

RENATA CRISTINA FAUSTINO



**POSICIONAMENTO POR PONTO
PRECISO ESTÁTICO E CINEMÁTICO:
IMPLEMENTAÇÃO E ANÁLISE**

Dissertação de Mestrado

PRESIDENTE PRUDENTE

2006

RENATA CRISTINA FAUSTINO

**POSICIONAMENTO POR PONTO
PRECISO ESTÁTICO E CINEMÁTICO:
IMPLEMENTAÇÃO E ANÁLISE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, para obtenção do título de Mestre em Ciências Cartográficas.

Orientador: Prof. Dr. João Francisco Galera Monico

**PRESIDENTE PRUDENTE
2006**



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE PRESIDENTE PRUDENTE
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DE PRESIDENTE PRUDENTE

DEFESA DE DISSERTAÇÃO de RENATA CRISTINA FAUSTINO, realizada no dia 31 de outubro de 2006.

RELATÓRIO FINAL

Foi realizada, no dia 31 de outubro de 2006, a DEFESA DE DISSERTAÇÃO de **RENATA CRISTINA FAUSTINO**, aluna regular do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS CARTOGRÁFICAS desta Unidade Universitária.

O candidato apresentou o trabalho intitulado : POSICIONAMENTO POR PONTO PRECISO ESTÁTICO E CINEMÁTICO: IMPLEMENTAÇÃO E ANÁLISES, tendo como Orientador o Dr. JOAO FRANCISCO GALERA MONICO.

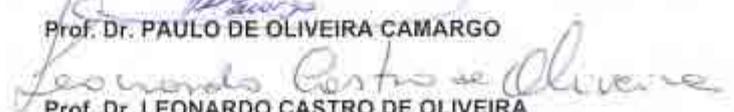
A Comissão examinadora foi constituída pelos membros: Dr. JOAO FRANCISCO GALERA MONICO, Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente; Dr. PAULO DE OLIVEIRA CAMARGO, Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente e Dr. LEONARDO CASTRO DE OLIVEIRA, IME/ Instituto Militar de Engenharia que elaborou o seguinte relatório:

O candidato evidenciou domínio do assunto e de acordo com os conceitos atribuídos pelos examinadores, foi considerado APROVADO, o que lhe concede o direito de receber, regimentalmente, o título de MESTRE em CIÊNCIAS CARTOGRÁFICAS, devendo este resultado ser homologado pela douta Congregação desta Unidade Universitária.

PRESIDENTE PRUDENTE, 31 de outubro de 2006.


Prof. Dr. JOAO FRANCISCO GALERA MONICO


Prof. Dr. PAULO DE OLIVEIRA CAMARGO


Prof. Dr. LEONARDO CASTRO DE OLIVEIRA

DEDICATÓRIA

*Aos meus amados pais Nilsa e Carlos, a
minha segunda mãe tia Bete, aos meus avós
Ruth (in memoriam) e Ananias e ao meu
namorado Maurício*

*Pelo amor, incentivo e compreensão de
forma incondicional.*

*Aos meus tios Wanderley, Wagner e Valdecir
e às minhas priminhas Katharinne, Gabriela
e Lais*

Pelos momentos de laser e descontração.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à Deus pela minha vida e pela oportunidade de realizar essa pesquisa.

À FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa no Estado de São Paulo), pelo apoio financeiro durante o desenvolvimento do projeto.

Ao meu orientador, o Prof. Dr. João Francisco Galera Monico, pela experiência acadêmica que por ele me foi transmitida, pelo incentivo e dedicação constante durante esta jornada.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas (PPGCC) e do Departamento de Cartografia da UNESP, que contribuíram para a minha formação e evolução pessoal.

Ao GEGE (Grupo de Estudo em Geodésia Espacial), pelos ensinamentos nas tardes de sexta-feira. Aos alunos do PPGCC, pelas longas conversas produtivas, em especial aos alunos Daniele, Nilcilene (Aninha), Marcelo, Eliane, William, Edgar e Eniuce.

Aos meus amigos de São Paulo e de POA que mesmo estando longe sempre me apoiaram e incentivaram. Obrigada Tatiana, Cristiane, Igor, Renata e Glaucia.

Aos meus companheiros do Projeto Camerata de Presidente Prudente, em especial ao professor e maestro Luiz Antônio Perez Filho (Luizão), pelos ensaios da orquestra, incentivo e momentos de descontração. Vocês foram minha segunda família em Presidente Prudente.

E, finalmente, a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

EPÍGRAFE

“Tudo posso Naquele que me fortalece.”

Filipenses 4:13

“Porque todo o que é nascido de Deus vence o mundo; e esta é a vitória que vence o mundo: a nossa fé.”

1 João 5:4

RESUMO

Nesta dissertação investiga-se o Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), nos modos estático e cinemático, utilizando o Filtro de Kalman Estendido. Foram corrigidos os erros devido aos efeitos da refração troposférica, relatividade, movimento de rotação da Terra, variações das marés terrestres, correção do centro de fase da antena do satélite e fase *Wind-up*. Os efeitos devido à ionosfera foram minimizados através da combinação linear *Ion-Free*. A perda de ciclo foi detectada através da combinação linear *widelane*, envolvendo as duas observáveis: fase da onda portadora e pseudodistância. Quando a perda de ciclo é detectada, uma nova ambigüidade é inicializada no lugar da antiga. As implementações foram realizadas no *software* FILTER_FCT, em desenvolvimento na FCT/UNESP, o qual processava apenas a pseudodistância. Visando mostrar a acurácia que pode ser obtida com o PPP, foram realizados três experimentos: PPP no modo estático, PPP estático simulando o modo cinemático e PPP cinemático. No primeiro e no segundo experimentos foram utilizados dados das estações GPS: PPTE, VICO, RIOD e FORT, pertencentes à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), e da estação FRDN, localizada em Fredericton, no Canadá. No terceiro experimento foram utilizados dados do receptor GPS a bordo do satélite CHAMP. No PPP estático, utilizou-se como estratégia de processamento a modificação da variância das coordenadas e do relógio do receptor na matriz de variância-covariância do Filtro de Kalman Estendido. Verificou-se uma discrepância em relação às coordenadas consideradas “verdadeiras” na ordem de decímetros, com exceção das estações VICO e RIOD, que foram da ordem de centímetros. Quando a variância do relógio do receptor foi incrementada de $(3.300)^2 \text{ m}^2$ para $(10.000)^2 \text{ m}^2$, os valores das discrepâncias aumentaram; assim, há influência da variância do relógio no cálculo das coordenadas. A parte residual dos efeitos da refração troposférica foi estimada mediante a introdução de um fator de escala para todo o processamento, sendo que saltos no fator de escala estimado representam a existência de perdas de ciclo nos dados que possivelmente não foram corrigidos pelo processo implementado. No segundo experimento, para simular o modo cinemático, adicionou-se um valor de $1,00 \text{ m}^2$ para a variância das coordenadas na matriz de variância-covariância dos ruídos e dos parâmetros do Filtro de Kalman Estendido, considerando sua correlação nula. As discrepâncias das coordenadas estimadas neste processo, juntamente com as correções do relógio do receptor, apresentaram praticamente o mesmo comportamento com relação ao PPP no modo estático. No terceiro experimento, PPP cinemático, foi utilizada a mesma estratégia adotada no segundo experimento, mas nesse caso com dados GPS do satélite CHAMP. Neste experimento os resíduos foram altos sendo sua média de $0,281 \text{ m} \pm 5,189 \text{ m}$ para a fase e de $1,510 \text{ m} \pm 36,117 \text{ m}$ para a pseudodistância. Já a variação média do comportamento do relógio do receptor foi de $0,214 \text{ m} \pm 4,998 \text{ m}$. As discrepâncias em relação às coordenadas da órbita do CHAMP foram de $-3,030 \text{ m} \pm 36,509 \text{ m}$ na coordenada X, $6,186 \text{ m} \pm 60,740 \text{ m}$ na coordenada Y e $3,877 \text{ m} \pm 92,181 \text{ m}$ na coordenada Z, indicando que provavelmente ainda há problemas na estratégia adotada para realizar o PPP cinemático para o satélite CHAMP, problemas esses que devem ser investigados em trabalhos futuros.

Palavras Chave: Posicionamento por Ponto Preciso (PPP); Erros nas observáveis GPS; Filtro de Kalman Estendido; PPP estático e cinemático; Satélite CHAMP.

ABSTRACT

In this dissertation the Precise Point Positioning (PPP), in static and kinematic modes, using Extended Kalman Filter is investigated. The errors due to troposphere refraction, relativity, movement of Earth's rotation, tide loading, satellite antenna phase center offset and phase wind-up were corrected. The effects due to ionosphere were minimized through the Ionospheric-Free linear combination. The widelane combination, involving phase and pseudorange, was used to detect cycle slips. When a cycle slip is detected, a new ambiguity is initialized in the place of the old one. The implementations were accomplished in the FILTER_FCT software. To show the accuracy in the PPP, three experiments were accomplished: PPP in the static mode, PPP in the static mode simulating the kinematic mode and PPP in kinematic mode. In the first and second experiments, data from PPTE, VICO, RIOD and FORT stations belonging to Brazilian Network for Continuous Monitoring (RBMC), and FRDN station located in Fredericton, Canada, were used. In the third experiment data from a GPS receiver on board of the CHAMP satellite were used. In static PPP, the modification of the coordinates variance and the receiver clock was used as processing strategy. The discrepancies obtained in the static positioning were on the order of decimeters, except for VICO and RIOD stations where they were on the order of centimeters. When the clock receiver variance was increased from $(3.300)^2 \text{ m}^2$ to $(10.000)^2 \text{ m}^2$, the values of the discrepancies also increased, on the order of centimeters. Then, there is influence of the receiver clock variance in the estimated coordinates. The residual part of the tropospheric effects was estimated with the introduction of a scale factor in the processing. Jumps in the scale factor shows that there are cycle slips in the processing that possibly were not corrected by the implemented process. In the second experiment, to simulate the kinematic mode, at each epoch, a value of 1.00 m^2 was added for the coordinate's variance in the variance and covariance matrix of the noise and parameters of the Extended Kalman Filter, considering null correlation. The behavior of the receiver clock and the discrepancies were of the same order as the static PPP. In the third experiment, in which the kinematic PPP was tested, the same strategy adopted in the second experiment was used for the CHAMP satellite data. In this experiment, the residuals were large being their average of $0.852 \text{ m} \pm 5.049 \text{ m}$ for the phase and $12.934 \text{ m} \pm 36.985 \text{ m}$ for pseudorange. The clock receiver variation behavior, the average was 0.214 m with a standard deviation of 4.998 m . The discrepancies in relation to the coordinates of the CHAMP's orbit were of $-3.030 \text{ m} \pm 36.509 \text{ m}$ in the X coordinate, $6.186 \text{ m} \pm 60.740 \text{ m}$ in the Y coordinate and of $3.877 \text{ m} \pm 92.181 \text{ m}$ in the Z coordinate indicating that probably there are still problems in the strategy adopted to accomplish the kinematic PPP for the CHAMP satellite. This must be investigated in future works.

Keywords: Precise Point Positioning (PPP); GPS Observable Errors; Extended Kalman Filter; Static and kinematic PPP; CHAMP Satellite.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema das funções de mapeamento	24
Figura 2 – Camadas da Ionosfera	27
Figura 3 – Geometria para o atraso do caminho geométrico	30
Figura 4 – Ilustração da perda de ciclo	31
Figura 5 – Ilustração do efeito do multicaminho.	33
Figura 6 – Correções do centro de fase da antena do satélite.....	42
Figura 7 – Fluxograma do FILTER_FCT.	48
Figura 8 – Estrutura do arquivo de controle do FILTER_FCT.	49
Figura 9 – Fluxograma do PPP.	60
Figura 10 – Discrepância das Coordenadas PPTE no PPP estático.....	65
Figura 11 – Discrepância das Coordenadas RIOD no PPP estático.	65
Figura 12 – Discrepância das Coordenadas VICO no PPP estático.	66
Figura 13 – Discrepância das Coordenadas FORT no PPP estático.....	66
Figura 14 – Discrepância das Coordenadas FRDN no PPP estático.	67
Figura 15 – Fator de escala estimado para a troposfera na estação FORT com $\mathbf{s}_r^2 = (3.300,00)^2 \text{ m}^2$ e $\mathbf{s}_{X_INICIAL} = 1,00 \text{ m}^2$ no PPP estático.	71
Figura 16 – Fator de escala estimado para a troposfera na estação RIOD com $\mathbf{s}_r^2 = (3.300,00)^2 \text{ m}^2$ e $\mathbf{s}_{X_INICIAL} = 1,00 \text{ m}^2$ no PPP estático.	72
Figura 17 – Fator de escala estimado para a troposfera na estação VICO com $\mathbf{s}_r^2 = (3.300,00)^2 \text{ m}^2$ e $\mathbf{s}_{X_INICIAL} = 1,00 \text{ m}^2$ no PPP estático.	72
Figura 18 – Fator de escala estimado para a troposfera na estação PPTE com $\mathbf{s}_r^2 = (3.300,00)^2 \text{ m}^2$ e $\mathbf{s}_{X_INICIAL} = 1,00 \text{ m}^2$ no PPP estático.....	73
Figura 19 – Fator de escala estimado para a troposfera na estação FRDN com $\mathbf{s}_r^2 = (3.300,00)^2 \text{ m}^2$ e $\mathbf{s}_{X_INICIAL} = 1,00 \text{ m}^2$ no PPP estático.....	73
Figura 20 – Ambigüidades da estação VICO com $\mathbf{s}_r^2 = 3.300,00 \text{ m}^2$ e $\mathbf{s}_{X_INICIAL} = 1,00 \text{ m}$ no PPP estático.	75
Figura 21 – Desvio-padrão para as ambigüidades da estação VICO com $\mathbf{s}_r^2 = 3.300,00 \text{ m}^2$ e $\mathbf{s}_{X_INICIAL} = 1,00 \text{ m}^2$ no PPP estático.....	75
Figura 22 – Discrepância das coordenadas simulando o PPP cinemático.	76
Figura 23 – Discrepância das Coordenadas RIOD simulando o PPP cinemático.	77
Figura 24 – Discrepância das Coordenadas VICO simulando o PPP cinemático.	77
Figura 25 – Discrepância das Coordenadas FORT simulando o PPP cinemático.....	78
Figura 26 – Discrepância das Coordenadas FRDN simulando o PPP cinemático.	78
Figura 27 – Variação no comportamento do relógio do receptor para a estação PPTE no PPP simulando o posicionamento cinemático.	80
Figura 28 – Variação no comportamento do relógio do receptor para a estação RIOD no PPP simulando o posicionamento cinemático.	81

Figura 29 – Variação no comportamento do relógio do receptor para a estação VICO no PPP simulando o posicionamento cinemático.	81
Figura 30 – Variação no comportamento do relógio do receptor para a estação FORT no PPP simulando o posicionamento cinemático.	82
Figura 31 – Variação no comportamento do relógio do receptor para a estação no PPP simulando o posicionamento cinemático.	82
Figura 32 – Fator de escala estimado para a troposfera na estação PPTE no PPP simulando o cinemático.	83
Figura 33 – Fator de escala estimado para a troposfera na estação RIOD no PPP simulando o cinemático.	84
Figura 34 – Fator de escala estimado para a troposfera na estação VICO no PPP simulando o cinemático.	84
Figura 35 – Fator de escala estimado para a troposfera na estação FORT no PPP simulando o cinemático.	85
Figura 36 – Fator de escala estimado para a troposfera na estação FRDN no PPP simulando o cinemático.	85
Figura 37 – Ambigüidades da estação VICO no PPP estático simulando o cinemático.	86
Figura 38 – Desvio-padrão para as ambigüidades da estação VICO no PPP estático simulando o cinemático.	87
Figura 39 – Satélite CHAMP.	88
Figura 40 – Posição do satélite CHAMP do arquivo CHORB.	89
Figura 41 – Posição do satélite CHAMP.	90
Figura 42 – Desvio-padrão das coordenadas do satélite CHAMP.	90
Figura 43 – Variação do relógio do receptor para o satélite CHAMP.	92
Figura 44 – Valores das ambigüidades para o satélite CHAMP.	92
Figura 45 – Desvio-padrão das ambigüidades para o satélite CHAMP.	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fontes e efeitos dos erros envolvidos no GPS	20
Tabela 2 – Valores dos coeficientes para a componente seca	26
Tabela 3 – Valores dos coeficientes para a componente úmida	26
Tabela 4 – <i>Bias</i> P1/CA (ns).	46
Tabela 5 – Combinação linear das fases de batimento da onda portadora	57
Tabela 6 – Combinação linear da pseudodistância	57
Tabela 7 – Coordenadas das Estações utilizadas nos experimentos.	62
Tabela 8 – Discrepância das coordenadas com $s_r^2 = (3.300,00)^2$ m ²	67
Tabela 9 – Discrepância das coordenadas com $s_r^2 = (10.000,00)^2$ m ²	68
Tabela 10 – Erro médio dos resíduos no PPP estático.	69
Tabela 11 – Variação média do relógio do receptor no PPP estático com.....	70
Tabela 12 – Variação média do relógio do receptor no PPP estático com.....	70
Tabela 13 – Fator de escala da troposfera no PPP estático.	74
Tabela 14 – Discrepância das coordenadas do PPP simulando o posicionamento cinemático.	79
Tabela 15 – Erro médio dos resíduos no PPP estático simulando o modo cinemático.	79
Tabela 16 – Fator de escala da troposfera no PPP estático.	86
Tabela 17 – Discrepâncias das coordenadas em relação ao arquivo CHORB no PPP cinemático.	91
Tabela 18 – Erro médio e desvio-padrão dos resíduos no PPP cinemático.	91

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Descrição Geral.....	13
1.2 Objetivos.....	14
1.3 Justificativa	14
1.4 Conteúdo da Dissertação	16
2 FUNDAMENTOS ENVOLVIDOS NO POSICIONAMENTO POR PONTO PRECISO.....	17
2.1 Modelo Matemático do PPP	18
2.2 Erros envolvidos nas observáveis GPS	19
2.2.1 Propagação do Sinal.....	21
2.2.1.1 Erro devido à Refração Troposférica.....	21
2.2.1.1.1 Funções de Mapeamento	23
2.2.1.2 Erro devido à Refração Ionosférica	27
2.2.1.3 Perdas de ciclo	30
2.2.1.4 Multicaminho.....	32
2.2.1.5 Relatividade	34
2.2.1.6 Rotação da Terra.....	35
2.2.2 Erros relacionados com a estação	35
2.2.2.1 Marés terrestres.....	36
2.2.2.2 Carga dos Oceanos	37
2.2.2.3 Carga Atmosférica	38
2.2.2.4 Relógio do Receptor	39
2.2.2.5 Variação temporal das coordenadas devido à Geodinâmica	39
2.2.3 Erros relacionados com o centro de fase da antena	41
2.2.3.1 Erro relacionado ao centro de fase da antena do satélite	41
2.2.3.2 Fase <i>Wind-up</i>	43
2.2.3.3 Erro relacionado ao centro de fase da antena do receptor	44
2.2.3.4 Correções das observações obtidas a partir do código	45
3 IMPLEMENTAÇÃO DO PPP NO SOFTWARE FILTER_FCT	47
3.1 Filtro de Kalman Estendido	50
3.2 Eliminação dos erros devido à refração troposférica e ionosférica	55

3.3 Detecção da Perda de ciclo	58
3.4 Outras implementações realizadas no FILTER_FCT	59
4 EXPERIMENTOS E ANÁLISES	61
4.1 Experimentos	62
4.1.1 Configurações do Filtro de Kalman para realizar o PPP	63
4.1.2 Resultados do PPP estático	64
4.1.3 Resultados do PPP estático simulando o posicionamento cinemático.....	76
4.1.4 Resultados do PPP cinemático – Posicionamento do satélite CHAMP.....	87
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES	94
REFERÊNCIAS	97
BIBLIOGRAFIAS	103

1 INTRODUÇÃO

1.1 Descrição Geral

A atual tecnologia de posicionamento permite que qualquer pessoa possa se localizar no planeta com uma precisão nunca imaginada. Assim, quando se necessita de rapidez e precisão no posicionamento, pensa-se, imediatamente, no GPS (*Global Positioning System*). Entre os sistemas de posicionamento global pode-se citar, além do GPS, o GLONASS (*GLObal NAVigation Satellite System*) e o GALILEO (Sistema de Posicionamento por Satélite Europeu), esse último em fase de validação.

O GPS é um sistema de rádio-navegação desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América (DoD – *Department of Defense*), visando ser o principal sistema de navegação das forças armadas americanas (MONICO, 2000). O GLONASS é um sistema similar ao GPS, de origem russa. Esses dois sistemas já estão em operação. O GALILEO, de origem européia, deverá entrar em operação em 2010.

No posicionamento geodésico dois métodos principais são utilizados: o posicionamento por ponto (PP), também conhecido como posicionamento absoluto, e o posicionamento relativo. Basicamente, o posicionamento relativo trata-se do ajustamento das diferenças de observáveis coletadas em duas ou mais estações. Já o posicionamento por ponto é um método de posicionamento geodésico mais simples, o qual se baseia na utilização de um único receptor para obtenção das coordenadas tridimensionais de uma estação. Apesar de ser menos preciso do que o posicionamento relativo há a possibilidade de torná-lo tão preciso quanto o posicionamento relativo, trata-se do Posicionamento por Ponto Preciso (PPP).

Desde a introdução do GPS nos anos 70, o posicionamento relativo vinha dominando o campo do processamento de dados GPS. De fato, ocorreu um “monopólio” desse método, por ser muito preciso, até a década de 90, quando surgiu o PPP.

A principal vantagem do PPP é a apresentação da alta precisão, como ocorre com o posicionamento relativo, só que com a eliminação do rastreamento simultâneo de dados com outra estação de referência. No PPP, geralmente, utilizam-se receptores de dupla frequência e as efemérides precisas, as quais são responsáveis pela redução dos erros de órbitas e erro dos relógios dos satélites. Os erros envolvidos nas observáveis utilizadas no PPP, ao contrário do modo convencional, devem ser corrigidos ou modelados. Além disso, apesar de haver uma grande quantidade de erros envolvidos, pode-se dizer que no PPP os dados são mantidos

completamente intactos, o que o torna o principal método utilizado para analisar a maioria das fontes de erros GPS.

Os satélites de baixa órbita (LEO – *Low Earth Orbit*), tais como o satélite CHAMP (*CHALLENGING Minisatellite Payload*), o GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*) e o SAC-C (*Satélite de Aplicaciones Científicas - C*), cuja finalidade é a determinação do campo gravitacional e parâmetros da atmosfera terrestre, dentre outras, necessitam ter suas posições determinadas. Elas podem ser determinadas a partir dos dados dos satélites GPS, ou seja, observações de pseudodistâncias e fase da onda portadora, coletadas em órbita. Essa determinação pode ser realizada utilizando o PPP no modo cinemático.

Neste trabalho realiza-se o PPP, no modo estático e no modo cinemático, implementado mediante o uso do Filtro de Kalman Estendido. Ele é uma extensão do Filtro de Kalman, sendo comumente utilizado quando o processo a ser estimado e/ou medidas relacionadas ao processo é não linear (WITCHAYANGKON, 2000).

1.2 Objetivos

Os objetivos deste projeto de mestrado são:

- Investigar e implementar o modelo matemático do PPP, no modo estático e cinemático, levando em consideração os erros envolvidos nas observáveis GPS;
- Avaliar a qualidade dos resultados provindos do *software*, com as diferentes estratégias de processamento;
- Dar continuidade as pesquisas desenvolvidas na FCT/UNESP no que concerne ao posicionamento por satélite de alta precisão.

1.3 Justificativa

Utilizando as observáveis fase de batimento da onda portadora e pseudodistância coletadas por receptores de dupla frequência, também em conjunto com os produtos IGS, o PPP pode proporcionar resultados similares aos casos em que dados de vários receptores são processados em conjunto, numa rede GPS.

No que concerne ao modo estático e cinemático no PPP, trabalhos vêm sendo desenvolvidos, buscando explorar a possibilidade de obter alta precisão utilizando apenas um receptor. Os trabalhos iniciais estão vinculados ao posicionamento estático, desenvolvidos na Divisão de Geodésia do NRCAn (*Natural Research Canada*) (KOUBA e HÉROUX, 2000). Monico (2000A) realizou experimentos com o PPP estático utilizando o *software* GIPSY OASYS II (GOA II), em conjunto com dados da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) disponibilizados pelo IBGE. Os resultados proporcionaram repetibilidade melhor que 5,0 mm e 10,0 mm para as componentes horizontais N e E respectivamente, e de 6,0 mm + 4 ppb (partes por bilhão) para a componente vertical (h). Comparação com resultados estimados na realização do SIRGAS (Sistema de Referência das Américas), mostrou-se compatível com a incerteza das estações que foram utilizadas para conectá-lo ao ITRF94. SAPPUCCI (2001) utilizou-se do PPP para calcular o atraso troposférico utilizando também o *software* GOA II.

No que concerne ao posicionamento cinemático, pode-se citar Bisnath e Langley (2001), que obtiveram acurácia de poucos decímetros na determinação de posições de satélites de baixa órbita; Salam, Gao e Shen (2002) confirmaram a possibilidade da utilização do PPP no modo estático e cinemático com obtenção de bons resultados.

Perez (2002) utilizou-se do PPP para estimar o campo de velocidade para as estações da RBMC e do IGS localizados na placa sulamericana (SOAM) em conjunto com dados GPS. Ele comparou seus resultados com outras fontes confiáveis, como as várias soluções do ITRF e modelos geofísicos existentes, obtendo êxito em realização de seu objetivo.

Witchayangkoon (2000) descreve todos os erros envolvidos nas observáveis GPS e realiza o PPP no modo estático e o PPP no modo estático simulando o modo cinemático, tanto para receptores de dupla frequência, quanto para de simples frequência, obtendo acurácia da ordem de centímetros no modo estático e de decímetros no modo cinemático. Abdel-Salam (2005), para receptores de dupla frequência, também obteve a mesma acurácia.

Assim, existem *softwares* que realizam o PPP, tanto no modo estático, como no modo cinemático. Entretanto, estes *softwares* são “fechados”, sem a possibilidade de modificar o programa de acordo com as necessidades de estudo, como é o caso do GOA II. Nesse sentido, com a implementação do PPP neste projeto de Mestrado, pretende-se dominar essa metodologia e não depender de *softwares* do tipo *Black Box*.

1.4 Conteúdo da Dissertação

Este trabalho tem seu conteúdo dividido em cinco capítulos. A organização deste trabalho é descrita a seguir, com o conteúdo de cada capítulo.

O capítulo 2 apresenta o PPP, suas observáveis e as principais fontes de erros envolvidas nas observáveis GPS.

No capítulo 3 é descrito o *software* FILTER_FCT e as implementações realizadas neste *software* para realizar o PPP, bem como o Filtro de Kalman.

O capítulo 4 apresenta os experimentos realizados, bem com a análise dos mesmos. O quinto e último capítulo apresenta as considerações finais e recomendações futuras deste trabalho.

2 FUNDAMENTOS ENVOLVIDOS NO POSICIONAMENTO POR PONTO PRECISO

No Posicionamento por Ponto (PP), também conhecido como Posicionamento Absoluto, necessita-se de apenas um receptor e de no mínimo 4 satélites visíveis simultaneamente, ou seja, possíveis de serem rastreados na mesma época, pois para se realizar o posicionamento há quatro incógnitas no ajustamento, três relativas as coordenadas da estação (X, Y, Z) e uma relativa ao erro do relógio do receptor (dt_r).

Nesse método de posicionamento, a determinação das posições pode ser feita tanto em tempo real como pós-processada, em função do nível de precisão requerido. Esses métodos são conhecidos como Posicionamento Absoluto ou PP e PPP.

A primeira forma de processamento é a que proporciona o menor grau de precisão. Esse tipo de posicionamento é geralmente realizada em tempo real e a observável básica utilizada é a pseudodistância derivada do código C/A presente na portadora L_1 . A precisão nessa forma de processamento depende da qualidade da observável utilizada (pseudodistância) e a acurácia dos parâmetros transmitidos nas mensagens de navegação, juntamente com os outros erros relacionados. No PP, quando disponível a fase da onda portadora, a mesma pode ser incluída no processamento juntamente com a pseudodistância. Entretanto, tal procedimento não tem sido uma prática comum nesse posicionamento, pois para uma única época não proporciona refinamento da solução. Dessa forma, esse método não atende os requisitos de precisão intrínsecos ao posicionamento geodésico (MONICO, 2000).

Quando as observações de pseudodistância obtidas com receptores de simples ou dupla frequência são pós-processadas, é possível a utilização das efemérides precisas e das correções para os relógios dos satélites produzidos pelo IGS. Nesse caso, tem-se o método de PPP, o qual geralmente se utiliza receptor de dupla frequência, envolvendo o uso das duas observáveis nas duas portadoras.

Com relação ao erro devido à ionosfera, quando se dispõe de receptores de simples frequência pode-se negligenciar o mesmo ou utilizar modelos disponíveis para reduzir o erro devido à ionosfera. Já quando se utilizam receptores de dupla frequência, podem-se reduzir consideravelmente os efeitos da ionosfera a partir do uso da combinação linear livre dos efeitos da ionosfera (L_0).

O objeto a ser posicionado pode estar imóvel, caracterizando o posicionamento estático, ou estar em movimento, caracterizando o posicionamento

cinemático. No método cinemático, o receptor coleta dados enquanto está se deslocando, permitindo estimar as coordenadas de sua trajetória (MONICO, 2000).

Na seqüência serão descritas as observáveis (pseudodistância e fase de batimento da onda portadora).

2.1 Modelo Matemático do PPP

O PPP geralmente requer dados de receptores de dupla frequência. Desta forma, as equações linearizadas que fazem parte do PPP para receptores de dupla frequência são a pseudodistância e a fase da onda portadora. A equação linearizada da pseudodistância é dada por (MONICO, 2000):

$$E(\Delta PD_{rj}^s) = a_r^s \Delta X_r + b_r^s \Delta Y_r + c_r^s \Delta Z_r + c(dt_r - dt^s) + I_r^s + T_r^s, \quad (2.1)$$

sendo:

ΔPD_{rj}^s – diferença entre a pseudodistância observada entre o receptor r e o satélite s e a calculada em função dos parâmetros aproximados para a portadora L_j , sendo $j = (1,2)$;

a_r^s, b_r^s, c_r^s – coeficientes referentes às derivadas parciais da distância geométrica com relação aos parâmetros aproximados;

c – a velocidade da luz no vácuo;

$\Delta X_r, \Delta Y_r, \Delta Z_r, dt_r$ – 4 incógnitas relativas às três correções às coordenadas aproximadas do receptor e ao erro do relógio do receptor da estação, respectivamente;

dt^s – erro do relógio do satélite calculado com informações contidas nas efemérides precisas dos satélites;

I_r^s – erro devido à refração ionosférica;

T_r^s – erro devido à refração troposférica.

A equação (2.1) é da pseudodistância modulada sobre uma das portadoras. Como existem duas portadoras, haverá duas equações (uma para L_1 e outra para L_2).

