



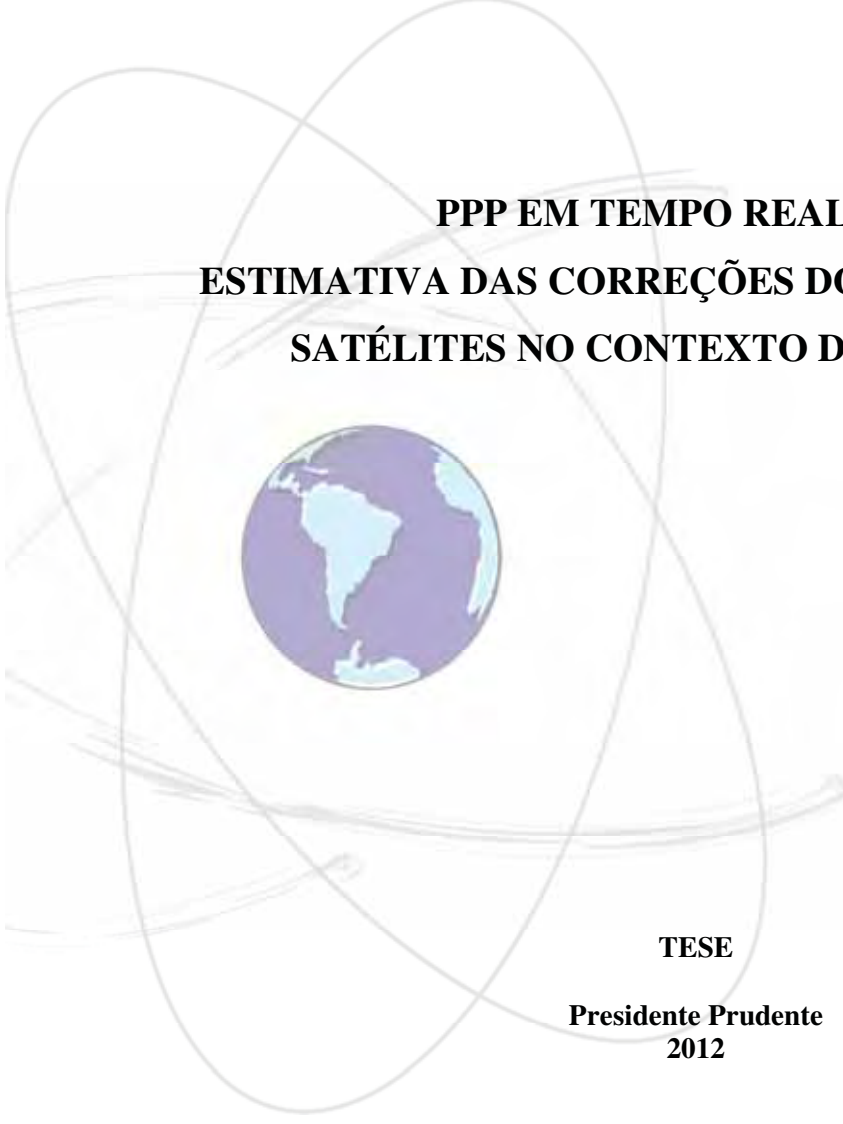
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

CAMPUS DE PRESIDENTE PRUDENTE

FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

HAROLDO ANTONIO MARQUES



**PPP EM TEMPO REAL COM
ESTIMATIVA DAS CORREÇÕES DOS RELÓGIOS DOS
SATÉLITES NO CONTEXTO DE REDE GNSS**

TESE

**Presidente Prudente
2012**



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

CAMPUS DE PRESIDENTE PRUDENTE

FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

HAROLDO ANTONIO MARQUES

**PPP EM TEMPO REAL COM
ESTIMATIVA DAS CORREÇÕES DOS RELÓGIOS DOS
SATÉLITES NO CONTEXTO DE REDE GNSS**

Tese de doutorado desenvolvida junto ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista.

Orientador: Prof. Dr. João Francisco Galera Monico

Co-orientadores: Prof. Dr. Milton Hirokazu Shimabukuro
Marcio de Oliveira Aquino

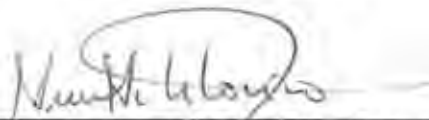
**Presidente Prudente
2012**

M317p Marques, Haroldo Antonio.
PPP em tempo real com estimativa das correções dos relógios dos satélites no contexto de rede GNSS / Haroldo Antonio Marques. - Presidente Prudente : [s.n], 2012
xxxvi, 244 f. : il.

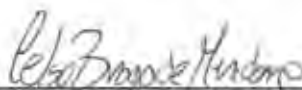
Orientador: João Francisco Galera Monico
Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia
Inclui bibliografia

1. Correção do relógio do satélite. 2. PPP em tempo real. 3. Redes GNSS. I. Monico, João Francisco Galera. II. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e Tecnologia. III. Título.

BANCA EXAMINADORA



PROF. DR. JOAO FRANCISCO GALERA MONICO
ORIENTADOR



PROF. DR. CELSO BRAGA DE MENDONÇA
EMPRESA BRASILEIRA DE AERONÁUTICA



PROF. DR. HELIO KOITI KUGA
- INPE- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS



PROF. DR. SILVIO JACKS DOS ANJOS GARNÊS
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO



PROFA. DRA. DANIELE BARROCÁ MARRA ALVES
FCT/UNESP/CAMPUS DE PRESIDENTE PRUDENTE



HAROLDO ANTONIO MARQUES

PRESIDENTE PRUDENTE (SP), 26 DE ABRIL DE 2012

RESULTADO: APROVADO

DADOS CURRICULARES

Haroldo Antonio Marques

NASCIMENTO: 26/05/1979 - Araçatuba - SP

FILIAÇÃO: Euripedes Antonio Marques
Diva Batista Marques

2002-2006: Curso de Graduação
Engenharia Cartográfica
Faculdade de Ciências e Tecnologia - UNESP

2006-2008: Curso de Pós-Graduação
Mestrado em Ciências Cartográficas
Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas
Faculdade de Ciências e Tecnologia - UNESP

2008-2012: Curso de Pós-Graduação
Doutorado em Ciências Cartográficas
Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas
Faculdade de Ciências e Tecnologia - UNESP

DEDICATÓRIA

À minha querida Heloísa, pelo apoio, carinho e incentivo, principalmente nos momentos mais difíceis dessa jornada.

Aos meus estimados pais e irmãos, Euripedes, Diva, Heitor e Rodrigo, os quais sempre estiveram e estarão presentes em minha vida.

Aos meus queridos primos Alex e Elisane pelo apoio nos momentos difíceis e por compartilhar bons momentos.

Aos meus queridos sogros, Dionisio e Lúcia, que sempre me incentivaram na continuação do trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

Primeiramente a “DEUS” por que acredito que a fé em sua força superior nos faz trilhar pelos bons caminhos e nos renova sempre a esperança.

Às agências de fomento CNPq e FAPESP, pelo apoio financeiro durante o desenvolvimento da tese.

À empresa Embraer por ceder gentilmente dados GPS para a realização de experimentos.

Ao Professor Dr. João Francisco Galera Monico, pelos ensinamentos, pelos vários anos de parceria no trabalho, pela confiança apoio e incentivo.

Aos meus pais, irmãos e todos os familiares por todo o apoio e encorajamento.

A todos os professores do Departamento de Cartografia da FCT/UNESP, que contribuíram fortemente para a minha formação acadêmica.

A todos os funcionários da FCT/UNESP, os quais sempre atuaram com gentileza e competência tornando o convívio agradável durante todos esses anos.

Ao Guilherme Poleszuk dos Santos Rosa (aluno do PPGCC) pelo auxílio e apoio de sempre na solução de diversos problemas.

Ao Rogério (aluno do curso de Ciências da Computação) e Prof. Milton do Departamento de Matemática Estatística e Computação pela parceria no desenvolvimento dos *softwares*.

Aos colegas do Grupo de Estudos em Geodésia Espacial (GEGE) que sempre proporcionaram bons momentos para discussões científicas e também de descontração.

EPIGRAFE

Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível.

(Charles Chaplin)

RESUMO

Dentre os diversos métodos possíveis de posicionamento GNSS, encontra-se atualmente em evidência aqueles que proporcionam posicionamento em tempo real (ou próximo do tempo real) com acurácia ao nível centimétrico ou decimétrico. Nesse caso, destaca-se o PPP em tempo real, o qual requer a disponibilização de órbitas precisas em tempo real, bem como as correções ou erros dos relógios dos satélites. Atualmente, é possível utilizar as efemérides preditas denominadas IGU, as quais são disponibilizadas pelo IGS, porém, as correções dos relógios dos satélites contidas nessas efemérides não apresentam acurácia suficiente ($3 \text{ ns} \cong 0,9 \text{ m}$) para obtenção de resultados com qualidade centimétrica no PPP. Logo, é necessário pesquisar e desenvolver metodologias adequadas para estimar as correções dos relógios dos satélites com melhor qualidade para aplicação no PPP em tempo real. A estimativa das correções dos relógios dos satélites pode ser realizada com base numa rede de estações GNSS de referência. Nesta tese, a metodologia adotada para estimar estas correções consiste em realizar o ajustamento dos dados no modo PPP para uma rede de estações GNSS. Dessa forma, todos os efeitos sistemáticos envolvidos com os sinais dos satélites GNSS devem ser modelados adequadamente para cada estação da rede, realizando-se assim a estratégia denominada de PPP em rede. Uma vez estimadas as correções dos relógios dos satélites em tempo real, estas devem ser enviadas ao usuário, o qual as utilizará para aplicação no processamento dos dados GNSS de uma determinada estação no modo PPP. Esse trabalho de doutorado tem como principais objetivos pesquisar e disponibilizar uma metodologia para estimar as correções dos relógios dos satélites GNSS em tempo real no contexto de uma rede GNSS, bem como a aplicação dessas correções no PPP em tempo real. Para atingir tais objetivos, foi desenvolvido um sistema composto por dois softwares, sendo um para a estimativa das correções dos relógios dos satélites utilizando os dados de uma rede de estações GNSS e o outro para a realização do PPP em tempo real. Os resultados foram gerados em tempo real e no modo pós-processado (simulando tempo real). A estimativa das correções dos relógios dos satélites foi gerada com base nas medidas de pseudodistância suavizada pela fase da onda portadora e também utilizando o código e a fase com estimativa das ambiguidades para cada satélite disponível em cada estação. A precisão diária da estimativa das correções dos relógios dos satélites alcançou valores da ordem de $0,15 \text{ ns}$ ($\cong 0,05 \text{ m}$) e a aplicação no posicionamento GNSS mostra que é possível realizar PPP em tempo real no modo cinemático com acurácia da ordem de 10 a 20 cm.

Palavras-chave: Correção do relógio do satélite, PPP em tempo real, Efemérides IGU, NTRIP, Redes GNSS.

ABSTRACT

Among several possible methods of GNSS positioning, it is currently in evidence those that provide real time positioning (or near real time) with accuracy near to decimeter or centimeter level. In this case, we highlight the real time PPP method, which requires the availability of real time precise orbits and corrections or errors of the satellites clocks. Currently, it is possible to use the predicted IGU ephemerides which are made available by the IGS centers. However, the satellites clocks corrections available in the IGU do not present enough accuracy ($3 \text{ ns} \cong 0.9 \text{ m}$) to accomplish real time PPP with the level of centimeter accuracy. Therefore, it is necessary to research and develop appropriate methodologies for estimating the satellite clock corrections in real time with better quality for real time PPP application. The estimation of satellite clock corrections can be performed based on a GNSS network of reference. In this PhD thesis, the methodology used to estimate these corrections is based on the adjustment of data in the PPP mode for stations of a GNSS network. Thus, all systematic effects involved with the GNSS satellite signals must be modeled appropriately for each station of the network, being this strategy named as network PPP. Once estimated the corrections of the satellite clocks in real time, it should be sent to the user, which will use them for application in the GNSS data processing from a particular station in real time PPP mode. The main objective of this PhD project is to research and provide a methodology for estimating the GNSS satellite clocks corrections in real time in the context of a GNSS network, as well as applying these corrections to the real time PPP. To achieve these objectives, we developed a system composed by two softwares, being one for estimating the satellite clock corrections based on data from a GNSS network and the other for the realization of the real time PPP. The results were generated in real time and post-processed mode (simulating real time). The estimate of the satellites clocks corrections was generated based on the measurements of the pseudorange smoothed by carrier phase and also using the undifferenced pseudorange and phase with ambiguities estimation for each satellite available at each station. The daily precision of the estimated satellite clock corrections reached the order of $0.15 \text{ ns} (\cong 0,05 \text{ m})$ and the application in the GNSS positioning shows that is possible to accomplish real time PPP in the kinematic mode with accuracy of the order of 10 to 20 cm.

Keywords: Satellite clock correction, Real time PPP, IGU ephemeris, NTRIP, GNSS networks.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|-----|
| Figura 1 - Projeção plana da constelação GPS | 48 |
| Figura 2 - Potência de densidade espectral do sinal L1 | 53 |
| Figura 3 - EMQ diário para a posição transmitidas dos satélites (dia 27/11/2011)..... | 65 |
| Figura 4 - Erro 3D das órbitas preditas IGU | 66 |
| Figura 5 - Efeito devido a rotação da Terra | 69 |
| Figura 6 - DCBs P1-C1 para a constelação GPS no ano de 2011 | 72 |
| Figura 7 - DCBs P1-P2 para a constelação GPS no ano de 2011..... | 73 |
| Figura 8 - DCBs P2-C2 para a constelação GPS no ano de 2011 | 73 |
| Figura 9 - Variação do centro de fase e ponto de referência da antena do receptor..... | 75 |
| Figura 10 - Esquema de uma câmara anecoica de calibração (<i>anechoic chamber</i>) | 76 |
| Figura 11 - Robô para calibração absoluta em campo de antenas GNSS | 77 |
| Figura 12 - Sistema de referência centrado no satélite (Bloco IIA) | 78 |
| Figura 13 - PCV absoluto na frequência L1 em função do ângulo de elevação e azimute (antena: AOAD/MT - NONE)..... | 80 |
| Figura 14 - PCV absoluto L1 e L2 em função do ângulo de elevação (antena: AOAD/MT - NONE) | 80 |
| Figura 15 - Ondas eletromagnéticas | 81 |
| Figura 16 - Regiões atmosféricas | 83 |
| Figura 17 - Histórico do número de manchas solares (ciclos solares)..... | 86 |
| Figura 18 - Predição do número de manchas (ciclo solar 24)..... | 86 |
| Figura 19 - Efeito ionosférico inclinado a partir do modelo de Klobuchar (Estação SJRP 2011) | 89 |
| Figura 20 - Efeito ionosférico na direção receptor-satélite com base no GIM (Estação SJRP 2011) | 90 |
| Figura 21 - Componentes do atraso troposférico calculadas pelo modelo de Hopfield | 97 |
| Figura 22 - Efeitos de marés de corpos terrestres para a estação PPTE | 105 |
| Figura 23 - Função de autocorrelação (a) e função de densidade espectral (b) para o processo de Gauss-Markov..... | 120 |
| Figura 24 - Erro do relógio do satélite a partir de DDs entre satélites e entre épocas..... | 136 |
| Figura 25 - Esquematisação do PPP em rede para a estimativa do erro do relógio do satélite | 139 |
| Figura 26 - Matriz design para o PPP em rede | 140 |
| Figura 27 - Fluxograma do RT_PPP em tempo real..... | 149 |
| Figura 28 - Fluxograma do RT_SAT_CLOCK..... | 152 |
| Figura 29 - Série temporal dos “erros” em altitude nos processamentos com código C/A ... | 158 |
| Figura 30 - Série temporal do erro 3D no PPP estático utilizando simples frequência (estação BRAZ - 2009)..... | 160 |
| Figura 31 - Efeito ionosférico estimado no caso PPP utilizando simples frequência | 161 |
| Figura 32 - Índices Kp e K para o dia 08/06/2003 | 162 |
| Figura 33 - Série temporal dos “erros” SGL no PPP estático utilizando simples frequência (estação UEPP 2003) | 163 |
| Figura 34 - Série temporal das precisões no SGL do PPP estático utilizando simples frequência (estação UEPP 2003) | 164 |
| Figura 35 - ZTD advindos de modelos de PNT e estimados no PPP no modo estático (PPTE - 2008) | 166 |
| Figura 36 - Série temporal dos “erros” no SGL para o PPP no modo estático utilizando dupla frequência - (estação BRAZ - 2009)..... | 167 |

| | |
|--|-----|
| Figura 37 - Precisão da estimativa do PPP no modo estático utilizando dupla frequência (estação BRAZ - 2009) | 168 |
| Figura 38 - Resíduos do código e da fase na solução PPP no modo estático utilizando dupla frequência | 169 |
| Figura 39 - Localização das estações com dados processados no PPP..... | 169 |
| Figura 40 - Erros 2D e 3D ao final do processamento dos dados no modo PPP estático para diversas estações..... | 170 |
| Figura 41 - Séries temporais dos “erros” no SGL para o PPP no modo cinemático | 171 |
| Figura 42 - Potência de Densidade Espectral da correção do relógio do satélite PRN03 | 173 |
| Figura 43 - Variância de Allan para os satélites da constelação GPS e para as estações ALGO e YELL | 174 |
| Figura 44 - Variância de Allan com a reta ajustada..... | 175 |
| Figura 45 - Séries temporais dos “erros” dos relógios dos satélites PRN03 e PRN10 (Bloco IIA)..... | 175 |
| Figura 46 - Resíduos do ajustamento do polinômio à correção do relógio do satélite (Bloco IIA)..... | 176 |
| Figura 47 - Séries temporais dos “erros” dos relógios dos satélites PRN 11 e PRN12 (Blocos IIR e IIRM)..... | 176 |
| Figura 48 - Resíduos do ajustamento do polinômio à correção do relógio do satélite (Blocos IIR e IIRM)..... | 177 |
| Figura 49 - Visibilidade dos satélites GPS na estação PPTE..... | 180 |
| Figura 50 - Ângulo de elevação dos satélites na estação PPTE (02/12/2011) | 180 |
| Figura 51- Configuração considerando 20, 30 e 40 estações ao redor do mundo..... | 181 |
| Figura 52 - Precisão média diária da correção do relógio para cada satélite (20, 30 e 40 estações) | 182 |
| Figura 53 - Série temporal das correções estimadas dos relógios, das IGU e do IGS (PRN 30) | 184 |
| Figura 54 - Erros das correções estimadas sem remoção da tendência | 185 |
| Figura 55 - Série temporal das correções estimadas dos relógios e do IGS (PRN 25)..... | 186 |
| Figura 56 - “Erros” das correções dos relógios estimadas em relação ao IGS com tendência removida..... | 187 |
| Figura 57 - Precisão diária do “erro” dts estimado para cada satélite (código suavizado pela fase)..... | 187 |
| Figura 58 - Correção estimada do relógio do receptor da estação ALGO | 189 |
| Figura 59 - “Erros” das correções estimadas sem remoção da tendência (injunção: ALGO) | 189 |
| Figura 60 - Erros das correções estimadas com a tendência removida (injunção: ALGO) ... | 190 |
| Figura 61 - Valores estimados do ZTD para cada estação (solução com código suavizado pela fase)..... | 191 |
| Figura 62 - Valores do ZTD advindos do modelo europeu (solução com código suavizado pela fase) | 192 |
| Figura 63 - Série temporal das correções estimadas e das correções finais do IGS para os satélites PRN 07, 15, 23 e 30 (dia 244 de 2009) | 194 |
| Figura 64 - Série temporal das precisões das correções dos relógios dos satélites - solução com código e fase (dia 244 de 2009) | 195 |
| Figura 65 - Precisão formal média diária das correções dos relógios - solução com código e fase (dia 244 de 2009)..... | 195 |
| Figura 66 - Erros do dts estimado em relação ao IGS sem remoção da tendência - solução com código e fase (dia 244 de 2009)..... | 196 |
| Figura 67 - Erros em relação às correções finais do IGS com tendência removida - código e fase (dia 244 de 2009)..... | 197 |

| | |
|--|-----|
| Figura 68 - Precisão do erro dts em relação à correção do IGS - solução com código e fase (dia 244 de 2009)197 | |
| Figura 69 - Precisão formal do ajustamento par o dts estimado no dia 10 de 2012..... | 198 |
| Figura 70 - Erros em relação às correções finais do IGS com tendência removida - código e fase (dia 10 de 2012)..... | 199 |
| Figura 71 - Precisão do erro dts em relação à correção do IGS - solução com código e fase (dia 10 de 2012)..... | 199 |
| Figura 72 - “Erros” no SGL no modo PPP cinemático em tempo real para a estação PPTE (10/04/2011)..... | 202 |
| Figura 73 - Precisões no SGL para o PPP modo cinemático em tempo real na estação PPTE (10/04/2011)..... | 202 |
| Figura 74 - EMQ resultante (2D e 3D) para o PPP cinemático em tempo real na estação PPTE (10/04/2011)..... | 203 |
| Figura 75 - Ambiguidades estimadas no PPP cinemático em tempo real (10/04/2011)..... | 203 |
| Figura 76 - Precisões das ambiguidades estimadas no PPP cinemático em tempo real (10/04/2011)..... | 204 |
| Figura 77 - Precisões das coordenadas no modo PPP estático em tempo real (19 e 20 de janeiro de 2012)..... | 205 |
| Figura 78 - ZTD estimado em tempo real pelo <i>software</i> RT_PPP no modo PPP estático (19 e 20 de janeiro de 2012)..... | 205 |
| Figura 79 - Precisão do ZTD no PPP estático em tempo real (19 e 20 de jan. de 2012)..... | 206 |
| Figura 80 - Erros no PPP cinemático em tempo real para a estação LGE2 (14 e 15 de fevereiro de 2012)..... | 207 |
| Figura 81 - Precisão das coordenadas estimadas no PPP cinemático da estação LGE2 (14 e 15 de fevereiro de 2012)..... | 208 |
| Figura 82 - Correção do relógio do satélite interpolada da IGU para taxa de 30 s..... | 209 |
| Figura 83 - Correção do relógio do satélite PRN 25 interpolado da IGU para taxa de 30 s.. | 210 |
| Figura 84 - Erros no PPP cinemático utilizando posição dos satélites e relógios da IGU..... | 211 |
| Figura 85 - Erros no PPP cinemático utilizando posição dos satélites da IGU e correção do relógio pelo RT_SATCLOCK no modo PD suavizada pela fase..... | 212 |
| Figura 86 - Erros no PPP cinemático utilizando posição dos satélites da IGU e correção do relógio pelo RT_SATCLOCK no modo código e fase..... | 212 |
| Figura 87 - Erros no PPP cinemático com órbitas e correções finais dos relógios dos satélites do IGS..... | 212 |
| Figura 88 - Precisões estimadas pelo RT_PPP - “IGU + clk PD e Fase” e “IGS + clk final” | 213 |
| Figura 89 - Erros no SGL para o PPP cinemático “IGS + clk final” e “IGS + clk RT_SAT_CLOCK”..... | 214 |
| Figura 90 - Erros 2D e 3D para o PPP cinemático “IGS + clk final” e “IGS + clk RT_SAT_CLOCK”..... | 215 |
| Figura 91 - Trajetória percorrida pelo avião no vôo do dia 244 de 2009..... | 216 |
| Figura 92 - Precisões das coordenadas do avião (vôo da Embraer) estimadas pelo <i>software</i> GPSPPP..... | 216 |
| Figura 93 - Altitude geométrica do avião em trajetória estimada pelo <i>software</i> RT_PPP.... | 217 |
| Figura 94 - ZTD estimado pelos <i>softwares</i> GPSPPP e RT_PPP para o vôo da aeronave..... | 218 |
| Figura 95 - Discrepância 2D e 3D das coordenadas do avião no PPP utilizando correção do relógio estimada pelo RT_SAT_CLOCK..... | 218 |
| Figura 96 - Precisões das coordenadas do avião estimadas pelo RT_PPP..... | 219 |
| Figura 97 - Sistema NTRIP..... | 238 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 1 - Acurácia atual dos produtos IGS | 42 |
| Tabela 2 - <i>Status</i> atual da constelação GPS | 49 |
| Tabela 3 - Frequências e respectivos comprimentos de ondas dos sinais GPS..... | 52 |
| Tabela 4 - Sumário das características dos sinais GPS..... | 54 |
| Tabela 5 - Relação entre o gráfico de potência espectral e o gráfico de variância de Allan.... | 59 |
| Tabela 6 - Contribuição dos erros nas medidas de pseudodistância GPS..... | 108 |
| Tabela 7 - Modelagem matemática dos efeitos sistemáticos implementada no <i>software</i> RT_PPP | 147 |
| Tabela 8 - Dimensões das matrizes no ajustamento | 151 |
| Tabela 9 - Estatísticas dos “erros” em altitude - PPP utilizando somente código (unidades de metros)..... | 158 |
| Tabela 10 - Erros ao final do processamento estático PPP utilizando simples frequência.... | 160 |
| Tabela 11 - EMQ ao final do processamento PPP para a estação UEPP (2003)..... | 164 |
| Tabela 12 - Erros e incertezas ao final do processamento PPP no modo estático - BRAZ (dupla frequência)..... | 168 |
| Tabela 13 - EMQ diário dos “erros” no SGL para o PPP cinemático | 171 |
| Tabela 14 - Ruído do processo | 178 |
| Tabela 15 - Precisão das medidas | 178 |
| Tabela 16 - Informações relativas ao uso de diferentes configurações para a rede GNSS.... | 183 |
| Tabela 17 - Estatísticas diárias do PPP cinemático utilizando somente IGU | 211 |
| Tabela 18 - Estatísticas diárias do PPP cinemático simulando tempo real | 213 |
| Tabela 19 - Estatística do PPP cinemático “IGS + clk final” e “IGS + clk RT_SAT_CLOCK” | 215 |
| Tabela 20 - Estatísticas do PPP para o vôo da aeronave..... | 219 |
| Tabela 21 - Mensagens do grupo RTK | 242 |
| Tabela 22 - Conteúdo do cabeçalho das mensagens tipo 1001, 1002, 1003, e 1004..... | 243 |
| Tabela 23 - Conteúdo de uma porção da mensagem tipo 1004 para cada satélite | 243 |
| Tabela 24 - Tipos de mensagens adicionadas a versão do RTCM 3.x | 244 |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

| | |
|-----------|---|
| AIUB | – <i>Astronomical Institute of the University of Berne</i> |
| ARP | – <i>Antenna Reference Point</i> |
| ASCII | – <i>American Standard Code for Information Interchange</i> |
| BKG | – <i>Federal Agency for Cartography and Geodesy</i> |
| BNC | – <i>BKG NTRIP Client</i> |
| BNS | – <i>BKG NTRIP State Space Server</i> |
| BOC | – <i>Binary Offset Carrier</i> |
| BPSK | – <i>Binary Phase Shift Keying</i> |
| CDMA | – <i>Code Division Multiple Access</i> |
| CL | – <i>Civil Long</i> |
| CM | – <i>Civil Moderate</i> |
| CNR | – <i>carrier-to-noise</i> |
| CODE | – <i>Center for Orbit Determination for Europe</i> |
| CORS | – <i>Continuously Operating Reference Station</i> |
| CPTEC | – <i>Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos</i> |
| CRC | – <i>Checação de Redundância Cíclica</i> |
| DCB | – <i>Differential Code Bias</i> |
| DD | – <i>Dupla Diferença</i> |
| DGPS | – <i>Differential GPS</i> |
| DGPS/GNSS | – <i>Differential GPS/GNSS</i> |
| DIA | – <i>Detecção, Identificação e Adaptação</i> |
| DoD | – <i>Department of Defense</i> |
| DOP | – <i>Dilution of Precision</i> |
| DOT | – <i>Department of Transportation</i> |
| DSS | – <i>Direct Sequence Spread Spectrum</i> |
| ECI | – <i>Earth Centered Inertial Frame</i> |
| ECMWF | – <i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i> |
| EMQ | – <i>Erro Médio Quadrático</i> |
| ESA | – <i>European Space Agency</i> |
| ESOC | – <i>European Space Operations Center</i> |
| EUREF | – <i>European Reference Frame</i> |
| FCT | – <i>Faculdade de Ciências e Tecnologia</i> |
| FDMA | – <i>Frequency Division Multiple Access</i> |
| GDGPS | – <i>Global Differential GPS</i> |
| GFZ | – <i>GeoForschungsZentrum</i> |
| GIM | – <i>Global Ionosphere Maps</i> |
| GIOVE-A | – <i>Galileo In-Orbit Validation Element-A</i> |
| GLONASS | – <i>GLOBAL'naya NAVigatsionnaya Sputnikovaya Sistema</i> |
| GMF | – <i>Global Mapping Function</i> |
| GNSS | – <i>Global Navigation Satellite System</i> |
| GOP | – <i>Geodetic Observatory Pecny</i> |

| | |
|--------------|--|
| GPS | – <i>Global Positioning System</i> |
| GPT | – <i>Global Pressure and Temperature</i> |
| GSOC | – <i>German Space Operations Center</i> |
| HTTP | – <i>HyperText Transfer Protocol</i> |
| IAG | – <i>International Association of Geodesy</i> |
| IBGE | – <i>Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística</i> |
| IGS | – <i>International GNSS Service</i> |
| IGS-RTPPP | – <i>IGS Real Time Pilot Project</i> |
| INPE | – <i>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais</i> |
| IOV | – <i>In-Orbit Validation</i> |
| ITRF | – <i>International Terrestrial Reference Frame</i> |
| JPL | – <i>Jet Propulsion Laboratory</i> |
| LEO | – <i>Low Earth Orbit</i> |
| LOM | – <i>Local Overall Model</i> |
| MMQ | – <i>Método dos Mínimos Quadrados</i> |
| MVC | – <i>Matriz de Variância e Covariância</i> |
| NRCan | – <i>Natural Resources Canada</i> |
| NTRIP | – <i>Networked Transport of RTCM via Internet Protocol</i> |
| OSI | – <i>Open Systems Interconnection</i> |
| PCO | – <i>Phase Center Offsets</i> |
| PCV | – <i>Phase Center Variation</i> |
| PD | – <i>Pseudodistância</i> |
| PNT | – <i>Previsão Numérica do Tempo</i> |
| PPGCC | – <i>Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas</i> |
| PPP | – <i>Posicionamento por Ponto Preciso</i> |
| PRN | – <i>Pseudo-Random Noise</i> |
| QPSK | – <i>Quadrature Phase Shift Keying</i> |
| RBMC | – <i>Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo</i> |
| RINEX | – <i>Receiver INdependent EXchange format</i> |
| RTCM | – <i>Radio Technical Commission for Maritime Services</i> |
| RTIGS | – <i>Real Time IGS</i> |
| RTG | – <i>Real Time GIPSY</i> |
| RTK | – <i>Real Time Kinematic</i> |
| RTPPP | – <i>Real Time Precise Point Positioning</i> |
| RT_PPP | – <i>Real Time PPP</i> |
| RT_SAT_CLOCK | – <i>Real Time Satellite Clock</i> |
| SA | – <i>Selective Availability</i> |
| SBAS | – <i>Space Based Augmentation Systems</i> |
| SGL | – <i>Sistema Geodésico Local</i> |
| SI | – <i>Sistema Internacional</i> |
| SIO | – <i>Scripps Institution of Oceanography</i> |
| SP3 | – <i>Standard Product #3</i> |
| STEC | – <i>Slant TEC</i> |
| SVN | – <i>Space Vehicle Number</i> |

| | |
|--------|--|
| TAI | – Tempo Atômico Internacional |
| TCP/IP | – <i>Transfer Control Protocol/Internet Protocol</i> |
| TEC | – <i>Total Electron Content</i> |
| TECU | – <i>TEC-Unit</i> |
| TGD | – <i>Timing Group Delay</i> |
| TKS | – <i>Time Keeping System</i> |
| ToW | – <i>Time of Week</i> |
| TS | – Tempo Sideral |
| TU | – Tempo Universal |
| UNESP | – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” |
| USNO | – <i>United States Naval Observatory</i> |
| UTC | – <i>Universal Time Coordinate</i> |
| VCXO | – <i>Voltage Controlled Crystal Oscillator</i> |
| VMF | – <i>Vienna Mapping Function</i> |
| VTEC | – <i>Vertical TEC</i> |
| WGS84 | – <i>World Geodetic System 1984</i> |
| ZTD | – <i>Zenital Tropospheric Delay</i> |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|------------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 37 |
| 1.1 | Objetivos | 40 |
| 1.2 | Justificativa | 40 |
| 1.3 | Estado da arte | 41 |
| 1.4 | Conteúdo da tese | 44 |
| 2 | INTRODUÇÃO AO GNSS | 45 |
| 2.1 | Descrição da constelação de satélites GPS | 47 |
| 2.2 | Características dos sinais GPS | 51 |
| 2.3 | Introdução ao conceito de relógios atômicos | 55 |
| 2.3.1 | Análise da estabilidade de relógios atômicos | 57 |
| 3 | OBSERVAÇÕES GNSS E EFEITOS SISTEMÁTICOS | 60 |
| 3.1 | Equações de pseudodistância e fase | 60 |
| 3.2 | Efeitos sistemáticos relacionados com o satélite e o receptor | 63 |
| 3.2.1 | Órbita do satélite | 63 |
| 3.2.2 | Erro do relógio do satélite e efeitos de relatividade | 66 |
| 3.2.3 | Correção devido à rotação da Terra | 69 |
| 3.2.4 | Atraso do <i>hardware</i> do satélite e do receptor | 70 |
| 3.2.5 | Variação do centro de fase da antena do receptor e do satélite | 74 |
| 3.2.6 | Correção fase <i>windup</i> | 81 |
| 3.3 | Efeitos sistemáticos relacionados com a propagação do sinal na atmosfera | 83 |
| 3.3.1 | Ionosfera | 84 |
| 3.3.1.1 | Modelagem da ionosfera no posicionamento geodésico | 87 |
| 3.3.2 | Troposfera | 93 |
| 3.3.2.1 | Modelagem da troposfera no posicionamento geodésico | 95 |
| 3.3.2.2 | Funções de mapeamento | 99 |
| 3.3.3 | Perdas de ciclos | 102 |
| 3.4 | Efeitos sistemáticos relacionados com a estação | 103 |
| 3.4.1 | Marés terrestres | 104 |
| 3.4.2 | Carga de marés oceânicas | 106 |
| 3.5 | Contribuição dos erros nas medidas GNSS | 107 |
| 4 | AJUSTAMENTO DE OBSERVAÇÕES | 109 |
| 4.1 | Ajustamento recursivo | 109 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 4.2 | Filtro de Kalman..... | 113 |
| 4.2.1 | Predição | 116 |
| 4.2.2 | Filtragem..... | 117 |
| 4.3 | Introdução aos processos aleatórios e aplicação no Filtro de Kalman discreto .. | 118 |
| 4.3.1 | Modelos de correlação..... | 119 |
| 4.4 | Controle de qualidade..... | 122 |
| 4.4.1 | Detecção | 123 |
| 4.4.2 | Identificação..... | 124 |
| 4.4.3 | Adaptação | 124 |
| 5 | MODELOS MATEMÁTICOS ENVOLVIDOS NO PPP..... | 126 |
| 5.1 | Modelo funcional | 126 |
| 5.2 | Modelo estocástico | 129 |
| 5.3 | Estimativa estocástica do efeito ionosférico | 130 |
| 5.4 | Sistema Geodésico Local e DOP..... | 132 |
| 6 | ESTIMATIVA DA CORREÇÃO DO RELÓGIO DO SATÉLITE | 135 |
| 6.1 | Correção do relógio do satélite com base na observável Dupla Diferença | 136 |
| 6.2 | Correção do relógio do satélite a partir do método PPP em rede | 138 |
| 6.3 | Predição do erro do relógio do satélite utilizando polinômios | 142 |
| 7 | DESENVOLVIMENTO DOS SOFTWARES..... | 145 |
| 7.1 | RT_PPP..... | 146 |
| 7.2 | RT_SAT_CLOCK | 150 |
| 8 | EXPERIMENTOS REALIZADOS, RESULTADOS E ANÁLISES..... | 155 |
| 8.1 | Avaliação do PPP no modo pós-processado..... | 156 |
| 8.1.1 | PPP para dados de simples frequência utilizando o código..... | 157 |
| 8.1.2 | PPP para dados de simples frequência utilizando código e fase..... | 159 |
| 8.1.3 | PPP para dados de dupla frequência | 165 |
| 8.1.3.1 | Modo estático..... | 165 |
| 8.1.3.2 | Modo cinemático..... | 170 |
| 8.2 | Análise da estimativa das correções dos relógios dos satélites | 172 |
| 8.2.1 | Análise da estabilidade e do modelo de predição para as correções dos relógios dos satélites GPS | 172 |
| 8.2.2 | Estimativa da correção do relógio do satélite com código suavizado pela fase .. | 177 |
| 8.2.2.1 | Análise da estrutura da rede GNSS para a estimativa das correções dos relógios dos satélites | 179 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 8.2.2.2 | Avaliação da estimativa das correções dos relógios | 183 |
| 8.2.3 | Estimativa da correção do relógio do satélite com código e fase | 193 |
| 8.3 | RT_PPP utilizando as correções de relógios estimadas para tempo real | 200 |
| 8.3.1 | PPP em tempo real | 200 |
| 8.3.1.1 | PPP cinemático para a estação PPTE (conexão via <i>caster</i>) | 201 |
| 8.3.1.2 | PPP estático para a estação LGE2 (conexão via porta serial) | 204 |
| 8.3.1.3 | Problemas que ocorrem nas aplicações de PPP em tempo real | 206 |
| 8.3.2 | PPP simulando tempo real com solução gerada pelo RT_SAT_CLOCK..... | 208 |
| 8.3.2.1 | PPP cinemático utilizando as correções do RT_SAT_CLOCK | 210 |
| 8.3.2.2 | PPP para vôo de aeronaves utilizando as correções do RT_SAT_CLOCK. | 215 |
| 9 | CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES..... | 221 |
| | REFERÊNCIAS..... | 226 |
| | APÊNDICE A | 237 |

1 INTRODUÇÃO

O posicionamento GNSS (*Global Navigation Satellite System*) em tempo real pode ser realizado através do método RTK (*Real Time Kinematic*) ou RTK em rede, do DGPS/GNSS (*Differential GPS/GNSS*) ou através do RTPPP (*Real Time Precise Point Positioning*). O RTK e o DGPS requerem o uso de dois receptores GNSS e link de comunicação. No caso do RTK em rede, faz-se uso de uma rede de estações GNSS de referência (MONICO, 2008; ALVES, 2008).

