram utilizadas nas estimativas.

O intervalo de tempo de dados simultâneos para a formação da SD de ambiguidades entre dois arcos de dois satélites (s e j), para uma determinada estação (r) é calculada a partir das seguintes definições:

$T_i(s,r)$ = Instante inicial para arco de dados (s,r);
 $T_f(s,r)$ = Instante final para arco de dados (s,r);
 $T_i(j,r)$ = Instante inicial para arco de dados (j,r);
 $T_f(j,r)$ = Instante final para arco de dados (j,r);
 $T_i\{(s,r);(j,r)\}$ = Maior instante inicial ($T_i(s,r)$; $T_i(j,r)$);
 $T_f\{(s,r);(j,r)\}$ = Menor instante final ($T_f(s,r)$; $T_f(j,r)$).

O intervalo de tempo simultâneo da SD das ambiguidades WL é dado por:

$$\text{Duração } \{(s,r);(j,r)\} = T_f\{(s,r);(j,r)\} - T_i\{(s,r);(j,r)\} \quad (91)$$

As estimativas da SD de ambiguidades WL e o seu respectivo desvio padrão são calculados através das equações (54) e (55) (p.72). Repete-se o processo de estimativa da SD de ambiguidades WL para todos os satélites com relação ao satélite base e para todas as estações da rede. Após terem sido obtidas todas as possíveis SD de ambiguidades WL para todas as estações da rede, é então realizado o cálculo dos UPDs_WL (equação (83)). Os UPDs_WL estimados são utilizados para fixar a SD de ambiguidades WL, conforme equações (57) e (58). A decisão de fixação é realizada conforme critério de probabilidade apresentado na equação (78). A solução das ambiguidades WL é pré-requisito para solução de ambiguidades NL e estimativa dos UPDs_NL. Conforme mostra a figura 9, no módulo 2 do UPD_NETWORK, os UPDs_WL e as SD de ambiguidades WL fixas são armazenados para serem posteriormente utilizados no módulo 3.

O módulo 3 UPD_NETWORK (figura 9), tem a finalidade de estimar os UPDs_NL. Os dados de entrada do módulo 3 são as ambiguidades reais *ion-free* geradas em arcos contínuos pelo módulo 1 RT_PPP e as SD de ambiguidades WL fixas, geradas no módulo 2. Eles são pré-requisito para estimativa da SD das ambiguidades NL.

O satélite base para os cálculos da SD de ambiguidades IF é o mesmo selecionado nas estimativas do módulo 2. O tempo de dados em comum visualização para a formação das SD de ambiguidades IF entre os arcos de dois satélites, para uma determinada estação, foi calculada a partir da equação (91).

As estimativas da SD de ambiguidades NL e o seu respectivo desvio padrão são calculados através das equações (59) e (60). Esse processo de estimativa é realizado para todos os satélites com relação ao satélite base e para todas as estações da rede.

As SD de ambiguidades IF e NL, utilizadas no cálculo dos UPDs_NL, com tempo de observações menor que 20 minutos também foram ignoradas. Da mesma forma, as SD de ambiguidades com desvio padrão maior que 0,2 ciclos não foram utilizadas nas estimativas.

Após terem sido obtidas todas as possíveis SD de ambiguidades NL, para todas as estações da rede, realiza-se o cálculo dos UPDs_NL, conforme equação (83). Os UPDs WL e NL são armazenados para posterior utilização na solução de ambiguidades no Módulo Usuário.

- **Módulo do usuário**

Para o Módulo Usuário foram desenvolvidas rotinas e realizadas adaptações no *software* RT_PPP, de forma que foi gerada uma nova versão desse *software*, denominada RT_PPP_AR (*Real Time PPP Ambiguity Resolution*). Essa nova versão recebe os produtos UPDs WL e NL e realiza PPP com solução de ambiguidades para o usuário.

O *software* RT_PPP foi desenvolvido em linguagem de programação C/C++. A partir desse *software*, os processamentos podem ser realizados no modo estático ou cinemático. A verificação de perdas de ciclos é realizada com base nas equações apresentadas no tópico de perdas de ciclos na seção 2.4.2. Caso sejam detectadas perdas de ciclos para determinado satélite, o RT_PPP adota a estratégia de reiniciar a estimativa da ambiguidade da fase para esse satélite.

O *software* RT_PPP permite a utilização de arquivos de efemérides precisas do IGS ou de efemérides preditas IGU. As correções para os relógios dos satélites podem ser as precisas finais do IGS ou em tempo real. Também utiliza as medidas GPS P1, P2 e fases na L1 e na L2, porém, quando P1 ou P2 não estão disponíveis, o RT_PPP utiliza C1 ou L2C, aplicando as correções de DCB (seção 2.4.1) apropriadas para compatibilizaras medidas com P1 e P2. Maiores informações sobre as modelagens matemáticas para eliminar ou minimizar os efeitos sistemáticos nos sinais GPS que estão implementadas no RT_PPP podem ser encontradas em Marques (2012).

O RT_PPP_AR inicialmente faz a leitura, verificação e atualização dos dados de entrada como arquivos de observação, navegação e dos UPD_WL e UPD_NL. Através do filtro de *Kalman* (seção 2.7) é realizada a estimativa *float* das ambiguidades da combinação linear *ion-free* juntamente com os outros parâmetros relacionados às coordenadas da estação, erro do relógio do receptor e parâmetro da troposfera, conforme mostrado na equação (29). No

caso de posicionamento pelo modo estático, a cada época é obtida uma solução com ambiguidades *float* e o processo de solução de ambiguidades inteiras só é iniciado na última época. Para alguns experimentos realizados nesta pesquisa, modificou-se o programa para que houvesse tentativa de solução de ambiguidades no modo estático a cada época, como acontece no modo cinemático e na opção de época por época.

Os parâmetros referentes aos UPDs_WL são previamente estimados no *software* UPD_NETWORK (figura 9) utilizando dados de 24 horas. Já os UPDs_NL são estimados com dados horários. Análises dos resultados dessas estimativas são apresentadas no Capítulo 5.

Como os UPDs são estimados tendo como base um determinado Satélite, caso ocorra do Satélite Base não estar presente em determinada época, foi desenvolvida uma função para realizar a mudança do Satélite Base dos UPD_WL e UPD_NL. Desta forma, sendo um conjunto de estimativas UPD para 32 satélites s ($s = 1$ até 32), tendo como satélite base k , a mudança do Satélite Base k para j é realizada da seguinte forma:

$$UPD^{s,j} = UPD^{s,k} - UPD^{j,k} \quad (92)$$

$$\sigma_{UPD}^{s,j} = \sqrt{(\sigma_{UPD}^{s,k})^2 + (\sigma_{UPD}^{j,k})^2} \quad (93)$$

onde:

$UPD^{s,j}$ representa o UPD referente a SD entre os satélites s e j ;

$UPD^{s,k}$ representa o UPD referente a SD entre os satélites s e k ;

$UPD^{j,k}$ representa o UPD referente a SD entre os satélites j e k ;

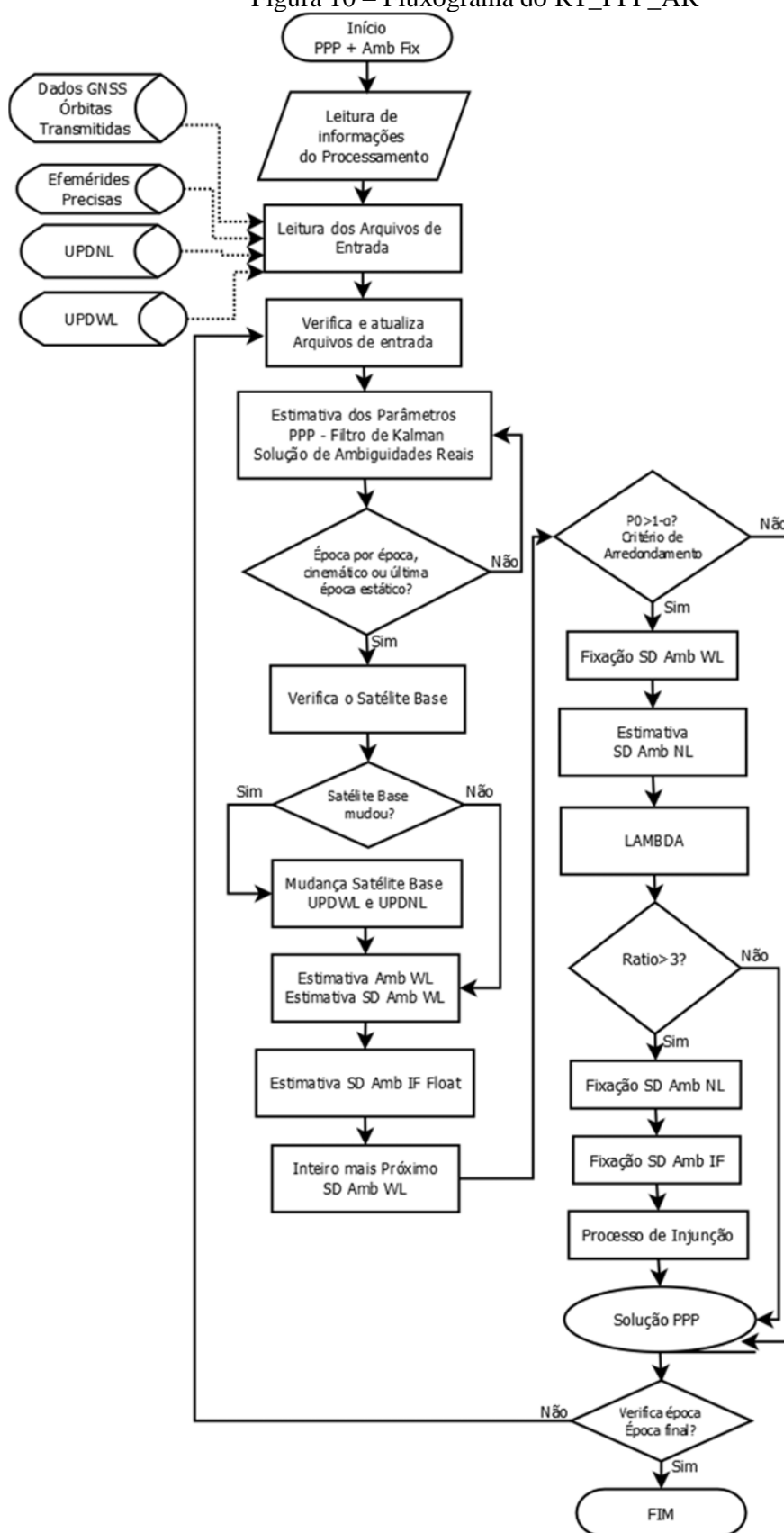
$\sigma_{UPD}^{s,j}$ representa o desvio padrão do UPD referente a SD entre os satélites s e j ;

$\sigma_{UPD}^{s,k}$ representa o desvio padrão do UPD referente a SD entre os satélites s e k ; e

$\sigma_{UPD}^{j,k}$ representa o desvio padrão do UPD referente a SD entre os satélites j e k .

A figura 10 apresenta o fluxograma de execução do RT_PPP_AR que possui as rotinas implementadas para solução de ambiguidades.

Figura 10 – Fluxograma do RT_PPP_AR



Nas etapas seguintes às já descritas, na figura 10, o *software* RT_PPP_AR realiza o cálculo das ambiguidades WL, baseado na combinação linear *Melbourne–Wübbena*, de acordo com as equações (51) a (55).

Os UPDs_WL estimados e seus respectivos desvios padrão são utilizados para fixar a SD de ambiguidades WL, conforme equações (57) e (58). A decisão de fixação é realizada conforme critério de probabilidade apresentado na equação (78). Somente após fixar as ambiguidades WL é que se realiza a estimativa das ambiguidades NL, conforme equações (59) e (60). Os UPDs_NL são utilizados para fixar as ambiguidades NL. A decisão de fixação pode ser realizada conforme critério de probabilidade (equação (78)). O método LAMBDA foi implementado nessa etapa de fixação das ambiguidades NL e a validação realizada por meio do Teste *Ratio* (seção 3.3). As ambiguidades WL e NL são fixadas de forma sequencial, ou seja, a tentativa de fixação das ambiguidades NL ocorre quando tiverem ambiguidades WL, de no mínimo dois satélites, fixas na época e para as demais ambiguidades é realizada nova tentativa de fixação a cada época, até que todas sejam fixadas.

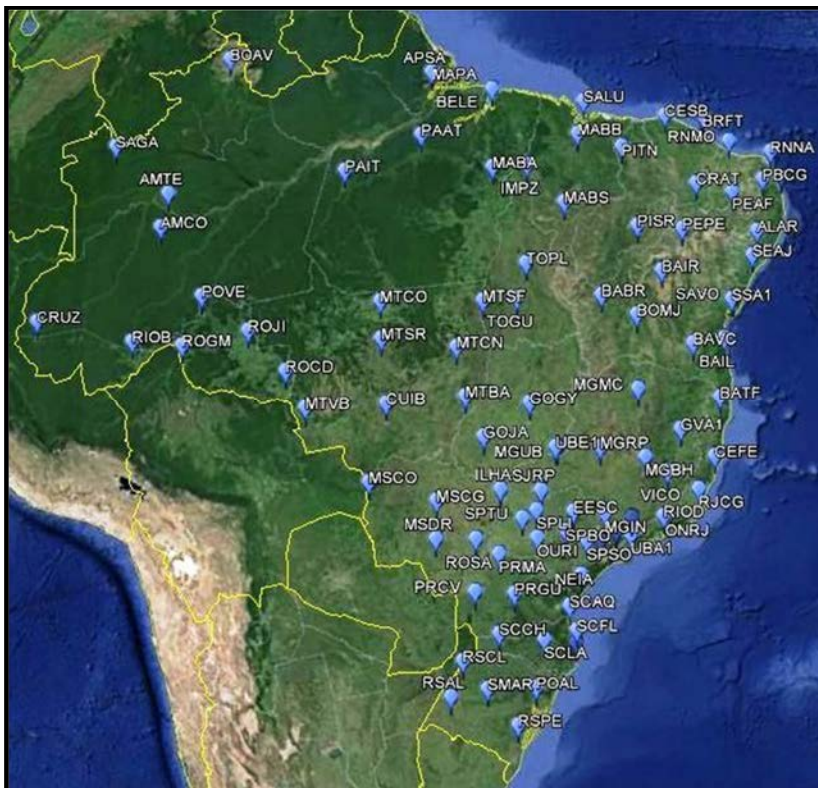
Depois de fixadas as ambiguidades WL e NL, as ambiguidades da IF são fixadas conforme equação (50) e é iniciado o processo de injunção (seção 3.4) de forma que os parâmetros estimados sejam ajustados com a influência das ambiguidades fixas.

4.1 Experimentos realizados com o *software* UPD_NETWORK

Neste tópico são apresentados os experimentos realizados com o objetivo de avaliar os resultados obtidos por meio do *software* UPD_NETWORK, desenvolvido nesta pesquisa, no qual compõe o Módulo do Servidor, com a finalidade de estimar os UPD_WL e NL.

Os experimentos foram realizados de forma a avaliar o desempenho do sistema desenvolvido dentro das condições existente no Brasil. Desta forma, a Rede GNSS utilizada foi composta por estações brasileiras da RBMC e da Rede GNSS–SP, totalizando aproximadamente 100 estações, caracterizando, para esta pesquisa, um “contexto Regional”. Com a utilização dos dados das estações de uma Rede Regional tem-se uma cobertura reduzida para os satélites da constelação, tornando-se a estimativa dos UPDs para um número menor de satélites. Conseqüentemente, os usuários ficam restritos aos da região da rede, no caso o Brasil, para fazer uso do serviço de solução das ambiguidades fixas. A localização aproximada das estações da rede GNSS utilizada no Módulo do Servidor é mostrada na figura 11.

Figura 11 – Localização das estações da rede GNSS



Fonte: Google Earth

Para a análise da qualidade e comportamento temporal dos UPD WL e NL foram utilizadas as observações das estações da rede GNSS, nos dias 012 a 018 do ano de 2014 e realizados processamentos PPP para gerar as estimativas UPD por meio do *software* UPD_NETWORK, de acordo com a estratégia de processamento apresentada no Quadro 3.

Os processamentos dos dados para as estações da rede GNSS foram realizados com máscara de elevação de 30 graus para as estimativas de UPD_WL e 10 graus para as estimativas de UPD_NL. A taxa de coleta de dados em todos os arquivos foi de 15 segundos.

Com relação aos dois últimos itens apresentados no quadro 3, antes que as ambiguidades WL sejam aproximadas para o inteiro mais próximo, é realizada uma verificação da diferença mínima entre ambiguidades reais e inteiras. Se essa diferença for inferior a 0,25 ciclos, então é tomada a decisão de fixação, conforme critério de probabilidade apresentado na equação (78), com nível de significância de 0,1%.

Quadro 3- Estratégia de Processamento para estimativas UPD.

Configuração	Descrição
Órbitas e relógios dos satélites	IGS Final
Ionosfera	Combinação <i>Ion-free</i>
Troposfera	Estimada como <i>Random Walk</i> ($0,005 \text{ m}/\sqrt{(\text{hora})}$)
Observáveis	C1, P2, L1 e L2 com precisões (0,8; 1,0; 0,008 e 0,01 m)
Máscara de Elevação	UPD_WL– 30 graus; UPD_NL– 10 graus
Taxa de coleta dados	15 segundos
Desvio Padrão mínimo para estimativa de SD ambiguidades	0,2 ciclos
Tempo mínimo em comum visualização para SD ambiguidades	20 minutos
Coordenadas de Referência das estações da rede	Injuncionadas – Solução SIRGAS 2005 (época 2005,0), atualizadas para a época dos dados
Diferença mínima entre ambiguidades reais e inteiras para arredondamento do inteiro mais próximo	0,25 ciclos
Nível de significância para fixação das ambiguidades WL	$\alpha = 0,1\%$

4.2 Experimentos realizados com o *software* RT_PPP_AR

Com a finalidade de avaliar o desempenho do software RT_PPP_AR na solução de ambiguidades PPP e as melhorias que podem ser obtidas nesse posicionamento com o método implementado foram realizados alguns experimentos, simulando uma estação de usuário utilizando sistema desenvolvido. Cinco estações foram selecionadas como estações de teste, sendo uma estação para cada região do Brasil: NAUS, localizada na região norte, RECF, localizada na região nordeste, BRAZ, localizada no centro-oeste do país, PPTE, localizada na região sudeste e UFPR, localizada na região sul. Essas estações não fizeram parte da rede GNSS utilizada para estimativa dos UPD_WL e UPD_NL realizada previamente no módulo do servidor. A figura 12 destaca a localização aproximada das estações de teste.

Figura 12–Localização das estações de teste



Fonte: Google Earth

4.2.1 Solução de Ambiguidades no PPP no Modo Estático

A fim de se verificar influência das ambiguidades fixas em curtos períodos de observação, foram realizados cinco experimentos no PPP, no modo estático, coletados por um período de oito horas, das 8 às 16h, durante sete dias. Esse período do dia foi escolhido para se evitar as irregularidades das condições ionosféricas, como por exemplo, os efeitos de cintilação ionosférica. Para tal, os valores de índices de cintilação (S_4) foram analisados, para as estações FORT, POAL e PRU1, nos dias 012 e 018 de 2014, respectivamente, a partir da ferramenta *ISMR Query Tool* (seção 2.4.2). As figuras 13 e 14 apresentam esses valores, onde foi possível verificar que o período escolhido para os experimentos estava sob fraca influência de cintilação ionosférica, com amplitude $S_4 \leq 0,5$.

Outro experimento foi realizado com a finalidade de verificar a influência da cintilação ionosférica na aplicação do método de PPP com solução de ambiguidades inteiras. Os detalhes serão apresentados adiante, na seção 4.2.2.

Figura 13 – Índices de cintilação (S4) em amplitude para o dia 012 de 2014

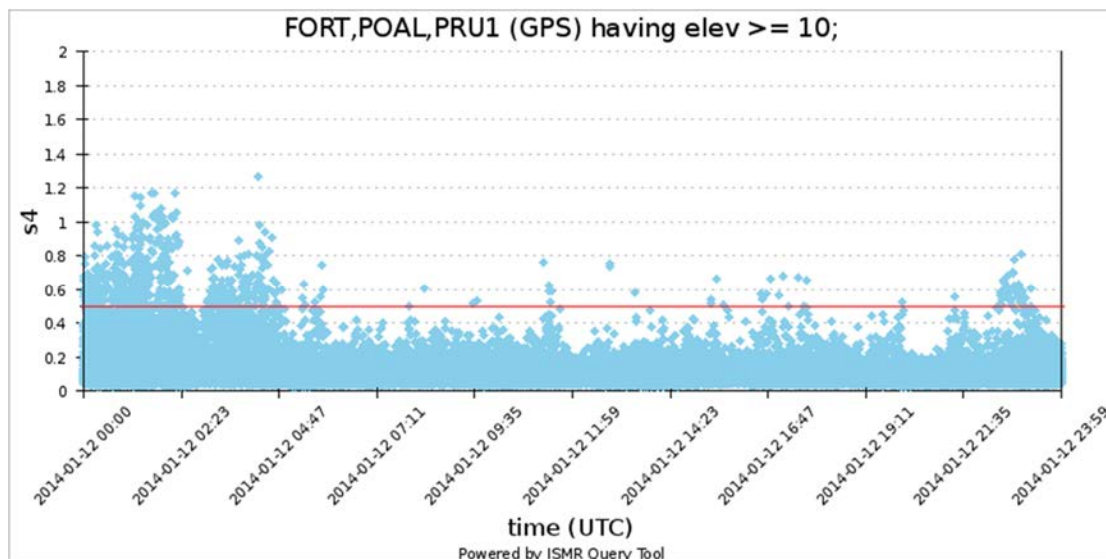
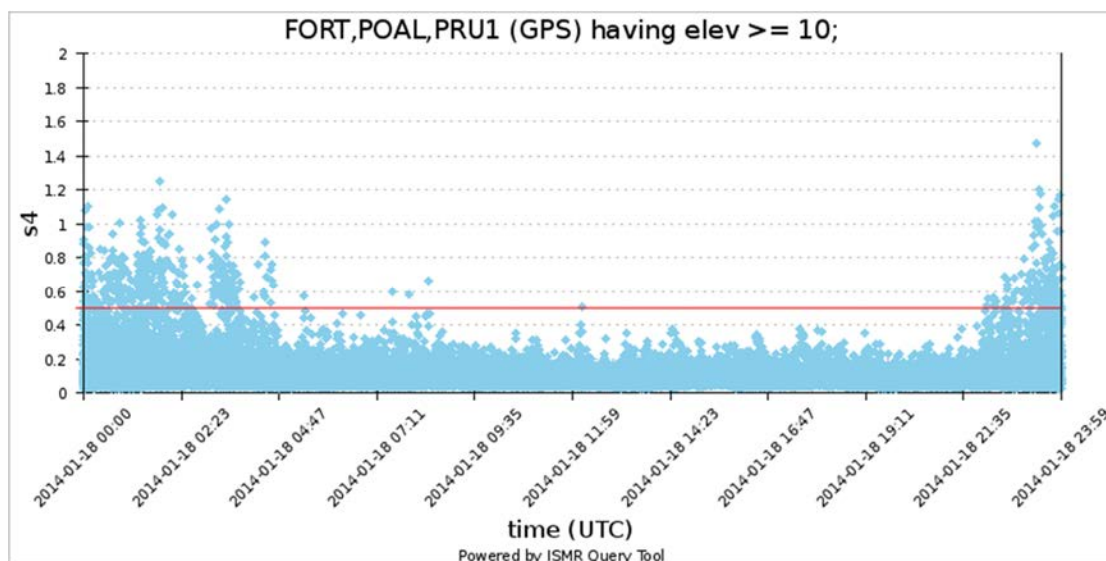


Figura 14 – Índices de cintilação (S4) em amplitude para o dia 018 de 2014



Com relação aos cinco experimentos realizados, o primeiro experimento envolveu dados com 15 minutos de coleta, o segundo com 30 minutos, o terceiro e o quarto compostos, respectivamente, por arquivos com dados de 45 minutos e 60 minutos. A taxa de coleta de dados em todos os arquivos foi de 15 segundos.

No quinto experimento realizado não se fixou tempo mínimo para que as ambiguidades fossem solucionadas como inteiro. Desta forma, foi possível analisar os resultados com relação à aplicação do método proposto na pesquisa, por meio do *software*

RT_PPP_AR para a solução de ambiguidades fixas em intervalos de tempo menores do que 15 minutos, se observando o tempo mínimo necessário para fixação das ambiguidades em modo estático.

Cada processamento PPP foi realizado duas vezes, um com ambiguidades reais e outro com ambiguidades fixas, para os dias 012 a 018 de 2014. Os processamentos dos dados foram realizados utilizando as medidas GPS dos códigos P1 e P2 e das fases na L1 e L2, com precisões adotadas de, respectivamente, 0,8; 1,0; 0,008 e 0,01 m, considerando que estes valores são inseridos na equação de propagação das incertezas da combinação *ion-free*. Para os casos em que os receptores não coletam a observável P1, foram utilizadas as medidas C1 aplicando as correções de DCBs P1-C1.

As coordenadas de referência das estações de teste para avaliação dos resultados foram obtidas no sistema SIRGAS 2005 (época 2005,0), convertidas para o sistema ITRF 2008 e atualizadas para a época dos dados. As velocidades das estações foram obtidas a partir do aplicativo “VEMOS2009”, Modelo de velocidades para América do Sul e Caribe, dentro do contexto SIRGAS (DREWES e HEIDBACH, 2012).

Para análise dos resultados foram obtidas as discrepâncias entre as coordenadas de referência e as coordenadas obtidas nos processamentos, e essas discrepâncias foram transformadas para o SGL (Sistema Geodésico Local) com respectiva propagação das incertezas para fins de análises (MONICO, 2008).

Os processamentos PPP para as estações de teste foram realizados com máscara de elevação de 10°, as órbitas e correções precisas dos relógios do IGS foram utilizadas, além de vários outros modelos para correção e/ou modelagem dos erros e efeitos que afetam as observáveis que se encontram implementadas no RT_PPP (MARQUES, 2012). A correção dos efeitos de primeira ordem da ionosfera foi obtida através da combinação *ion-free*. Com relação a troposfera, foi estimada a componente úmida tratando-a como um processo estocástico *random walk*, sendo que a componente hidrostática é calculada com base em um modelo de *Hopfield* e é mantida fixa durante todo o processamento. A variação do centro de fase da antena do receptor e do satélite é corrigida utilizando a correção com base em calibração absoluta. Outras correções se referem às da fase *windup*, os modelos de marés de corpos terrestres e carga de marés oceânicas, a correção devido aos efeitos de relatividade, entre outros.

Para a solução de ambiguidades as estimativas de UPD geradas pelo *software* UPD_NETWORK, no módulo do servidor, foram aplicadas nos processamentos realizados

pelo software RT_PPP_AR. Desta forma, as SD de ambiguidades WL e NL reais foram corrigidas por meio dos UPD_WL e UPD_NL, a fim de se obter as ambiguidades fixas, conforme seção 3.2.1. Os UPDs_WL, devido à sua estabilidade diária, foram estimados com 24 horas de dados e a fixação das SD de ambiguidades WL para o inteiro foi realizada utilizando o critério de probabilidade apresentado na seção 3.3, com nível de significância de 0,1%.

Os UPDs_NL foram estimados com dados horários, após ter sido avaliada sua estabilidade na análise dos resultados que serão apresentados na seção 5.1.2, que trata das estimativas dos UPDs_NL. As SD de ambiguidades NL foram fixadas com a utilização do método LAMBDA e a validação realizada por meio do Teste *Ratio*, onde o valor crítico adotado foi 3 (seção 3.3).

A porcentagem de fixação para a SD de ambiguidades WL é calculada pelo número de SD de ambiguidades WL fixas sobre o número de todas as SD de ambiguidades WL formadas. Para a NL, essa porcentagem é o número de SD de ambiguidades NL fixas sobre o número total de SD ambiguidades WL fixas. Como as ambiguidades IF só são estimadas se as ambiguidades NL forem fixadas, a porcentagem de fixação da SD de ambiguidades IF é a mesma da SD de ambiguidades NL. O quadro 4 apresenta a estratégia de processamento PPP para o modo estático.