As equações de observação linearizadas da fase de batimento da onda portadora são dadas por (MONICO, 2000):

$$E(\mathbf{I}_j \Delta \mathbf{f}_{rj}^s) = a_r^s \Delta X_r + b_r^s \Delta Y_r + c_r^s \Delta Z_r + c(dt_r - dt^s) + T_r^s - I_r^s + \mathbf{I}_j [\mathbf{f}^s(t_0)_j - \mathbf{f}_r(t_0)_j + N_{rj}^s] \quad (2.2)$$

com:

Δf_{rj}^s – referem-se às fases das ondas portadoras observadas e subtraídas das calculadas em função dos parâmetros aproximados para a portadora L_j , sendo $j = (1,2)$;

λ_j – comprimento de onda da portadora L_j , sendo $j = (1,2)$;

I_r^s – refração ionosférica na portadora L_j , sendo $j = (1,2)$, para o satélite s ;

$f^j(t_0)_j$ – refere-se à fase da portadora L_j , geradas no satélite s , para uma época de referência t_0 ;

$f_r(t_0)_j$ – referem-se à fase da portadora L_j , geradas no receptor r , para uma época de referência t_0 , sendo $j = (1,2)$;

N_{rj}^s – ambigüidade na portadora L_j , sendo $j = (1,2)$;

Pode-se observar que há o envolvimento de 4 observáveis para cada um dos satélites visíveis em cada época. As duas observáveis de fase de batimento da onda portadora podem ser combinadas linearmente, reduzindo os efeitos de refração ionosférica. De forma análoga, é possível realizar este procedimento com as pseudodistâncias. A refração troposférica pode ser minimizada utilizando um dos vários modelos existentes em conjunto com alguma técnica de parametrização (MONICO, 2000).

2.2 Erros envolvidos nas observáveis GPS

O posicionamento por satélite, assim como qualquer experimento que envolve medição, está sujeito aos erros de observação. No posicionamento por satélite os elementos fundamentais são as distâncias entre a antena do receptor e os satélites rastreados, obtidas a partir da medição do tempo da propagação de ondas eletromagnéticas no espaço. Portanto, os erros originados em várias fontes propagam-se no resultado final, que são as coordenadas dos pontos resultantes do posicionamento (SÁ, 2002).

Para se estimar os erros associados às coordenadas, é necessário quantificá-los nas diversas fontes e propagá-los através de modelos matemáticos. No posicionamento por satélite, os erros geralmente são projetados nas distâncias. As observáveis (pseudodistância e fase de batimento da onda portadora) estão sujeitas aos erros aleatórios, sistemáticos e grosseiros. Os erros aleatórios são inevitáveis e são considerados como uma característica de observação. Os erros sistemáticos são aqueles cuja causa é conhecida, podendo ser

parametrizados (modelados como termos adicionais) ou reduzidos por técnicas especiais de observação e/ou processamento. Já os erros grosseiros são oriundos de falhas humanas e/ou equipamentos e devem ser eliminados.

Os diversos erros, agrupados pelas possíveis fontes, envolvidos no posicionamento GPS são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Fontes e efeitos dos erros envolvidos no GPS

FONTES DE ERRO	ERROS
Satélite	Erro da órbita Erro do relógio Relatividade Erro das portadoras no <i>hardware</i> do satélite
Propagação do sinal	Refração troposférica Refração ionosférica Perdas de ciclo Multicaminho Rotação da Terra Relatividade Atraso instrumental de interfrequência
Receptor/Antena	Erro do relógio Erro entre os canais Centro de fase da antena Fase <i>Wind-up</i> Correção de <i>bias</i> P1/CA
Estação	Erro nas coordenadas Multicaminho Marés terrestres Movimento do Pólo Carga dos oceanos Carga atmosférica

Fonte: Adaptado de MONICO (2000)

No que se refere à estação, vale salientar que marés terrestres, carga dos oceanos e da atmosfera não se tratam especificamente de erros, mas de variações que devem ser consideradas para os casos de posicionamento de alta precisão. Assim, os erros envolvidos nas observáveis utilizadas no PPP devem ser corrigidos. Nas próximas seções 2.2.1, 2.2.2 e 2.2.3 são apresentadas as maiores fontes de degradação da precisão do PPP.

2.2.1 Propagação do Sinal

Os sinais GPS, no caminho entre o satélite e a antena da estação de rastreamento, propagam-se através da atmosfera dinâmica, atravessando camadas de diferentes naturezas e estados variáveis. Assim, eles sofrem diferentes tipos de influências, as quais podem provocar variações na polarização, na potência, na direção e na velocidade de propagação do sinal.

O meio no qual ocorre a propagação consiste, essencialmente, da troposfera e da ionosfera, cada uma com características bem diferentes (MONICO, 2000). Com o desligamento da SA a ionosfera passou a ser uma das maiores fontes de erro no GNSS, juntamente com a troposfera.

A troposfera, para frequências abaixo de 30 GHz, comporta-se como um meio não dispersivo, ou seja, o erro independe da frequência do sinal transmitido, dependendo apenas das propriedades termodinâmicas do ar. Já a ionosfera, como um meio dispersivo, afeta a modulação e a fase de batimento da onda portadora, fazendo com que sofram um retardo e um avanço, respectivamente (LEICK, 1995).

2.2.1.1 Erro devido à Refração Troposférica

A troposfera é a camada mais baixa da atmosfera terrestre. Situa-se entre a superfície da Terra até aproximadamente 50 km de altura (MONICO, 2000). Constitui a zona neutra da atmosfera e a propagação do sinal depende principalmente do conteúdo do vapor d'água, da pressão do ar e da temperatura da camada atmosférica.

O erro devido à refração troposférica sobre uma observável GPS pode chegar até aproximadamente 30 m. Esta variação ocorre devido às mudanças na densidade da atmosfera e no ângulo de elevação do satélite, pois a troposfera é muito sensível à quantidade de vapor d'água presente, razão pela qual costuma-se dividi-la em duas componentes: uma seca e outra úmida (MONICO, 2000). O efeito troposférico independe da frequência e não pode ser eliminado via combinação linear entre observáveis de um receptor de dupla frequência (SAPUCCI, 2001).

Vários modelos podem ser utilizados para minimizar os efeitos causados pela troposfera, como por exemplo, o de Hopfield (SEEBER, 2003) e o de Saastamoinen (SAASTAMOINEN, 1973), os quais são os mais conhecidos. Esses modelos têm a capacidade de modelar com boa acurácia a componente seca, a qual é responsável pela maior

parte da refração troposférica (cerca de 90%). Entretanto, a componente úmida é mais difícil de ser modelada, pois as medidas de temperatura e de pressão do vapor d'água, as quais são realizadas nas estações, não representam adequadamente as condições de percurso do sinal. Assim, costuma-se usar um modelo representando as condições meteorológicas ao invés das medidas efetuadas nos locais das observações.

O modelo de Hopfield é dado por:

$$T_r^s = T_{ZH} * mh(E) + T_{ZW} * mw(E), \quad (2.3)$$

$$T_{ZH} = 155,2 * 10^{-7} * \frac{P}{T} * H_D, \quad (2.4)$$

$$T_{ZW} = 155,2 * 10^{-7} * \frac{4810 * e}{T^2} * H_W, \quad (2.5)$$

$$mh(E) = \left(\text{sen} \left(E^2 + 6,25 \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{-1}, \quad (2.6)$$

$$mw(E) = \left(\text{sen} \left(E^2 + 2,25 \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{-1}, \quad (2.7)$$

$$H_D = 40136 + 148,72 * (T - 273,16), \quad (2.8)$$

$$H_W = 11000m, \quad (2.9)$$

onde:

T_r^s – atraso troposférico total entre a antena de um receptor (r) e um satélite (s);

T_{ZH} – atraso zenital da componente hidrostática;

T_{ZW} – atraso zenital da componente úmida;

E – ângulo de elevação do satélite dado em graus;

$mh(E)$ e $mw(E)$ – funções de mapeamento que relacionam o atraso das componentes hidrostática e úmida, respectivamente, com o ângulo de elevação;

T – temperatura em Kelvin;

P – pressão superficial do ar seco (1 atm);

e – pressão do vapor d'água em milibares;

H_D – altitude seca;

H_W – altitude úmida.

Saastamoinen desenvolveu um modelo baseado na suposição do decréscimo linear da temperatura até a Tropopausa e, acima dessa, um valor constante caracteriza a

Estratosfera como um modelo isotérmico (SAASTAMOINEN, 1973). Assume-se uma atmosfera em equilíbrio hidrostático e que todo o vapor d'água se concentra na troposfera, comportando-se como um gás ideal.

Para determinar a pressão parcial do ar seco e do vapor d'água Saastamoinen utilizou equações exponenciais, uma vez que os valores crescem quando a pressão total da troposfera cresce, porém muito mais rapidamente. O modelo padrão descrito por Saastamoinen, com alguns refinamentos, é dado da seguinte forma (HOFMANN-WELLENHOF, LICHTENEGGER e COLLINS, 2001):

$$T_r^s = 0,002277 * (1 + D) * \sec(\Psi) * \left[P + \left(\frac{1255}{T} + 0,05 \right) * e - B * \tan^2(\Psi) \right] + \partial_R, \quad (2.10)$$

onde:

P – valor da pressão superficial do ar seco;

e – valor da pressão superficial do vapor d'água;

T – temperatura em graus Kelvin;

Ψ – valor de $(90^\circ - E)$;

D – resultado de $0,0026 * \cos(2f) + 0,00028 * H$;

H – altitude ortométrica dada em km;

f – latitude do lugar;

E – ângulo de elevação do satélite dado em graus;

B e ∂_R – fatores de correção com relação ao valor do ângulo de elevação.

2.2.1.1.1 Funções de Mapeamento

As funções de mapeamento descrevem a dependência do ângulo de elevação com relação aos atrasos dos sinais que viajam sobre a atmosfera neutra (NIELL, 1996). Em cada componente da atmosfera neutra, o atraso zenital e uma função de mapeamento são utilizados para modelar o atraso do sinal.

Os parâmetros das funções de mapeamento estão relacionados com temperatura, pressão e umidade relativa. A Figura 1 apresenta um esquema das funções de mapeamento, as quais têm por função projetar o atraso troposférico na direção satélite-receptor (traço azul) para a direção zenital (traço vermelho), permitindo a modelagem da

influência troposférica a partir das medidas de temperatura, pressão e umidade do perfil vertical troposférico (CEPTEC, 2005).

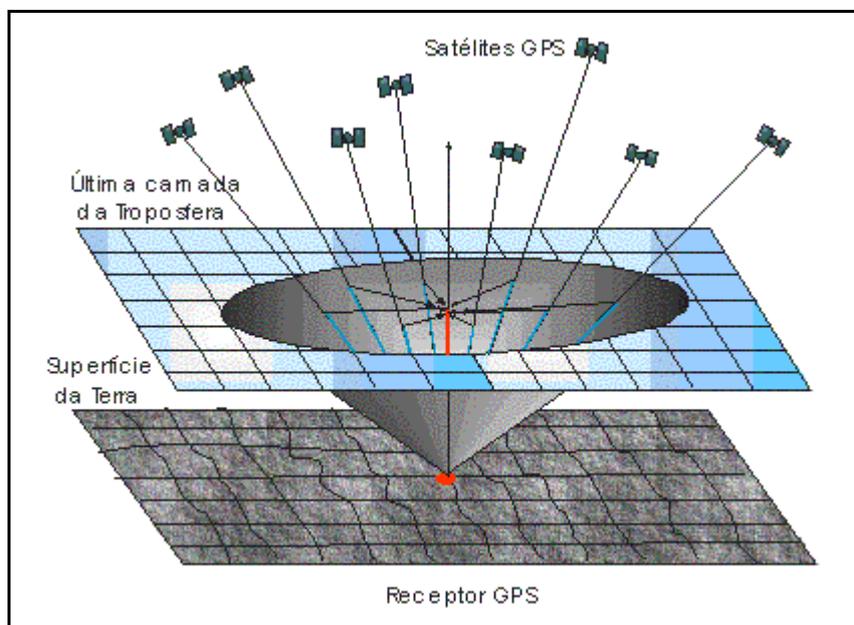


Figura 1 – Esquema das funções de mapeamento
Fonte: Sapucci (2001)

De acordo com Witchayangkoon (2000), o atraso zenital nominal para um local ao nível do mar é de 2,3 m para a componente hidrostática e 0,1 m para a componente úmida. Os maiores atrasos zenitais úmidos estão entre 0,3 m para latitudes médias e 0,4 m para regiões tropicais. Todavia, os valores mais específicos do atraso zenital devem ser obtidos dos modelos troposféricos.

Segundo Monico (2000), para ângulos próximos do zênite ($E \sim 90^\circ$), uma simples aproximação do tipo $1/\sin(E)$ pode ser suficiente. No entanto, para ângulos menores, essa aproximação é inadequada, sendo necessário o emprego de outras mais sofisticadas, como, por exemplo, a função de mapeamento de Niell 1996.

Devido à curvatura atmosférica, a função de mapeamento não muda apenas pela co-secante do ângulo de elevação. Ela muda de acordo com a razão da densidade atmosférica como resultado das mudanças na temperatura. Todavia, a mudança temporal da função de mapeamento é relacionada com a variabilidade de temperatura a diferentes altitudes.

Na função de mapeamento de Chao 1974, as componentes hidrostática (m_H) e úmida (m_w) se apresentam da seguinte forma (MONICO, 2000):

$$m_H(E) = \frac{1}{\text{sen}(E) + \frac{0,00143}{\tan(E) + 0,0445}} \quad (2.11)$$

e

$$m_w(E) = \frac{1}{\text{sen}(E) + \frac{0,00035}{\tan(E) + 0,017}} \quad (2.12)$$

Já a função de mapeamento de Herring 1992 é obtida a partir da normalização do zênite da função de mapeamento de Marini 1972, o qual não separa as componentes hidrostática e seca. Esta função é dada por (SEEBER, 2003):

$$m(E) = \frac{1}{\text{sen}(E) + \frac{a}{\text{sen}(E) + \frac{b}{\text{sen}(E) + c}}}, \quad (2.13)$$

onde os coeficientes das quantidades físicas a , b e c podem ser estimados a partir de ajustes dos mínimos quadrados da $m(E)$ e dependem linearmente da temperatura, da altitude ortométrica e do co-seno da latitude da estação.

Na função de mapeamento de Niell 1996 é proposta uma função fundamentada nas variações temporais e localização geográfica em vez dos parâmetros meteorológicos. Niell (1996) mostra que todas as funções de mapeamento disponíveis são limitadas em sua acurácia devido à dependência da temperatura da superfície terrestre. Segundo Witchayangkoon (2000), há três condições a serem examinadas:

- 1^a) Alterações diurnas na temperatura da superfície causam menos variações que aquelas calculadas pelas funções de mapeamento;
- 2^a) Mudanças sazonais da temperatura da superfície são normalmente maiores que as mudanças na parte superior da atmosfera;
- 3^a) A função de mapeamento calculada para dias muito frios no verão, não deve ser diferente de dias muito quentes no inverno.

O modelo de Niell segue as características da função de mapeamento de Herring 1992, equação (2.13), porém seus coeficientes a , b e c são calculados de forma distinta. As Tabelas 2 e 3 apresentam os valores tabelados para o cálculo dos coeficientes das componentes seca e úmida.

Tabela 2 – Valores dos coeficientes para a componente seca.

Coeficientes	LATITUDE (j_i)				
	15°	30°	45°	60°	75°
	MÉDIA (e^{-3})				
a_m	1,2769934	1,2683230	1,2465397	1,2196049	1,2045996
b_m	2,9153695	2,9152299	2,9288445	2,9022565	2,9024912
c_m	62,610505	62,837393	63,721774	63,824265	64,258455
	AMPLITUDE (e^{-5})				
a_{amp}	0,0000000	1,2709626	2,6523662	3,4000452	4,1202191
b_{amp}	0,0000000	2,1414979	3,0160779	7,2562722	11,723375
c_{amp}	0,0000000	9,0128400	4,3497037	84,795348	170,37206
	CORREÇÃO DA ALTITUDE (e^{-5})				
a_{ht}	2,5300				
b_{ht}	0,0549				
c_{ht}	0,0114				

Fonte: Niel (1996)

Os coeficientes são calculados a partir das seguintes equações:

$$a_{hnmf}(j_i, t) = a_m(j_i) + a_{amp}(j_i) * \cos\left(\frac{t - T_0}{365.25} * 2 * p\right), \quad (2.14)$$

$$b_{hnmf}(j_i, t) = b_m(j_i) + b_{amp}(j_i) * \cos\left(\frac{t - T_0}{365.25} * 2 * p\right), \quad (2.15)$$

e

$$c_{hnmf}(j_i, t) = c_m(j_i) + c_{amp}(j_i) * \cos\left(\frac{t - T_0}{365.25} * 2 * p\right), \quad (2.16)$$

sendo:

 T_0 – fase adotada para DOY28; t – DOY (dias do ano).

Tabela 3 – Valores dos coeficientes para a componente úmida.

Coeficientes	LATITUDE j_i				
	15°	30°	45°	60°	75°
a_{wnmf}	5,8021897e-4	5,6794847e-4	5,8118019e-4	5,9727542e-4	6,1641693e-4
b_{wnmf}	1,4275268e-3	1,5138625e-3	1,4572752e-3	1,5007428e-3	1,7599082e-3
c_{wnmf}	4,3472961e-2	4,6729510e-2	4,3908931e-2	4,4626982e-2	5,4736038e-2

Fonte: Niel (1996)

É necessário realizar uma interpolação dos valores apresentados na Tabela 3 para a componente úmida.

2.2.1.2 Erro devido à Refração Ionosférica

A ionosfera é um meio dispersivo, ou seja, depende da frequência. Isso significa que a fase da onda portadora e a modulação sobre ela serão afetadas de formas diferentes. Enquanto a portadora sofre um avanço, a modulação sobre ela sofre um retardo (MONICO, 2000). A camada ionosférica está situada aproximadamente entre 50 km a 1000 km de altura e pode ser dividida em quatro regiões D, E, F₁ e F₂ (Figura 2), nomeadas na medida em que aumenta a altitude e a concentração de íons.

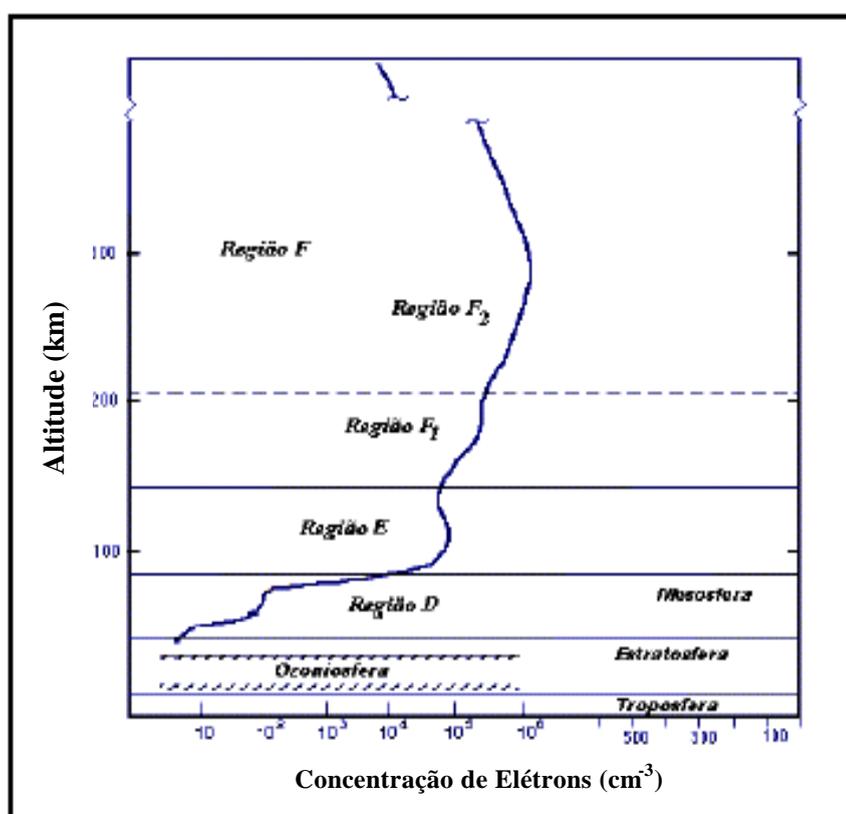


Figura 2 – Camadas da Ionosfera
Fonte: Adaptado de Camargo (1999)

De acordo com Camargo (1999), a estrutura ionosférica está relacionada com parâmetros térmicos, químicos e eletromagnéticos, os quais combinados podem variar sensivelmente em função da hora, latitude, longitude, época do ano e atividade solar.

O efeito da ionosfera depende da frequência, conforme já mencionado, e do índice de refração. O efeito de refração é proporcional ao Conteúdo Total de Elétrons (TEC), ou seja, ao número de elétrons presentes ao longo do caminho percorrido pelo sinal entre o

satélite e o receptor (MONICO, 2000), e inversamente proporcional ao quadrado das frequências. Apesar de existir um erro instrumental para cada uma das frequências do GPS, a estimativa do TEC é afetada pela diferença entre estas frequências, para cada satélite e receptor, a qual é referida como atraso instrumental (CAMARGO, 1999).

A magnitude da refração ionosférica pode se tornar três vezes maior a medida com que o satélite aproxima-se do horizonte. Os elétrons livres presentes no caminho de propagação do sinal do satélite provocam um atraso na modulação do código e um avanço de igual magnitude na fase. Este efeito pode ser minimizado utilizando-se receptores de dupla frequência ou por meio de modelos ionosféricos, como por exemplo, o modelo de Klobuchar (MATSUOKA, 2003).

O problema principal é que o TEC varia no tempo e no espaço, em função do fluxo de ionização solar, da atividade magnética, do ciclo de manchas solares, da estação do ano, localização do usuário e da direção do raio vetor do satélite (LEICK, 1995).

Em Camargo (1999) e em Seeber (2003) são desenvolvidas as equações do índice de refração ionosférica para a fase da onda portadora e para o grupo (código), que são dados respectivamente por:

$$n_f = 1 - \frac{40,3.n_e}{f^2} \quad (2.17)$$

e

$$n_g = 1 + \frac{40,3.n_e}{f^2}, \quad (2.18)$$

onde:

n_e – densidade de elétrons (n° de elétrons/ m^2);

f – frequência da fase da onda portadora.

Sendo:

$$n_f = \frac{c}{V_f} \quad (2.19)$$

e

$$n_g = \frac{c}{V_g}, \quad (2.20)$$

sendo c a velocidade da luz.

Verifica-se que ocorre atraso no grupo e avanço na fase, pois a velocidade do grupo (V_g) é menor que a velocidade da fase (V_f). Dessa forma, resulta em um aumento nas

distâncias obtidas a partir dos códigos modulados sobre a portadora, e uma diminuição nas obtidas a partir da fase, de uma mesma quantidade (MONICO, 2000).

Nas Equações (2.17) e (2.18), o TEC é dado ao longo da direção do satélite e receptor e a unidade utilizada para representá-lo é dada em número de elétrons por metros quadrados (el/m^2). Para quantidades do TEC na direção vertical (VTEC), a refração é calculada pelas seguintes equações para a fase e código, respectivamente:

$$I_{f_r}^s = -\frac{1}{\cos(z')} \cdot \frac{40,3}{f^2} VTEC \quad (2.21)$$

e

$$I_{g_r}^s = \frac{1}{\cos(z')} \cdot \frac{40,3}{f^2} VTEC. \quad (2.22)$$

O coeficiente z' representa o ângulo zenital do caminho do sinal em relação a um plano de altitude média (h_m), sendo obtido na seguinte expressão (HOFMANN-WELLENHOF, LICHTENEGGER e COLLINS, 2001):

$$\text{sen}(z') = \frac{r_m}{r_m + h_m} \cdot \text{sen}(z), \quad (2.23)$$

onde:

r_m – raio médio da Terra;

h_m – altura média da ionosfera que varia entre 300 e 450 km;

z – distância zenital do satélite.

A Figura 3 ilustra a geometria para o atraso do caminho ionosférico.

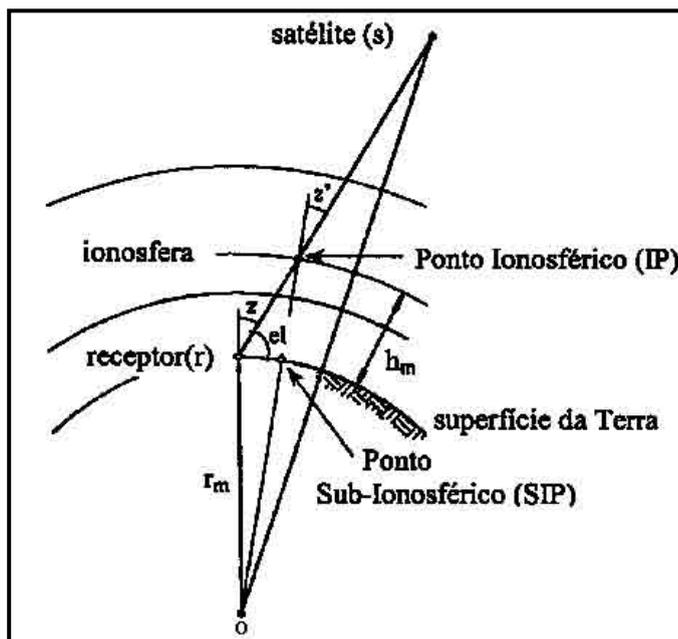


Figura 3 – Geometria para o atraso do caminho geométrico
Fonte: Camargo (1999)

Vale a pena salientar que o avanço da fase e o atraso do grupo não são as únicas manifestações da ionosfera na propagação do sinal. Pode ocorrer também a cintilação, que é análoga a variação em intensidade de estrelas luminosas quando vistas através de uma atmosfera turbulenta (LEICK, 1995). A cintilação pode causar uma rápida oscilação na amplitude do sinal e da fase recebidos (SPILKER e PARKINSON, 1996).

2.2.1.3 Perdas de ciclo

Um erro específico da observação da fase da onda portadora é a perda de ciclo. Em uma seção de observação, as medidas da fase de batimento da onda portadora, na maioria dos casos, são contínuas. Quando o receptor é ligado, a parte fracionária de batimento da onda portadora é medida e um contador de ciclos inteiros é iniciado. Durante o rastreamento este contador é incrementado por um ciclo sempre que a fase de batimento muda de 2π para 0. Assim, para uma determinada época, a fase observada é igual à soma da parte fracionária medida naquela época com o número inteiro de ciclos contados desde o início do rastreamento (MONICO, 2000).

O número de ciclos inteiros é desconhecido no início do posicionamento e recebe o nome de ambigüidade (HOFMANN-WELLENHOF, LICHTENEGGER e

COLLINS, 2001). Entretanto, nos levantamentos GPS o sinal está sujeito à obstrução devido à presença de corpos sólidos em seu caminho, e também apresentar ruídos devido às irregularidades atmosféricas e multicaminho. Neste caso, poderá ocorrer perda de sinal e conseqüentemente, a perda da contagem de ciclos inteiros no receptor. Segundo Monico (2000), a impossibilidade de manter o rastreamento contínuo do satélite causa o evento denominado de *Cycle Slips* ou Perda de Ciclos, conforme ilustra a Figura 4.

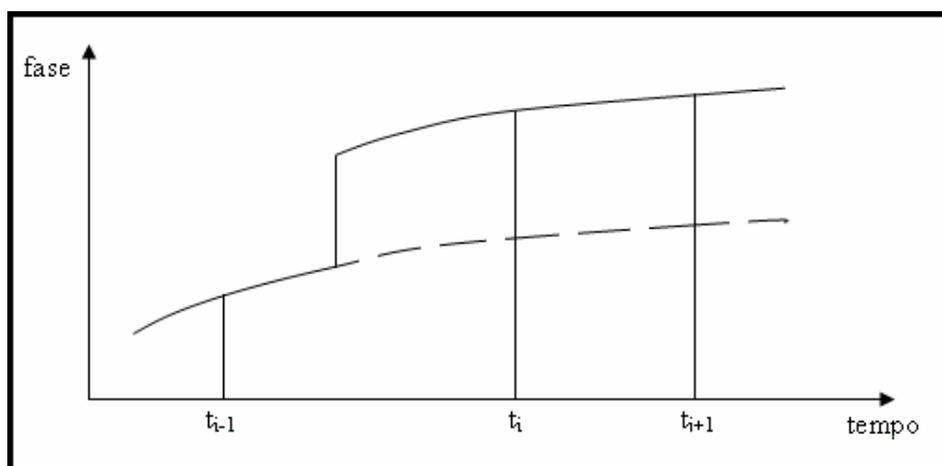


Figura 4 – Ilustração da perda de ciclo
FONTE: Matsuoka (2003)

De acordo com Seeber (2003), a perda de ciclos ocorre de duas maneiras:

- **em função das observações** – quando estas ocorrem por obstruções, em particular para observações cinemáticas; ruídos no sinal, quando causado por cintilação ionosférica, multicaminho e baixa elevação de satélites, causando uma baixa potência do sinal;
- **em função do receptor** – quando está com sinais fracos decorrentes de interferência do sinal, inclinação da antena em aplicações cinemáticas (aviões, navios) e causado pelo próprio processamento do sinal.

Quando ocorre a perda de ciclos pode-se realizar tentativas para detectar e corrigir a ambigüidade da fase, estimando-a novamente. Outra forma é fazer um gráfico de toda a fase observada. Isso mostrará o salto e até mesmo os erros grosseiros, os quais podem ter ocorrido na coleta dos dados.

O tamanho da perda de ciclo varia e não tem um valor constante, podendo ser 1 ou até mesmo milhões de ciclos. Uma técnica utilizada para a detecção de ciclos é a

simples diferença da fase de batimento da onda portadora entre os satélites, eliminando o erro do relógio do receptor.

A perda de ciclo deve ser removida dos dados na fase de pré-processamento, ou uma nova ambigüidade será determinada no ajustamento (MATSUOKA, 2003). Ela pode ser facilmente detectada através de duplas e triplas diferenças, o que não é o caso com o PPP, impossibilitado de fazer o mesmo que no posicionamento relativo. Entretanto, existem alternativas para a detecção da perda de ciclos, como o uso de combinações lineares entre as observáveis, como pode ser visto na seção 3.1.3.

2.2.1.4 Multicaminho

Os sinais recebidos pela antena de um receptor de GNSS podem ser divididos em dois grupos:

- **Diretos** – são os sinais recebidos diretamente dos satélites;
- **Indiretos** – são os sinais enviados pelos satélites que atingiram um corpo qualquer e sofrendo uma reflexão (desvio), atingiram a antena do receptor.

Os sinais refletidos, comumente, são chamados de multicaminho (*multipath*) ou multicaminhamento. De acordo com Bisnath, Collins e Langley (1997), multicaminho é o fenômeno pelo qual um sinal chega à antena do receptor por caminhos múltiplos, devido à reflexão, conforme ilustra a Figura 5. O sinal refletido chega à antena do receptor com fase e amplitude deslocadas, causando erros nas observáveis pseudodistância e fase de batimento da onda portadora.