O PPP em tempo real, diferentemente do RTK e DGPS, requer o uso de somente um receptor ao nível de usuário GNSS, porém todos os erros envolvidos com as observações do GNSS devem ser adequadamente modelados para a obtenção de coordenadas com boa qualidade. A aplicação do RTPPP requer a disponibilidade em tempo real de órbitas precisas e das correções ou erros dos relógios dos satélites (não sincronização do relógio do satélite com o sistema de tempo GNSS) com boa qualidade para posicionamento com acurácia de ordem decimétrica (HAUSCHILD, 2010).

Nos últimos anos, a comunidade científica internacional tem reunido esforços no sentido de aprimorar a estrutura para a realização do PPP (Posicionamento Por Ponto Preciso) em tempo real, podendo-se citar, por exemplo, o projeto piloto do IGS (*International GNSS Service*) para tempo real (<http://www.rtigs.net> - Acesso em: jan. 2012) ou o projeto GNSS em tempo real da EUREF (*European Reference Frame*) para geração das correções dos relógios e órbitas dos satélites em tempo real (www.epncb.oma.be/euref_IP/ - Acesso em: jan. 2012).

Com o avanço das pesquisas, o método de PPP em tempo real, pode se tornar uma ferramenta importante aos usuários e auxiliar em vários tipos de aplicações, como por exemplo, determinação de órbitas de satélites LEO (*Low Earth Orbit*), locação de obras, apoio geodésico e topográfico, suporte para aplicações científicas, tais como a estimativa do atraso zenital troposférico em tempo real, e outras (SEEBER, 2003; LEICK, 2004; SAPUCCI, 2005; WEBER; MERVAT; DOUSA, 2007; HAUSCHILD; MONTENBRUCK, 2008; MONICO, 2008).

Para o usuário GNSS, o método requer o uso de um receptor e conexão com a internet para o recebimento das correções dos relógios dos satélites. No entanto, é importante ressaltar que a aplicação do RTPPP exige o uso de dados de uma rede global GNSS, uma vez que as órbitas, correções dos relógios dos satélites e outros, devem ser estimados para serem utilizados em tempo real.

Com relação às órbitas em tempo real, o IGS disponibiliza as efemérides preditas denominadas IGU. As posições preditas dos satélites (órbitas) contidas nas efemérides IGU apresentam, atualmente, acurácia da ordem de 5 cm, porém, as correções dos relógios dos satélites contidas nestas efemérides apresentam, atualmente, acurácia da ordem de 3 ns (aproximadamente 0,9 m) como divulgado pelo IGS (IGS, 2012), valor esse que não é suficiente para a estimativa de coordenadas com acurácia decimétrica no PPP. Sendo assim, é necessário pesquisar e desenvolver uma metodologia adequada para estimar as correções dos relógios dos satélites com melhor qualidade para posicionamento em tempo real.

A estimativa das correções dos relógios dos satélites pode ser realizada com base numa rede de estações GNSS de referência. Alguns trabalhos na literatura internacional propõem a estimativa das correções dos relógios dos satélites usando observações do código ou da fase ao nível da DD (Dupla Diferença) das observáveis entre satélites e entre épocas, como pode ser visto em Han, Kwon e Jekeli (2001); Weber, Mervat e Dousa (2007). Outra proposta para a estimativa das correções dos relógios dos satélites é baseada na realização do método de PPP em rede (HAUSCHILD; MONTENBRUCK, 2008; HAUSCHILD, 2010). Nesse caso, todos os efeitos sistemáticos envolvidos com os sinais dos satélites GNSS devem ser modelados adequadamente para cada estação da rede.

A rede de estações GNSS pode ser uma rede global, como por exemplo, a rede IGS-IP operada pelo BKG (*Federal Agency for Cartography and Geodesy*) (<http://www.igs-ip.net/home>) para dar suporte ao RTIGS (*Real Time IGS*). No Brasil, atualmente, parte da rede de estações da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) está transmitindo dados em tempo real (COSTA et al., 2008; IBGE, 2012), além da Rede GNSS-SP (Rede GNSS do estado de São Paulo) (MONICO et al., 2006; MONICO et al., 2010). Essas redes transmitem os dados GNSS em tempo real via internet através do protocolo NTRIP (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*).

Dessa forma, nessa pesquisa foi proposta a investigação e a implementação de uma metodologia para estimar as correções dos relógios dos satélites em tempo real, bem como a aplicação dessas correções no método PPP em tempo real dentro do contexto de rede de estações GNSS.

A aplicação da metodologia envolveu o desenvolvimento de um sistema composto por dois *softwares*, sendo um para estimar as correções dos relógios dos

satélites em tempo real, denominado RT_SAT_CLOCK (*Real Time Satellite Clock*), e o outro para processar os dados GNSS no modo PPP em tempo real, denominado RT_PPP (*Real Time PPP*). A comunicação em rede e decodificação das medidas GNSS no formato RTCM (*Radio Technical Commission for Maritime Services*) foram desenvolvidas com base nos aplicativos disponibilizados pelo BKG.

No caso dos softwares RT_SAT_CLOCK e RT_PPP, foi implementada a estimativa com base Filtro de Kalman e aplicação do controle de qualidade DIA (Detecção, Identificação e Adaptação), bem como diversos modelos matemáticos para a correção dos efeitos envolvidos com a propagação dos sinais GNSS.

O software RT_SAT_CLOCK permite estimar as correções dos relógios dos satélites com base nas medidas de código suavizado pela fase da onda portadora ou utilizando as medidas de código e fase sem diferenciações. No primeiro caso, eliminam-se as ambiguidades, uma vez que as medidas são diferenciadas entre épocas e no segundo caso é necessário estimar as ambiguidades para cada satélite disponível em cada estação da rede, juntamente com os parâmetros de correções dos relógios e outros.

No caso do software RT_PPP, o usuário tem diversas opções de processamento dos dados, podendo realizar PPP com medidas de código e fase, para dados de receptores de simples ou dupla frequência nos modos estático e cinemático e utilizando diversas estratégias, tais como, estimar os efeitos de troposfera e ionosfera, ou a utilização de correções desses efeitos advindas de modelos.

Os resultados apresentados foram obtidos em tempo real e também no modo pós-processado (simulando tempo real). Foram realizados também levantamentos cinemáticos com aplicação em tempo real, utilizando as correções estimadas dos relógios dos satélites. Em termos de resultados, a acurácia alcançada pela estimativa das correções dos relógios foi da ordem de 0,15 ns e a aplicação dessas correções no PPP cinemático em tempo real forneceu acurácia da ordem 10 a 20 cm após a convergência do processamento. É importante ressaltar que esse desenvolvimento é pioneiro no Brasil e, uma vez que o sistema esteja totalmente implementado, o usuário terá à disposição um sistema completo para a realização do PPP em tempo real com desenvolvimento nacional, caracterizando assim um processo de inovação tecnológica.

1.1 Objetivos

Essa tese de doutorado tem como objetivos principais pesquisar e implementar uma metodologia para estimar as correções dos relógios dos satélites e realizar o PPP em tempo real com base em uma rede de estações GNSS.

1.2 Justificativa

A acurácia proporcionada pelo PPP em tempo real, bem como a praticidade para aplicações em tempo real, tem tornado esse método alvo de muitas investigações científicas na atualidade como pode ser visto, por exemplo, através do projeto piloto do IGS (*International GNSS Service*) para tempo real (IGS - Pilot Project) - www.rtigs.net. São várias as aplicações que esse método proporciona, dentre as quais se podem citar: navegação precisa de aeronaves e veículos em geral, apoio na determinação de órbitas de satélites LEO, suporte para aplicações científicas, tais como a estimativa do atraso zenital troposférico em tempo real, e outras (SEEBER, 2003; LEICK, 2004; SAPUCCI, 2005; WEBER; MERVAT; DOUSA, 2007; HAUSCHILD; MONTENBRUCK, 2008; MONICO, 2008).

Para aplicações em tempo real têm-se disponível, atualmente, as efemérides IGU, as quais apresentam acurácia da ordem de 5 cm para a posição predita dos satélites, o que atende a demanda para aplicações de PPP em tempo real com acurácia de ordem decimétrica (IGS, 2012). Com relação às correções dos relógios dos satélites contidos nas efemérides IGU, a acurácia divulgada é de aproximadamente 3 ns ($\cong 0,90$ m) e pode se degradar em função do tempo, devido à problemas na etapa de predição, o que é provocado pelo desvio de fase e efeitos randômicos no oscilador atômico dos satélites. Desta maneira, a acurácia relacionada à estimativa das correções dos relógios dos satélites não é suficiente para a obtenção de coordenadas com acurácia centimétrica no PPP.

Dessa forma, é necessário pesquisar e desenvolver uma metodologia adequada para estimar as correções dos relógios dos satélites com melhor qualidade para PPP em tempo real. Essa estimativa pode ser realizada com base numa rede de estações GNSS de referência. A estimativa das correções dos relógios dos satélites no contexto de

rede GNSS é um assunto relativamente novo na área de Geodésia e tem sido alvo de muitas investigações da comunidade científica internacional (HAUSCHILD, 2010; IGS-RTPPP, 2011; LAURICHESSE, 2011; GENG et al., 2011).

No que concerne à infraestrutura para realização do PPP em tempo real, tem-se a rede GNSS global do IGS que conta com diversas estações espalhadas ao redor do mundo. A região Brasileira está sendo, atualmente, favorecida em termos de estações GNSS a partir rede de estações da RBMC-IP juntamente com a RIBAC ou a partir da rede de estações GNSS ativas do Estado de São Paulo. Essas redes de estações transmitem os dados em tempo real via internet utilizando o protocolo NTRIP.

Considerando então, a demanda por posicionamento em tempo real, a acurácia proporcionada pelo método PPP em tempo real, bem como a estrutura que já está se tornando disponível no Brasil, verifica-se a necessidade de investigação e desenvolvimento nacional de uma metodologia adequada para estimativa das correções dos relógios dos satélites e aplicação no método PPP em tempo real.

1.3 Estado da arte

Neste tópico objetiva-se apresentar um sumário do estado da arte atual relacionado com a estimativa das correções dos relógios dos satélites GNSS e do PPP em tempo real. A partir do ano de 1996, o JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) começou a disponibilizar uma rede sobre os EUA (Estados Unidos da América) que transmitia dados GPS em tempo real. A partir do ano 2000, essa rede foi expandida para uma rede global e culminou no Sistema GPS Diferencial Global da NASA (GDGPS) (<http://www.gdgps.net/>) que é hoje uma das maiores redes globais transmitindo dados em tempo real (BERTIGER et al., 1997; BAR-SEVER et al., 2004, GDGPS, 2012). Atualmente, o JPL estima órbitas e correções dos relógios dos satélites em tempo real através do *software* RTG (*Real Time GIPSY*), além de fornecer diversos outros serviços.

A partir de novembro do ano 2000, o IGS passou a produzir os produtos ultra-rápidos (IGU) para aplicações em tempo real ou próximas do tempo real. São produzidas órbitas GNSS, correções dos relógios dos satélites, parâmetros de rotação da Terra, entre outros. Originalmente, os produtos IGU possuíam uma taxa de atualização de duas vezes ao dia, mas a partir de 2004 essa taxa de atualização passou para quatro vezes ao dia sendo às 3, 9, 15 e 21 horas UTC (*Universal Time Coordinate*). Os centros de análises que contribuem para as combinações IGU são: AIUB/COU (*Astronomical*

Institute of the University of Berne), ESOC/ESU (*European Space Operations Center*), GOP/GOU (*Geodetic Observatory Pecny*), GFZ/GFU (*GeoForschungsZentrum*) Potsdam, NRCan/EMU (*Natural Resources Canada*), SIO/SIU (*Scripps Institution of Oceanography*), USNO/USU (*United States Naval Observatory*). A redundância de dados fornecidos por estes centros visa proporcionar melhores níveis de confiabilidade e melhor acurácia na estimativa das órbitas (RAY; GRIFFITHS, 2008).

Além da órbita predita IGU, o centro IGS também produz a órbita rápida denominadas IGR (1 dia de latência) e a órbita final denominada IGS (1 a 2 semanas de latência), as quais também são denominadas de efemérides precisas. A Tabela 1 apresenta a acurácia atual dos produtos gerados pelo IGS (IGS, 2012):

Tabela 1 - Acurácia atual dos produtos IGS

| Produtos IGS | | Acurácia | Latência | Atualização | Intervalo amostral dos dados |
|-------------------------------------|---------|-----------|---------------|--------------------|------------------------------|
| Transmitido pelos satélites | Órbita | ~100 cm | Tempo real | -- | 10 seg. |
| | Relógio | ~5 ns | | | |
| Ultra-Rápida (IGU predita) | Órbita | ~5 cm | Tempo real | 03, 09, 15, 21 UTC | 15 min. |
| | Relógio | ~3 ns | | | |
| Ultra-Rápida (IGU observada) | Órbita | ~3 cm | 3 - 9 horas | 03, 09, 15, 21 UTC | 15 min. |
| | Relógio | ~0,15 ns | | | |
| Rápida (IGR) | Órbita | ~2,5 cm | 17 - 41 horas | Diária | 15 min. |
| | Relógio | ~0,075 ns | | | 5 min. |
| Final (IGS) | Órbita | ~2,5 cm | 12 - 18 dias | Semanal | 15 min. |
| | Relógio | ~0,075 ns | | | 5 min. / 30 seg. |

Fonte: IGS (2012).

Os valores de órbitas e correções dos relógios dos satélites contidos nas efemérides precisas são dados em intervalos (Intervalo amostral) de 15 minutos (ver Tabela 1), o que requer interpolação para uso no processamento de dados GNSS coletados em intervalos menores. Nesse caso, aparecem erros inerentes ao processo de interpolação dos dados, principalmente com relação às correções de relógios dos satélites, as quais apresentam comportamento estocástico (ver seção 2.3). Contudo, esse problema não é crítico no caso do uso de correções dos relógios advindos da solução final do IGS com intervalo amostral de 30 segundos para os dados.

Para a transmissão dos dados em tempo real utiliza-se, atualmente, o protocolo NTRIP, o qual foi criado para transmitir dados no formato RTCM via internet. Atualmente, existe um crescente número de estações ao redor do mundo transmitindo dados em tempo real através desse protocolo. Para aplicações de PPP em tempo real,

encontra-se em desenvolvimento a nova versão do NTRIP (versão 3.x), a qual possui campos de dados para o envio de correções de órbitas e relógios dos satélites (BKG, 2012).

A estimativa e envio das correções de órbitas e relógios em tempo real estão, atualmente, inseridas dentro do contexto do Projeto Piloto do IGS denominado IGS-RTPPP (*IGS Real Time Pilot Project*) que se iniciou em 2007. Esse projeto tem como objetivo distribuir dados e produtos GNSS em tempo real, além do monitoramento desses produtos em tempo real. Desde setembro de 2008, as órbitas e correções dos relógios dos satélites derivadas de dados em tempo real são comparadas com produtos IGS rápidos em um processo *off-line*. Os principais centros de análises que contribuem para as estimativas em tempo real são: ESA/ESOC, NRCan, DLR/GSOC (*DLR - German Space Operations Center*) e BKG. Uma vez que o projeto esteja completamente implementado, os produtos serão disponibilizados em tempo real com taxa de atualização de 10 segundos (IGS-RTPPP, 2011; HAUSCHILD, 2010). Todos os quatro centros de análises citados anteriormente adotaram estratégias de separar o processo de estimação das órbitas e relógios dos satélites. As órbitas são estimadas a partir de uma solução em lote e posteriormente preditas para estimativa das correções dos relógios em tempo real.

O BKG produz e disponibiliza atualmente as correções dos relógios dos satélites, bem como correções para as órbitas em tempo real. Essa solução faz parte do projeto piloto do IGS e do projeto GNSS em tempo real da EUREF e pode ser obtida, por exemplo, através do *software* BNS (*BKG NTRIP State Space Server*). No caso, as estimativas de órbitas e correções dos relógios são realizadas a partir do *software* RTnet (BKG, 2012) e o BNS transforma essas estimativas em correções para as efemérides transmitidas. As correções para as efemérides transmitidas são posteriormente codificadas numa versão preliminar do formato RTCM 3.x e enviadas via internet usando o protocolo NTRIP. Além do BNS, o BKG disponibiliza o *software* BNC (*BKG NTRIP Client*) que permite ao usuário receber dados GNSS e as correções para realizar o PPP em tempo real.

Atualmente, diversas pesquisas têm sido realizadas no sentido de solucionar as ambiguidades da fase como inteira no PPP em tempo real, podendo-se citar os trabalhos de Laurichesse (2010; 2011) e Geng et al. (2011). Finalmente, pode-se dizer que a técnica de PPP em tempo real é atualmente alvo de muitas investigações da comunidade científica internacional e tem apresentado relevantes avanços nos últimos anos, principalmente com os projetos do IGS e da EUREF. Uma vez que essa técnica esteja bem concretizada, suas aplicações serão muito diversificadas, podendo-se citar a

agricultura de precisão, aplicações em aviação, determinação de órbitas de satélites LEO, posicionamento geodésico em tempo real, navegação em geral, etc.

Neste trabalho foi desenvolvido um sistema completo para a realização do PPP em tempo real, o qual contempla a estimativa das correções dos relógios dos satélites utilizando dados de uma rede GNSS e a aplicação destas correções no PPP em tempo real. Desta forma, essa tese de Doutorado representa a contribuição brasileira, no contexto do PPGCC (Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas) para com o tema.

1.4 Conteúdo da tese

A tese está organizada em 9 Capítulos, de maneira que, no Capítulo 2, apresentam-se a introdução ao GNSS envolvendo a descrição da constelação GPS e conceitos de relógios atômicos.

No Capítulo 3 são apresentadas as observações GNSS, suas características e os efeitos sistemáticos envolvidos com os sinais GNSS, os quais devem ser modelados adequadamente para aplicações no PPP. No Capítulo 4, são apresentados conceitos de ajustamento de observações e o Filtro de Kalman, além do controle de qualidade DIA.

No Capítulo 5, são apresentados os modelos matemáticos para o ajustamento dos dados no modo PPP e no capítulo 6 apresentam-se os modelos matemáticos envolvidos com a estimativa das correções dos relógios dos satélites e formas para realizar a etapa de predição no Filtro de Kalman.

No Capítulo 7 são apresentados os *softwares* RT_PPP e RT_SAT_CLOCK desenvolvidos durante a pesquisa e a metodologia implementada. O Capítulo 8 apresenta os experimentos realizados, resultados e análises envolvendo a estimativa das correções dos relógios dos satélites e o processamento dos dados no método PPP em tempo real. Finalmente no Capítulo 9 são apresentadas as conclusões e recomendações.

2 INTRODUÇÃO AO GNSS

O termo GNSS foi criado em 1991 e, atualmente, refere-se aos sistemas de posicionamento globais por satélites GPS (*Global Positioning System*), GLONASS (*GLObal'naya NAVigatsionnaya Sputnikkovaya Sistema*), COMPASS/BeiDou (CNSS - *Compass Navigation Satellite System*) e Galileo, além dos sistemas de aumento (*augmentation system*) e várias outras definições como acurácia, integridade, etc. Enquanto o GPS é de responsabilidade dos EUA, a Federação da Rússia é responsável pelo GLONASS, a União Europeia pelo Galileo e a China é responsável pelo COMPASS (SEEBER, 2003).

O COMPASS está em construção pela China desde o ano de 2005 e estão previstos mais de 30 satélites em órbita transmitindo dados em três frequências. A previsão de cobertura completa de satélites é para meados do ano de 2020 (CHONG, 2009).

O Galileo encontra-se em fase de desenvolvimento pela ESA (*European Space Agency*) com a Comissão Europeia e a Indústria Europeia. O primeiro satélite desse sistema foi lançado em dezembro de 2005 e foi denominado GIOVE-A (*Galileo In-Orbit Validation Element-A*) e o lançamento do segundo satélite, denominado GIOVE-B, ocorreu no dia 27 de abril de 2008. Em 21 de outubro de 2011 foram lançados os dois primeiros de quatro satélites designados para validar o Galileo em órbita e em Terra (IOV - *In-Orbit Validation*). Os próximos dois serão lançados em 2012. Quando a fase de validação do sistema estiver completa, satélites adicionais serão lançados para alcançar a capacidade operacional do sistema (ESA, 2012).

O GLONASS teve o primeiro satélite lançado em 1982 e foi declarado operacional no início de 1996 com uma constelação de 24 satélites. Mas em decorrência da falta de lançamento de novos satélites para substituir os mais antigos ou aqueles que apresentaram problemas, o número de satélites foi diminuindo e no final de 2005 a constelação contava apenas com 12 satélites. Com a recuperação da economia russa, o GLONASS teve alta prioridade e a constelação de satélites começou a ser recomposta, primeiramente, com o lançamento de satélites modernizados GLONASS-M e posteriormente com o lançamento dos satélites GLONASS-K (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008; MONICO, 2008).

Similar ao GPS, o GLONASS foi planejado para conter no mínimo 24 satélites em órbita. As órbitas nominais dos satélites estão em três planos orbitais separadas por 120°, os satélites são igualmente espaçados em cada plano orbital com uma inclinação nominal de 64,8°. As órbitas nominais são circulares com cada raio sendo de

aproximadamente 25.500 km, o que proporciona um período orbital de aproximadamente 11 horas e 15 minutos (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008; MONICO, 2008).

A maior diferença entre os satélites GLONASS e GPS é que cada satélite GLONASS transmite na sua própria frequência e, dessa forma, a identificação dos satélites se dá pela frequência do sinal a partir da técnica denominada FDMA (*Frequency Division Multiple Acces*) (LEICK, 2004; MONICO, 2008). Porém, o sistema GLONASS também transmitirá os dados da mesma forma que o GPS, ou seja, utilizando a técnica CDMA (*Code Division Multiple Access*), o que começou com o lançamento do satélite GLONASS-K em fevereiro de 2011 (OLEYNIK, 2011).

O sistema GPS foi declarado operacional em 27 de abril de 1985 com 24 satélites em órbita, mas desde 1983 já estava sendo utilizado no posicionamento geodésico. Esse sistema foi desenvolvido pelo DoD (*Department of Defense*) dos EUA visando ser o principal sistema de navegação das forças armadas americanas. Considerando os sistemas do GNSS citados acima, o GPS, atualmente ainda é o mais utilizado pela comunidade civil. O princípio básico de navegação com o GPS consiste na medida de distância entre o usuário e no mínimo quatro satélites. Conhecendo as coordenadas dos satélites em um sistema de referência, é possível calcular as coordenadas da antena do usuário nesse mesmo sistema. Do ponto de vista geométrico, somente três satélites seriam suficientes para determinar a posição do usuário, porém, o relógio do receptor não está sincronizado com os relógios dos satélites, o que requer uma quarta observação.

O GPS consiste de três segmentos: Espacial, Controle e de Usuários. O primeiro está associado com a constelação dos satélites e seus sinais, o segundo é responsável pelo controle e manutenção do sistema e o terceiro, de usuários, envolve a comunidade civil e militar, e no geral, é muito abrangente com contínuo crescimento (MONICO, 2008).

O GPS tem sido utilizado como sistema de navegação em sua forma operacional completa por mais de uma década e, atualmente, encontra-se em fase de modernização. Durante esse período ocorreram diversos avanços tecnológicos, além do surgimento de uma demanda por melhor desempenho com relação à aplicabilidade e acurácia, seja, pela comunidade de usuários civis ou pelos militares. Além desses fatores, comparece também a competição com outros sistemas em desenvolvimento, como por exemplo, o GLONASS, Galileo e o COMPASS. Dessa forma, o programa de modernização do GPS, o qual foi oficialmente anunciado em 25 de janeiro de 1999, tem por objetivos satisfazer os requerimentos mencionados. A modernização envolve os segmentos de Controle e Espacial e,

especificamente, os sinais GPS (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008).

O processo de modernização do segmento Espacial começou em setembro de 2005 com o lançamento do primeiro satélite do Bloco IIR-M (R de *replenishment* e M de *modernized*) e, atualmente, já se tem em órbita satélites do Bloco IIF (F - *follow on*). As principais características da classe de satélites do Bloco IIR-M são o novo código civil na frequência L2 (L2C) e o novo código M nas frequências L1 e L2 que se refere ao código militar. O primeiro satélite do Bloco IIF foi lançado em maio de 2010 (ver Tabela 2). Essa classe de satélites possui o terceiro sinal civil denominado L5C, além do código militar (KAPLAN; HEGART, 2006; MONICO, 2008).

A modernização do segmento de Controle está relacionada com a redução de custos operacionais e melhoramentos no desempenho do sistema. Esses melhoramentos incluem maior tempo de atividade do satélite sem contato com o segmento de controle; atualizações das estações monitoras e novos equipamentos; iniciativa de melhoramento na acurácia das órbitas transmitidas e produtos relacionados com o GPS; entre outros (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008). Uma descrição mais detalhada da constelação de satélites GPS incluindo os satélites antigos e modernizados é apresentada na próxima seção.

2.1 Descrição da constelação de satélites GPS

A constelação de satélites GPS consiste nominalmente de 24 satélites divididos em seis planos orbitais ao redor da Terra, de forma que se têm quatro satélites em cada plano (Figura 1). O período orbital nominal de um satélite GPS é de aproximadamente 12 horas siderais. As órbitas são aproximadamente circulares e igualmente espaçadas ao longo do equador com 60° de separação e possuem uma inclinação de 55° em relação ao plano equatorial. O raio orbital (distância do satélite ao centro de massa da Terra) é de aproximadamente 26600 km. Esta configuração da constelação providencia aos usuários uma cobertura adequada de 24 horas de navegação global e capacidade para determinação de tempo (KAPLAN; HEGARTY, 2006).

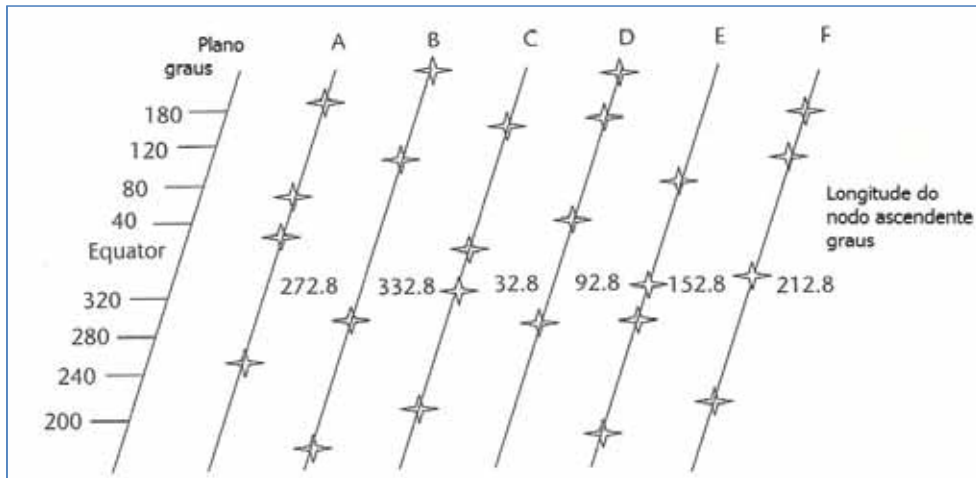


Figura 1 - Projeção plana da constelação GPS
Adaptada de Kaplan (2006).

Os satélites são referenciados por diferentes nomenclaturas podendo ser a letra de cada plano orbital (A, B, C, D, E e F) e um número (1 a 4) associado a cada satélite pertencente ao determinado plano. Outro tipo de notação é o SVN (*Space Vehicle Number*), onde cada satélite tem um determinado número designado pelo centro de Controle. Os satélites também podem ser referenciados pelo seu gerador de código PRN (*Pseudo-Random Noise*) a bordo do satélite. A Tabela 2 mostra o *status* atual da constelação de satélites GPS.