Quadro 4- Estratégia de Processamento para o modo estático

Configuração	Descrição
Orbitas e relógios dos satélites	IGS Final
Ionosfera	Combinação <i>Ion-free</i>
Troposfera	Estimada como <i>Random Walk</i> ($0,005 \text{ m}/\sqrt{(\text{hora})}$)
Observáveis	C1, P2, L1 e L2 com precisões (0,8; 1,0; 0,008 e 0,01 m)
Taxa de coleta de dados	15 segundos
Máscara de Elevação	10 graus
Coordenadas de Referência das Estações de Teste	Solução SIRGAS 2005 (época 2005,0), atualizadas para a época dos dados
Desvio Padrão mínimo para estimativa de SD ambiguidades	0,2 ciclos
Tempo mínimo em comum visualização para SD ambiguidades	20 minutos
Nível de significância para fixação das ambiguidades WL	$\alpha = 0,1\%$,
Valor Crítico <i>Ratio</i> – Validação solução inteira ambiguidades NL	3

4.2.2 Solução de Ambiguidades no PPP no Modo Cinemático

O caso cinemático se refere à estimativa da posição de um determinado objeto que se encontra em movimento. Nesta seção são apresentados os experimentos PPP realizados em modo cinemático. Foram realizados dois experimentos, onde no primeiro foram

processados dados das estações de teste PPTE, BRAZ, RECF e UFPR (dias 015, 016 e 017 de 2014) simulando modo cinemático, e no segundo, um levantamento em modo cinemático, com o receptor em movimento.

Para o experimento simulando o modo cinemático (taxa de coleta de dados de 15 segundos), supõe-se que o receptor esteja em movimento. Neste caso, a variância das coordenadas do receptor é relaxada (expandida) a cada época (com ruído branco de $1 \times 10^{18} \text{m}$ (equação (31))), de modo que a mesma apresente uma posição praticamente independente da anterior. Esse experimento foi realizado de duas formas:

- No primeiro caso, as coordenadas da estação de teste foram consideradas como fixas, ou seja, como conhecidas considerando-se suas respectivas incertezas, e as ambiguidades solucionadas com o receptor no modo estático. Após a fixação das ambiguidades, a variância das coordenadas do receptor foi relaxada a cada época, o que simulava um levantamento cinemático. As análises dos resultados foram realizadas na época de fixação das ambiguidades e nas épocas seguintes.
- No segundo caso, as ambiguidades foram solucionadas considerando o receptor no modo estático, e após a fixação das ambiguidades a variância das coordenadas do receptor foi relaxada a cada época. As análises dos resultados foram realizadas na época de fixação das ambiguidades e nas épocas seguintes.

O segundo experimento foi realizado com dados coletados, durante a noite, em um percurso de aproximadamente 60 metros, nos dias 022 e 023 de 2015. Para ambos os dias, o levantamento foi realizado no mesmo horário, das 23 às 23h 59min 59s. Esse horário foi selecionado para esse experimento, pois no mesmo tinha-se com objetivo avaliar a influência da cintilação ionosférica na solução de ambiguidades inteiras no PPP. Na seção 5.2.2.2, são apresentados os resultados referentes às análises com relação aos índices de cintilação para esse período.

Para coletados dados, um tripé e receptor foram instalados em seis pontos selecionados como pontos de controle (44 a 49), coletando-se dados por dois minutos em cada ponto, com 1s de taxa de coleta de dados.

Os dados foram coletados em uma área teste dentro da UNESP, cidade de Presidente Prudente, com 10 metros de distância, aproximadamente, de um ponto para outro.

A figura 15 apresenta a localização aproximada dos seis pontos de controle selecionados para o experimento, os quais fizeram parte do projeto CALIBRA(<http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br/is/calibra/index.php> - Acesso em: 15 de agosto de 2015).

Figura 15–Localização dos pontos de controle



Fonte: Google Earth

Uma vez que os pontos de controle foram implantados, um levantamento com receptores GNSS de dupla frequência foi realizado a fim de se obter as coordenadas a serem consideradas como de referência para esses pontos. Cerca de duas horas de coleta de dados foi realizada por ponto e os dados coletados foram processados utilizando-se o software TBC (*Trimble Business Center*). O processamento foi realizado com o método de posicionamento relativo estático, com taxa de coleta de dados de um segundo, utilizando as efemérides precisas de IGS, bem como duas estações base diferentes (PPTE e PRU2). Todos os comprimentos de linha de base foram menores que 500 m.

Para esse experimento em modo cinemático, as coordenadas do primeiro ponto de controle (ponto inicial do percurso) foram consideradas como fixas e as ambiguidades foram solucionadas antes de se iniciar o movimento. Após a fixação das ambiguidades, iniciou-se o movimento e a variância das coordenadas do receptor foi relaxada a cada época, para todos os pontos.

A estratégia de processamento para os experimentos no modo cinemático foi similar ao do caso estático (seção 4.2.1), ou seja, utilizando a combinação *ion-free*, estimativa da troposfera, correção dos vários erros e efeitos envolvidos nas observáveis GPS, dentre outros, conforme quadro 5.

Quadro 5- Estratégia de Processamento para o modo cinemático

Configuração	Descrição
Órbitas e relógios dos satélites	IGS Final
Ionosfera	Combinação <i>Ion-free</i>
Troposfera	Estimada como <i>Random Walk</i> ($0,005 \text{ m}/\sqrt{(\text{hora})}$)
Observáveis	C1, P2, L1 e L2 com precisões (0,8; 1,0; 0,008 e 0,01 m)
Máscara de Elevação	10 graus
Taxa de coleta de dados	15 segundos (cinemático simulado), 1 segundo (cinemático)
Coordenadas de Referência PPTE (cinemático simulado)	Solução SIRGAS 2005 (época 2005,0) atualizadas para a época dos dados
Coordenadas de Referência dos pontos de controle (cinemático)	Posicionamento relativo estático realizado em campo
Desvio Padrão mínimo para estimativa de SD ambiguidades	0,2 ciclos
Tempo mínimo em comum visualização para SD ambiguidades	20 minutos
Nível de significância para fixação das ambiguidades WL	$\alpha = 0,1\%$,
Valor Crítico <i>Ratio</i> - Validação solução inteira ambiguidades NL	3

O próximo capítulo apresenta a análises dos resultados obtidos por meio dos experimentos realizados, para avaliação da metodologia proposta neste trabalho, através dos *softwares* UPD_ NETWORK e RT_PPP_AR.

5 RESULTADOS E ANÁLISES DOS EXPERIMENTOS REALIZADOS COM OS SOFTWARES UPD_NETWORK E RT_PPP_AR

Neste capítulo são apresentados os resultados dos experimentos realizados com o objetivo de avaliar a metodologia e o sistema desenvolvido nesta tese, composto por dois Módulos, o do Servidor e do Usuário. No Módulo do Servidor os produtos UPDs foram gerados por meio do *software* UPD_NETWORK e no Módulo do Usuário as soluções de PPP com ambiguidades fixas foram geradas com o *software* RT_PPP_AR. Esses resultados são apresentados a seguir.

5.1 Resultados e análises dos experimentos com o software UPD_NETWORK

Nesta seção é realizada uma avaliação das estimativas do UPD_WL e UPD_NL obtidas através do *software* UPD_NETWORK, no módulo do servidor.

5.1.1 Estimativa UPD_WL

Para a estimativa dos UPDs_WL foram testadas duas metodologias, uma com estimativa de ambiguidades WL somente com o maior arco de dados contínuos dos satélites e a outra com a estimativa de ambiguidades WL com todos os arcos de dados contínuos dos satélites, ambas no período de 24 horas.

As figuras 16 e 17 apresentam os UPDs_WL para alguns satélites com relação ao PRN9 calculados com maior arco contínuo e com todos os arcos contínuos de ambiguidades WL.

Figura 16 - Estimativas do UPD_WL com relação ao PRN9 para os dias 012 a 018 de 2014 - Estimativas com maior arco de dados contínuo

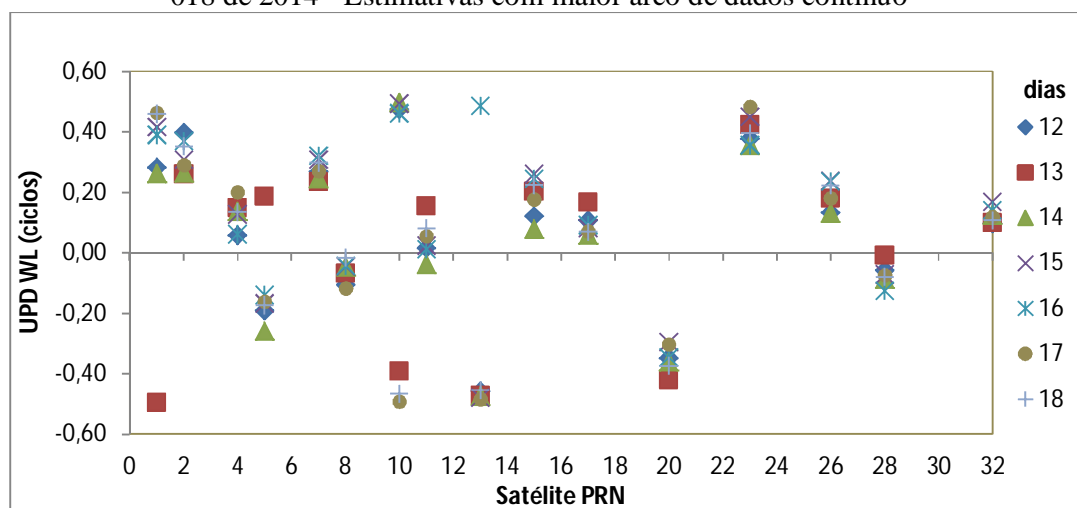
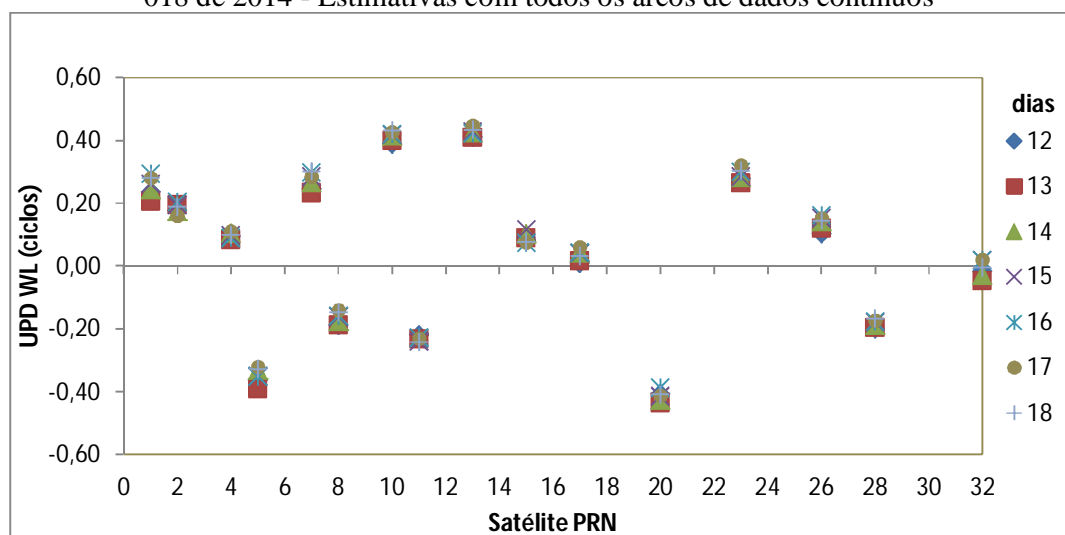


Figura 17 - Estimativas do UPD_WL com relação ao PRN9 para os dias 012 a 018 de 2014 - Estimativas com todos os arcos de dados contínuos



A partir das figuras 16 e 17 verifica-se que os UPDs_WL são claramente diferentes de zero. Analisando visualmente as figuras, observa-se que os valores dos UPDs_WL para os sete dias, para os mesmos satélites, são muito próximos uns dos outros, o que já é um indicador da estabilidade dos UPDs_WL. Na figura 17 os valores de UPD_WL, estimados com todos os arcos contínuos, para os sete dias estão mais próximos uns dos outros do que os estimados somente com o maior arco (figura 16).

A figura 18 apresenta os desvios padrão UPD_WL calculados com o maior arco de dados contínuos para alguns satélites e a figura 19 apresenta os desvios padrão UPD_WL

calculados com todos os arcos de dados contínuos para os mesmos satélites. O satélite utilizado como base para ambos os experimentos citados acima foi o PRN09.

Figura 18 – Desvio Padrão UPD_WL com relação ao PRN09 para os dias 012 a 018 de 2014 – Estimativas com maior arco de dados contínuo

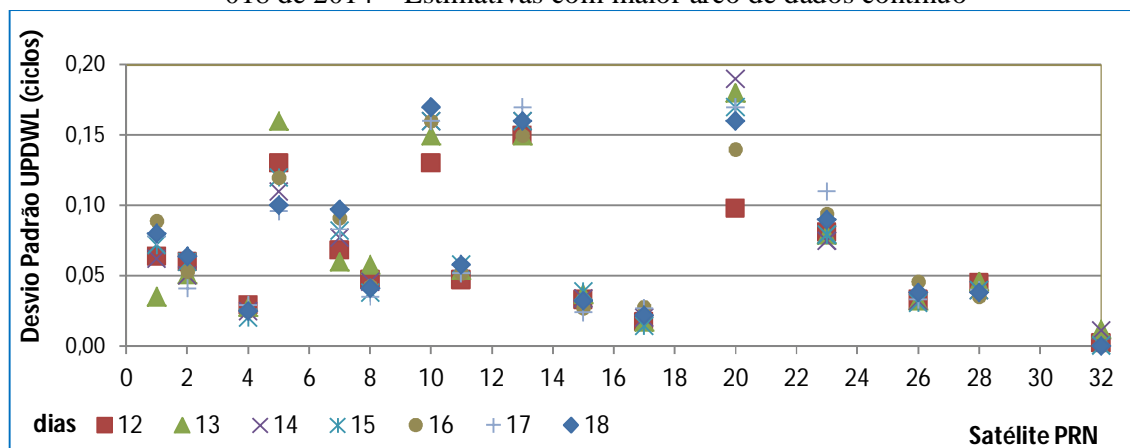
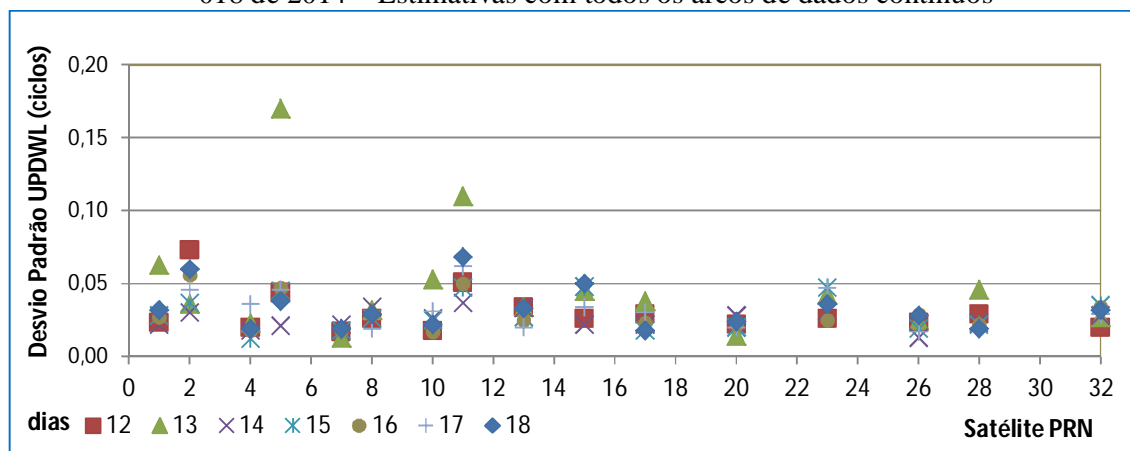


Figura 19 – Desvio Padrão UPD_WL com relação ao PRN09 para os dias 012 a 018 de 2014 – Estimativas com todos os arcos de dados contínuos



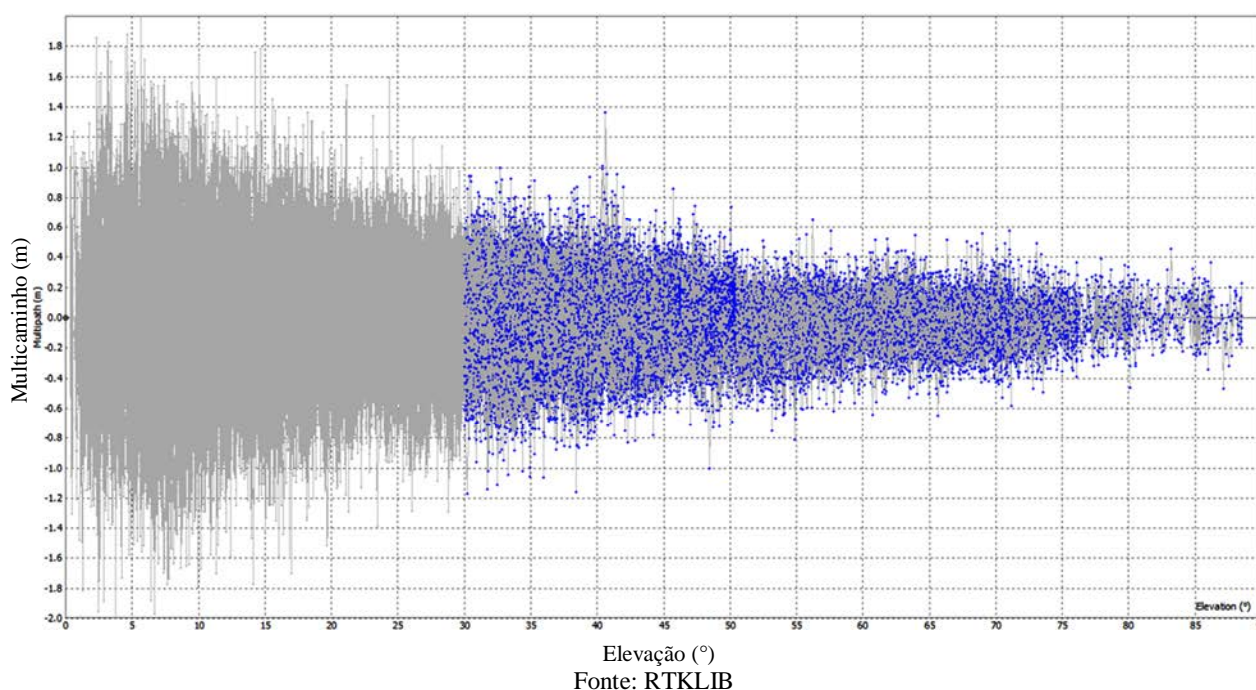
A partir das figuras 18 e 19 observa-se que os desvios padrão UPD_WL estimados com todos os arcos contínuos de ambiguidades WL são menores do que os estimados somente com o maior arco contínuo de ambiguidades WL. Considerando somente o maior arco de dados contínuo para o cálculo do UPD_WL tem-se uma estimativa de SD de ambiguidades WL para cada par de satélites em cada estação. Como a rede GNSS usada para estes experimentos é de aproximadamente 100 estações, conforme mostrado na seção 4.1, significa que para cada par de satélites tem-se somente 100 observações de ambiguidades WL para a estimativa dos UPDs_WL.

A quantidade de informações para a estimativa dos UPDs_WL aumenta consideravelmente, tendo várias SD de ambiguidades WL para cada par de satélites em cada estação GNSS. Desta forma, o número de possíveis SD de ambiguidades WL que serão utilizadas no cálculo UPD_WL para um determinado par de satélites dependerá da simultaneidade de observações entre os dois satélites e das discontinuidades dos arcos de ambiguidades.

Diante dos valores estimados do UPD_WL e de seus desvios padrão, observa-se que as estimativas a partir de ambiguidades WL com todos os possíveis arcos contínuos proporcionaram os melhores resultados. Sendo assim, essa foi a estratégia adotada no trabalho para os cálculos dos UPD_WL e UPD_NL.

Conforme equação (51), os UPDs_WL são estimados a partir da combinação linear *Melbourne–Wübbena*, na qual utiliza medidas de pseudodistâncias, sendo fortemente influenciada por efeitos de multicaminho presentes nas mesmas. A figura 20 apresenta os valores de multicaminho de acordo com o ângulo de elevação dos satélites para a estação BRAZ, no dia 012 de 2014.

Figura 20 - Multicaminho para a estação BRAZ, dia 012 de 2014



A partir da figura 20 é possível verificar que quanto maior o ângulo de elevação, menor é o efeito de multicaminho. Desta forma, adotou-se para os cálculos dos UPDs_WL máscara de elevação de 30 graus. É importante salientar que cada receptor da rede GNSS, com ângulo de elevação de 30 graus, rastreia em torno de seis a sete satélites GPS, o pode ser visto,

A partir dos resultados apresentados na figura 22 observa-se que a diferença média entre o maior valor de UPD_WL e o menor valor, para o mesmo par de satélites, durante sete dias, foi de aproximadamente 0,05 ciclos, o que significa uma boa concordância entre si para vários dias. A tabela 1 apresenta os valores em ciclos de UPD_WL e desvio padrão para os dias 012 a 018 de 2014, para os mesmo satélites apresentados na figura 22. O desvio padrão também se manteve estável, por volta de 0,05 ciclos.

Gabor (1999) estimou por meio de Simples Diferença os UPDs_WL para 515 dias. Nesse trabalho, todos os UPDs_WL formados para os satélites sofreram taxa de variação menor que 0,1 ciclos por ano e a estimativa dos UPDs_WL com precisão de 0,05 ciclos se mostrou boa o suficiente para fixação das ambiguidades. Ge *et al.* (2008) mostrou que o UPD_WL varia dentro de $\pm 0,05$ ciclos dentro de duas semanas. Os resultados apresentados na figura 22 e tabela 1 confirmam essas comprovações, mostrando que os UPDs_WL são bastante estáveis ao longo de alguns dias e podem ser estimados com precisão numa taxa de atualização de alguns dias, tendo estabilidade e qualidade suficientes para se alcançar a fixação para o inteiro das ambiguidades WL.

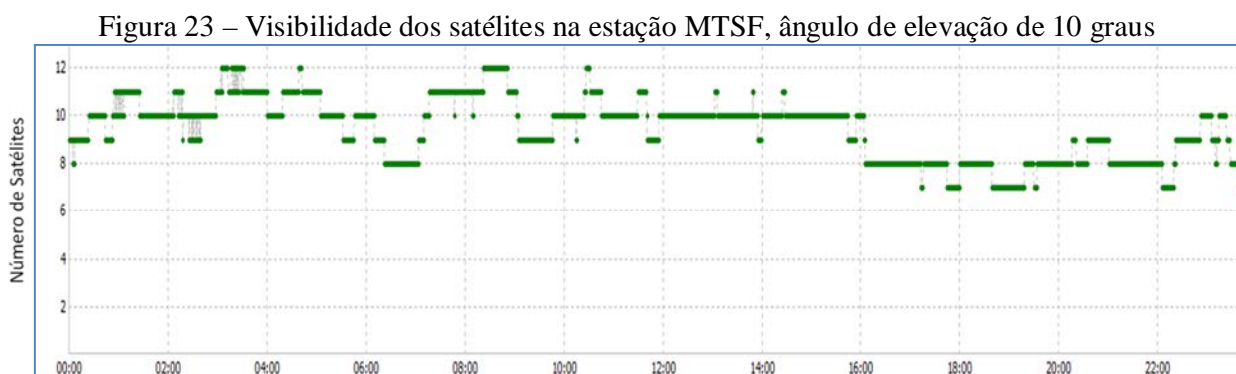
Tabela 1 - UPD_WL para os satélites com relação ao PRN9 e seus desvios padrão

Dia	012		013		014		015		016		017		018	
	UPD WL	Desv. Pad.	UPD WL	Desv. Pad.	UPD WL	Desv. Pad.	UPD WL	Desv. Pad.	UPD WL	Desv. Pad.	UPD WL	Desv. Pad.	UPD WL	Desv. Pad.
PRN1	0,24	0,06	0,21	0,04	0,25	0,06	0,26	0,07	0,29	0,09	0,28	0,08	0,28	0,08
PRN2	0,18	0,06	0,20	0,05	0,18	0,05	0,20	0,06	0,21	0,05	0,16	0,04	0,19	0,06
PRN4	0,10	0,03	0,08	0,03	0,11	0,03	0,10	0,02	0,09	0,03	0,11	0,03	0,10	0,03
PRN5	-0,36	0,13	-0,39	0,16	-0,33	0,11	-0,35	0,12	-0,35	0,12	-0,32	0,10	-0,33	0,10
PRN7	0,25	0,07	0,23	0,06	0,27	0,08	0,29	0,08	0,30	0,09	0,29	0,08	0,30	0,10
PRN8	-0,19	0,05	-0,19	0,06	-0,17	0,05	-0,16	0,04	-0,16	0,04	-0,14	0,04	-0,15	0,04
PRN10	0,39	0,13	0,40	0,15	0,42	0,16	0,42	0,16	0,42	0,16	0,43	0,16	0,43	0,17
PRN13	0,41	0,15	0,41	0,15	0,43	0,16	0,43	0,16	0,42	0,15	0,45	0,17	0,44	0,16
PRN15	0,09	0,03	0,09	0,04	0,10	0,03	0,12	0,04	0,07	0,03	0,08	0,02	0,08	0,03
PRN17	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04	0,02	0,04	0,01	0,04	0,03	0,06	0,03	0,03	0,02
PRN20	-0,41	0,10	-0,43	0,18	-0,43	0,19	-0,41	0,17	-0,39	0,14	-0,41	0,17	-0,41	0,16
PRN23	0,28	0,08	0,27	0,08	0,28	0,08	0,29	0,08	0,30	0,09	0,32	0,11	0,30	0,09
PRN26	0,10	0,03	0,12	0,03	0,14	0,03	0,15	0,03	0,16	0,05	0,15	0,03	0,15	0,04
PRN28	-0,20	0,05	-0,20	0,05	-0,19	0,04	-0,18	0,04	-0,18	0,04	-0,17	0,04	-0,17	0,04

5.1.2 Estimativa do UPD_NL

Após as ambiguidades WL serem fixadas, foram estimados os UPDs_NL a partir de todos os arcos de dados contínuos das ambiguidades NL, dentro da rede GNSS. Para as

estimativas das ambiguidades NL é necessário realizar processamentos PPP para cada estação pertencente à rede. A máscara de elevação utilizada nos processamentos foi de 10 graus. A quantidade de satélites visíveis nessas estimativas está diretamente relacionada com a máscara de elevação adotada. A figura 23 apresenta a visibilidade dos satélites para a estação MTSF (Latitude: -11° ; Longitude: -50°), com máscara de elevação de 10 graus.



Fonte: Aplicativo RTKLIB

Como pode ser visto na figura 23, para a estação MTSF, com ângulo de elevação de 10 graus, o receptor rastreia em torno de dez satélites GPS. O mesmo acontece para as demais estações da rede GNSS. Esse número de satélites é superior ao utilizado no cálculo dos UPDs_WL, conforme figura 21.

As figuras 24 e 25 apresentam, respectivamente, a estimativa UPD_NL e seu desvio padrão com dados de 24 horas, para vários satélites, em diferentes dias, com a finalidade de verificar sua estabilidade diária.