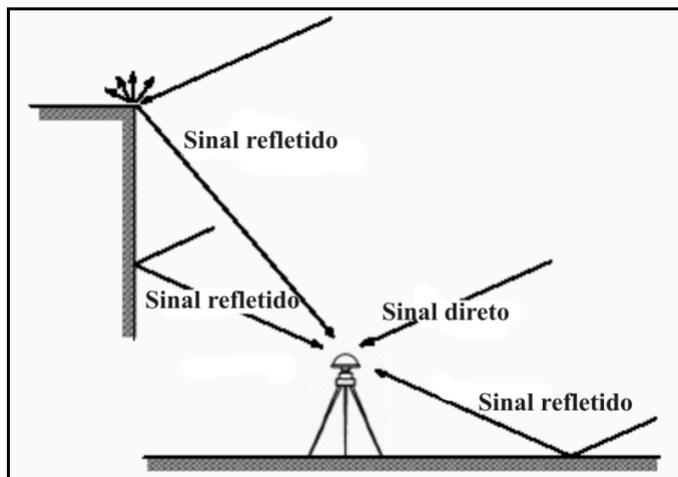


Figura 5 – Ilustração do efeito do multicaminho.
Fonte: Hannah, Walker e Kubik (1998)

Segundo Souza (2004), a ocorrência do multicaminho depende da refratividade do meio onde se posiciona a antena e das características da antena e do objeto refletor. Antenas estacionadas em locais bastante arborizados, com construções altas e próximas a espelhos d'água possivelmente receberão a influência de multicaminho. Sendo assim, é aconselhável, como procedimento básico, procurar evitar ao máximo a realização de posicionamento em locais favoráveis a este efeito, o que nem sempre é possível.

O multicaminho distorce a modulação do sinal, tanto no código C/A como do P, e degrada a acurácia no posicionamento por ponto. Este efeito também distorce a fase de batimento da onda portadora e, conseqüentemente, degrada a acurácia dos sistemas baseados nessa observável (SOUZA, 2004). As propriedades eletromagnéticas do objeto refletor influenciam na amplitude do sinal com relação à fase da onda portadora. O sinal direto é polarizado circularmente à direita, vindo a se tornar polarizado à esquerda quando este for refletido em uma superfície plana próxima. Este sinal polarizado à esquerda é atenuado apenas parcialmente. Esta atenuação é conseguida pela própria configuração das antenas, isto é, com a modelagem de ganho, a qual torna as mesmas indiferentes a sinais eletromagnéticos polarizados à esquerda.

Os padrões de algumas antenas permitem a atenuação de sinais refletidos abaixo do horizonte da antena, como por exemplo, a antena *choke-ring*. Contudo, os sinais de multicaminho também podem chegar à antena com ângulos de elevação acima do horizonte (HOFMANN-WELLENHOF, LICHTENEGGER, e COLLINS, 2001).

Com relação ao multicaminho na pseudodistância, o comportamento é similar ao da fase da onda portadora. Todavia, a variação apresenta uma ordem de magnitude

4 vezes maior que da fase, conforme Leick (1995). O erro máximo também será proporcional ao comprimento de onda, que no caso da pseudodistância está relacionado com os códigos C/A e P. Quanto maior for a frequência, menor será o erro máximo (MONICO, 2000). Próximo a grandes construções, o erro devido ao multicaminho para o código C/A pode chegar a 150 m. Segundo Leick (1995), o erro máximo do multicaminho corresponde aproximadamente a $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda dos sinais GPS.

2.2.1.5 Relatividade

Os efeitos da relatividade no GPS não são restritos somente aos satélites (órbitas e relógios), mas também à propagação do sinal e aos relógios dos receptores (MONICO, 2000). O relógio do satélite varia em razão de alguns erros e por causa da relatividade geral e especial.

Há uma diferença de potencial gravitacional não negligenciável entre os satélites GPS e os usuários sobre a superfície da Terra. A alta velocidade desses satélites, a rotação da Terra e essa diferença de potencial, combinados com medidas de tempo com precisão de nanossegundos, nas quais está fundamentado o GPS, dão lugar a importantes efeitos relativísticos (CARARO, FERREIRA e AFONSO, 2005).

Os relógios dos receptores nas estações terrestres e a bordo dos satélites estão situados em campos gravitacionais diferentes, além de deslocamentos diferentes (diferentes velocidades). Isso provoca uma aparente alteração na frequência dos relógios dos satélites em relação aos relógios dos receptores terrestres. Os efeitos são compensados, antes do lançamento dos satélites, pela redução da frequência nominal dos relógios dos satélites em $4,55 \cdot 10^{-3}$ Hz (MONICO, 2000).

Verifica-se, também, que as correções relativistas mudam de satélite para satélite e de época para época. Conforme sugerido pelo ICD-GPS-200C apud Witchayangkoon (2000), as correções relativistas devem ser aplicadas no erro do relógio do satélite ao se utilizar o PPP, sendo a equação dada por:

$$dt_{rel} = \frac{2}{c^2} \cdot X^s \cdot \dot{X}^s, \quad (2.24)$$

onde:

X^s – vetor das coordenadas dos satélites;

\dot{X}^s – vetor das velocidades dos satélites.

2.2.1.6 Rotação da Terra

O cálculo das coordenadas do satélite é para o instante de transmissão do sinal e num sistema de coordenadas fixo à Terra. Dessa forma, torna-se necessário efetuar a correção 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 (MONICO, 2000).

Sendo assim, as coordenadas dos satélites devem ser rotacionadas sobre o eixo Z de um ângulo a (em radianos), definido como o produto do tempo de propagação pela velocidade de rotação da Terra (w_e):

$$\mathbf{a} = w_e t , \quad (2.25)$$

onde t é o tempo de propagação do sinal.

Sendo X', Y', Z' as coordenadas originais do satélite, e X^s, Y^s, Z^s as coordenadas corrigidas, tem-se (MONICO, 2000):

$$\begin{bmatrix} X^s \\ Y^s \\ Z^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{a} & 0 \\ -\mathbf{a} & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

2.2.2 Erros relacionados com a estação

Além dos possíveis, e prováveis erros nas coordenadas da estação, outras variações, resultantes de fenômenos geofísicos ocorridos durante o período de coleta das observações podem afetar as coordenadas das estações no levantamento. Os movimentos da Terra junto com a força de atração do Sol e da Lua causam as marés que podem ser terrestres, oceânicas e atmosféricas. Também, ocorrem outras forças que contribuem para as marés, sendo elas: o potencial gravitacional, o qual é resultante da atração newtoniana do centro de massa da Terra; e o potencial centrífugo, causado pela rotação da Terra.

Em se tratando de PPP, ao se considerar a estação terrestre fixa, há outros tipos de fenômenos que devem ser corrigidos tais como: os efeitos de marés terrestres, carga dos oceanos e carga da atmosfera.

2.2.2.1 Marés terrestres

As deformações elásticas da crosta terrestre (marés terrestres), sob a ação gravitacional da Lua e do Sol, constituem um assunto de grande importância na dinâmica de órbitas, pois dependendo do grau de precisão adotado as principais grandezas geodésicas são afetadas (GEMAEL, 1999). Este efeito depende, também, das alterações temporais, influenciando diretamente na altitude da estação.

De acordo com Seeber (2003), as marés terrestres alteram o potencial gravitacional da Terra causando uma aceleração adicional aos satélites, isto é, alteram a órbita dos satélites. Esta aceleração é relativamente pequena, da ordem de $2 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}^2$. Próximo ao Equador, a superfície desloca-se por volta de 40 cm durante um período de 6 horas. A variação é em função do tempo sideral e da localização da estação na qual está sendo realizado o PPP.

Os efeitos das marés terrestres podem causar uma variação na ordem de decímetros nas coordenadas da estação (ABDEL-SALAM, 2005).

As correções dos efeitos das marés terrestres podem ser feitas a partir das efemérides DE403 (planetárias), desenvolvidas pelo JPL (*Jet Propulsion Laboratory*), além de utilizar programas computacionais desenvolvidos pelo IERS (JPL, 2000A *apud* WITCHAYANGKOON, 2000).

A correção dos efeitos das marés terrestres é dada por:

$$X = X(t) - \Delta X(t)_c, \quad (2.27)$$

sendo:

X – vetor das coordenadas corrigidas das marés terrestres;

$X(t)$ – vetor das coordenadas estimadas a partir de um método de ajustamento; e

$\Delta X(t)_c$ – vetor das correções das marés terrestres no tempo t , sendo este vetor obtido a partir das efemérides Planetária.

As correções para o deslocamento das estações são realizadas por um procedimento que envolve basicamente duas etapas. Na primeira etapa, os cálculos são feitos a partir de uma equação de segundo grau para o potencial de maré. São também utilizados valores nominais para os números de *Love* e *Shida* para todos os constituintes envolvidos no potencial e em todas as estações. Estes números são fatores de conversão que refletem na Terra não rígida, ou refletem no campo da Terra devido às forças das marés (WITCHAYANGKOON, 2000). A correção em virtude das forças de maré é dada por:

$$d = \frac{GM_{MS} r^4}{GM_E R^3} \left\{ 3l_2 (\hat{r} * \hat{R}) \hat{R} + \left[3\left(\frac{h_2}{2} - l_2\right) (\hat{r} * \hat{R})^2 - \frac{l_2}{2} \right] r \right\}, \quad (2.28)$$

sendo:

d – vetor tridimensional de correção às coordenadas;

GM_{MS} – parâmetro gravitacional para a Lua ou o Sol;

GM_E – parâmetro gravitacional para a Terra;

\hat{R} e R – vetor unitário do geocentro à Lua ou ao Sol e a magnitude do mesmo, respectivamente;

\hat{r} e r – vetor unitário do geocentro à estação e a magnitude do mesmo, respectivamente;

h_2 – valor nominal do número de *Love* de grau 2;

l_2 – valor nominal do número de *Shida* de grau 2.

A parte proporcional a h_2 fornece a componente radial do deslocamento da estação, em virtude da maré induzida. Os termos em l_2 representam o vetor deslocamento transversal à direção radial.

2.2.2.2 Carga dos Oceanos

O efeito da carga dos oceanos é uma deformação do piso oceânico e terrestre próxima ao oceano, em resposta à redistribuição da água do mar que se movimenta durante as marés oceânicas. A magnitude do deslocamento depende das características da crosta e das posições do Sol, da Lua e da estação.

O erro causado pela carga dos oceanos está na casa dos centímetros e o deslocamento vertical é aproximadamente três vezes maior que a componente horizontal. Em regiões afastadas da costa esse valor decresce, mas ainda pode alcançar 1 cm para uma distância oceano-estação da ordem de 1.000 km (BAKER et al, 1995 *apud* MONICO, 2000). Uma componente de deslocamento local de um lugar particular em um tempo t pode ser expressa por (ABDEL-SALAM, 2005):

$$\Delta c = \sum_j f_j A_{cj} \cos(\mathbf{w}_j t + \mathbf{c}_j + u_j - \mathbf{f}_{cj}), \quad (2.29)$$

sendo:

$\mathbf{w}_j t$ – co-latitude;

- c_j – longitude média do Sol, Lua e perigeu lunar;
- f_j, u_j – funções da longitude do nodo lunar;
- A_{cj}, f_{cj} – elementos específicos de cada lugar que refletem a geografia costeira, a estrutura elástica e a densidade de um modelo terrestre;
- j – índice que indica os coeficientes das maiores marés terrestres devido ao Sol (S) e Lua (M).

2.2.2.3 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 (PEREZ, 2002). O empuxo gravitacional do Sol e da Lua afeta a superfície terrestre, os oceanos e a atmosfera de diferentes modos devido às propriedades dos diferentes materiais envolvidos. A carga atmosférica exerce força sobre a superfície terrestre, afetando de forma indireta a carga dos oceanos e as marés terrestres.

Variações na distribuição da massa atmosférica induzem as deformações sobre a crosta, principalmente na direção vertical (MONICO, 2000), sendo que as maiores deformações estão associadas com tempestades na atmosfera. Estudos demonstram possíveis deslocamentos verticais de até 25 mm e 1/3 desse valor é para deslocamentos horizontais. Uma forma simplificada de calcular o deslocamento vertical é a partir da equação encontrada nas Convenções do IERS de 1996 (MCCARTHY, 1996):

$$\Delta r = -0,35.p - 0,55.\bar{p}, \quad (2.30)$$

sendo:

Δr – carga atmosférica em mm;

p – anomalia da pressão local em relação à pressão padrão (101,3 kPa);

\bar{p} – média da anomalia da pressão em um raio de 2.000 km a partir do local.

2.2.2.4 Relógio do Receptor

Geralmente, os receptores GPS são equipados com osciladores de quartzo, os quais têm a vantagem de serem pequenos, possuírem uma boa estabilidade interna e serem de custo relativamente baixo (SHEN, 2002). Também existem receptores com padrões de tempo mais estáveis, porém com custos mais elevados. Ambos os tipos de receptores não estão sincronizados com o sistema de tempo GPS. Assim, no posicionamento por ponto, o erro do relógio é uma das incógnitas do modelo e pode ser estimado com precisão de 10^{-8} do segundo (MONICO, 2000).

O erro do relógio do receptor pode ser estimado usando um processo de GAUSS-MARKOV em um Filtro de Kalman Estendido, sendo modelado como um ruído branco. O erro do relógio pode também ser modelado como um caminho aleatório, desde que haja observações de pseudodistância disponíveis. O cálculo aproximado do erro do relógio pode ser dado a partir da simplificação da equação da pseudodistância, ou seja:

$$dt_r = \frac{PD - r_r^s}{c} + dt^s \quad (2.31)$$

Com a utilização das efemérides precisas do IGS obtêm-se as coordenadas dos satélites e o erro do relógio do satélite. A partir da equação (2.31), é feito o cálculo do dt_r , aproximado para todas as observações de pseudodistância possíveis da época, sendo ao final feito uma média para se chegar a um valor médio do dt_r .

Assim, o *offset* do relógio do receptor é tratado como desconhecido junto com as três coordenadas (X, Y, Z). Outra opção é remover o erro do relógio do receptor via observações diferenciais entre satélites.

2.2.2.5 Variação temporal das coordenadas devido à Geodinâmica

Com base na teoria da *Tectônica de Placas*, sabe-se que a Litosfera é composta pela crosta terrestre e por placas rígidas flutuando sobre o manto fluido e viscoso, logo abaixo da crosta terrestre (TURCOTTE e SCHUBERT, 2002). Estas placas, chamadas de placas litosféricas, não estão fixas e paradas, pelo contrário, elas se movem continuamente numa velocidade relativa entre 1 e 10 cm/ano. Logo, os continentes sobre estas placas estão

em constante movimento. A 200 milhões de anos atrás eles estavam todos juntos, formando um único continente, denominado Pangea (COSTA, 1999).

Como há o movimento das placas litosféricas, as coordenadas geodésicas dos pontos sobre a superfície terrestre mudam com o tempo tornando-se dependentes da época as quais foram determinadas (PEREZ, 2002). Assim, conhecendo-se os elementos que definem estes movimentos, torna-se possível estimar as variações nas coordenadas em função do tempo.

Existem diferentes modelos disponíveis para a estimação dos movimentos das placas litosféricas, tais como: NNR-NUVEL 1A (*No Net Rotation – Northwestern University VELOCITY model 1A*); APKIM 2002 (*Actual Plate Kinematic Model*); Perez (2002); IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística); Costa, Santos e Gemael (2003); e ITRF 2000 (*International Terrestrial Reference Frame*) (FAUSTINO et al., 2005).

Para poder analisar os resultados que serão obtidos com o PPP é necessário obter o vetor das velocidades, ou seja, o vetor da variação que ocorre na posição do ponto requerido, para poder atualizar as coordenadas obtidas para a mesma época das coordenadas precisas. A atualização deve ser feita porque não se conhece a velocidade com que as coordenadas de uma determinada estação terrestre variam com relação ao tempo. Segundo Sapucci (2001) o vetor das velocidades é dado por:

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\Omega_z & \Omega_y \\ \Omega_z & 0 & -\Omega_x \\ -\Omega_y & \Omega_x & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

onde:

V_x, V_y, V_z – componentes do vetor velocidade das coordenadas X, Y e Z;

X_r, Y_r, Z_r – coordenadas cartesianas em um referencial terrestre qualquer;

Ω – matriz antissimétrica a qual possui os valores das velocidades angulares com relação aos eixos X, Y, Z.

2.2.3 Erros relacionados com o centro de fase da antena

Estes erros são em função da sua construção. Dependem das características da antena e do ângulo da direção do sinal observado. Estas variações podem atingir alguns centímetros. O centro de fase da antena é o ponto no qual a medida do sinal esta referida e geralmente não é coincidente com o centro geométrico da antena. Esta discrepância depende do ângulo de elevação, do azimute e da intensidade do sinal do satélite, sendo diferente para L_1 e L_2 . Assim, dois efeitos podem ser distinguidos: discrepância e variação do centro de fase da antena (HOFMANN-WELLENHOF, LICHTENEGGER e COLLINS, 2001).

A discrepância varia de acordo com a intensidade e a direção dos sinais, sendo diferente para cada portadora. Cada antena do receptor possui uma configuração e uma calibração, sendo que a calibração delas é feita com relação à antena *Dorne Margolin*, realizada pelo NGS (*National Geodetic Survey*).

Além da variação do centro de fase da antena do receptor com respeito ao ângulo de elevação, elas apresentam deslocamentos (*offsets*) do centro médio de fase das duas frequências com respeito ao ponto de referência da antena. Estas correções (E, N e H) devem ser adicionadas às posições horizontal e vertical das antenas respectivamente. Caso se utilize alguma combinação linear das portadoras L_1 e L_2 , a mesma combinação deve ser aplicada para os deslocamentos (MONICO, 2000).

2.2.3.1 Erro relacionado ao centro de fase da antena do satélite

Para posicionamento de alta precisão, o erro baseado na diferença do centro de massa do satélite e o seu centro de fase também devem ser corrigidos. Há várias correções desses deslocamentos convencionadas pelo IGS, devido à maioria dos modelos de órbitas utilizados se referirem ao centro de massa e não ao centro de fase. As correções são dadas em coordenadas cartesianas X , Y e Z , sendo que a coordenada X aponta na direção do Sol e Z aponta para a Terra (IGS, 2006). A Figura ilustra as correções que devem ser feitas no caso do PPP.



Figura 6 – Correções do centro de fase da antena do satélite
Fonte: Adaptado de Kouba e Héroux (2000)

Se a correção do centro de fase da antena do satélite não for realizada corretamente, ela será um erro adicionado à estimação do relógio do receptor. Sua correção é dada pelos seguintes passos (WITCHAYANGKOON, 2000):

- **Primeiro** – Calculam-se as coordenadas do Sol (X_{SOL} – Vetor das coordenadas do Sol) a partir das efemérides planetárias e as coordenadas do satélite (X_{SAT} – Vetor das coordenadas do satélite) a partir das efemérides precisas SP3;
- **Segundo** – Com as coordenadas, faz-se o cálculo do vetor unitário (\bar{e}) do satélite apontando em direção do Sol a partir da equação:

$$\bar{e} = \frac{X_{SOL} - X_{SAT}}{|X_{SOL} - X_{SAT}|} \quad (2.33)$$

- **Terceiro** – Calcula-se o vetor unitário que se inicia no centro de massa do satélite e aponta em direção ao centro da Terra:

$$\bar{k} = \frac{-X_{SAT}}{|X_{SAT}|} \quad (2.34)$$

- **Quarto** – Calcula-se o vetor unitário ao longo do eixo que aponta para o Sol:

$$\bar{j} = \bar{k} \times \bar{e} \quad (2.35)$$

- **Quinto** – Calcula-se o vetor unitário que completa o sistema dextrógiro:

$$\bar{i} = \bar{j} \times \bar{k} \quad (2.36)$$

Assim, a correção da antena do satélite é dada por:

$$\Delta X_{SAT} = R^{-1} \cdot C, \quad (2.37)$$

onde C é o vetor correção da antena dos satélites do Bloco II/IIA, conforme mostrado na Figura 7, onde o vetor R é:

$$R = \begin{bmatrix} \bar{i}^T \\ \bar{j}^T \\ \bar{k}^T \end{bmatrix}. \quad (2.38)$$

As coordenadas corrigidas do satélite:

$$X_{SV} = X_{SAT} + \Delta X_{SAT} \quad (2.39)$$

2.2.3.2 Fase *Wind-up*

Os satélites GPS transmitem ondas de rádio polarizadas circularmente à direita e, dessa forma, a observável fase de batimento da onda portadora depende da orientação mútua das antenas do satélite e receptor (KOUBA e HÉROUX, 2000). Qualquer rotação de uma das antenas em torno de seu próprio eixo mudará a fase da onda portadora em mais de um ciclo, o que corresponde a uma completa revolução da antena. Este efeito é chamado de fase *Wind-up* (WITCHAYANGKON, 2000).

Geralmente a antena mantém sua orientação voltada para a referência (usualmente o Norte). Contudo, a antena do satélite submete-se a lentas rotações dependendo da direção dos seus painéis solares, os quais são orientados em relação ao Sol e, dessa maneira, ocorrem alterações na geometria estação-satélite. No período de eclipses, os satélites também estão sujeitos a rotações rápidas chamadas de “giro do meio-dia e da meia-noite”, para reorientar seus painéis solares na direção do Sol. Durante cada “giro do meio-dia ou da meia-noite” os dados da fase de batimento da onda portadora necessitam ser corrigidos do efeito, ou simplesmente editados. Isto pode representar rotações da antena de até uma revolução em menos de meia hora (WITCHAYANGKON, 2000).

O erro da fase *Wind-up* pode alcançar cerca de meio comprimento de onda. Desde 1994, a maioria dos Centros de Análises do IGS aplica esta correção. Caso haja negligência da mesma, haverá um erro da ordem de decímetros. No entanto, este erro geralmente é negligenciado nos *softwares*. Para as antenas em movimento, como é o caso do posicionamento cinemático, a fase *Wind-up* é estimada a juntamente com a solução do relógio do receptor ou eliminada pela dupla diferença. O erro da fase *Wind-up* é calculado a partir de produtos vetoriais e escalares (WU et al., 1993 apud WITCHAYANGKON, 2000; KOUBA e HÉROUX, 2000):

$$\Delta \mathbf{f} = \text{sign}(\mathbf{z}) \cdot \cos^{-1} \left(\frac{\bar{D}' \cdot \bar{D}}{|D'| |D|} \right), \quad (2.40)$$

$$\mathbf{z} = \hat{k} \cdot (D' \times D), \quad (2.41)$$

$$D' = \hat{x}' - \hat{k} \cdot (\hat{k} \cdot \hat{x}') - \hat{k} \times \hat{y}', \quad (2.42)$$

$$D = \hat{x} - \hat{k} \cdot (\hat{k} \cdot \hat{x}) + \hat{k} \times \hat{y}, \quad (2.43)$$

sendo:

\hat{k} – vetor unitário do satélite para o receptor;

D' e D – vetores dipolos efetivos do satélite e receptor calculados a partir das coordenadas vetoriais dos mesmos (\hat{x}' , \hat{y}' e \hat{z}' para o satélite e, \hat{x} , \hat{y} e \hat{z} para o receptor);

• – produto vetorial.

2.2.3.3 Erro relacionado ao centro de fase da antena do receptor

As medidas do receptor GPS referem-se ao centro de fase eletrônico da antena. Todavia, o centro de fase da antena do receptor não é uma marca física, ela muda de acordo com o ângulo de elevação do satélite e esta variação é em função da fabricação da antena. Este erro deve ser corrigido; caso contrário pode chegar na ordem de decímetros. Segundo Mader (1999) apud Witchayangkoon (2000), o erro relacionado ao centro de fase da antena do receptor pode chegar a 10,00 cm para a coordenada altimétrica e abaixo do centímetro para as coordenadas horizontais.

Há diversos métodos para calibração de antenas com objetivo de determinar o centro de fase da antena: calibração relativa realizada pelo NGS (*National Geodetic Survey*), a qual consiste em medidas de campo com as antenas instaladas em linhas de base curtas; calibração absoluta, a qual consiste em utilizar uma câmara anecóica ou o uso de robôs (MADER, 2001). Atualmente, o *offset* e a variação do ângulo de elevação em 5 graus são disponibilizados pelo IGS e pelo NGS (*National Geodetic Survey*). Usuários GPS podem interpolar a variação do centro de fase da antena para obter os valores correspondentes em cada elevação arbitrária (ABDEL-SALAM, 2005).

2.2.3.4 Correções das observações obtidas a partir do código

Devido ao aumento dos tipos de receptores, os quais fornecem medidas a partir dos códigos em L_1 e L_2 , a consistência entre essas observações tem se tornado um assunto que deve ser considerado no processamento de dados GPS. Estudos mostram que as correções (*bias*) entre o código C/A e P1 apresentam diferenças de poucos decímetros (ABDEL-SALAM, 2005).

Assim, qualquer desenvolvimento no sistema de posicionamento deve considerar esse *bias*. Vale a pena mencionar que o *bias* causa problemas. O primeiro problema é que todas as estações rastreadas deveriam usar o mesmo tipo de observações para assegurar os dados precisos e consistentes da órbita e do relógio. Os usuários devem examinar as observações GPS, caso contrário, propagará erro na solução da posição, pois o *bias* pode ter efeito direto na estimativa do relógio do receptor (KOUBA, 2003).

Dependendo do tipo de receptor e da tecnologia utilizada no rastreamento dos sinais dos satélites, este problema está associado com os receptores de correlação cruzada e os que não utilizam esta técnica. Receptores com a tecnologia de correlação cruzada, tais como o AOA Rogue e TurboRogue, fornecem medidas de pseudodistâncias a partir de C/A e P2, além das medidas de fase das portadoras L_1 e L_2 . Porém, a medida a partir de P2 é baseada na adição daquela advinda do código C/A e da diferença entre as de P1 e P2, as quais são monitoradas pelo receptor (GAO et al. 2001). Os receptores modernos fornecem medidas a partir de C/A, P1 e P2, além da fase da onda portadora de L_1 e L_2 . Porém, as observações advindas de P2 não são equivalentes àquela correspondente do P2 da correlação cruzada. Como resultado, os usuários devem compatibilizar as observações medidas a partir de C/A e P2 de correlação cruzada com as de P1/P2 dos receptores modernos. A aplicação das correções (*bias*) dadas pelas equações (2.44) e (2.45) compatibilizam as observações de receptores antigos com as de receptores modernos (ABDEL-SALAM, 2005).

$$C / A_{\text{corrigido}} = C / A + B(i) \quad (2.44)$$

e

$$P2_{\text{corrigido}} = P2 + B(i) \quad (2.45)$$

onde:

C/A – código de fácil aquisição;

$C / A_{\text{corrigido}}$ – código C/A corrigido na L_1 que é consistente com P1;

$P2$ – código P na L_2 ;

$P2_{\text{corrigido}}$ – código P2 corrigido na L2 que é consistente com o P2 moderno;

$B(i)$ – *bias* entre C/A e P1.

No caso em que não há correlação cruzada nos receptores que fornecem C/A, ao invés de P1, a correção é feita somente pela equação (2.44).

Os dados coletados pelas estações que fazem parte do IGS são baseados numa rede que opera os receptores GPS modernos. Assim, os usuários devem considerar esta consistência se utilizar as observações do código C/A (ABDEL-SALAM, 2005). De acordo com o IGS mail # 5078, os *bias* são da order de nano segundos, e são organizados pelo PRN do satélite, os quais são listado na Tabela 4.

Tabela 4 – *Bias P1/CA* (ns).

PRN	<i>bias</i>								
1	-0,028	2	-0,061	3	0,077	4	1,334	5	-0,929
6	0,0664	7	-0,912	8	-0,335	9	0,529	10	-1,567
11	0,535	12	NA	13	1,541	14	0,335	15	-1,057
16	-0,419	17	-0,906	18	0,098	19	-2,269	20	-1,105
21	-0,346	22	0,579	23	-0,221	24	0,152	25	0,735
26	1,247	27	-0,018	28	-0,205	29	0,842	30	2,017
31	-0,307								

Fonte: IGS mail # 5078.

3 IMPLEMENTAÇÃO DO PPP NO SOFTWARE FILTER_FCT

O *software* originalmente denominado de FILTER faz parte do *software GPS Analysis Software (GAS)*, desenvolvido pela Universidade de Nottingham (UK). Esse *software* foi modificado para realizar o PPP no modo estático e no modo cinemático, passando a ser denominado FILTER_FCT. Ele é composto, principalmente, pelo arquivo de controle, pelo executável do programa e pelo arquivo *log*. O *software* FILTER_FCT é composto atualmente de 129 sub-rotinas.

A função primária do FILTER_FCT é converter dados RINEX (*Receiver Independent EXchange format*) para o formato NOT. Nesta etapa, é possível: descartar épocas que contenham menos que certo número de satélites; definir um novo intervalo de dados, por exemplo, dados coletados a cada 15 segundos para dados coletados a cada 30 segundos; remover dados de satélites que apresentem algum problema; detectar e corrigir grandes saltos de ciclos na fase de batimento da onda portadora; especificar o intervalo de tempo para os arquivos de observação; realizar o PP através das pseudodistâncias com dados GPS e GLONASS; realizar o PPP utilizando a combinação linear *Ion-free*.

O arquivo de controle consiste de três blocos: FILES; OPTIONS; PSEUDO/PPP. A Figura 7 ilustra o fluxograma do FILTER_FCT.

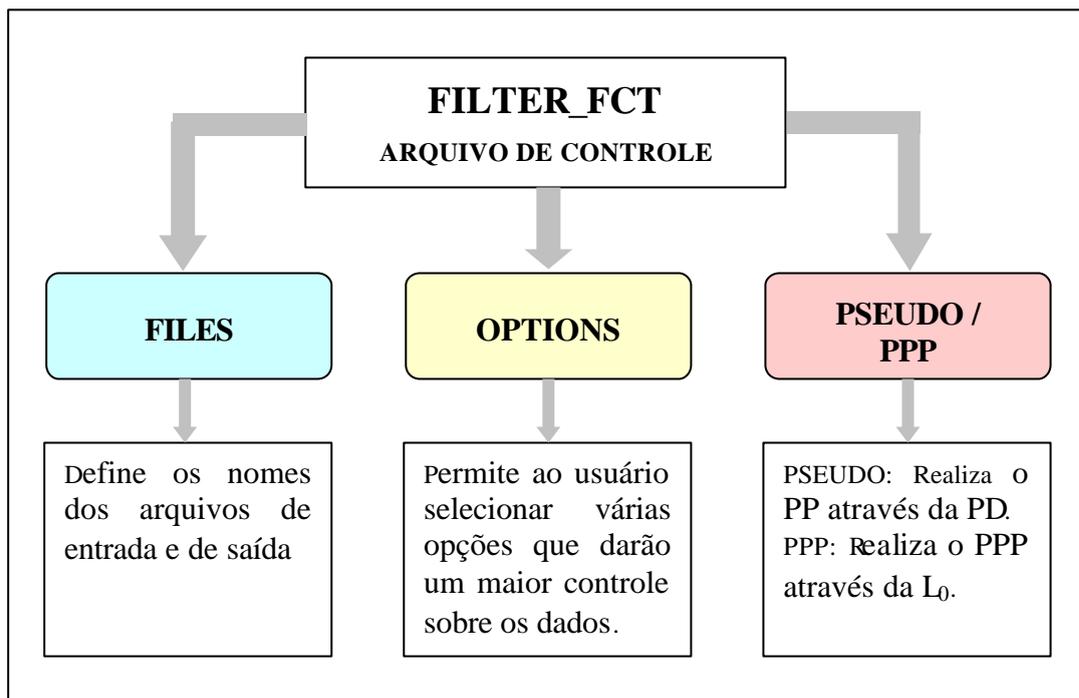


Figura 7 – Fluxograma do FILTER_FCT.