Tabela 2 - Status atual da constelação GPS

| Ordem de lançamento | PRN | SVN | Data de lançamento | Padrão de frequência | Plano |
|----------------------------|------------|------------|---------------------------|-----------------------------|--------------|
| IIA-10 | 32 | 23 | 26 nov 1990 | Rb | E5 |
| IIA-11 | 24 | 24 | 04 jul 1991 | Cs | D5 |
| IIA-14 | 26 | 26 | 07 jul 1992 | Rb | F5 |
| IIA-15 | 27 | 27 | 09 set 1992 | Cs | A4 |
| IIA-21 | 09 | 39 | 26 jun 1993 | Cs | A1 |
| IIA-23 | 04 | 34 | 26 out 1993 | Rb | D4 |
| IIA-24 | 06 | 36 | 10 mar 1994 | Rb | C5 |
| IIA-25 | 03 | 33 | 28 mar 1996 | Cs | C2 |
| IIA-26 | 10 | 40 | 16 jul 1996 | Cs | E3 |
| IIA-27 | 30 | 30 | 12 set 1996 | Cs | B2 |
| IIA-28 | 08 | 38 | 06 nov 1997 | Cs | A3 |
| IIR-2 | 13 | 43 | 23 jul 1997 | Rb | F3 |
| IIR-3 | 11 | 46 | 07 out 1999 | Rb | D2 |
| IIR-4 | 20 | 51 | 11 mai 2000 | Rb | E1 |
| IIR-5 | 28 | 44 | 16 jul 2000 | Rb | B3 |
| IIR-6 | 14 | 41 | 10 nov 2000 | Rb | F1 |
| IIR-7 | 18 | 54 | 30 jan 2001 | Rb | E4 |
| IIR-8 | 16 | 56 | 29 jan 2003 | Rb | B1 |
| IIR-9 | 21 | 45 | 31 mar 2003 | Rb | D3 |
| IIR-10 | 22 | 47 | 21 dez 2003 | Rb | E2 |
| IIR-11 | 19 | 59 | 20 mar 2004 | Rb | C3 |
| IIR-12 | 23 | 60 | 23 jun 2004 | Rb | F4 |
| IIR-13 | 02 | 61 | 06 nov 2004 | Rb | D1 |
| IIR-14M | 17 | 53 | 26 set 2005 | Rb | C4 |
| IIR-15M | 31 | 52 | 25 set 2006 | Rb | A2 |
| IIR-16M | 12 | 58 | 17 nov 2006 | Rb | B4 |
| IIR-17M | 15 | 55 | 17 out 2007 | Rb | F2 |
| IIR-18M | 29 | 57 | 20 dez 2007 | Rb | C1 |
| IIR-19M | 07 | 48 | 15 mar 2008 | Rb | A6 |
| IIR-20M | 01 | 49 | 24 mar 2009 | Rb | B6 |
| IIR-21M | 05 | 50 | 17 ago 2009 | Rb | E6 |
| IIF-1 | 25 | 62 | 28 mai 2010 | Rb | B2 |
| IIF-2 | 01 | 63 | 16 jul 2011 | Rb | D2-A |

Fonte :<ftp://tycho.usno.navy.mil/pub/gps/gpsb2.txt> (Acesso em: jan. de 2012).

Os satélites GPS transportam a bordo relógios com padrão de frequência atômica (ou oscilador atômico) e, atualmente, podem ser divididos em satélites dos Blocos I, II, IIA, IIR/IIRM e IIF.

Os primeiros satélites GPS a serem lançados foram os do Bloco I, sendo que o último satélite desse bloco foi desativado no final de 1995. Somente onze satélites desse bloco foram lançados e serviram para validar o conceito inicial do GPS. Os primeiros satélites carregavam padrões de frequência exclusivamente de rubídio (Rb). Em 1983, o primeiro padrão de frequência de césio foi implementado no SVN 8 (PRN 11) do Bloco I.

Os satélites do bloco I foram incorporados, primeiramente, com o padrão de frequência de rubídio em função do longo tempo que levou para o desenvolvimento do padrão de césio (Cs). O padrão de frequência de Rb possuía diversas características que fazia dele uma escolha óbvia para a geração precisa de tempo. Ele era menor, mais leve e sua história

sugeria que ele poderia ser mais confiável do que o novo padrão de frequência de Cs. Apesar dessas vantagens, o padrão de frequência de Rb possuía alguns inconvenientes, ou seja, era sensível a temperatura e necessitava ocasionalmente de intervenção do segmento de controle para manter a frequência. Sua estabilidade para o caso de longo período (longo termo) era pobre, o que dificultava a capacidade de navegação estendida (sem intervenção do segmento de controle). Dessa forma, o GPS necessitava de um padrão com melhor estabilidade de longo termo (no caso o Cs), o que é essencial para navegação estendida, assegurando cobertura de satélites em caso de problemas com o segmento de controle (DIETER; HATTEN, 1995; HAUSCHILD, 2010).

Os últimos satélites do Bloco I foram então equipados com os dois padrões de frequência, ou seja, Rb e Cs e até os hoje os satélites possuem, geralmente, os dois padrões de frequência. Alguns desses satélites operaram por mais que o dobro do tempo devida útil esperado, que no caso, era de cinco anos (KAPLAN; HEGARTY, 2006).

Os satélites do Bloco II foram os primeiros operacionais da constelação GPS e o primeiro lançamento foi no ano de 1989. Nesta geração de satélites foi incorporada a Disponibilidade Seletiva (AS - *Selective Availability*) que é uma técnica para degradação da acurácia da solução de posicionamento para usuários civis. Os satélites do Bloco II foram equipados com múltiplo padrão de frequência (Rb e Cs). O tempo de vida média dos satélites desse bloco foi de 11,8 anos, sendo que o SVN 15 durou aproximadamente 15 anos (KAPLAN; HEGARTY, 2006). Atualmente, não se tem mais satélites do Bloco II em uso pelo GPS.

O primeiro satélite do Bloco IIA foi lançado em novembro de 1990 e o último em 1997. O sistema de tempo atômico desses satélites era idêntico ao seu antecessor com padrões de frequência de Cs e de Rb e, atualmente, ainda existem satélites deste bloco em operação (ver Tabela 2, p. 49).

Os satélites do Bloco IIR começaram a ser desenvolvidos em 1989 para substituir os satélites dos Blocos II e IIA. Existem duas versões de satélites do Bloco IIR: o clássico IIR com seu padrão de frequência avançado e o modernizado IIR-M. O padrão de frequência é baseado em Rb e o sistema de tempo origina de voltagem controlada por oscilador de cristal (VCXO - *Voltage Controlled Crystal Oscillator*), cuja frequência é controlada por um relógio atômico de Rb. Ambos os satélites IIR e IIR-M possuem o TKS (*Time Keeping System*) que é responsável pela estabilização e controle do relógio. Os satélites do Bloco IIR-M estão em operação desde setembro de 2005 e oferecem sinais adicionais tais

como o novo código civil L2C na frequência L2 e o novo código M (militar) nas frequências L1 e L2.

O PRN 25 foi o primeiro satélite lançado do Bloco IIF em maio de 2010 (ver Tabela 2, p. 49). O segundo satélite desse bloco foi o PRN 01 lançado em julho de 2011 e apresentou atrasos na operação de ativação, mas foi declarado saudável em 14 de outubro de 2011. O atraso em colocar o satélite em serviço foi devido aos testes realizados no padrão de frequência de Cs. Os satélites desse bloco carregam um relógio de Cs e dois de Rb e o desempenho do padrão de Cs se mostrou pobre, fazendo o sistema mudar para o padrão de Rb em 5 de outubro de 2011 (LANGLEY, 2012). Os satélites do Bloco IIF transmitem, além dos sinais na L1 e L2, os sinais na frequência L5. Foram feitos melhoramentos nos padrões de frequência de forma a obter melhorias na predição e melhor estabilidade dos relógios a bordo. O padrão atômico utilizado é o de feixe de Cs digital (*Digital Cesium-Beam Frequency Standard*) com estabilidade da ordem 5.10^{-14} por dia (VANNICOL et al., 2010).

Os satélites do Bloco III estão atualmente em fase de desenvolvimento e a previsão de início de lançamento é para o ano de 2014 como pode ser visto em <http://www.lockheedmartin.com/products/GPS/> (Acesso em jan. de 2012). Espera-se 24 satélites em órbita até meados de 2021 (ROPER, 2010). Além de novos sinais civis e militares (4º sinal civil - L1C), os satélites oferecerão autonomia no monitoramento de integridade para garantir a confiabilidade dos sinais GPS e conseqüentemente no posicionamento para propósitos de navegação. Os melhoramentos também incluem avanços na tecnologia de relógios atômicos, o que poderá beneficiar o usuário no que concerne à predição das correções desses relógios.

2.2 Características dos sinais GPS

Originalmente, cada satélite GPS transmite sinais centrados em duas frequências de ondas de rádio denominadas de L1 e L2. Essas frequências são geradas pela frequência fundamental f_0 com valor de 10,23 MHz, a qual é multiplicada por 154 e 120, respectivamente. Com a modernização do GPS, os novos satélites do Bloco IIF contam com a terceira portadora denominada L5, cuja frequência fundamental deve ser multiplicada por 115 (LANGLEY, 1998; LEICK, 1995, MONICO, 2008). Dessa forma, as frequências L_i ($i=1, 2, 5$) e os respectivos comprimentos de onda (λ_i) são:

Tabela 3 - Frequências e respectivos comprimentos de ondas dos sinais GPS

| Nome | Multiplicador | Frequência (MHz) | Comprimento de onda (cm) |
|------|---------------|------------------|--------------------------|
| L1 | 154 | 1575,42 | $\lambda_1 \cong 19,03$ |
| L2 | 120 | 1227,60 | $\lambda_2 \cong 24,42$ |
| L5 | 115 | 1176,45 | $\lambda_5 \cong 25,48$ |

O propósito do GPS é proporcionar meios para realizar navegação, ou seja, determinar posições terrestres em tempo real, o que é possível devido ao processo de modulação da fase com os códigos PRN. O código PRN é uma sequência de valores binários (0 e 1 ou +1 e -1) que parecem ter características aleatórias, mas podem ser identificados de forma unívoca. As pseudodistâncias são derivadas a partir da medida do tempo de propagação da modulação de um determinado código PRN. Dois diferentes tipos de códigos são utilizados, o código P ou P(Y) (P de *Precision* ou *Protected*) e o código C/A (*Coarse/Acquisition*) (SEEBER, 2003; MONICO, 2008).

O código P (código criptografado) é transmitido em uma frequência de 10,23 MHz (uma sequência de 10,23 milhões de dígitos binários ou *chips* por segundos). Esta frequência também é conhecida como *chipping rate* do código P. Esse código tem um comprimento de onda de aproximadamente 30 m e uma sequência longa, ou seja, se repete depois de 266 dias (38 semanas). No entanto, segmentos de código são formados para os satélites considerando um período de sete dias. Esses segmentos são configurados como zero a cada semana, mais especificamente, a meia noite (0 h UT) de sábado para domingo. Por esta razão, todos os satélites podem transmitir sinais sobre a mesma frequência e, ainda, podem ser identificados pelo seu único segmento semanal de código PRN. Esta técnica é conhecida como CDMA (SEEBER, 2003).

Diferentemente do código P com período de uma semana, o código C/A apresenta um período de um milissegundo e é gerado a uma frequência de 1,023 MHz com comprimento de onda de aproximadamente 300 m. Cada satélite transmite um código C/A diferente, o que poderia provocar problemas no receptor relacionados com a distinção entre todos os códigos possíveis. No entanto, o código C/A faz parte da família de códigos conhecida como Código de Ouro (*Gold Codes*), o qual apresenta baixa correlação entre seus membros, possibilitando a distinção rápida dos sinais recebidos simultaneamente de vários satélites (SEEBER, 2003; LEICK, 2004; MONICO, 2008).

A geração dos sinais GPS é baseada numa técnica denominada sistema de espalhamento espectral (*spread spectrum system*), no qual o sinal espalhado (*spread signal*) ocupa uma largura de banda muito maior do que a taxa de dados sendo transmitidos. Essa técnica de espalhamento é denominada DSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*) que é uma

extensão do tipo de modulação conhecido como BPSK (*Binary Phase Shift Keying*). Essas técnicas permitem gerar as formas de ondas relacionadas com os códigos PRN do GPS. Uma descrição mais detalhada sobre o assunto pode ser encontrada em Kaplan e Hegart (2006) e Blunt (2007). A Figura 2 apresenta a potência de densidade espectral dos códigos C/A e P (BLUNT, 2007).

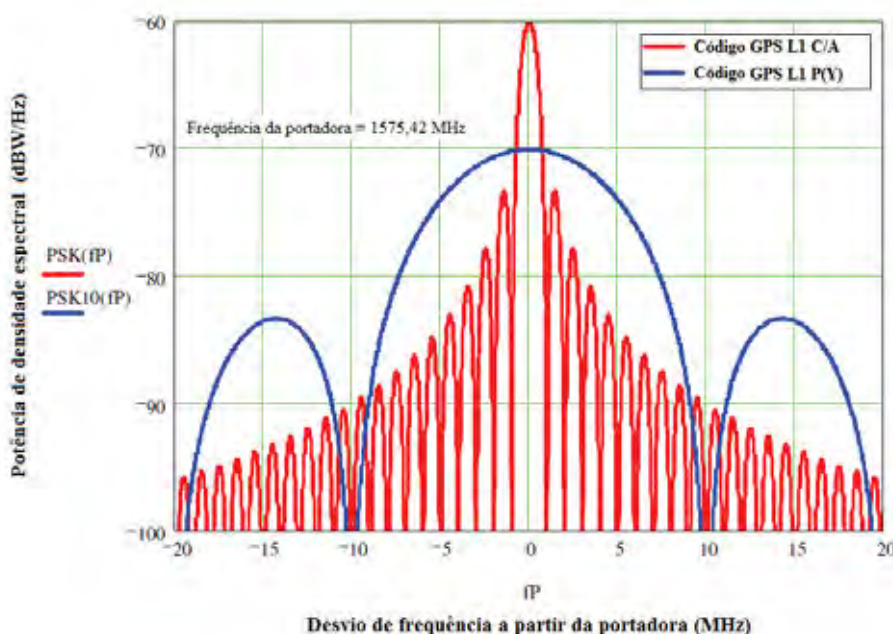


Figura 2 - Potência de densidade espectral do sinal L1
Fonte: Blunt (2007).

Na Figura 2 nota-se no lóbulo principal do código C/A (em vermelho) que o sinal se espalha a $\pm 1,023$ MHz ao redor da frequência L1. O valor de *chipping rate* do código P é dez vezes o valor do código C/A, provocando uma energia espectral no lobo principal (em azul) e formando um espalhamento de $\pm 10,23$ MHz ao redor da portadora.

Durante anos houve uma demanda por sinais adicionais no GPS com aplicações para a comunidade civil. Esses sinais são necessários para proporcionar a correção e/ou eliminação dos efeitos provocados pela ionosfera; melhoramento na robustez dos sinais (especialmente em operações de segurança de aviação) e melhoramentos na aquisição dos dados e acurácia. As frequências L1 e L2 disponíveis aos usuários satisfazem a maioria dos usuários civis, porém, a aviação necessita de uma terceira frequência que seja capaz de suprir as limitações da portadora L2 em aplicações de segurança de vida (*safety-of-life applications*). Após uma intensa procura por novas frequências pelo DOT (*Department of Transportation*)

americano, pelo DOD e por outras agências, foi anunciado em 25 de janeiro de 1999 que o terceiro sinal civil seria a portadora L5 centrada em 1176,45 MHz, cuja seleção parece satisfazer o uso em segurança para aviação (McDONALD, 2002).

A portadora L1 é modulada pelos códigos C/A e P e, com a modernização contará com mais um código militar na frequência L1 (L1M). A portadora L2 está modulada pelo código P e, atualmente, já possui o novo código civil L2C. A portadora L5 está modulada pelo código denominado L5C (LEICK, 2004, MONICO, 2008).

Atualmente, os satélites do Bloco IIR transmitem o código civil na L2 e os satélites do Bloco IIF já transmitem os novos sinais na L5 e futuramente os satélites do Bloco III transmitirão um novo código civil na frequência L1 (L1C). Um detalhe importante relacionado aos novos sinais é o tipo de modulação conhecido como BOC (*Binary Offset Carrier*), o qual é uma variação básica do DSS e também é utilizado pelo sistema Galileo (KAPLAN; HEGART, 2006; BLUNT, 2007). A Tabela 4 apresenta um resumo das características dos sinais GPS:

Tabela 4 - Sumário das características dos sinais GPS

| Sinal | Frequência (MHz) | Tipo de modulação | Taxa de dados (bps) | Largura de banda no lóbulo principal (MHz) ² | Tipo de dados |
|----------------|------------------|-------------------|---------------------|---|---------------|
| L1 C/A | 1575,42 | BPSK | 50 | 2,046 | Civil |
| L1 C | 1575,42 | BOC | Desconhecida | 4,092 | Civil |
| L1 P(Y) | 1575,42 | BPSK | 50 | 20,46 | Militar |
| L1 M | 1575,42 | BOC | Desconhecida | 30,69 | Militar |
| L2 C (CM e CL) | 1227,60 | BPSK | 25 | 2,046 | Civil |
| L2 P(Y) | 1227,60 | BPSK | 50 | 20,46 | Militar |
| L2 M | 1227,60 | BOC | Desconhecida | 30,69 | Militar |
| L5 (I5 e Q5) | 1176,45 | BPSK | 50 | 20,46 | Civil |

Fonte: Blunt (2007).

O código L2C é um pouco diferente do código C/A (ver Tabela 4), pois utiliza dois códigos PRN diferentes por satélite. O primeiro código PRN é denominado código civil moderado (CM - *Civil Moderate*) e emprega uma sequência que se repete a cada 10,230 *chips*, o que é considerado ser de comprimento moderado. O segundo código PRN é denominado código civil longo (CL - *Civil Long*) com um comprimento de 767,250 *chips*. O código L2C é transmitido com frequência de 511,5 KHz e enquanto o código CM se repete a cada 20 *ms*, o código CL se repete a cada 1,5 s (KAPLAN; HEGART, 2006).

O sinal na frequência L5 é um sinal complexo, no qual se utiliza a técnica de QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) para combinar a componente *in-phase* do sinal (I5) e a componente *quadrature* do sinal (Q5).

Em termos práticos, o receptor deve replicar o código PRN transmitido pelo satélite GPS e gerar a observável com base em técnicas de correlação. As observáveis básicas do GPS que permitem determinar posição, velocidade e tempo, são identificadas como a pseudodistância a partir da medida do código e a fase da onda portadora ou diferença de fase da onda portadora, as quais são descritas na próxima seção.

2.3 Introdução ao conceito de relógios atômicos

Uma escala de tempo pode ser definida pela sua origem e pelo período de oscilação básica de um elemento determinante de frequência. Como exemplo, temos a rotação da Terra que é utilizada para definir a escala de TS (Tempo Sideral) e de TU (Tempo Universal), a oscilação de átomos no caso de relógios atômicos ou de um cristal no caso de relógios de cristal. A origem da escala de tempo pode ser definida arbitrariamente ou a partir de convenções internacionais, como é o caso do TAI (Tempo Atômico Internacional) (RIZOS, 1999).

Os satélites GNSS transportam a bordo relógios com padrão de frequência atômica (ou oscilador atômico) para a geração precisa do sistema de tempo. Os relógios atômicos, no geral, são baseados em tubo de feixe de césio, célula de vapor de rubídio ou osciladores de maser de hidrogênio. Os intervalos de tempo são mais precisamente definidos pelo contador de ciclos de uma frequência padrão, por exemplo, um segundo na escala de tempo atômico é definido como a *“duração de 9192631770 períodos de radiação (ou ciclos de micro-ondas de luz absorvida ou emitida) correspondente à transição entre dois níveis hiperfinos do estado fundamental do átomo de césio 133 (peso atômico de 133)”*. Esta definição foi aceita pela 13ª Conferência Internacional do Comitê de Pesos e Medidas em Paris no ano de 1967 (SEEBER, 2003). Ela representa a medida do segundo no SI (Sistema Internacional) e refere-se a um átomo de césio numa estação terrestre a uma temperatura de 0 grau Kelvin sem perturbações do campo externo (USNO, 2012).

Um relógio atômico pode ser pensado como um equipamento que fornece um sinal elétrico de saída. Então, para caracterizar o comportamento de um relógio atômico é necessário definir um modelo matemático que seja capaz de descrever o sinal de saída em todos os seus componentes, o qual é dado por (CERRETTO, TAVELLA, 2008):

$$V(t) = [V_0 + \varepsilon(t)] \text{sen}(2\pi\nu_0 t + \Phi(t)) \quad (2.1)$$

onde V_0 e ν_0 são, respectivamente, a amplitude e frequência nominal do sinal, $\varepsilon(t)$ e $\Phi(t)$ são as flutuações randômicas da amplitude e da fase. Esse modelo é uma forma simplificada, considerando que os relógios atômicos são compostos de ruídos estocásticos ou aleatórios.

O desvio da fase normalizado é definido da seguinte forma:

$$x(t) = \frac{\Phi(t)}{2\pi\nu_0} \quad (2.2)$$

O desvio da frequência normalizado é definido por:

$$y(t) = \frac{\nu(t) - \nu_0}{\nu_0} = \frac{1}{2\pi\nu_0} \frac{d}{dt} \Phi(t) \quad (2.3)$$

No caso das equações 2.2 e 2.3, $\nu(t)$ é a frequência de saída do relógio atômico em estudo e ν_0 representa a frequência de um relógio de referência, assumido ser de melhor qualidade que o relógio em estudo. A variável $x(t)$ na Equação 2.2 representa a diferença de tempo (*time offset*) entre o sinal do relógio em estudo e o sinal do relógio de referência.

Existe uma relação entre as equações 2.2 e 2.3, a qual é dada por:

$$y(t) = \frac{d}{dt} x(t) \quad (2.4)$$

O desvio da frequência normalizada pode então ser definido assumindo uma variação linear:

$$y(t) = y(t_0) + d(t - t_0) + \varepsilon(t) \quad (2.5)$$

onde:

$y(t_0)$ - representa o termo tendência da frequência (*frequency offset*) na época de referência t_0 ;

d - representa o termo deriva da frequência (*linear frequency drift*);

$\varepsilon(t)$ - efeitos randômicos genéricos no desvio da frequência.

Da mesma forma, é possível definir o desvio da fase normalizada $x(t)$ como:

$$x(t) = x(t_0) + y(t_0)(t - t_0) + \frac{1}{2}d(t - t_0)^2 + \Psi(t) \quad (2.6)$$

onde:

$x(t_0)$ - representa o termo tendência da fase (*phase offset*) na época de referência t_0 ;

$y(t_0)$ - componente linear da fase;

d - componente quadrática da fase;

$\Psi(t)$ - efeitos randômicos genéricos no desvio da fase.

Como pode ser visto nas Equações 2.5 e 2.6, os relógios atômicos são compostos por componentes determinísticas e estocásticas (ou aleatórias). O termo tendência da frequência (d) pode ser considerado a principal perturbação determinística, ou seja, uma mudança sistemática na frequência em função do tempo devido a modificações na estrutura interna do relógio atômico e, usualmente, se manifesta como um incremento ou decremento constante na frequência dos relógios. A componente estocástica ou perturbações aleatórias são ruídos que influenciam a estabilidade da frequência de um relógio. Esses ruídos podem ser de diferentes tipos e sua presença e nível podem variar dependendo do tipo de relógio atômico. Os tipos de ruídos mais encontrados em relógios atômicos são conhecidos como *white noise*, *flicker noise* ou *random walk* na fase e na frequência (ALLAN, 1981). A componente estocástica tem que ser levada em consideração no momento da estimativa das correções ou erros dos relógios atômicos. As equações para quantificação de ruídos e análise da estabilidade de osciladores atômicos são apresentadas na próxima seção.

2.3.1 Análise da estabilidade de relógios atômicos

Para análise da estabilidade de um oscilador, geralmente, a equação de variância de Allan (*Allan variance*) é utilizada. Ela representa a medida de estabilidade de um relógio em termos de diferenças entre amostras sobre um intervalo de tempo (ALLAN, 1981).

Com base na Equação 2.4 pode-se definir o desvio de tempo a partir de uma origem arbitrária ($t=0$) como a integral do desvio da frequência a partir da origem:

$$x(t) = \int_0^t y(t') dt' \quad (2.7)$$

Dessa forma, a média do i -ésimo desvio da frequência sobre o intervalo de tempo τ é dado por:

$$\bar{y}_i = \frac{x_{i+1} - x_i}{\tau} \quad (2.8)$$

assumindo que as medidas de desvio do tempo sejam igualmente espaçadas pelo intervalo de tempo τ . A equação de variância de Allan é definida por:

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{2} \langle (\bar{y}_{i+1} - \bar{y}_i)^2 \rangle \quad (2.9)$$

onde “ $\langle \rangle$ ” representa o valor esperado. Com base nas Equações 2.8 e 2.9, pode-se escrever a equação de variância de Allan de uma forma mais genérica (ALLAN, 1981):

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2\tau^2(N-2n)} \sum_{i=1}^{N-2n} (x_{i+2n} - 2x_{i+n} + x_i)^2 \quad (2.10)$$

onde, se assume que esteja disponível um número N de amostras de um determinado relógio com o espaçamento mínimo de τ_0 e os intervalos τ sendo inteiros múltiplos do intervalo fundamental $\tau = n\tau_0$.

A análise da variância de Allan pode ser realizada com base em um gráfico da variância em função do tempo numa escala de log (log-log). A equação de Allan é muito utilizada também para identificação de ruídos (processos aleatórios) com base na lei de potência de densidade espectral (PSD - *Power Spectral Density*):

$$S_y(f) = h_\alpha f^\alpha \quad (2.11)$$

onde, y é o desvio da frequência normalizado, f é a frequência de Fourier, h_α é a intensidade de um processo aleatório em particular e α é uma constante sobre um intervalo de f também conhecido como índice espectral (HECKERT; FILLIBEN, 2003).

A variância de Allan varia com τ^μ onde $\mu = -\alpha - 1$. Dessa forma, existe uma relação (*one-to-one*) entre o ângulo do gráfico de log-log da potência espectral (α) e o ângulo de inclinação do gráfico log-log da variância de Allan (Tabela 5).

Tabela 5 - Relação entre o gráfico de potência espectral e o gráfico de variância de Allan

| Tipo de ruído (modulação da fase) | Ângulo de inclinação do gráfico de log-log da potência espectral (α) | Ângulo de inclinação do gráfico de log-log do Allan variance ($(-\alpha - 1)/2$) |
|--------------------------------------|---|--|
| <i>Random Walk</i> | -2 | 0,5 |
| <i>Flicker</i> | -1 | 0 |
| <i>White Noise</i> | 0 | -0,5 |
| <i>Super Flicker</i> | 1 | -1 |
| <i>Super White</i> | 2 | -1,5 |

A equação de variância de Allan (Equação 2.10) apresenta uma limitação que se refere a não distinção entre os ruídos *white* e *flicker* da fase. Dessa forma, a equação foi modificada e, atualmente, é conhecida como variância de Allan modificada (*Modified Allan Variance*) (ALLAN, 1981).

$$\text{Mod } \sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2\tau^2 n^2 (N - 3n + 1)} \sum_{j=1}^{N-3n+1} \left[\sum_{i=j}^{n+j-1} (x_{i+2n} - 2x_{i+n} + x_i)^2 \right] \quad (2.12)$$

Análises serão realizadas com as correções dos relógios dos satélites GNSS utilizando a equação de variância de Allan com o objetivo de verificar o tipo de ruído presente e a estabilidade dos relógios.

3 OBSERVAÇÕES GNSS E EFEITOS SISTEMÁTICOS

Nesta seção são descritas as equações básicas do sinal GNSS, mais especificamente do GPS, o qual foi utilizado para os experimentos nesta tese. São apresentados os efeitos sistemáticos envolvidos com o gerador e receptor de sinais (receptor e satélite), com a propagação do sinal através da atmosfera e efeitos geofísicos relacionados com a estação terrestre.

3.1 Equações de pseudodistância e fase

A medida da pseudodistância é obtida a partir da correlação entre o código gerado pelo satélite no instante de transmissão (t^t) e sua réplica gerada no receptor no instante de recepção (t_r). O sistema de tempo dos satélites (t^s) é obtido com base em relógios atômicos de alta precisão e é utilizado como referência para todos os sinais gerados e transmitidos. No caso dos receptores, estes dispõem de relógios de menor qualidade, os quais operam no sistema de tempo t_r do receptor. Esses dois sistemas de tempo são relacionados com o sistema de tempo GPS a partir de (MONICO, 2008):

$$\begin{aligned} t_t^{\text{GPS}} &= t^s - dt^s \\ t_r^{\text{GPS}} &= t_r - dt_r \end{aligned} \quad (3.1)$$

onde:

t_t^{GPS} - tempo de transmissão no satélite (sistema de tempo GPS);

t_r^{GPS} - tempo de recepção no receptor (sistema de tempo GPS);

dt^s - erro (correção) do relógio do satélite em relação ao tempo GPS no instante t^s ;

dt_r - erro (correção) do relógio do receptor em relação ao tempo GPS no instante t_r .

A equação da pseudodistância (PD) é igual a diferença entre o tempo t_r de recepção (receptor) e o tempo t^s de transmissão (satélite) multiplicada pela velocidade da luz (c) no vácuo:

$$\begin{aligned}
PD_r^s &= c \left[(t_r^{GPS} + dt_r) - (t_t^{GPS} + dt^s) \right] + \varepsilon_{PD_r^s} \\
\Rightarrow PD_r^s &= c \underbrace{(t_r^{GPS} - t_t^{GPS})}_{\tau_r^s} + c(dt_r - dt^s) + \varepsilon_{PD_r^s} \\
\Rightarrow PD_r^s &= c\tau_r^s + c(dt_r - dt^s) + \varepsilon_{PD_r^s}
\end{aligned} \tag{3.2}$$

onde, $\tau_r^s = (t_r^{GPS} - t_t^{GPS})$ é o intervalo de propagação do sinal e $\varepsilon_{PD_r^s}$ representa os erros envolvidos na medida de pseudodistância. A componente $c\tau_r^s$ resultaria na distância geométrica (ρ_r^s) entre o satélite e o receptor se não fosse os diversos efeitos sistemáticos envolvidos com a propagação do sinal, tais como os efeitos da troposfera, da ionosfera, multicaminho, erro da órbita do satélite, entre vários outros. Dessa forma, a equação de pseudodistância (unidade de metros) entre o satélite s e o receptor r pode ser escrita como (MONICO, 2008; SEEBER, 2003):

$$PD_{rLi}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + I_{rLi}^s + T_r^s + Orb^s + dm_r^s + b_{rLi} + b_{Li}^s + v_{PD_r^s} \tag{3.3}$$

onde:

Li - refere-se a portadora GPS (i=1, 2, 5);

ρ_r^s - distância geométrica entre o satélite e o receptor, a qual deve ser calculada entre o instante de transmissão e o de recepção do sinal;

c - velocidade da luz no vácuo;

dt_r - erro do relógio do receptor;

dt^s - erro do relógio do satélite;

I_{rLi}^s - efeito provocado pela ionosfera;

T_r^s - efeito provocado pela troposfera;

Orb^s - erro da órbita (posição) do satélite;

dm_r^s - efeito provocado pelo multicaminho;

b_{rLi} - atraso de *hardware* para o receptor;

b_{Li}^s - atraso de *hardware* para o satélite;

$v_{PD_r^s}$ - efeitos aleatórios e não modelados da pseudodistância.

A fase da onda portadora é uma observável muito mais precisa que a pseudodistância. Ela é também conhecida com fase de batimento da onda portadora (ϕ_r^s) e é obtida a partir da diferença entre a fase gerada pelo satélite, no instante de transmissão do sinal, e sua réplica, gerada pelo receptor, no instante de recepção do sinal. Apenas uma medida fracionária é obtida, restando um número inteiro de ciclos desconhecido, denominado ambiguidade da fase (N). A equação da fase de batimento (em ciclos) da onda portadora pode ser escrita como:

$$\phi_{rLi}^s = f_i \left(\frac{\rho_r^s - I_{rLi}^s + T_r^s + Orb_r^s + dm_r^s + b_{rLi} + b_{Li}^s}{c} \right) + f_i (dt_r - dt^s) + (\phi_t^s(t_0) - \phi_r(t_0)) + N_{rLi}^s + v_{\phi_{rLi}^s} \quad (3.4)$$

onde:

- f_i - frequência da fase (i=1, 2, 5);
- $\phi_t^s(t_0)$ - fase inicial no satélite, correspondente à época de referência t_0 ;
- $\phi_r(t_0)$ - fase inicial no receptor, correspondente à época de referência t_0 ;
- N_{rLi}^s - ambiguidade da fase no instante inicial de rastreamento;
- $v_{\phi_{rLi}^s}$ - efeitos aleatórios e não modelados da fase da portadora.

Os outros termos na equação da fase já foram definidos a partir da Equação 3.3. A acurácia que o usuário pode determinar sua posição e velocidade, além da sincronização com o sistema de tempo GPS, depende da interação dos sinais dos satélites com diversos fatores. Em geral, a acurácia do GPS depende da qualidade das medidas de pseudodistância e fase.

O tratamento matemático dos efeitos envolvidos nas equações de observação GNSS e as técnicas adequadas para minimizá-los, podem ser encontrados na literatura especializada sobre Geodésia por satélite, como por exemplo, em Seeber (2003), Leick (2004), Kaplan e Hegart (2006), Monico (2008), entre outros.

As fontes de erros ou efeitos podem estar relacionadas com os satélites e receptores, com a propagação do sinal na atmosfera ou relacionadas com efeitos geofísicos na estação terrestre. As próximas seções descrevem esses efeitos e a modelagem matemática envolvida no posicionamento GNSS.

3.2 Efeitos sistemáticos relacionados com o satélite e o receptor

Os efeitos relacionados com os satélites e receptores são devidos aos erros no processo de determinação das órbitas dos satélites, não sincronização dos relógios com o sistema de tempo GNSS (erros dos relógios), atrasos dos sinais devido ao *hardware*, variação do centro de fase das antenas, entre outros. A descrição e a análise destes efeitos são apresentadas nessa seção.

3.2.1 Órbita do satélite

As órbitas dos satélites são estimadas pelo centro de controle e enviadas (*uplinked*) para os satélites juntamente com outros parâmetros nas mensagens de navegação (efemérides transmitidas), os quais são retransmitidos para os usuários. Para propósitos de posicionamento, a posição dos satélites em sua órbita pode ser calculada a partir das mensagens de navegação enviadas pelos satélites. Outra possibilidade é a utilização das efemérides precisas, seja pós-processadas ou preditas.

As coordenadas dos satélites são, em geral, injuncionadas como fixa na etapa de ajustamento dos dados GNSS. Dessa forma, para o caso do posicionamento por ponto, os erros nas coordenadas dos satélites se propagarão para as coordenadas do usuário. No caso de posicionamento relativo, esses erros são cancelados no processo de diferenciação, principalmente para linhas de base curtas.