Figura 24 - Estabilidade diária do UPD_NL para alguns satélites, com relação ao PRN9

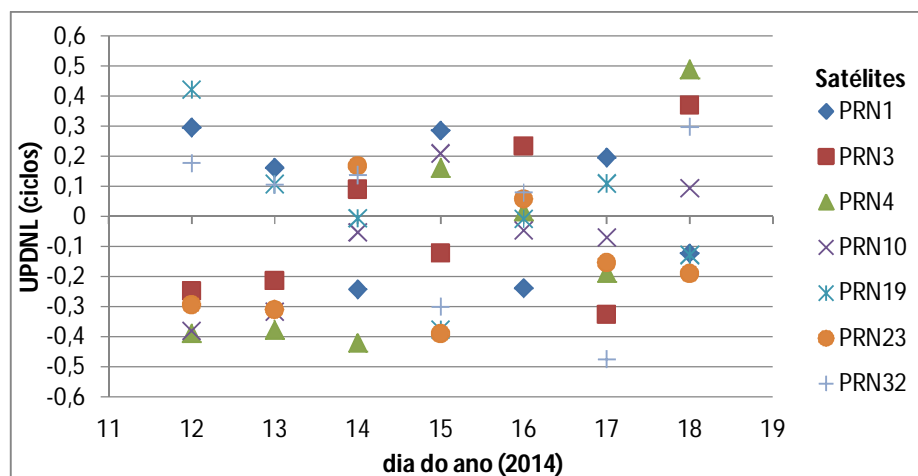
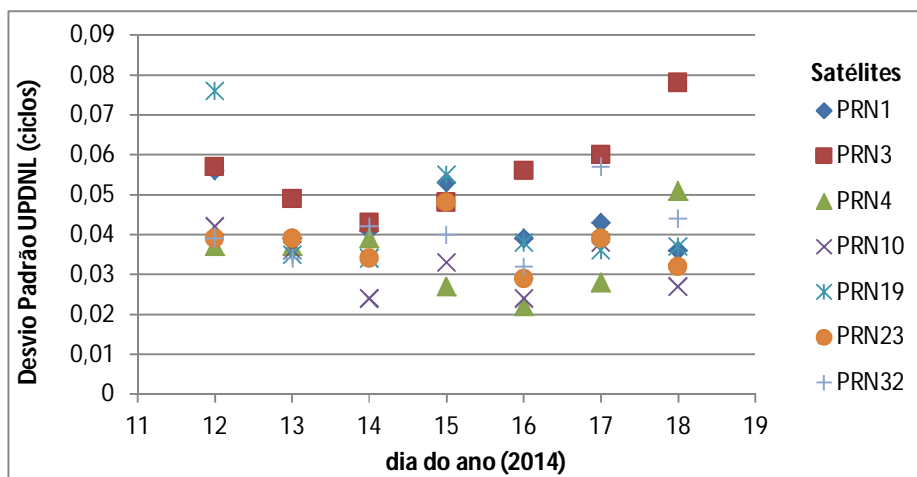


Figura 25–Desvio padrão UPD_NL para alguns satélites, com relação ao PRN9



A partir da figura 24 observa-se que os UPDs_NL não são estáveis como os da WL, conforme apresentado na seção 5.1.1. A variação média do UPD_NL para sete dias foi maior que 0,4 ciclos, mesmo possuindo valores de desvio padrão melhores que 0,1 ciclos, como mostrado na figura 25.

Gabor (1999) relata que o UPD_NL possui baixa estabilidade diária. Ge *et al.* (2008) verificou por meio de experimentos que o UPD_NL variava até 0,4 ciclos dentro de 24 horas e podem ser considerados estáveis se as estimativas temporais e desvio padrão concordarem entre si melhor que 0,1 ciclos.

Geng *et al.* (2009) apresentou experimentos que confirmam que o UPD_NL para um par de satélite pode ser precisamente determinado a cada passagem completa dentro de uma rede GNSS. Nessa abordagem, as partes fracionárias de todas as ambiguidades NL estimadas para um par de satélites durante uma passagem completa são utilizadas para calcular a média visando estimar um UPD_NL e há usualmente dois UPD_NL estimados a cada 24 horas.

Ge *et al.* (2008) afirmam que por cerca de 2 a 3 horas os UPDs_NL são muito estáveis, especialmente se foram estimadas com simultaneidade de dados. Entretanto, sugeriram a estimativa do UPD_NL a cada 15 minutos.

Os valores referentes aos UPDs_NL, no dia 015 de 2014, apresentados a seguir nas figuras 26 e 27, confirmam a estabilidade dos UPDs_NL para um período de poucas horas. Até duas horas (480 épocas de 15 segundos) os UPDs_NL de uma forma geral concordam entre si algo em torno de 0,1 ciclos. Com três horas (720 épocas de 15 segundos), as estimativas de UPD_NL apresentam concordância um pouco maior que 0,1 ciclos. A tabela 2

apresenta as estimativas UPD_NL e seus respectivos desvios padrão para 1440 épocas, no dia 015 de 2014, onde pode ser confirmada a estabilidade dos UPDs_NL para períodos de no mínimo duas horas de dados.

Figura 26– UPD_NL para alguns satélites, com relação ao PRN9, dia 015 de 2014

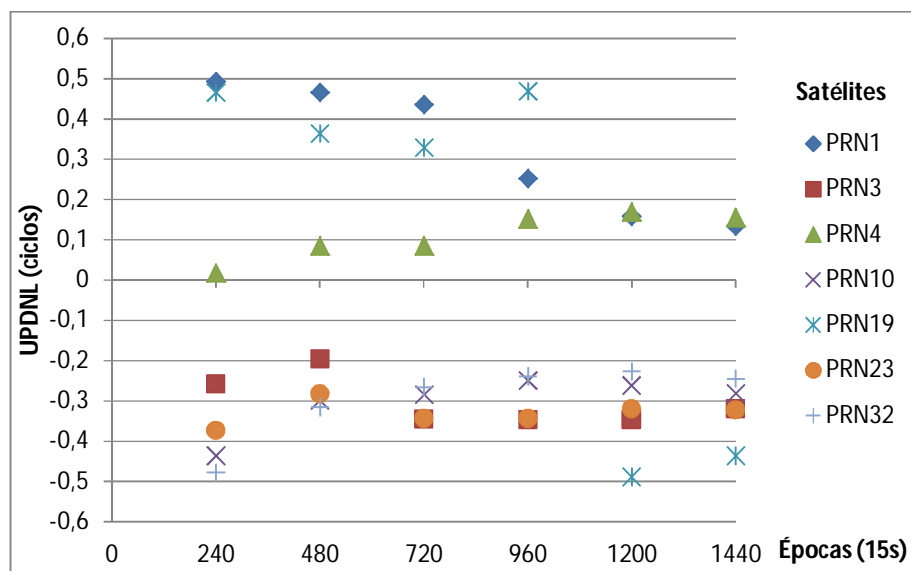


Figura 27– Desvio padrão UPD_NL para alguns satélites, com relação ao PRN9

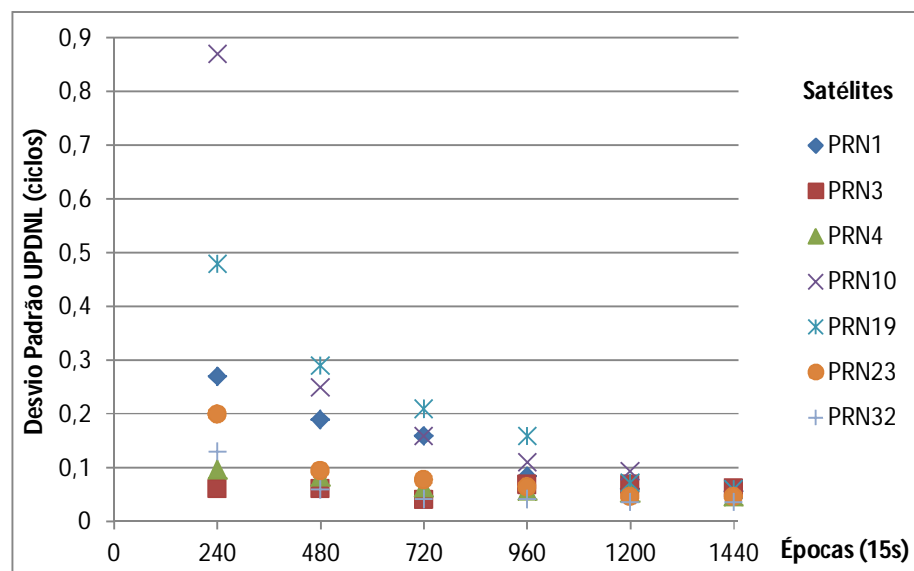


Tabela 2 - UPD_NL para os satélites com relação ao PRN9 e seus desvios padrão

Época (15s)	240		480		720		960		1200		1440	
	UPD NL	Desv. Pad.	UPD NL	Desv. Pad.	UPD NL	Desv. Pad.	UPD NL	Desv. Pad.	UPD NL	Desv. Pad.	UPD NL	Desv. Pad.
PRN1	0,49	0,27	0,47	0,19	0,44	0,16	0,25	0,09	0,16	0,06	0,13	0,06
PRN3	-0,26	0,06	-0,20	0,06	-0,35	0,04	-0,35	0,07	-0,35	0,07	-0,32	0,06
PRN4	0,02	0,10	0,09	0,08	0,08	0,06	0,15	0,06	0,17	0,05	0,15	0,05
PRN7	0,12	0,11	0,12	0,06	0,11	0,05	0,13	0,04	0,14	0,04	0,14	0,03
PRN10	-0,44	0,87	-0,30	0,25	-0,28	0,16	-0,25	0,11	-0,26	0,09	-0,28	0,06
PRN11	0,49	0,28	0,49	0,19	0,46	0,17	0,48	0,13	0,35	0,09	0,32	0,08
PRN13	-0,38	0,06	-0,20	0,06	-0,21	0,05	-0,22	0,04	-0,25	0,03	-0,27	0,03
PRN16	-0,11	0,10	-0,19	0,08	-0,33	0,08	0,42	0,11	0,46	0,11	-0,45	0,08
PRN19	0,47	0,48	0,36	0,29	0,33	0,21	0,47	0,16	-0,49	0,07	-0,44	0,06
PRN20	0,11	0,11	0,17	0,10	0,12	0,06	0,08	0,04	0,09	0,04	0,09	0,04
PRN23	-0,37	0,20	-0,28	0,10	-0,34	0,08	-0,34	0,06	-0,32	0,05	-0,32	0,05
PRN28	0,13	0,26	0,03	0,05	-0,03	0,04	-0,01	0,03	0,02	0,04	0,01	0,03
PRN32	-0,48	0,13	-0,32	0,06	-0,27	0,04	-0,24	0,04	-0,23	0,04	-0,25	0,04

Os experimentos de PPP com fixação de ambiguidades foram realizados com os UPDs_WL estimados com 24 horas de dados de observação, com máscara de elevação de 30 graus e os UPDs_NL estimados com uma hora de dados, com máscara de elevação de 10 graus. Esses resultados são apresentados a seguir.

5.2 Resultados e análises dos experimentos com o *software* RT_PPP_AR

5.2.1 Solução de Ambiguidades no PPP no modo estático

Nesta seção são apresentados os resultados PPP gerados pelo *software* RT_PPP_AR para dados coletados no modo estático, com solução das ambiguidades reais e inteiras, onde as soluções foram comparadas e calculadas as melhorias obtidas com a aplicação da metodologia proposta e desenvolvida nesta Tese. Os experimentos foram realizados considerando uma hora de dados, cujo intervalo de tempo foi diminuindo, realizando então experimentos com 45 minutos, 30 minutos, 15 minutos, conforme mostrado na seção 4.2.1. Os dados foram coletados por um período de oito horas, das 8h às 16h, durante os dias 012 a 018 de 2014, com taxa de coleta de 15 segundos.

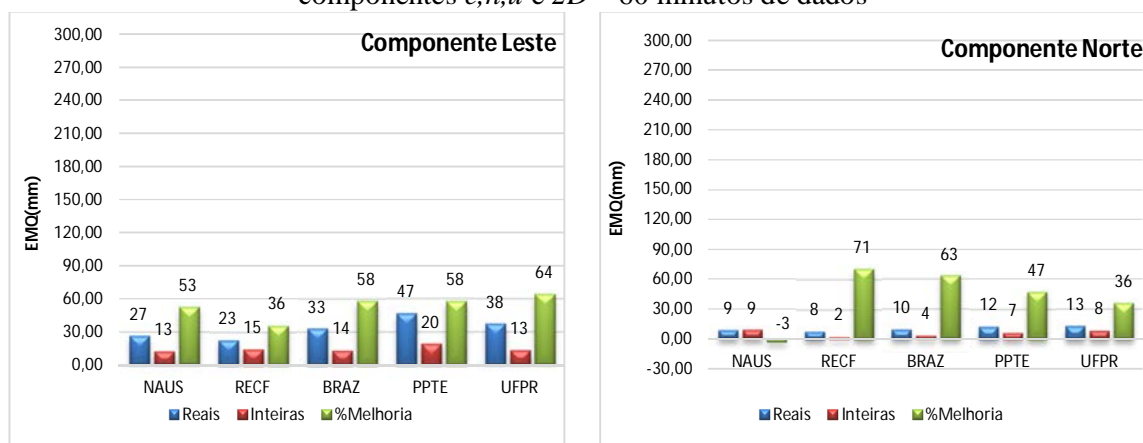
Os valores de EMQ (Erro Médio Quadrático) das componentes leste (e), norte (n), vertical (u) no SGL, desvio padrão, as porcentagens de fixação resultantes de cada processamento e os valores do *Ratio* são apresentados adiante. A porcentagem de melhoria para

as componentes do SGL (%Melhoria) foi calculada para avaliar de forma mais clara os resultados obtidos com ambiguidades fixas com relação aos de ambiguidades reais. Essa porcentagem aparece em alguns resultados como negativa, que para fins deste trabalho representa o indicativo não houve melhoria, mas sim que a solução degradou. Os valores de EMQ foram obtidos através da resultante do erro médio (tendência) e do desvio padrão (incerteza), o que representa uma medida de acurácia. Com relação às análises das componentes no SGL, a resultante horizontal (2D) foi calculada pela resultante das discrepâncias ($\sqrt{e^2 + n^2}$). A componente vertical foi analisada individualmente. O valor crítico do *Ratio* adotado na solução das ambiguidades NL foi 3. De modo geral, as SD de ambiguidades WL tiveram porcentagem de fixação de 98% e as SD de ambiguidades NL porcentagem de 85%.

5.2.1.1 PPP com 60 minutos de dados

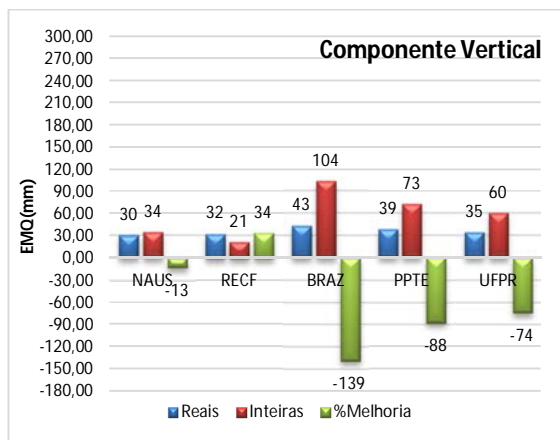
Os resultados referentes aos processamentos considerando 60 minutos de dados, com soluções de ambiguidades reais e inteiras, para os dias 012 a 018 de 2014 são apresentados para as cinco estações de teste na figura 28 e na tabela 3. São apresentados o EMQ, as porcentagens de melhoria para as componentes do SGL, leste (a), norte (b), vertical (c) e resultante horizontal (d), bem como a porcentagem de ambiguidades fixas e os valores do *Ratio*.

Figura 28– EMQ das soluções estimadas com ambiguidades reais e inteiras, com relação às componentes e, n, u e $2D$ – 60 minutos de dados

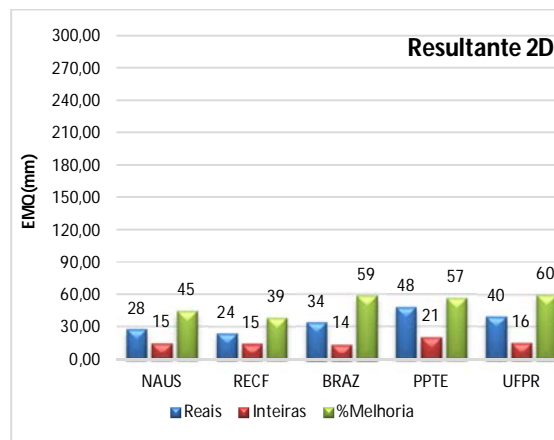


(a)

(b)



(c)



(d)

Tabela 3–EMQ para as componentes e , n , u , resultante horizontal, porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras, $Ratio$ e porcentagem de ambiguidades fixas– 60 minutos de dados

EQM Estação	Soluções reais (mm)				Soluções Inteiras (mm)				%melhoria				$Ratio$	%Fix
	e	n	u	2D	e	n	u	2D	e	n	u	2D		
NAUS	26,6	8,5	30,3	28,0	12,6	8,8	34,2	15,4	52,6	-3,0	-13,0	45,0	15,6	68
RECF	22,8	8,1	32,3	24,2	14,6	2,4	21,5	14,8	36,2	70,7	33,6	39,0	21,8	73
BRAZ	32,9	9,6	43,5	34,3	13,7	3,5	103,8	14,2	58,3	63,3	-138,9	58,7	26,0	86
PPTE	46,8	12,4	38,8	48,4	19,8	6,5	72,9	20,9	57,7	47,2	-87,7	56,9	37,4	79
UFPR	37,7	13,2	34,7	39,9	13,5	8,4	60,4	15,9	64,2	35,8	-74,3	60,1	36,5	97

Por meio desses resultados é possível verificar que o EMQ da resultante horizontal para todas as estações melhorou de 39 a 60% após a fixação das ambiguidades. Na estação BRAZ o EMQ da componente leste passou de 32,9 mm com soluções de ambiguidades reais para 13,7 mm com as soluções de ambiguidades inteiras. Para as outras estações, a melhoria do EMQ também foi significativa, com a menor porcentagem de melhoria de 36,2 % para a estação RECF. Na estação NAUS, as componentes n e u não obtiveram melhoria com a solução das ambiguidades como inteiras. As estações BRAZ, PPTE e UFPR também não tiveram resultados satisfatórios para a componente vertical. Esses resultados referentes à componente vertical são analisados no final desta seção 5.2.1.

A tabela 4 contém os resultados de desvio padrão para as componentes do SGL. A porcentagem de melhoria, para todas as estações, na componente leste, ficou em todo de 90%. O desvio padrão em e , para a estação PPTE, passou de 33,9 mm, nas soluções de ambiguidades reais para 2 mm nas soluções de ambiguidades inteiras. Já para n e u , para as

cinco estações, o desvio padrão das ambiguidades inteiras foi melhor do que o das ambiguidades reais de 50 a 77%.

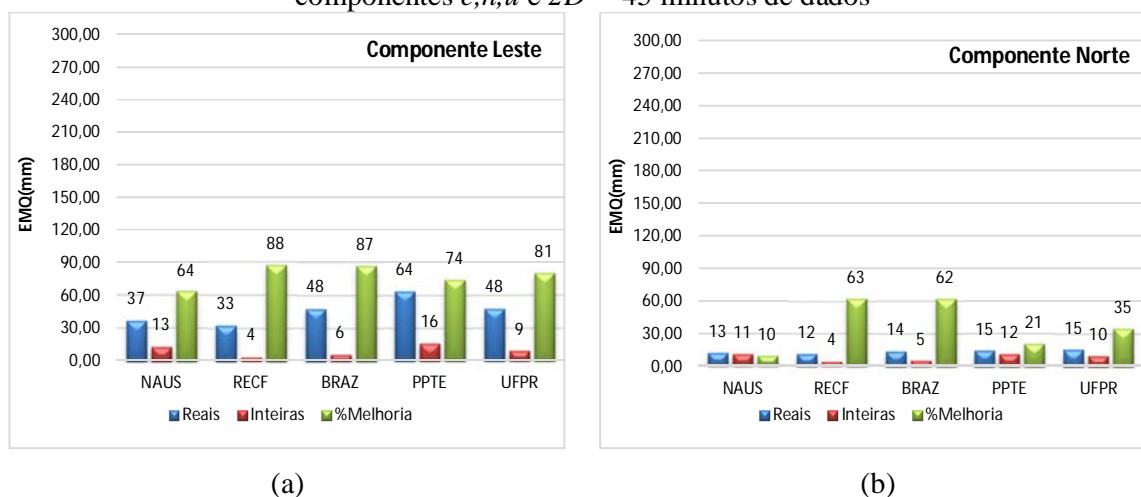
Tabela 4–Desvio Padrão para as componentes e , n , u , resultante horizontal e porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras – 60 minutos de dados

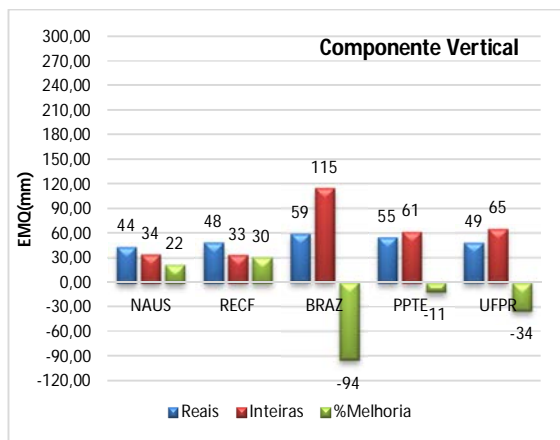
DesPad	Soluções reais (mm)			Soluções Inteiras (mm)			%melhoria		
	σe	σn	σu	σe	σn	σu	σe	σn	σu
NAUS	24,7	8,2	29,5	2,4	2,1	14,6	90,2	74,1	50,4
RECF	20,3	7,8	28,9	2,2	2,0	13,7	89,4	75,1	52,5
BRAZ	25,9	8,5	32,0	2,6	2,0	14,6	89,9	76,6	54,4
PPTE	33,9	9,2	38,6	2,0	2,4	15,1	94,2	73,6	60,8
UFPR	31,8	9,1	34,6	1,9	2,5	13,4	94,0	72,3	61,2

5.2.1.2 PPP com 45 minutos de dados

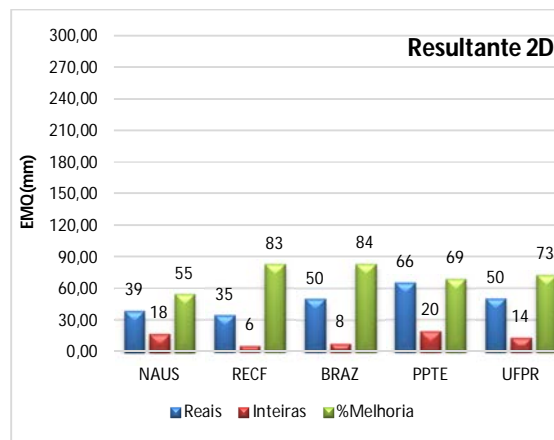
A figura 29 apresenta os valores correspondentes ao EMQ das soluções estimadas com ambiguidades reais e inteiras, com relação à componente leste (a), norte (b), vertical (c) e resultante horizontal (d), referentes aos processamentos com 45 minutos de dados de observação, para os dias 012 a 018 de 2014.

Figura 29– EMQ das soluções estimadas com ambiguidades reais e inteiras, com relação às componentes e, n, u e $2D$ – 45 minutos de dados





(c)



(d)

Com 45 minutos de dados os resultados do PPP com solução de ambiguidades inteiras são melhores que os resultados com ambiguidades reais, para a componente e , em todas as estações. Para essa componente, a menor porcentagem de melhoria do EMQ foi de 63,7% na estação NAUS e a maior porcentagem de 87,9% na estação RECF. Para a componente norte, em todas as estações, a porcentagem de melhoria do EMQ foi positiva para as ambiguidades inteiras sobre as reais. A resultante horizontal teve porcentagem de melhoria do EMQ mínima de 54,9% para a estação NAUS e máxima de 83,6% para a estação BRAZ. O valor do *Ratio* obtido na fixação das ambiguidades para a estação BRAZ foi de 16 e a porcentagem de fixação de 79%. Para a estação UFPR, o valor do *Ratio* foi de 19,1 e a porcentagem de fixação foi de 98%, conforme mostra a tabela 5.

Tabela 5–EMQ para as componentes e , n , u , resultante horizontal, porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras, *Ratio* e porcentagem de ambiguidades fixas – 45 minutos de dados

EQM	Soluções reais (mm)				Soluções Inteiras (mm)				%melhoria				<i>Ratio</i>	%Fix	
	Estação	e	n	u	2D	e	n	u	2D	e	n	u			2D
NAUS		36,8	12,6	43,5	38,8	13,4	11,3	34,1	17,5	63,7	9,6	21,6	54,9	10,9	60
RECF		32,7	11,8	48,0	34,8	3,9	4,4	33,4	5,9	87,9	62,7	30,5	83,0	19,5	73
BRAZ		48,1	14,2	59,1	50,1	6,2	5,4	114,9	8,2	87,0	62,1	-94,5	83,6	16,0	79
PPTE		63,9	15,0	55,2	65,6	16,4	11,8	61,4	20,2	74,4	21,3	-11,1	69,2	23,5	81
UFPR		48,1	15,4	48,7	50,5	9,3	10,0	65,3	13,7	80,6	35,0	-34,1	72,9	19,1	98

Os desvios padrão para e , n , u , e resultante horizontal são apresentados na tabela 6, onde se observa melhoria, para todas as estações, acima de 80% em e , 70% n e em u 48,7% para a estação NAUS e 67,4% para a estação UFPR.

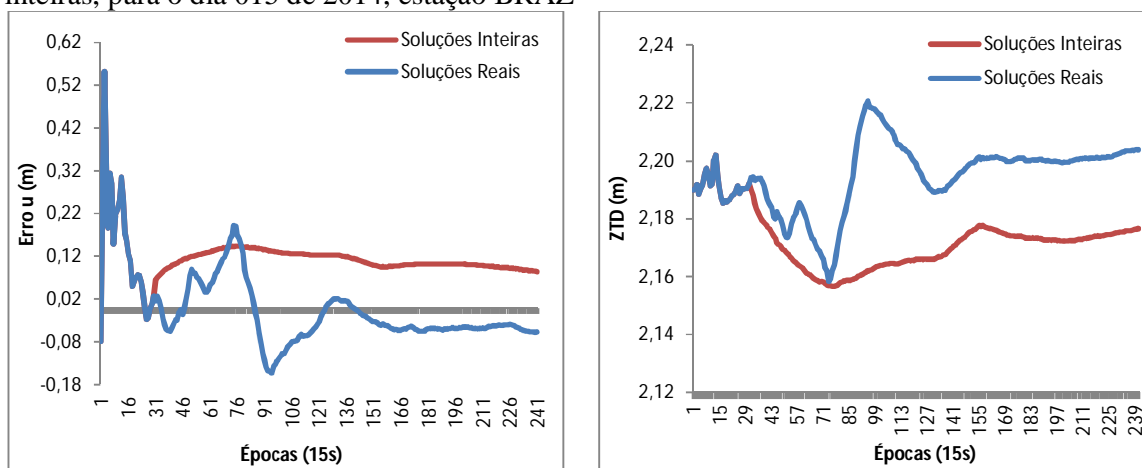
Tabela 6–Desvio Padrão para as componentes e , n , u , resultante horizontal e porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras – 45 minutos de dados

DesPad Estação	Soluções reais (mm)			Soluções Inteiras (mm)			%melhoria		
	σe	σn	σu	σe	σn	σu	σe	σn	σu
NAUS	36,2	12,2	42,9	5,8	3,3	22,0	83,9	73,4	48,7
RECF	29,8	11,7	42,5	2,6	2,3	16,9	91,1	80,4	60,3
BRAZ	37,4	12,6	46,4	3,0	2,5	18,6	91,9	80,5	59,9
PPTE	47,5	13,6	54,8	2,3	2,8	18,6	95,2	79,8	66,1
UFPR	44,3	13,5	48,7	2,2	2,9	15,9	95,1	78,5	67,4

Com 45 minutos de dados, para a componente vertical, de forma semelhante aos resultados com 60 minutos (figura 28c), nas estações BRAZ, PPTE e UFPR, o EMQ da componente vertical degradou após a solução das ambiguidades (figura 29c), o que significa que essa componente foi influenciada de forma negativa com a fixação das ambiguidades.

A estação BRAZ foi a que apresentou os piores resultados para a componente vertical nesses dois experimentos. Alguns fatores podem estar relacionados com o comportamento dessa componente, como o atraso troposférico, por exemplo. Desta forma, realizou-se um processamento de 60 minutos com dados da estação BRAZ, sem tempo mínimo determinado para fixação das ambiguidades, com o objetivo de analisar o comportamento do ZTD com relação a componente vertical. As figuras 30 e 31 apresentam um comparativo entre o “erro” (discrepâncias) na componente vertical (a) e o ZTD (b) estimado no PPP no modo estático para a estação BRAZ, nos dias 15 e 16 de 2014.