Para se ter acesso ao arquivo de controle e a todas as suas funções, deve-se editar o arquivo FILTER_FCT.CTL. A Figura 8 mostra a estrutura do arquivo de controle com todas as funções existentes.

```
FILES
  INPUT
    STYLE rine\***.not !06o
    DATA PPTE0511
  END
  OUTPUT
    STYLE SAIDA\***.not
  END
END

OPTIONS
  SLIP_TOL 500
! PSEUDO YES
  PPP YES
  ATMOSPHERE YES
    TROPOSPHERE HOPIFIELD ! SAASTAMOINEN

  START YMDHMS 2006 02 20 02 30 00.
  STOP  YMDHMS 2006 02 20 22 30 00.

! UNHEALTHY 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22
!23 24 25 26 27 28 29 30 31
END

PPP_OPTIONS
  FILES
    INPUT
      EPH eph\IGS11820.sp3
    END
    OUTPUT
      POS_STYLE saida\***.POS
      RES_STYLE saida\***.RES
    END
  END

PROC_OPT
  MODE EPOCH
!  MODE SEQUENTIAL
  ELEV_MIN 10
  FREQUENCY 0
END

END
```

Figura 8 – Estrutura do arquivo de controle do FILTER_FCT.

Como o FILTER só realizava o PP utilizando a pseudodistância, algumas alterações foram realizadas em parte das sub-rotinas visando implementar o PPP, tanto no modo estático quanto no modo cinemático. Para tanto, foi utilizado o compilador *Lahey-Fujitsu Developer FORTRAN 95 v. 5.0*. Além disto, foram criadas novas sub-rotinas para a correção de erros das observáveis. Primeiramente, o PPP foi implementado através do Filtro de Kalman Estendido, conforme consta da seção 3.1.

3.1 Filtro de Kalman Estendido

O Filtro de Kalman Estendido é uma extensão do Filtro de Kalman, sendo comumente utilizado quando o processo a ser estimado e/ou medidas relacionadas ao processo é não. A estimativa da posição na época $k-1$ é usada para calcular a posição na época k para o movimento do satélite LEO, por exemplo.

A formulação matemática a ser apresentada utiliza a notação de Camargo (1992). Todavia, o filtro de Kalman é encontrado em várias versões, como por exemplo, em Witchayangkoon (2000), Teunissen (2001), Kuga e Prado (2001), Gomes (2004) e Abdelsalam (2005).

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

$$X_k = T_{k,k-1} X_{k-1} + W_k, \quad (3.1)$$

$$L_k^b = A_k X_k + V_k, \quad (3.2)$$

onde:

X_k – vetor de estado do sistema na época k , de dimensão $u \times 1$, sendo u igual ao número de parâmetros incógnitos;

$T_{k,k-1}$ – matriz de transição ($u \times u$) que interliga os vetores de estado X_k e X_{k-1} ;

W_k – vetor das correções do modelo dinâmico ou vetor dos ruídos ($u \times 1$);

L_k^b – vetor das observações ou medidas, de dimensão $n_k \times 1$, com n_k igual ao número de observações coletadas na época k ;

A_k – matriz dos coeficientes ($n_k \times u$) que relaciona as observações ao estado;

V_k – vetor dos resíduos nas medidas, o qual é assumido que $E\{V_k\} = 0$, sendo E o operador de esperança matemática.

O vetor W_k é o ruído do sistema ou processo (podendo ser considerado ruído branco) para o qual é assumido que $E\{W_k\} = 0$, sendo Σ_{W_k} sua matriz variância-covariância (MVC).

De acordo com Kalman (1960), a matriz de transição contém as seguintes propriedades:

$$\begin{cases} T_{k,k} = I \\ T_{k,s} T_{s,r} = T_{k,r} \\ T_{k,s}^{-1} = T_{s,k} \end{cases} \quad (3.3)$$

onde k , s e r são inteiros e indicam épocas. Se o modelo for estacionário, tem-se que $T_{k+1,k} = constante$.

Quando se utiliza o filtro de Kalman, algumas considerações são necessárias, tais como (CAMARGO, 1992):

- as MVCs das correções do modelo dinâmico e do modelo de medida devem ser positivas definidas;
- os vetores das correções do modelo dinâmico e das correções do modelo de medida são estatisticamente independentes, ou seja, $E\{W_k V_j^T\} = E\{V_k W_j^T\} = 0$;
- o vetor estado inicial X_0 seja considerado um vetor de variáveis com distribuição normal e com estatística conhecida, representada por $E\{X_0\} = \hat{X}_{0,0}$ e $E\{(X_0 - \hat{X}_{0,0})(X_0 - \hat{X}_{0,0})^T\} = \Sigma_{\hat{X}_{0,0}}$;
- o vetor de estado inicial e o vetor das correções são estatisticamente independentes, isto é, $E\{W_k X_0^T\} = E\{V_k X_0^T\} = 0$.

Assume-se ainda que os vetores aleatórios (V_k e W_k) não são correlacionados e ainda que (TEUNISSEN, 1998 apud AGUIAR, 2005):

$$\begin{cases} E\{V_k V_j^T\} = \Sigma_{V_k} \mathbf{d}_{k,j} \\ E\{W_k W_j^T\} = \Sigma_{W_k} \mathbf{d}_{k,j} \end{cases}, \quad (3.4)$$

onde $\mathbf{d}_{k,j}$ é o delta *Kronecker*, definido por $\mathbf{d}_{k,j} = 1$ quando $k = j$ e $\mathbf{d}_{k,j} = 0$ quando $k \neq j$.

O Filtro de Kalman consiste de duas etapas: Predição ou Ciclo de Propagação e a etapa de Filtragem ou Ciclo de Atualização. A etapa de Predição dissemina o estado e a covariância do instante t_{k-1} à t_k e a etapa de Atualização corrige o estado e a covariância para o instante t_k devido à medida L_k^b . Esse método tem natureza recursiva e não necessita armazenar as medidas previamente em grandes matrizes.

Na etapa de Predição a estimativa predita do vetor de estado é dada por (CAMARGO, 1992):

$$\hat{X}_{k,k-1} = T_{k,k-1} X_{k,k-1}^o + W_k \quad (3.5)$$

e sua respectiva MVC como:

$$\Sigma_{\hat{X}_{k,k-1}} = T_{k,k-1} \Sigma_{\hat{X}_{k-1,k-1}} T_{k,k-1}^T + \Sigma_{W_k}. \quad (3.6)$$

Sendo:

$$X_{k,k-1}^o = f_{k,k-1}(\widehat{X}_{k-1,k-1}), \quad (3.7)$$

e

$$T_{k,k-1} = \left. \frac{\partial f_{k,k-1}(X_{k-1})}{\partial X_{k-1}} \right|_{X_{k-1} = \widehat{X}_{k-1,k-1}}. \quad (3.8)$$

Na etapa de Atualização se corrige o estado e a covariância. Segundo Camargo (1992), as equações para esta fase são dadas por:

$$K_k = \Sigma_{\widehat{X}_{k,k-1}} A_k^T (A_k \Sigma_{\widehat{X}_{k,k-1}} A_k^T + \Sigma_{L_k^b})^{-1} \quad (3.9)$$

onde K é denominada matriz de Ganho de Kalman com:

$$L_k^o = g_k(\widehat{X}_{k,k-1}), \quad (3.10)$$

$$A_k = \left. \frac{\partial g_k(X_k)}{\partial X_k} \right|_{X_k = \widehat{X}_{k,k-1}}. \quad (3.11)$$

A estimativa filtrada e sua respectiva MVC é dada por:

$$\widehat{X}_{k,k} = \widehat{X}_{k,k-1} + K_k (L_k^b - L_k^o) \quad (3.12)$$

$$\Sigma_{\widehat{X}_{k,k}} = [I - K_k A_k] \Sigma_{\widehat{X}_{k,k-1}} \quad (3.13)$$

A equação (3.13) é susceptível a erros numéricos. Uma forma mais conveniente proposta para esta equação é a forma de Joseph (BUCY e JOSEPH, 1986 apud KUGA e PRADO, 2001):

$$\Sigma_{\widehat{X}_{k,k}} = [I - K_k A_k] \Sigma_{\widehat{X}_{k,k-1}} [I - K_k A_k]^T + K_k \Sigma_{\widehat{X}_{k,k-1}} \quad (3.14)$$

Esta equação é válida para um ganho arbitrário (K_k) e em particular para o Ganho de Kalman.

Assim, para aplicar o Filtro de Kalman no PPP é necessário conhecer o vetor de estado inicial, bem como a sua precisão:

$$\widehat{X}_{0,0} = [X_r \quad Y_r \quad Z_r \quad N_1 \quad N_2 \quad \dots \quad N_n \quad \mathbf{a}_{T_r^s} \quad dt_r]^T \quad (3.15)$$

e

$$\Sigma_{\hat{X}_{0,0}} = \begin{bmatrix} \mathbf{s}_X^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{s}_Y^2 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{s}_Z^2 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{s}_{N_1}^2 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{s}_{N_2}^2 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \mathbf{s}_{N_1}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \mathbf{s}_{a_{T_r^s}}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \mathbf{s}_{dt_r}^2 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

onde:

- $\hat{X}_{0,0}$ – vetor de estado inicial ($t_k=0$) dos parâmetros a serem estimados;
- $\Sigma_{\hat{X}_{0,0}}$ – MVC dos parâmetros iniciais;
- X_r, Y_r, Z_r – coordenadas estimadas ou coordenadas projetadas no receptor;
- N_i – ambigüidades, $i = 1, \dots, n$, onde n é o número de satélites;
- $\mathbf{a}_{T_r^s}$ – fator de escala da troposfera;
- dt_r – erro do relógio do receptor;
- \mathbf{s}_i^2 – variância dos parâmetros ($i = 1, 2, \dots, n+5$).

No posicionamento cinemático e no PPP estático simulando cinemático, a MVC dos parâmetros é acrescida da matriz dos ruídos (Σ_{w_k}), conforme a equação (3.6). Neste trabalho, acrescentou-se um valor constante (*Const*) para as coordenadas no modo cinemático.

$$\Sigma_{w_k} = \begin{bmatrix} Const & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Const & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Const & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & N_2 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & N_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \mathbf{a}_{T_r^s} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & dt_r \end{bmatrix}, \quad (3.17)$$

sendo $N_1, N_2, \dots, e N_n$ igual a zero.

A matriz A para n satélites na época k e o vetor de estado da posição X_r , Y_r , Z_r , ambigüidades, efeito da troposfera, relógio do receptor para a fase de batimento da onda portadora e para a pseudodistância utilizando a combinação linear *ion-free* é escrita como:

$$A_k^s(\mathbf{f}) = \begin{bmatrix} \overbrace{\frac{X_{r_k} - X_k^{s_1}}{\mathbf{r}_{r_k}^s}}^a & \overbrace{\frac{Y_{r_k} - Y_k^{s_1}}{\mathbf{r}_{r_k}^s}}^b & \overbrace{\frac{Z_{r_k} - Z_k^{s_1}}{\mathbf{r}_{r_k}^s}}^c & \overbrace{1 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0}^{\text{ambigüidades}} & \overbrace{T_r^{s_1}}^{T_r^s} & \overbrace{1}^{dt_r} \\ \frac{X_{r_k} - X_k^{s_2}}{\mathbf{r}_{r_k}^s} & \frac{Y_{r_k} - Y_k^{s_2}}{\mathbf{r}_{r_k}^s} & \frac{Z_{r_k} - Z_k^{s_2}}{\mathbf{r}_{r_k}^s} & 0 \ 1 \ 0 \ \dots \ 0 & T_r^{s_2} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \ \vdots \ \vdots \ \ddots \ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{X_{r_k} - X_k^{s_n}}{\mathbf{r}_{r_k}^s} & \frac{Y_{r_k} - Y_k^{s_n}}{\mathbf{r}_{r_k}^s} & \frac{Z_{r_k} - Z_k^{s_n}}{\mathbf{r}_{r_k}^s} & 0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 1 & T_r^{s_n} & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.18)$$

e

$$A_k^s(PD) = \begin{bmatrix} \overbrace{\frac{X_{r_k} - X_k^{s_1}}{\mathbf{r}_{r_k}^s}}^a & \overbrace{\frac{Y_{r_k} - Y_k^{s_1}}{\mathbf{r}_{r_k}^s}}^b & \overbrace{\frac{Z_{r_k} - Z_k^{s_1}}{\mathbf{r}_{r_k}^s}}^c & \overbrace{0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0}^{\text{ambigüidades}} & \overbrace{T_r^{s_1}}^{T_r^s} & \overbrace{1}^{dt_r} \\ \frac{X_{r_k} - X_k^{s_2}}{\mathbf{r}_{r_k}^s} & \frac{Y_{r_k} - Y_k^{s_2}}{\mathbf{r}_{r_k}^s} & \frac{Z_{r_k} - Z_k^{s_2}}{\mathbf{r}_{r_k}^s} & 0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0 & T_r^{s_2} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \ \vdots \ \vdots \ \ddots \ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{X_{r_k} - X_k^{s_n}}{\mathbf{r}_{r_k}^s} & \frac{Y_{r_k} - Y_k^{s_n}}{\mathbf{r}_{r_k}^s} & \frac{Z_{r_k} - Z_k^{s_n}}{\mathbf{r}_{r_k}^s} & 0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0 & T_r^{s_n} & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.19)$$

$$\mathbf{r}_{r_k}^s = \sqrt{(X_{r_k} - X_k^s)^2 + (Y_{r_k} - Y_k^s)^2 + (Z_{r_k} - Z_k^s)^2}, \quad (3.20)$$

onde:

X_k^s, Y_k^s, Z_k^s – coordenadas do satélite s , onde $s=1, \dots, n$, sendo n o número de satélites visíveis;

a, b, c – coeficientes referentes às derivadas parciais da distância geométrica com relação aos parâmetros aproximados, conforme apresentado na equação (2.1);

$\mathbf{r}_{r_k}^s$ – distância geométrica.

A matriz de transição (T) é dada como matriz identidade. O vetor de observações L_k^b é composto da combinação linear L_0 das observáveis (fase de batimento da

onda portadora e pseudodistância) e a sua matriz variância-covariância ($\Sigma_{L_k^b}$), cujas variâncias serão distintas para a fase de batimento da onda portadora e pseudodistância.

Quando o satélite está em um baixo ângulo de elevação há o aumento de ruído e a presença de multicaminho nas observações. Assim, é conveniente aplicar uma função que utiliza a combinação da variância das observações juntamente com o ângulo de elevação do satélite para $\Sigma_{L_k^b}$. Esta função pode ser dada como (WITCHAYANGKOON, 2000):

$$\mathbf{s}^2(E) = \begin{cases} \mathbf{s}^2 & E > \ell \\ \mathbf{s}^2 (\cos ec(E))^2 & E < \ell \end{cases} \quad (3.21)$$

ou

$$\mathbf{s}^2(E) = \begin{cases} \mathbf{s}^2 \cos ec(E) & E > \ell \\ \mathbf{s}^2 (\cos ec(E))^2 & E < \ell \end{cases} \quad (3.22)$$

onde:

E – ângulo de elevação do satélite;

ℓ – ângulo de elevação limiar definido pelo usuário.

3.2 Eliminação dos erros devido à refração troposférica e ionosférica

Com relação aos erros devido à propagação do sinal, a parte residual dos efeitos da refração troposférica, neste trabalho, é estimada mediante a introdução de um fator de escala ($\mathbf{a}_{T_r^s}$) como incógnita na equação de observação para todo o processamento. Por exemplo, a equação da pseudodistância ficará:

$$PD_r^s = \mathbf{r}_r^s + c.(dt_r - dt^s) + T_r^s (1 + \mathbf{a}_{T_r^s}) + \mathbf{e}_{PD_r^s} \quad (3.23)$$

O valor calculado a partir do modelo troposférico é utilizado diretamente na matriz A , uma vez que o valor incógnito a ser ajustado é um fator de escala. Por isso que na matriz A entra o valor da Troposfera, pois a derivada parcial é em relação ao fator de escala \mathbf{a} . As sub-rotinas criadas para a correção dos efeitos da troposfera foram:

- HOPFIELD.F90;
- SAASTAMOINEN.F90.

Para a correção dos efeitos da troposfera, foram utilizados dados de temperatura, pressão e umidade relativa no nível médio dos mares, segundo Butler et al. (1988):

- Temperatura = 18 °C;
- Pressão = 1013,25 mbars;
- Umidade Relativa = 50%.

Junto com a correção dos efeitos da troposfera foram criadas as funções de mapeamento de Chao e Niell.

Combinações lineares foram utilizadas para se reduzir o efeito da ionosfera sobre as observáveis, sendo estes praticamente eliminados quando se utilizam receptores de dupla frequência. Assim, realizando combinações lineares entre as portadoras L_1 e L_2 é possível eliminar erros de primeira ordem. Por outro lado, os usuários com receptores de simples frequência têm que negligenciá-los ou corrigi-los a partir de modelos existentes, como por exemplo, o modelo de Klobuchar. Esse modelo corrige cerca de 50% do efeito total da ionosfera para latitudes médias.

Em se tratando de PPP, para a correção dos erros ocasionados pela refração ionosférica pode-se utilizar combinações lineares entre as observáveis, conforme serão mostradas nas Tabelas 5 e 6. Para realizar uma combinação linear (C) entre as observáveis, aplica-se a equação:

$$C = n.L_1 + m.L_2, \quad (3.24)$$

onde:

L_i – observável a ser utilizada (pseudodistância ou fase da onda portadora), sendo $i = (1,2)$ referente às duas portadoras existentes;

n e m – coeficientes da combinação linear.

A Tabela 5 apresenta a combinação linear da fase da onda portadora, onde I_{Σ} é o comprimento da onda portadora resultante, V_I é o efeito da ionosfera, S_{L_i} é o desvio-padrão.

Tabela 5 – Combinação linear das fases de batimento da onda portadora

Sinal (L _i)	n	m	l (cm)	V _I	S _{L_i} (mm)
L ₁	1	0	19,0	0,779	3,0
L ₂	0	1	24,4	1,283	3,9
L ₂ ¹	1	-1	86,2	-1,000	19,4
L ₂ ²	1	1	10,7	1,000	2,1
L ₋₁₂	-1	2	34,1	2,168	12,1
L ₃₂	3	-2	13,2	0,234	7,6
L ₄₃	4	-3	11,4	0,070	9,1
L ₉₇	9	-7	5,4	0,004	9,7
L ₅₄	5	-4	10,1	-0,055	10,3
L ₆₅	6	-5	9,0	-0,154	11,2
L ₀	$f_1^2/(f_1^2 - f_2^2)$	$-f_1 f_2/(f_1^2 - f_2^2)$	≈19,0	0,000	10,0

Fonte: Adaptado de Seeber (2003)

As combinações lineares das pseudodistâncias são possíveis desde que se utilize o código P, devido ao código C/A não estar disponível na L₂. A Tabela 6 apresenta a combinação linear para a pseudodistância.

Tabela 6 – Combinação linear da pseudodistância

Sinal (C _i)	n	m	V _I	S _G (m)
C ₁	1	0	-0,779	0,470
C ₂	0	1	-1,283	0,470
C ₂ ¹	1	-1	1,000	2,680
C ₂ ²	1	1	-1,000	0,330
C ₀	$f_1^2/(f_1^2 - f_2^2)$	$f_2^2/(f_1^2 - f_2^2)$	0,000	10,0

Fonte: Adaptado de Seeber (2003)

Uma combinação muito utilizada para reduzir os efeitos da ionosfera, mostrada na Tabela 5 e 6, é a combinação livre dos efeitos da ionosfera (*Ionospheric Free*), conhecida como L₀ ou L₃, a qual foi utilizada neste trabalho. Trata-se de uma combinação linear normalmente utilizada no posicionamento geodésico de alta precisão (MONICO, 2000).

¹ Combinação denominada *widelane*

² Combinação denominada *narrow lane*

3.3 Detecção da Perda de ciclo

A perda de ciclos não foi corrigida e sim detectada através da combinação linear *widelane*, combinando fase e pseudodistância. Quando ocorre perda de ciclo, estima-se novamente o valor da ambigüidade da seguinte maneira: na MVC dos parâmetros coloca-se um valor alto para a variância da ambigüidade na qual ocorreu a perda de ciclo (valor inicial da variância quando se inicia o processamento), deixando sua correlação com as demais nula. Assim, para cada época de observação, a ambigüidade da *widelane* é avaliada e quando a perda de ciclo é detectada, uma nova ambigüidade será inicializada no lugar da antiga.

No PPP, geralmente se calcula apenas a ambigüidade *float* ou solução real (BISNATH, 2004). Sendo assim, neste trabalho, as ambigüidades são tratadas como real, sem tentativa de solução como inteira. A cada nova época de observação a ambigüidade tende a convergir e estabilizar, dependendo do algoritmo utilizado (BISNATH e LANGLEY, 2001).

De acordo com Witchayangkoon (2000), para detectar a perda de ciclos com a *widelane* tem-se:

$$N_w = \mathbf{f}_w - \frac{f_1 \cdot PD_1 + f_2 \cdot PD_2}{(f_1 + f_2) \cdot \mathbf{I}_w}, \quad (3.25)$$

$$\mathbf{f}_w = \mathbf{f}_{L_1} - \mathbf{f}_{L_2}, \quad (3.26)$$

onde:

N_w – ambigüidade da *widelane*;

\mathbf{f}_w – fase da *widelane*;

f_1 – frequência L_1 ;

f_2 – frequência L_2 ;

PD_1 – pseudodistância na frequência L_1 ;

PD_2 – pseudodistância na frequência L_2 ;

λ_w – comprimento de onda da *widelane* que é 86,2 cm.

Para cada época de observação, a ambigüidade da *widelane* será avaliada. O algoritmo seqüencial recursivo para a ambigüidade da *widelane* e sua variância é dado por:

$$(N_w)_k = (N_w)_{k-1} + \frac{1}{k} [N_{w,k} - (N_w)_{k-1}], \quad (3.27)$$

$$\mathbf{s}_k^2 = \mathbf{s}_{k-1}^2 + \frac{1}{k} \{ [N_{w,k} - (N_w)_{k-1}]^2 - \mathbf{s}_{k-1}^2 \}, \quad (3.28)$$

onde:

(N_w) – média de N_w ;

S_i – desvio padrão de N_w ;

k – época.

Numa época $k+1$, a ambigüidade $N_{w,i+1}$ deve estar dentro de $4s$ da média (N_w) da época anterior (k), caso contrário assume-se que houve perda de ciclos. Todavia, consecutivas perdas de ciclos com saltos iguais na *widelane*, mas com sinal negativo, são tratadas como erros grosseiros (WITCHAYANGKOON, 2000).

3.4 Outras implementações realizadas no FILTER_FCT

Além da redução dos erros devido à refração troposférica, ionosfera e detecção da perda de ciclo, foram realizadas outras implementações no FILTER_FCT. Tratam-se dos erros devido à relatividade e ao movimento de rotação da Terra. Para os erros relacionados com o centro de fase da antena foram corrigidos aqueles devido ao Centro de Fase da Antena do Satélite para os satélites do Bloco II e IIA. Adicionalmente introduziu-se a correção da fase *Wind-up*, esta correção quando introduzida diminui cerca de 1 a 3 cm a discrepância dos resultados.

Com relação aos erros relacionados com a estação, foram corrigidos os efeitos devido ao movimento das marés terrestres e o erro do relógio do receptor. O erro do relógio do receptor é estimado a cada época no Filtro de Kalman Estendido, sendo modelado como um ruído branco. Foi realizada a correção de *bias* P1/CA para que haja consistência das observações do código para as estações em que o receptor também recebe a observável P1.

A análise do PPP foi feita no dia do processamento, de modo que as coordenadas de referência tiveram que ser atualizadas para essa época, sendo as velocidades obtidas no IBGE. Também foi criada uma sub-rotina para transformar as coordenadas cartesianas (X, Y, Z) em coordenadas locais (E, N, h) para analisar os resultados. A Figura 9 ilustra um fluxograma do PPP.

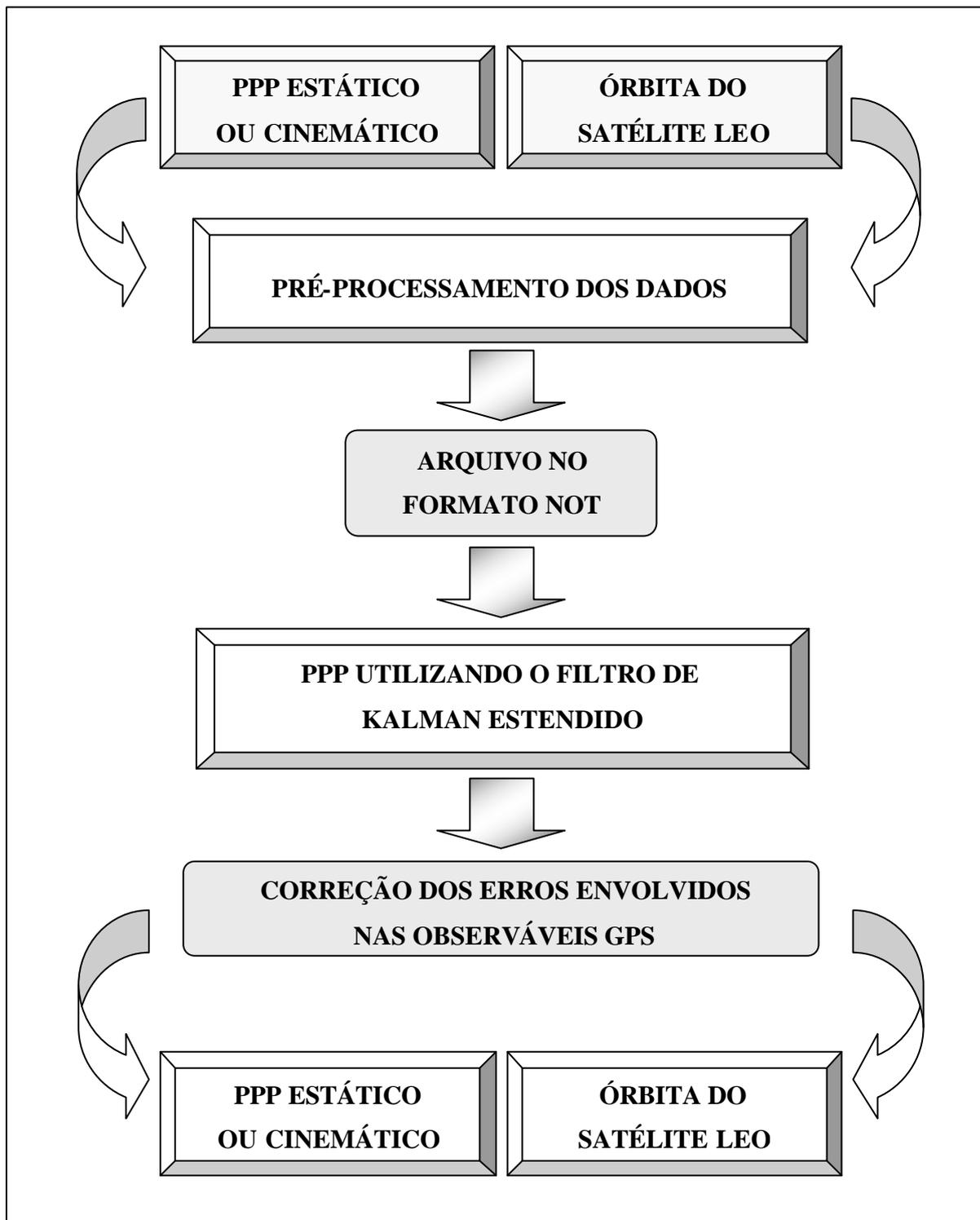


Figura 9 – Fluxograma do PPP.

4 EXPERIMENTOS E ANÁLISES

Para analisar o PPP foram realizados experimentos com os dados das seguintes estações: RIOD e VICO, as quais possuem um receptor TRIMBLE 4000SSI; PPTE, a qual possui um receptor TRIMBLE NetRS; e FORT, a qual possui um receptor Leica GRX1200 PRO. Todas as quatro estações pertencem a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), sendo os dados obtidos via internet. Os dados para as estações da RBMC foram do dia 20 de fevereiro de 2006.

Também foram realizados experimentos com a estação FRDN, do dia 06 de janeiro de 2005, localizada no Canadá, a qual possui um receptor GPS AOA BENCHMARK ACT. Para a escolha destas estações utilizou-se a seguinte estratégia: a estação RIOD se localiza no litoral da cidade do Rio de Janeiro tendo influência das marés oceânicas, ao contrário da estação VICO que está a aproximadamente 1.200 km de distância do oceano. A estação PPTE, onde se localiza a FCT/UNESP, foi instalado um novo receptor (NetRS) em dezembro de 2005, o qual possui uma nova tecnologia. Já as estações FORT e FRDN foram escolhidas por possuírem um relógio atômico. Por fim, para realizar o processamento no modo cinemático também foram utilizados dados do satélite CHAMP.

As coordenadas das estações PPTE, RIOD, VICO e FORT no sistema de Referência SIRGAS2000, na época 2000,4, e as coordenadas da estação FRDN no sistema de referência ITRF2000, época 1997,0, são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Coordenadas das Estações utilizadas nos experimentos.

Estação	Cidade / Estado	Coordenadas (m)	Velocidades (m/a)
PPTE	Presidente Prudente / São Paulo	X = 3.687.624,315 ± 0,001	V _x = 0,0005
		Y = -4.620.818,606 ± 0,002	V _y = -0,0057
		Z = -2.386.880,343 ± 0,001	V _z = 0,0117
RIOD	Rio de Janeiro / Rio de Janeiro	X = 4.280.294,879 ± 0,002	V _x = 0,0010
		Y = -4.034.431,225 ± 0,002	V _y = -0,0069
		Z = -2.458.141,380 ± 0,001	V _z = 0,0129
VICO	Viçosa / Minas Gerais	X = 4.373.383,313 ± 0,002	V _x = 0,0001
		Y = -4.059.639,049 ± 0,002	V _y = -0,0065
		Z = -2.246.959,728 ± 0,001	V _z = 0,0118
FORT	Euzébio / Ceará	X = 4.985.386,605 ± 0,004	V _x = -0,0023
		Y = -3.954.998,594 ± 0,004	V _y = -0,0042
		Z = -428.420,440 ± 0,001	V _z = 0,0119
FRDN	Fredericton / New Brunswick	X = 1.760.543,420 –	V _x = -0,0034
		Y = -4.080.069,400 –	V _y = 0,0032
		Z = 4.560.178,60 –	V _z = 0,0069

4.1 Experimentos

Essa seção descreve os resultados e as análises dos experimentos realizados para validar o método proposto nesse trabalho. Primeiramente, os dados da pseudodistância e da fase de batimento da onda portadora foram pré-processados para detectar erros grosseiros e grandes perdas de ciclos com o *software* FILTER_FCT gerando o arquivo NOT. Após, faz-se o processamento dos dados utilizando o Filtro de Kalman Estendido conforme descrito na seção 3.1.1.