As efemérides transmitidas são compostas por elementos keplerianos que descrevem a órbita, além dos parâmetros perturbadores e dos parâmetros de tempo. Estes últimos permitem aplicar correções relacionadas ao tempo e aos relógios dos satélites. A partir dos elementos keplerianos e dos parâmetros perturbadores é possível calcular as posições (coordenadas) de cada satélite. As coordenadas (X, Y e Z) dos satélites GPS, nesse caso, serão referenciadas ao sistema de referência do GPS, ou seja, o WGS84 (*World Geodetic System 1984*). A acurácia das órbitas transmitidas, conforme divulgado atualmente pelo IGS, é da ordem de 1 metro (IGS, 2012).

As efemérides precisas, conhecidas como efemérides IGS, são produzidas e disponibilizadas de 12 a 18 dias (Tabela 1, p. 42) após a coleta de dados pelos vários centros do IGS distribuídos pelo globo terrestre. Essas efemérides fornecem acurácia da ordem de 2,5 cm para as posições e de 0,075 ns para os erros dos relógios dos satélites. Elas são apresentadas num formato padrão em ASCII (*American Standard Code for Information*

Interchange), chamado SP3 (*Standard Product #3*). As órbitas são referenciadas a um dos ITRFs (*International Terrestrial Reference Frame*), atualmente o ITRF2008, e ao sistema de tempo GPS. As efemérides precisas (IGS) apresentam dados em um intervalo de tempo de 24 horas, começando às 0 h e terminando às 23:45 horas do dia do arquivo. Têm-se ainda as efemérides rápidas, denominadas IGR, que estão disponíveis aproximadamente 17 à 41 horas após a coleta dos dados. Elas apresentam acurácia da ordem de 2,5 cm para as coordenadas dos satélites e 0,075 ns para os erros dos relógios dos satélites (ver Tabela 1, p. 42), sendo importante destacar que, atualmente, a acurácia divulgada das órbitas IGR é idêntica à das órbitas IGS.

A partir do ano 2000, o IGS passou a produzir as órbitas ultra-rápidas denominadas IGU em substituição à órbita conhecida como IGP. Enquanto a IGP apresentava acurácia de 50 cm para a posição dos satélites, a IGU apresenta, atualmente, acurácia de 5 cm para a posição e de 3 ns ($\cong 0,9$ m) para o erro do relógio do satélite (IGS, 2012). Essas órbitas são muito úteis para o posicionamento em tempo real, já que estão disponíveis algumas horas antes do início de sua validade. As efemérides IGU apresentam dados para um período de 48 horas, podendo ter início às 0, 6, 12 ou 18 horas UT do dia.

Com o objetivo de verificar a acurácia das efemérides transmitidas e IGU, foram realizadas análises para dados do dia 27 de novembro de 2011 (escolhido aleatoriamente). As análises consistiram em comparar essas efemérides (transmitidas e IGU) com as finais do IGS (adotadas como valores de referência) a partir do *software* GPSATORB, o qual fornece também as estatísticas dos “erros” das órbitas (MARQUES, 2003).

O EMQ (Erro Médio Quadrático) diário para cada coordenada (X, Y e Z) advinda das efemérides transmitidas dos satélites é apresentado na Figura 3. As coordenadas dos satélites, nesse caso, foram calculadas considerando o período válido de duas horas antes e duas após o toe (tempo origem das efemérides) (MONICO, 2008).

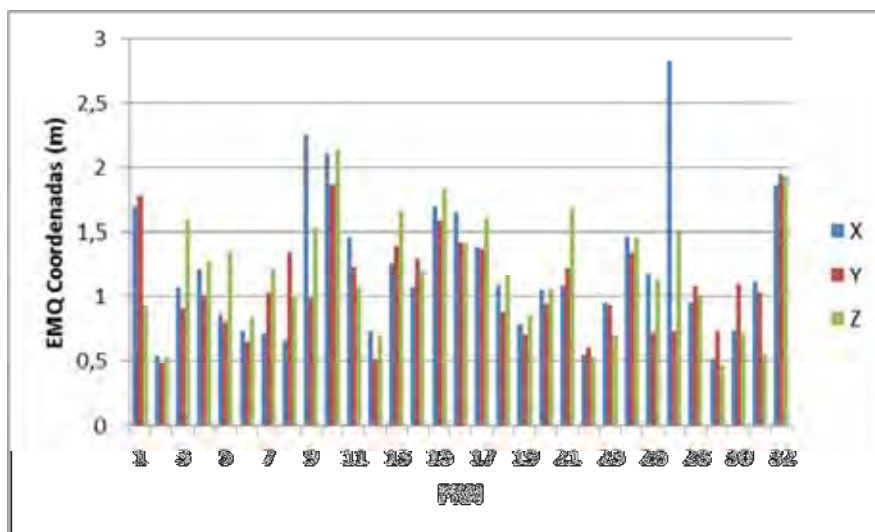


Figura 3 - EMQ diário para a posição transmitidas dos satélites (dia 27/11/2011)

O EMQ diário das coordenadas dos satélites calculadas a partir das efemérides transmitidas (Figura 3) apresentou valores máximos acima de 2 metros. Porém, no geral, o EMQ diário foi da ordem de 1 metro, o que está de acordo com os valores divulgados, atualmente, pelo IGS (Tabela 1, p. 42).

Para as efemérides IGU foram analisados os arquivos disponibilizados às 0, 6, 12 e 18 horas do dia 331 de 2011. Para o arquivo IGU disponível a 0 hora, a análise é realizada somente para dados preditos para as próximas 24 horas. À medida que a nova IGU das 6 horas fica disponível, esta contém as primeiras 6 horas do dia com base em dados observados e as próximas 18 horas preditas foram analisadas e assim sucessivamente para os outros arquivos IGU das 12 e 18 horas.

A Figura 4 apresenta a série temporal dos erros 3D da IGU (0h, 6h, 12h e 18h UT) para os satélites PRN 02 (Bloco IIR), PRN 15 (Bloco IIRM), PRN 25 (Bloco IIF) e PRN 27 (Bloco IIA).

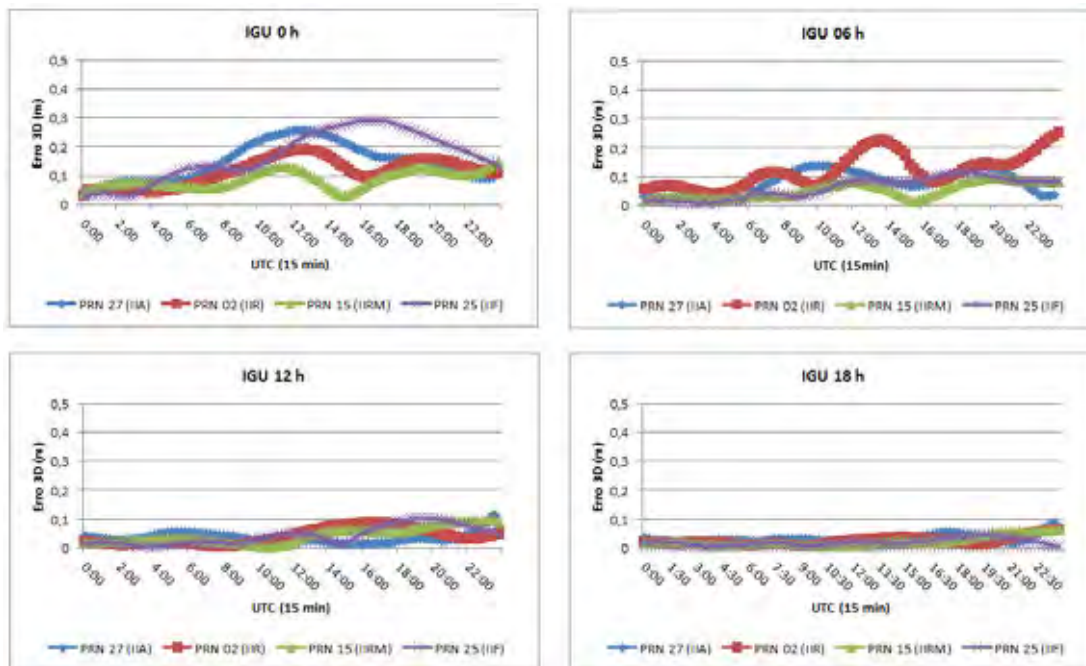


Figura 4 - Erro 3D das órbitas previstas IGU

No caso da IGU 0 h, verifica-se que a órbita prevista apresenta erro 3D abaixo de 10 cm nas primeiras 6 horas previstas e, após esse período, os erros vão degradando e atinge a ordem de 30 cm como é o caso para os satélites PRN 25 e PRN 27.

A série temporal da IGU disponível às 6 h mostra melhorias da órbita nas primeiras 6 horas (baseada em dados observados) e o erro 3D da predição se mantém na ordem de 10 cm para as próximas horas do dia, com exceção do erro para o satélite PRN 02 que atinge até 20 cm próximo das 12 horas e no final do dia. Para a IGU disponível às 12 e 18 horas, os erros 3D das órbitas previstas para as horas seguintes do dia foram da ordem de 10 cm, o que mostra que as órbitas previstas IGU podem ser utilizadas no RTPPP para posicionamento com acurácia da ordem de decímetros.

3.2.2 Erro do relógio do satélite e efeitos de relatividade

Como descrito na seção 2.1, os satélites GNSS transportam a bordo relógios atômicos responsáveis pela geração de tempo nos satélites. Apesar de serem relógios que apresentam alta estabilidade, não estão perfeitamente sincronizados com o sistema de tempo GPS. Desta forma, o centro de controle é responsável por determinar (predição) essa não

sincronização (ou erro do relógio) e enviar aos satélites para que sejam transmitidos aos usuários nas mensagens de navegação.

Os valores das correções dos relógios dos satélites GPS (dt^s) são transmitidos em forma de um polinômio de segunda ordem (coeficientes a_0 , a_1 e a_2) (ver seção 2.3). Nesse caso, a equação que permite calcular as correções é dada por (KAPLAN, 1996):

$$dt^s = a_0 + a_1(t_t^{GPS} - toc) + a_2(t_t^{GPS} - toc)^2 + \Delta t_r \quad (3.5)$$

onde:

a_0 - tendência (*offset*) do relógio (seg);

a_1 - deriva do relógio (*drift*) (seg./seg);

a_2 - deriva da frequência (*drift rate*) (seg/seg²);

toc - tempo de referência para os coeficientes a_0 , a_1 , a_2 ;

t_t^{GPS} - tempo GPS de transmissão do sinal;

Δt_r - correção devido aos efeitos relativísticos.

A componente Δt_r se refere à correção dos efeitos relativísticos afetando os satélites GPS. Como parte da teoria da relatividade de Einstein, tem-se a relatividade geral e a especial. A correção da relatividade especial se faz necessária, devido ao sinal gerado (satélite GPS) ou ao sinal recebido (receptor) em um determinado instante estarem se movendo na velocidade da luz com relação a um sistema de referência inercial, que no caso do GPS é o ECI (*Earth Centered Inertial Frame*). A correção da relatividade geral deve ser aplicada devido ao satélite GNSS (gerador do sinal) e o receptor GNSS estarem em potenciais gravitacionais diferentes. O relógio do satélite é afetado por ambos os efeitos de relatividade, o geral e o especial (KAPLAN, 1996).

Para compensar os efeitos de relatividade geral e especial, a frequência do relógio do satélite é ajustada para 10,2299999545 MHz antes do lançamento. Dessa forma, a frequência observada por um usuário no nível do mar deve ser de 10,23 MHz e o usuário não precisa aplicar a correção devido a esses efeitos. Contudo, o usuário deve aplicar a correção para outro efeito periódico causado pela pequena excentricidade da órbita do satélite. Quando o satélite está no perigeu (mais próximo do ponto focal da órbita), sua velocidade é maior e o potencial gravitacional é menor, o que faz que o relógio do satélite funcione mais lentamente. Quando o satélite está no apogeu, sua velocidade é menor e o potencial gravitacional é maior

fazendo que o relógio do satélite funcione mais rápido. Dessa forma, esse efeito pode ser compensado por (KAPLAN, 1996):

$$\Delta t_r = F e \sqrt{A} \sin(E_k) \quad (3.6)$$

onde:

F - constante com valor de $-4,442807633 \times 10^{-10}$ seg/m^{1/2};

e - excentricidade da órbita do satélite;

A - semi-eixo maior da órbita do satélite;

E_k - anomalia excêntrica da órbita do satélite.

As variáveis da Equação (3.6) podem ser obtidas e ou calculadas a partir das mensagens de navegação. Outra possibilidade para calcular o efeito relativístico relacionado ao erro do relógio do satélite é a partir da seguinte equação (LEICK, 2004):

$$\Delta t_r = \frac{2}{c^2} \bar{X} \cdot \dot{\bar{X}} \quad (3.7)$$

onde:

c - velocidade da luz no vácuo;

\bar{X} - vetor de coordenadas cartesianas do satélite;

$\dot{\bar{X}}$ - vetor velocidade do satélite.

O vetor velocidade do satélite pode ser calculado com base nos elementos keplerianos da órbita transmitida (REMONDI, 2004). Para a órbita GPS circular (excentricidade e nula) a correção relativística (Equação 3.6) será nula e para uma órbita com excentricidade de 0,02 a correção pode atingir até 45 ns, correspondendo a um valor de 14 metros. Uma discussão mais detalhada sobre os efeitos de relatividade nos sinais GPS pode ser encontrada em Ashby e Spilker (1996).

A correção do relógio do satélite transmitida e calculada com base na Equação 3.5 é muito útil para o propósito de solução de navegação, seja pós-processado ou em tempo real. No caso do PPP no modo pós-processado, é possível utilizar as correções determinadas pelo IGS, as quais são disponíveis em arquivos no formato SP3 com taxa de dados de 5 minutos para a solução rápida (disponível aproximadamente 24 horas após a coleta dos dados) e taxa de dados de 30 s para a solução final. Para a realização de PPP em tempo

real, as correções de relógios transmitidas ou aquelas previstas nas efemérides IGU apresentam acurácia da ordem de metros (Tabela 1, p. 42) e não atende a demanda da ordem de decímetros, o que requer um processo de estimativa dessas correções para aplicação no PPP em tempo real.

3.2.3 Correção devido à rotação da Terra

Devido à rotação da Terra durante o tempo de transmissão do sinal GPS, o sistema de coordenadas terrestres rotaciona com relação ao satélite, considerando que os vetores de posição do receptor e do satélite sejam calculados no sistema terrestre. Se esses vetores estivessem no sistema inercial, esse problema não ocorreria, uma vez que se assume que todo o sistema rotaciona, razão pela qual, geralmente, as órbitas dos satélites são determinadas em um sistema inercial. A Figura 5 ilustra o efeito provocado pela rotação da Terra durante a transmissão do sinal do satélite:

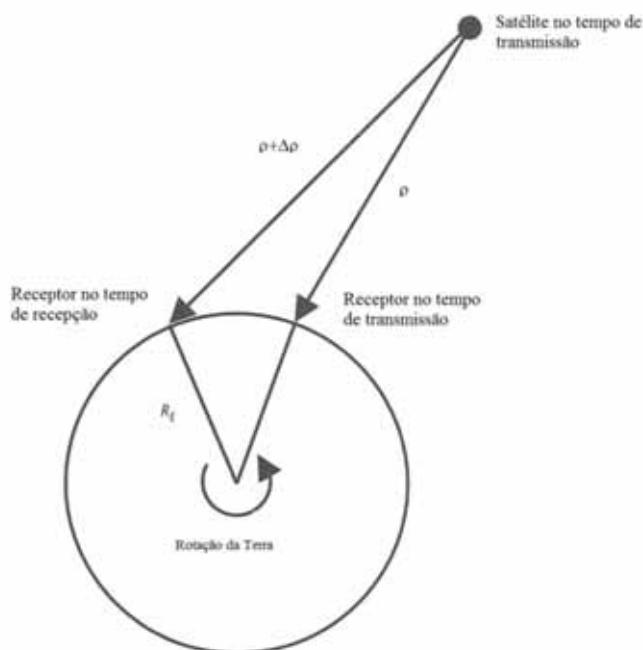


Figura 5 - Efeito devido a rotação da Terra
Fonte: Adaptada de Kaplan (2006).

Durante o tempo de propagação do sinal GPS, um relógio na superfície da Terra experimentará rotação finita com relação ao sistema de coordenadas inercial. Dessa forma, outro efeito relativístico é introduzido, sendo conhecido na literatura inglesa como

efeito *sagnac* (KAPLAN, 2006). Logo, as coordenadas dos satélites devem ser corrigidas do movimento de rotação da Terra durante o tempo de propagação do sinal.

Existem diversas formas de resolver o problema de rotação da Terra, sendo que uma delas seria transformar as coordenadas do satélite no tempo de transmissão para o sistema inercial. Outra forma é aplicar rotações quando as coordenadas dos satélites estão no sistema terrestre. Nesse caso, as coordenadas ($X^{s'}$, $Y^{s'}$ e $Z^{s'}$) no instante GPS de transmissão (t_t^{GPS}) dos satélites são corrigidas a partir de (STRANGE; BORRE, 1997):

$$\begin{bmatrix} X^s(t_t^{GPS}) \\ Y^s(t_t^{GPS}) \\ Z^s(t_t^{GPS}) \end{bmatrix} = R_3(\omega_e \tau) \begin{bmatrix} X^{s'}(t_t^{GPS}) \\ Y^{s'}(t_t^{GPS}) \\ Z^{s'}(t_t^{GPS}) \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

onde, $R_3(\omega_e \tau)$ é a matriz de rotação em torno do eixo Z da Terra aplicada a um ângulo $(\omega_e \tau)$, o qual representa a velocidade de rotação da Terra multiplicada pelo tempo de propagação do sinal τ .

$$R_3(\omega_e \tau) = \begin{bmatrix} \cos(\omega_e \tau) & \text{sen}(\omega_e \tau) & 0 \\ -\text{sen}(\omega_e \tau) & \cos(\omega_e \tau) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Uma discussão mais detalhada sobre o efeito *sagnac* nos sinais GPS pode ser encontrada em Ashby (2004).

3.2.4 Atraso do *hardware* do satélite e do receptor

O atraso de *hardware*, seja no satélite ou no receptor (ver Equação 3.3), é causado pela diferença entre os caminhos percorridos pelas portadoras L1 e L2 no *hardware*. Os atrasos (*bias* instrumentais) B_{c1} , B_{p1} e B_{p2} são relacionados, respectivamente aos códigos C1, P1 e P2. Com a modernização do GPS, os novos satélites transmitem o código L2C e dessa forma, comparece também o atraso B_{c2} . Estes atrasos não são acessíveis diretamente em sua forma absoluta, ou seja, eles são obtidos quando se faz combinações entre as portadoras L1 e L2 (forma relativa). Desta maneira, os atrasos ou *bias* são denominados de DCB (*Differential Code Bias*) e são designados como (DACH et al., 2007; LEANDRO, 2009):

$$\begin{aligned} B_{p1} - B_{p2} &= B_{p1-p2}; \\ B_{p1} - B_{c1} &= B_{p1-c1}; \\ B_{p2} - B_{c2} &= B_{p2-c2}. \end{aligned}$$

No caso do *hardware* dos satélites, a magnitude desse atraso é determinada durante o processo de calibração dos satélites antes do seu lançamento e é conhecida como TGD (*Timing Group Delay*). Os valores do TGD para cada satélite fazem parte das mensagens de navegação (WILSON et al., 1999).

Por convenção, as correções precisas IGS dos relógios dos satélites devem ser consistentes com as observáveis P1 e P2. Isso significa que a correção de relógio do satélite contém os atrasos B_{p1} e B_{p2} da combinação linear *ion-free* (ver seção 3.3.1) (aproximadamente: $2,5457 \cdot B_{p1} - 1,5457 \cdot B_{p2}$). O mesmo é válido para as correções dos relógios dos satélites nas efemérides transmitidas. Dessa forma, a utilização das observáveis C1 ou C2 requer a aplicação das correções de DCBs para torná-las compatíveis com as observáveis P1 e P2.

O valor de B_{P1-P2} pode ser relacionado com o atraso de grupo TGD da seguinte forma:

$$TGD = -1,5457 B_{p1-p2} + B_0 \quad (3.10)$$

onde, B_0 é um valor arbitrário irrelevante para muitas aplicações (DACH et al., 2007).

Para o caso do PPP, o valor do TGD deve ser subtraído da correção do relógio do satélite (Equação 3.5), seja utilizando correção precisa ou advinda das efemérides transmitidas. O valor do TGD também é calculado com base na combinação *ion-free* dos códigos P1 e P2 e é transmitido para ser utilizado com a portadora L1. Para utilização do

TGD transmitido na portadora L2 basta multiplicá-lo por $\beta = \left(\frac{f_1^2}{f_2^2} \right) \cong 1,647$.

Muitos receptores não coletam o código P1, mas somente o código C/A. Sendo assim a utilização do código C/A para posicionamento preciso requer a aplicação da correção B_{p1-c1} . A forma adequada de se aplicar os atrasos B_{p1-c1} e B_{p1-p2} para diversos tipos de combinações lineares das medidas GPS pode ser encontrada em Dach et al. (2007).

Com a disponibilidade do novo código civil na L2, comparece também o atraso de *hardware* referente à observável L2C. No caso de combinações entre P1 e L2C é

necessário aplicar a correção P2-C2 para compatibilizar L2C com P2, uma vez que as correções do IGS são obtidas a partir de P1 e P2.

Os valores dos DCBs para os satélites GPS e GLONASS, bem como para os receptores que fazem parte da rede de estações ativas do IGS, são estimados diariamente e mensalmente pelo CODE (*Center for Orbit Determination for Europe*) e podem ser encontrados em <http://www.aiub.unibe.ch/download/CODE/> ou em <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE> (Acesso em jan. de 2012). A Figura 6, Figura 7 e Figura 8 mostram, respectivamente, os valores mensais dos DCBs P1-C1, P1-P2 e P2-C2 da constelação GPS, os quais foram estimados pelo CODE durante o ano de 2011:

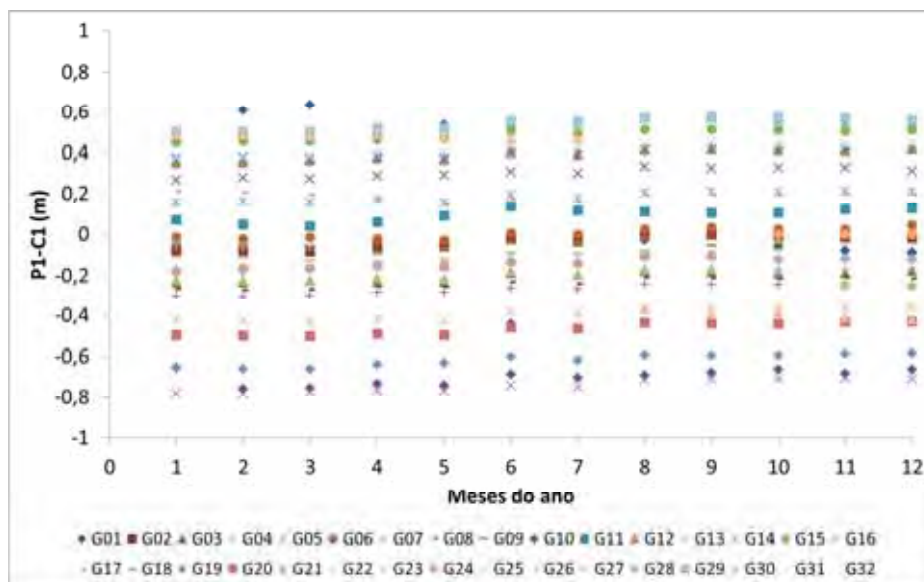


Figura 6 - DCBs P1-C1 para a constelação GPS no ano de 2011

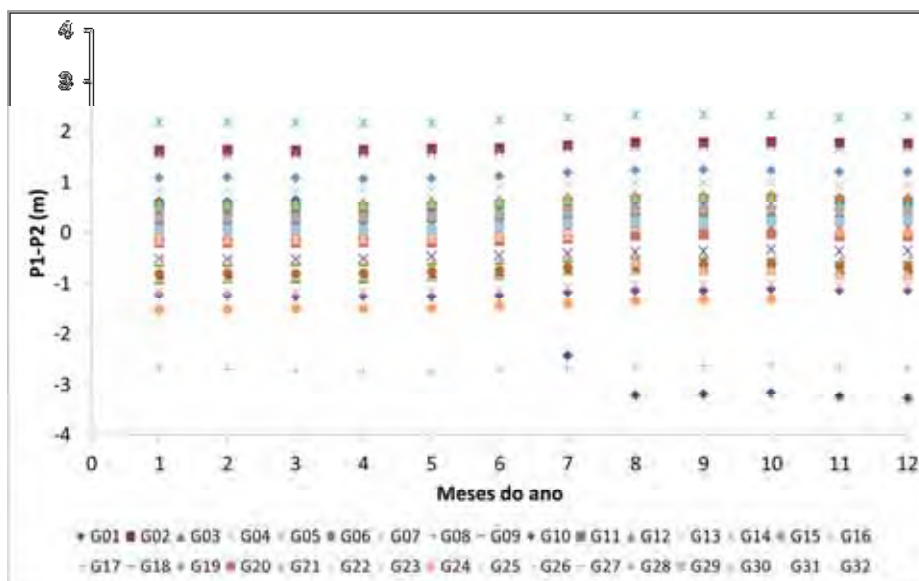


Figura 7 - DCBs P1-P2 para a constelação GPS no ano de 2011

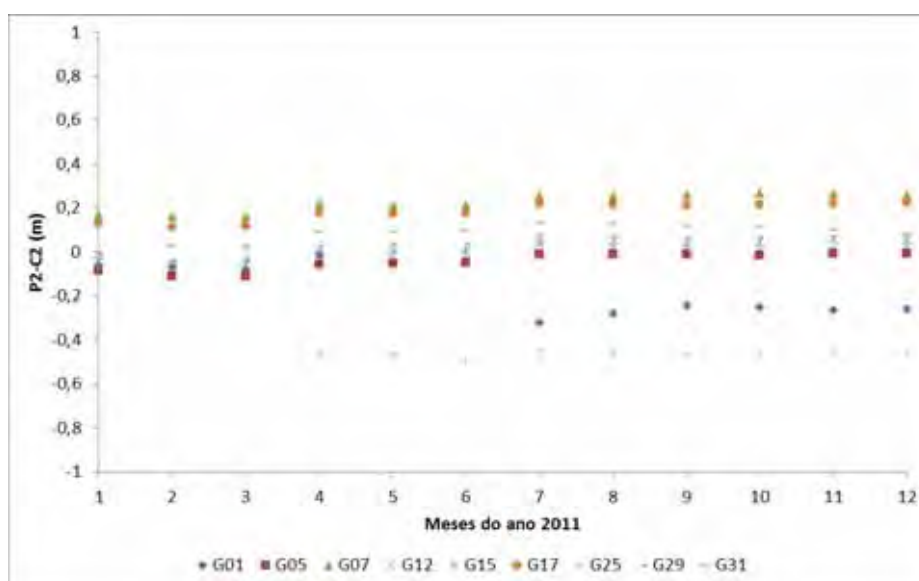


Figura 8 - DCBs P2-C2 para a constelação GPS no ano de 2011

Os valores de DCBs P1-C1 ficaram num intervalo de aproximadamente 0,8 m para a constelação GPS no ano de 2011 (Figura 6). No caso dos DCBs P1-P2 (Figura 7), os valores máximos atingem a ordem de aproximadamente 4 metros e os piores valores são para os satélites PRN 01 e PRN 25, que foram lançados mais recentemente e fazem parte dos satélites do Bloco IIF. Para os DCBs P2-C2, os valores máximos são da ordem de 0,50 m e também foram para os satélites PRN 01 e PRN 25.

Geralmente, o atraso de *hardware* do receptor é estimado juntamente com o erro do relógio do receptor ou com as ambiguidades no processamento dos dados no modo PPP (ver seção 5). A estimativa dos DCBs dos receptores é muito importante para o cálculo do valor absoluto do TEC (*Total Electron Content*) com base em receptores de dupla frequência (CIRAOLLO et al, 2007).

3.2.5 Variação do centro de fase da antena do receptor e do satélite

O posicionamento geodésico GNSS refere-se ao centro de fase eletrônico da antena do receptor, o qual varia com a intensidade e direção (elevação e azimute) do sinal incidente. Para posicionamento preciso, a posição do centro de fase das antenas envolvidas deve ser bem determinada. Ela afeta diretamente os valores estimados da componente altura da antena e troposfera, uma vez que essas componentes são altamente correlacionadas com a dependência da elevação dos satélites.

O centro de fase eletrônico para as frequências L1 e L2 não coincide com o centro mecânico da antena. Dessa forma, define-se mecanicamente o Ponto de Referência da Antena (ARP - *Antenna Reference Point*) para realizar as medidas. O ARP é definido como a intersecção do eixo mecânico vertical com a parte mais baixa da antena. Para a maioria dos tipos de antenas, a variação tri-dimensional do centro de fase eletrônico (L1 e L2) (*offsets*) com relação ao ARP é dada pelos próprios fabricantes (SEEBER, 2003). Esses *offsets* são conhecidos como PCO (*Phase Center Offsets*).

O centro de fase eletrônico varia em função do ângulo de elevação e azimute do satélite observado. O desvio do centro de fase atual para o centro de fase eletrônico médio é denominado de PCV (*Phase Center Variation*) e pode alcançar a ordem de milímetros a poucos centímetros (Figura 9).

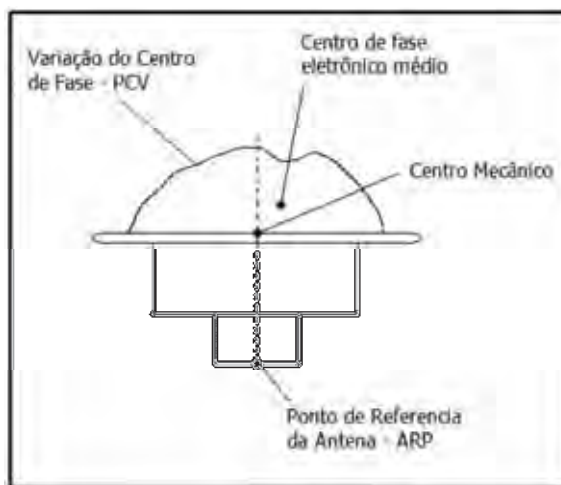


Figura 9 - Variação do centro de fase e ponto de referência da antena do receptor
 Fonte: Adaptada de Seeber, (2003).

Ao realizar posicionamento relativo considerando linha de base curta, as variações de centro de fase das antenas são praticamente canceladas no processo de diferenciação das medidas, considerando que estejam sendo utilizadas antenas do mesmo tipo no levantamento GNSS. Nesse caso, devido à dependência da variação do centro de fase em função do azimute, as antenas devem ser orientadas a priori para uma mesma direção, como por exemplo, a direção Norte.

Para o caso de linha de base longa, mesmo que sejam utilizadas antenas do mesmo tipo, as correções da variação do centro de fase das antenas devem ser aplicadas, porque nesse caso, os satélites são observados a ângulos de elevação diferentes em cada estação. Se antenas de diferentes tipos forem utilizadas no posicionamento relativo, as correções relacionadas ao centro de fase das antenas também devem ser aplicadas.

Para posicionamento com alta acurácia (ordem de centímetros), somente antenas calibradas devem ser utilizadas. Atualmente, os principais métodos de calibração das antenas são (SEEBER, 2003):

- Calibração relativa em campo;
- Calibração absoluta em campo;
- Calibração utilizando câmaras anecóicas (*anechoic chamber*).

No processo de calibração relativa, os valores de PCV e PCO são determinados com relação à outra antena de referência. Os valores de PCV da antena de

referência (geralmente a antena “Done Margolin T” *choque ring*) são injuncionados como fixo e, geralmente, com valores nulos. As antenas são posicionadas muito próximas umas das outras em pilares com coordenadas determinadas com alta precisão e a calibração é realizada com base nos resíduos das simples ou duplas diferenças das medidas GNSS. Os modelos de PCV dependentes de elevação e algumas vezes de azimute utilizam polinômios ou harmônicos esféricos (SEBBER, 2003; SCHMID et al., 2007). Informações sobre o processo de calibração podem ser encontradas <http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL> (Acesso em: jan. 2012).

No processo de calibração em câmaras anecóicas (*anechoic chamber*), a principal ideia é simular diferentes direções de sinais rotacionando as antenas GNSS. Para tanto, um transmissor é fixo em um dos lados da câmara e do outro lado tem-se um posicionador controlado remotamente, o qual é responsável por movimentar a antena (Figura 10). Nesse processo, determina-se a variação absoluta do centro de fase da antena (PCV absoluto).

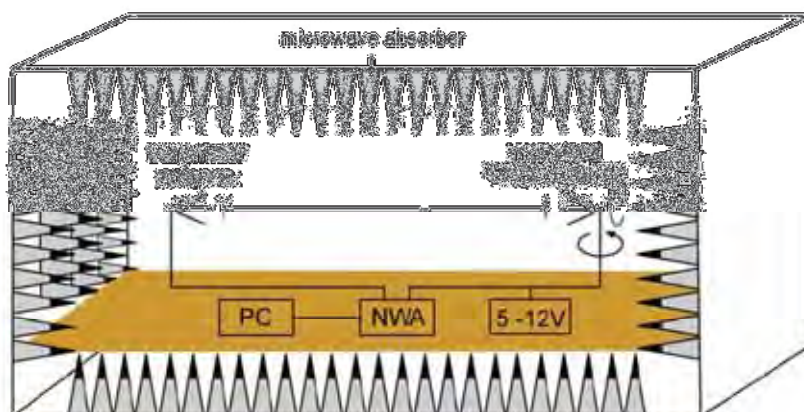


Figura 10 - Esquema de uma câmara anecóica de calibração (*anechoic chamber*)
Fonte: Zeimetz e Kuhlmann (2008).