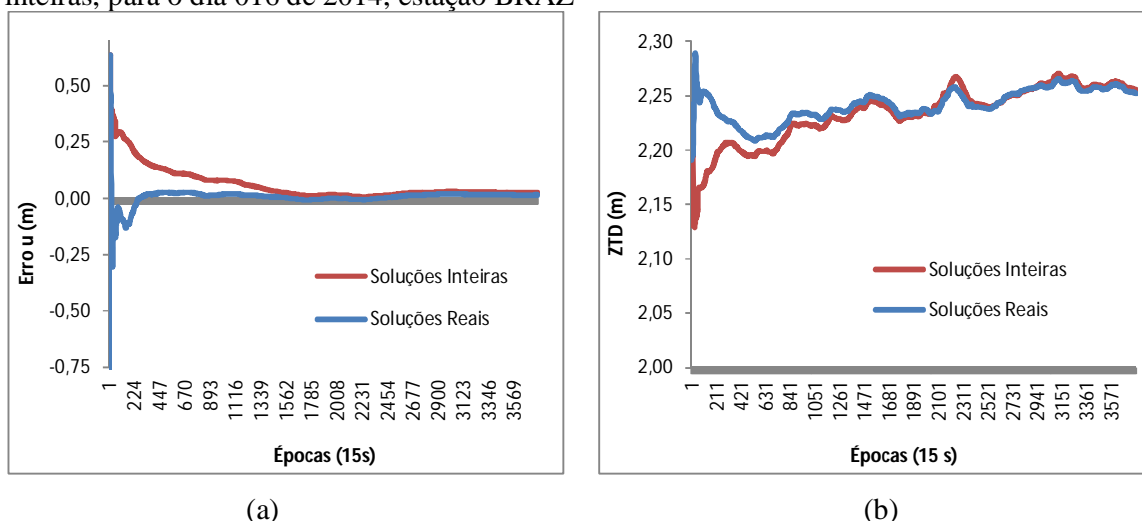
Figura 30 – Erro em u (a) e ZTD (b) das soluções estimadas com ambiguidades reais e inteiras, para o dia 015 de 2014, estação BRAZ



(a)

(b)

Figura 31 – Erro em u (a) e ZTD (b) das soluções estimadas com ambiguidades reais e inteiras, para o dia 016 de 2014, estação BRAZ



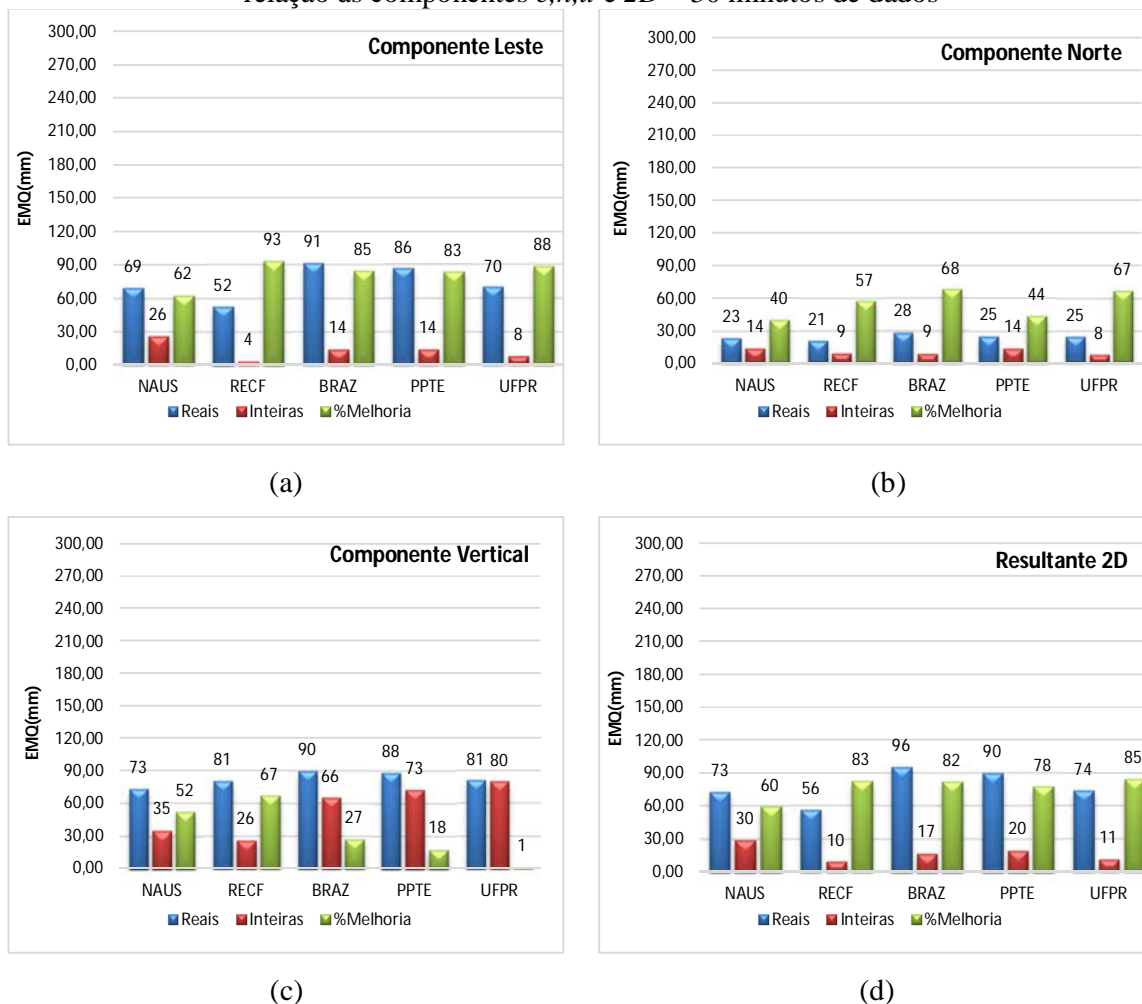
Nas figuras 30 e 31 observa-se que a componente vertical tem comportamento inverso ao comportamento do ZTD, demonstrando alta correlação. Em ambos os dias, 015 e 016 de 2014, o erro na componente vertical aumentou após a solução das ambiguidades. É provável que a troposfera tenha influenciado negativamente na componente vertical após fixação das ambiguidades, pois segundo Blewitt (1989), a componente vertical está fortemente correlacionada com a estimativa do atraso troposférico.

Geng et al. (2009) verificou que se o ZTD não é estimado juntamente com os outros parâmetros, mas fixados com os valores precisos derivados de estimativas diárias, a quantidade de soluções degradadas após a fixação das ambiguidades é significativamente reduzida. Além disso, foi também observado que na grande maioria das soluções que tiveram acréscimo do EMQ após a fixação das ambiguidades, o acréscimo ocorreu para a componente vertical. Isso demonstra que ZTD é um fator crucial que influencia na solução das ambiguidades no PPP e está diretamente ligado com as soluções degradadas na componente vertical.

5.2.1.3 PPP com 30 minutos de dados

Tal como apresentado para os casos de 60 e 45 minutos, a figura 32 apresenta os resultados referentes aos processamentos com 30 minutos de dados.

Figura 32– EMQ das soluções estimadas com ambiguidades reais e inteiras, com relação às componentes e, n, u e $2D$ – 30 minutos de dados



A tabela 7 apresenta, além dos valores contidos na figura 32, também os valores referentes às percentagens de fixação e valores de *Ratio*. A partir dos valores contidos nela é possível verificar que a componente e teve a maior percentagem de melhoria comparada com as outras componentes, para todas as estações. Na estação UFPR, para a componente vertical não houve melhoria significativa e a resultante horizontal obteve a maior percentagem de melhoria dentre todas as estações, o que justifica o alto valor de *Ratio* (10,5) e percentagem de fixação de 97% das ambiguidades.

Tabela 7–EMQ para as componentes e , n , u , resultante horizontal, porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras, *Ratio* e porcentagem de ambiguidades fixas – 30 minutos de dados

EQM	Soluções reais (mm)				Soluções Inteiras (mm)				%melhoria				Ratio	%Fix
	Estação	e	n	u	$2D$	e	n	u	$2D$	e	n	u		
NAUS	69,3	23,3	73,5	73,1	26,0	13,9	35,1	29,5	62,5	40,1	52,2	59,6	9,9	49
RECF	52,3	20,7	80,8	56,3	3,6	8,9	26,4	9,6	93,0	57,1	67,3	82,9	16,0	78
BRAZ	91,4	28,4	90,1	95,7	14,1	9,1	65,5	16,8	84,5	67,8	27,3	82,4	10,5	51
PPTE	86,4	24,9	88,5	89,9	14,3	13,9	72,8	20,0	83,5	43,9	17,6	77,8	10,9	78
UFPR	69,7	24,5	81,2	73,9	8,0	8,2	80,0	11,4	88,5	66,8	1,5	84,5	10,5	97

A partir da tabela 8, onde se apresenta os valores de desvio padrão para e , n , u e resultante horizontal, bem como a porcentagem de melhoria referentes às soluções reais e inteiras, pode-se observar que a porcentagem de melhoria do desvio padrão para a componente leste se manteve por volta de 90%, para a componente norte 80% e para a vertical de 53 a 73%. O desvio padrão em e da estação PPTE passou de 74,2 mm para 2,9 mm, após a solução das ambiguidades, representando 96,1% de melhoria.

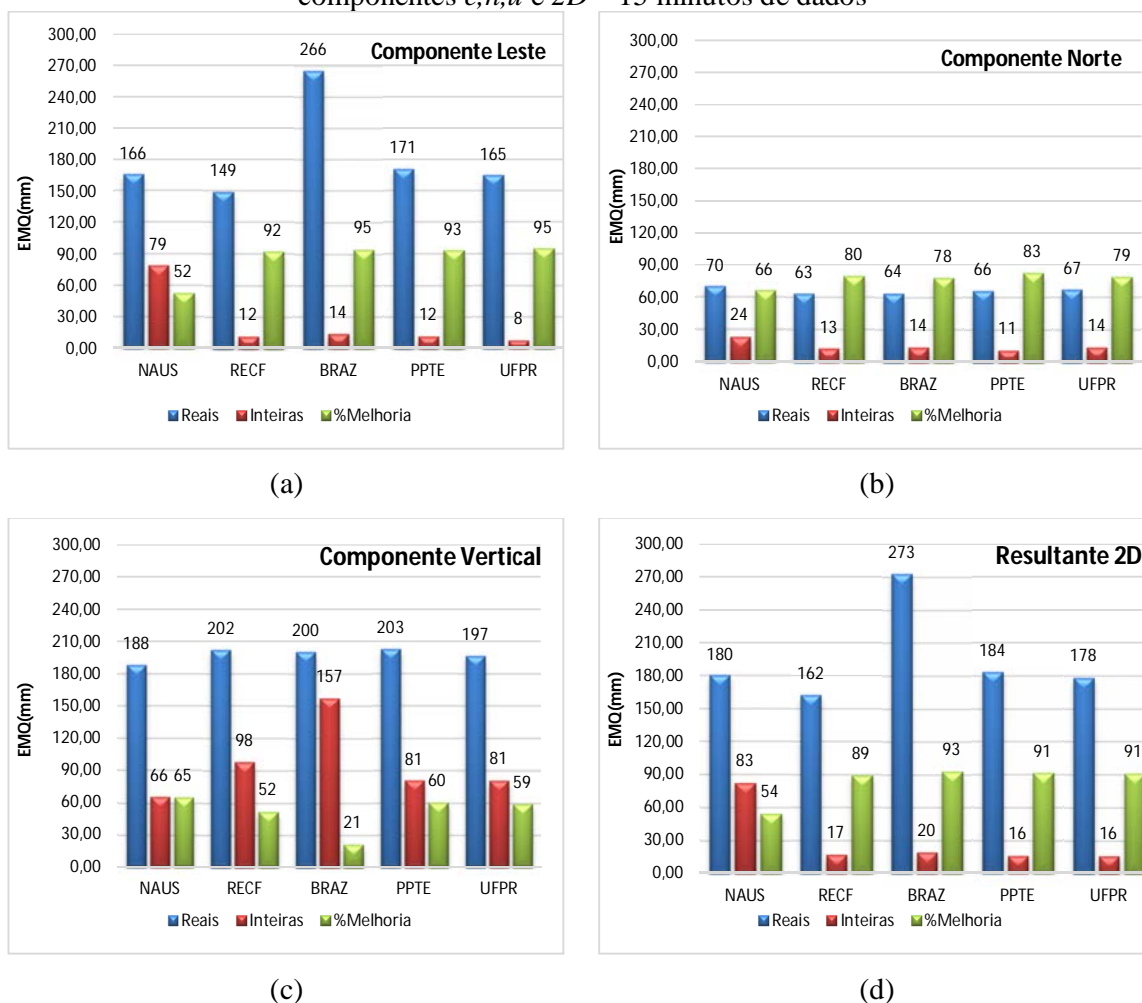
Tabela 8–Desvio Padrão para as componentes e , n , u , resultante horizontal e porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras – 30 minutos de dados

DesPad	Soluções reais (mm)			Soluções Inteiras (mm)			%melhoria		
	Estação	σe	σn	σu	σe	σn	σu	σe	σn
NAUS	60,5	21,2	72,0	5,8	3,7	33,5	90,4	82,4	53,5
RECF	51,6	20,7	77,7	3,3	2,9	24,1	93,5	86,1	69,0
BRAZ	62,7	22,3	81,6	3,3	2,9	23,6	94,8	87,2	71,0
PPTE	74,2	23,8	87,2	2,9	3,3	24,0	96,1	85,9	72,4
UFPR	69,4	23,9	81,2	2,7	3,4	21,5	96,2	85,8	73,5

5.2.1.4 PPP com 15 minutos de dados

Na figura 33 são apresentados os resultados referentes ao experimento realizado com dados de 15 minutos de dados, da mesma forma como apresentados nos experimentos de 60 a 30 minutos.

Figura 33– EMQ das soluções estimadas com ambiguidades reais e inteiras, com relação às componentes e, n, u e $2D$ – 15 minutos de dados



Na figura 33 observa-se que na estação BRAZ, para a componente leste o EMQ para a solução real teve valor máximo de 265,6 mm passando a ser 13,9 mm com ambiguidades fixas, o que representa uma melhoria de 94,8%. Para as outras estações a porcentagem de melhoria foi semelhante, com exceção da estação NAUS que apresentou melhoria de 52,4% para a componente leste. Para a componente norte, os valores de EMQ das soluções com ambiguidades reais tiveram valores por volta de 70 mm, com porcentagem de melhoria mínima de 66,3% para a estação NAUS e máxima de 83,1% para a estação PPTE.

A partir da figura 33 também é possível verificar que para a estação BRAZ, a componente vertical obteve menor porcentagem de melhoria com relação às outras estações, 21,4%. Para essa estação, o valor de EMQ da resultante 2D de ambiguidades reais foi de 273,4 mm, valor superior ao referente a todas as outras estações. Em consequência disso, a porcentagem de melhoria para a resultante desta estação também foi maior do que para as

outras estações, 92,8%. As porcentagens de melhoria da resultante 2D para todas as estações foram acima de 50%.

A tabela 9 apresenta os valores de EMQ, porcentagem de melhoria, valor do *Ratio* e porcentagem de fixação para as soluções de ambiguidades reais e inteiras para as componentes do SGL.

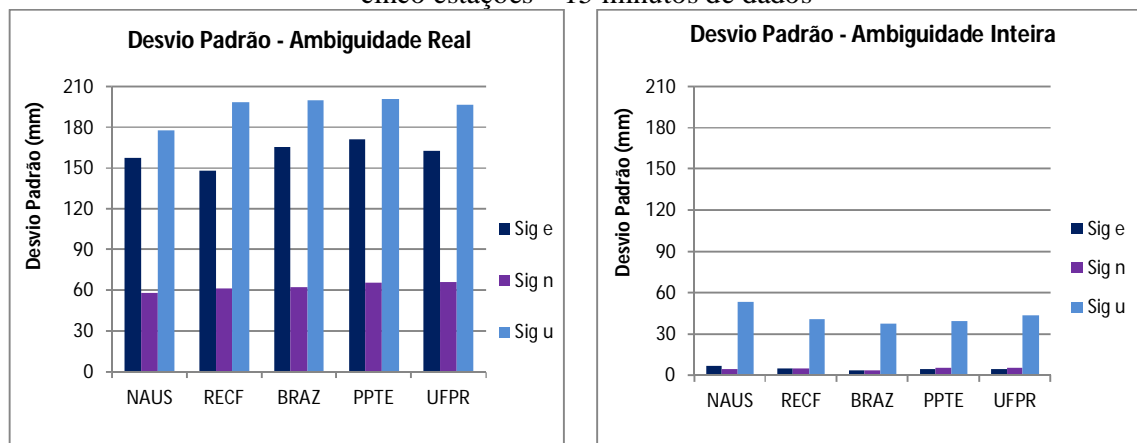
Tabela 9–EMQ para as componentes *e*, *n*, *u*, resultante horizontal, porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras, *Ratio* e porcentagem de ambiguidades fixas– 15 minutos de dados

EQM Estação	Soluções reais (mm)				Soluções Inteiras (mm)				%melhoria				<i>Ratio</i>	%Fix
	<i>e</i>	<i>n</i>	<i>u</i>	2D	<i>e</i>	<i>n</i>	<i>u</i>	2D	<i>e</i>	<i>n</i>	<i>u</i>	2D		
NAUS	166,2	70,3	187,8	180,4	79,0	23,7	65,5	82,5	52,4	66,3	65,1	54,3	6,7	25
RECF	149,4	63,3	202,2	162,2	11,7	12,7	97,9	17,2	92,2	79,9	51,6	89,4	7,1	85
BRAZ	265,6	63,9	200,2	273,2	13,9	13,8	157,4	19,5	94,8	78,5	21,4	92,8	5,9	37
PPTE	171,1	66,5	202,6	183,6	11,7	11,3	80,8	16,2	93,2	83,1	60,1	91,2	7,5	62
UFPR	165,1	67,3	196,5	178,3	8,0	14,0	80,8	16,1	95,2	79,3	58,9	91,0	5,7	98

Na tabela 9 pode-se observar que os valores obtidos de *Ratio* foram todos acima de 5 e que a porcentagem de fixação da estação NAUS foi de 25% e da estação BRAZ 37%, valores mais baixos do que para as demais estações, que tiveram valores acima de 60%, sendo que a estação UFPR alcançou porcentagem de fixação de 98%.

A figura 34 e tabela 10 apresentam os valores correspondentes ao desvio padrão para *e*, *n*, *u* e resultante horizontal, para os processamentos realizados com ambiguidades reais (a) e com ambiguidades inteiras (b).

Figura 34– Desvio Padrão das soluções estimadas com ambiguidades reais e inteiras, para as cinco estações – 15 minutos de dados



(a)

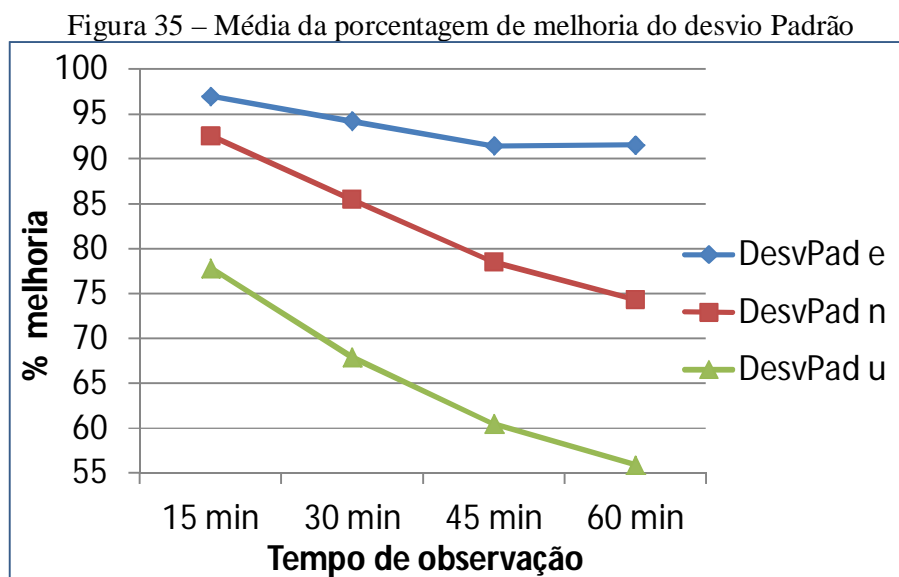
(b)

Tabela 10–Desvio Padrão para as componentes e , n , u , resultante horizontal e porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras – 15 minutos de dados

DesPad	Soluções reais (mm)			Soluções Inteiras (mm)			%melhoria		
	σe	σn	σu	σe	σn	σu	σe	σn	σu
NAUS	157,5	58,0	177,8	6,6	4,5	53,3	95,8	92,3	70,1
RECF	148,0	61,3	198,7	4,9	4,7	41,0	96,7	92,3	79,4
BRAZ	165,3	62,2	200,1	3,8	3,5	37,2	97,7	94,3	81,4
PPTE	171,0	65,3	200,9	4,6	5,2	39,6	97,3	92,1	80,3
UFPR	162,9	66,2	196,4	4,4	5,4	43,6	97,3	91,8	77,8

Para os valores de desvio padrão mostrados na tabela 10 e ilustrados na figura 34, os resultados de PPP com ambiguidades reais apresentaram maiores valores para as componentes e e u , passando de 200 mm, como é o caso da componente u na estação PPTE. Após a solução das ambiguidades, os valores de desvio padrão melhoraram acima de 90% para as componentes horizontais e de 70 a 81% para a vertical. Na estação BRAZ o desvio padrão da componente leste passou de 165,3 mm para 3,8 mm, com 97,7% de melhoria.

A figura 35 apresenta os resultados referentes à média, em todas as estações, das porcentagens de melhoria do desvio padrão, para os tempos de observação correspondentes aos quatro experimentos apresentados nesta seção.

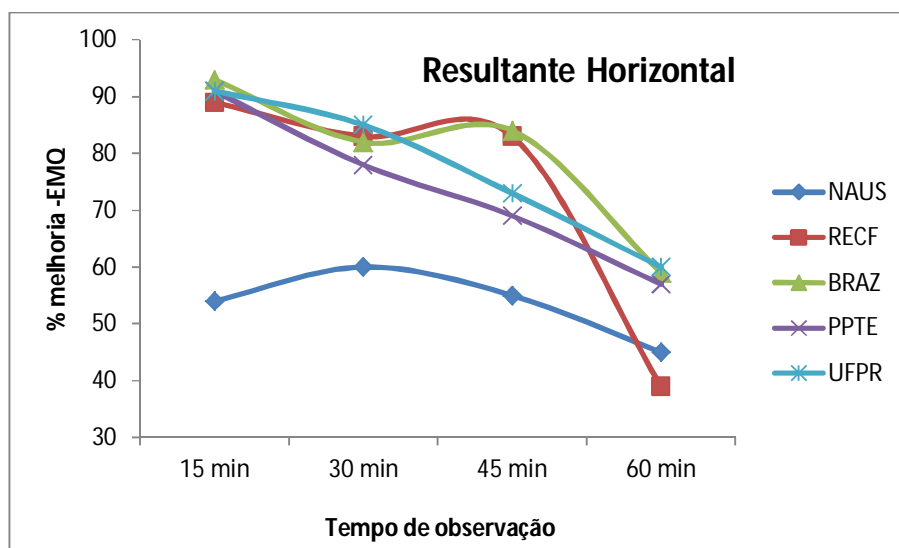


Por meio dos resultados do desvio padrão obtidos nos experimentos e apresentados na figura 35, verifica-se que a melhoria obtida com ambiguidades fixas será tanto maior quanto menor for o intervalo de tempo de dados utilizado. Também se observa que nos

quatro experimentos apresentados a menor porcentagem de melhoria obtida em termos de desvio padrão foi para a componente vertical.

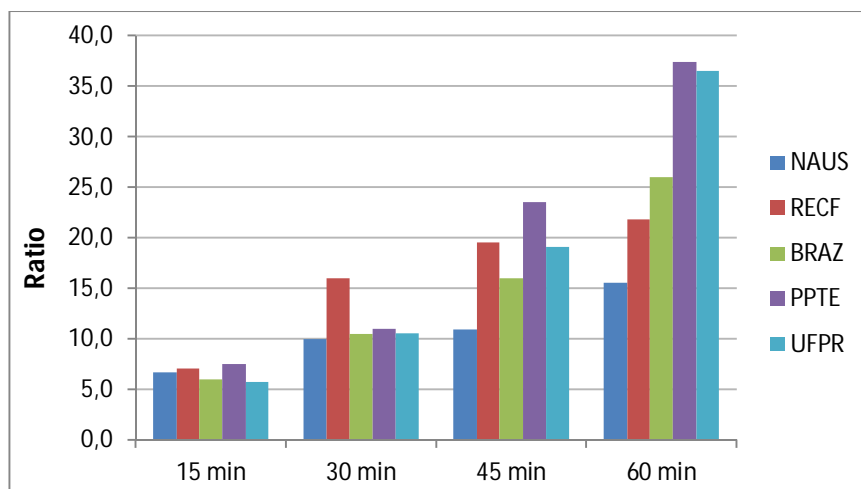
De uma forma geral, de acordo com o aumento do tempo de dados, a diferença entre os valores das soluções de ambiguidades fixas com relação ao de ambiguidades reais vai diminuindo, pois as ambiguidades reais vão convergindo com o aumento do tempo. Isso pode ser visto na figura 36, a qual apresenta as porcentagens de melhoria do EMQ para a resultante horizontal obtida nos experimentos de 15, 30, 45 e 60 min.

Figura 36– Porcentagem de melhoria do EMQ para a resultante horizontal



A figura 37 apresenta o valor médio do *Ratio*, dos processamentos de 15, 30, 45 e 60 minutos, para as cinco estações de teste. O menor valor de *Ratio* com 15 minutos de dados foi de 5,7 e com 60 minutos de dados foi de 15,6, destacando-se que o valor crítico adotado para o *Ratio* foi de 3. Diferente da porcentagem de melhoria, os valores de *Ratio* vão aumentando proporcionalmente ao tempo de dados utilizado. O maior valor de *Ratio* foi de 37,4 para a estação PPTE, com 60 minutos de dados.

Figura 37– Valor médio do *Ratio* para os processamentos de 15, 30,45 e 60 minutos



Em todos os quatro experimentos apresentados, a porcentagem de melhoria do EMQ foi significativamente superior para a componente leste. De acordo com Blewitt (1989) e Dong e Bock(1989), a componente leste possui uma forte correlação com as ambiguidades, sendo que a fixação das ambiguidades como inteiras pode melhorar significativamente essa componente.

5.2.1.5 PPP estático rápido

Nesta seção são apresentados os resultados referentes ao experimento realizado, com PPP no modo estático, sem fixação de tempo mínimo para que as ambiguidades fossem solucionadas como inteiro. O objetivo desse experimento foi analisar o desempenho do método de solução de ambiguidades proposto nesta tese, com relação à solução de ambiguidades fixas em intervalos de tempo menores do que 15 minutos.

Através do *software* RT_PPP_AR foram processados dados de observação com taxa de coleta de 15s, para duas estações de teste, BRAZ e PPTE, para os dias 012a 018 de 2014. Alguns desses resultados foram selecionados para serem apresentados adiante. Eles representam a maioria das situações que ocorreram com a fixação das ambiguidades nesse experimento. As análises com relação aos valores de EMQ e desvio padrão das componentes leste, norte, vertical e resultante horizontal foram feitas na mesma época em que aconteceu a fixação das ambiguidades. As figuras 38 e39 apresentam o erro para a resultante horizontal dos processamentos de PPP com ambiguidades reais e inteiras, para as duas estações.