O processamento dos dados foi realizado iniciando-se à 1 hora e 30 minutos e terminando às 22 horas e 30 minutos (TU) para as estações RIOD, VICO, PPTE, FORT e FRDN e foram utilizadas as efemérides precisas do IGS. Serão apresentados o desvio-padrão (DP) em relação à média das coordenadas e a discrepância (Disc) entre as coordenadas médias e a posição considerada “verdadeira” de cada estação no dia do processamento.

Foram realizados três experimentos: o primeiro experimento realiza o PPP no modo estático; o segundo faz o PPP estático simulando o posicionamento cinemático e o terceiro experimento realiza o PPP no modo cinemático utilizando dados do satélite CHAMP.

4.1.1 Configurações do Filtro de Kalman para realizar o PPP

As configurações do Filtro de Kalman para realizar o PPP incluem os valores da MVC dos parâmetros ($\Sigma_{\tilde{X}k,k-1}$), a matriz de covariância do ruído do sistema (Σ_{W_k}) e a MVC das observações ($\Sigma_{L_k^b}$).

Os valores adotados para a variância de Σ_{W_k} foram adotados de acordo com Witchayangkoon (2000):

$$\begin{aligned} \mathbf{s}_X^2 &= 0,0003 \text{ m}^2 \text{ – coordenadas;} \\ \mathbf{s}_N^2 &= 0,00 \text{ m}^2 \text{ – ambigüidades;} \\ \mathbf{s}_{T_{rs}}^2 &= 0,01 \text{ m}^2 \text{ – troposfera;} \\ \mathbf{s}_r^2 &= 30,00 \text{ m}^2 \text{ – relógio do receptor.} \end{aligned}$$

As variâncias das observações para a pseudodistância e para a fase de batimento da onda portadora foram, sendo estes valores modificados de acordo com o ângulo de elevação do satélite, o qual foi de 10° para o processamento, sendo o ângulo limiar de 45° , conforme apresentou a equação 3.22:

$$\begin{aligned} \mathbf{s}_{PD}^2 &= 4,00 \text{ m}^2; \\ \mathbf{s}_f^2 &= 0,02 \text{ m}^2. \end{aligned}$$

Para chegar a esses valores foram realizados vários testes, com base nos valores adotados por Witchayangkoon (2000), e verificou-se que há uma grande influência na escolha da variância das observações no resultado final do PPP. Neste trabalho, aumentou-se o valor da variância da PD para $4,00 \text{ m}^2$.

Para os experimentos foram adotados os seguintes valores para as variâncias dos parâmetros iniciais ($\Sigma_{\tilde{X}k,k-1}$):

$$\begin{aligned} \mathbf{s}_{X_INICIAL}^2 &= 1,00 \text{ m}^2; 5,00 \text{ m}^2 \text{ e } 10,00 \text{ m}^2 \text{ – coordenadas (X, Y, Z);} \\ \mathbf{s}_{N_INICIAL}^2 &= 10,00^{10} \text{ m}^2 \text{ – ambigüidades;} \\ \mathbf{s}_{a_{T_{rs}}^2 - INICIAL} &= 0,10 \text{ m}^2 \text{ – troposfera;} \\ \mathbf{s}_r^2 &= 3.300,00^2 \text{ m}^2 \text{ e } 10.000,00^2 \text{ m}^2 \text{ – relógio do receptor.} \end{aligned}$$

Na tese de Witchayangkoon (2000), o valor utilizado para a variância das coordenadas é de 1,00 m². Para verificar a influência da variância das coordenadas e do relógio do receptor no PPP realizaram-se os experimentos com diferentes valores. Já os valores da variância adotados para a ambigüidade e para a troposfera foram de acordo com os experimentos realizados por Witchayangkoon (2000). As ambigüidades são tratadas como números reais, sem tentativa de solução como inteiras. Por sua vez, a perda de ciclo foi detectada com a combinação linear *widelane*.

4.1.2 Resultados do PPP estático

No primeiro experimento realizou-se o PPP no modo estático. Para verificar a influência da variância do relógio na MVC dos parâmetros, serão mostradas as discrepâncias para a variância do relógio (\mathbf{s}_r^2) igual a (3.300,00)² m² e igual a (10.000,00)² m². A variância de 3.300,00² m² foi obtida a partir do PP. Realizando o PP, verificou-se que a variação do relógio do receptor era de aproximadamente 3.300,00 m a cada época. Também foram testadas diferentes variâncias iniciais para as coordenadas a fim de verificar a convergência dos resultados.

As Figuras 10, 11, 12, 13 e 14 mostram o comportamento diário das discrepâncias planimétricas (coordenadas E, N) e altimétrica (h), bem como a resultante planimétrica (RP) para as estações PPTE, RIOD, VICO, FORT e FRDN com $\mathbf{s}_{X_INICIAL}^2$ das coordenadas igual a 1,00 m², 5,0 m² e 10,0 m² e também com a variância do relógio (\mathbf{s}_r^2) igual a (3.300,00)² m² e igual a (10.000,00)² m².

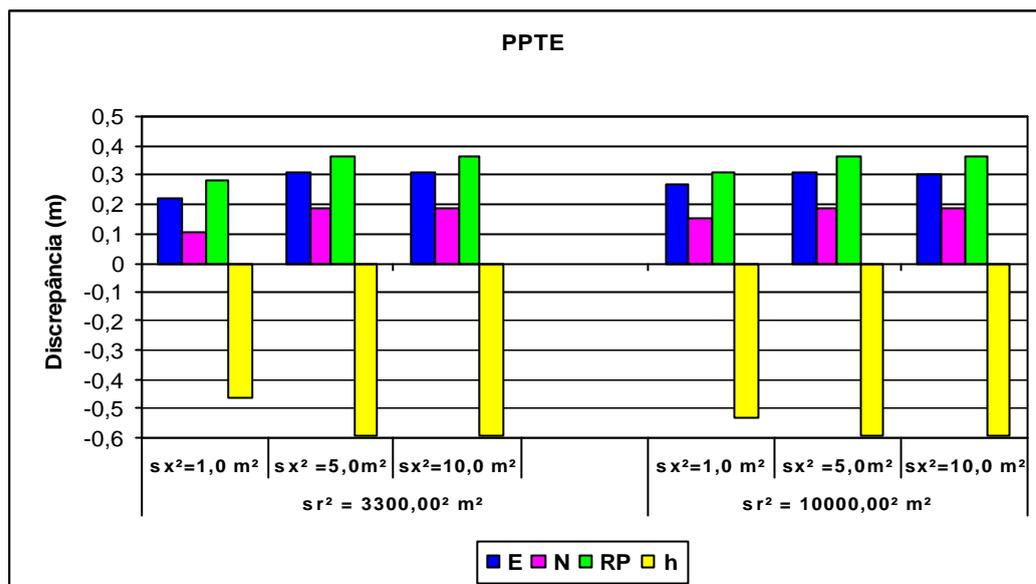


Figura 10 – Discrepância das Coordenadas PPTE no PPP estático

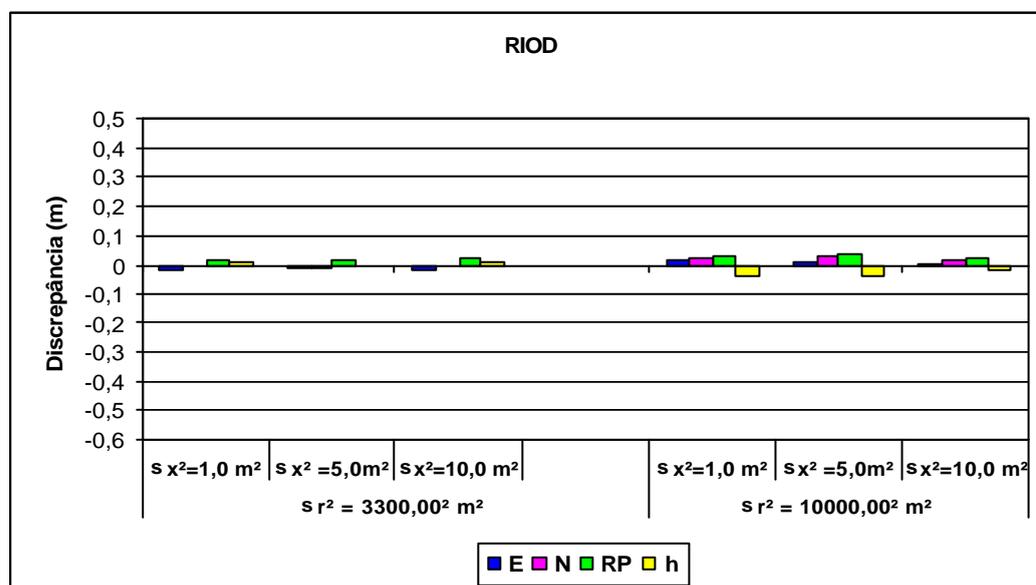


Figura 11 – Discrepância das Coordenadas RIOD no PPP estático

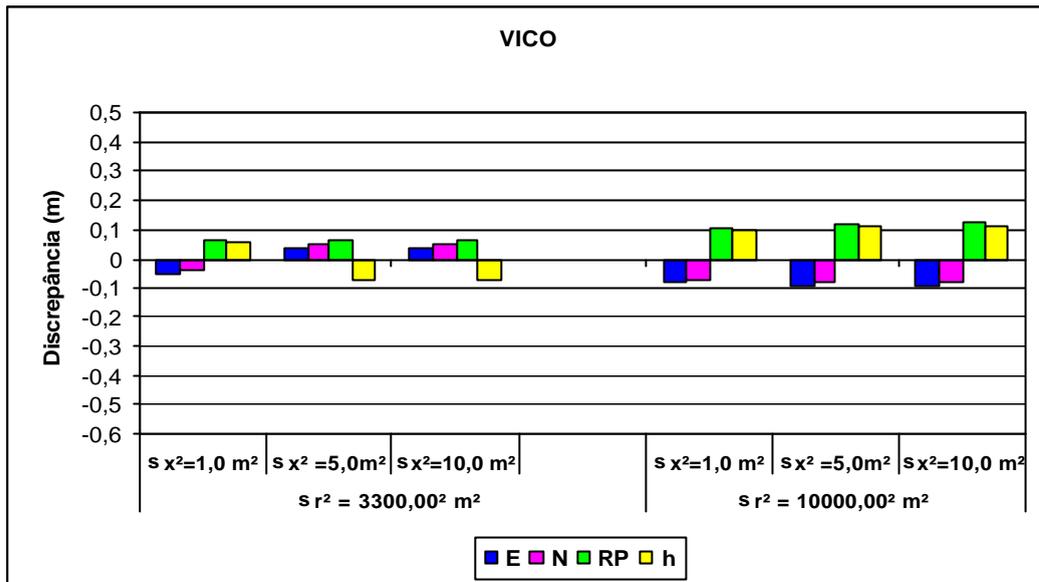


Figura 12 – Discrepância das Coordenadas VICO no PPP estático

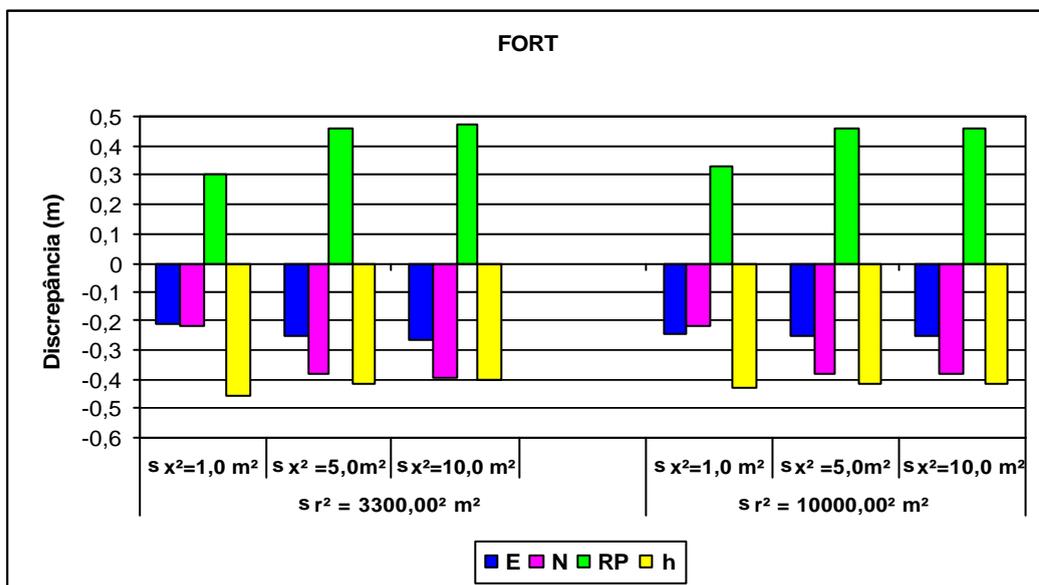


Figura 13 – Discrepância das Coordenadas FORT no PPP estático

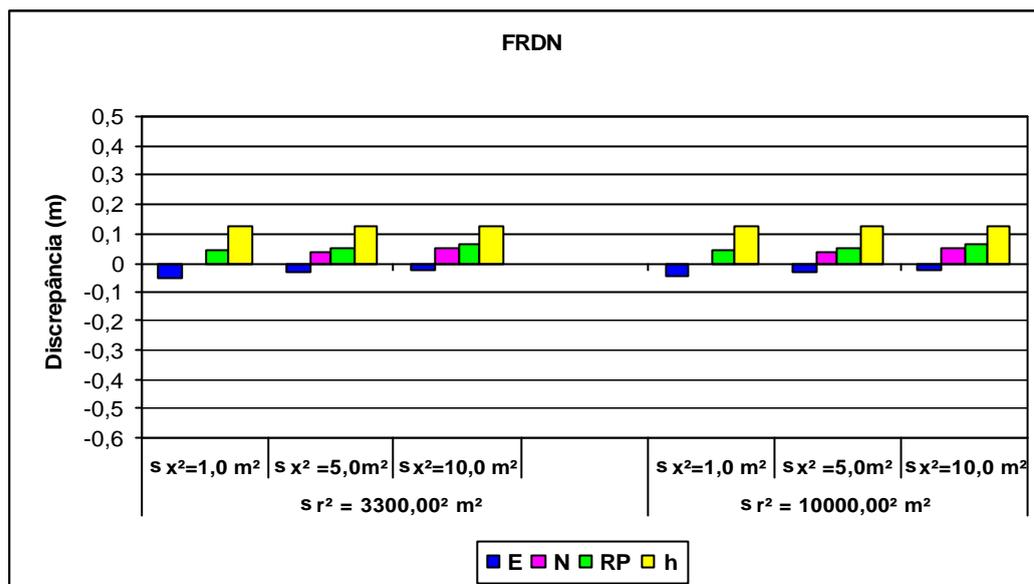


Figura 14 – Discrepância das Coordenadas FRDN no PPP estático

Verifica-se que as discrepâncias das coordenadas estimadas em relação às consideradas “verdadeiras” variam na ordem de décimetros para a maioria das configurações como podem ser verificados nas Tabelas 8 e 9.

Tabela 8 – Discrepância das coordenadas com $s_r^2 = (3.300,00)^2 \text{ m}^2$.

Estação	Variância das coordenadas (m ²)	Discrepância da RP (cm)	Desvio-padrão da RP (cm)	Discrepância da h (cm)	Desvio-padrão da h (cm)
PPTE	1,00	28,55	13,83	-46,61	20,14
	5,00	36,28	11,46	-59,17	16,75
	10,00	36,46	11,50	-59,39	16,79
RIOD	1,00	1,81	1,94	1,10	2,02
	5,00	1,82	5,57	-0,55	6,01
	10,00	2,23	6,17	1,15	6,45
VICO	1,00	6,26	2,15	5,57	2,10
	5,00	6,83	2,43	6,95	3,47
	10,00	6,85	2,45	6,83	3,48
FORT	1,00	30,57	7,77	-43,02	8,59
	5,00	45,68	10,28	-41,57	7,76
	10,00	45,69	10,28	-40,63	7,94
FRDN	1,00	4,75	3,85	12,57	0,28
	5,00	5,28	7,37	12,85	0,46
	10,00	6,31	9,32	12,95	0,56

Tabela 9 – Discrepância das coordenadas com $s_r^2 = (10.000,00)^2 \text{ m}^2$.

Estação	Variância das coordenadas (m^2)	Discrepância da RP (cm)	Desvio-padrão da RP (cm)	Discrepância da h (cm)	Desvio-padrão da h (cm)
PPTE	1,00	31,10	10,72	-53,52	15,90
	5,00	36,29	11,46	-59,17	16,75
	10,00	36,42	11,50	-59,39	16,79
RIOD	1,00	3,03	1,52	-3,39	1,87
	5,00	3,85	5,09	-3,44	5,62
	10,00	2,57	5,59	-1,84	5,98
VICO	1,00	10,72	1,43	9,87	1,42
	5,00	12,09	2,36	11,28	2,38
	10,00	12,39	2,38	11,58	2,40
FORT	1,00	33,02	7,58	-43,18	6,22
	5,00	45,69	10,28	-41,62	7,65
	10,00	45,71	10,28	-41,63	7,65
FRDN	1,00	4,75	3,85	12,57	0,28
	5,00	5,28	7,37	12,85	0,46
	10,00	6,31	9,32	12,95	0,56

De acordo com a Tabela 8 e 9 as discrepâncias da RP das coordenadas estimadas em relação às coordenadas consideradas “verdadeiras” foram da ordem de centímetros para todas as configurações, com exceção das estações FORT e PPTE que foram da ordem de decímetros. Com a variância das coordenadas igual a $1,0 \text{ m}^2$ e a variância do relógio igual a $3.300,00^2 \text{ m}^2$ os resultados foram melhores. A discrepância da RP para a estação FORT foi de $33,02 \text{ cm} \pm 7,58 \text{ cm}$ e para a estação PPTE de $31,10 \text{ cm} \pm 10,72 \text{ cm}$. A estação RIOD foi a qual apresentou um melhor resultado, sendo a discrepância da RP de $1,81 \text{ cm}$ com desvio-padrão $1,94 \text{ cm}$.

A discrepância altimétrica em todas as configurações foi da ordem de decímetros para as estações PPTE, FORT e FRDN e quando se utiliza a variância da coordenada igual a $5,00 \text{ m}^2$ ou igual a $10,00 \text{ m}^2$, junto com a variância do relógio do receptor de $(10.000,00)^2 \text{ m}^2$, a discrepância altimétrica da estação VICO também fica na ordem de decímetros. Já a estação RIOD a discrepância altimétrica é na ordem de centímetros em todas as configurações. Com a variância das coordenadas igual a $1,0 \text{ m}^2$ e a variância do relógio igual a $3.300,00^2 \text{ m}^2$ os resultados foram melhores, tendo uma menor discrepância em todas as estações, como pode ser verificado nas Tabelas 9 e 10.

Quando a variância do relógio é igual a $10.000,00^2 \text{ m}^2$, os valores das discrepâncias aumentam. Assim, há influência da variância do relógio no cálculo das

coordenadas. A estação FORT foi a que teve um menor aumento com a mudança da variância do relógio, 2,5 cm para a discrepância da RP e 0,10 cm para a discrepância com relação a altitude, somente quando a variância das coordenadas foi de 1,0 m²; já para os outros testes (5,0 m² e 10,0 m²) esta estação apresentou praticamente o mesmo resultado, já para a estação FRDN não houve mudanças, isso se deve ao fato destas estações possuírem um receptor com relógio atômico e assim ter uma maior estabilidade. Entretanto para as estações RIOD e VICO os valores da discrepância aumentaram em todas as configurações dos experimentos. Com relação à altimetria, verifica-se que esta é a que apresenta uma maior discrepância em todos os processamentos e configurações, degradando, assim, o resultado final no PPP, principalmente nas estações FORT e PPTE.

Em relação aos resíduos obtidos, a Tabela 10 sumariza, respectivamente, o erro médio dos resíduos para a pseudodistância e para a fase de batimento da onda portadora, para cada estação.

Tabela 10 – Erro médio dos resíduos no PPP estático.

Estação	Erro médio dos Resíduos	
	Pseudodistância (m)	Fase da onda portadora (m)
PPTE	1,271	$4,35 \cdot 10^{-4}$
RIOD	5,823	$1,97 \cdot 10^{-3}$
VICO	7,952	$5,27 \cdot 10^{-4}$
FORT	1,291	$1,98 \cdot 10^{-4}$
FRDN	0,611	$2,96 \cdot 10^{-3}$

Apesar da estação RIOD apresentar a menor discrepância, os seus resíduos são maiores do que as demais estações, como se pode observar na Tabela 10. Isso deve ocorrer devido à influência das cargas oceânicas que não foram modeladas neste trabalho. Já a estação FRDN foi a que apresentou um menor resíduo tanto na pseudodistância quanto na fase da onda portadora.

Para cada processamento, houve uma grande variação no comportamento do relógio do receptor. As Tabelas 11 e 12 apresentam a variação do relógio do receptor no PPP estático para as estações utilizadas no experimento.

Tabela 11 – Variação média do relógio do receptor no PPP estático com $s_r^2 = (3.300,00)^2$ m².

Estação	Variância das coordenadas (m ²)	Variação média (m)	Desvio-Padrão (m)
PPTE	1,00	-0,021	0,321
	5,00	-0,020	0,317
	10,00	-0,020	0,317
RIOD	1,00	2.786,995	8,368
	5,00	2.786,995	8,367
	10,00	2.786,995	8,367
VICO	1,00	6.413,507	10,445
	5,00	6.413,507	10,445
	10,00	6.413,507	10,445
FORT	1,00	0,049	0,258
	5,00	0,046	0,258
	10,00	0,046	0,258
FRDN	1,00	-0,193	0,052
	5,00	-0,193	0,051
	10,00	-0,193	0,051

Tabela 12 – Variação média do relógio do receptor no PPP estático com $s_r^2 = (10.000,00)^2$ m².

Estação	Variância das coordenadas (m ²)	Variação média (m)	Desvio-Padrão (m)
PPTE	1,00	-0,020	0,317
	5,00	-0,020	0,317
	10,00	-0,020	0,317
RIOD	1,00	2.786,995	8,368
	5,00	2.786,995	8,367
	10,00	2.786,995	8,366
VICO	1,00	6.413,507	10,445
	5,00	6.413,507	10,445
	10,00	6.413,507	10,445
FORT	1,00	0,050	0,258
	5,00	0,046	0,258
	10,00	0,046	0,258
FRDN	1,00	-0,193	0,052
	5,00	-0,193	0,051
	10,00	-0,193	0,051

Na estação FORT e na estação FRDN há pouca variação do relógio do receptor, ficando em $4,90 \text{ cm} \pm 25,79 \text{ cm}$ e $-19,30 \text{ cm} \pm 5,2 \text{ cm}$, respectivamente. Isso se deve ao fato destas estações possuírem um receptor com relógio atômico. Todavia, a estação PPTE também apresenta pouca variação no comportamento do relógio, sendo a variação média de 2,1 cm com desvio-padrão de 32,1 cm. Vale a pena ressaltar que esta estação não possui um

relógio atômico, sendo o seu receptor o TRIMBLE NetRS, o qual possui uma nova tecnologia. Nas outras estações, as quais possuem receptor TRIMBLE 4000SSI, há uma grande variação no comportamento do relógio do receptor. Em todas as configurações, modificando o valor inicial da variância das coordenadas, a variação no comportamento do relógio do receptor se manteve.

A parte residual dos efeitos da refração troposférica foi estimada mediante a introdução de um fator de escala (a_{r^s}) como incógnita na equação de observação, conforme apresentado na seção 3.2. Os efeitos da troposfera foram reduzidos a partir do modelo de Hopfield e estimou-se um fator de escala, como ilustram as Figuras 15, 16, 17, 18 e 19.

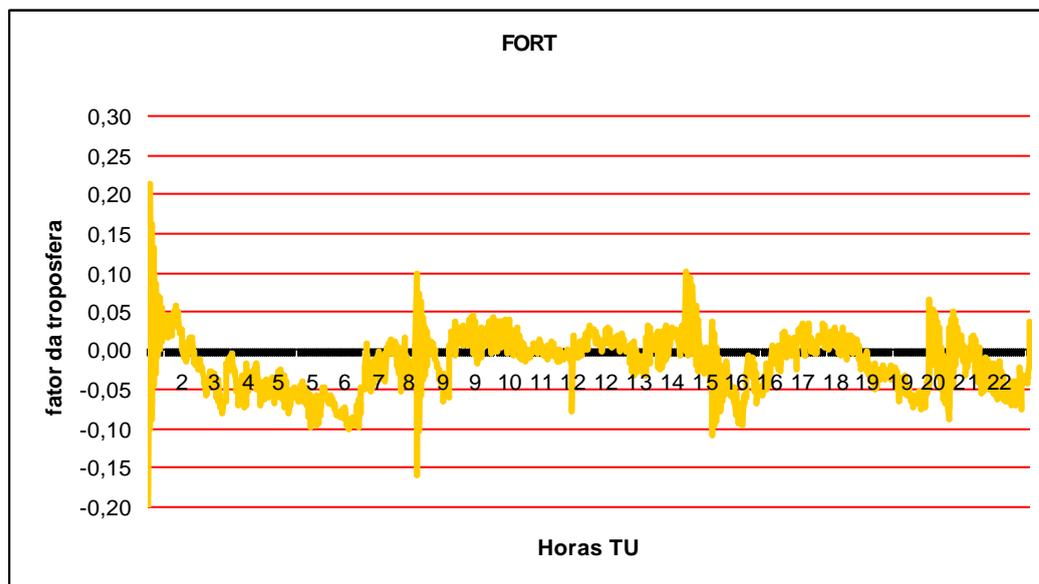


Figura 15 – Fator de escala estimado para a troposfera na estação FORT com $S_r^2 = (3.300,00)^2 \text{ m}^2$ e

$$S_{X_INICIAL} = 1,00 \text{ m}^2 \text{ no PPP estático}$$

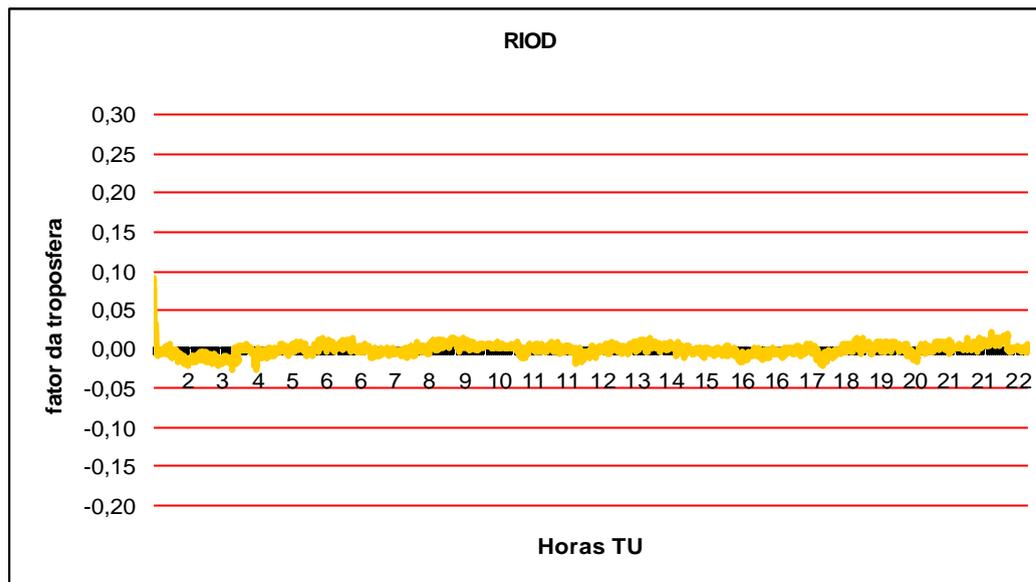


Figura 16 – Fator de escala estimado para a troposfera na estação RIOD com $S_r^2 = (3.300,00)^2 \text{ m}^2$ e

$$S_{X_INICIAL} = 1,00 \text{ m}^2 \text{ no PPP estático}$$

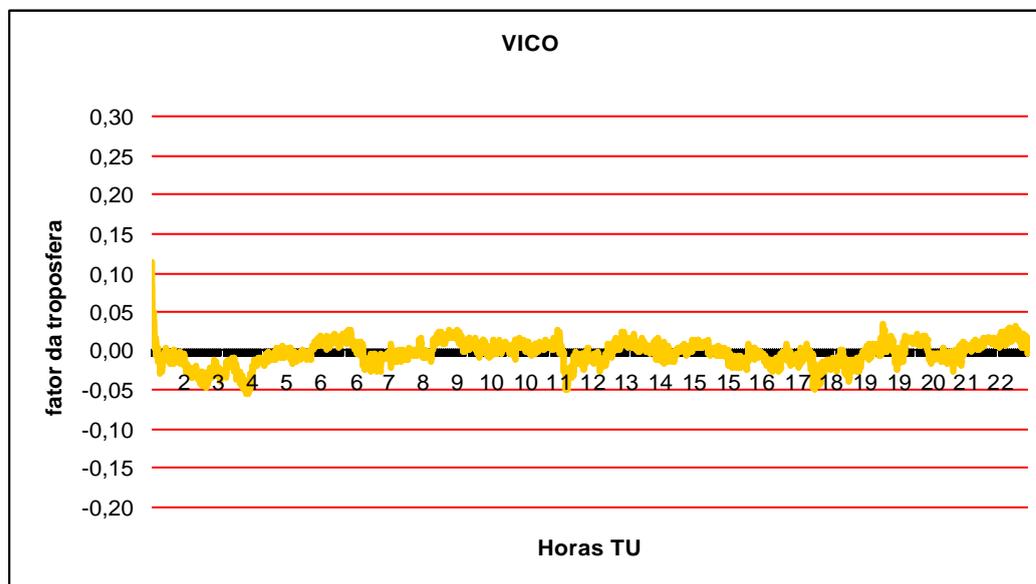


Figura 17 – Fator de escala estimado para a troposfera na estação VICO com $S_r^2 = (3.300,00)^2 \text{ m}^2$ e

$$S_{X_INICIAL} = 1,00 \text{ m}^2 \text{ no PPP estático}$$

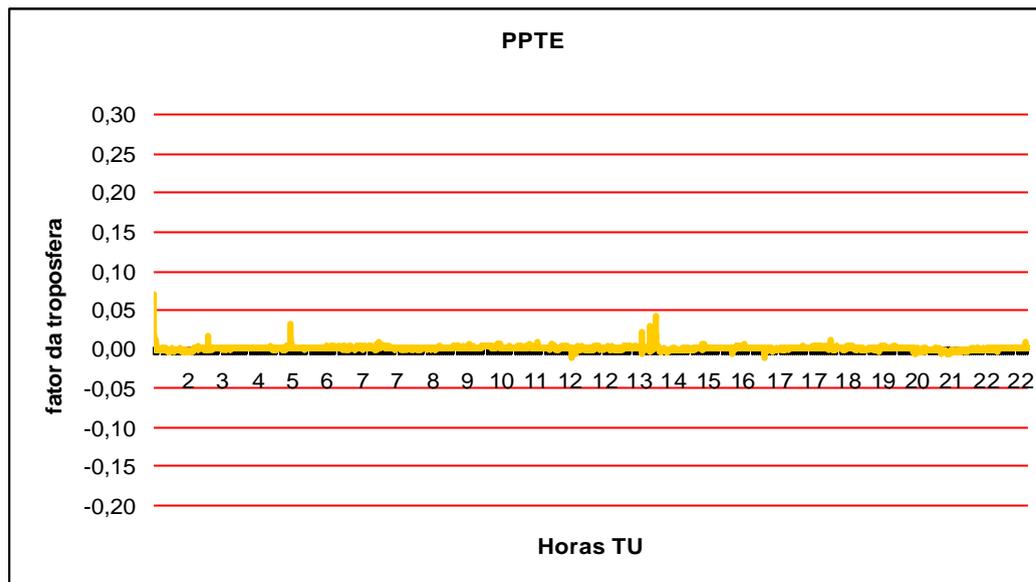


Figura 18 – Fator de escala estimado para a troposfera na estação PPTE com $S_r^2 = (3.300,00)^2 \text{ m}^2$ e

$$S_{X_INICIAL} = 1,00 \text{ m}^2 \text{ no PPP estático}$$

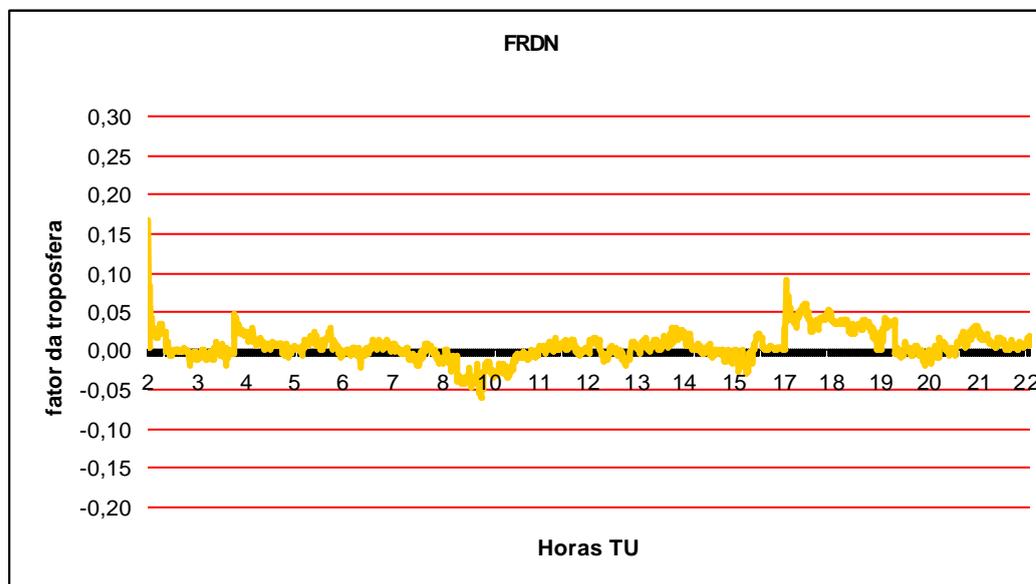


Figura 19 – Fator de escala estimado para a troposfera na estação FRDN com $S_r^2 = (3.300,00)^2 \text{ m}^2$ e

$$S_{X_INICIAL} = 1,00 \text{ m}^2 \text{ no PPP estático}$$

Tabela 13 – Fator de escala da troposfera no PPP estático.