As medidas são realizadas dentro da câmara anecóica para evitar problemas de multicaminho. Essas câmaras possuem materiais específicos em suas paredes, capazes de absorver os sinais de testes evitando assim a reflexão dos sinais. O posicionador rotaciona a antena por pequenos ângulos de elevação e azimute, de forma que seja possível simular diferentes direções para o satélite GNSS (ZEIMETZ; KUHLMANN, 2008).

No processo de calibração absoluta em campo, a ideia principal é eliminar os efeitos de multicaminho, seja com base em diferenças das observações em dois dias consecutivos (mesmo horário sideral) ou usando um robô de alta precisão que rotaciona ou

inclina (*tilt*) a antena a ser calibrada a uma determinada velocidade (Figura 11). Observações de uma antena estacionada próxima são necessárias para eliminar efeitos dependentes da distância. Os resultados são PCV absoluto, independentes do tipo de antena de referência (SEEBER, 2003).



Figura 11 - Robô para calibração absoluta em campo de antenas GNSS
Fonte: Zeimetz e Kuhlmann (2008).

O método de calibração absoluta, atualmente, é conhecido como IfE/GEO++, devido a parceria entre o Instituto de Geodésia e Levantamento (IfE) da Universidade de Hannover e a empresa GEO++. Os valores de PCV absoluto estão, na maioria, abaixo de 10 mm, porém podem alcançar valores bem maiores. Contudo, o impacto (erro) na determinação da altura da antena no posicionamento pode alcançar a ordem de vários centímetros.

Para a utilização dos dados de PCO e PCV, um formato RINEX (*Receiver INdependent EXchange format*) foi desenvolvido e denominado formato ANTEX. Até a data 5 de novembro de 2006, era utilizada a calibração relativa das antenas tendo como referência a antena “Done Margolin”. Nesse caso, o usuário deve usar o arquivo ANTEX igs_01.pcv disponível em <ftp://www.igs.org/pub/station/general> (Acesso em: jan. 2012). A partir de 5 de novembro de 2006, recomenda-se o uso da calibração absoluta para as antenas dos receptores e satélites (KOUBA, 2009).

Com relação à variação do centro de fase da antena do satélite, esse é o ponto de referência para a emissão dos sinais. Esse centro de fase difere do centro de massa que é o ponto de referência para as coordenadas dos satélites. A correção dessa diferença se faz necessária para a obtenção de órbitas com alta precisão e, conseqüentemente, para posicionamento preciso.

As correções com relação ao centro de fase do satélite (PCO) são aplicadas em um sistema de coordenadas fixo no satélite (Figura 12), o qual também é utilizado para aplicar as correções de pressão de radiação solar (MARQUES, 2005). Nesse caso, o eixo Z_R (*radial*) aponta para o centro de massa da Terra, o eixo transversal Y_T (*along-track*) é tangente à trajetória do satélite, enquanto que o terceiro eixo normal X_N (*cross-track*) completa o sistema dextrogiro e fica no plano formado pelo Sol e pela Terra. Essa definição falha quando o Sol, o satélite e a Terra se alinham colinearmente.

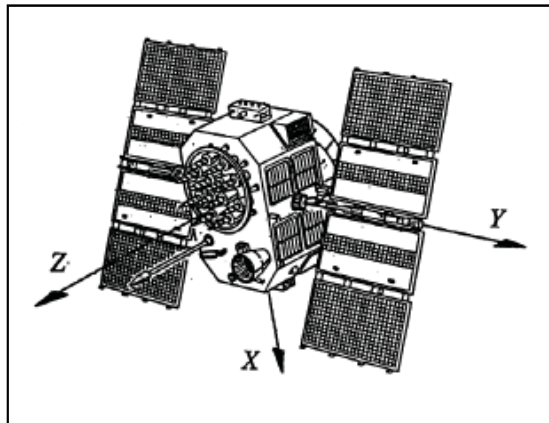


Figura 12 - Sistema de referência centrado no satélite (Bloco IIA)
Fonte: Fortes (2002).

A definição matemática dos eixos centrados no satélite é obtida considerando as coordenadas do satélite (\bar{X}_{sat}) e as coordenadas do Sol (\bar{X}_{sol}) no sistema fixo na Terra. O vetor unitário \bar{e} do Sol apontando para o satélite é calculado da seguinte forma (WITCHAYANGKOON, 2000):

$$\bar{e} = \frac{\bar{X}_{sol} - \bar{X}_{sat}}{|\bar{X}_{sol} - \bar{X}_{sat}|} \quad (3.11)$$

As coordenadas do Sol podem ser calculadas a partir de modelos matemáticos de baixa precisão (MONTENBRUCK; GILL, 2005). O vetor unitário no centro de massa do satélite apontando para o geocentro (*radial*) é dado por:

$$Z_R = -\frac{\bar{X}_{\text{sat}}}{|\bar{X}_{\text{sat}}|} \quad (3.12)$$

O vetor unitário na direção do painel solar do satélite (*along-track*) pode ser calculado da seguinte forma:

$$Y_T = Z_R \times \bar{e} \quad (3.13)$$

onde ‘ \times ’ representa produto vetorial.

O vetor unitário X (*cross-track*) que completa o sistema dextrogiro é dado por:

$$X_N = Y_T \times Z_R \quad (3.14)$$

Fazendo C denotar o vetor de correções do centro de fase expressas no sistema de coordenadas fixo no satélite, obtém-se a respectiva correção no sistema de coordenadas fixo na Terra a partir de (WITCHAYANGKOON, 2000):

$$\Delta X_{\text{sat}} = R^{-1}C \quad (3.15)$$

onde a matriz R é dada por:

$$R = \begin{bmatrix} X_N^t \\ Y_T^t \\ Z_R^t \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

onde, t representa vetor transposto.

Finalmente, as correções aplicadas ao centro de fase da antena do satélite são dadas por:

$$X_{\text{sv}} = X_{\text{sat}} + \Delta X_{\text{sat}} \quad (3.17)$$

Os valores de PCV e PCO relacionados com os satélites de um determinado bloco também são estimados e distribuídos no arquivo formato ANTEX. Os valores podem ser encontrados para os satélites mais antigos, bem como para os lançados mais recentemente.

Atualmente, os valores são fornecidos para as frequências L1 e L2, o que deve ser levado em consideração no caso de se aplicar a combinação *ion-free* na etapa de processamento dos dados.

A Figura 13 mostra a variação dos valores de PCV em função dos ângulos de elevação e de azimute na frequência L1 para a antena AOAD/M_T - NONE:

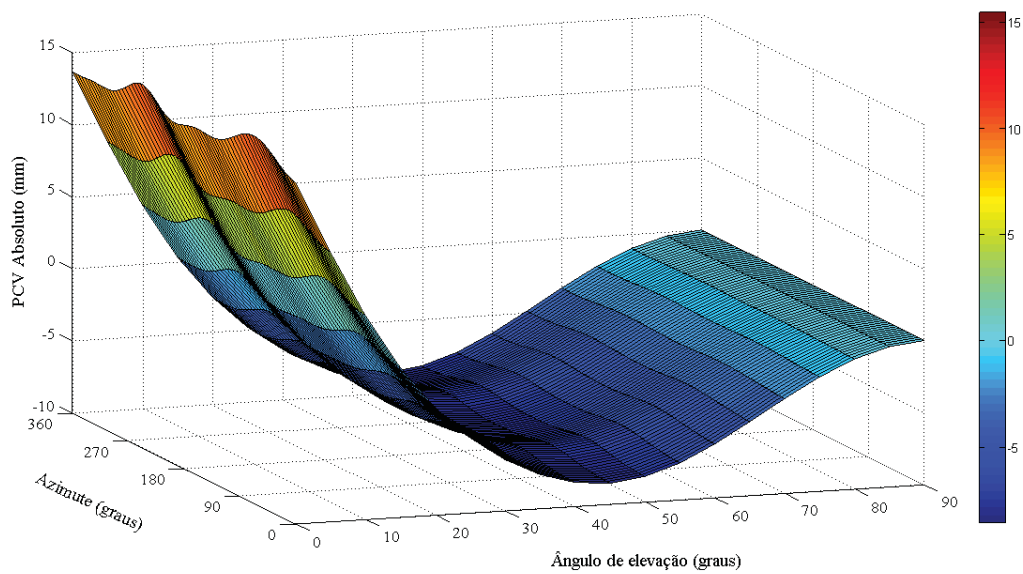


Figura 13 - PCV absoluto na frequência L1 em função do ângulo de elevação e azimute (antena: AOAD/MT - NONE)

A Figura 14 mostra os valores de PCV absoluto nas frequências L1 e L2 (antena: AOAD/MT - NONE) em função do ângulo de elevação e considerando um azimute de 45 graus:

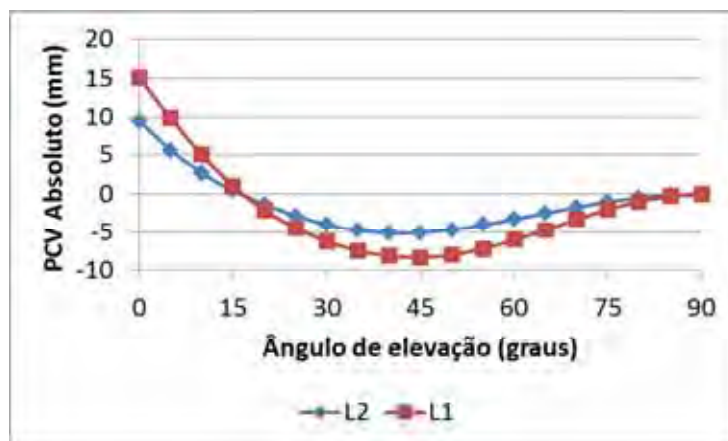


Figura 14 - PCV absoluto L1 e L2 em função do ângulo de elevação (antena: AOAD/MT - NONE)

Como pode ser verificado na Figura 13 e na Figura 14, os valores de PCV na L1 para a antena AOAD/MT - NONE variam de aproximadamente -10 até 15 mm. A variação é bem maior em função do ângulo de elevação do que em função do azimute.

3.2.6 Correção fase *windup*

A polarização de uma onda eletromagnética é o modo de vibração constante da fase no plano, no qual uma onda não polarizada, tal como a luz natural, vibra em todas as direções. Entretanto, sinais eletromagnéticos podem ser polarizados de diferentes maneiras, como por exemplo, elíptica, circular, etc. Na Figura 15 (a), observa-se que a onda é linear, com a direção j do vetor campo elétrico E constante no tempo e variação somente em amplitude H . No caso do GPS, os sinais são polarizados circularmente à direita (*right-handed*), cuja escolha dessa polarização se deve ao fato do sinal GPS atravessar a atmosfera. Nesse caso, o campo elétrico faz um movimento espiral a partir do transmissor como mostrado na Figura 15 (b) (ODIJK, 2002; LANGLEY, 1998; LEICK, 1995):

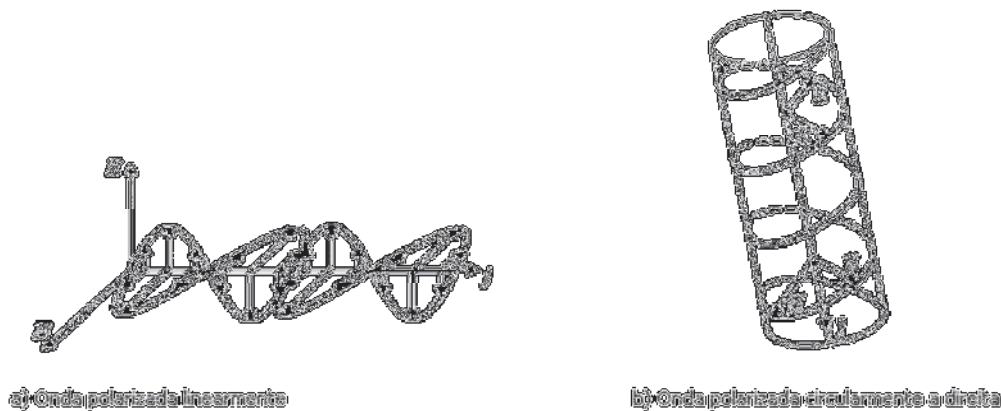


Figura 15 - Ondas eletromagnéticas
Fonte: Adaptada de Odiijk (2002).

O vetor campo elétrico rotaciona 360° a cada comprimento de onda espacial ou a cada ciclo temporal da onda. A fase portadora observada pode ser visualizada como o ângulo geométrico entre o vetor campo elétrico instantâneo na antena receptora e alguma direção de referência sobre a antena. Como a antena receptora (receptor GPS) pode rotacionar em azimute, esta medida de fase também muda e o mesmo se pode dizer quando a antena transmissora (satélite) muda sua orientação com relação ao receptor (LEICK, 2004).

À medida que as antenas rotacionam, seja do receptor ou do satélite, a mudança na observação da fase se acumula, sendo denominada de fase *windup*. Em geral, a antena do receptor mantém sua orientação voltada para uma direção, geralmente, o Norte. Porém, os painéis solares dos satélites GPS são orientados para o Sol e dessa forma a antena está sujeita a lentas rotações conhecidas. No período em que o satélite entra ou sai da sombra da Terra, ocorre o giro do meio dia e da meia noite (*noon and midnight turn*) para reorientar os painéis solares e esse fato também provoca rápidas rotações, os quais também afetam a fase portadora coletada.

A correção do efeito da fase *windup* ($\Delta\phi$) é calculada da seguinte forma (LEICK, 2004):

$$\begin{aligned} d &= \hat{x} - Z^r (Z^r \cdot \hat{x}) + Z^r \times \hat{y} \\ d' &= X_N - Z^r (Z^r \cdot X_N) - Z^r \times Y_T \\ \zeta &= Z^r \cdot (d' \times d) \\ \Delta\phi &= \text{sign}[\zeta] \cos^{-1} \left(\frac{d' \cdot d}{\|d'\| \|d\|} \right) \end{aligned} \quad (3.18)$$

onde:

\hat{x} e \hat{y} - vetores unitários, respectivamente, na direção leste e oeste do sistema local noreceptor;

X_N e Y_T - vetores unitários no sistema de coordenadas do satélite;

Z^r - vetor unitário apontando do satélite para o receptor;

$$\text{sign}[\zeta] = \begin{cases} 1 & \text{para } \zeta > 0 \\ 0 & \text{para } \zeta = 0 \\ -1 & \text{para } \zeta < 0 \end{cases}$$

A correção da fase *windup*, geralmente, é negligenciada no posicionamento relativo com aplicação das duplas diferenças. Porém, para PPP os efeitos são significantes podendo alcançar metade de um comprimento de onda. Desde 1994, a maioria dos centros de análises do IGS aplica essa correção na determinação de órbitas, erro dos relógios dos satélites e produtos combinados. A negligência da correção da fase *windup* para o PPP ao se fixar as órbitas e erro dos relógios dos satélites pode resultar em erros da ordem de decímetros no posicionamento (KOUBA, 2009).

3.3 Efeitos sistemáticos relacionados com a propagação do sinal na atmosfera

Os sinais provenientes dos satélites propagam-se através da atmosfera dinâmica, atravessando camadas de diferentes naturezas e estados variáveis. Para propósitos de posicionamento geodésico, o meio no qual ocorre a propagação do sinal, geralmente, é dividido em troposfera e ionosfera, cada uma com características bem definidas (MONICO, 2008). Contudo, a atmosfera pode ser subdividida em outras camadas, como exemplificado na Figura 16:

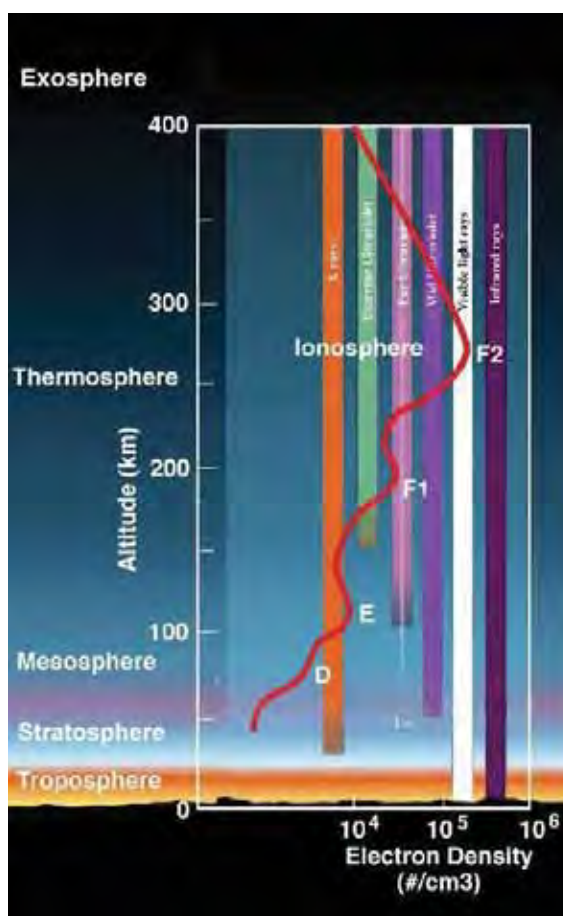


Figura 16 - Regiões atmosféricas

Fonte: Adaptada de: <http://www.nasa.gov> (Acesso em: jan. 2012).

No que concerne à divisão entre troposfera e ionosfera, existem diferentes definições com relação à altitude dessas camadas. O final da troposfera e, conseqüentemente, o início da ionosfera, varia entre aproximadamente 50 e 80 km e a ionosfera se estende até aproximadamente 1000 e 1500 km (KLOBUCHAR, 1996; DAVIES, 1990; LEICK, 2004;

KAPLAN, 2006). As próximas seções descrevem os efeitos da ionosfera e troposfera na propagação do sinal e modelagem matemática para o posicionamento geodésico.

3.3.1 Ionosfera

A ionosfera é um meio dispersivo e nesta região os raios ultravioleta do Sol ionizam uma porção de moléculas de gases e liberam elétrons livres que afetam o sinal das ondas de rádio e conseqüentemente o sinal dos satélites GNSS. A transição de um gás para um gás ionizado (ou seja, o plasma) ocorre gradualmente. Durante o processo, um gás molecular dissocia primeiro em um gás atômico que ioniza com o aumento da temperatura. O plasma resultante consiste de uma mistura de partículas neutras, íons positivos (átomos e moléculas que tem perda de um ou mais elétrons) e elétrons negativos (KAPLAN, 2006; LEICK, 2004).

Devido às diferentes moléculas e átomos presentes na atmosfera e suas diferentes taxas de absorção, distintas camadas ionosféricas são formadas. Ao ser descoberta, a ionosfera foi primeiramente nomeada pelas letras E e F, respectivamente para *Electric* e *Field* com a ideia de que camadas menos densas ou letras anteriores do alfabeto poderiam surgir (KLOBUCHAR, 1996). Atualmente, as camadas são divididas em D, E e F (Figura 16).

A camada D fica na parte mais baixa da camada ionosférica entre 60 e 90 km acima da Terra. A atmosfera nessa região é ainda muito densa e os átomos que foram divididos em íons se recombinam rapidamente. O nível de ionização é diretamente relacionado com a radiação solar que começa no nascer do Sol e diminui drasticamente ou até mesmo desaparece durante a noite (LEICK, 2004; MATSUOKA, 2007).

A camada E se estende de aproximadamente 90 até 140 km acima da Terra e a fonte primária de ionização é a radiação solar eletromagnética na faixa do raio-X. Essa camada também é composta por uma fina camada designada de “E - Esporádica”, oriunda de variações na densidade de elétrons próximo a região compreendida entre 90 e 130 km (KLOBUCHAR, 1996; McNAMARA, 1991).

A camada F se localiza, aproximadamente, entre as altitudes de 140 km e 1000 km, sendo, ainda, subdividida em camadas F1 e F2 que surgem durante o dia. Nesta camada, os elétrons e íons se recombinam lentamente devido à baixa pressão. Os efeitos observáveis da radiação solar se desenvolvem mais lentamente e picos da densidade de elétrons são observados após o meio dia. A camada F1 é formada entre as altitudes

aproximadas de 140 km e 200 km e a camada F2 entre 200 e 1000 km (KLOBUCHAR, 1996; MATSUOKA, 2007).

A camada F1 juntamente com a camada E provoca até 10% do atraso no sinal GPS. A camada F2 é mais densa e apresenta mais alta variabilidade, causando os maiores efeitos na propagação de ondas de rádio na frequência do GPS. A altura do pico da densidade de elétrons na camada F2 varia entre 250 e 400 km, mas pode ser mais alta ou algumas vezes mais baixa em extremas condições da atmosfera (KLOBUCHAR, 1996).

As variações temporais da ionosfera compreendem as variações diurnas, sazonais e ciclos de longos períodos e influenciam diretamente na mudança da densidade de elétrons na ionosfera. As variações diurnas são provocadas por mudanças que ocorrem em certas regiões da ionosfera, que desaparecem à noite devido à recombinação e junção dos elétrons e ions.

A principal razão da existência da variação diurna é devido à iluminação do Sol, ou seja, à radiação solar. A variação sazonal ocorre durante os meses do ano em uma determinada região devido à variação sazonal do ângulo zenital do Sol e também devido às mudanças intrínsecas da camada ionosférica. Valores máximos da densidade de elétrons ocorrem, aproximadamente, nos meses de março, abril, setembro e outubro (equinócio) e valores mínimos nos meses de solstícios de inverno e verão. As variações de ciclos de longos períodos na densidade de elétrons, com ciclos de aproximadamente 11 anos, são associadas às ocorrências de manchas solares (*sunspot*).

O aumento do número de manchas solares aumenta a radiação solar e ocasiona uma mudança na densidade de elétrons na ionosfera. A Figura 17, mostra o histórico dos ciclos solares (número de manchas) desde 1900 até atualmente e a Figura 18 mostra a predição realizada pela NASA até 2020:

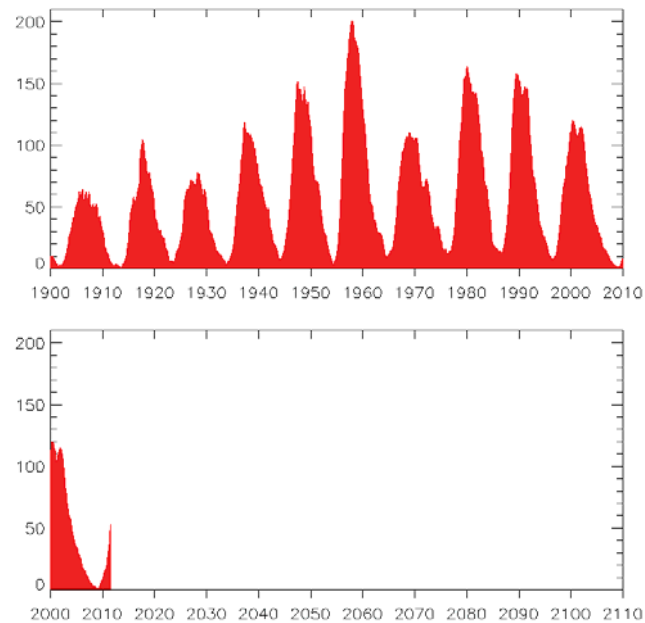


Figura 17 - Histórico do número de manchas solares (ciclos solares)
 Fonte: Adaptada de: <http://sidc.oma.be/html/wolfaml.html> (Acesso em: jan. 2012).

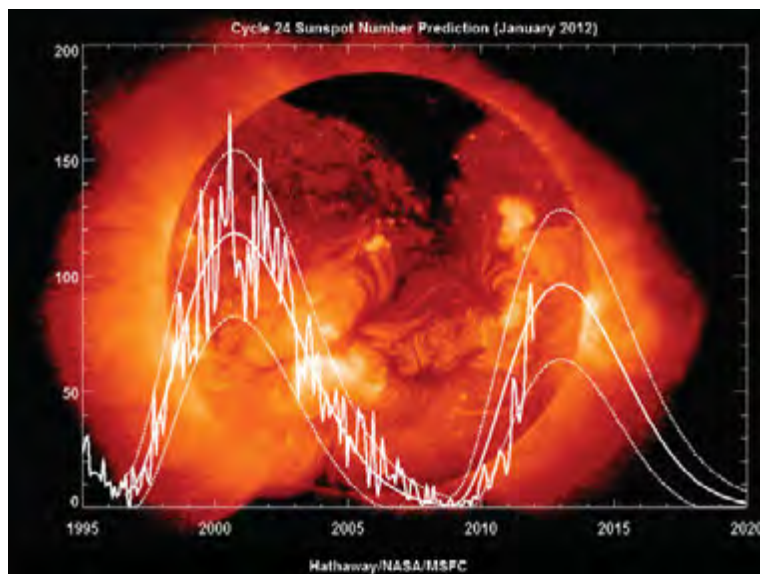


Figura 18 - Predição do número de manchas (ciclo solar 24)
 Fonte: http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/ssn_predict_1.gif (Acesso em: jan. 2012).

O último pico do número de manchas solares foi para o ciclo 23 e ocorreu em meados do ano 2000 e o ciclo 24 deverá apresentar pico máximo em meados de 2013.

Em termos de posicionamento geodésico, o parâmetro da ionosfera que produz a maioria dos efeitos nos sinais GPS é o número total de elétrons na ionosfera, denominado TEC. O TEC é o número de elétrons em uma coluna vertical com um metro

quadrado de sessão cruzada estendendo sobre todo o caminho do satélite GPS até o receptor. Um valor de TEC igual a 10^{16} elétrons/m² é chamado de unidades de TEC, mais conhecido como TECU (*TEC-UNIT*). Valores de TEC de 10^{16} a 10^{19} el/m², ao longo do caminho de ondas de rádio, representam os extremos dos valores observados na ionosfera terrestre (KLOBUCHAR, 1996). A próxima seção descreve a modelagem da ionosfera no posicionamento geodésico.

3.3.1.1 Modelagem da ionosfera no posicionamento geodésico

O atraso de propagação na ionosfera depende, principalmente, do TEC ao longo do caminho percorrido pelo sinal e da frequência utilizada. Os principais parâmetros que causam influência são: a atividade solar e o campo geomagnético, uma vez que a refração ionosférica varia com a frequência, a localização geográfica e o tempo (SEEBER, 2003).

O efeito ionosférico no sinal GPS pode alcançar de poucos metros a mais de dez metros na direção zenital. A ionosfera é um meio dispersivo, o que significa que o sinal apresenta diferentes atrasos para diferentes frequências, logo, receptores de dupla frequência levam vantagens no sentido que é possível realizar a combinação *ion-free* para minimizar ou eliminar os efeitos de primeira ordem da ionosfera. Contudo, os efeitos de segunda ou terceira ordem da ionosfera não são eliminados.

O atraso ionosférico de primeira ordem é uma função do termo $\int N_e d\rho$, o que representa o TEC ao longo da linha geométrica do receptor até o satélite, ou seja, o STEC (*Slant TEC*). No caso do TEC na direção vertical, geralmente, utiliza-se o termo VTEC (*Vertical TEC*). Dessa forma, os atrasos ionosféricos de primeira ordem para o código (grupo) ($I_g^{(1)}$) e para a fase ($I_\phi^{(1)}$) podem ser escritos como:

$$\begin{aligned} I_{g \text{ Li}}^{(1)} &= \frac{40,3}{f_{\text{Li}}^2} \text{STEC} \\ I_{\phi \text{ Li}}^{(1)} &= -\frac{40,3}{f_{\text{Li}}^2} \text{STEC} \end{aligned} \quad (3.19)$$

onde Li representa a frequência do sinal GPS.

Considerando somente o efeito ionosférico calculado para a portadora L1 é possível obter o efeito para a portadora L2 com base na Equação 3.19. Nesse caso, isolando o STEC na equação do atraso ionosférico do grupo, têm-se:

$$\text{STEC} = \frac{f_1^2}{40,3} I_{g \text{ L1}}^{(1)} \quad (3.20)$$

O efeito de primeira ordem para a pseudodistância na L2 é dado por:

$$I_{g \text{ L2}}^{(1)} = \frac{40,3}{f_{L2}^2} \text{STEC} \quad (3.21)$$

Substituindo a Equação 3.20 do STEC na equação 3.21, têm-se:

$$\begin{aligned} I_{g \text{ L2}}^{(1)} &= \frac{40,3}{f_{L2}^2} \frac{f_{L1}^2}{40,3} I_{g \text{ L1}}^{(1)} \\ \Rightarrow I_{g \text{ L2}}^{(1)} &= \frac{f_{L1}^2}{f_{L2}^2} I_{g \text{ L1}}^{(1)} \end{aligned} \quad (3.22)$$

De forma mais simplificada, o efeito de primeira ordem da ionosfera para o grupo na portadora L2 pode ser calculado por:

$$I_{g \text{ L2}}^{(1)} = \beta I_{g \text{ L1}}^{(1)} \quad (3.23)$$

onde, $\beta = \frac{f_{L1}^2}{f_{L2}^2}$.

A correção dos efeitos de primeira ordem da ionosfera para dados coletados por receptores de simples frequência pode ser calculada pelo modelo de Klobuchar, a partir de modelos globais da ionosfera disponibilizados em forma de mapas globais (GIM - *Global Ionosphere Maps*), a partir de modelos regionais da ionosfera ou a partir da estimativa do efeito ionosférico no processamento dos dados GNSS. A estratégia de estimativa da ionosfera no PPP será detalhada na seção 5.3.

A utilização do modelo de Klobuchar requer o uso de oito coeficientes α_i e β_i , ($i = 1, \dots, 4$) que são enviados nas mensagens de navegação GPS, da latitude (Φ) e

longitude (λ) geodésica da estação, do azimute e ângulo de elevação do satélite e do tempo GPS da época de observação. O procedimento para efetuar o cálculo é descrito em Klobuchar (1996). Um aplicativo com código fonte em linguagem de programação Fortran pode ser encontrado no endereço de internet <http://www.ngs.noaa.gov/gps-toolbox/ovstedal.htm> (Acesso em: jan. 2012).

Os efeitos ionosféricos na frequência L1 mapeados para a direção receptor satélite (inclinados) foram calculados com base no modelo de Klobuchar e a Figura 19 mostra a série temporal para cada satélite na estação SJRP (lat: -20° e lon.: -49°) durante o dia 07 de abril de 2011 (escolhido aleatoriamente).

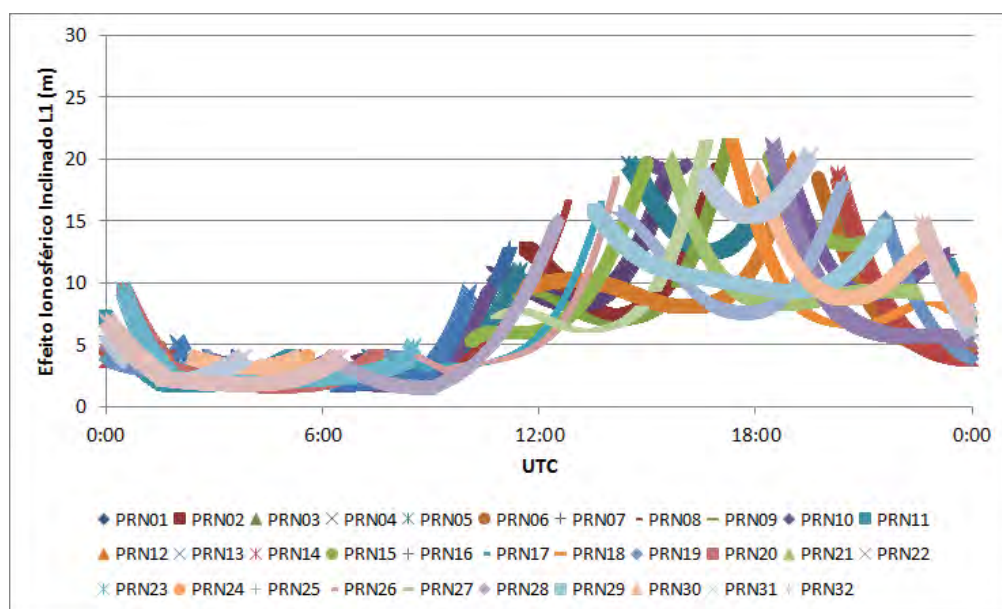


Figura 19 - Efeito ionosférico inclinado a partir do modelo de Klobuchar (Estação SJRP 2011)

O modelo de Klobuchar utiliza-se da função coseno para descrever a variação da ionosfera durante o dia e apresenta amplitude máxima às 14 horas local. A amplitude (A) e o período (P) da função coseno são calculados em função da latitude geomagnética e dos coeficientes transmitidos pelos satélites e representados por um polinômio de terceiro grau (LEICK, 1995).

Os efeitos ionosféricos na frequência L1 também foram interpolados a partir do mapa global gerado pelo CODE e a Figura 20 apresenta a série temporal para cada satélite na estação SJRP.