Para a estação BRAZ (figura 38), as ambiguidades foram fixadas com 9 minutos de dados (36 épocas), com valor do *Ratio* para fixação das ambiguidades NL de 3,02. Na estação PPTE (figura 39), as ambiguidades alcançaram a solução fixa com 9 minutos e 45s (39 épocas), com *Ratio* de 3,18.

Figura 38– Erro das soluções estimadas com ambiguidades reais e inteiras, para a resultante horizontal – BRAZ, dia 015 de 2014

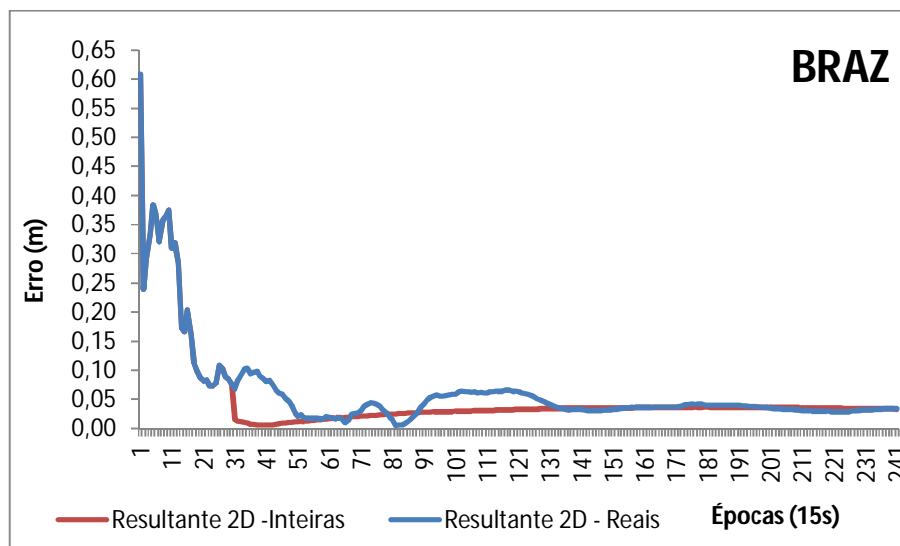
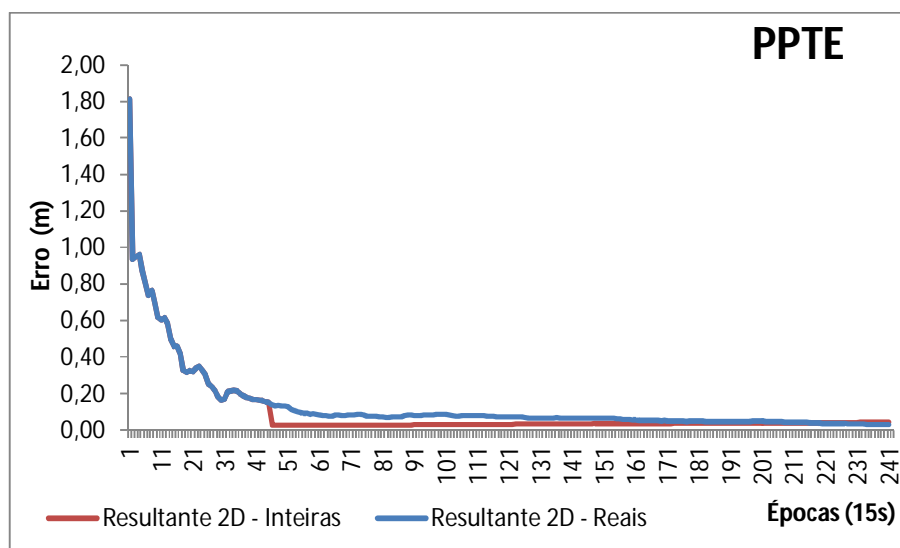


Figura 39– Erro das soluções estimadas com ambiguidades reais e inteiras, para a resultante horizontal – PPTE, dia 015 de 2014



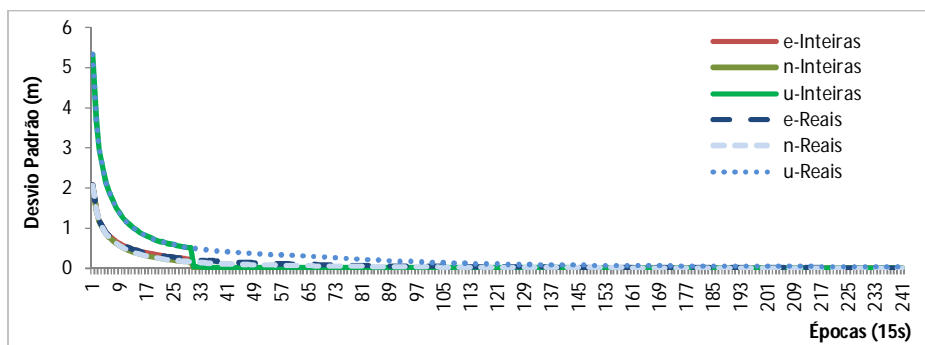
A tabela 11 apresenta os valores de erro para as soluções de ambiguidades reais e inteiras, porcentagem de melhoria e valor do *Ratio*, para as estações BRAZ e PPTE. A resultante horizontal, para ambas as estações, obteve melhoria acima de 80% após a fixação das ambiguidades. A porcentagem de melhoria do erro para a componente *e* foi de 98% para a estação BRAZ e 88% para PPTE. Em *n*, as porcentagens de melhoria foram de 79 e 92%, respectivamente para BRAZ e PPTE. Já para a componente vertical, na estação BRAZ, os resultados com ambiguidades reais foram degradados 29% após a solução de ambiguidades inteiras. Para a estação PPTE, as soluções de ambiguidades inteiras proporcionaram resultados com melhorias de 47%.

Tabela 11–Erro para as componentes *e*, *n*, *u*, resultante horizontal, porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras e valores de *Ratio*

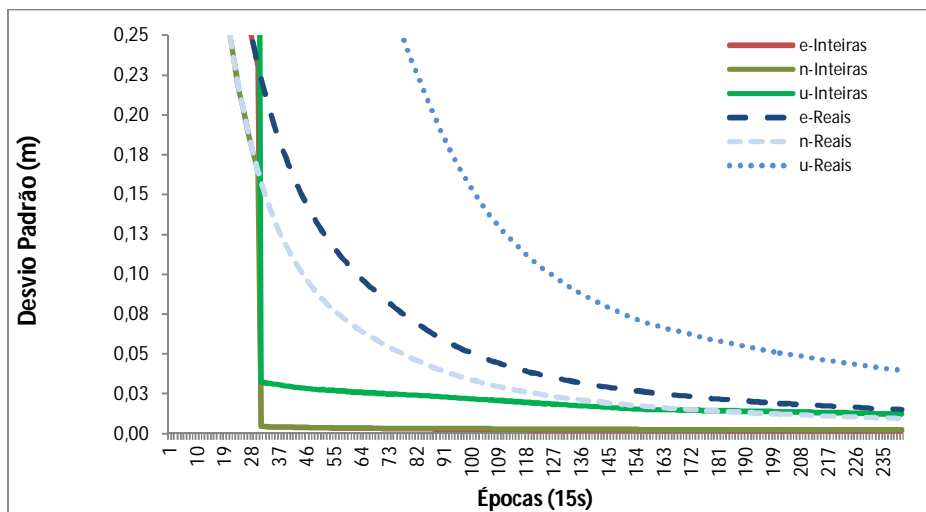
Erro	Soluções reais (mm)				Soluções Inteiras (mm)				%melhoria				<i>Ratio</i>
	<i>e</i>	<i>n</i>	<i>u</i>	2D	<i>e</i>	<i>n</i>	<i>u</i>	2D	<i>e</i>	<i>n</i>	<i>u</i>	2D	
BRAZ	64	-71	-51,5	95,6	-1,1	14,9	66,2	14,9	98	79	-29	84	3,02
PPTE	92,5	101,2	152,5	137,1	-11,2	7,9	81,1	13,7	88	92	47	90	3,18

As figuras 40 e 41 apresentam os valores de desvio padrão referentes às componentes *e*, *n* e *u*, das soluções de ambiguidades reais e fixas, para as estações BRAZ e PPTE. Para mostrar com maior clareza a diferença de valores, a ampliação das figuras 40a e 41a é apresentada nas figuras 40(b) e 41(b).

Figura 40 – Desvio padrão das soluções estimadas com ambiguidades reais e inteiras, para as componentes *e*, *n* e *u* - BRAZ

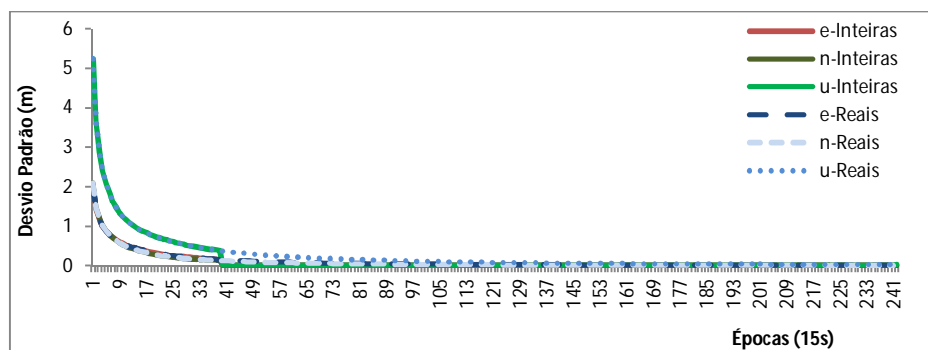


40 (a)

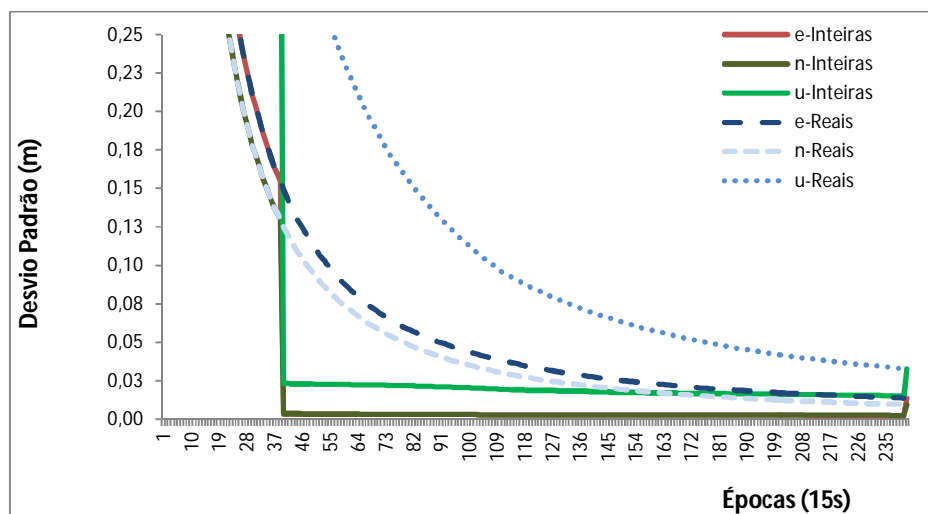


40 (b)

Figura 41 – Desvio padrão das soluções estimadas com ambiguidades reais e inteiras, para as componentes e , n e u - PPTE



41 (a)



41 (b)

A tabela 12 contém a porcentagem de melhoria do desvio padrão, onde é possível verificar que o mesmo melhorou para as duas estações acima de 90%, para todas as componentes, a partir da época em que as ambiguidades foram fixadas.

Tabela 12–Desvio Padrão para as componentes e , n , u , resultante horizontal e porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras

DesPad Estação	Soluções reais (mm)			Soluções Inteiras (mm)			%melhoria		
	σe	σn	σu	σe	σn	σu	σe	σn	σu
BRAZ	183,8	126,7	441,9	4,4	4,4	32,5	98	97	93
PPTE	124,7	104,6	319,5	3,4	3,9	23,5	97	96	93

Dentre os processamentos realizados nos dias 012 a 018 de 2014, observou-se que, na grande maioria, as ambiguidades foram fixadas a partir de 9 minutos de dados (36 épocas). Esse tempo se deve principalmente à solução das ambiguidades WL, que é realizada com a combinação de Melbourne, tendo ruído alto devido principalmente às PD utilizadas, além dos efeitos de multicaminho e atmosféricos. Consequentemente, um tempo suficientemente longo precisa ser despendido para fixar as ambiguidades WL antes que a solução de ambiguidades NL possa ser alcançada com confiança.

Em alguns casos, a fixação das ambiguidades ocorreu com intervalo de tempo menor do que cinco minutos. Para ilustrar essa situação, as figuras 42 e 43 apresentam o erro para a estação BRAZ, para o dia 016 e 012 de 2014, onde as ambiguidades tiveram solução fixa com 14 e 3 épocas de dados, respectivamente.

Figura 42– Erro das soluções estimadas com ambiguidades reais e inteiras, para a resultante horizontal – BRAZ, dia 016 de 2014

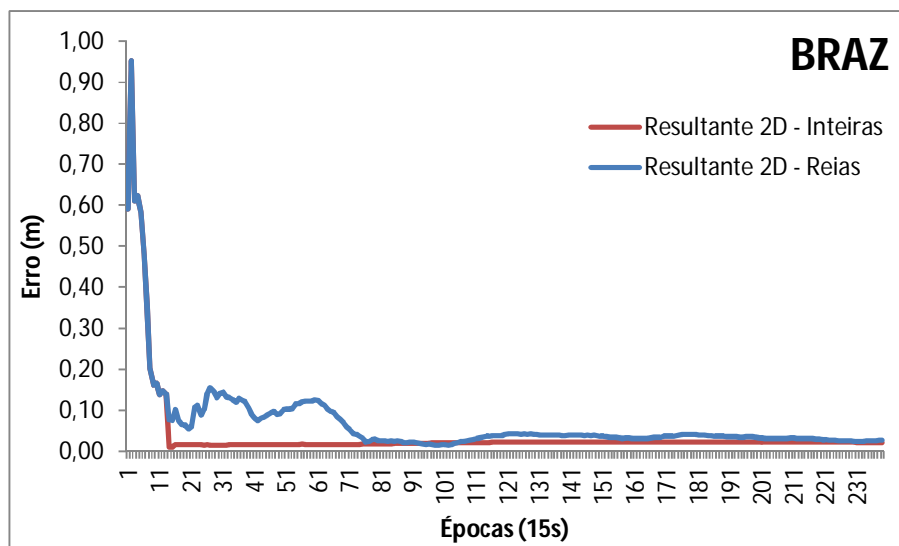
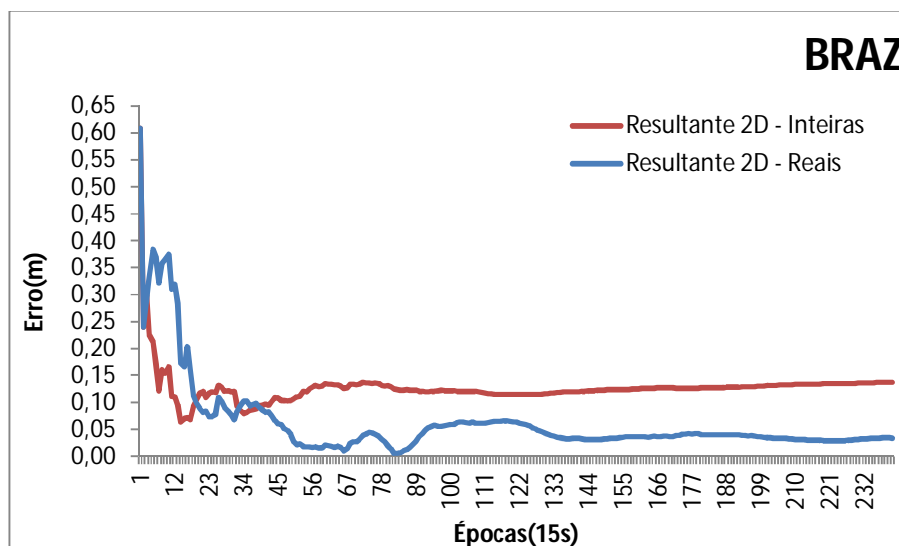


Figura 43– Erro das soluções estimadas com ambiguidades reais e inteiras, para a resultante horizontal – BRAZ, dia 012 de 2014



Para os resultados apresentados na figura 42, onde as ambiguidades foram fixadas com 14 épocas (3 minutos e 30 segundos), o erro na resultante horizontal passou de 8 cm para 1 cm após a solução inteira das ambiguidades. Na componente e , o erro passou de 7 cm com ambiguidades reais para 0,09 cm com ambiguidades inteiras. Em n , o erro foi de 4 cm para 1 cm e em u , o erro passou de 47 cm para 26 cm, após fixação das ambiguidades. Em resumo, a porcentagem de melhoria foi de 87% para a resultante horizontal e de 45% para a componente vertical. O desvio padrão melhorou acima de 90% pra todas as componentes, passando de 44, 37 e 94 cm, para 0,86, 0,91 e 7,82 cm, em e , n e u , respectivamente, após a solução inteira das ambiguidades.

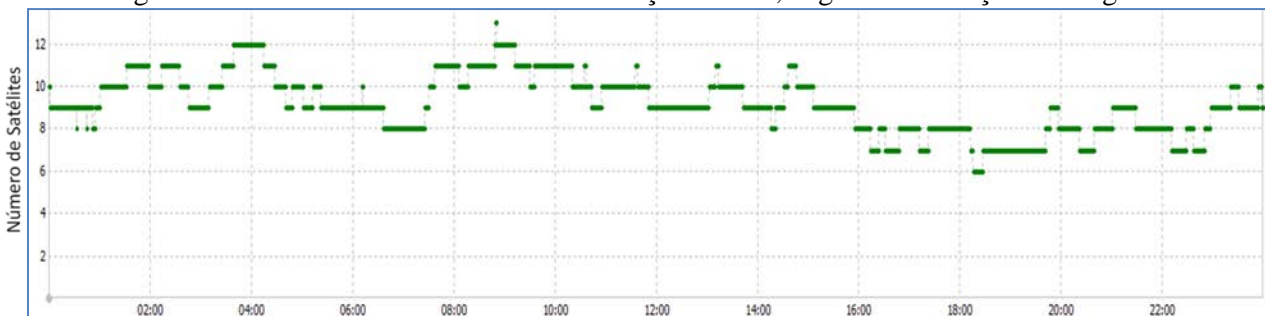
Para resultados apresentados na figura 43, cuja fixação ocorreu na 3ª época (45 segundos), o erro na componente e com ambiguidades reais foi de 29 cm e com ambiguidades fixas de 30 cm. Em n , o erro foi de 1 cm para ambiguidades reais e 0,8 para fixas e em u , 55 cm e 64 cm para ambiguidades reais e fixas, respectivamente. Isso significa que, na prática, os resultados não foram satisfatórios, ficando a solução degradada com cerca de 3% para a resultante horizontal e 17% para a componente vertical após a fixação das ambiguidades.

De uma forma geral, analisando os resultados que tiveram fixação das ambiguidades com intervalo de tempo de observação inferior a cinco minutos e que as soluções foram degradadas após a fixação das ambiguidades, observou-se que, para esses casos, haviam sido fixadas poucas ambiguidades WL e NL na época (por volta de duas ou três).

Nos resultados apresentados na figura 43 referentes ao processamento realizado no dia 012 de 2014 para a estação BRAZ, a solução foi considerada fixa com as ambiguidades de

dois satélites. A figura 44 mostra a visibilidade dos satélites na estação BRAZ, com ângulo de elevação acima de 10 graus, para o dia 012 de 2014, onde é possível verificar que havia mais de seis satélites visíveis durante todo o dia. Deste modo, como forma de minimizar as possibilidades de solução de ambiguidades inteiras que degradam a estimativa dos parâmetros, parece razoável que a solução seja considerada fixa numa determinada época, quando as ambiguidades forem fixadas para o mínimo de seis satélites, mantendo o valor crítico do *Ratio* como maior ou igual a 3.

Figura 44 – Visibilidade dos satélites na estação BRAZ, ângulo de elevação de 10 graus



Fonte: Aplicativo RTKLIB

5.2.2 Solução de Ambiguidades no PPP no Modo Cinemático

Nesta seção são apresentados os resultados referentes ao processamento PPP realizado no modo cinemático simulado e cinemático propriamente dito.

5.2.2.1 Cinemático Simulado

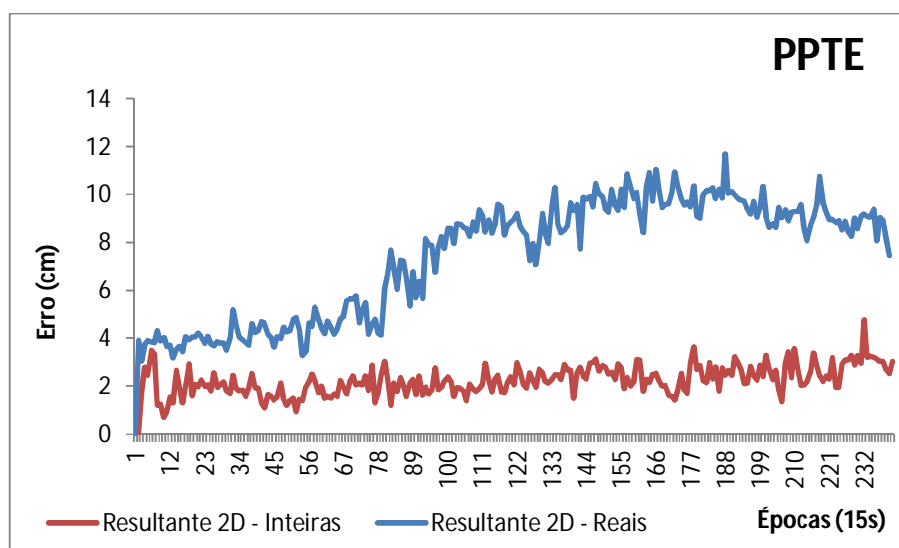
Nesta seção são apresentados os resultados referentes ao processamento PPP realizado com o *software* RT_PPP_AR, simulando modo cinemático, utilizando dados das estações RECF, UFPR, BRAZ e PPTE, para os dias 015, 016 e 017 de 2014, com soluções de ambiguidades reais e inteiras. As análises dos resultados foram realizadas na época de fixação das ambiguidades e em algumas épocas seguintes. A estratégia de processamento seguiu o que foi apresentado na seção 4.2.2.

- Cinemático com inicialização a partir de coordenadas conhecidas

Os resultados apresentados adiante são referentes aos processamentos no modo cinemático para as estações RECF, UFPR e PPTE, onde as coordenadas dessas estações de teste foram consideradas como fixas e as ambiguidades foram solucionadas antes de se iniciar o movimento. Após a fixação das ambiguidades, a variância das coordenadas do receptor foi relaxada a cada época. Para as três estações de teste desse experimento, as ambiguidades foram fixadas com 45 segundos, ou seja, 3 épocas de dados de observação, com valor do *Ratio* de 5,34, 4,03 e 3,20, para RECF, UFPR e PPTE, respectivamente.

A figura 45 apresenta o erro para as soluções com ambiguidades reais e inteiras, no que diz respeito à resultante horizontal, para a estação PPTE.

Figura 45– Erro das soluções estimadas no PPP modo cinemático com ambiguidades reais e inteiras, para a resultante horizontal – PPTE, dia 015 de 2014



A tabela 13 apresenta o erro para as soluções com ambiguidades reais e inteiras, além da porcentagem de melhoria obtida e o valor do *Ratio*, para as estações RECF, UFPR e PPTE, no instante de solução das ambiguidades.

Tabela 13 – Erro para as componentes e , n , u , resultante horizontal, porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras e valores de $Ratio$ – Instante de solução

Erro Estação	Soluções reais (cm)				Soluções Inteiras (cm)				%melhoria				Ratio
	e	n	u	$2D$	e	n	u	$2D$	e	n	u	$2D$	
RECF	-1,48	-5,27	79,87	5,47	0,57	-0,2	-3,8	0,6	61	96	95	89	5,34
UFPR	1,2	-3,22	56,9	3,44	-1,9	2,44	12,62	3,09	-58	24	78	10	4,03
PPTE	1,12	-3,57	72,55	3,74	-2,25	1,61	13,37	2,77	-101	55	82	26	3,20

Por meio da figura 45 e tabela 13 verifica-se que para PPTE no instante de fixação das ambiguidades o erro da resultante horizontal com ambiguidades reais e inteiras foi de 3,74 e 2,77 cm, respectivamente. Essa diferença pequena é devido ao fato de ambas as soluções iniciarem com coordenadas conhecidas. Observa-se por meio da figura 45 que com o passar do tempo a solução de ambiguidades inteiras permaneceu com erro horizontal constante e que a solução de ambiguidades reais teve maior erro durante todo o tempo.

As figuras 46 e 47 apresentam o erro das componentes e , n e u , para as soluções PPP estimadas com ambiguidades reais e inteiras, respectivamente.

Figura 46– Erro das soluções estimadas no PPP modo cinemático com ambiguidades reais para as componentes e , n e u – PPTE, dia 015 de 2014

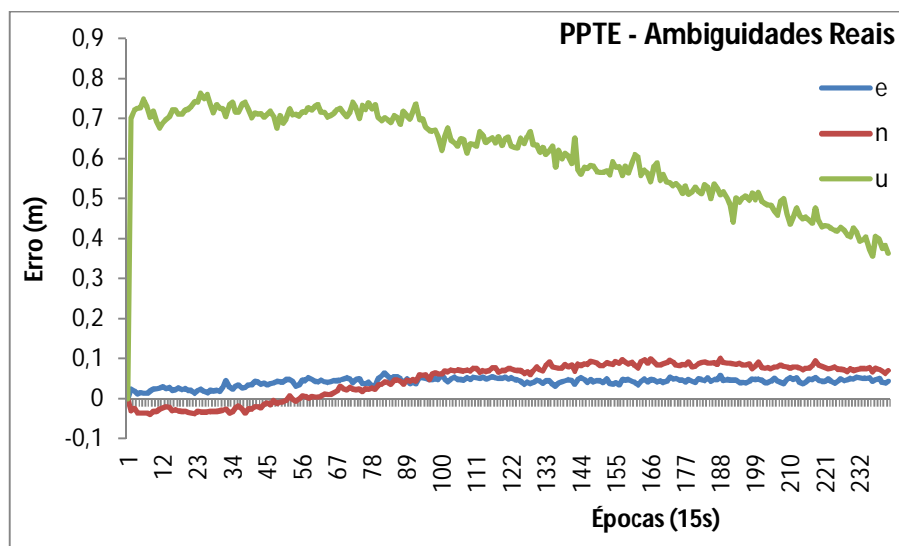
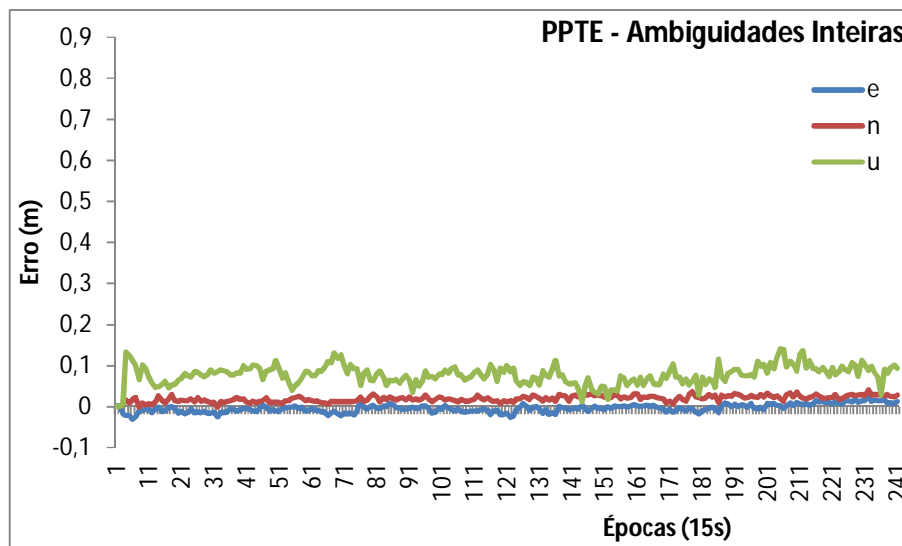


Figura 47– Erro das soluções estimadas no PPP modo cinemático com ambiguidades inteiras para as componentes e, n e u – PPTE, dia 015 de 2014



Conforme pode ser visto na tabela 13, o erro da componente vertical na estação PPTE passou de 72,55 cm para 13,37 cm, representando 82% de melhoria e permaneceu estável até o final do processamento.