Estação	Média do $a_{T_r^s}$	Desvio-padrão de $a_{T_r^s}$
PPTE	$-1,2 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$
RIOD	$-1,0 \cdot 10^{-3}$	$7,0 \cdot 10^{-3}$
VICO	$-3,0 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$
FORT	$-1,7 \cdot 10^{-2}$	$3,7 \cdot 10^{-2}$
FRDN	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$

Observando as Figuras 15, 16, 17, 18 e 19 verifica-se a ocorrência de alguns saltos nos valores estimados. Quando há esses saltos ocorre também perda de ciclo. A estação PPTE é a qual o fator de escala converge rapidamente, apesar de também apresentar alguns saltos. Independente da configuração adotada, todas as estações utilizadas no experimento possuem o mesmo comportamento. Verifica-se também que a estação FORT é a que apresenta o maior fator de escala (Tabela 13) e a maior discrepância entre as coordenadas, junto com a estação PPTE. Como há ocorrência de saltos nos valores estimados da troposfera pode-se dizer que possivelmente as perdas de ciclo não foram corrigidas nestes locais pelo processo implementado ou que alguns problemas no PPP ainda estão presentes. Os valores do fator de escala devem ser algo em torno de $x \cdot 10^{-3}$, com x menor que 10, pois está estimando esse fator. Assim, o fator de escala de todas as estações está dentro do esperado, com exceção da estação RIOD, o qual foi um pouco maior. O fato de o desvio-padrão ser maior que o valor da média é devido aos saltos que ocorrem durante o processamento.

Neste trabalho, as ambigüidades são tratadas como real, sem tentativa de solução como inteira. Com a finalidade de ilustrar a convergência das ambigüidades, a Figura 20 mostra o comportamento das ambigüidades, para alguns satélites, no PPP no modo estático para a estação VICO e a Figura 21 mostra o desvio-padrão para a mesma estação no início do processamento.

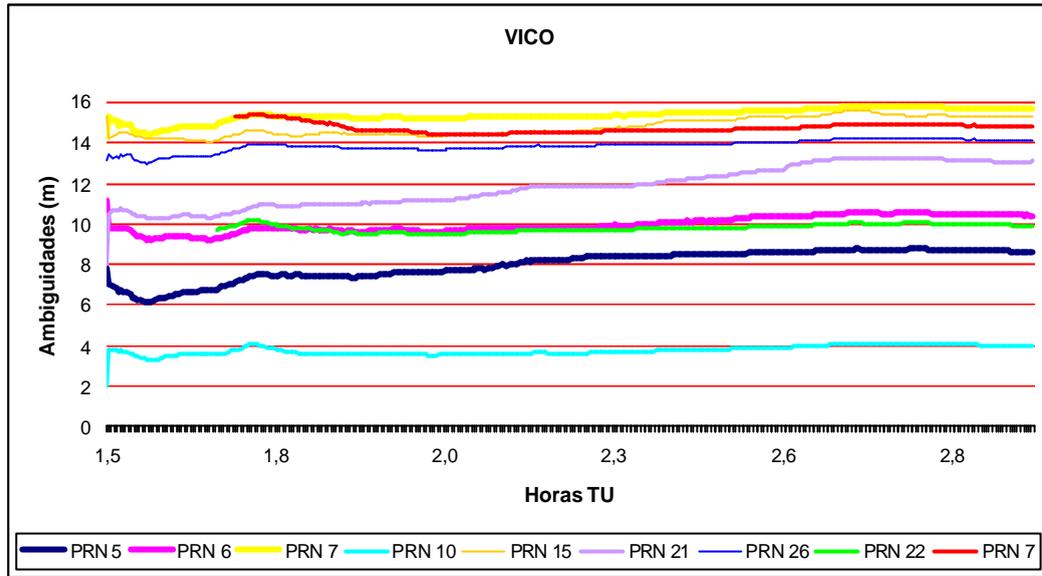


Figura 20 – Ambigüidades da estação VICO com $S_r^2 = 3.300,00 \text{ m}^2$ e $S_{X_INICIAL} = 1,00 \text{ m}$ no PPP estático

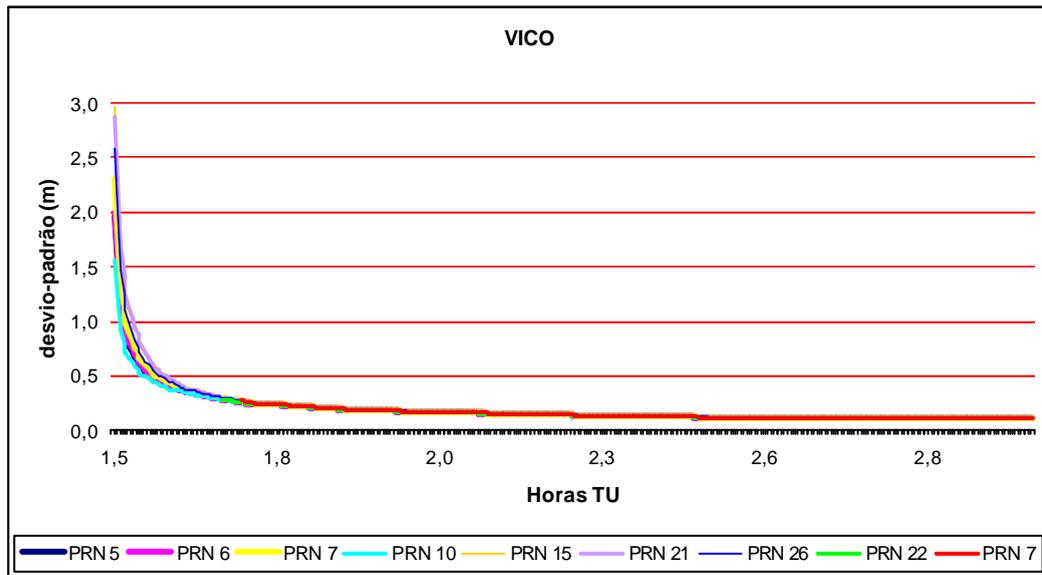


Figura 21 – Desvio-padrão para as ambigüidades da estação VICO com $S_r^2 = 3.300,00 \text{ m}^2$ e $S_{X_INICIAL} = 1,00 \text{ m}^2$ no PPP estático

Vale a pena ressaltar que em todas as estações as ambigüidades convergiram após aproximadamente 30 min de dados. O desvio-padrão da ambigüidade se estabiliza em um número constante, o que está de acordo com a literatura, segundo Witchayangkoon (2000) e Kouba e Héroux (2000).

4.1.3 Resultados do PPP estático simulando o posicionamento cinemático

O segundo experimento realiza o PPP estático simulando o posicionamento cinemático para as cinco estações utilizadas no experimento anterior. Através dos dados dos receptores estacionários o posicionamento cinemático é simulado configurando a variância das coordenadas na MVC de Σ_{w_k} em $1,00 \text{ m}^2$ a cada época, sendo sua correlação nula. Neste experimento também foi utilizada a combinação linear *ion-free* para a pseudodistância e fase de batimento da onda portadora e o fator de escala da troposfera foi estimado através do modelo de Hopfield.

De acordo com os resultados obtidos anteriormente, neste experimento o processamento foi realizado com a seguinte configuração:

$$s_{X_INICIAL}^2 = 1,00 \text{ m}^2 - \text{coordenadas (X, Y, Z)};$$

$$s_r^2 = 3.300,00^2 \text{ m}^2 - \text{relógio do receptor};$$

$$s_{w_{k,k}}^2 = 1,00 \text{ m}^2 - \text{variância do ruído das coordenadas, com } k = 1, 2, 3.$$

As Figuras 22, 23, 24, 25 e 26 mostram o comportamento das discrepâncias planimétricas e altimétricas, bem como a resultante para as estações PPTE, RIOD, VICO, FORT e FRDN.

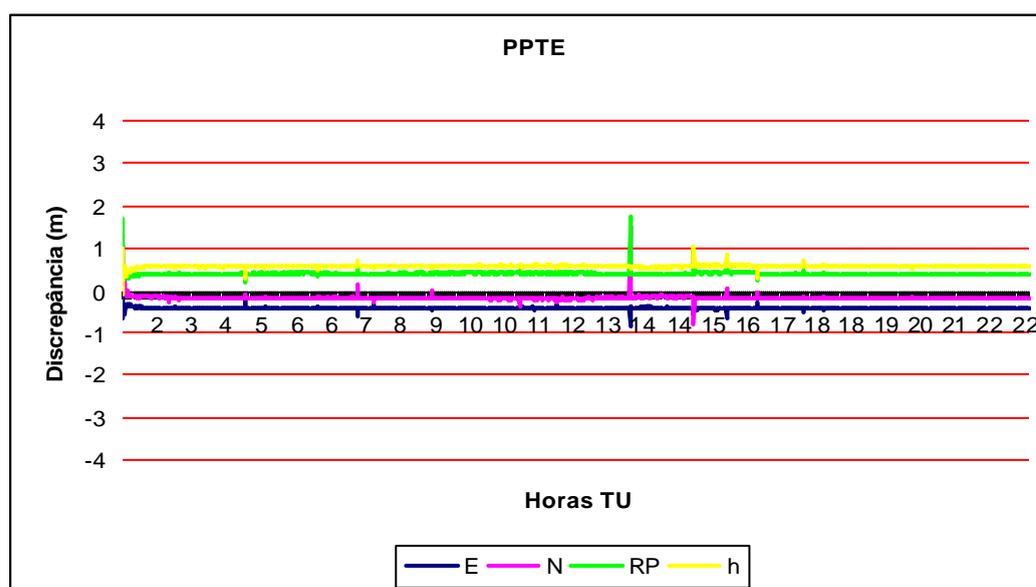


Figura 22 – Discrepância das coordenadas simulando o PPP cinemático

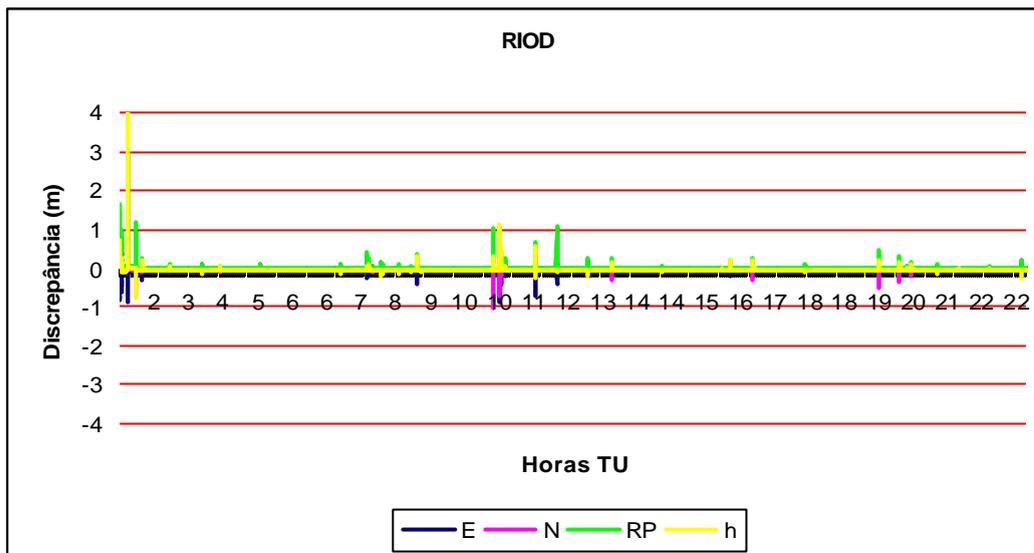


Figura 23 – Discrepância das Coordenadas RIOD simulando o PPP cinemático

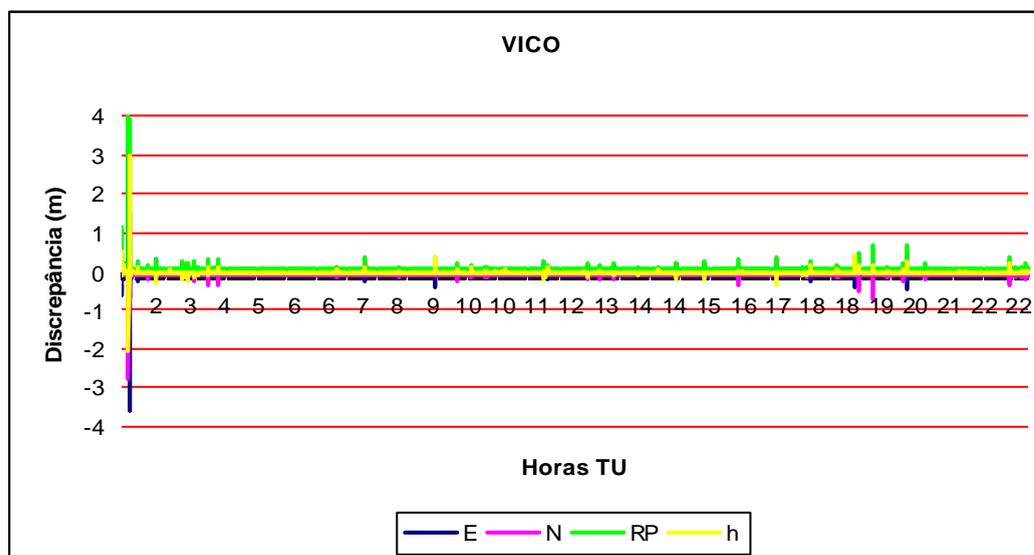


Figura 24 – Discrepância das Coordenadas VICO simulando o PPP cinemático

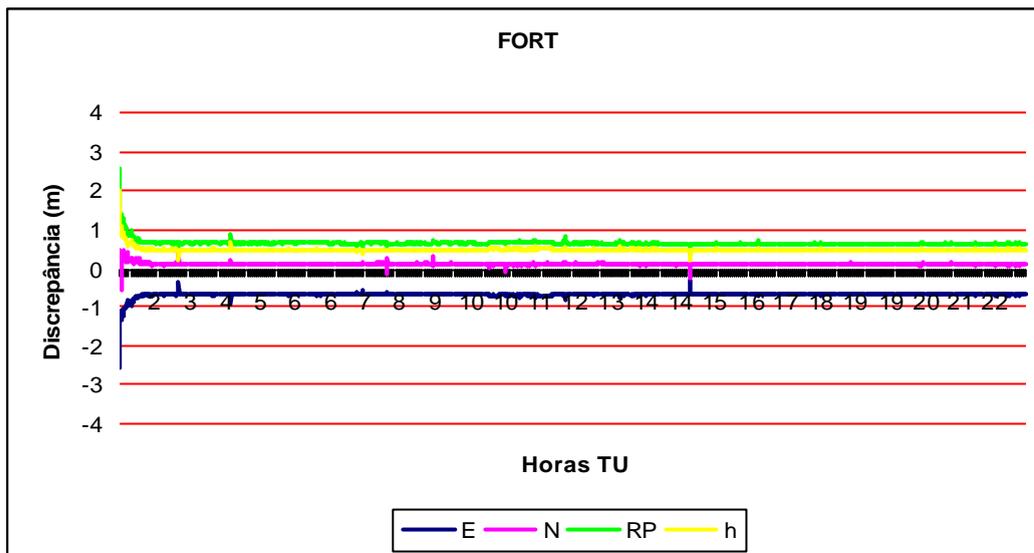


Figura 25 – Discrepância das Coordenadas FORT simulando o PPP cinemático

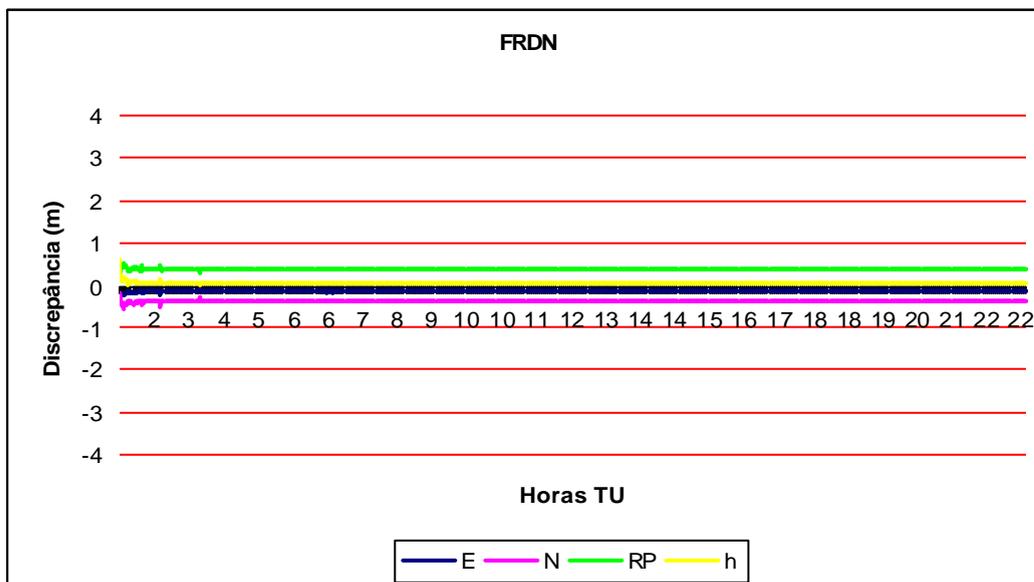


Figura 26 – Discrepância das Coordenadas FRDN simulando o PPP cinemático

Tabela 14 – Discrepância das coordenadas do PPP simulando o posicionamento cinemático.

Estação	Discrepância da RP (cm)	Desvio-padrão da RP (cm)	Discrepância da h (cm)	Desvio-padrão da h (cm)
PPTE	41,84	3,57	57,82	2,50
RIOD	0,90	7,29	0,57	7,57
VICO	8,24	8,76	0,67	5,65
FORT	67,02	7,30	50,43	5,56
FRDN	39,55	1,01	7,27	1,65

Verifica-se que as discrepâncias das coordenadas estimadas em relação às consideradas “verdadeiras”, no PPP simulando o posicionamento cinemático também variam na ordem de decímetros para cada estação, com exceção da estação RIOD e VICO, conforme a Tabela 14. A estação PPTE apresentou discrepância na RP de 41,84 cm \pm 3,57 cm e discrepância altimétrica de 57,82 cm \pm 2,50 cm. A estação RIOD apresentou discrepância na RP de 0,90 cm \pm 7,29 cm e discrepância em h de 0,57 cm \pm 7,57 cm; na estação VICO a discrepância na RP foi de 8,24 cm \pm 8,76 cm e a discrepância altimétrica foi de 0,67cm \pm 5,65 cm; na estação FORT a discrepância na RP foi de 67,02 cm \pm 7,30 cm e a discrepância altimétrica foi de 50,43 cm \pm 5,56 cm; e na estação FRDN a discrepância na RP foi de 39,55 cm \pm 1,01 cm e em h foi de 7,27 cm \pm 1,65 cm. Pode-se observar que tanto na estação PPTE quanto na estação FORT a discrepância com relação a altitude foi a que apresentou um alto valor.

A Tabela 15 apresenta o erro médio dos resíduos no PPP simulando o cinemático.

Tabela 15 – Erro médio dos resíduos no PPP estático simulando o modo cinemático.

Estação	Erro médio dos Resíduos	
	Pseudodistância (m)	Fase da onda portadora (m)
PPTE	2,371	$1,74 \cdot 10^{-4}$
RIOD	4,943	$1,02 \cdot 10^{-3}$
VICO	8,174	$7,26 \cdot 10^{-4}$
FORT	2,251	$1,88 \cdot 10^{-4}$
FRDN	0,486	$7,01 \cdot 10^{-3}$

Como ocorreu no experimento anterior, a estação RIOD foi a que apresentou os maiores resíduos comparando com as demais estações, nas duas observáveis. Neste segundo experimento, a estação FRDN foi a que apresentou um menor resíduo nas duas observáveis.

Com relação ao comportamento do relógio do receptor no PPP simulando modo cinemático, ocorreu grande variação no comportamento do relógio em todas as estações, como ilustram as Figuras 27, 28, 29, 30 e 31.

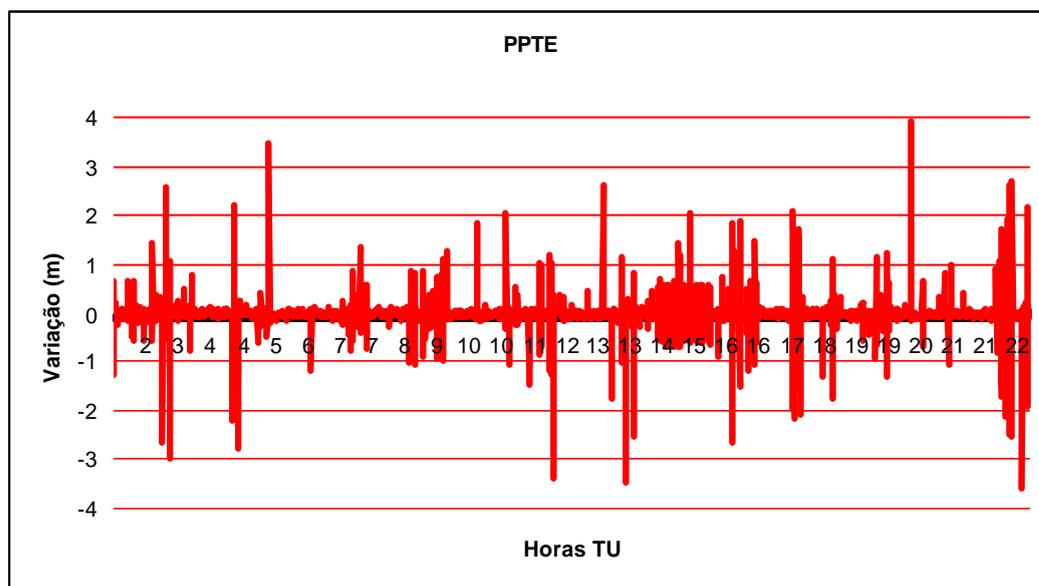


Figura 27 – Variação no comportamento do relógio do receptor para a estação PPTE no PPP simulando o posicionamento cinemático

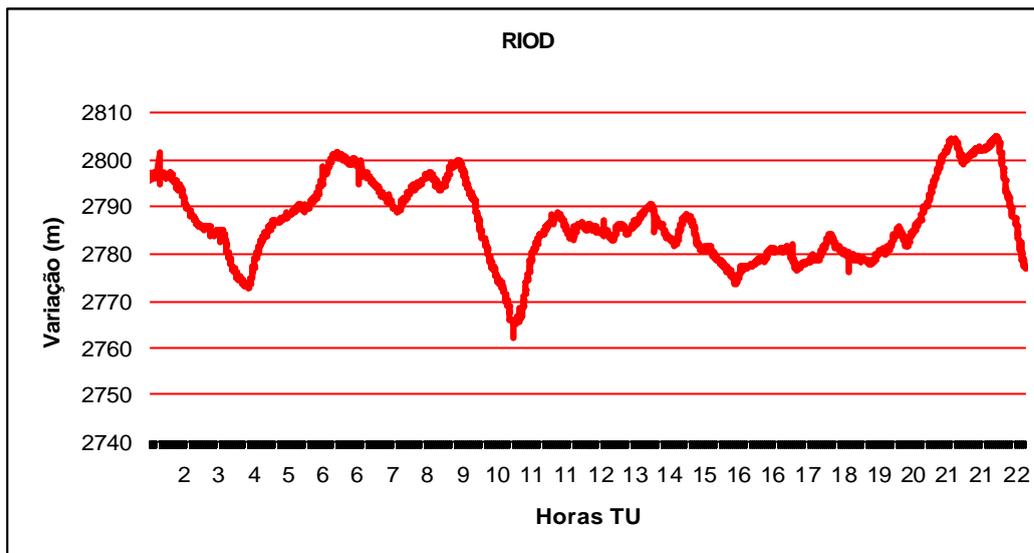


Figura 28 – Variação no comportamento do relógio do receptor para a estação RIOD no PPP simulando o posicionamento cinemático

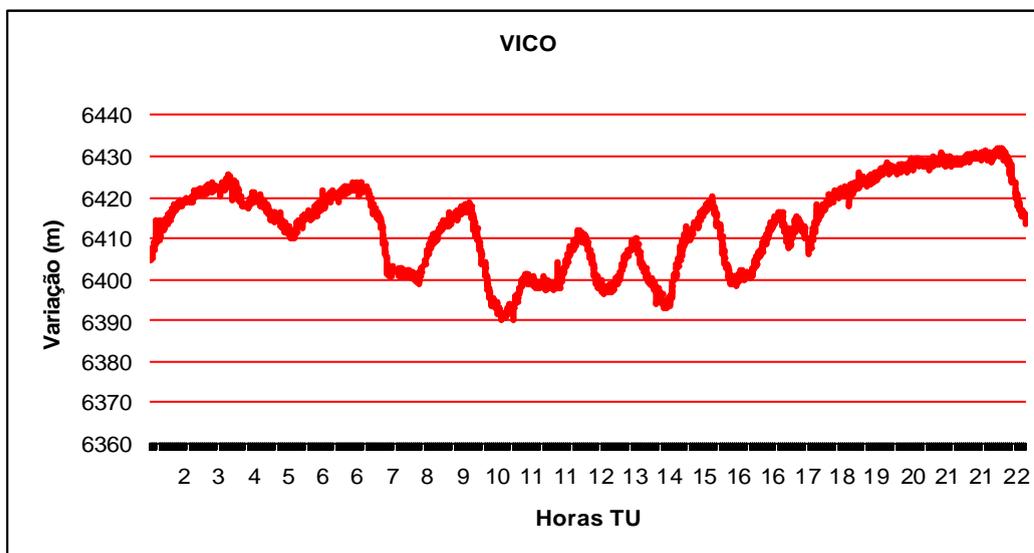


Figura 29 – Variação no comportamento do relógio do receptor para a estação VICO no PPP simulando o posicionamento cinemático

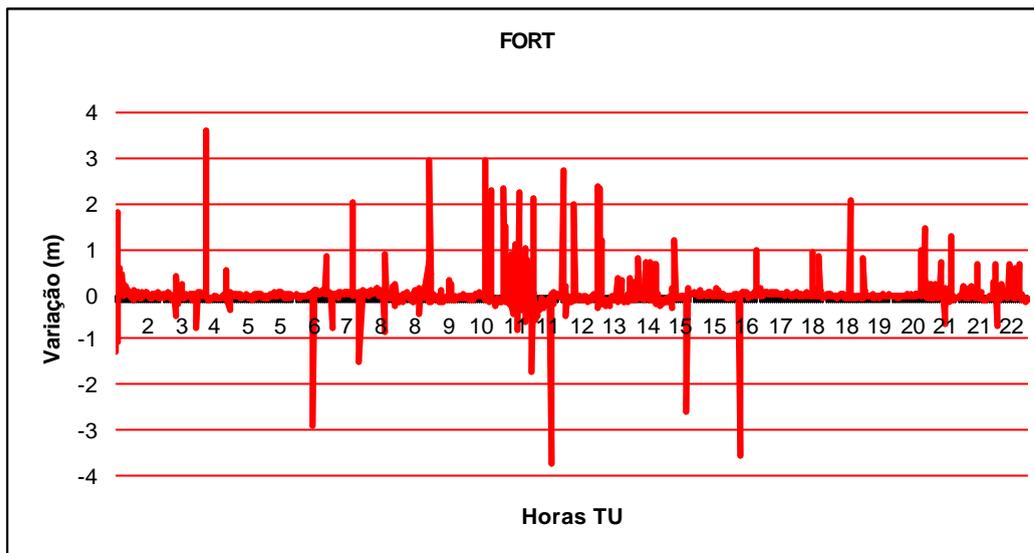


Figura 30 – Variação no comportamento do relógio do receptor para a estação FORT no PPP simulando o posicionamento cinemático

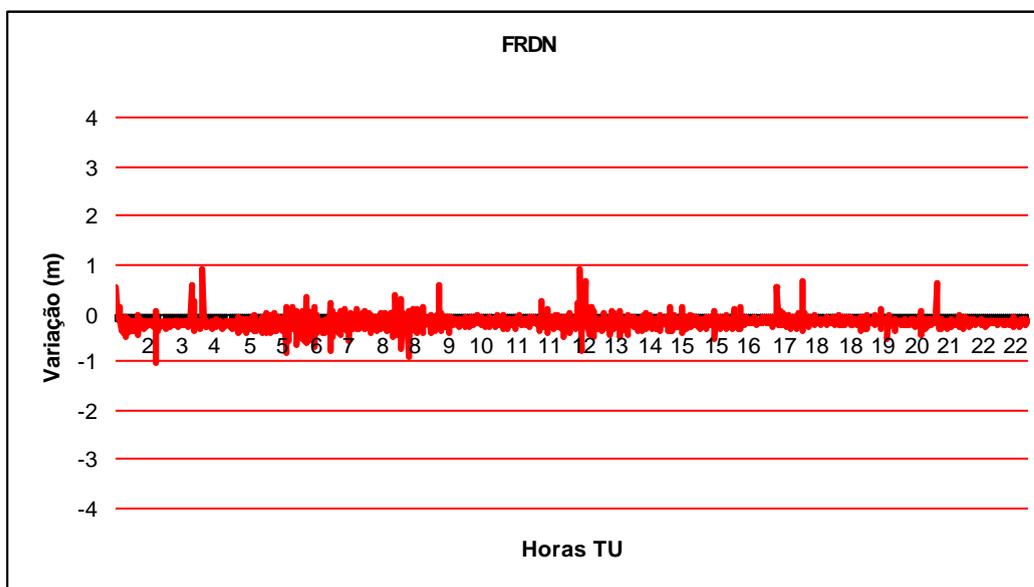


Figura 31 – Variação no comportamento do relógio do receptor para a estação no PPP simulando o posicionamento cinemático

A variação média no comportamento do relógio do receptor foi bem parecida com o PPP no modo estático, divergindo com relação ao desvio-padrão que foi maior. A variação média do comportamento do relógio do receptor para a estação FRDN foi de 0,193 m com desvio-padrão de 0,136 m. Já para as estações da RBMC a variação foi de $2.786,995 \pm 8,37$ m na estação RIOD; de $6.413,509 \pm 10,45$ m na estação VICO; $0,085 \pm 0,36$ m para a estação FORT; e $0,208 \pm 0,318$ m para a estação PPTE. Os saltos presentes nos gráficos, na maioria dos casos, acontecem quando ocorrem perdas de ciclo ou quando há somente 4 satélites no arquivo, o mesmo que ocorre com o fator de escala da troposfera.