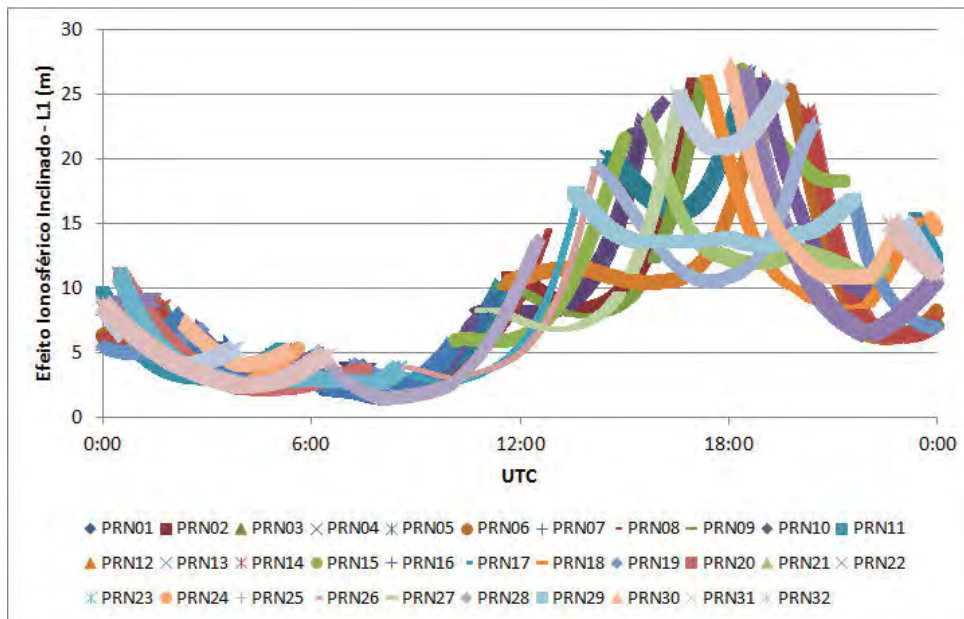


Figura 20 - Efeito ionosférico na direção receptor-satélite com base no GIM (Estação SJRP 2011)

Verifica-se na Figura 20 que, no caso da ionosfera calculada a partir do GIM, o pico máximo atingiu valores de aproximadamente 25 metros, enquanto que para o modelo de Klobuchar (Figura 19) os valores no pico máximo foram de aproximadamente 20 m. O GIM é gerado em soluções diárias com base em ajustamento de dados GNSS observados em aproximadamente 150 estações da rede global do IGS.

Os mapas globais da ionosfera produzidos pela agência CODE são disponibilizados no formato denominado IONEX com latência de aproximadamente 3 dias. Existe a solução rápida com latência de aproximadamente 12 horas e ainda, a solução predita, a qual pode ser utilizada para aplicações em tempo real. Informações sobre os tipos de mapa global disponibilizado pelo CODE podem ser encontradas em <http://aiuws.unibe.ch/ionosphere/> (Acesso em: jan. 2012).

Considerando receptores de dupla frequência, é possível aplicar a combinação linear denominada *ion-free*. No caso da fase da onda portadora, a combinação pode ser expressa da seguinte forma:

$$\phi_{IF} = m_1\phi_1(t) + m_2\phi_2(t) \quad (3.24)$$

onde, ϕ_1 e ϕ_2 , representam as medidas de fase relacionadas, respectivamente, com as frequências L1 e L2 e m_1 e m_2 são os coeficientes multiplicadores da combinação.

A frequência da combinação *ion-free* e o respectivo comprimento de onda são calculados por:

$$\begin{aligned} f_{\text{IF}} &= m_1 f_1 + m_2 f_2 \\ \lambda_{\text{IF}} &= \frac{c}{m_1 f_1 + m_2 f_2} \end{aligned} \quad (3.25)$$

A ambiguidade da combinação linear fica da seguinte forma:

$$N_{\text{IF}} = N_1 m_1 + N_2 m_2 \quad (3.26)$$

A partir da equação acima, verifica-se que N_{IF} é inteiro se m_1 e m_2 são inteiros. Para que os efeitos de primeira ordem da ionosfera sejam eliminados usando a combinação da Equação 3.24 é necessário impor algumas condições. O termo I_{rLi}^s , implícito nas equações de fase e pseudodistância (seção 3.1), é cancelado com base na seguinte condição:

$$\frac{m_1}{f_1} + \frac{m_2}{f_2} = 0 \quad (3.27)$$

Outra condição pode ser imposta tal que a combinação resultante seja semelhante ao sinal da portadora L1, porém sem o efeito ionosférico. Essa condição é obtida quando a frequência da combinação *ion-free* é adotada como igual à frequência do sinal L1 (GOAD, 1996):

$$m_1 f_1 + m_2 f_2 = f_1 \quad (3.28)$$

Com base nas condições impostas pelas Equações 3.27 e 3.28, os coeficientes m_1 e m_2 para o caso da observável fase são dados por (GOAD, 1996):

$$\begin{aligned}
m_{1\text{ph}} &= \frac{f_1^2}{(f_1^2 - f_2^2)} \cong 2,5457 \\
m_{2\text{ph}} &= -\frac{f_1 f_2}{(f_1^2 - f_2^2)} \cong -1,9837
\end{aligned}
\tag{3.29}$$

Para o caso da pseudodistância, o índice m_1 é adotado igual ao da fase e a partir daí obtém-se o índice m_2 :

$$\begin{aligned}
m_1 &= \frac{f_1^2}{(f_1^2 - f_2^2)} \cong 2,5457 \\
m_2 &= -\frac{f_2^2}{(f_1^2 - f_2^2)} \cong -1,5457
\end{aligned}
\tag{3.30}$$

A aplicação dos coeficientes das Equações 3.29 e 3.30, respectivamente, para as equações de fase e pseudodistancia (seção 3.1) permite eliminar os efeitos de primeira ordem da ionosfera, porém, restam os efeitos de segunda e terceira ordem. Os efeitos de segunda e terceira ordem também são diretamente proporcionais ao STEC, porém o efeito de segunda ordem é dependente do campo geomagnético da Terra e o de terceira ordem é dependente da densidade máxima de elétrons ao longo das camadas da ionosfera. O desenvolvimento das equações para incluir os efeitos de 2ª e 3ª ordem da ionosfera nas observáveis GNSS, bem como outras discussões sobre o assunto, pode ser encontrado em Bassiri e Hajj (1993), Odijk (2002), Kedar et al. (2003), Hernández-Pajares et al. (2005), Kim e Tinin (2006), Hoque e Jakowski (2006), Marques, Monico e Aquino (2011), dentre outros.

Uma consideração muito importante sobre a combinação *ion-free* é que ela também elimina o atraso de *hardware* (P1-P2) (seção 3.2.4). Considerando a incerteza das medidas observadas pode-se obter a incerteza da combinação *ion-free* ($\sigma_{\phi_{\text{IF}}}$) com base na lei de propagação de variância e covariância. A partir da Equação 3.24, para o caso da fase tem-se:

$$\sigma_{\phi_{\text{IF}}} = \sqrt{m_1^2 \sigma_{\phi_1}^2 + m_2^2 \sigma_{\phi_2}^2}
\tag{3.31}$$

Adotando, por exemplo, os valores de 2 mm e 3 mm para σ_{ϕ_1} e σ_{ϕ_2} , respectivamente, a incerteza $\sigma_{\phi_{\text{IF}}}$, usando a Equação 3.31, fica com o valor de 7,832 mm.

Dessa forma, verifica-se que a incerteza da combinação *ion-free* sofre forte degradação com relação à incerteza das medidas originais. Além disso, a combinação *ion-free* realça o nível de ruído de outros efeitos, tal como o de multicaminho, e a ambiguidade da combinação (Equação 3.26) perde sua característica de número inteiro, algo que requer técnicas apropriadas para a sua determinação (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; COLLINS, 2001; LEICK, 2004).

3.3.2 Troposfera

A troposfera é a camada localizada entre a ionosfera e a superfície da Terra. O gradiente de concentração dos gases presentes nessa camada é um dos fatores que influencia a qualidade obtida no posicionamento geodésico utilizando satélites artificiais. Essa influência gera um atraso no sinal, que ao ser projetado na direção zenital é denominado Atraso Zenital Troposférico (ZTD - *Zenital Tropospheric Delay*) (SAPUCCI, 2001).

A troposfera se comporta como um meio não dispersivo para frequências abaixo de 30 GHz, ou seja, a refração não depende da frequência do sinal. O atraso provocado nos sinais GNSS é gerado pela atmosfera hidrostática e úmida. O atraso devido à componente hidrostática varia em função da temperatura, latitude e pressão atmosférica e pode ser estimado ou predito com razoável precisão, pois sua variação é pequena, sendo da ordem de 1% durante várias horas. O atraso devido à atmosfera úmida é gerado pela influência do vapor d'água atmosférico total e sua variação é muito maior, atingindo cerca de 20% em poucas horas, o que torna muito difícil sua predição com boa precisão, até mesmo quando se têm medidas de umidade superficiais disponíveis (SEEBER, 2003).

O atraso troposférico é causado pela variação do índice de refração (n) dos gases atmosféricos em relação ao ar livre. Essa variação provoca uma leve curvatura na trajetória S do sinal em relação à trajetória geométrica S_g entre o satélite e o receptor GNSS. Dessa forma, o modelo que estima o atraso troposférico, entre a antena de um receptor r e um satélite s , tem a seguinte forma:

$$T_r^s = S - S_g = 10^{-6} \int N_T ds \quad (3.32)$$

onde N_T é a refratividade da troposfera. A integral ao longo do caminho do sinal do satélite até o receptor é solucionada quando se conhece o valor de N_T (MONICO, 2008).

A expressão empírica mais utilizada para a refratividade de gases não ideais incluindo o vapor d'água foi desenvolvida por Thayer (1974) apud Spilker (1996), a qual é dada por:

$$N_T = k_1 \frac{P_h}{T} Z_h^{-1} + k_2 \frac{\bar{e}}{T} Z_w^{-1} + k_3 \frac{\bar{e}}{T^2} Z_w^{-1} \quad (3.33)$$

onde:

P_h - pressão parcial da componente hidrostática (ar seco);

\bar{e} - pressão parcial do vapor d'água;

T - temperatura na superfície terrestre em graus Kelvin;

Z_h e Z_w - constante de compressibilidade, respectivamente para as componentes hidrostática e úmida;

k_1, k_2 e k_3 - constantes físicas que são baseadas em parte na teoria e parte sobre experimentos observados.

Os valores experimentais gerados por Thayer em unidade de (K/m) são $k_1 = 77,604 \pm 0,0124$; $k_2 = 64,79 \pm 10$; $k_3 = 377600 \pm 3000$. Uma expressão para obter os valores do inverso da compressibilidade é dada por (SPILKER, 1996):

$$\begin{aligned} Z_d^{-1} &= 1 + P_h \left[57,97 \cdot 10^{-8} \left(1 + \frac{0,52}{T} \right) - 9,4611 \cdot 10^{-4} \frac{T_c}{T} \right] \\ Z_w^{-1} &= 1 + 1650 \left(\frac{\bar{e}}{T^3} \right) \left[1 - 0,01317 T_c + 1,75 \cdot 10^{-4} T_c^2 + 1,44 \cdot 10^{-6} T_c^3 \right] \end{aligned} \quad (3.34)$$

onde, T_c e T são, respectivamente, a temperatura em graus Celsius e Kelvin, P_h é pressão parcial da componente hidrostática em mb (SPILKER, 1996).

A relação da refratividade do ar com a altitude na atmosfera deve ser bem conhecida para solucionar o atraso troposférico do sinal GNSS como descrito pela Equação 3.32. Essa relação depende da razão de mistura das componentes hidrostática e úmida, porém, é possível tornar os termos da Equação 3.33 independentes dessa razão reescrevendo os dois primeiros termos dessa equação e fazendo um tratamento algébrico, a partir do qual se obtém (SAPUCCI, 2001):

$$N_T = N_h + N_w = k_1 R_h \rho + k_2 \frac{\bar{e}}{T} Z_w^{-1} + k_3 \frac{\bar{e}}{T^2} Z_w^{-1} \quad (3.35)$$

onde ρ é a densidade do ar, $R_h = 287,0538$ J/kg.K é a constante específica dos gases hidrostáticos e k_2' é dado por:

$$k_2' = k_2 - k_1 \frac{R_h}{R_w} \quad (3.36)$$

onde, $R_w = 461,5181$ J/kg.K é a constante específica do vapor d'água.

A Equação 3.35 permite a separação da refratividade em função das componentes hidrostática e úmida. No caso, a componente hidrostática não depende mais da razão de mistura com a componente úmida, mas apenas da densidade total da atmosfera, o que explica o motivo pela qual a componente hidrostática pode ser determinada com razoável precisão a partir de medidas atmosféricas efetuadas na superfície.

3.3.2.1 Modelagem da troposfera no posicionamento geodésico

O atraso troposférico T_r^s pode ser aproximado como a soma dos efeitos das componentes hidrostática e úmida. Geralmente, cada uma das componentes é expressa como o produto do atraso zenital (vertical) por uma função de mapeamento, a qual relaciona o atraso vertical com o atraso para ângulos de elevação (E) do satélite. De forma simplificada, o atraso troposférico pode ser escrito da seguinte forma (MONICO, 2008):

$$T_r^s = [T_{zh} mh(E) + T_{zw} mw(E)] \quad (3.37)$$

onde:

T_{zh} - atraso zenital da componente hidrostática;

T_{zw} - atraso zenital da componente úmida;

$mh(E)$ e $mw(E)$ - funções de mapeamento que relacionam o atraso das componentes hidrostáticas e úmida com o ângulo de elevação (E).

Para o cálculo do atraso zenital troposférico, pode-se utilizar modelos empíricos da troposfera, os quais, geralmente já possuem implícita ou explicitamente, uma função de mapeamento. Existem diversos modelos e um dos mais conhecidos é o de Hopfield

que foi desenvolvido durante os anos 60. As equações do modelo de Hopfield são mostradas a seguir e podem ser encontradas em Seeber (2003):

$$\begin{aligned}
 T_r^s &= T_{zh} mh(E) + T_{zw} mw(E) \\
 T_{zh} &= 155,2 \times 10^{-7} \frac{P}{T} H_d \\
 T_{zw} &= 155,2 \times 10^{-7} \frac{4810 \bar{e}}{T^2} H_w \\
 mh(E) &= \left(\text{sen}(E^2 + 6,25)^{1/2} \right)^{-1} \\
 mw(E) &= \text{sen} \left((E^2 + 2,25)^{1/2} \right)^{-1} \\
 H_d &= 40136 + 148,72(T - 273,16) \\
 H_w &= 11000 \text{ m}
 \end{aligned} \tag{3.38}$$

Os termos T_{zh} e T_{zw} juntos descrevem o efeito total da refração troposférica na direção do zênite, $mh(E)$ e $mw(E)$ são as funções de mapeamento, sendo que o ângulo de elevação E do satélite é dado em graus. Além disso, T representa a temperatura do ar, P é a pressão em mbar e \bar{e} é a pressão parcial do vapor d'água.

Uma forma de calcular a pressão parcial do vapor d'água \bar{e} em função da umidade relativa é apresentada por WMO (1960) apud Leick (2004):

$$\bar{e} = 0,01 R_{h\%} e^{-37,2465 + 0,213166 T - 0,000256908 T^2} \tag{3.39}$$

onde o termo “e” é o número neperiano.

A Figura 21 apresenta as componentes do atraso troposférico calculadas pelo modelo de Hopfield e sua variação em função do ângulo de elevação:

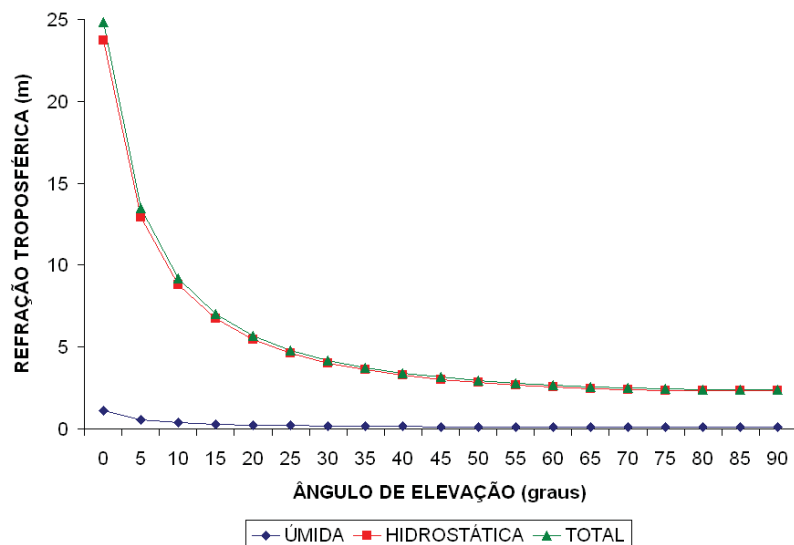


Figura 21 - Componentes do atraso troposférico calculadas pelo modelo de Hopfield

A partir da Figura 21, verifica-se que para ângulos de elevação baixos, o efeito total da troposfera calculado pelo modelo de Hopfield pode alcançar valores acima de 20 metros.

Com base na Equação 3.32, verifica-se que o atraso zenital troposférico (ZTD) pode ser obtido integrando-se as parcelas da Equação 3.35, a qual fica da seguinte forma:

$$ZTD = \underbrace{10^{-6} \int_{h_0}^{\infty} k_1 R_h \rho dh}_{T_{zh}} + \underbrace{10^{-6} \int_{h_0}^{\infty} \left(k_2 \frac{\bar{e}}{T} Z_w^{-1} + k_3 \frac{\bar{e}}{T} Z_w^{-1} \right) dh}_{T_{zw}} \quad (3.40)$$

Como pode ser visto na Equação 3.40, o atraso troposférico pode ser determinado em função da temperatura (T), da densidade do ar (ρ) e da pressão parcial do vapor d'água (e), com valores variando em função da altitude (h).

O atraso zenital troposférico hidrostático podem ser escrito da seguinte forma:

$$T_{zh} = 10^{-6} \int_{h_0}^{\infty} k_1 R_h \rho dh \quad (3.41)$$

A partir da Equação 3.41 as constantes podem ser deixadas do lado de fora da integral, facilitando o processo de integração. O desenvolvimento pode ser encontrado em Davies et al. (1985), Spilker (1996) e Sapucci (2001). No caso, a componente hidrostática pode ser calculada de forma aproximada por (DAVIES et al., 1985):

$$T_{zh} = [(0,0022768 \pm 0,0000005) \text{ m/mbar}] \frac{P_0}{(1 - 0,0026 \cos 2\varphi - 0,00028h)} \quad (3.42)$$

onde, P_0 é a pressão atmosférica na superfície em hPa, φ é a latitude do local e h a altitude em km. A incerteza na Equação 3.42 está relacionada com as incertezas na obtenção das constantes baseadas em valores observados experimentalmente.

Os termos restantes da Equação 3.40 se referem à componente úmida, a qual é dada por:

$$T_{zw} = 10^{-6} \int_{h_0}^{\infty} \left(k_2 \frac{\bar{e}}{T} Z_w^{-1} + k_3 \frac{\bar{e}}{T} Z_w^{-1} \right) dh \quad (3.43)$$

Previsões para a componente T_{zh} são obtidas com base nas coordenadas desse ponto e aplicando valores da pressão atmosférica na superfície prevista por um modelo de PNT (Previsão Numérica do Tempo). No caso da componente T_{zw} é necessário aplicar os perfis de temperatura e razão de mistura previsto pelo modelo de PNT. Depois de aplicados os valores do modelo de PNT, realiza-se o processo de integração numérica.

No Brasil, pesquisas relacionadas com relação à predição da troposfera com base em modelos de PNT são realizadas pelo CPTEC/INPE (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos / Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), cujo desenvolvimento se iniciou em conjunto com a FCT/UNESP (Faculdade de Ciências e Tecnologia/Universidade Estadual Paulista) como pode ser visto em Sapucci (2001; 2005). Valores de previsão para os pontos de uma grade são gerados e aplicados para obter os valores do ZTD. Posteriormente, esses valores podem ser interpolados para um determinado ponto de interesse pertencente à grade.

Os valores disponibilizados pelo CPTEC podem ser encontrados em <http://satellite.cptec.inpe.br/htmldocs/ztd/zenital.htm> (Acesso em: jan. 2012), cuja taxa de

atualização, atualmente, é de duas vezes ao dia. A primeira atualização ocorre entre 7:30 e 8:30 h, a qual se refere às saídas do modelo das 0 h UTC. A segunda atualização é feita entre 19:30 e 20:30 h e essa se refere as saídas das 12 h UTC do modelo numérico do CPTEC.

O modelo disponível no CPTEC, atualmente, apresenta valores de ZTD válidos para a América do Sul, mais especificamente para o Brasil. Porém, se estações de uma rede global forem utilizadas, como por exemplo, para estimativa do erro do relógio do satélite, podem-se obter valores de ZTD a partir do modelo global Europeu (ECMWF - *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) (BOEHM; SCHUH, 2004). Valores para as componentes úmidas e hidrostáticas são disponibilizados juntamente com os coeficientes para a função de mapeamento conhecida como Função de Mapeamento de Viena (*Vienna Mapping Function- VMF*), a qual será brevemente descrita na próxima seção.

Outra possibilidade para determinar o atraso troposférico é a partir da estimativa com o Filtro de Kalman utilizando as medidas GNSS. Neste caso, o atraso troposférico é tratado como um processo estocástico apresentando ruídos do tipo *random walk*, cujos valores são inseridos na etapa de atualização da matriz de variância e covariância do vetor estado (seção 4). Para o caso de PPP, os valores do ZTD podem ser estimados juntamente com as coordenadas e correções dos relógios dos receptores como será descrito na seção 5.

3.3.2.2 Funções de mapeamento

O atraso troposférico (Equação 3.37) na direção receptor satélite é escrito como o produto do atraso hidrostático e úmido na direção vertical (T_{zh} e T_{zw}) e de funções de mapeamento ($m_h(E)$ e $m_w(E)$), a qual relaciona o atraso vertical com o atraso para o ângulo de elevação E do satélite em relação ao receptor GNSS.

Os valores de atraso troposférico podem estimados com base nas medidas GNSS, a partir de modelos baseados em PNT, ou em modelos matemáticos tais como o de Hopfield e outros (seção 3.3.1.1). Os modelos matemáticos para o ZTD, geralmente, já dispõem de funções de mapeamento, seja de forma implícita ou explícita, onde para ângulos próximos de 90° é feita, por exemplo, uma aproximação de $1/\sin(E)$. No entanto, para ângulos menores essa aproximação pode não ser suficiente, sendo necessária a utilização de funções de mapeamento melhores elaboradas, tais como a função de Marini, Chao, Davis, Niell, entre outras (MONICO, 2008; SEEBER, 2003).

Na função de mapeamento de Chao, que é uma adaptação de Marini, as funções para as componentes hidrostática e úmida são dadas da seguinte forma (MONICO, 2008; SEEBER, 2003):

$$\begin{aligned} mh(E) &= \frac{1}{\text{sen}(E) + \frac{0,00143}{\tan(E) + 0,0445}} \\ mw(E) &= \frac{1}{\text{sen}(E) + \frac{0,00035}{\tan(E) + 0,017}} \end{aligned} \quad (3.44)$$

A função de Davis foi desenvolvida considerando a componente hidrostática com alguns coeficientes (a e b) que dependem de outros fatores, tais como pressão superficial, temperatura e altitude da troposfera (H_T). A função $mh(E)$ é dada por (MONICO, 2008; SPILKER, 1996):

$$mh(E) = \frac{1}{\text{sen}(E) + \frac{a}{\tan(E) + \frac{b}{\text{sen}(E) + c}}} \quad (3.45)$$

onde, a e b dependem de medidas ou estimativas e $c = -0,0090$.

Nos últimos anos, pesquisadores tem se esforçado para melhorar as funções de mapeamento da troposfera com base em modelos de PNT. Niell propôs a IMF (*Isobaric Mapping Function*) a qual utiliza os seguintes parâmetros (BOEHM; SCHUH, 2004):

- Altura a 200 mbar de pressão (“z200”);
- Raio do atraso úmido ao longo de uma linha a uma elevação de 3,3° e seu atraso zenital (“smfw3”).

As equações que relacionam os parâmetros z200 e smfw3 aos coeficientes a, b, e c (Equação 3.45) são baseadas na técnica de *ray-tracing* utilizando dados de radiossondas (BOEHM; SCHUH, 2004):

$$mf(E) = \frac{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1 + c}}}{\text{sen}(E) + \frac{a}{\text{sen}(E) + \frac{b}{\text{sen}(E) + c}}} \quad (3.46)$$

Uma descrição mais detalhada sobre a técnica de *ray-tracing* pode ser encontrado em Boehm e Schuh (2004) e Nievinski (2009). A função de mapeamento de Viena (VMF) tem como ideia principal simplificar o uso do *ray-tracing* diretamente através de modelos de previsão numérica do tempo (PNT) ao invés dos passos intermediários (parâmetros *z200* e *smfw3*) da função de Niell (BOEHM; SCHUH, 2004). Nesse caso, os coeficientes da Equação 3.46 são determinados a partir de *ray-tracing* usando dados de um modelo de previsão numérica do tempo.

Os parâmetros de entrada para o programa de *ray-tracing* (BOEHM; SCHUH, 2004) são o ângulo de elevação inicial E_0 e os valores para altura, temperatura e pressão do vapor d'água a diferentes níveis de pressão na atmosfera neutra. O *ray-tracing* produz o ângulo de elevação de partida (E) e os valores para a função de mapeamento hidrostática (mh) e úmida (mw).

Os valores dos coeficientes a serem utilizados na função de mapeamento de Viena (VMF), bem como sub-rotinas em Fortran para aplicação dessa função de mapeamento, podem ser encontrados em <http://ggsatm.hg.tuwien.ac.at/DELAY/> (Acesso em: jan. 2012). Os valores dos coeficientes são distribuídos em um *grid* (grade) variando em função do tempo, da latitude e da longitude e o usuário deve realizar um procedimento de interpolação considerando a variação temporal e espacial. Além da VMF é disponível uma subrotina para obter a pressão e temperatura com base em modelo global (GPT - *Global Pressure and Temperature*), além de subrotina para aplicar função de mapeamento GMF (*Global Mapping Function*), a qual é baseada em dados a partir do modelo global de previsão numérica do tempo ECMWF. Os coeficientes da GMF são obtidos a partir de uma expansão em harmônicos esféricos dos parâmetros da VMF1 (versão atualizada da VMF) sobre um *grid* global.

3.3.3 Perdas de ciclos

A perda de ciclo (*cycle slip*) ocorre se o receptor perde o sinal do satélite que está sendo rastreado. Nesse caso, a fase da onda portadora apresenta um salto por um número inteiro de ciclos afetando a estimativa e solução das ambiguidades da fase da onda portadora. Logo, na ocorrência de perdas de ciclos, esses devem ser corrigidos das medidas ou uma nova ambiguidade incógnita deve ser determinada no processo de ajustamento dos dados (MONICO, 2008).

As principais causas para a ocorrência de perdas de ciclos são: obstruções do sinal; ruído no sinal causado por multicaminho ou pela ionosfera; baixo ângulo de elevação do satélite provocando diminuição da potência do sinal, entre outros (SEEBER, 2003).

Para o caso de posicionamento relativo, a detecção de perdas de ciclos pode ser realizada com base nas combinações de dupla e tripla diferença. Porém, para o caso do PPP, onde somente uma estação está envolvida, outras estratégias devem ser adotadas. Blewitt (1990) apresenta uma estratégia baseada na combinação *wide-lane* envolvendo código e fase. Nesse caso, a ambiguidade da *wide-lane* (N_w) é estimada recursivamente e a perda de ciclos é encontrada com base na combinação das ambiguidades da L1 (N_1) e da L2 (N_2). A combinação entre código e fase é dada por (BLEWITT, 1990):

$$N_w = \varphi_w - \frac{1}{\lambda_w} \frac{f_1 P_1 + f_2 P_2}{(f_1 + f_2)} \quad (3.47)$$

onde:

φ_w - combinação *wide-lane* da fase;

λ_w - comprimento de onda da *wide-lane* ($\cong 86,2$ cm);

P_1 e P_2 - códigos, respectivamente, para as portadoras L1 e L2;

f_1 e f_2 - frequências, respectivamente, para as portadoras L1 e L2.

Para cada época, a ambiguidade da *wide-lane* (Equação 3.47) é analisada independentemente para verificar a perda de ciclos. Nesse caso, é utilizado um procedimento recursivo que na verdade se trata do cálculo recursivo da média entre épocas:

$$\langle N_w \rangle_k = \langle N_w \rangle_{k-1} + \frac{1}{k} [N_{w,k} - \langle N_w \rangle_{k-1}] \quad (3.48)$$

$$\sigma_k^2 = \sigma_{k-1}^2 + \frac{1}{k} \{ (N_{w,k} - \langle N_w \rangle_{k-1})^2 - \sigma_{k-1}^2 \} \quad (3.49)$$

Nas expressões 3.48 e 3.49, $\langle N_w \rangle_k$ representa a média atual da ambiguidade N_w e σ_k é o desvio-padrão de N_w . Um valor a priori para o desvio-padrão pode ser adotado como 0,5 ciclos da *wide-lane*.

O cálculo do desvio-padrão σ_k vai diminuindo em função do tempo por um termo da ordem de $\frac{1}{k^2}$, onde k representa o número de pontos no conjunto de dados observados da fase. Um teste é realizado de forma que o valor de $N_{w,k+1}$ deve ficar dentro do intervalo de $4\sigma_k$ da média atual $\langle N_w \rangle_k$, caso contrário tem-se um potencial candidato a perda de ciclos. Contudo, quando a perda de ciclo na L1 é igual na L2, a ambiguidade da *wide-lane* não apresenta saltos e pode falhar. Nesse caso, o processo de detecção e identificação de erros grosseiros, associado à etapa de ajustamento dos dados GNSS, pode auxiliar na detecção de perdas de ciclos.

Uma vez detectada a perda de ciclos, estratégias devem se adotadas no sentido obter o número inteiro de ciclos e aplicá-los na correção dos dados, ou começar a estimativa de uma nova ambiguidade no processamento dos dados. Estratégias de correção dos dados podem ser encontradas em Blewit (1990); Wichayangkoon (2000); Duchesne e Fleury (2005).

3.4 Efeitos sistemáticos relacionados com a estação

Como a Terra não é um corpo rígido, as forças de atração do Sol e da Lua, que variam continuamente devido às suas diferentes órbitas aparentes com relação à Terra, causam deformações sobre ela, resultando em mudanças no seu campo gravitacional. Além disso, a superfície dos oceanos é considerada equipotencial e a atração do Sol, da Lua e dos planetas causa aumento do potencial das marés, gerando ondulações nas camadas dos oceanos em função do tempo. Estes efeitos aplicam uma carga (*loading*) sobre os corpos da Terra que respondem com deformações, resultando em mudanças do seu campo gravitacional (McCARTHY e PETIT, 2003).

As deformações de corpos sólidos da Terra são chamadas de Marés de Corpos Terrestres (*Earth Bodies Tides*), ou simplesmente marés terrestres enquanto que os oceanos respondem de maneira diferente à perturbação lunisolar, denominada de maré oceânica (*ocean tide*). Para o caso do PPP, os efeitos de marés terrestres e oceânicas devem ser levados em consideração, uma vez que se queira obter coordenadas com alta acurácia, além de consistentes com as convenções do ITRF (KOUBA, 2009).

3.4.1 Marés terrestres

O cálculo dos efeitos de marés terrestres, também conhecido máres de corpos terrestres (*Earth Body Tide*), em uma estação sobre a superfície da Terra pode ser encontrado em McCarthy e Petit (2003). A variação na posição horizontal e vertical (radial) da estação causada pelas marés pode ser representada por harmônicos esféricos de grau e ordem (m, n) caracterizados pelo número *Love* (h_{mn}) e pelo número *Shida* (l_{mn}).

Os valores efetivos dos números *Love* e *Shida* dependem da latitude da estação e da frequência da maré e deve ser levado em consideração para posicionamento com precisão da ordem de 1 mm. As equações para aplicar as correções em função da latitude e frequência podem ser encontradas em McCarthy e Petit (2003). Contudo, para precisão da ordem de 5 mm, somente as marés de grau e ordem 2 com o termo correção de altura são necessárias. Nesse caso, as mudanças na posição da estação em termos de coordenadas cartesianas são dadas por (KOUBA, 2009; McCARTHY;PETIT, 2003):

$$\Delta_{\vec{r}} = \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j}{GM_{\oplus}} \frac{r^4}{R_j^3} \left\{ \left[3l_2 (\hat{R}_j \cdot \hat{r}) \right] \hat{R}_j + \left[3 \left(\frac{h_2}{2} - l_2 \right) (\hat{R}_j \cdot \hat{r})^2 - \frac{h_2}{2} \right] \hat{r} \right\} + \left[-0,025 \sin \phi \cos \phi \sin(\theta_g + \lambda) \right] \hat{r} \quad (3.50)$$

onde:

- GM_{\oplus} - constante gravitacional para a Terra;
- GM_j - constante gravitacional para a Lua (j =2) e Sol (j = 3);
- \hat{R}_j e R_j - vetor unitário do geocentro apontando para a Lua (j =2) ou ao Sol (j = 3) e a magnitude do mesmo;
- \hat{r} e r - vetor unitário do geocentro apontando para a estação e a magnitude do mesmo, respectivamente;
- h_2 - valor nominal do número de *Love* de grau 2 ($\cong 0,6078$);

- I_2 - valor nominal do número de *Shida* de grau 2 ($\cong 0,0847$);
 ϕ e λ - latitude e longitude (positiva a leste);
 θ_g - tempo sideral médio de Greenwich.