Na estação RECF, conforme mostra a tabela 13, a porcentagem de melhoria do erro para a resultante horizontal e para a vertical foi de 89 e 95%, respectivamente. Para a estação UFPR a melhoria foi de 78% para a vertical, passando o erro de 56,9 cm nas soluções de ambiguidades reais para 12,62 cm nas inteiras. A porcentagem de melhoria da resultante horizontal foi de 10%. Na estação PPTE, a porcentagem de melhoria foi de 82 e 26% para a vertical e resultante 2D, respectivamente.

As figuras 48 e 49 ilustram o erro, com o passar do tempo, para as soluções com ambiguidades reais e inteiras, no que diz respeito à resultante horizontal, para as estações RECF e UFPR.

Figura 48– Erro das soluções estimadas no PPP modo cinemático com ambiguidades reais e inteiras, para a resultante horizontal – RECF, dia 017 de 2014

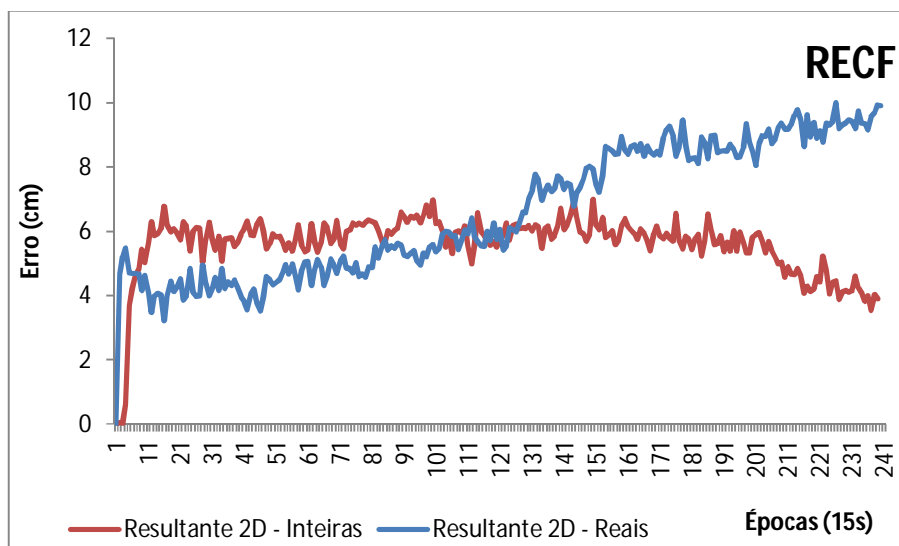
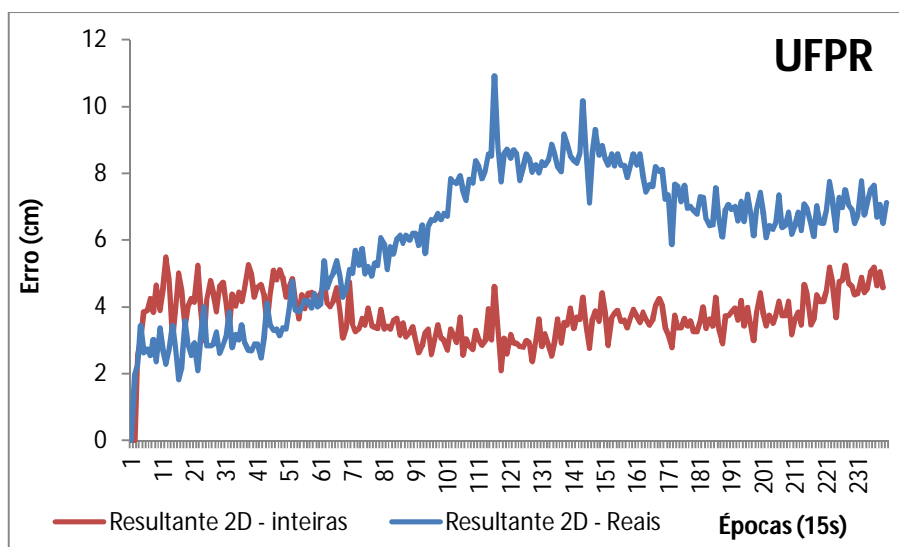


Figura 49– Erro das soluções estimadas no PPP modo cinemático com ambiguidades reais e inteiras, para a resultante horizontal – UFPR, 017 de 2014



Neste experimento, onde o ponto de partida foi com coordenadas conhecidas, a solução de ambiguidades reais da estação RECF se manteve com o erro menor do que a de ambiguidades inteiras por volta de 25 minutos (100 épocas) e na estação UFPR por volta de 13 minutos (50 épocas). Vale ressaltar que essa diferença não quer dizer que a solução de ambiguidades reais foi melhor. A solução real com a coordenada inicial conhecida também é boa, mas não é estável, como pode ser visto nas figuras 48 e 49. Nesse período inicial, a

diferença máxima entre o erro das soluções de ambiguidades reais com relação às inteiras para a resultante horizontal foi por volta de 2 cm. A solução de ambiguidades inteiras se manteve estável durante todo o tempo, com o erro variando de 3 a 6 cm. Já a solução de ambiguidades reais com o passar do tempo se mostrou bastante inconsistente, alcançando erros próximos a 10 cm para ambas as estações. Essa é uma vantagem de se solucionar as ambiguidades no modo cinemático, pois mesmo com o passar do tempo a solução com as ambiguidades inteiras permanece com o erro constante.

As tabelas 14 e 15 apresentam o erro para as soluções com ambiguidades reais e inteiras, além da porcentagem de melhoria obtida, para as estações RECF, UFPR e PPTE, com 100 e 240 épocas de 15 segundos, respectivamente.

Tabela 14 – Erro para as componentes e , n , u , resultante horizontal, porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras – 100 épocas

Erro Estação	Soluções reais(cm)				Soluções Inteiras (cm)				%melhoria			
	e	n	u	$2D$	e	n	u	$2D$	e	n	u	$2D$
RECF	-5,79	-2,73	64,24	6,4	1,53	4,73	-20,55	4,98	74	-73	68	22
UFPR	6,04	5,54	39,89	8,2	-0,75	2,95	4,99	3,04	88	47	87	63
PPTE	5,17	6,66	66,7	8,43	-1,09	2,74	8,96	2,95	79	59	87	65

Tabela 15 – Erro para as componentes e , n , u , resultante horizontal, porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras – 240 épocas

Erro Estação	Soluções reais(cm)				Soluções Inteiras (cm)				%melhoria			
	e	n	u	$2D$	e	n	u	$2D$	e	n	u	$2D$
RECF	-9,76	1,83	27,87	9,93	-0,15	3,9	-19,75	3,9	98	-113	29	61
UFPR	3,99	5,15	21,44	6,51	-0,73	4,53	17,31	4,59	82	12	19	29
PPTE	4,31	6,98	36,36	8,2	1,21	2,79	9,33	3,04	72	60	74	63

Conforme tabelas 14 e 15, com 100 e 240 épocas (1 hora) a porcentagem de melhoria para as componentes vertical foi de 19 a 87%. Para a resultante horizontal, a melhoria foi de 22 a 65%. A componente e , melhorou 98% na estação RECF na época 240. Esses resultados são importantes no sentido de se verificar que a solução de ambiguidades inteiras permaneceu com baixo erro para todas as componentes, com o passar do tempo.

A tabela 16 apresenta o desvio padrão para as soluções com ambiguidades reais e inteiras, além da porcentagem de melhoria para as estações RECF, UFPR e PPTE, no instante de fixação.

Tabela 16 – Desvio Padrão para as componentes e , n , u , e porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras – Instante de solução

DesPad Estação	Soluções reais (cm)			Soluções Inteiras (cm)			%melhoria		
	σe	σn	σu	σe	σn	σu	σe	σn	σu
RECF	3,44	3,5	6,91	2,75	3,05	13,71	20	13	-98
UFPR	3,61	3,93	8,83	2,52	2,89	26,24	30	26	-197
PPTE	3,57	3,69	8,04	2,39	2,45	13,50	33	34	-68

As figuras 50 e 51 apresentam o comportamento dos desvios padrão para e , n e u para as soluções de ambiguidades reais e para as de ambiguidades fixas, para as estações RECF e UFPR.

Figura 50 – Desvio padrão das soluções estimadas no PPP modo cinemático com ambiguidades reais e inteiras, para as componentes e , n e u – RECF - 017 de 2014

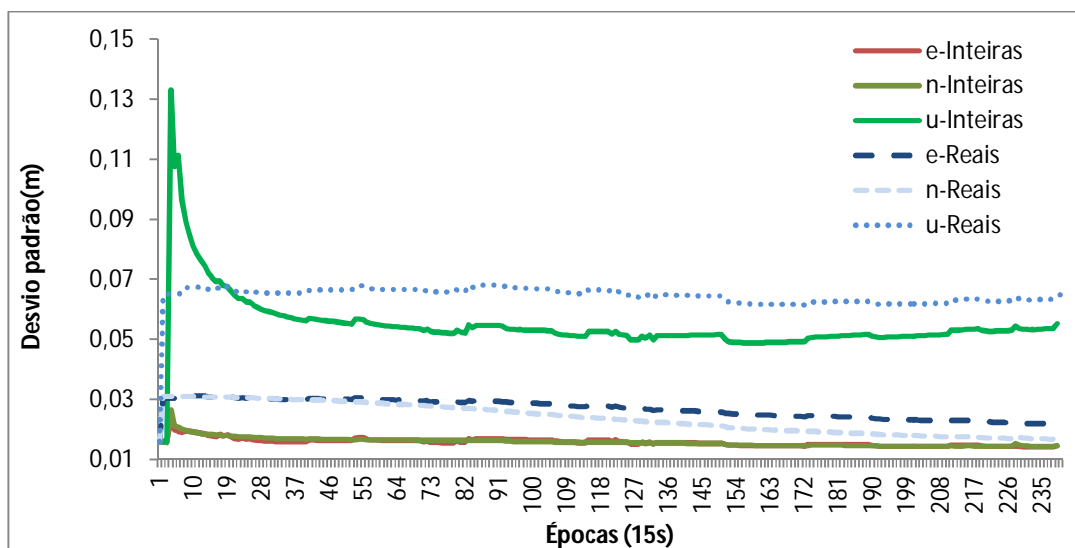
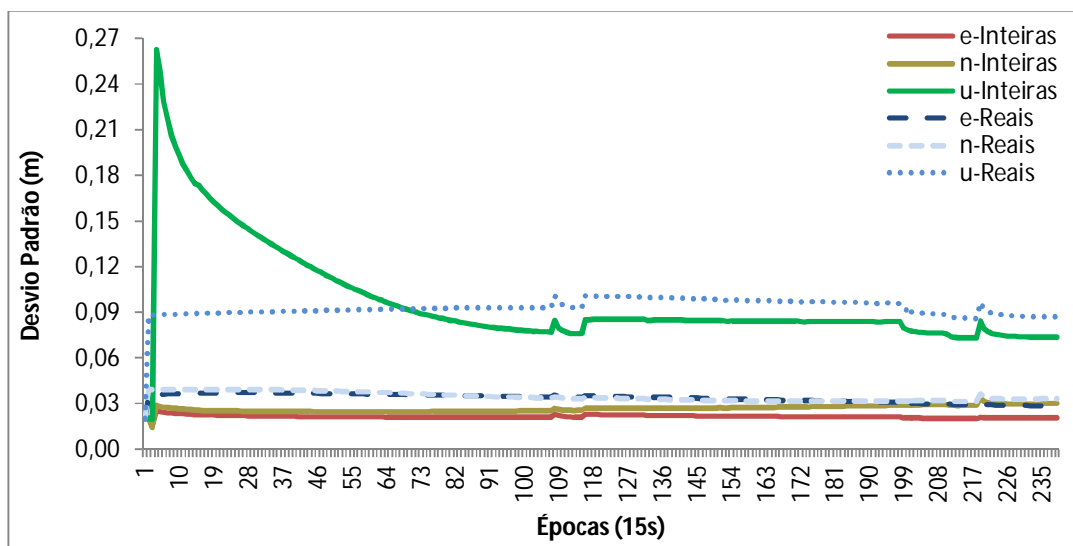


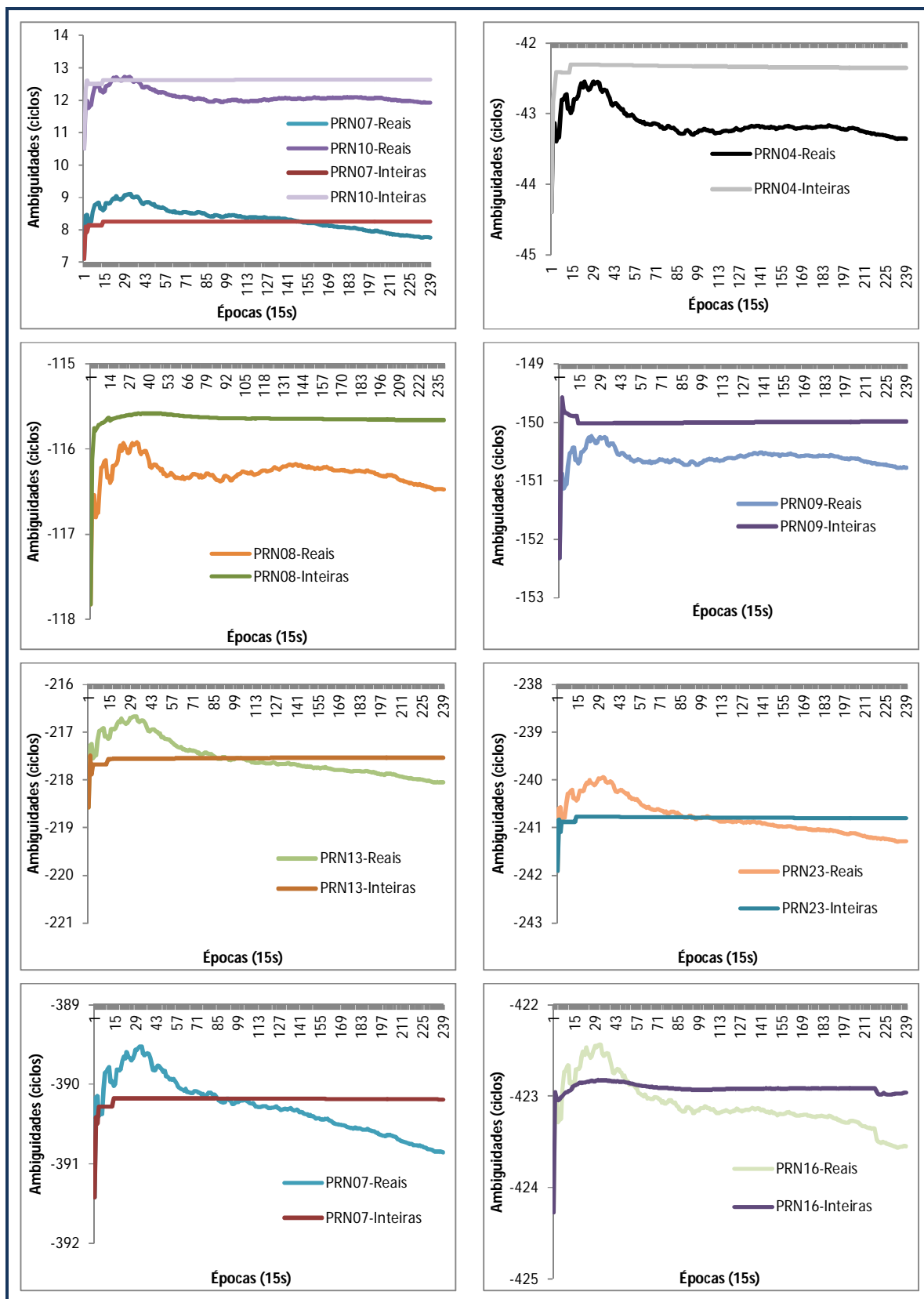
Figura 51 – Desvio padrão das soluções estimadas no PPP modo cinemático com ambiguidades reais e inteiras, para as componentes e , n e u – UFPR - 017 de 2014



Na tabela 16 e figuras 50 e 51 observa-se que o comportamento do desvio padrão é semelhante para ambas as estações. Na época de fixação, o desvio padrão da componente vertical apresentou comportamento diferente do que para as outras componentes, com um pico máximo de 26,24 cm na estação UFPR, com ambiguidades inteiras. Observa-se também que a convergência é rápida e o mesmo com o passar do tempo apresenta menores valores para as soluções fixas. Outro fato importante a se considerar é que conforme pode ser visto na tabela 13, o erro na componente vertical melhorou de 78 a 95% após a solução das ambiguidades.

A Figura 52 apresenta os valores das ambiguidades (unidade de ciclos) da combinação *ion-free* da fase para os nove satélites visíveis no PPP cinemático da estação UFPR, onde se observa que ambiguidades da solução inteira permaneceram estáveis após a fixação das ambiguidades.

Figura 52– Ambiguidades estimadas no PPP modo cinemático dia 017 de 2014, UFPR



Na figura 53 são apresentadas as precisões das ambiguidades (unidade de ciclos), para a estação UFPR. Uma ampliação da figura 53 é apresentada na figura 54. As linhas em tons de vermelho representam as ambiguidades reais e as linhas em tons de azul, as ambiguidades inteiras. Com 240 épocas (1 hora de dados) as ambiguidades reais tiveram precisão de 0,40 ciclos (aproximadamente 8 cm). As ambiguidades fixas mantiveram suas precisões também nas épocas seguintes à fixação, melhor que 0,10 ciclos (aproximadamente 2 cm).

Figura 53– Precisões das ambiguidades estimadas no PPP no modo cinemático no dia 017 de 2014, UFPR

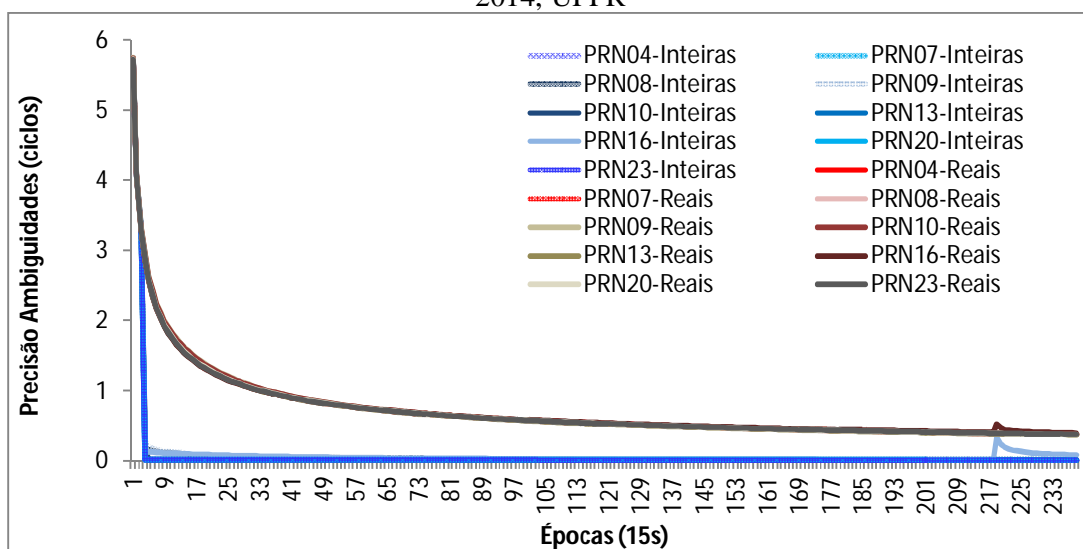
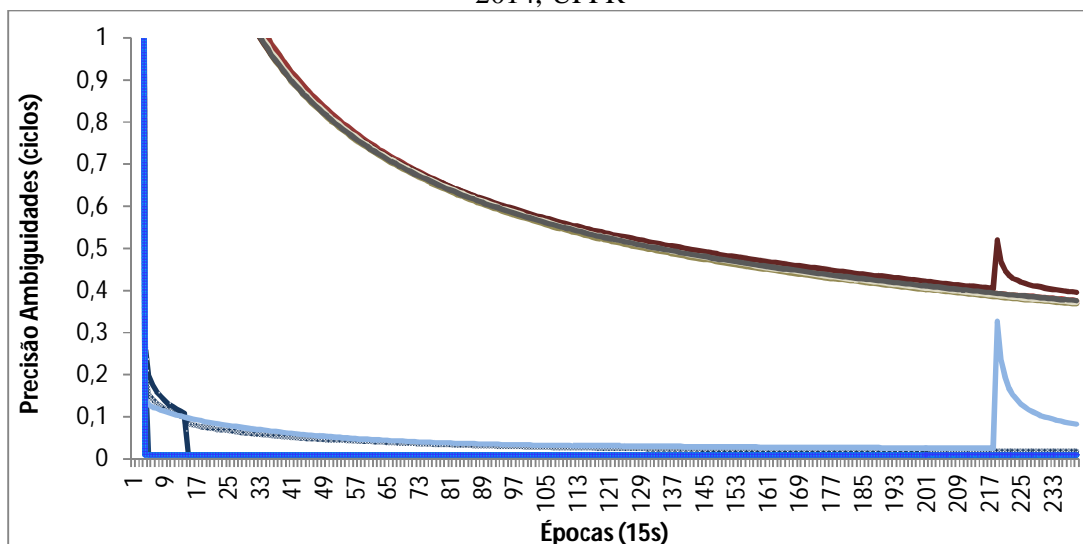


Figura 54– Precisões das ambiguidades estimadas no PPP no modo cinemático no dia 017 de 2014, UFPR



- Cinemático sem fixar as coordenadas da estação

Os resultados apresentados a seguir são referentes aos processamentos cinemáticos para as estações RECF, UFPR e BRAZ, nos quais as ambiguidades foram solucionadas considerando a estação sem movimento e após a fixação das ambiguidades a variância das coordenadas do receptor foi relaxada a cada época. As coordenadas das estações foram consideradas desconhecidas em todo o experimento.

As figuras 55 a 57 apresentam o erro para as soluções com ambiguidades reais e inteiras, no que diz respeito à resultante horizontal, para as estações RECF, UFPR e BRAZ.

Figura 55– Erro das soluções estimadas no PPP modo cinemático com ambiguidades reais e inteiras, para a resultante horizontal – RECF, dia 017 de 2014

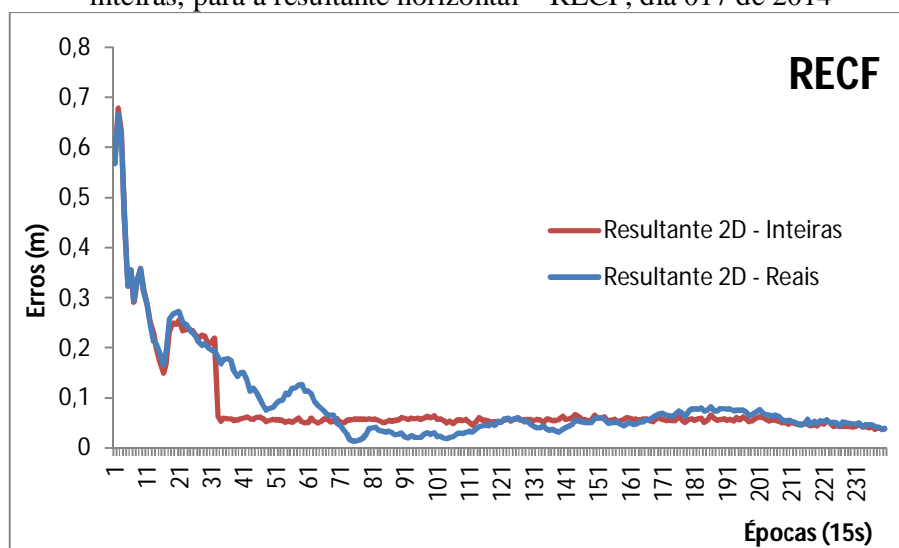


Figura 56– Erro das soluções estimadas no PPP modo cinemático com ambiguidades reais e inteiras, para a resultante horizontal – UFPR, dia 017 de 2014

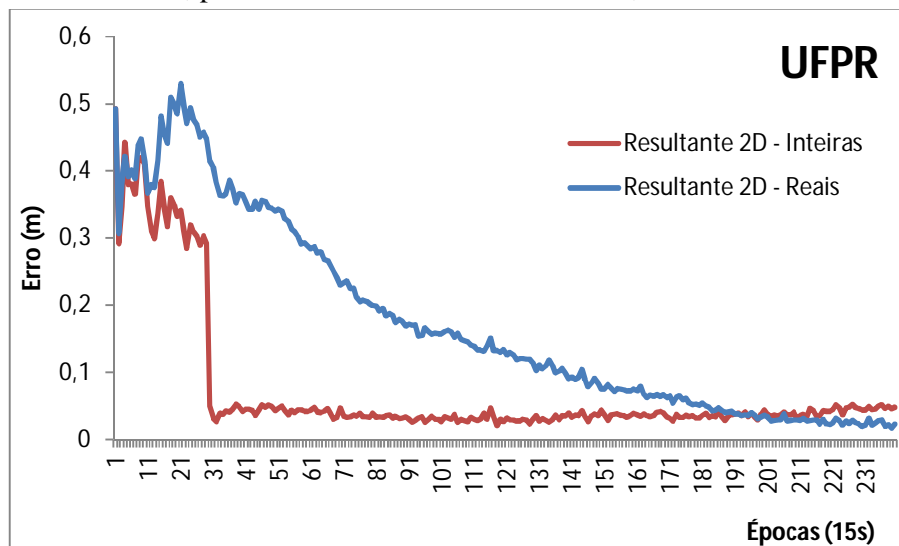
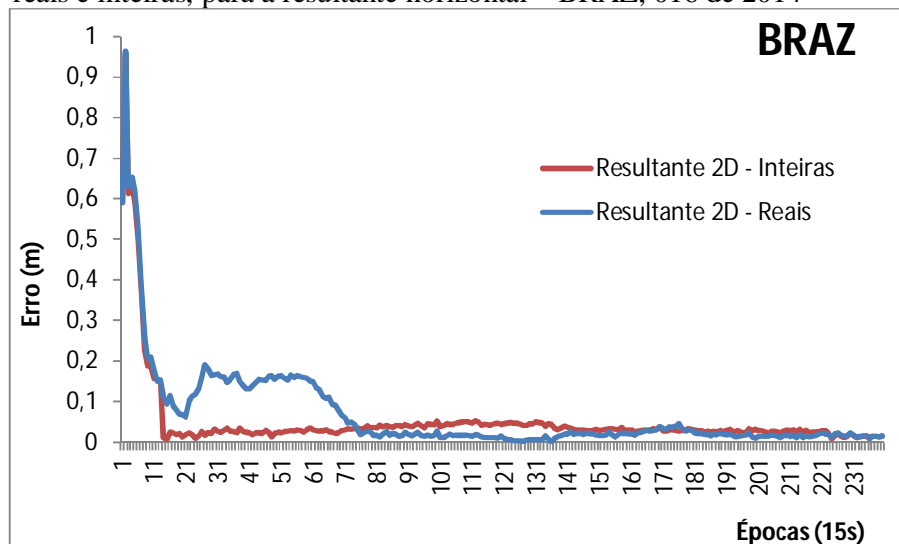


Figura 57– Erro das soluções estimadas no PPP modo cinemático com ambiguidades reais e inteiras, para a resultante horizontal – BRAZ, 016 de 2014



As ambiguidades no processamento cinemático da estação RECF foram fixadas com 33 épocas (8 minutos e 15 segundos), com *Ratio* de 3,29. Para a estação UFPR, as ambiguidades foram solucionadas como inteiras com 30 épocas (7 minutos e 30 segundos), com *Ratio* de 3,56. As ambiguidades da estação BRAZ foram fixadas com 14 épocas (3 minutos e 30 segundos), com valor de *Ratio* de 3,37.