As Figuras 32, 33, 34, 35 e 36 mostram o comportamento do fator de escala da troposfera estimado para as estações PPTE, RIOD, VICO, FORT e FRDN no PPP simulando o cinemático.

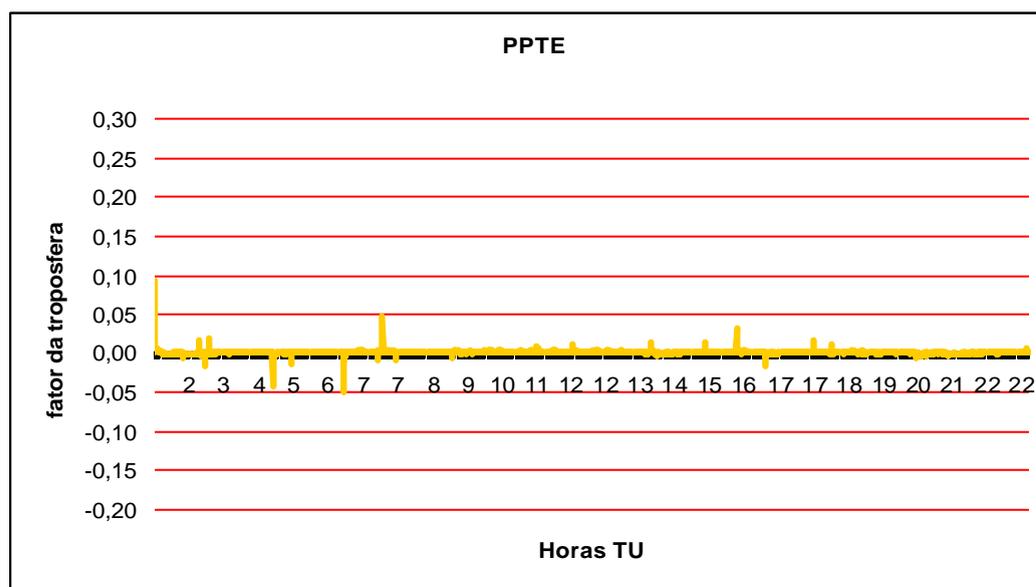


Figura 32 – Fator de escala estimado para a troposfera na estação PPTE no PPP simulando o cinemático

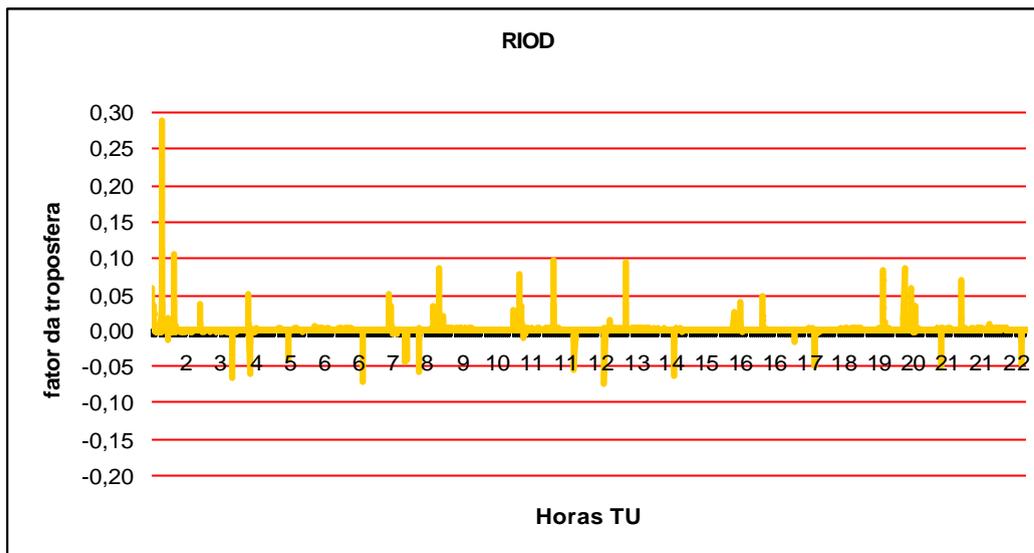


Figura 33 – Fator de escala estimado para a troposfera na estação RIOD no PPP simulando o cinemático

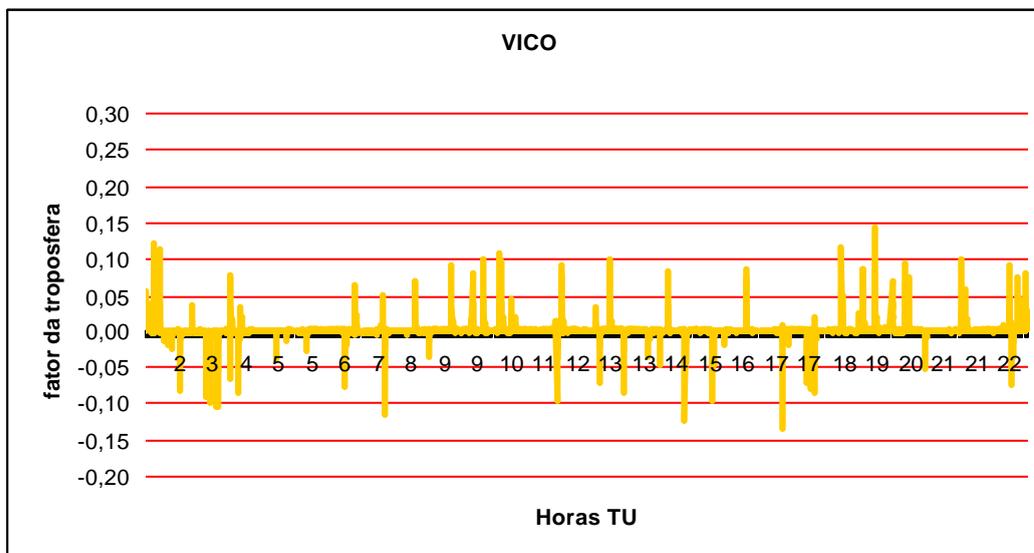


Figura 34 – Fator de escala estimado para a troposfera na estação VICO no PPP simulando o cinemático

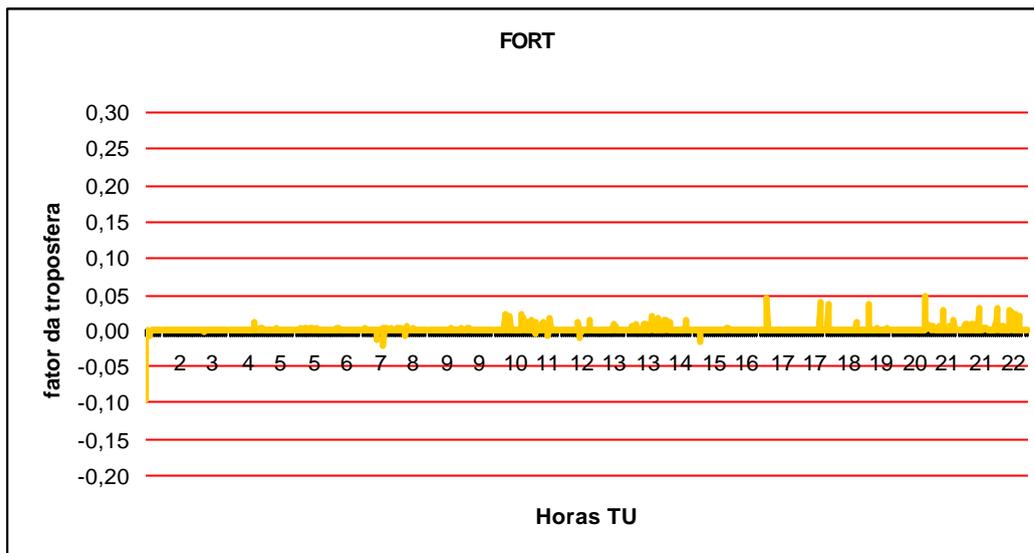


Figura 35 – Fator de escala estimado para a troposfera na estação FORT no PPP simulando o cinemático

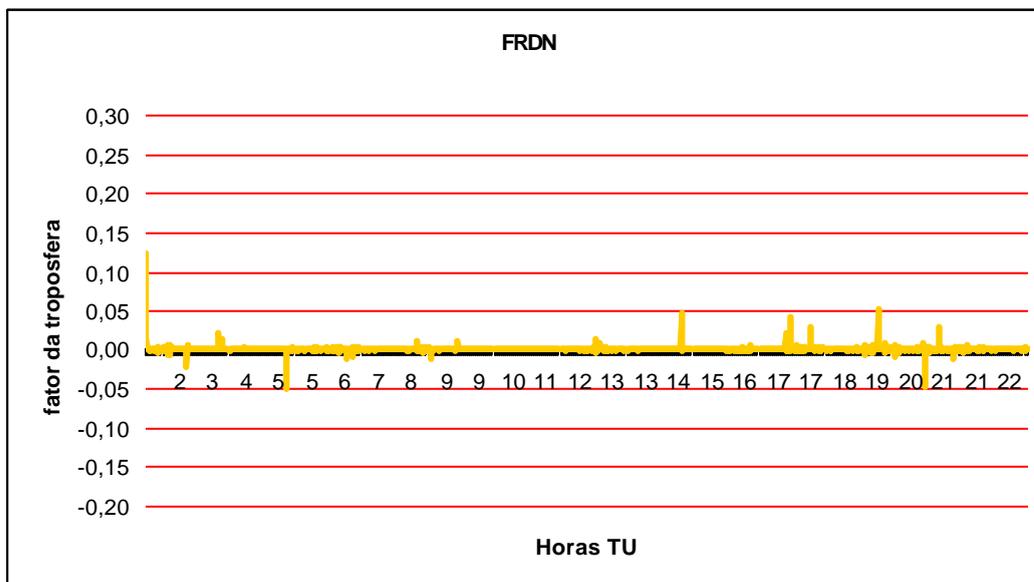


Figura 36 – Fator de escala estimado para a troposfera na estação FRDN no PPP simulando o cinemático

Tabela 16 – Fator de escala da troposfera no PPP estático.

Estação	Média do $a_{T_r^s}$	Desvio-padrão de $a_{T_r^s}$
PPTE	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$
RIOD	$2,78 \cdot 10^{-4}$	$7,59 \cdot 10^{-3}$
VICO	$1,74 \cdot 10^{-4}$	$1,13 \cdot 10^{-2}$
FORT	$6,48 \cdot 10^{-4}$	$4,71 \cdot 10^{-3}$
FRDN	$2,05 \cdot 10^{-4}$	$4,34 \cdot 10^{-3}$

Observa-se na Tabela 16 e nas Figuras 32, 33, 34, 35 e 36, que o comportamento do fator de escala estimado apresenta um maior número de saltos com relação ao PPP no modo estático, apesar de sua média final ser menor. Na estação FRDN, a média do fator de escala foi de $2,05 \cdot 10^{-4}$ e desvio-padrão de $4,34 \cdot 10^{-3}$; na estação VICO foi de $1,74 \cdot 10^{-4} \pm 1,13 \cdot 10^{-2}$; na estação RIOD foi de $2,78 \cdot 10^{-4} \pm 7,59 \cdot 10^{-3}$. Para a estação PPTE a média do fator de escala foi de $1,63 \cdot 10^{-4} \pm 2,64 \cdot 10^{-3}$ e para a estação FORT a média foi de $6,48 \cdot 10^{-4} \pm 4,71 \cdot 10^{-3}$. Há uma alta correlação do fator de escala da troposfera com o comportamento do relógio do receptor. Isso pode ser verificado na presença dos saltos que ocorrem nestas duas componentes na mesma época.

Para ilustrar a convergência das ambigüidades, a Figura 37 mostra o comportamento das ambigüidades, para alguns satélites, no PPP estático simulando o cinemático para a estação VICO e a Figura 38 mostra o desvio-padrão para a mesma estação no início do processamento.

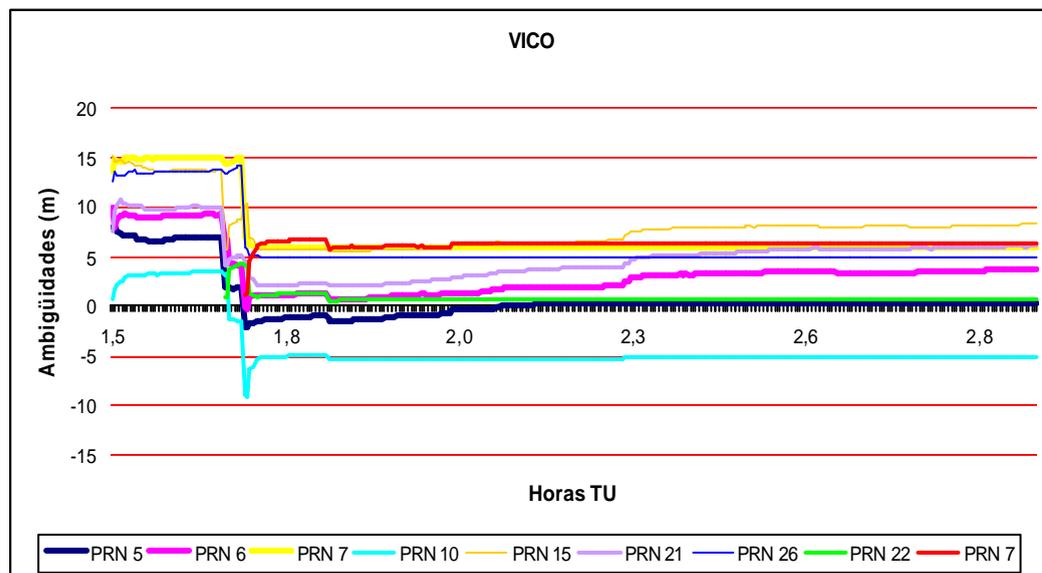


Figura 37 – Ambigüidades da estação VICO no PPP estático simulando o cinemático

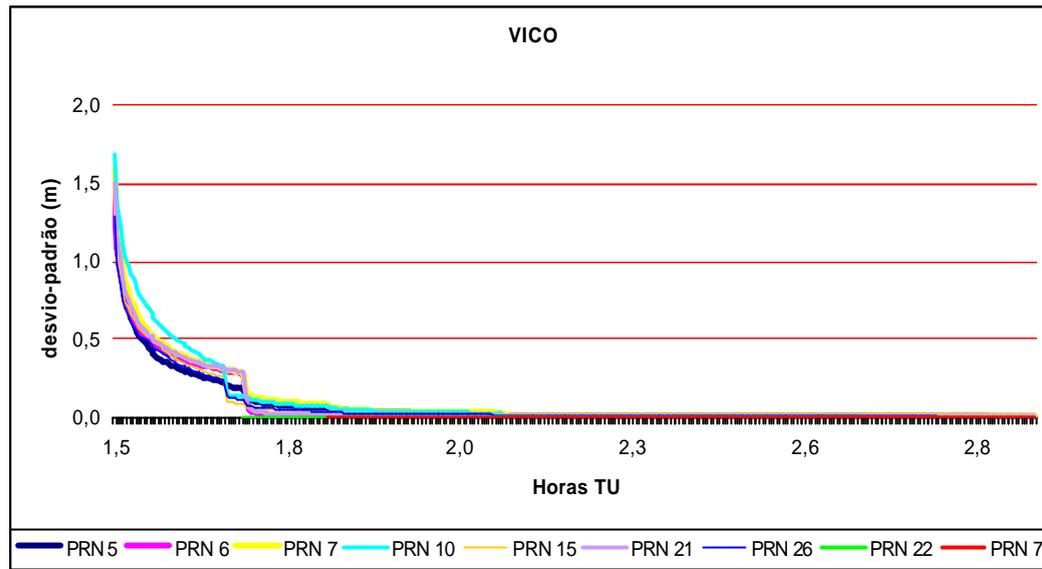


Figura 38 – Desvio-padrão para as ambigüidades da estação VICO no PPP estático simulando o cinemático

Como no PPP estático, após aproximadamente 30 min de dados, as ambigüidades convergiram e o desvio-padrão de cada uma delas se estabilizou. De acordo com o trabalho de Witchayangkoon (2000), a convergência ocorre após 11 minutos.

4.1.4 Resultados do PPP cinemático – Posicionamento do satélite CHAMP

O terceiro experimento realiza o PPP no modo cinemático utilizando dados do satélite CHAMP (Figura 39). O satélite CHAMP é um satélite alemão de baixa órbita que foi lançado em 15 de julho de 2000 e é de responsabilidade científica do GFZ (*GeoForschungsZentrum Potsdam*). O CHAMP tem uma missão geo-científica para a determinação dos campos globais de gravidade e magnético da Terra, bem como determinar parâmetros importantes da atmosfera terrestre (troposfera e ionosfera), como por exemplo, o vapor d'água e o conteúdo total de elétrons (GFZ, 2004).



Figura 39 – Satélite CHAMP
Fonte: CHAMP-ISDC (2005)

A estimativa do tempo de vida da Missão CHAMP é de aproximadamente cinco anos (REIGBER et al., 2000). Esta estimativa se dá em função do decréscimo da altitude da órbita (454 km), a qual é considerada baixa, devido ao atrito da atmosfera, do fluxo solar, entre outros fatores. A órbita do CHAMP é quase circular, próxima a órbita polar, com inclinação de 87° em relação ao Plano do Equador.

O CHAMP carrega a bordo diversos instrumentos, dentre eles podemos destacar um receptor GPS TRSR-2 de dupla frequência, sendo o receptor GPS a principal ferramenta para a determinação da órbita do satélite com alta precisão (GFZ, 2004).

Os dados do satélite CHAMP estão disponíveis na Internet, sendo este serviço realizado pelo GFZ, disponível na página <<http://isdc.gfz-potsdam.de/champ/>>, e pelo JPL, disponível na página <<http://genesis.jpl.nasa.gov/zope/GENESIS/Atmosphere/DIAL>>. Entretanto, no JPL, somente estão disponíveis os dados do satélite CHAMP entre maio e setembro de 2001.

Os dados do satélite CHAMP utilizados nessa pesquisa são do dia 02 de setembro do ano de 2002. Neste experimento o processamento foi realizado com a seguinte configuração:

$$\mathbf{s}_{X_INICIAL}^2 = 10,00^2 \text{ m}^2 - \text{coordenadas } (X, Y, Z);$$

$$\mathbf{s}_r^2 = 3.300,00 \text{ m}^2 - \text{relógio do receptor.}$$

$$\mathbf{s}_{W_{k,k}}^2 = 76.000,00 \text{ m} - \text{variância do ruído para as coordenadas, com } k = 1, 2, 3.$$

Da mesma forma que no PPP simulando o posicionamento cinemático, para implementar o modo cinemático, colocou-se um valor da variância das coordenadas na MVC de Σ_{W_k} com correlação nula. Como a velocidade do satélite CHAMP é de aproximadamente 7,00 km/s e os dados do receptor no satélite são fornecidos de 10 em 10 s, o valor da variância de Σ_{W_k} para as coordenadas deveria ser de 70.000,00 m. Entretanto, de posse da órbita do satélite CHAMP, arquivo CHORB disponível no site do ISDC do GFZ (CHAMP-ISDC, 2005), a velocidade média do satélite CHAMP para este dia foi de 7,6 km/s. Assim, o valor da variância de Σ_{W_k} para as coordenadas foi de 76.000,00 m.

O fator de escala da troposfera não foi estimado neste experimento devido ao fato do satélite CHAMP estar a 454 km de altitude. O arquivo CHORB é dado de 14 em 14 horas. A Figura 40 apresenta as posições para o satélite CHAMP, obtidas a partir do arquivo CHORB, para 14 horas, com início a 1 h do dia 02 de setembro de 2002.

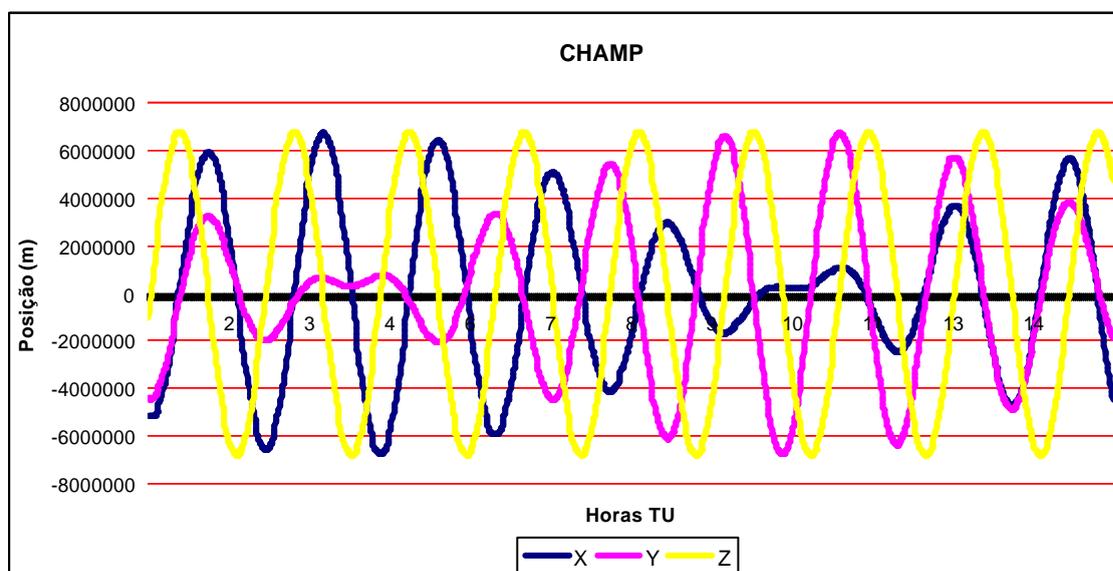


Figura 40 – Posição do satélite CHAMP do arquivo CHORB

A Figura 41 apresenta as posições do satélite CHAMP obtidas a partir do PPP no modo cinemático a partir da 1 h e 30 min, enquanto a Figura 42 apresenta os respectivos desvios-padrão das coordenadas e a Tabela 17 apresenta as discrepâncias do PPP cinemático.

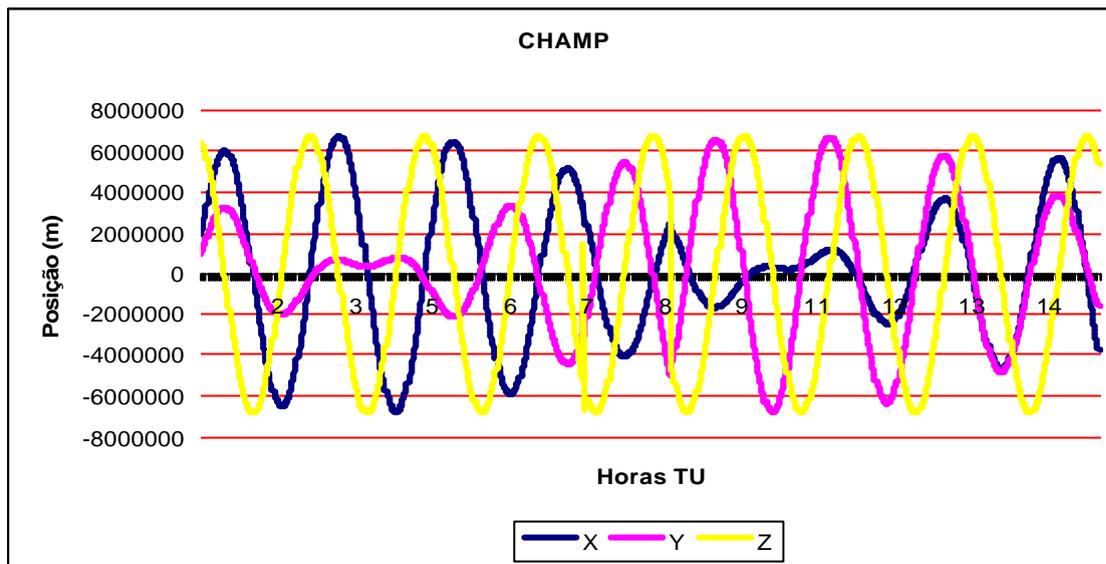


Figura 41 – Posição do satélite CHAMP

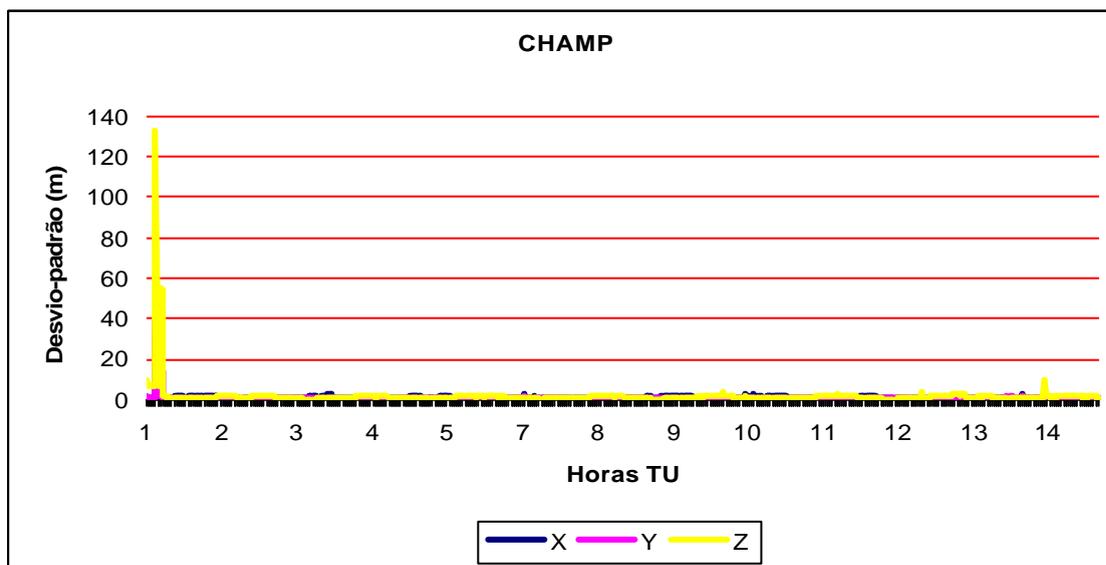


Figura 42 – Desvio-padrão das coordenadas do satélite CHAMP

Tabela 17 – Discrepâncias das coordenadas em relação ao arquivo CHORB no PPP cinemático.

Coordenadas	Discrepâncias das coordenadas	
	Média (m)	Desvio-padrão (m)
X	-3,030	36,509
Y	6,186	60,740
Z	3,877	92,181

De acordo com as Figuras 40 e 41 verifica-se que as coordenadas do satélite apresentam o mesmo comportamento. Já na Tabela 18 pode-se consultar as discrepâncias das coordenadas do PPP cinemático com relação às coordenadas do arquivo CHORB. A discrepância na coordenada X foi de $-3,030 \text{ m} \pm 36,509 \text{ m}$, na coordenada Y foi de $6,186 \text{ m} \pm 60,740 \text{ m}$ e de $3,877 \text{ m} \pm 92,181 \text{ m}$ na componente Z, a qual apresentou o maior desvio-padrão. Observando a Figura 42, pode-se notar que a média do desvio-padrão das coordenadas é de $1,141 \text{ m}$ para a coordenada X, $0,878 \text{ m}$ para a coordenada Y e $1,717 \text{ m}$ para a coordenada Z.

A Tabela 18 apresenta a média dos resíduos das observações, bem como o seu desvio-padrão.

Tabela 18 – Erro médio e desvio-padrão dos resíduos no PPP cinemático.

Estação	Erro médio dos Resíduos	
	Pseudodistância (m)	Fase da onda portadora (m)
CHAMP	$1,510 \pm 36,117$	$-0,281 \pm 5,189$

Nota-se que os resíduos no posicionamento do satélite CHAMP estão altos para a fase de batimento da onda portadora, sendo sua média de $-0,281 \text{ m} \pm 5,189 \text{ m}$ para esta observável e $1,510 \text{ m} \pm 36,117 \text{ m}$ para a pseudodistância, indicando, assim, que problemas na implementação do PPP no modo cinemático ainda devem ser investigados.

A variação do comportamento do relógio do receptor para o satélite CHAMP é ilustrada na Figura 43.