As coordenadas do Sol e da Lua podem ser obtidas a partir das efemérides planetárias (fornecidas pelo JPL) ou calculadas a partir de modelos matemáticos (baixa precisão), como descritos em Montenbruck e Gill (2005). A Figura 22, mostra os efeitos de marés de corpos terrestres para a estação PPTE da RBMC, no dia 10 de fevereiro de 2008, calculados com base na Equação 3.50:

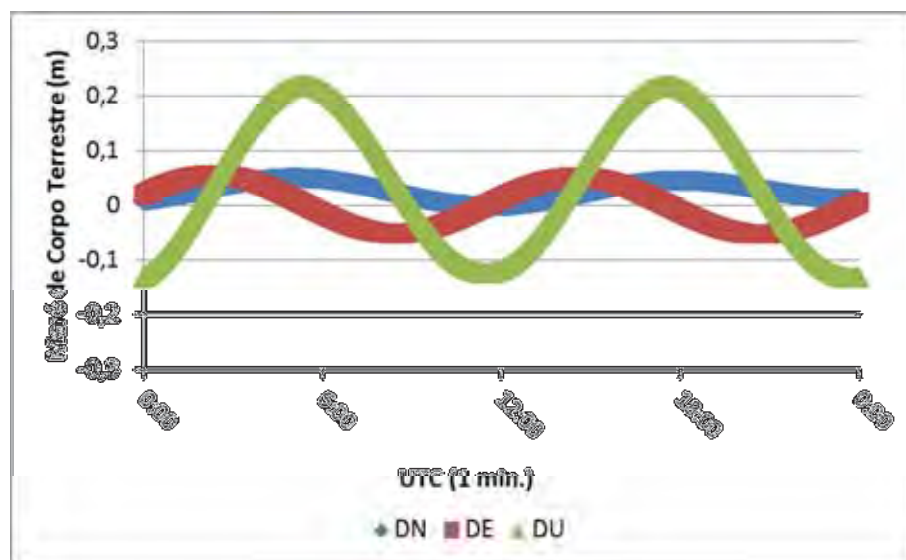


Figura 22 - Efeitos de marés de corpos terrestres para a estação PPTE

Nota-se na Figura 22 que a componente altimétrica (radial) atinge valores de até 20 cm em alguns momentos do dia, enquanto que as componentes na direção horizontal atingem até aproximadamente 10 cm. Segundo Kouba (2009), a correção de marés de corpos terrestres pode alcançar até aproximadamente 30 cm na direção radial. Esse efeito consiste de uma mudança permanente dependente da latitude e uma parte periódica com períodos diurnos e semidiurnos de mudanças de amplitudes. Para o caso do PPP, a negligência desses efeitos pode resultar em efeitos sistemáticos na posição da estação acima de 5 cm e 10 cm, respectivamente, para as componentes planimétrica e altimétrica.

3.4.2 Carga de marés oceânicas

As marés oceânicas causam variação temporal da distribuição de massas oceânicas e da carga associada com a crosta terrestre, além de produzir variação temporal deformando a Terra (McCARTHY e PETIT, 2003).

As mudanças devido à carga de maré oceânica são pelo menos uma ordem de magnitude menor que as mudanças devido às marés de corpos terrestres (seção 3.4.1). O efeito de carga oceânica afeta mais determinadas regiões e não possui a parte permanente. Para posicionamento com precisão requerida da ordem de 5 cm durante um período de 24h ou para estações que estão longe dos oceanos, a carga oceânica pode ser seguramente negligenciada. Por outro lado, para PPP estático ou cinemático próximo de regiões costeiras considerando intervalos menores que 24 h, esse efeito deve ser levado em consideração (KOUBA, 2009).

Para posicionamento que requeira a estimativa do erro do relógio do receptor ou da componente úmida da troposfera, também se faz necessária a correção devido aos efeitos de carga oceânica, caso contrário, a estimativa dessas componentes “absorvem” estes efeitos.

Os efeitos da carga de maré oceânica (Δc), para as componentes (radial, leste e sul) em uma estação particular e em um tempo (t) qualquer, podem ser modelados a partir de (PETIT; LUZUM, 2010):

$$\Delta c = \sum_j f_j A_{c_j} \cos(\omega_j t + \chi_j + u_j - \Phi_{c_j}) \quad (3.51)$$

onde, f_j e u_j dependem da longitude do nodo lunar. Para precisão da ordem de 1 a 3 mm é possível configurar $f_j = 1$ e $u_j = 0$ (KOUBA, 2009). O somatório de j representa as 11 constituintes de marés designadas de: ondas semidiurnas (M2, S2, N2, K2); ondas diurnas (K1, O1, P1, Q1) e ondas de longo período (MF, Mm e Ssa). As componentes ω_j e χ_j representam, respectivamente a velocidade angular e os argumentos astronômicos. Esses últimos podem ser obtidos a partir da sub-rotina Fortran (ARG.f) disponível em <ftp://tai.bipm.org/iers/conv2010/chapter7/> (Acesso em: jan. 2012).

A amplitude A_{c_j} e Φ_{c_j} específica em uma estação para as componentes nas direções radial, sul (positivo) e leste (positivo) são calculadas com base em modelos de marés

oceânicas. Os valores dessas componentes podem ser obtidos em <http://www.oso.chalmers.se/~loading/>. No caso desse trabalho, adotou-se a utilização dos coeficientes disponibilizados no formato mais recente HARPOS, cuja descrição pode ser encontrada em http://gemini.gsfc.nasa.gov/loading/harpos_format.txt (Acesso em: jan. 2012).

3.5 Contribuição dos erros nas medidas GNSS

Os erros envolvidos com as medidas GNSS, tais como mostrados nas seções anteriores, podem ser levados em consideração no processo de estimativa das coordenadas com base em modelos matemáticos ou a juntamente com a estimativa de outros parâmetros. Quando se utilizam modelos matemáticos para corrigir determinados efeitos nas medidas GNSS, restam efeitos residuais não modelados devido às incertezas dos modelos com relação à realidade física. No caso do PPP, geralmente, as órbitas são injuncionadas como fixas. Dessa forma, a incerteza da posição do satélite é propagada para a posição da estação e o mesmo ocorre com a incerteza dos relógios dos satélites entre outros (KAPLAN, 2006).

A contribuição de uma fonte particular de erro, geralmente, é analisada em termos de seus efeitos na determinação da distância (*range*). O efeito combinado dos erros das órbitas, relógios, *hardware* e outros erros propagados, quando projetados na direção receptor satélite, é chamado de UERE (*User Equivalent Range Error*), ou simplesmente URE (*User Range Error*) (SEEBER, 2003).

O UERE total engloba os componentes de cada segmento do sistema GNSS: segmentos espacial, de controle e de usuário. A contribuição pode ser analisada para medidas de simples ou de dupla frequência. O UERE total é obtido com base na Raiz da Soma Quadrática (RSQ) dos erros de cada componente, no qual se assume ter distribuição Gaussiana.

A Tabela 6 mostra a contribuição dos erros GPS nas medidas de pseudodistâncias considerando os casos do SPS (*Standard Positioning Service*) e do PPS (*Precise Positioning Service*) para o posicionamento por ponto (KAPLAN, 2006).

Tabela 6 - Contribuição dos erros nas medidas de pseudodistância GPS

| Segmento | Fonte de Erro | Típico UERE PPS Erro 1 σ (m) | Típico UERE SPS Erro 1 σ (m) |
|-------------------|---------------------------------|---|---|
| Espacial/Controle | Erro do Relógio Transmitido | 1,1 | 1,1 |
| | Atraso de Grupo L1-P(Y)-L1(C/A) | - | 0,3 |
| | Órbita Transmitida | 0,8 | 0,8 |
| Usuário | Atraso Ionosférico Residual | 0,1 | 7,0 |
| | Atraso Troposférico Residual | 0,2 | 0,2 |
| | Ruído do receptor | 0,1 | 0,1 |
| | Multicaminho | 0,2 | 0,2 |
| UERE Total | Total RSQ | 1,4 | 7,1 |

Fonte: Adaptada de Kaplan (2006).

O efeito residual é considerado após aplicação do modelo matemático para a correção nas medidas. Para o caso de simples frequência, verifica-se na Tabela 6 que o erro dominante é o da ionosfera após aplicação dos coeficientes transmitidos no modelo de Klobuchar.

4 AJUSTAMENTO DE OBSERVAÇÕES

Nesta seção é realizada a revisão bibliográfica relacionada com o ajustamento de observações no modo recursivo, a modelagem matemática relacionada com o Filtro de Kalman e o controle de qualidade denominado DIA. A próxima seção apresenta os modelos matemáticos para aplicar o ajustamento recursivo, em seguida apresenta-se o Filtro de Kalman e finalmente o método DIA.

4.1 Ajustamento recursivo

A descrição dos modelos matemáticos para a realização do ajustamento recursivo pode ser encontrada em Gemael (1994), Teunissen (2001) entre outros. No caso, a formulação a ser apresentada segue a do MMQ (Método dos Mínimos Quadrados) como usualmente apresentada por Gemael (1994).

No MMQ, um sistema inconsistente com m equações e n incógnitas se torna consistente a partir da introdução do vetor de resíduos V (GEMAEL, 1994; TEUNISSEN, 2001):

$$L_b = AX + V, \quad m > n = \text{Car}(A); \quad D\{L_b\} = \Sigma_{L_b} \quad (4.1)$$

onde, L_b representa o vetor de observações, A é a matriz *design* ou Jacobiana e X é o vetor de parâmetros incógnitos. A medida de variabilidade das observações é dada pela MVC (Matriz Variância e Covariância) Σ_{L_b} e $D\{.\}$ representa o operador de dispersão. O termo $\text{Car}(A)$ é denominado de característica ou posto da matriz A , conhecido na literatura inglesa como *rank*.

O objetivo do MMQ, generalizado pela introdução da matriz peso P , é encontrar o valor de X que minimize o comprimento do vetor $V = L_b - AX$. A solução única para o estimador de X é representada por \hat{X} , a qual é dada por (GEMAEL, 1994):

$$\hat{X} = (A^t P A)^{-1} A^t P L_b \quad (4.2)$$

Considerando que $E\{V\} = 0$, a aplicação da esperança matemática na Equação 4.1, resulta em:

$$E\{L_b\} = AX \quad (4.3)$$

Supondo que dois conjuntos distintos de observações foram coletados, os quais são representados pelos vetores L_{b1} e L_{b2} , o seguinte modelo particionado pode ser considerado com base na Equação 4.3:

$$E\left\{\begin{bmatrix} L_{b1} \\ L_{b2} \end{bmatrix}\right\} = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} X; \quad D\left\{\begin{bmatrix} L_{b1} \\ L_{b2} \end{bmatrix}\right\} = \begin{bmatrix} \Sigma_{L_{b1}} & 0 \\ 0 & \Sigma_{L_{b2}} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

onde, se assume que as observações L_{b1} e L_{b2} são não correlacionadas. A solução por MMQ, denotada por $\hat{X}_{(2)}$, pode ser calculada da seguinte forma (TEUNISSEN, 2001):

$$\begin{cases} \hat{X}_2 = \left(\Sigma_{\hat{X}_{(1)}}^{-1} + A_2^t \Sigma_{L_{b2}}^{-1} A_2 \right)^{-1} \left(\Sigma_{\hat{X}_{(1)}}^{-1} \hat{X}_{(1)} + A_2^t \Sigma_{L_{b2}}^{-1} L_{b2} \right) \\ \Sigma_{\hat{X}_{(2)}} = \left(\Sigma_{\hat{X}_{(1)}}^{-1} + A_2^t \Sigma_{L_{b2}}^{-1} A_2 \right)^{-1} \end{cases} \quad (4.5)$$

onde, $\Sigma_{\hat{X}_{(1)}}$ é a MVC da estimativa de $\hat{X}_{(1)}$, a qual utilizou somente a primeira observação L_{b1} . Dessa forma, tem-se que:

$$E\left\{\begin{bmatrix} \hat{X}_{(1)} \\ L_{b2} \end{bmatrix}\right\} = \begin{bmatrix} I \\ A_2 \end{bmatrix} X; \quad D\left\{\begin{bmatrix} \hat{X}_{(1)} \\ L_{b2} \end{bmatrix}\right\} = \begin{bmatrix} \Sigma_{\hat{X}_{(1)}} & 0 \\ 0 & \Sigma_{L_{b2}} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

A partir das Equações 4.5 e 4.6, verifica-se que o modelo particionado (Equação 4.4) pode ser resolvido em dois passos. No primeiro, estima-se $\hat{X}_{(1)}$ e $\Sigma_{\hat{X}_{(1)}}$ e no segundo utiliza-se essa estimativa juntamente com a observação L_{b2} e respectiva MVC $\Sigma_{L_{b2}}$, para obter a solução final $\hat{X}_{(2)}$ e $\Sigma_{\hat{X}_{(2)}}$. Esse resultado mostra que não é necessário armazenar as observações do passado, no caso L_{b1} , para o propósito de obter a estimativa atual de $\hat{X}_{(2)}$, o que consiste na essência da estimação recursiva (TEUNISSEN, 2001). Considerando agora o modelo particionado, generalizado para L_{bi} observações ($i = 1, 2, 3, \dots, k$), tem-se a seguinte solução:

$$E \left\{ \begin{bmatrix} \hat{X}_{(k-1)} \\ L_{bk} \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} I \\ A_k \end{bmatrix} X; \quad D \left\{ \begin{bmatrix} \hat{X}_{(k-1)} \\ L_{bk} \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} \Sigma_{\hat{X}_{(k-1)}} & 0 \\ 0 & \Sigma_{L_{bk}} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

O processo recursivo é inicializado a partir do cálculo da primeira estimativa $\hat{X}_{(0)}$ pelo MMQ padrão. Então, o estimador $\hat{X}_{(k)}$ pode ser obtido a partir da estimativa anterior $\hat{X}_{(k-1)}$ e da observação atual L_{bk} , usando o mesmo procedimento da Equação 4.5, na qual depois de algumas manipulações matemáticas, obtêm-se (TEUNISSEN, 2001):

$$\begin{cases} \hat{X}_{(k)} = \hat{X}_{(k-1)} + \underbrace{\Sigma_{\hat{X}_{(k)}}^{-1} A_k^t \Sigma_{L_{bk}}^{-1}}_{K_k} \underbrace{(L_{bk} - A_k \hat{X}_{(k-1)})}_{V_k} \\ \Sigma_{\hat{X}_{(k)}} = \left(\Sigma_{\hat{X}_{(k-1)}}^{-1} + A_k^t \Sigma_{L_{bk}}^{-1} A_k \right)^{-1} \end{cases} \quad (4.8)$$

A primeira equação em 4.8 é chamada de equação de atualização de medida, na qual a componente $A_k \hat{X}_{(k-1)}$ pode ser interpretada como a predição da observação L_{bk} atual. A diferença entre a observação atual e a predição $L_{bk} - A_k \hat{X}_{(k-1)}$ é chamada de resíduo predito, denotado por:

$$V_k = L_{bk} - A_k \hat{X}_{(k-1)} \quad (4.9)$$

Na expressão 4.8, o vetor de resíduos preditos V_k é multiplicado pela matriz de ganho:

$$K_k = \Sigma_{\hat{X}_{(k)}}^{-1} A_k^t \Sigma_{L_{bk}}^{-1} \quad (4.10)$$

A multiplicação da matriz de ganho K_k pelo vetor de resíduos preditos V_k representa o produto adicionado à estimativa anterior $\hat{X}_{(k-1)}$ para obter a estimativa atual $\hat{X}_{(k)}$, logo:

$$\hat{X}_{(k)} = \hat{X}_{(k-1)} + K_k V_k \quad (4.11)$$

Na Equação 4.8 uma matriz de dimensão n (n é igual ao número de parâmetros incógnitos) precisa ser invertida. Porém, é possível derivar uma expressão para estimar $\hat{X}_{(k)}$, na qual uma matriz de dimensão m_k será invertida, onde m_k é o número de observações da etapa k . Essa expressão é encontrada resolvendo o modelo da Equação 4.4 via equações de condição:

$$\begin{bmatrix} -A_k & I_{m_k} \end{bmatrix} E \left\{ \begin{bmatrix} \hat{X}_{(k-1)} \\ L_{bk} \end{bmatrix} \right\} = 0; \quad D \left\{ \begin{bmatrix} \hat{X}_{(k-1)} \\ L_{bk} \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} \Sigma_{\hat{X}_{(k-1)}} & 0 \\ 0 & \Sigma_{L_{bk}} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Então, a estimativa de $\hat{X}_{(k)}$ fica com a forma da Equação 4.13, cuja demonstração pode ser encontrada em Teunissen (2001):

$$\begin{cases} \hat{X}_{(k)} = \hat{X}_{(k-1)} + \Sigma_{\hat{X}_{(k-1)}} A_k^t \Sigma_{V_k}^{-1} (L_{bk} - A_k \hat{X}_{(k-1)}) \\ \Sigma_{\hat{X}_{(k)}} = \Sigma_{\hat{X}_{(k-1)}} - \Sigma_{\hat{X}_{(k-1)}} A_k^t \Sigma_{V_k}^{-1} A_k \Sigma_{\hat{X}_{(k-1)}} \end{cases} \quad (4.13)$$

onde, Σ_{V_k} é a MVC dos resíduos preditos, a qual é calculada por:

$$\Sigma_{V_k} = \Sigma_{L_{bk}} + A_k \Sigma_{\hat{X}_{(k-1)}} A_k^t \quad (4.14)$$

Nesse caso, a matriz de ganho é obtida por:

$$K_k = \Sigma_{\hat{X}_{(k-1)}} A_k^t \Sigma_{V_k}^{-1} \quad (4.15)$$

Substituindo as Equações 4.14 e 4.15 na 4.13, a estimativa recursiva fica da seguinte forma:

$$\begin{cases} \hat{X}_{(k)} = \hat{X}_{(k-1)} + K_k V_k \\ \Sigma_{\hat{X}_{(k)}} = (I - K_k A_k) \Sigma_{\hat{X}_{(k-1)}} \end{cases} \quad (4.16)$$

Outras discussões relacionadas com o processo de estimativa recursiva por MMQ podem ser encontradas em Teunissen (2001).

4.2 Filtro de Kalman

Muitas aplicações da Geodésia requerem a determinação de estados que variam no tempo, podendo-se citar, por exemplo, a determinação da trajetória de um satélite ou de um móvel qualquer. A estimativa do vetor estado pode ser realizada com base no Filtro de Kalman.

O Filtro de Kalman é um estimador recursivo não tendencioso e de variância mínima, que consiste na estimativa do vetor estado atual combinando as observações atuais e a adição do vetor estado predito para o mesmo instante de tempo (BROWN; HWANG, 1997; GELB et al., 1974; LIU, 2001; CAMARGO, 1992).

O vetor estado representa a descrição de um determinado fenômeno ou processo que pode ocorrer de forma discreta ou contínua. Processos discretos podem ser originados a partir de amostras de um processo contínuo em intervalos específicos. A amostragem pode ser, por exemplo, a obtenção de dados analógicos convertidos para sinal digital, ou pode ser as observações enviadas por um satélite a uma determinada taxa de amostragem.

O Filtro de Kalman pode ser encontrado em várias versões. No caso em que se consideram os instantes e as observações discretas, tem-se o Filtro de Kalman Discreto (CAMARGO, 1992; GELB et al., 1974).

O desenvolvimento do modelo dinâmico e do modelo de medida pode ser obtido a partir da modelagem de um processo contínuo. No caso, se assume que o vetor estado $X(t)$ pode ser modelado a partir da equação diferencial do estado linear variando no tempo, a qual é dada por (BROWN; HWANG, 1997; TEUNISSEN, 2001):

$$\dot{X}(t) = F(t)X(t) + G(t)Z(t) \quad (4.17)$$

onde, $F(t)$ e $G(t)$ são matrizes de dimensões conhecidas variando no tempo. A solução da Equação 4.17 no tempo t_k é dada por:

$$X_k = \Phi_{k,k-1}X_{k-1} + \int_{t_{k-1}}^{t_k} \Phi_{k,\tau}G(\tau)Z(\tau)d\tau \quad (4.18)$$

onde $\Phi_{k,k-1}$ é a matriz de transição que relaciona os vetores estados X_k e X_{k-1} , respectivamente nas épocas k e $k-1$. No caso da Equação 4.18, assume-se que a entrada $Z(\tau)$ pode ser tratada como uma observável e que sua matriz de auto-covariância é dada por (TEUNISSEN, 2001):

$$\Sigma_{ZZ}(t_1, t_2) = S_{ZZ}(t_1)\delta(t_2 - t_1) \quad (4.19)$$

onde $\delta(t_2 - t_1)$ representa a função delta de Dirac. O vetor de diferenças:

$$W_k = \int_{t_{k-1}}^{t_k} \Phi_{k,\tau}G(\tau)Z(\tau)d\tau \quad (k = 1, 2, \dots) \quad (4.20)$$

também é uma observável, cuja MVC é dada por:

$$\Sigma_{W_k} = \int_{t_{k-1}}^{t_k} \Phi_{k,\tau}G(\tau)S_{ZZ,\tau}G(\tau)^t \Phi_{k,\tau}^t d\tau \quad (4.21)$$

Aplicando a lei de propagação de covariâncias na Equação 4.21, tem-se (TEUNISSEN, 2001):

$$E\{(W_k - E\{W_k\})(W_l - E\{W_l\})^t\} = \Sigma_{W_k} \delta_{kl} \quad (4.22)$$

onde, δ_{kl} é a função delta de Kronecker que vale 1 para $k = l$ e 0 caso contrário (CAMARGO, 1992).

No caso discreto, o vetor W_k é conhecido como seqüência branca do sistema dinâmico, no qual se assume que ele é não correlacionado no tempo. Esse vetor representa as correções ao modelo dinâmico, a qual afeta o estado durante o intervalo entre as épocas t_k e t_{k-1} . Além disso, assume-se que W_k tem distribuição normal com média zero, $E\{W_k\} = 0$, e MVC igual a Σ_{W_k} . Dessa forma, o modelo dinâmico que descreve o vetor estado X_k é obtido

pela combinação das Equações 4.18 e 4.20 (GELB et al., 1974; CAMARGO, 1992, TEUNISSEN, 2001):

$$X_k = \Phi_{k,k-1} X_{k-1} + W_k \quad W_k \sim N(0, \Sigma_{W_k}) \quad (4.23)$$

O modelo de medida ou de observação para o vetor estado X_k tem a seguinte forma:

$$L_{bk} = A_k X_k + V_k; \quad V_k \sim N(0, \Sigma_{V_k}) \quad (4.24)$$

onde, L_{bk} representa o vetor de observações, A_k é a matriz que relaciona as observações ao estado e V_k é o vetor das correções ao modelo de observação, o qual para o caso discreto é conhecido como vetor de sequência branca do modelo de medida (GELB et al., 1974; CAMARGO, 1992; TEUNISSEN, 2001).

Os modelos matemáticos envolvidos com o sistema GNSS, geralmente, são não lineares, o que requer um processo de linearização. Nesse caso, o modelo dinâmico e de medida (Equações 4.23 e 4.24) para um sistema discreto e não linear pode ser escrito como (CAMARGO, 1992):

$$\begin{aligned} X_k &= f_{k,k-1}(X_{k-1}) + W_k \\ L_{bk} &= g_k(X_k) + V_k \end{aligned} \quad (4.25)$$

onde, $f_{k,k-1}(\bar{X}_{k-1})$ e $g_k(\bar{X}_k)$ representam funções de transição de estado não linear que dependem do estado das épocas t_{k-1} e t_k , respectivamente. Os demais elementos da Equação 4.25, já foram descritos.

A linearização das equações em 4.25 por séries de Taylor nos pontos \bar{X}_{k-1} e \bar{X}_k fornece as equações para o Filtro de Kalman Linearizado. Os pontos \bar{X}_{k-1} e \bar{X}_k representam o vetor estado aproximado para X_{k-1} e X_k nos instantes t_{k-1} e t_k respectivamente. Então, tem-se (CAMARGO, 1992):

$$\begin{aligned}
f_{k,k-1}(X_{k-1}) &= \underbrace{f_{k,k-1}(\bar{X}_{k-1})}_{X_{k,k-1}^0} + \underbrace{\frac{\partial f_{k,k-1}(X_{k-1})}{\partial X_{k-1}} \Big|_{X_{k-1}=\bar{X}_{k-1}}}_{\Phi_{k,k-1}} (X_{k-1} - \bar{X}_{k-1}) + \dots \\
g_k(X_k) &= \underbrace{g_k(\bar{X}_k)}_{L_k^0} + \underbrace{\frac{\partial g_k(X_k)}{\partial X_k} \Big|_{X_k=\bar{X}_k}}_{A_k} (X_k - \bar{X}_k) + \dots
\end{aligned} \tag{4.26}$$

Fazendo:

$$\begin{aligned}
X_{k,k-1}^0 &= f_{k,k-1}(\bar{X}_{k-1}) \\
\Phi_{k,k-1} &= \frac{\partial f_{k,k-1}(X_{k-1})}{\partial X_{k-1}} \Big|_{X_{k-1}=\bar{X}_{k-1}} \\
L_k^0 &= g_k(\bar{X}_k) \\
A_k &= \frac{\partial g_k(X_k)}{\partial X_k} \Big|_{X_k=\bar{X}_k}
\end{aligned} \tag{4.27}$$

e substituindo-as na expressão 4.26, obtêm-se (CAMARGO, 1992; GELB et al., 1974):

$$\begin{aligned}
X_k &= X_{k,k-1}^0 + \Phi_{k,k-1}(X_{k-1} - \bar{X}_{k-1}) + W_k \\
L_{bk} &= L_k^0 + A_k(X_k - \bar{X}_k) + V_k
\end{aligned} \tag{4.28}$$

O Filtro de Kalman consiste numa combinação de predição e filtragem, a qual é descrita a seguir (KALMAN, 1960; GELB et al., 1974; CAMARGO, 1992; TEUNISSEN, 2001).

4.2.1 Predição

A predição é realizada quando se deseja obter a estimativa do vetor estado \hat{X}_k , baseado em informações anteriores a época t_k , ou seja, $t_k > t_{k-1}$. Nesse caso, $\hat{X}_{k,k-1}$ é o estimador predito de \hat{X}_k . Então, tendo disponível o estimador da época anterior $\hat{X}_{k-1,k-1}$, o vetor estado predito para o caso do Filtro do Kalman linearizado é calculado por (CAMARGO, 1992; GELB et al., 1974):

$$\begin{aligned}\hat{X}_{k,k-1} &= X_{k,k-1}^0 + \Phi_{k,k-1} (\hat{X}_{k-1,k-1} - \bar{X}_{k-1}) \\ \Sigma_{\hat{X}_{k,k-1}} &= \Phi_{k,k-1} \Sigma_{\hat{X}_{k-1,k-1}} \Phi_{k,k-1}^t + \Sigma_{W_k}\end{aligned}\quad (4.29)$$

onde, Σ_{W_k} é a MVC do ruído do modelo dinâmico (ver seção 4.3).

O conjunto de equações em 4.29 representa as equações de predição aproximadas para sistemas linearizados, o que é denominado de ciclo de predição aproximado.

4.2.2 Filtragem

A filtragem ocorre quando se deseja obter a estimativa do vetor estado X_k , baseada em todas as observações coletadas até a época t_k . O estimador $\hat{X}_{k,k}$ é chamado de estimador filtrado. Dessa forma, a estimativa do vetor estado e respectiva MVC são obtidas a partir de (CAMARGO, 1992):

$$\begin{aligned}\hat{X}_{k,k} &= \hat{X}_{k,k-1} + K_k [(L_{bk} - L_k^0) - A_k (\hat{X}_{k,k-1} - \bar{X}_k)] \\ \Sigma_{\hat{X}_{k,k}} &= (I - K_k A_k) \Sigma_{\hat{X}_{k,k-1}}\end{aligned}\quad (4.30)$$

A matriz de ganho de Kalman é calculada por:

$$K_k = \Sigma_{\hat{X}_{k,k-1}} A_k^t (A_k \Sigma_{\hat{X}_{k,k-1}} A_k^t + \Sigma_{L_{bk}})^{-1}\quad (4.31)$$

onde $\Sigma_{\hat{X}_{k,k-1}}$ é a MVC da etapa anterior e $\Sigma_{L_{bk}}$ é a MVC das observações.

Os modelos apresentados nessa seção e desenvolvidos com base na linearização por série de Taylor, com valores aproximados para o vetor estado (trajetória nominal) nas épocas t_k e t_{k-1} consiste no Filtro de Kalman Linearizado para modelos discretos. Quando se utiliza os vetores aproximados pelas estimativas do vetor estado (trajetória atualizada) nas épocas t_k e t_{k-1} tem-se o Filtro de Kalman Estendido (BROWN; HWANG, 1997).

4.3 Introdução aos processos aleatórios e aplicação no Filtro de Kalman discreto

Em muitos casos não se consegue descrever totalmente um sistema dinâmico a partir das propriedades determinísticas, devido às quantidades com perturbações aleatórias (estocásticas). Como exemplo, pode-se citar a estimativa das correções dos relógios dos satélites, pois, os sinais gerados pelo oscilador atômico são compostos de componentes determinísticas e estocásticas, como mostrado na seção 2.3. A componente estocástica pode ser levada em consideração no processo de ajustamento com suficiente grau de aproximação a partir de um processo aleatório (TEUNISSEN, 2001).

Um processo aleatório, também conhecido como processo randômico ou processo estocástico, pode ser pensado como uma coleção ou conjunto de funções que variam no tempo. Esse conjunto pode ser representado por $\{X(t)\}$ e o valor observado de um membro do conjunto num instante particular t_k é uma variável aleatória (GELB et al., 1974).

Para o caso da modelagem utilizando o Filtro de Kalman, considera-se que o vetor estado do processo é representado por $X(t)$, cujo processo original $L_{bk}(t)$ é necessário para obter uma combinação linear do sistema de variáveis. Então, um processo aleatório linear contínuo no tempo com vetor estado $X(t)$ e MVC do vetor estado $\Sigma_{X(t)}$, pode ser descrito a partir de modelos de equações diferenciais, assim como mostrado na seção 4.2. Por motivos de simplicidade, a equação diferencial do estado $X(t)$ (Equação 4.17) é substituída por X_k formando um processo discreto (STRANG; BORRE, 1997):

$$\begin{aligned} X_k &= F_{k-1}X_{k-1} + G_k W_k \\ L_k &= A_k X_k + V_k \end{aligned} \quad (4.32)$$

Supondo que o ruído do processo W_k , com MVC Σ_{W_k} , seja não correlacionado no tempo e o ruído da observação V_k também não correlacionado no tempo com média zero, pela lei de propagação de covariâncias obtém-se a seguinte fórmula recursiva para a MVC do vetor estado X_k (STRANG; BORRE, 1997):

$$\Sigma_{X_k} = F_{k-1} \Sigma_{X_{k-1}} F_{k-1}^t + G_k \Sigma_{W_k} G_k^t \quad (4.33)$$

O uso da Equação 4.33 supõe o ruído do processo W_k não correlacionado no tempo, porém, na prática comparecem correlações temporais, as quais podem ser tratadas corretamente a partir da técnica do aumento do vetor estado X_k (GELB et al., 1974; STRANG; BORRE, 1997; LIU, 2001).

Suponha que o vetor de ruídos W_k tenha quantidades correlacionadas W_{1k} e quantidades não correlacionadas W_{2k} (GELB et al., 1974):

$$W_k = W_{1k} + W_{2k} \quad (4.34)$$

onde se supõe que o ruído W_{1k} pode ser modelado por uma equação discreta:

$$W_{1k} = G_W W_{1k-1} + W_{3k-1} \quad (4.35)$$

sendo W_3 um vetor de ruídos não correlacionados. Então, o vetor estado aumentado X_k^{\wedge} é dado por:

$$X_k^{\wedge} = \begin{bmatrix} X_k \\ W_{1k} \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

Dessa forma, a equação discreta do estado aumentado, composta somente por perturbações não correlacionadas, é dada por:

$$X_k^{\wedge} = \begin{bmatrix} X_k \\ W_{1k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F & G \\ 0 & G_W \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{k-1} \\ W_{1k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_{2k-1} \\ W_{3k-1} \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

Alguns modelos específicos de correlação para sistemas com componentes estocásticas são apresentados a seguir (GELB et al., 1974; STRANG; BORRE, 1997; LIU, 2001).

4.3.1 Modelos de correlação

Uma classe especial de processos aleatórios que pode ser gerada pela passagem do *white noise* através de um simples filtro é a família de processos de *Gauss-*

Markov. Um processo contínuo $X(t)$ é chamado de processo de *Gauss-Markov* de primeira ordem se para cada k e $t_1 < t_2 < \dots, t_k$ tem-se:

$$F[X(t_k)|X(t_{k-1}), \dots, X(t_1)] = F[X(t_k)|X(t_{k-1})] \quad (4.38)$$

O significado da Equação 4.38 é que a função de distribuição de probabilidade $F[.]$ para o processo $X(t_k)$ é dependente somente do valor em um ponto no passado $X(t_{k-1})$ (GELB et al., 1974). A função de autocorrelação e a função de densidade espectral para um processo estacionário de *Gauss-Markov* são dadas, respectivamente, por:

$$\begin{aligned} R_x(\tau) &= \sigma^2 e^{-\beta|\tau|} \\ S_x(j\omega) &= \frac{2\sigma^2\beta}{\omega^2 + \beta^2} \end{aligned} \quad (4.39)$$

onde, σ é uma constante conhecida e o tempo de correlação é dado por $\frac{1}{\beta}$ (GELB et al., 1974; BROWN; HWANG, 1997).

As funções expressas no conjunto de Equações 4.39 são esquematizadas na Figura 23:

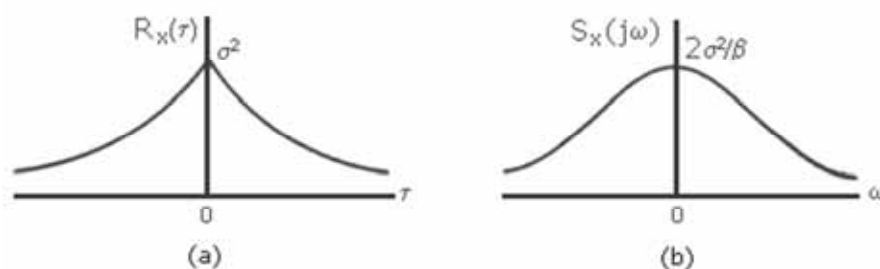


Figura 23 - Função de autocorrelação (a) e função de densidade espectral (b) para o processo de Gauss-Markov

O processo de *Gauss-Markov* é um processo muito aplicado na prática, porque se ajusta a um grande número de processos físicos com razoável acurácia, além de apresentar uma descrição matemática simples (BROWN; HWANG, 1997).