Em todas as estações ocorreu melhoria de mais de 60% no erro da resultante horizontal após a solução inteira das ambiguidades e o erro nessa componente se manteve estável nas épocas seguintes após a fixação (figuras 55 a 57). As tabelas 17 e 18 apresentam os

erros, desvio padrão, porcentagem de melhoria e valor do *Ratio* para as soluções com ambiguidades reais e inteiras, para as estações RECF, UFPR e BRAZ.

Tabela 17 – Erro para as componentes *e*, *n*, *u*, resultante horizontal, porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras e valores de *Ratio*

Erro	Soluções reais(cm)				Soluções Inteiras (cm)				%melhoria				Ratio
	<i>e</i>	<i>n</i>	<i>u</i>	<i>2D</i>	<i>e</i>	<i>n</i>	<i>u</i>	<i>2D</i>	<i>e</i>	<i>n</i>	<i>u</i>	<i>2D</i>	
RECF	15,23	9,83	-4,82	18,13	2,07	5,86	-16,31	6,21	86	40	-238	66	3,29
UFPR	40,2	-10,48	-27,47	41,55	-0,97	4,9	-41,93	4,99	98	53	-53	88	3,56
BRAZ	9,7	5,77	32,7	11,28	-0,13	1,08	25,5	1,09	99	81	22	90	3,37

Tabela 18 – Desvio Padrão para as componentes *e*, *n*, *u*, e porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras

DesPad	Soluções reais (cm)			Soluções Inteiras (cm)			%melhoria		
	σe	σn	σu	σe	σn	σu	σe	σn	σu
RECF	25,89	17,82	48,61	0,66	0,44	2,49	97	98	95
UFPR	29,46	22,84	84,12	0,72	0,75	12,74	98	97	85
BRAZ	46,78	38,59	123,41	0,92	0,97	8,24	98	97	93

Na tabela 17 verifica-se que na estação BRAZ, a melhoria no erro da resultante horizontal foi de 90%, onde o erro passou de aproximadamente 11,28 cm para 1,09 cm após a fixação das ambiguidades. Em *e*, o erro para as soluções de ambiguidades reais foi de 15,23, 40,2 e 9,7 cm, para RECF, UFPR e BRAZ, respectivamente e após solução das ambiguidades como inteiras passou a ser 2,07, -0,97 e -0,13 cm, representando de 86 a 99% de melhoria. O desvio padrão das 3 estações melhorou de 85 a 98% para todas as componentes (tabela 18).

5.2.2.2 Cinemático

Esta seção apresenta os resultados do experimento referente ao levantamento cinemático realizado nos dias 022 e 023 de 2015. A fim de verificar a qualidade dos resultados do levantamento após o processamento dos dados utilizando o *software* RT_PPP_AR, foram implantados seis pontos de controle ao longo do percurso (44 a 49), conforme mostrado na seção 4.2.2.

Para esse experimento, as coordenadas do primeiro ponto de controle (ponto 44) foram injuncionadas aos valores conhecidos e as ambiguidades foram solucionadas antes de se iniciar o movimento. Ao iniciar o movimento, a variância das coordenadas do receptor foi relaxada em cada época, coletando-se dados em cada ponto por cerca de dois minutos, com

taxa de 1 segundo, inclusive com retorno ao ponto inicial (ponto 44). O EMQ para cada ponto foi calculado por meio do erro médio e do desvio padrão obtidos a cada época, durante os dois minutos de dados.

Com finalidade de se avaliar a influência da cintilação ionosférica na solução de ambiguidades inteiras no PPP, os experimentos foram realizados à noite, das 23 às 23h 59min 59s. As figuras 58 e 59 apresentam os valores de índices S4 na estação PRU2, para os dias 022 e 023 de 2015, respectivamente, fornecidos a partir da ferramenta *ISMR Query Tool*, considerando os satélites GPS com ângulos de elevação maiores ou iguais a 10 graus. A estação PRU2 foi escolhida por ter sua localização próxima à área onde o experimento foi realizado.

Figura 58– Índices de cintilação (S4) em amplitude da estação PRU2 para o dia 022

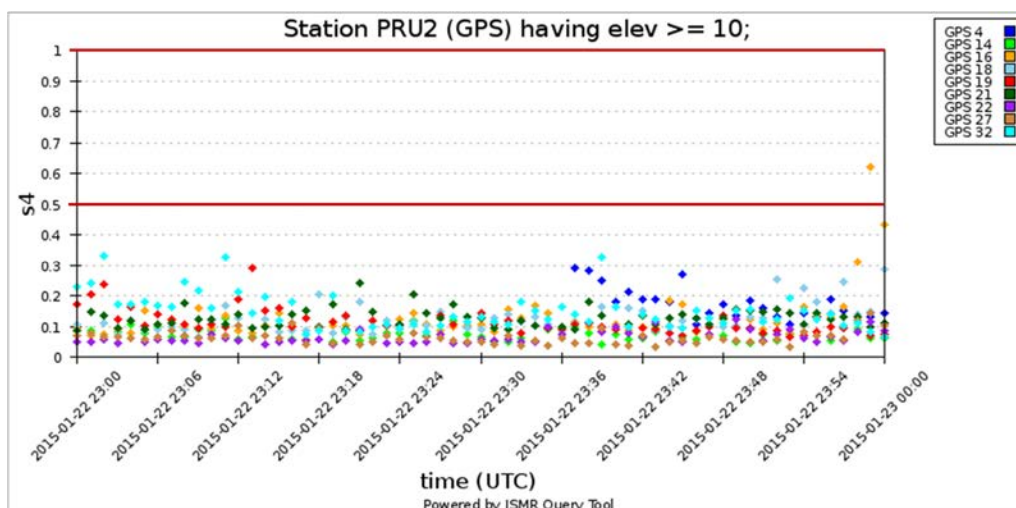
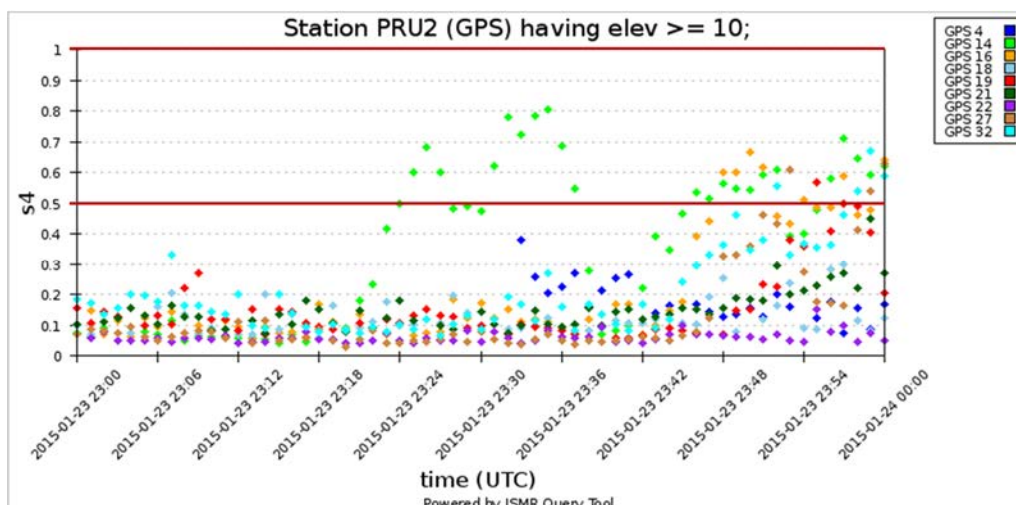


Figura 59– Índices de cintilação (S4) em amplitude da estação PRU2 para o dia 023



Como pode ser visto na figura 58, durante todo o horário do levantamento cinemático, o dia 022 estava sob fraca influência de cintilação ionosférica, com amplitude $S4 \leq 0,5$. Já para o dia 023 (figura 59) observa-se que a partir das 23:18 horas ocorreu moderada cintilação ionosférica ($0,5 < S4 < 1,0$). Os resultados desses levantamentos são analisados adiante.

A figura 60 e tabela 19 apresentam o EMQ no SGL, calculado para as soluções de PPP em modo cinemático no dia 022 de 2015, com soluções de ambiguidades reais e inteiras para os pontos de controle, bem como a porcentagem de melhoria obtida após a fixação das ambiguidades.

Figura 60– EMQ das soluções estimadas com ambiguidades reais e inteiras, com relação às componentes e, n, u e $2D$, dia 022

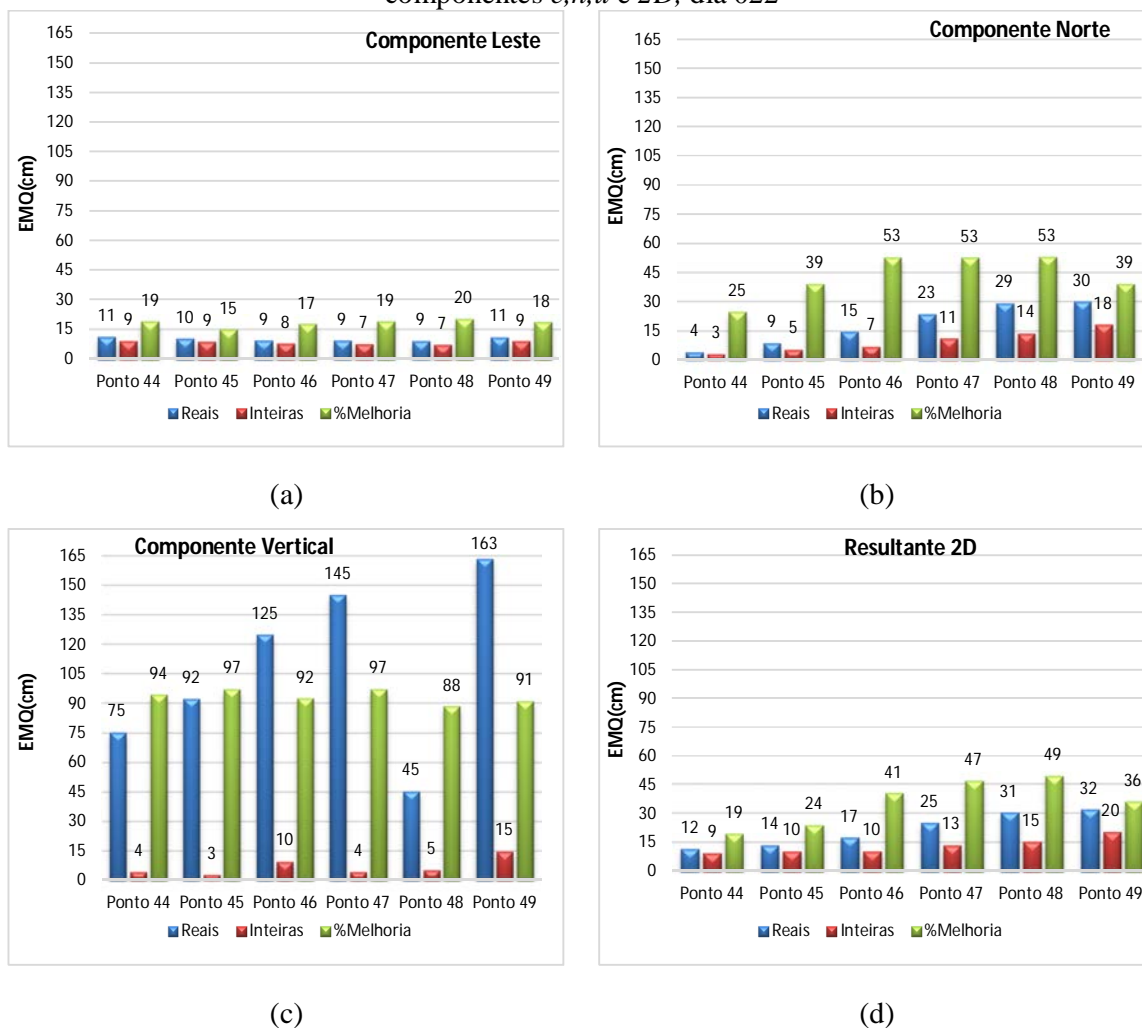


Tabela 19–EMQ para as componentes e , n , u , resultante horizontal e porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras, dia 022

EQM	Soluções reais (cm)				Soluções Inteiras (cm)				%melhoria			
	e	n	u	$2D$	e	n	u	$2D$	e	n	u	$2D$
Estação												
Ponto 44	11,02	3,95	75,37	11,71	8,95	2,98	4,42	9,44	19	25	94	19
Ponto 45	10,35	8,82	92,09	13,60	8,84	5,38	2,76	10,35	15	39	97	24
Ponto 46	9,29	14,74	124,87	17,42	7,66	6,96	9,62	10,35	17	53	92	41
Ponto 47	9,16	23,48	145,11	25,20	7,43	11,14	4,43	13,39	19	53	97	47
Ponto 48	8,96	29,20	45,26	30,55	7,17	13,68	5,27	15,45	20	53	88	49
Ponto 49	10,88	29,95	163,47	31,86	8,88	18,28	14,70	20,33	18	39	91	36

A solução fixa das ambiguidades foi alcançada com 75 épocas, 1 minuto e 15 segundos, com valor de *Ratio* de 3,02. Por meio da tabela 19 e figura 60 é possível verificar que no ponto inicial, o EMQ na componente vertical passou de 75,37 cm para 4,42 cm após solução das ambiguidades como fixa, ou seja, 94% de melhoria. Em e e n , a porcentagem de melhoria foi de 19 e 25%, respectivamente. Para os seis pontos, na resultante horizontal, o EMQ para as soluções de ambiguidades fixas foi de 9 a 20 cm, e a porcentagem de melhoria mínima foi de 19% no ponto 44 e máxima de 49% no ponto 48. Para as soluções de ambiguidades reais, nos seis pontos, o EMQ da resultante horizontal foi de 12 a 32 cm. Na componente vertical a porcentagem de melhoria para os seis pontos foi de 88 a 94%.

Afigura 61 e tabela 20 apresentam o desvio padrão em e , n e u e porcentagem de melhoria, para as soluções de ambiguidades reais e inteiras, referentes aos seis pontos de controle. No ponto 44, após a fixação das ambiguidades o desvio padrão passou de 9,9 cm, 3,9 cm e 3,7 cm, para 7,9 cm, 2,9 cm e 2,9 cm em e , n e u , respectivamente. Para todas as componentes, o desvio padrão das soluções de ambiguidades reais foi melhor do que da solução inteira. Os valores de desvio padrão foram maiores para a componente leste, tanto nas soluções de ambiguidades reais como inteiras.

Figura 61– Desvio padrão das soluções de ambiguidades reais e inteiras para as componentes e, n e u , dia 022

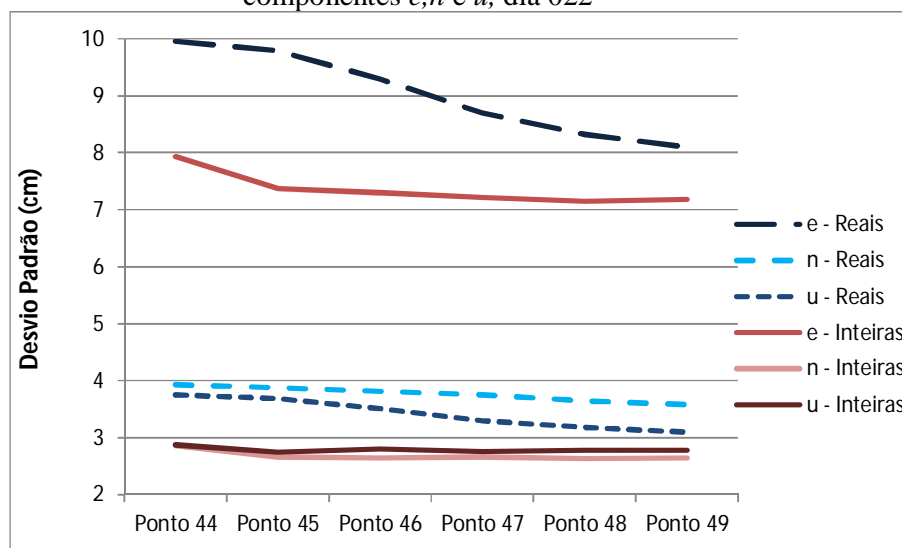
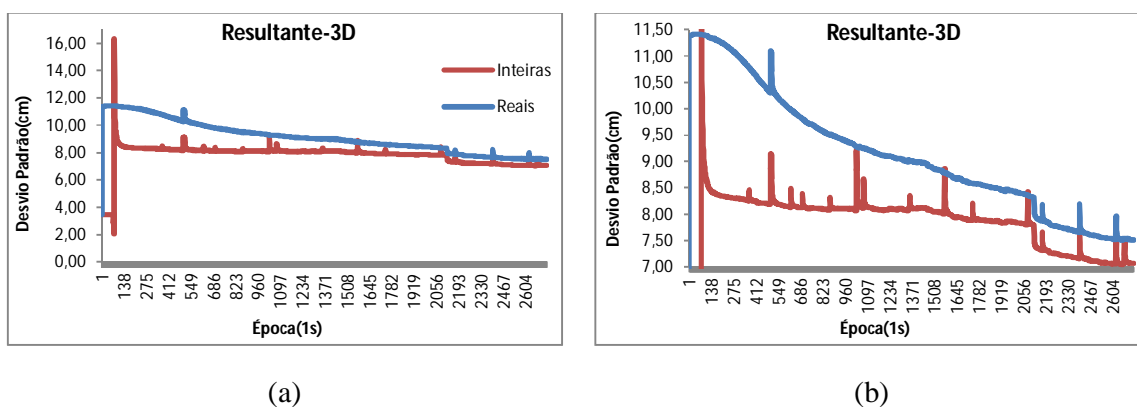


Tabela 20–Desvio Padrão para as componentes e, n, u , e porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras

DesPad Estação	Soluções reais (cm)			Soluções Inteiras (cm)			%melhoria		
	σe	σn	σu	σe	σn	σu	σe	σn	σu
Ponto 44	9,95	3,93	3,75	7,93	2,86	2,87	20	27	23
Ponto 45	9,79	3,88	3,68	7,38	2,66	2,75	25	31	25
Ponto 46	9,29	3,82	3,51	7,30	2,64	2,80	21	31	20
Ponto 47	8,70	3,75	3,30	7,21	2,66	2,76	17	29	16
Ponto 48	8,32	3,65	3,18	7,15	2,64	2,78	14	28	12
Ponto 49	8,10	3,58	3,10	7,18	2,65	2,78	11	26	10

A figura 62(a) apresenta o desvio padrão da resultante 3D para as soluções de ambiguidades reais e inteiras para todas as épocas de coleta do dia 022. Uma ampliação da figura 62(a) é apresentada na figura 62(b). O desvio padrão das soluções reais passa a ser estável por volta de 20 minutos (época 1226), quando a diferença do mesmo com relação ao de ambiguidades inteiras passa a ser por volta de 1 cm.

Figura 62– Desvio padrão das soluções de ambiguidades reais e inteiras para resultante 3D, dia 022



A figura 63 apresenta os valores das ambiguidades reais (a) e inteiras (b), em unidade de ciclos da combinação *ion-free* da fase, as quais foram estimadas com PPP no levantamento cinemático no dia 022 de 2015. Uma ampliação da figura 63 é apresentada na figura 64, para algumas das ambiguidades.

Figura 63– Ambiguidades estimadas no PPP modo cinemático dia 022 de 2015

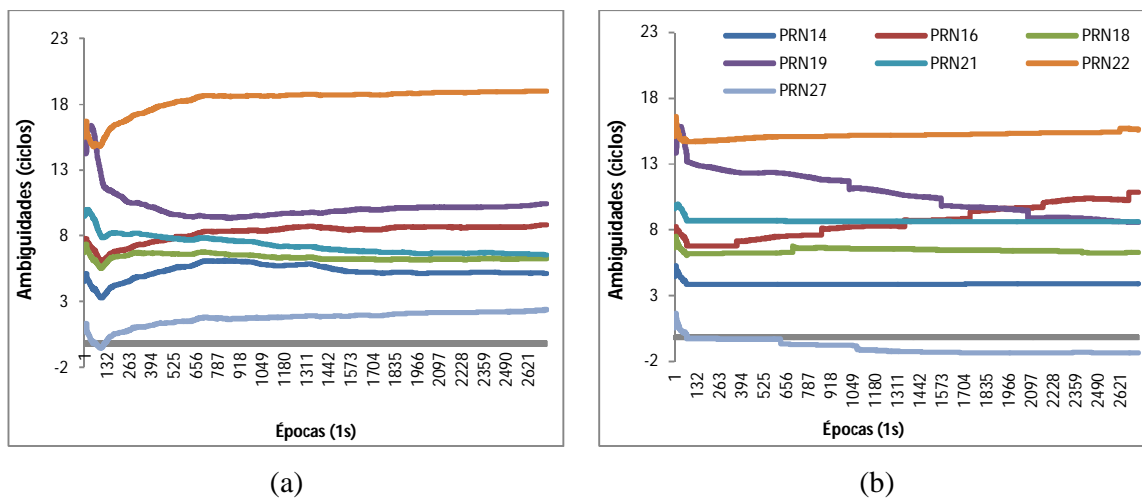
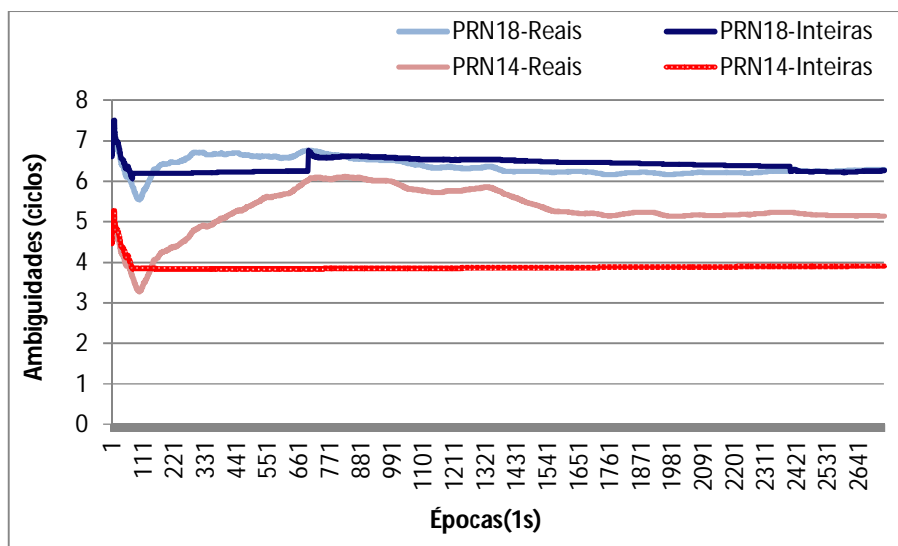


Figura 64– Ambiguidades estimadas no PPP modo cinemático dia 022 de 2015



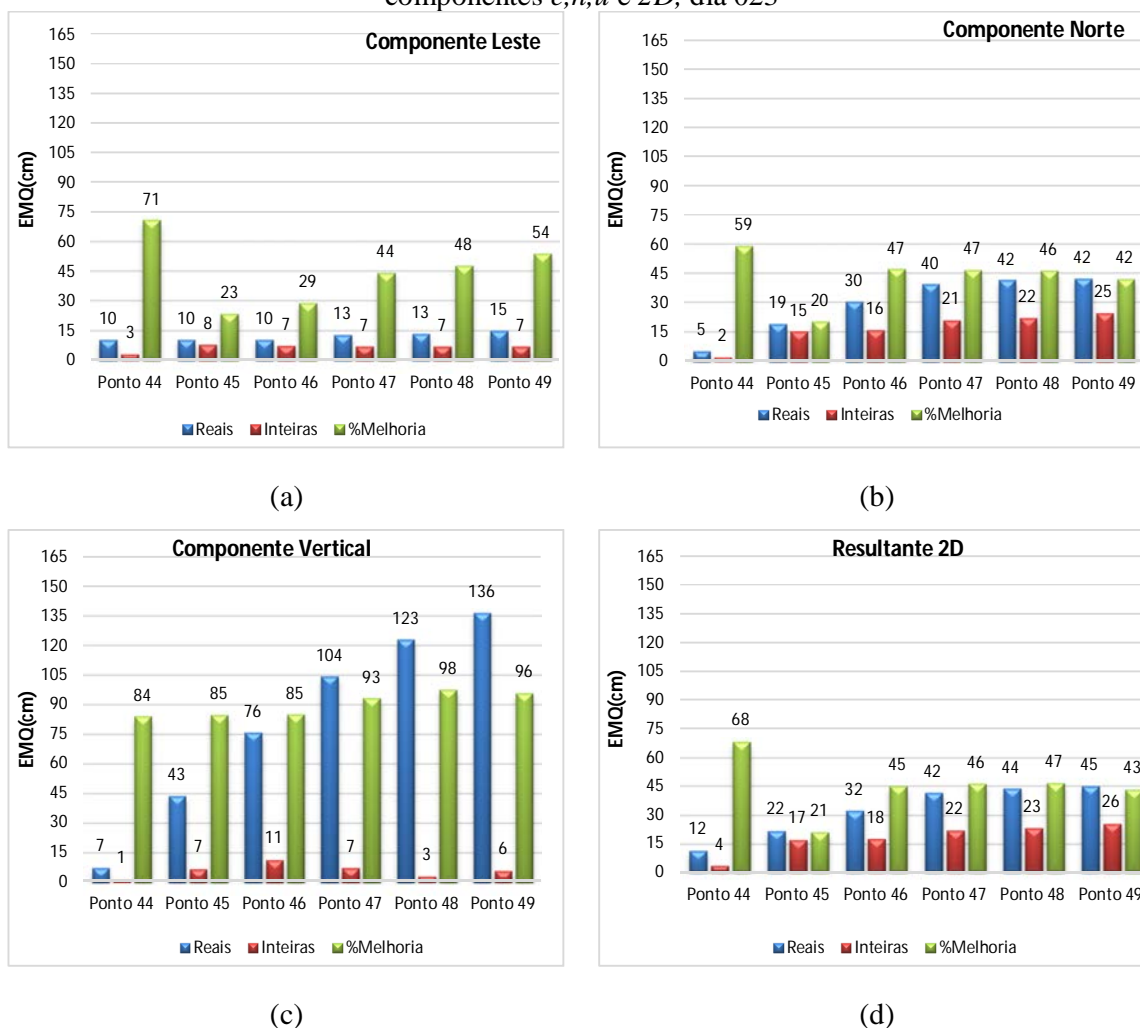
Conforme esperado, nas figuras 63 e 64 se verifica que as ambiguidades da solução inteira permaneceram estáveis após as épocas iniciais onde se alcançou a solução fixa.

O levantamento cinemático do dia 023 de 2015 foi realizado da mesma forma que para o dia 022, conforme mostrado na seção 4.2.2. A tabela 21 e figura 65 apresentam o EMQ no SGL, com porcentagem de melhoria obtida após a fixação das ambiguidades, para os seis pontos de controle.