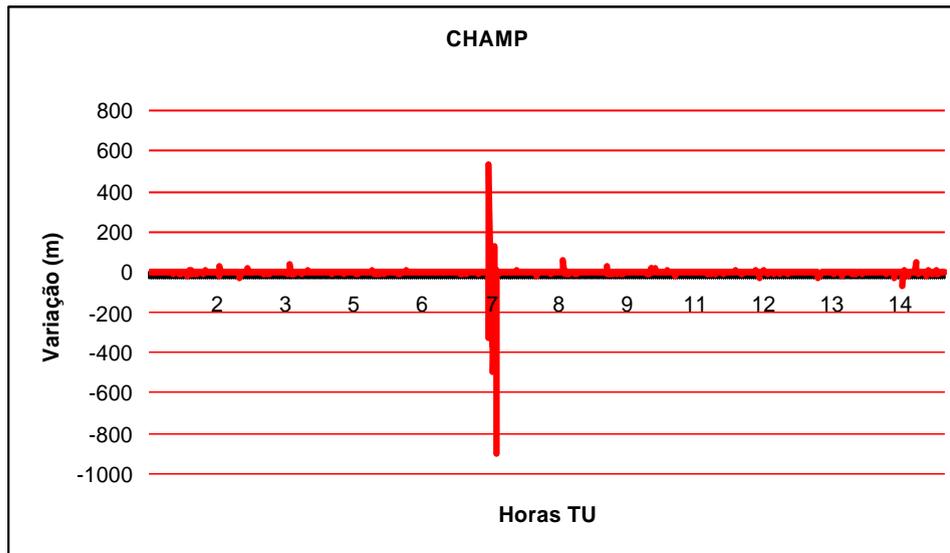


Figura 43 – Variação do relógio do receptor para o satélite CHAMP

A média da variação do comportamento do relógio do receptor foi de 0,214 m com um desvio-padrão de 4,998 m.

Os valores das ambigüidades, neste posicionamento, podem ser vistas na Figura 44 e seu desvio-padrão na Figura 45 para o início do processamento.

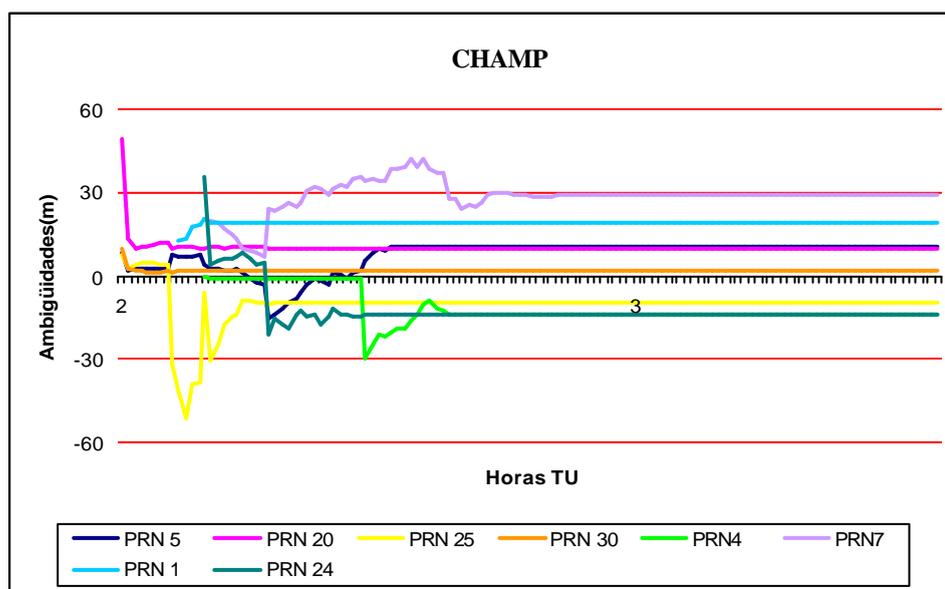


Figura 44 – Valores das ambigüidades para o satélite CHAMP

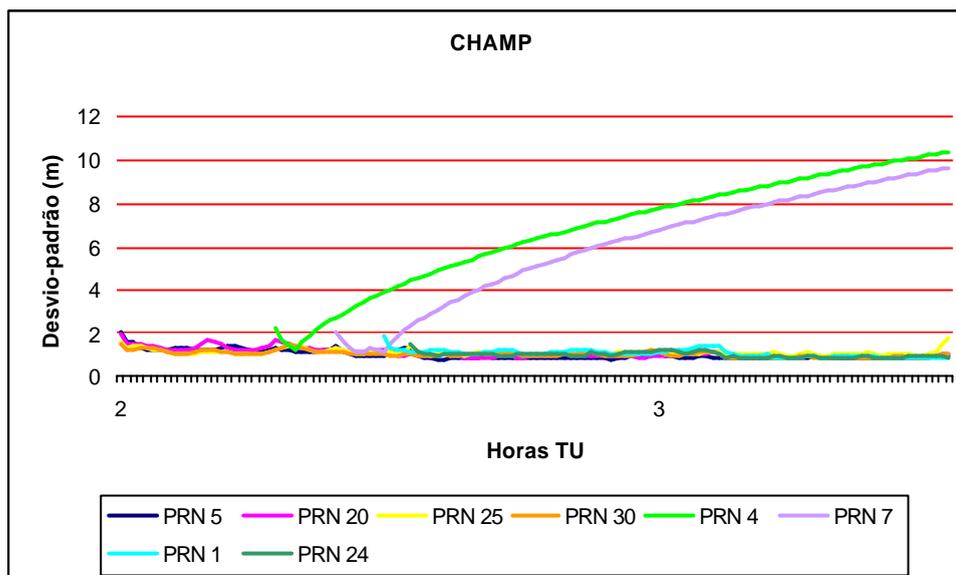


Figura 45 – Desvio-padrão das ambigüidades para o satélite CHAMP

A Figura 44 apresentou o comportamento dos valores das ambigüidades para alguns satélites no PPP cinemático para o caso do receptor GPS a bordo do satélite CHAMP e verifica-se que as precisões das ambigüidades convergiram após aproximadamente 20 min, como no PPP estático e no PPP simulando o cinemático. O desvio-padrão das ambigüidades aumentam para alguns satélites no decorrer do processamento, como os satélites PRN 4 e PRN 7 apresentados na Figura 45. Já a ambigüidade dos satélites PRN 6 e PRN 5 apresentaram um salto mas depois se estabilizaram; quando ocorreram estes saltos, no arquivo Rinex havia somente 4 satélites.

Portanto, de acordo com os resultados obtidos com o PPP no modo cinemático, nota-se a necessidade de realizar uma investigação para verificar possíveis falhas na estratégia adotada visando obter melhores resultados em processamentos futuros.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho foi realizado o PPP, nos modos estático e cinemático, utilizando o Filtro de Kalman Estendido. Foram corrigidos os erros devido aos efeitos da refração troposférica, da relatividade, do movimento de rotação da Terra, das variações do movimento das marés terrestres, do centro de fase da antena do satélite e da fase *Wind-up*. Os efeitos devido à ionosfera foram minimizados através da combinação linear *ion-free*. Já as perdas de ciclos foram detectadas através da combinação linear *widelane*, assim, para cada época de observação, a ambigüidade da *widelane* foi avaliada. As implementações foram realizadas no *software* FILTER_FCT.

Visando mostrar a acurácia que pode ser obtida com o PPP, foram realizados três experimentos: PPP no modo estático, PPP no modo estático simulando o modo cinemático e o PPP cinemático. No primeiro e no segundo experimento, foram utilizados dados das estações PPTE, VICO, RIOD e FORT, pertencentes à RBMC, e da estação FRDN localizada em Fredericton, no Canadá. No terceiro experimento foram utilizados dados do receptor GPS a bordo do satélite CHAMP.

No PPP no modo estático utilizou-se como estratégia de processamento a modificação da variância das coordenadas e do relógio do receptor na MVC dos parâmetros do Filtro de Kalman. Neste experimento, as discrepâncias da RP das coordenadas estimadas foram da ordem de centímetros para todas as configurações, com exceção das estações FORT e PPTE que foram da ordem de decímetros. A discrepância da RP para a estação FORT foi de $33,02 \text{ cm} \pm 7,58 \text{ cm}$ e para a estação PPTE de $31,10 \text{ cm} \pm 10,72 \text{ cm}$. A estação RIOD foi a qual apresentou um melhor resultado, sendo a discrepância da RP de $1,81 \text{ cm}$ com desvio-padrão $1,94 \text{ cm}$. A discrepância altimétrica em todas as configurações foi da ordem de decímetros para as estações PPTE, FORT e FRDN e quando se utiliza a variância da coordenada igual a $5,00 \text{ m}^2$ ou igual a $10,00 \text{ m}^2$, junto com a variância do relógio do receptor de $(10.000,00)^2 \text{ m}^2$, a discrepância altimétrica da estação VICO também fica na ordem de decímetros. Já a estação RIOD a discrepância altimétrica é na ordem de centímetros em todas as configurações. Com a variância das coordenadas igual a $1,0 \text{ m}^2$ e a variância do relógio igual a $(3.300,00)^2 \text{ m}^2$ os resultados foram melhores, tendo uma menor discrepância em todas as estações.

A parte residual dos efeitos da refração troposférica foi estimada mediante a introdução de um fator de escala. Como há ocorrência de alguns saltos nos valores estimados

do fator de escala da troposfera pode-se dizer que alguns problemas no PPP ainda estão presentes, ou que outros erros devem ser corrigidos, como por exemplo, os efeitos das marés oceânicas. Para cada processamento, houve variação no comportamento do relógio do receptor. Na estação FORT e na estação FRDN há pouca variação do relógio do receptor, ficando em $4,90 \text{ cm} \pm 25,79 \text{ cm}$ e $-19,30 \text{ cm} \pm 1,8 \text{ cm}$, respectivamente. Todavia, a estação PPTE também apresenta pouca variação no comportamento do relógio, sendo sua variação média de $-2,1 \text{ cm} \pm 32,1 \text{ cm}$. Vale a pena ressaltar que esta estação não possui um relógio atômico, trata-se de um receptor TRIMBLE NetRS.

Quanto ao segundo experimento, realizado a partir do modo PPP estático simulando o posicionamento cinemático (usando as cinco estações utilizadas no primeiro experimento), adicionou-se um valor para a variância das coordenadas na MVC dos ruídos e na MVC dos parâmetros do Filtro de Kalman Estendido, considerando sua correlação nula. As discrepâncias das coordenadas estimadas variaram na ordem de decímetros para as estações PPTE, FORT e FRDN. A estação PPTE apresentou discrepância na RP de $41,84 \text{ cm} \pm 3,57 \text{ cm}$ e para a altimetria de $57,82 \text{ cm} \pm 2,50 \text{ cm}$; a estação RIOD a discrepância na RP foi de $0,90 \text{ cm} \pm 7,29 \text{ cm}$ e em h de $0,57 \text{ cm} \pm 7,57 \text{ cm}$; na estação VICO a discrepância na RP foi de $8,24 \text{ cm} \pm 8,76 \text{ cm}$ e a em h foi de $0,67 \text{ cm} \pm 5,65 \text{ cm}$; na estação FORT a discrepância na RP foi de $67,02 \text{ cm} \pm 7,30 \text{ cm}$ e a discrepância altimétrica foi de $50,43 \text{ cm} \pm 5,56 \text{ cm}$; e na estação FRDN a discrepância na RP foi de $39,55 \text{ cm} \pm 1,01 \text{ cm}$ e em h foi de $7,27 \text{ cm} \pm 1,65 \text{ cm}$. Pode-se observar que tanto na estação PPTE quanto na estação FORT a discrepância com relação à altitude foi a que apresentou um alto valor. O comportamento do relógio do receptor foi praticamente o mesmo com relação ao PPP no modo estático para as cinco estações, todavia o desvio-padrão também foi maior. Já o comportamento do fator de escala estimado, apresentou um maior número de saltos do que no PPP no modo estático. Assim, pode-se verificar que há uma correlação do fator de escala da troposfera com o comportamento do relógio do receptor. Isso pode ser visualizado na presença dos saltos que ocorrem nestas duas componentes na mesma época.

Com relação à altimetria, verifica-se que esta é a componente que apresenta maior discrepância em todos os processamentos e configurações, degradando assim o resultado final no PPP, principalmente nas estações PPTE e FORT. Pode-se notar também que a resultante das discrepâncias para as estações VICO e RIOD, as quais possuem um receptor TRIMBLE 4000SSI, apresentaram uma resultante na ordem de centímetros no primeiro e no segundo experimento.

No terceiro experimento foi realizado o PPP no modo cinemático, utilizando dados coletados pelo receptor GPS a bordo do satélite CHAMP, utilizando a mesma estratégia do segundo experimento. Neste posicionamento os resíduos foram altos, sendo da pseudodistância de $1,510 \text{ m} \pm 36,117 \text{ m}$ e o da fase de batimento da onda portadora de $0,281 \text{ m} \pm 5,189 \text{ m}$. Já a variação do comportamento do relógio do receptor sua média foi de $0,214 \text{ m}$ com um desvio-padrão de $4,998 \text{ m}$. Com relação às discrepâncias no PPP cinemático elas foram de $-3,030 \text{ m} \pm 36,509 \text{ m}$ na coordenada X , $6,186 \text{ m} \pm 60,740 \text{ m}$ na coordenada Y e de $3,877 \text{ m} \pm 92,181 \text{ m}$ na componente Z , a qual apresentou o maior desvio-padrão, indicando que provavelmente há problemas PPP cinemático do satélite LEO.

Diante do exposto, pode-se verificar, de modo geral, que o modelo utilizado para realizar o PPP é aplicável. É importante enfatizar que ainda existem problemas no processamento dos dados, os quais devem ser aprimorados. O *software* FILTER_FCT consiste em sub-rotinas que formam uma boa base para continuar as pesquisas com o PPP.

Como recomendação para trabalhos futuros que tratem do assunto em questão, pode-se sugerir:

- Utilizar o método proposto neste trabalho no processamento de outras estações e também das mesmas, utilizando uma maior quantidade de dados;
- Modelar outros erros que afetam o PPP, tais como os efeitos das marés oceânicas, da atmosfera, erro relacionado ao centro de fase da antena do receptor, correção da perda de ciclo;
- Analisar possibilidades de calcular a ambigüidade inteira, tal como o trabalho apresentado por Leandro e Santos (2006) no ION GNSS 2006, o qual calcula a ambigüidade fixa;
- Utilizar outras estratégias com relação ao modelo dinâmico do PPP no modo cinemático;
- Realizar o PPP utilizando receptores de simples frequência em conjunto com modelos da ionosfera.

REFERÊNCIAS

ABDEL-SALAM, M. A. **Precise Point Positioning Using Un-Differenced Code and Carrier Phase Observations**. 2005. 228f. Dissertation of Department of Geomatics Engineering. University of Calgary.

AGUIAR, C. R. **Modelo Regional da Ionosfera (Mod_Ion): Implementação em Tempo Real**. 2005. 159f. Dissertação de Mestrado em Ciências Cartográficas – Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

BISNATH, S. B.; COLLINS, J. P.; LANGLEY R. B. GPS Multipath In: ASSESSMENT OF THE HIBERNIA OIL PLATFORM, 1997, New Brunswick: UNB, 43p (A study commissioned by Cougar Helicopters Ltd.). **Proceedings...**

BISNATH, S. B.; LANGLEY, R.B. Precise Orbit Determination of Low Earth Orbiters with GPS Point Positioning. In: ION 2001 National Technical Meeting, 2001, Long Beach, January 22-24. **Proceedings...**

BISNATH, S. **Precise Orbit Determination of Low Earth Orbiters with a Single GPS Receiver-Based, Geometric Strategy**. 2004. 143 f. Ph.D. Dissertation, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No. 220, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada.

BUTLER, J. H.; ELKINS, J. W.; BRUNSON, C. M.; EGAN, K. B.; THOMPSON, T. M.; CONWAY, T. J.; HALL, B. D. Trace gases in and over the West Pacific and East Indian Oceans during the El Nino-Southern Oscillation event of 1987. NOAA Data Report ERL ARL-16, Air Resources 5 Laboratory, Silver Spring, MD, USA, 1988. **Proceedings...**

CAMARGO, P. O. **Modelo regional da ionosfera para uso em posicionamento com receptores GPS de uma frequência**. 1999. 191f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

CAMARGO, P. O. **Controle de Qualidade Aplicado ao Filtro de Kalman**. 1992. 94f. Dissertação de Mestrado em Ciências Geodésicas – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

CARARO, A. C.; FERREIRA, L. D. D.; AFONSO, G. B.. GPS, sincronização e relatividade. In: IV COLÓQUIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS - IV CBCG, 2005, Curitiba, **Anais**, 16 a 20 de maio de 2005.

CEPTEC – **Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos**. Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: 01 de maio de 2005.

CHAMP-ISDC – Challenging Mini-Satellite Payload for Geoscientific Research and Application – **Information System and Data Center** – Disponível em: <<http://isdc.gfz-potsdam.de/champ/>>. Acesso em: 15 de abril de 2005.

COSTA, S. M. A., **Integração da rede geodésica brasileira aos sistemas de referência terrestres**. 1999. 170f. Tese de Doutorado em Ciências Geodésicas – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

COSTA, S.M.A.; SANTOS, M.C.; GEMAEL, C.. A velocity field estimation of the Brazilian portion of the SOAM plate. 2003. **GPS Solutions**, Springer, v.7, p.186-193.

DAL POZ, W. R. **Posicionamento relativo na região equatorial em diversas condições ionosféricas**. 2005. 151f. Dissertação de Mestrado em Ciências Cartográficas – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

DREWES, H.; ANGERMANN, D.. The Actual Plate Kinematic and Crustal Deformation Model 2000 (**APKIM2000**) as a Geodetic Reference. In: Book of Abstracts, INTERNATIONAL ASSOCIATION OF GEODESY GENERAL ASSEMBLY, 2001, 2-7 September, Budapest, Hungary.

FAUSTINO, R.C.; MONICO, J. F. G.; ALVES, D. B. M; SOUZA, E. M.; HOLZSCHUH, M. L.; RUY, R. S. Movimento de placas litosféricas: Análise dos modelos disponíveis para o Brasil. XXII CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 2005, Macaé, 26 a 30 setembro de 2005. **Proceedings....**, CDROM.

GAO, J.; LAHAYE, F.; HÉROUX, P; LIAO, X.; BECK, N; OLYNIK, M. Modeling and estimation of C1-P1 bias in GPS receives. **Journal of Geodesy** n.74, p.621-626, 2001.

GENESIS – Global Environmental & Earth Science Information System **GENESIS**. Disponível em: <<http://genesis.jpl.nasa.gov/zope/GENESIS/Atmosphere/DIAL>>. Acesso em: 06 de julho de 2005.

GFZ – GeoForschungsZentrum Potsdam. **CHAMP**. – Disponível em: <<http://op.gfz-potsdam.de>>. Acesso em: 02 de fevereiro de 2004.

GOMES, V. M. **Determinação de órbita de satélites artificiais em tempo real através da solução de navegação do GPS**. 2004. 107f. Dissertação de mestrado em Engenharia e Tecnologias Espaciais – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

HANNAH, C. D.; WALKER, R. A. e KUBIK, K. Towards a Complete Virtual Multipath Analysis Tool. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 11, 1998, Nashville. **Proceedings...** Nashville: The Satellite Division of the Institute of Navigation, 1998. p.1055-1063.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. **GPS: Theory and Practice**. 5.ed. Wien: Spring-Verlage, 2001. 382p.

IBGE – **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Online, 2006. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em: 20 de março de 2006.

IBGE-SIRGAS – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – **Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/sirgas/principal.htm>>. Acesso em 13 de maio de 2005.

IGS – International GNSS Service. **IGS PRODUCTS**. Disponível em: <<http://igsb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>>. Acesso em: 05 de maio de 2006.

IGS Mail # 5078. PIC1 Bias. Disponível em: <<ftp://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/software/cc2noncc/p1cbias.hist>, 2005>. Acesso em: 16 de maio de 2006.

ITRF – **The International Terrestrial Reference Frame**. Disponível em: <<http://www.iers.org/iers/products/itrf/>>. Acesso em: 13 de maio de 2005.

KALMAN, R. E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. Transactions of the ASME. **Journal of Basic Engineering**, v.82 (Series D), p.35-45, 1960.

KOUBA, J. **A guide to using International GPS Service (IGS) Products**. Disponível em: <<http://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/resource/pubs/GuidetoUsingIGSProducts.pdf>>. Acesso em: 25 de maio de 2005.

KOUBA, J.; HÉROUX, P. GPS Precise Point Positioning using IGS Orbit Products. **GPS Solutions**, v.5, n.2, 2000.

KUGA, H. K.; PRADO, A. F. B. A. **Fundamentos de Tecnologia Espacial**. 1.ed. Cruzeiro, São José dos Campos, 2001, 220p.

LEANDRO, R. F; SANTOS, M. C. Wide Area Based Precise Point Positioning. In: ION GNSS 2006, Texas, 2006. **Proceedings...**, 2006.

LEICK, A. **GPS – Satellite Surveying**. 2.ed. John Wiley & Sons, 1995. 560p.

MADER, G. L. A comparison of absolute and relative GPS antenna calibrations. **GPS Solutions**, v.4 n.4, pg37-40. 2001.

MATSUOKA, A. T. **Posicionamento por Ponto Preciso: Fundamentos, Implementação e Resultados Preliminares**. 2003. Relatório de Exame de Qualificação no Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

MATSUOKA, M. T. **Avaliação de funções para a modelagem do efeito da regração ionosférica na propagação dos sinais GPS**. 2003. 164f. Dissertação de Mestrado em Ciências Cartográficas – Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: Descrição, Fundamentos e Aplicações**. 1.ed. São Paulo: Unesp, 2000. 287p.

_____. Posicionamento por ponto de alta precisão utilizando o GPS: uma solução para a geodinâmica. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo, v.18, n.20, março de 2000A.

NIELL, A. E. Global Mapping Functions for the Atmosphere Delay at Radio Wavelengths. **Journal of Geophysical Research**, v.101, n.B2, p.3227-3246, 1996.

PEREZ, J. A. S. **Campo de Velocidade para as Estações da RBMC e do IGS Localizadas na Placa Sulamericana: Estimativa a partir do Processamento de Dados GPS**. 2002. 166f. Dissertação de Mestrado em Ciências Cartográficas – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

PEREZ, J. A. S.; MONICO, J. F. G. M; CHAVES, J. C. 2003. Velocity Field Estimation Using GPS Precise Point Positioning: The South American Plate Case. **Journal of Global Positioning System**, v.2, n.2, p.90-99, 2003.

REIGBER, C.H.; WICKERT, J.; BEYERLE, G.; GALAS, R.; GRUNWALDT L.; KÖNIG, R.; MARQUARDT, C.; SCHMIDT, T. GPS radio occultation with CHAMP. **Journal of Geophysical**, 2000.

SÁ, N. C. **GPS: Fundamentos e aplicações**. IAG/Universidade de São Paulo, Departamento de Geofísica, São Paulo, 2002.

SAASTAMOINEN, I. I. Contribution to the theory of atmospheric refraction. **Bulletin Géodésique**, v.107, p.13-34, 1973.

SALAM, M.A.; GAO, Y.; SHEN, X. Analyzing the Performance Characteristics of a Precise Point Positioning System. In: ION GPS 2002, Portland, 2002. **Proceedings...**, sep 2002, p. 1893 - 1899.

SAPUCCI, L.F. **Estimativa do vapor d'água atmosférico e avaliação da modelagem do atraso zenital troposférico utilizando GPS**. 2001. 167f. Dissertação de Mestrado em Ciências Cartográficas – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: Foundations, Methods and Applications**. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 2003. 586p.

SHEN, X. **Improving Ambiguity Convergence in Carrier Phase-Based Precise Point Positioning**. 2002. 143f. Thesis submitted to the Faculty of Graduate Studies in Partial Fulfilment of the Requirements for Degree of Master of Science. Department of Geomatics Engineering. Calgary.

SPIPKER, J. J.; PARKINSON, B. W. Overview of GPS Operation and Design. In: PARKINSON, B. W.; SPIPKER, J. J. **Global Positioning System: Theory and Applications**. Cambridge: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996. v.1, p.29-55.

SOUZA, E. M. **Efeito do Multicaminho de Alta frequência no Posicionamento Relativo GPS Estático: Detecção e Atenuação Utilizando Wavelets**. 2004. 140f. Dissertação de Mestrado em Ciências Cartográficas – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

TEUNISSEN, P. J. G. **Dynamic Data Processing: Recursive Least-Squares**. 1.ed. Netherlands: Delf University Press, 2001. 241p.

TURCOTTE, D. L.; SCHUBERT, G, 2002. **Geodynamics**. 2.ed. Cambridge, 2002. 456p.

WITCHAYANGKOON, B. **Elements of GPS Precise Point Positioning**. 2000. 265f. Thesis Doctor of Philosophy in Spatial Information Science and Engineering. University of Maine.

BIBLIOGRAFIAS

BETTADPUR, S. **Gravity Recovery and Climate Experiment** – Level 2 Gravity Field Product – User Handbook – Rev.1, 1/12/2003. Center for Space Research. The University of Texas Austin. Disponível em: <http://www.csr.utexas.edu/grace/publications/handbook/L2UserHandbook_v1.0.pdf>. Acesso em: 04 de abril de 2004.

COLOMBO, O. L. e LUTHCKE, S. B., 2004. Kinematic Point Positioning of a LEO With Simultaneous Reduced-Dynamic Orbit Estimation. In: ION GNSS 2004, Long Beach, Califórnia. **Proceedings...**, 2004.

CONAE – Comisión Nacional de Actividades Espaciales – **SAC-C**. Disponível em: <<http://www.conae.gov.ar/satelites/sac-c.html>>. Acesso em: 15 de abril de 2005.

FAUSTINO, R. C. **Integração GLONASS / GPS com correções da refração troposférica e ionosférica**. Relatório de Iniciação Científica financiado pela CNPq, 2003.

FONSECA, E. S. **O sistema GPS como ferramenta para a avaliação da refração ionosférica no Brasil**. 2002. 200f. Tese de Doutorado em Engenharia de Transportes – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

FORTES, L. P. S **Optimising the Use of GPS Multi-Reference Stations for Kinematic Positioning**. 2002. 355f. Tese (PhD) – University of Calgary, Calgary.

GAO, Y.; SHEN, X. Kinematic Processing Analysis of Carrier Phase based Precise Point Positioning. FIG XXII International Congress. Washington, D.C. USA, April 19-26. **Proceedings...**, 2002.

GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações: Aplicações Geodésicas**. Curitiba: UFPR, 1994. 319p.

GESIS – **German Earth Science Information System** – Disponível em: <<http://geis.gfz-potsdam.de/>>. Acesso em: 22 de março de 2005.

GLONASS – **Global Navigation Satellite System**. Disponível em: <<http://www.glonass-center.ru/>>. Acesso em: 05 de julho de 2005.

GRACE – **Gravity Recovery and Climate Experiment**. Disponível em: <<http://www.csr.utexas.edu/grace/>>. Acesso em: 10 de março de 2005.

HAIJ, G. A. et al. CHAMP and SAC-C Atmospheric Occultation Results and Intercomparisons. **Journal of Geophysical Research**. 2002. Disponível em: <http://genesis2.jpl.nasa.gov/archive/200212011/01/champ_sacc_paper_v2.pdf>. Acesso em: 07 de outubro de 2004.

HÉROUX, P.; GAO, Y.; KOUBA, J.; LAHAYE, F.; MIREAULT, Y.; COLLINS, P.; MACLEOD, K.; TÉTREAULT, P.; CHEN, K. **Products and Applications for Precise Point Positioning - Moving Towards Real-Time**. In: ION GNSS 2004, Long Beach, Califórnia, 2004. **Proceedings...**, 2004.

HOLZSCHUH, M. **Recuperação de Perfis Atmosféricos a partir da Ocultação GPS: Fundamentos e Análise de Resultados**. Projeto de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas. FCT/UNESP, Presidente Prudente, 2005.

ITRS – **The International Terrestrial Reference System**. Disponível em: <<http://www.iers.org/iers/earth/itrs/>>. Acesso em: 24 de julho de 2004.

KLOBUCHAR, J. A. Ionospheric Effects on GPS. In: PARKINSON, B. W.; SPILKER Jr., J. J. **Global Positioning System: Theory and Applications**. Cambridge: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996. v.1, p.485-515.

KUGA, H. K.; LOPES, R.V.F.; PRADO, A. F. B. A.; NASCIMENTO, J. M.; CHIARADIA, A. P. **Orbit Determination and Navigation Using GPS**. INPE, São José dos Campos, 1998.

MCCARTHY, D.D.; PETIT, G. **IERS Conventions (2003) – IERS Technical Note n° 32**. Frankfurt, 2004. Disponível em: <<http://maia.usno.navy.mil/conv2000.html>>. Acesso em: 08/08/2004.

MACHADO, W. C. **Solução Rápida das Ambigüidades GPS para Aplicação no Posicionamento Relativo de Bases Curtas**. 2001. 121f. Dissertação de Mestrado em Ciências Cartográficas – Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências de Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

MACHADO, W.C.; MONICO, J.F.G.; CAMARGO, P.O. SA: antes e depois de sua desativação. **A MIRA**, Criciúma, SC, n. 98, p. 38-43, 2000.

MONICO, J.F.G.; PEREZ, J.A.S. Integration of Regional GPS Network to ITRF Using Precise Point Positioning. In: IAG 2001 SCIENTIFIC ASSEMBLY, 2001, Budapeste. **Proceeding of the IAG 2001 SCIENTIFIC ASSEMBLY**. Budapespte: IAG, 2001. v. 1. **Proceedings...**, 2001.

MORITZ, H. (1992) Geodetic Reference System 1980. **Bulletin Géodésique**, v. 66, n.2, p.187-192.

OLYNIK, M. C. **Temporal Characteristics of GPS Error Sources and Their Impact on Relative Positioning**. 2002. 140f. Thesis, University of Calgary.

PEREIRA E. A.; MONICO, J. F. G. **Posicionamento por Satélite: Projeto Grace**. Disponível em: <<http://geodesia.ufsc.br/geodesia-online/RotaPrint/GRACE1.pdf>>. Acesso em: 10 de setembro de 2003.

REIGBER, C. **The CHAMP Mission**. GFZ Potsdam, Department 1. Disponível em: <<http://op.gfz-potsdam.de/champ/indexCHAMP.html>>. Acesso em: 19 de setembro de 2003.

REIGBER, C.H.; WICKERT, J.; BEYERLE, G.; GALAS, R.; GRUNWALDT L.; KÖNIG, R.; MARQUARDT, C.; SCHMIDT, T. GPS radio occultation with CHAMP. **Journal of Geophysical**. 2000.

SAC-C – **Satélite de Aplicaciones Científicas-C** – Disponível em: <<http://www.alcielosite.com.ar/misiones/sac-c-nc.htm>>. Acesso em: 20 de março de 2005.

SANTOS, M. C. **On Real Time Orbit Improvement for GPS Satellites**. 1995. 125f. Thesis, University of New Brunswick, Fredericton.

STEWART, M.P.; FOULKES-JONES, G.H.; CHEN, W.; OCHIENG, W.Y.; SHARDLOW, P.J.; PENNA, N.T. **GPS Analysis Software (GAS)**, Version 2.4 User Manual, IESSG Publication, UK, 1997.

TEUNISSEN, P. J. G. The GPS phase-adjusted pseudorange. In: **Proceedings** of the Second International Workshop on High Precision Navigation, Stuttgart, Freudenstadt, Nov., 1991, p115-125.

WEBB, F. H.; ZUMBERGE, J. F. **An Introduction to GIPSY/OASIS-II**. Jet Propulsion Laboratory, JPL D-11088, Pasadena CA, 1997.