Tabela 21–EMQ para as componentes e , n , u , resultante horizontal e porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras, dia 023

EQM	Soluções reais (cm)				Soluções Inteiras (cm)				%melhoria			
	e	n	u	$2D$	e	n	u	$2D$	e	n	u	$2D$
Ponto 44	10,37	5,11	7,35	11,56	3,01	2,08	1,18	3,66	71	59	84	68
Ponto 45	10,48	19,20	43,49	21,87	8,02	15,29	6,63	17,26	23	20	85	21
Ponto 46	10,46	30,44	75,66	32,19	7,44	16,08	11,29	17,71	29	47	85	45
Ponto 47	12,74	39,59	104,16	41,59	7,11	21,11	7,17	22,28	44	47	93	46
Ponto 48	13,39	41,67	122,96	43,77	6,99	22,30	2,89	23,37	48	46	98	47
Ponto 49	15,00	42,48	136,42	45,05	6,91	24,60	5,79	25,55	54	42	96	43

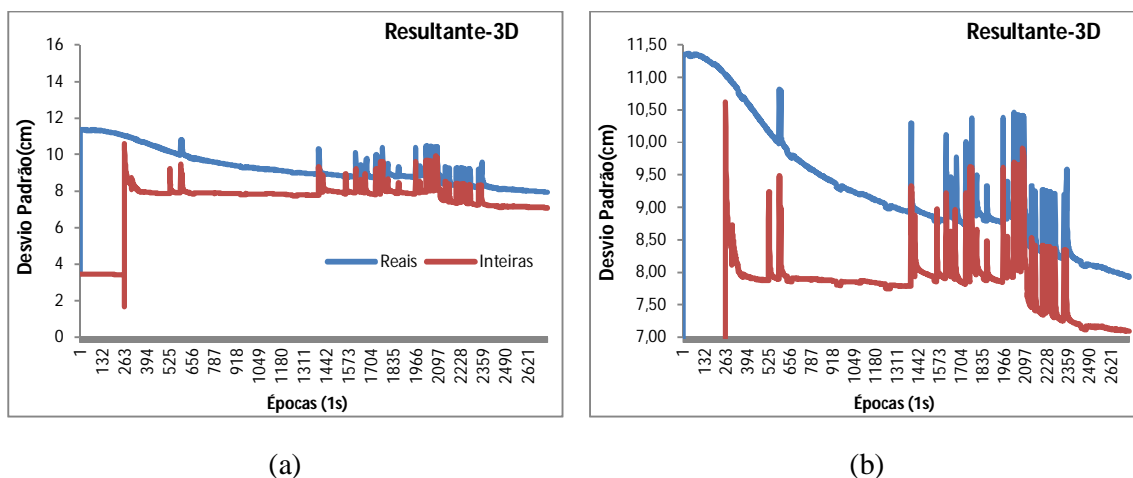
Figura 65– EMQ das soluções estimadas com ambiguidades reais e inteiras, com relação às componentes e, n, u e $2D$, dia 023



O ponto de partida do levantamento também foi o 44, da mesma forma que para o dia 022. A solução fixa das ambiguidades foi alcançada com 262 épocas, 4 minutos e 22 segundos, com valor de *Ratio* de 3,08, tempo 4 vezes maior do que foi necessário para a solução fixa das ambiguidades no dia 022. Por meio da tabela 21 e figura 65 se observa que o EMQ da solução de ambiguidades fixas para todos os pontos teve valor médio por volta de 20 cm para a resultante horizontal e valor médio por volta de 8 cm para a componente vertical. A solução das ambiguidades reais para todos os pontos teve EMQ médio de 32 cm para a resultante horizontal e na vertical teve variação de 7 a 136 cm. Os valores de EMQ foram maiores para a componente vertical consequentemente a porcentagem de melhoria foi maior para essa componente, chegando a 98% no ponto 48.

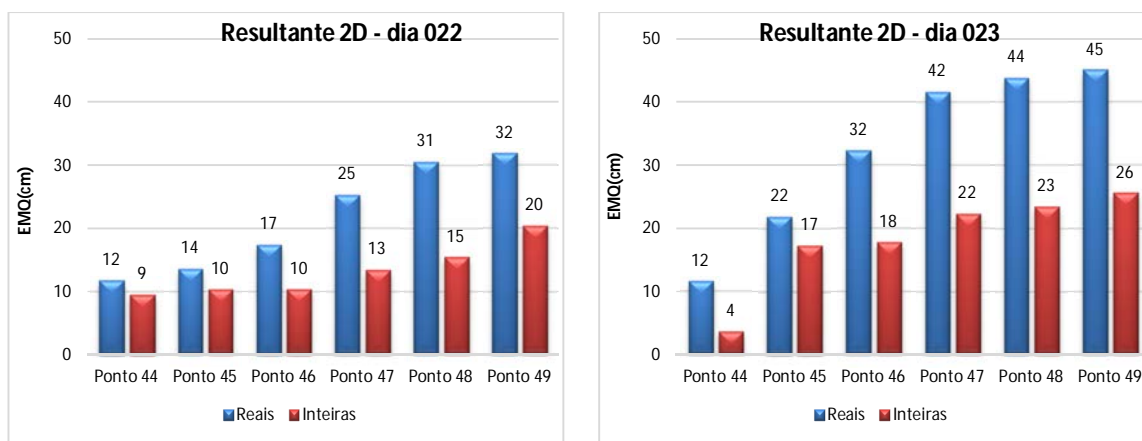
A figura 66(a) apresenta o desvio padrão da resultante 3D para as soluções de ambiguidades reais e inteiras para todas as épocas no dia 023. A figura 66(b) é uma ampliação da figura 66(a) e mostra que a diferença do desvio padrão da solução de ambiguidades reais para inteiras passa a ser estável, por volta de 1 cm, a partir da época 1414, com 24 minutos de observações.

Figura 66– Desvio padrão das soluções de ambiguidades reais e inteiras para resultante 3D, dia 023



Na figura 66, a partir da época 1399, aproximadamente às 23:20 horas, as soluções de ambiguidades reais e inteiras apresentaram algumas variações notáveis. Como a área na qual os pontos estão localizados possui baixa obstrução e multicaminho, acredita-se que essa variação possa ser por conta da influência dos efeitos de cintilação ionosférica. Como se mostrou na figura 59, no dia 023 a partir das 23 horas e 18 minutos ocorreu moderada cintilação ionosférica, o que pode explicar as essas variações. Considerando que o dia 022 estava sob fraca cintilação ionosférica e o dia 023 sob moderada cintilação, a figura 67 faz um comparativo entre o EMQ da resultante horizontal obtido nos dias 022 (67a) e 023 (67b) para as soluções de ambiguidades reais e inteiras.

Figura 67– EMQ da resultante 2D das soluções de ambiguidades reais e inteiras para os dias 022 e 023



(a)

(b)

A partir da figura 67 observa-se que para o dia 023, na componente 2D o EMQ da solução de ambiguidades reais foi maior em todos os pontos do que para o dia 022. De forma semelhante, as soluções de ambiguidades inteiras também apresentaram EMQ maior para o dia 23. Esses resultados mostram que a cintilação afeta tanto as soluções reais com as inteiras. As soluções de ambiguidades inteiras apesar de apresentar valores um pouco mais elevados no dia 023, apresentou bom comportamento nessa situação, com valores de EMQ melhores do que para as soluções reais, para todas as componentes, em todos os pontos, como mostrou a figura 65.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Nessa Tese foram propostas a investigação e a implementação de metodologia para solução de ambiguidades inteiras no PPP alinhadas com o sistema desenvolvido no GEGE da FCT/UNESP, denominado RT_PPP. Nos capítulos anteriores foram apresentados a revisão bibliográfica, o desenvolvimento e alterações realizadas para se alcançar os objetivos da pesquisa. A aplicação do método proposto, que se refere à solução de ambiguidades com base na estimativa dos UPDs, envolveu o desenvolvimento de um sistema composto por dois *softwares*, sendo um denominado UPD_NETWORK, que fornece os produtos UPDNL e WL, necessários para solução das ambiguidades inteiras, e o outro denominado RT_PPP_AR, capaz de proporcionar soluções fixas das ambiguidades para um receptor do usuário, o qual se alinhou com o programa de PPP desenvolvido por Marques (2012).

Dentro do contexto brasileiro com relação à infraestrutura de rede GNSS e localização geográfica, os UPDs_WL foram estimados com dados de 24 horas e os UPDs_NL com dados de 1 hora, tendo eles alcançado estabilidade e precisão suficientes para realização da solução de ambiguidades inteiras na maioria dos experimentos realizados. Para se chegar a tal conclusão, a análise da qualidade e comportamento temporal dos UPDs WL e NL foram investigados e os resultados apresentados no capítulo 5.

No processo de estimativa dos UPDs, surgiram várias abordagens, sendo realizados vários experimentos para se definir a estratégia a ser adotada, como a estimativa com todos os arcos de dados contínuos e a determinação do ângulo de elevação de 30 graus para as estimativas dos UPDs_WL e 10 graus para as estimativas dos UPDs_NL.

Os experimentos de PPP com a aplicação dos UPDs foram realizados em modo estático e cinemático, com a utilização de órbitas e correções precisas dos relógios do IGS, caracterizando o modo pós-processado.

Em modo estático, foram realizados experimentos de PPP com solução de ambiguidades reais e inteiras, com dados de 15, 30, 45 e 60 minutos. Também se verificou o tempo mínimo que o método necessita para que as ambiguidades sejam solucionadas como inteiro. Nos experimentos com 60 minutos, a porcentagem de melhoria do EMQ da resultante horizontal das soluções de ambiguidades fixas com relação às reais foi de 39 a 60% para todas as estações. Com 45 minutos de dados a porcentagem de melhoria foi de 55 a 84%. Com 30 minutos a melhoria foi de 60 a 85% e com 15 minutos de dados a porcentagem foi de 54 a

93%. Os valores mais baixos de porcentagem de melhoria, para todos os experimentos, foram para a estação NAUS. Os resultados mostram que a melhoria a ser obtida no posicionamento com a fixação das ambiguidades é inversamente proporcional ao tempo utilizado de dados de observação. Já para os valores de *Ratio*, seu valor aumentou de acordo com aumento do intervalo de dados, o que significa que a qualidade na obtenção da solução correta aumenta com o acúmulo de dados.

Com relação às componentes das coordenadas analisadas no posicionamento, a porcentagem de melhoria do EMQ foi significativamente superior para a componente leste em relação às demais, o que já era esperado, considerando a forte correlação dessa componente com as ambiguidades. O EMQ da componente vertical degradou após a solução das ambiguidades como fixas nos experimentos com 60 e 45 minutos de dados. Esse comportamento pode estar relacionado com a estimativa do atraso troposférico. Recomenda-se essa investigação em trabalhos futuros.

Dentre os processamentos realizados em modo estático, observou-se que, na grande maioria, as ambiguidades foram fixadas a partir de 9 minutos de dados. Em alguns casos, a fixação das ambiguidades ocorreu com intervalo de tempo menor do que cinco minutos. Essa variação de intervalo de tempo pode ser principalmente devida à influência dos ruídos das medições de PD, efeitos de multicaminho e efeitos atmosféricos.

Outro aspecto a se considerar diz respeito às soluções fixas de ambiguidades que degradam o posicionamento. Para reduzir tal ocorrência, recomenda-se por agora que a solução seja considerada fixa numa determinada época somente quando as ambiguidades forem fixadas para o mínimo de seis satélites, mantendo o valor crítico do *Ratio* como sendo maior ou igual a 3.

Experimentos foram realizados simulando o modo cinemático, onde as coordenadas da estação foram consideradas fixas até que as ambiguidades fossem solucionadas como inteiro e em seguida a variância presente na MVC das coordenadas da estação foi relaxada (expandida) para permitir o movimento do receptor a cada época (simulando cinemático). Para esse experimento, as ambiguidades foram fixadas em poucas épocas (3 épocas), como era esperado. Nesse caso, é importante salientar que o EMQ permaneceu relativamente constante até a época final de dados, mesmo considerando a estação como se estivesse em movimento. Nos experimentos onde não se fixou as coordenadas da estação, as ambiguidades foram fixadas no período de 3 a 8 minutos, com melhoria posicional horizontal

de 66 a 90%. Esses resultados confirmam a eficiência do método para aplicações que requerem o modo cinemático.

Outros experimentos em modo cinemático foram realizados de forma que também se pudessem usar dados coletados para analisar a influência da cintilação ionosférica, permitindo analisar preliminarmente sua influência no método de solução de ambiguidades aplicado no PPP. Nesse experimento foram implantados seis pontos de controle para se realizar as análises de qualidade das soluções. Por meio desses resultados se verificou que a cintilação ionosférica é de fato um problema para os métodos de posicionamento, dentre os quais o PPP. A cintilação afetou tanto as soluções de ambiguidades reais com as de inteiras. Nas soluções de ambiguidades inteiras, os valores de EMQ se mostraram um pouco mais elevados do que para o outro período sem influência de cintilação, mas se mantiveram melhores do que para as soluções reais.

O processo de solução de ambiguidades foi realizado baseado na combinação linear da observável *Ion-free* para as frequências GPS L1 e L2. Dessa forma, recomenda-se para trabalhos futuros, a utilização dos novos sinais dos satélites GPS, como por exemplo, as observáveis em L1 e L2 juntamente com as observáveis na frequência L5. Essa abordagem pode diminuir o tempo necessário para fixação das ambiguidades PPP.

Outra possibilidade de investigação visando à operacionalidade do sistema seria a respeito das possibilidades de disponibilização via internet do serviço de PPP com solução de ambiguidades inteiras, de forma que se possam chegar ao usuário os componentes necessários para alcançar a solução fixa.

O *software* RTPPP-AR, que contém as rotinas para solução das ambiguidades fixas, foi desenvolvido e estruturado de forma que a solução dos parâmetros, com a influência das ambiguidades inteiras, possa ser obtida a cada época. Adaptações são necessárias para se realizar o PPP em tempo real com solução de ambiguidades fixas, com possível utilização das órbitas preditas do IGS e também das órbitas estimadas em tempo real pelo BKG, IGS ou outros centros. As correções dos relógios dos satélites estimadas pelo BKG também podem ser utilizadas. Outra possibilidade é a utilização do *software* RT_SAT_CLOCK, desenvolvido no Brasil (Marques, 2012), o qual estima as correções dos relógios dos satélites para a realização do PPP em tempo real.

Com relação aos UPDs, o UPD_WL estimado com 24 horas de dados possui estabilidade e precisão suficientes para fixação das ambiguidades em tempo real. Para o UPD_NL, acredita-se que a estimativa com 1 hora de dados seja suficiente para a solução de ambiguidades inteiras, mas devem ser atualizados frequentemente, devido à instabilidade desses componentes. A

taxa de atualização necessária para a realização do posicionamento em tempo real com fixação das ambiguidades de forma confiável deve ser investigada em trabalhos futuros.

De uma forma geral, os objetivos da pesquisa foram alcançados e por meio do sistema desenvolvido, composto por dois *softwares*, foram obtidos os resultados que comprovam a eficiência do método proposto. Para o modo estático, isso é demonstrado com altas porcentagens de melhoria das soluções de ambiguidades inteiras com relação às de ambiguidades reais. Para o modo cinemático, além das porcentagens de melhoria no instante de fixação, a solução se manteve de certa forma constante até o final. Os experimentos em modo cinemático também contribuíram no sentido de se avaliar a influência da cintilação ionosférica no posicionamento, com a solução de ambiguidades fixas apresentando valores de EMQ melhores do que para as soluções reais, demonstrando a importância e eficiência do método de solução de ambiguidades inteiras.

REFERÊNCIAS

ALVES, C. M. D. **Solução de ambiguidades GPS no Posicionamento por Ponto Preciso utilizando uma rede de estações**. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2010.

BEIDOU. **BeiDou Navigation Satellite System**. Disponível em: <<http://en.beidou.gov.cn/index.html>>. Acesso em: 23 nov. 2015.

BERTIGER, W.; DESAI, S. D.; HAINES, B.; HARVEY, N.; MOORE, A. W.; OWEN, S.; WEISS, J. P. Single receiver phase ambiguity resolution with GPS data. **Journal of Geodesy**, v.84, doi 10.1007/s00190-010-0371-9, p.327–337. 2010.

BLEWITT, G. Carrier phase ambiguity resolution for the global positioning system applied to geodetic baselines up to 2000 km. **Journal Geophysics Research** v.94, B8, p.10187-10203. 1989.

_____. An automatic editing algorithm for GPS data. **Geophysical Research Letters**, v. v. 17, n.3, p.199-202. 1990.

_____. **The fixed point theorem of ambiguity resolution for precise point positioning of GPS networks: Theory and applications**. Eos Trans. AGU, 87(52), Fall Meet. Suppl., Abstract G43A-0977., 2006.

BLITZKOW, D.; MATOS, A. C. C. A evolução dos referenciais usados em Geodésia: A era moderna. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 8, n°1, ISSN 1982-2170, p. 3-16. 2005.

BNC. **BKG Ntrip Client**. Disponível em:<<http://igs.bkg.bund.de/ntrip/download>>. Acesso em: 10 ago.2015.

BOEHM, J.; SCHUH, H. Vienna Mapping Functions in VLBI Analyses. *Geophys. Res. Lett.* 31, L01603, doi:10.1029/2003GL018984. 2004.

CAMARGO, P. O. **Controle de qualidade aplicado ao Filtro de Kalman**. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 1992. 94 p.

COLLINS, P.; BISNATH, S. Undifferenced GPS Ambiguity Resolution using the Decoupled Clock Model and Ambiguity Datum Fixing. **Journal of the Institute of Navigation**, v.57. 2008.

COSTA, G. F.; SILVA, A. S.; ROMÃO, V. M. C.; RODRIGUES, D. D.; VIEIRA, C. A. O. Análise do Efeito do Multicaminho nas Observações de Satélites GPS na Estação da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) de Viçosa. . **Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário**. UFSC -Florianópolis – SC. 2008.

COSTA, S. M. A.; SILVA, A. L.; VAZ, J. A. **Avaliação do Processamento da Rede SIRGAS-CON pelo Centro de Análises IBGE**. XXIV Reunión Científica de la AAGG. Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas. Buenos Aires, 1a ed. p.142-147, ISBN 978-987-25291-1-6, 2009.

DACH, R. et al. **Bernese GPS software version 5.0**: user manual. Astronomical Institute, University of Bern, 2007.

DAVIES, K. **Ionospheric Radio**. Short Run Press Ltd. England 1990. 580 p.

DE JONGE, P.; TIBERIUS, C. C. J. M. **The LAMBDA method for integer ambiguity estimation: implementation aspects**, T.U. Delft-internal report, Delft, 1996.

Dong D, Bock Y. **Global positioning system network analysis with phase ambiguity resolution applied to crustal deformation studies in California**. J Geophys Res 94(B4):3949–3966, 1989.

Drewes, H., O. Heidbach (2012). **The 2009 Horizontal Velocity Field for South America and the Caribbean**. In: Kenyon S., M.C. Pacino, U. Marti (Eds.), "Geodesy for Planet Earth", IAG Symposia, 136: 657-664.

ESA. **European Space Agency**. Disponível em: <<http://www.esa.int>>. Acesso em: 23 nov. 2015.

GABOR, M. J. **GPS carrier phase ambiguity resolution using satellite-satellite single differences**. (PhD Thesis). The University of Texas at Austin, Austin, Texas. 1999.

GARNÉS, S. J. A. **Resolução das Ambiguidades GPS para Linhas de Base Curta: Análise dos Algoritmos de Otimização**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - CPGCG, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2001.

GE, M.; GENDT, G.; DICK, G.; ZHANG, F. P. Improving carrier-phase ambiguity resolution in global GPS network solutions. **Journal of Geodesy**, v.79, doi 10.1007/s00190-005-0447-0. 2005.

GE, M.; GENDT, G.; ROTHACHER, M.; SHI, C.; LIU, J. Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in precise point positioning (PPP) with daily observations. **Journal of Geodesy**, v.82,7, doi 10.1007/s00190-007-0187-4, p.389–399. 2008.

GEGE. **Grupo de Estudo em Geodésia Espacial**. Disponível em: <<http://www.fct.unesp.br/#!/pesquisa/grupos-de-estudo-e-pesquisa/gege/rede-gnss-sp2089/>>. Acesso em: 20 jul. 2015.

GENG, J.; BOCK, Y. **Triple-frequency GPS precise point positioning with rapid ambiguity resolution**. DOI 10.1007/s00190-013-0619-2. p. 449-460, 2013.

GENG, J.; MENG, X.; TEFERLE, F.; DODSON, A. Performance of Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution for 1- to 4-hour observation periods. **Survey Review**, v.42, p.155-165. 2010.

GENG, J.; MENG, X.; DODSON, A. H.; TEFERLE, F. N. **Integer ambiguity resolution in precise point positioning: method comparison**. Journal of Geodesy, v. 84, n. 9, p. 569-581, 6 ago 2010b.

GENG, J.; MENG, X.; TEFERLE, F. N.; DODSON, A. H. **Hourly precise point positioning with resolution ambiguity**. IESSG University of Nottingham. Disponível em:<<http://www.loran.org/Meetings/Meeting2008/Presentation%20pdfs/6B3%20GENG.pdf>>. Acesso em: 10 nov.2012.

GENG, J.; TEFERLE, F.; SHI, C.; MENG, X.; DODSON, A.; LIU, J. Ambiguity resolution in precise point positioning with hourly data. **GPS solutions**. 2009.

GENG, J.; TEFERLE, F. N.; MENG, X.; DODSON, A. H. Towards PPP-RTK: Ambiguity resolution in real-time precise point positioning. **Advances in Space Research**, v.47,10, doi: 10.1016/j.asr.2010.03.030, p. 0273-1177. 2011.

GPS. **National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing**. Disponível em: < <http://www.gps.gov/>>. Acesso em: 23 nov. 2015.

HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; JUAN, J. M.; SANZ, J.; ORÚS, R. Second-order ionospheric term in GPS: Implementation and impact on geodetic estimates. **Journal of Geophys Research**, v.112, B08417, p.1-16. 2007.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. **GPS Theory and Practice**: Wien: Springer-Verlag, 2001.

IAC. **Russian Federal Space Agency**. Disponível em: <<https://www.glonass-iac.ru/en/GLONASS/index.php>>. Acesso em: 23 nov. 2015.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Altera a caracterização do Sistema Geodésico Brasileiro. Resolução do Presidente nº 01 de 25 de fevereiro de 2005. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/pmrg/leg.shtm>>. Acesso em: 21 jan. 2015a.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc/rbmc.shtm>>. Acesso em: 21 jan. 2015b.

IGS. **INTERNATIONAL GNSS SERVICE**. IGS Products. Disponível em: <<http://igscb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>>. Acesso em: 08 jun. 2015.

JOOSTEN, P; TIBERIUS, C. LAMBDA: FAQs. *GPS Solut* 6(1-2):109-114, 2002.

KALMAN, R. E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. **Transactions of the ASME–Journal of Basic Engineering**, v.82, p.35-45. 1960.

KOUBA, J. **A GUIDE TO USING INTERNATIONAL GNSS SERVICE (IGS) PRODUCTS (2009)**. Geodetic Survey Division - Natural Resources Canada. Disponível em: <<http://igscb.jpl.nasa.gov/components/usage.html>>. Acesso em: 08 jun. 2015.

LAURICHESSE, D.; MERCIER, F.; BERTHIAS, J. P. **Real time zero-difference ambiguities fixing and absolute RTK**. ION NTM 2008. San Diego, California, 2008.

LEANDRO, R. F.; SANTOS, M. C. **Wide area based precise point positioning**. Proceedings of the Institute of Navigation - 19th International Technical Meeting of the Satellite Division, ION GNSS 2006, 4, 2272 - 2278, 2006.

LEICK, A. **GPS: satellite surveying**: John Wiley & Sons, 1994.

_____. **GPS satellite surveying**. 3rd. ed.: New York: John Wiley & Sons, 2004. 435p.

LI, X., DICK, G., GE, M., HEISE, S., WICKERT, J., BENDER, M. **Real-time GPS sensing of atmospheric water vapor**: precise point positioning with orbit, clock and phase delay corrections. - *Geophysical Research Letters*. DOI: <http://doi.org/10.1002/2013GL058721>. 2014

MELBORNE, W.G. **The case for ranging in GPS-based geodetic systems**. In: Proceedings first international symposium on precise positioning with the global positioning system, Rockville, 15–19 April pp 373–386, 1985.

MARQUES, H. A. **Influência da Ionosfera no Posicionamento GPS: Estimativa dos Resíduos no Contexto de Duplas Diferenças e Eliminação dos Efeitos de 2ª e 3ª Ordem**. (Dissertação - Mestrado em Ciências Cartográficas). Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2008.

_____. **PPP em Tempo Real com Estimativa das Correções dos Relógios dos Satélites no Contexto de Rede GNSS.** (Tese - Doutorado em Ciências Cartográficas). Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2012.

MONICO, J. F. G. **Ajustamento das observáveis GPS no contexto de posicionamento geodésico.** 275f. Tese (Livre Docência) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2005.

_____. **Posicionamento pelo GNSS – Descrição, fundamentos e aplicações.** São Paulo: Editora UNESP, 2008.

NRCAN.GPS POSITIONING GUIDE. Disponível em:<luna.csr.nrcan.gc.ca/GPS_Guide_e/GPS_Guide_e.pdf>. Acesso em: 20 jan.2015.

SAPUCCI, L. F. **Estimativa do vapor d'água atmosférico e avaliação da modelagem do atraso zenital troposférico utilizando GPS.** (Dissertação - Mestrado em Ciências Cartográficas). Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2001. 167 f.

SBAS.**Effect of Ionospheric Scintillations on GNSS – A White Paper.** SBAS Ionospheric Working Group (2010). Disponível em:<http://waas.stanford.edu/~www/papers/gps/PDF/IWG/sbas_iono_scintillations_white_paper.pdf>. Acesso em: 11 fev. 2012.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: foundations, methods, and applications.** 2nd.ed. Berlin: New-York:Walter de Gruyter, 2003.

SHEN, X. **Improving Ambiguity Convergence in Carrier Phase-based Precise Point Positioning.** (M.Sc. thesis). University of Calgary, Canada, UCGE Report No. 20170. 2002.

SHI, J; GAO Y. A comparison of three PPP integer ambiguity resolution methods. GPS Solut 18:519–528. DOI 10.1007/s10291-013-0348-2. 2014.

SILVA, N. C. C.; SANTOS, M. C.; OLIVEIRA, L. C. Efeito da refração troposférica no posicionamento geodésico com GPS. **Revista Brasileira de Geofísica**, v.17, n.2-3, ISSN 0102-261X, p.117-128. 1999.

SIRGAS. **Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas.** . Disponível em:<<http://www.sirgas.org>>. Acesso em: 21 jun. 2015.

SOUZA, E. M.; MONICO, J. F. G. **Validação da solução da ambiguidade GPS: Fundamentos, Implementação e Resultados.** Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas (IV) UFPR- Curitiba PR, 2005.

TAKASU, T.**RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning** Disponível em:<<http://gpspp.sakura.ne.jp/rtklib/rtklib.htm>>. Acesso em: 03 fev. 2015.

TEUNISSEN, P.J.G. **A new method for fast carrier phase ambiguity estimation.** In: Proceedings of IEEE Position, Location and Navigation Symposium, Las Vegas, US, pp 562-573, 1994.

TEUNISSEN, P. J. G.; KHODABANDEH, A. **Review and principles of PPP-RTK methods.** Journal of Geodesy, v. 89, n. 3, p. 217-240, 13 nov. 2014.

TEUNISSEN, P. J. G. **Least-Squares Estimation of the Integer GPS Ambiguities.** IV "Theory and Methodology", at the General Meeting of the International Association of Geodesy, Beijing, China, August 1993. Disponível

em:<http://www.citg.tudelft.nl/fileadmin/Faculteit/CiTG/Over_de_faculteit/Afdelingen/Afdeling_Geoscience_and_Remote_Sensing/pubs/PT_BEIJING93.PDF>. Acesso em: 11 fev. 2015.

TIWARI, R.; SKONE, S.; TIWARI, S.; STRANGWAYS, H. J. **WBMod Assisted PLL GPS Software Receiver for Mitigating Scintillation Affect in High Latitude Region.** . IONOSPHERIC AND TROPOSPHERIC EFFECTS IN PRECISION GNSS - XXXth URSI General Assembly (August 2011). Istanbul - Turquia. Disponível em:<<http://www.ursi.org/proceedings/procGA11/ursi/FG-4.pdf>>. Acesso em: 11 fev.2012.

WELL, L.R. Conquering Multipath: The GPS Accuracy Battle. GPS World, v.8, p.59-66, 1997.

WELLS, D.; BECK, N.; DELIKARAOGLU, D.; KLEUSBERG, A.; KRAKIWSKY, E. J.; LACHAPELLE, G.; LANGLEY, R. B.; NAKIBOGLU, M.; SCHWARZ, K. P.; TRANQUILLA, J. M.; VANÍCEK, P. **Guide to GPS positioning.** New Brunswick, Canadá 1986. (University of New Brunswick).

WÜBBENA G. **Software developments for geodetic positioning with GPS using TI-4100 code and carrier measurements.** In: Proceedings of first international symposium on precise positioning with the global positioning system, Rockville, 15–19 April pp 403–412, 1985.

XU, G. **GPS: Theory, Algorithms and Applications.** Berlin: Springer, 2007.

ZUMBERGE, J. F.; HEFLIN, M. B.; JEFFERSON, D. C.; WATKINS, M. M.; WEBB, F. H. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. **Journal of Geophys Research**, v.102(B3), doi:10.1029/96JB03860, p.5005–5017. 1997.