A versão discreta de uma variável aleatória correlacionada exponencialmente é descrita por (GELB et al., 1974):

$$X_k = e^{-\beta(t_k - t_{k-1})} X_{k-1} + W_k \quad (4.40)$$

cuja covariância de W_k é dada por:

$$\sigma_{w_k}^2 = \frac{\sigma_k^2}{2\beta} [1 - e^{-2\beta(t_{k+1} - t_k)}] \quad (4.41)$$

O processo discreto *white noise* ou ruído branco pode ser derivado a partir do processo *Gauss-Markov* de primeira ordem fazendo β tender ao infinito. Nesse caso, a função de autocorrelação (Equação 4.39) e até mesmo a covariância do processo correlacionado exponencialmente (Equação 4.41) é nula, o que indica que não há correlação de uma época para a outra. Dessa forma, a MVC do processo aleatório *white noise* requer a reinicialização da estimativa do parâmetro estocástico ao final de cada etapa (GELB, et al., 1974; GREGORIUS, 1996).

O processo *random walk* é resultante da integração de sinais independentes estatisticamente. O nome deriva do exemplo de um homem que caminha a passos de comprimento fixo em direções arbitrárias. Da mesma forma que o processo discreto *white noise*, o *random walk* também pode ser derivado do processo de *Gauss-Markov* de primeira ordem, porém fazendo β tender a zero. Dessa forma, a componente exponencial da Equação 4.39 fica com valor unitário e a função de autocorrelação é igual ao valor da variância (σ^2) do processo estocástico. O processo discreto para o *random walk* é descrito por (GELB et al., 1974; STRANG; BORRE, 1997):

$$X_k = X_{k-1} + W_k \quad (4.42)$$

A variância do ruído é obtida a partir do limite da Equação 4.41, com β tendendo a zero, o que pode ser feito com o auxílio da regra de l'Hospital (GELB et al., 1974):

$$\sigma_{W_k}^2 = (t_{k+1} - t_k) \sigma_k^2 \quad (4.43)$$

4.4 Controle de qualidade

Na área de ciências geodésicas e correlatas, muitas vezes, são utilizados dados empíricos para representar a realidade física, ou seja, procura-se associar a realidade física por meio de modelos matemáticos. Os modelos matemáticos se dividem em modelo funcional e modelo estocástico. O modelo funcional descreve a relação existente entre somente as observações ou entre observações e parâmetros desconhecidos do modelo. Já o modelo estocástico é usado para expressar a incerteza esperada ou variabilidade dos dados empíricos (TEUNISSEN, 1998).

O controle de qualidade é um sistema amplo e complexo que abrange todas as etapas de um projeto, visando melhorar e assegurar a qualidade deste de acordo com três fatores: economia, precisão e confiabilidade. A partir do controle de qualidade é possível verificar o quanto as observações são consistentes com o modelo adotado, além de detectar a presença de erros grosseiros para que em seguida o modelo possa ser adaptado.

Geralmente, o controle de qualidade, é dividido em três etapas: Detecção, Identificação e Adaptação, a qual é conhecida como DIA (CAMARGO, 1992; TEUNISSEN, 1998; MACHADO, 2001):

- Detecção: o modelo de observação é testado para diagnosticar possíveis erros nas observações;
- Identificação: visa localizar a possível fonte do erro responsável pela rejeição no processo de detecção. Isso significa que deve ser feita uma procura dentre todos os candidatos e é executada para cada observação individualmente;
- Adaptação: o modelo de observação é adaptado visando eliminar a influência dos erros identificados

As etapas incluídas no processo DIA podem ser de caráter local ou global dentro do contexto de ajustamento dos dados. Os tópicos a seguir descrevem as etapas de caráter local (TEUNISSEN, 1998).

4.4.1 Detecção

O teste para detecção de erros nas observações pode ser realizado a partir de uma análise dos resíduos preditos, os quais são calculados em função das observações do instante atual e de informações do instante anterior. Esse procedimento possibilita que o teste seja executado paralelamente ao ajustamento recursivo ou ao Filtro de Kalman.

A detecção deve ser distinguida entre a validação global do modelo e a validação local do mesmo. Para o processo de detecção local, a hipótese básica (H_0) e a hipótese alternativa (H_A) no instante k são dadas por (TEUNISSEN, 1998):

$$\begin{aligned} H_0 : E\{\underline{v}_k\} &= 0 \\ H_A : E\{\underline{v}_k\} &= C_{v_k} \nabla \end{aligned} \quad (4.44)$$

Para testar a validade da hipótese H_0 , a média ∇_{v_k} do resíduo predito v_k em H_A deve ser completamente desconhecida (*unspecified*). Essa adoção implica que a matriz C_{v_k} é escolhida como uma matriz regular quadrada. A estatística utilizada para testar H_0 contra H_A é denominada LOM (*Local Overall Model*) e é dada por (CAMARGO, 1992):

$$T_{LOM}^k = \underline{v}_k^T \Sigma_{v_k}^{-1} \underline{v}_k \quad (4.45)$$

onde, \underline{v}_k e Σ_{v_k} são o vetor de resíduos preditos e sua respectiva MVC no instante k .

A estatística acima abrange todas as observações do instante k , sendo, portanto, m -dimensional e local. Além disso, T_{LOM}^k segue a distribuição qui-quadrado ($\chi^2(m_k)$) de forma que a presença de erro é detectada quando $T_{LOM}^k > \chi^2$ com m_k graus de liberdade e certo nível de significância α . Uma vez que tenha sido detectado algum erro a partir do teste local, a identificação do mesmo deve ser realizada. A próxima seção descreve a etapa Identificação.

4.4.2 Identificação

O objetivo da etapa Identificação é identificar a possível fonte de erro detectada no teste local na etapa de Detecção. Essa etapa pode ser realizada com base no teste *data snooping* desenvolvido por Baarda. No caso local, tem-se $C_{v_k} = C_k$ para o caso unidimensional, o que significa que C_k é um vetor e será denotado pela letra minúscula c_k . Assim, a hipótese nula (H_0) e a alternativa (H_A) para a identificação local é dada por:

$$\begin{aligned} H_0 : E\{\underline{v}_k\} &= 0 \\ H_A : E\{\underline{v}_k\} &= c_k \nabla \end{aligned} \quad (4.46)$$

A estatística local para identificar o erro é dada por (CAMARGO, 1992; TEUNISSEN, 1998; MACHADO, 2001):

$$t_k = \frac{c_k^t \Sigma_{v_k}^{-1} \underline{v}_k}{\sqrt{c_k^t \Sigma_{v_k}^{-1} c_k}} \quad (4.47)$$

O teste estatístico para a identificação local segue a distribuição Normal $N(0,1)$. A estatística t_k na Equação 4.47 é calculada para cada candidato ao possível erro. Em seguida é necessário fazer uma busca para o maior valor de $|t_k|$ entre todas as hipóteses alternativas especificadas, o que nos dará o mais provável erro do modelo. A hipótese nula para o maior valor de $|t_k|$ será rejeitada caso ele seja maior que o valor crítico de $N_{\alpha/2}(0,1)$.

4.4.3 Adaptação

Após a identificação do erro, um processo de adaptação faz-se necessário para eliminar a influência da observação com erro no vetor estado e na respectiva MVC. Uma possibilidade é não considerar, na atualização de medidas do Filtro de Kalman, as observações identificadas na etapa de Identificação. Dessa maneira, obtém-se o vetor estado filtrado livre das influências dos erros, ou seja, não se considera no modelo de medida as observações rejeitadas pelo teste estatístico *data snooping* (CAMARGO, 1992).

Outra possibilidade é realizar a adaptação local para eliminar o efeito sistemático do vetor estado filtrado, o qual é causado pelo erro da observação identificada no instante k . A adaptação para eliminar a influência da observação com erro no vetor estado e na respectiva MVC é realizada da seguinte forma (TEUNISSEN, 1998, MACHADO, 2002):

$$\begin{aligned}\hat{X}_{k,k}^a &= \hat{X}_{k,k}^0 \hat{V}^k \\ \Sigma_{\hat{X}_{k,k}^a} &= \Sigma_{\hat{X}_{k,k}^0} + K_k C_k \sigma_{\hat{V}^k}^2 C_k^T K_k^T\end{aligned}\quad (4.48)$$

onde, \hat{V}^k é o estimador de mínimos quadrados do erro identificado e $\sigma_{\hat{V}^k}^2$ sua variância, os quais são dados por (TEUNISSEN, 1998):

$$\hat{V}^k = \frac{t_k}{\sqrt{C_k^T \Sigma_{V_k}^{-1} C_k}} \quad \text{e} \quad \sigma_{\hat{V}^k}^2 = \frac{1}{C_k^T \Sigma_{V_k}^{-1} C_k} \quad (4.49)$$

5 MODELOS MATEMÁTICOS ENVOLVIDOS NO PPP

O PPP refere-se à obtenção da posição de uma estação com acurácia centimétrica, seja com estimativa próxima do tempo real (latência de poucos segundos) ou no modo pós-processado. Para o caso de tempo real o método requer a disponibilidade em tempo real das órbitas precisas, dos erros dos relógios dos satélites, bem como da modelagem precisa dos efeitos sistemáticos presentes nas observáveis GPS (WITCHAYANGKON, 2000; LEICK, 2004; FAUSTINO, 2006, LEANDRO, 2009; HAUSCHILD, 2010).

Para a eliminação dos efeitos de primeira ordem da ionosfera, considerando receptores de simples frequência, pode-se fazer uso do modelo de Klobuchar, de mapas globais da ionosfera ou estimativa desse efeito. Caso estejam disponíveis dados de receptores de dupla frequência, pode-se aplicar combinação linear livre da ionosfera (*ion-free*) como mostrado na seção 3.3.1, (SEEBER, 2003). Os efeitos de segunda e terceira ordem da ionosfera são da magnitude de milímetros podendo alcançar centímetros ao longo do dia e podem ser eliminados a partir de modelos matemáticos (MARQUES, 2008; MARQUES; MONICO; AQUINO, 2011).

Uma alternativa para a modelagem dos efeitos atmosféricos (troposfera e ionosfera) e até mesmo dos erros dos relógios dos receptores, é estimá-los com base no Filtro de Kalman utilizando um processo aleatório como, por exemplo, o *random walk* ou *white noise* (seção 4.3). Todos os outros efeitos envolvidos com os sinais GNSS, tais como descritos na seção 3, devem ser levados em consideração, seja a partir de modelagem matemática ou no processo de estimativa dos parâmetros. O modelo matemático envolvido com o ajustamento dos dados GNSS no método PPP será descrito nas próximas seções.

5.1 Modelo funcional

A determinação da posição e do erro do relógio do receptor, a partir da técnica de PPP, pode ser realizada utilizando as observações de pseudodistância e de fase com base na combinação *ion-free* (seção 3.3.1.1). As equações de código e fase parametrizada com o atraso troposférico úmido na direção vertical são apresentadas a seguir:

$$PD_{IF_r}^s = \rho_r^s + c(dt_r(t_r) - dt^s(t^t)) + m_f Zwd + \epsilon_{PD_r^s} \quad (5.1)$$

$$\lambda_{IF} \phi_{IF_r}^s = \rho_r^s + c(dt_r(t_r) - dt^s(t^t)) + \lambda_1 N_{IF} + m_f Zwd + \epsilon_{\phi_{IF_r}^s} \quad (5.2)$$

onde:

$PD_{IF_r}^s$ - pseudodistância da *ion-free* (metros);

$\lambda_{IF} \phi_{IF_r}^s$ - fase da *ion-free* (metros);

ρ_r^s - distância geométrica entre receptor r e o satélite s;

$dt_r(t_r)$ - erro do relógio do receptor no instante de recepção t_r ;

$dt^s(t^t)$ - erro do relógio do satélite no instante de transmissão t^t ;

N_{IF} - ambiguidade da *ion-free*;

Zwd - atraso troposférico úmido na direção do zênite;

m_f - função de mapeamento do Zwd para a direção receptor-satélite.

Além da combinação *ion-free*, existem outras possibilidades, tal como a estimativa da ionosfera descrita na seção 5.3. No caso do PPP convencional a correção precisa do relógio do satélite $dt^s(t^t)$ no tempo de transmissão t^t , geralmente, é obtida a partir de um arquivo no formato sp3, os quais são disponibilizados pelo IGS com taxas de dados de 5 minutos e de 30 segundos. Para o caso do PPP em tempo real, essas correções precisam ser estimadas em tempo real e enviadas ao usuário.

O erro do relógio do receptor $dt_r(t_r)$ no tempo de recepção t_r deve ser estimado juntamente com os outros parâmetros no processo de ajustamento dos dados. Para realizar o posicionamento por ponto é necessário calcular a órbita (X^s , Y^s e Z^s) e o erro do relógio do satélite no instante de transmissão do sinal, além de corrigir ou estimar os efeitos sistemáticos envolvidos nas medidas. A distância geométrica é calculada a partir da diferença das coordenadas do satélite (no instante de transmissão) e do receptor (X_r , Y_r e Z_r) a partir de:

$$\rho_r^s = \sqrt{(X^s(t^t) - X_r)^2 + (Y^s(t^t) - Y_r)^2 + (Z^s(t^t) - Z_r)^2} \quad (5.3)$$

Então, a linearização da equação de pseudodistância e de fase (Equações 5.1 e 5.2), considerando o receptor r e o satélite s_i é dada por:

$$\begin{aligned}
E\left\{\Delta PD_{IF_r}^{s_i}\right\} &= -\frac{X^{s_i} - X_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} \Delta X_r - \frac{Y^{s_i} - Y_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} \Delta Y_r - \frac{Z^{s_i} - Z_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} \Delta Z_r \\
&\quad + c(cdt_r) + M_f Z_{wd} \\
E\left\{\Delta \lambda_{IF} \phi_{IF_r}^{s_i}\right\} &= -\frac{X^{s_i} - X_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} \Delta X_r - \frac{Y^{s_i} - Y_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} \Delta Y_r - \frac{Z^{s_i} - Z_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} \Delta Z_r \\
&\quad + c(cdt_r) + M_f Z_{wd} + \lambda_{IF} N_{IF}
\end{aligned} \tag{5.4}$$

onde:

$\Delta PD_r^{s_i}$ - diferença entre a pseudodistância observada e a calculada (vetor L para pseudodistância);

$\Delta \lambda_{IF} \phi_{IF_r}^{s_i}$ - diferença entre a fase observada e a calculada (vetor L para fase);

$(\rho_r^{s_i})^0$ - distância geométrica calculada em função dos parâmetros aproximados;

$E\{.\}$ - representa o operador de esperança matemática.

Os termos $(\Delta X_r, \Delta Y_r, \Delta Z_r, dt_r, Z_{wd}$ e N_{IF}) em 5.4 são as correções aos parâmetros incógnitos, ou seja, as coordenadas da estação, erro do relógio do receptor, troposfera e ambiguidade. A diferença entre a pseudodistância observada e a calculada e o mesmo para a fase pode ser representada por $(L=L^0 - L_b)$. A Equação 5.4 linearizada, considerando o receptor r e o satélite s_i , pode ser escrita em forma matricial:

$$E\left\{\begin{bmatrix} \Delta PD_{IF_r}^{s_i} \\ \Delta \lambda_{IF} \phi_{IF_r}^{s_i} \end{bmatrix}\right\} = AX = \begin{bmatrix} -\frac{X^{s_i} - X_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} & -\frac{Y^{s_i} - Y_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} & -\frac{Z^{s_i} - Z_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} & 1 & M_f & 0 \\ -\frac{X^{s_i} - X_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} & -\frac{Y^{s_i} - Y_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} & -\frac{Z^{s_i} - Z_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} & 1 & M_f & \lambda_{IF} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_r \\ \Delta Y_r \\ \Delta Z_r \\ cdt_r \\ Z_{wd} \\ N_{IF}^{s_i} \end{bmatrix} \tag{5.5}$$

Na Equação 5.5, os fatores c (velocidade da luz) e dt_r ficam juntos em um só produto, o que é feito por razões numéricas. As três primeiras colunas da matriz A contêm os cossenos diretores para o vetor satélite-receptor e dessa forma, todos os coeficientes dessa matriz devem ter valores menores ou iguais a 1.

$$f(E_r^s(t)) = \frac{1}{\text{sen}(E_r^s(t))} \quad (5.7)$$

$$f(E_r^s(t)) = \frac{1}{(E_r^s(t))} \quad (5.8)$$

$$f(E_r^s(t)) = e^{-E_r^s(t)} \quad (5.9)$$

$$f(E_r^s(t)) = \cos(E_r^s(t)) \quad (5.10)$$

$$f(E_r^s(t)) = \frac{1}{\cos(E_r^s(t))} \quad (5.11)$$

Todas as funções descritas nas Equações 5.7 a 5.11 foram analisadas por Silva (2009) utilizando dados da região brasileira e do norte europeu sob diferentes condições atmosféricas. Com base nas análises e considerando que as variâncias das observáveis são diferentes para a fase (L1 e L2) e para o código (C/A e P2) foi utilizado o seguinte modelo (SILVA, 2009):

$$\sigma_{\phi_r^s(t)}^2 = \sigma_{\text{obs}}^2 f(E_r^s(t)) \quad (5.12)$$

onde, σ_{obs}^2 é a variância da observação (C/A, P2, L1 ou L2) adotada pelo usuário e a função $f(E_r^s(t))$ atua como uma ponderação em função do ângulo de elevação do satélite.

Para o caso desse trabalho, as funções descritas nessa seção foram implementadas no *software* RT_PPP.

5.3 Estimativa estocástica do efeito ionosférico

O modelo matemático mais utilizado para o PPP está relacionado como a combinação *ion-free*, uma vez que essa permite a eliminação matemática dos efeitos ionosféricos de primeira ordem. Porém, outra estratégia pode ser adotada no sentido de corrigir o modelo dos efeitos ionosféricos. Essa estratégia se refere à estimativa estocástica da ionosfera juntamente com os outros parâmetros incógnitos.

A estimativa do efeito da ionosfera no processamento dos dados GPS pode ser feita considerando esse efeito como uma variável estocástica ou aleatória (seção 4.3). Nesse caso, para cada satélite GPS estima-se um valor do atraso ionosférico, porém é

introduzida uma pseudo-observação ($\text{Iono}^{\text{Pobs}}$) e um determinado desvio-padrão ($\sigma_{\text{Iono}^{\text{Pobs}}}$), o qual deve ser adotado pelo usuário. Para o caso do PPP, o valor da pseudo-observação deve ser um valor próximo da realidade e, sendo assim, pode-se adotar o valor calculado pelo modelo de Klobuchar ou advindo de um Mapa Global da Ionosfera (GIM). A matriz peso do ajustamento é acrescida dos pesos relacionados com os parâmetros da ionosfera e o vetor das observações L_b é acrescentado com as pseudo-observações ionosféricas.

O modelo linearizado do ajustamento, considerando somente as observações de código (C/A e P2), por motivos de simplificação, pode ser escrito da seguinte forma:

$$E \left\{ \begin{bmatrix} \Delta \text{PD}_{\text{CA}_r}^{s_i} \\ \Delta \phi_{\text{L1}_r}^{s_i} \\ \text{Iono}^{\text{Pobs},s_i} \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} -\frac{X^{s_i} - X_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} & -\frac{Y^{s_i} - Y_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} & -\frac{Z^{s_i} - Z_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} & 1 & M_f & 1 \\ -\frac{X^{s_i} - X_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} & -\frac{Y^{s_i} - Y_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} & -\frac{Z^{s_i} - Z_r^0}{(\rho_r^{s_i})^0} & 1 & M_f & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_r \\ \Delta Y_r \\ \Delta Z_r \\ \text{cdt}_r \\ Z_{\text{wd}} \\ \text{Iono}_{\text{L1}}^{s_i} \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

Para a estimativa dos parâmetros da ionosfera, a matriz design assume a forma de matriz identidade, o que possibilita a otimização computacional nas operações matriciais do ajustamento.

Essa estratégia de estimativa estocástica da ionosfera pode ser encontrada com mais detalhes em Marques (2008), porém, foi utilizada para posicionamento relativo. No caso desse trabalho, a estratégia adotada é a de estimar o parâmetro da ionosfera para cada satélite em cada época considerando cada parâmetro não correlacionado no tempo, o que na verdade, indica que o parâmetro está sendo tratado como *white noise*. Contudo, outros modelos de correlação podem ser adotados, como por exemplo, o *random walk*. A identificação do tipo de ruído presente na série temporal dos efeitos ionosféricos pode ser realizada com base nas equações de variância de Allan (seção 2.3). No caso de se escolher o processo discreto *random walk*, por exemplo, para modelar o atraso ionosférico no PPP têm-se o seguinte modelo dinâmico (ver seção 4.3):

$$\text{Iono}_k = \text{Iono}_{k-1} + W_{\text{Iono}_k} \quad (5.14)$$

onde, Iono_k é o parâmetro da ionosfera na época k e W_{Iono_k} representa o ruído do modelo dinâmico, cuja MVC é dada por:

$$\Sigma_{W_{Iono_k}} = E\{W_{Iono_k}^2\} = (t_{k+1} - t_k)\sigma_{Iono}^2 I \quad (5.15)$$

onde, $(t_{k+1} - t_k)$ representa a diferença de tempo entre as época $k+1$ e k e I representa a matriz identidade.

Para o caso da utilização do filtro de Kalman, os processos aleatórios são adaptados pela matriz de transição e pela adição de MVC de ruídos Σ_{W_k} à MVC do estado predito $\Sigma_{\hat{x}_{k,k-1}}$. A matriz de transição (Φ) para o PPP, considerando o caso estático com estimativa da troposfera e ionosfera, pode ser representada por (LIU, 2001):

$$\Phi_{t_k} = \begin{bmatrix} \Phi_{\bar{x}} & & & 0 \\ & \Phi dt_r & & \\ & & \Phi_{Z_{wd}} & \\ 0 & & & \Phi_{Iono} \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

onde, $\Phi_{\bar{x}}$, Φdt_r , $\Phi_{Z_{wd}}$ e Φ_{Iono} , representam, respectivamente, a matriz de transição da estimativa das coordenadas do receptor (X, Y e Z), do erro do relógio do receptor, do atraso zenital úmido e da ionosfera.

A MVC do vetor estado predito pode ser escrita como:

$$\Sigma_{\hat{x}_{k,k-1}} = \begin{bmatrix} \Sigma_{\bar{x}} & & & & \text{Simétrica} \\ \Sigma_{\bar{x}, dt_r} & \Sigma dt_r & & & \\ \Sigma_{\bar{x}, Z_{wd}} & \Sigma_{dt_r, Z_{wd}} & \Sigma_{Z_{wd}} & & \\ \Sigma_{\bar{x}, W_{Iono_k}} & \Sigma_{dt_r, W_{Iono_k}} & \Sigma_{Z_{wd}, W_{Iono_k}} & \Sigma_{W_{Iono_k}} & \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

onde, $\Sigma_{\bar{x}}$, Σ_{dt_r} , $\Sigma_{Z_{wd}}$ e Σ_{W_k} representam, respectivamente, as MVCs das coordenadas incógnitas, do erro do relógio do receptor, do atraso troposférico zenital úmido e do atraso ionosférico.

5.4 Sistema Geodésico Local e DOP

As coordenadas cartesianas estimadas no PPP, geralmente, são analisadas de forma qualitativa e quantitativa com base em comparações com coordenadas de referência que foram determinadas com melhor qualidade. A comparação fornece as diferenças em

termos de coordenadas cartesianas geodésicas (ΔX , ΔY e ΔZ) denominadas, geralmente de “erros” ou discrepâncias de coordenadas. Esses erros podem ser melhores analisados no SGL (Sistema Geodésico Local).

A transformação das diferenças de coordenadas cartesianas geodésicas (ΔX , ΔY e ΔZ) para o SGL (Δe , Δn e Δu) pode ser obtida a partir das seguintes expressões (SEEBER, 2003, JEKELI, 2002):

$$\begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} = R_3(180^\circ - \lambda) R_2(90 - \varphi) S_2 \begin{bmatrix} \Delta n \\ \Delta e \\ \Delta u \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

onde, $S_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ representa a matriz que permite transformar as componente do

sistema local de levogiro para dextrogiro e R_3 e R_2 são as matrizes de rotação, respectivamente, em torno dos eixos Z e Y. Logo, a Equação 5.18, pode ser escrita da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\text{sen}\lambda & -\text{sen}\varphi\text{cos}\lambda & \text{cos}\varphi\text{cos}\lambda \\ \text{cos}\lambda & -\text{sen}\varphi\text{sen}\lambda & \text{cos}\varphi\text{sen}\lambda \\ 0 & \text{cos}\varphi & \text{sen}\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta e \\ \Delta n \\ \Delta u \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

A transformação inversa da Equação 5.19 é facilmente obtida, uma vez que, a matriz de rotação é ortogonal (inversa igual a transposta). Logo, têm-se (JEKELI, 2002):

$$\begin{bmatrix} \Delta e \\ \Delta n \\ \Delta u \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\text{sen}\lambda & -\text{sen}\varphi\text{cos}\lambda & \text{cos}\varphi\text{cos}\lambda \\ \text{cos}\lambda & -\text{sen}\varphi\text{sen}\lambda & \text{cos}\varphi\text{sen}\lambda \\ 0 & \text{cos}\varphi & \text{sen}\varphi \end{bmatrix}^T}_{R} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} = R^T \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

A MVC dos valores ajustados no caso do PPP, considerando a estimativa das coordenadas e erro relógio do receptor, pode ser escrita da seguinte forma:

$$\Sigma_{\hat{X}} = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} & \sigma_{xcdt_r} \\ \sigma_{yx} & \sigma_y^2 & \sigma_{yz} & \sigma_{ycdt_r} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_z^2 & \sigma_{zcdt_r} \\ \sigma_{cdt_r,x} & \sigma_{cdt_r,y} & \sigma_{cdt_r,z} & \sigma_{cdt_r}^2 \end{bmatrix} \quad (5.21)$$

A propagação da MVC $\Sigma_{\hat{X}}$ (referente às coordenadas da estação) para a MVC no sistema local Σ_{enu} requer o uso da primeira sub-matriz em (5.21) com dimensão três por três, a qual será denominada de S. Nesse caso a MVC propagada para o sistema local é dada por:

$$\Sigma_{enu} = R^T S R = \begin{bmatrix} \sigma_e^2 & \sigma_{en} & \sigma_{eu} \\ \sigma_{ne} & \sigma_n^2 & \sigma_{nu} \\ \sigma_{ue} & \sigma_{un} & \sigma_u^2 \end{bmatrix} \quad (5.22)$$

No caso do posicionamento por ponto o cálculo da diluição da precisão (DOP – *Dilution of Precision*) é realizado com base na MVC propagada para o SGL. Os diversos tipos de DOPs são dados por (BORRE, K. et al., 2007; MONICO, 2008):

$$\text{Geométrico:} \quad \text{GDOP} = \sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_n^2 + \sigma_u^2 + \sigma_{cdt_r}^2} = \sqrt{\text{tr}(\Sigma_{\hat{X}})} \quad (5.23)$$

$$\text{Horizontal:} \quad \text{HDOP} = \sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_n^2} \quad (5.24)$$

$$\text{Posição:} \quad \text{PDOP} = \sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_n^2 + \sigma_u^2} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} = \sqrt{\text{tr}(\Sigma_{enu})} \quad (5.25)$$

$$\text{Tempo:} \quad \text{TDOP} = \sigma_{cdt_r} \quad (5.26)$$

$$\text{Vertical:} \quad \text{VDOP} = \sigma_u \quad (5.27)$$

Algumas configurações da constelação de satélites são melhores que outras e os valores de DOPs permitem fazer essa análise. Experiências práticas têm mostrado que uma boa geometria é alcançada quando $\text{PDOP} < 5$ com medidas de no mínimo cinco satélites (BORRE, et al., 2007).

6 ESTIMATIVA DA CORREÇÃO DO RELÓGIO DO SATÉLITE

Atualmente, a realização de PPP em tempo real com acurácia decimétrica requer a determinação das correções dos relógios dos satélites e posterior envio aos usuários. As correções dos relógios dos satélites GNSS em tempo real podem ser determinadas utilizando dados de estações de uma rede GNSS. Os satélites transportam relógios atômicos de alta estabilidade para a geração precisa de tempo, porém, esses relógios não estão sincronizados com o sistema de tempo GPS e para a realização do posicionamento GNSS é necessário determinar essa não sincronização ou erro do relógio do satélite, o qual também é denominado de correção do relógio do satélite.

As correções dos relógios dos satélites são compostas de uma parte determinística e outra estocástica conforme descrito na seção 2.3. Com relação à parte determinística, a modelagem pode ser na forma de um polinômio (seção 6.3). Com relação à componente estocástica, é necessária a introdução adequada de processos estocásticos associados ao Filtro de Kalman (seção 4.3).

Um método para a estimativa dos erros dos relógios dos satélites é apresentado por Han, Kwon e Jekeli (2001) e Weber, Mervat e Dousa (2007), o qual se baseia na utilização de observáveis de Duplas Diferenças (DDs) entre satélites e entre épocas. Outro método é apresentado por Hauschild (2010), o qual se baseia na utilização das observáveis de código e fase sem diferenciação, gerando assim o método de PPP em rede.

No primeiro método, utilizando as DDs entre épocas, o erro do relógio do receptor é eliminado no processo de simples diferenciação e em seguida, com a realização das DDs entre épocas, as ambiguidades são eliminadas, caso não haja perda de ciclos. Contudo, as correções são estimadas na forma relativa, ou seja, se obtém diferenças de correções dos relógios dos satélites e sendo assim, a realização do PPP em tempo real deve utilizar modelagem matemática ao nível de simples diferenças entre satélites.

No caso do método de PPP em rede, as observações de código e fase são utilizadas sem diferenciação e dessa forma, os efeitos sistemáticos envolvidos com as medidas GNSS devem ser corrigidos e/ou estimados para cada satélite em cada estação. A grande vantagem desse método é que as correções estimadas podem ser aplicadas no método de PPP em tempo real em sua forma convencional, ou seja, sem diferenciações. Porém, esse método apresenta uma grande quantidade de incógnitas a serem estimadas, uma vez que as ambiguidades da fase devem ser estimadas para cada satélite em cada estação, juntamente com os parâmetros de correções dos relógios e outros.

Uma combinação dos dois métodos é apresentada por Zhang; Li e Guo (2010). No caso, é realizada a estimativa dos parâmetros sem diferenciação (PPP em rede) utilizando dados observados a cada 5 segundos e, nos intervalos menores, se utiliza o método de DDs no tempo para a estimativa relativa a cada 1 segundo, considerando que no caso relativo, o número de parâmetros é bem menor, uma vez que as ambiguidades são eliminadas.

Uma alternativa para evitar a estimativa dos parâmetros de ambiguidades para os satélites observados nas estações da rede é fazer uso da observável pseudodistância suavizada pela fase. No caso, pode-se aplicar esse tipo de observável no método de PPP em rede. Os métodos de DDs no tempo e de PPP em rede serão descritos nas próximas seções.

6.1 Correção do relógio do satélite com base na observável Dupla Diferença

Nesse método, os erros dos relógios dos satélites podem ser estimados usando observações do código ou da fase e, geralmente, utiliza-se a combinação *ion-free* para eliminar os efeitos ionosféricos de primeira ordem (seção 3.3.1). Nesse caso, as correções dos erros dos relógios dos satélites são calculadas ao nível da DD das observáveis entre satélites e entre épocas conforme exemplificado na Figura 24 (HAN, KWON E JEKELI, 2001; WEBER, MERVAT E DOUSA 2007).

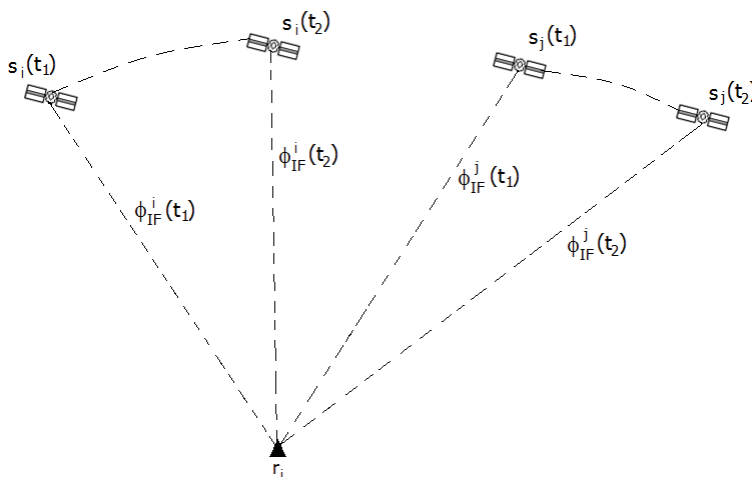


Figura 24 - Erro do relógio do satélite a partir de DDs entre satélites e entre épocas

As equações de observação *ion-free* da fase para os satélites s_i e s_j nas épocas t_1 e t_2 e, desconsiderando alguns efeitos sistemáticos por motivos de simplificação, são dadas por (WEBER; MERVAT; DOUSA, 2007):

$$\begin{aligned}
\phi_{IF}^{s_i}(t_1) &= \rho^{s_i}(t_1) + cdt_r(t_1) - cdt^{s_i}(t_1) + \lambda_{IF}N_{IF}^{s_i} \\
\phi_{IF}^{s_j}(t_1) &= \rho^{s_j}(t_1) + cdt_r(t_1) - cdt^{s_j}(t_1) + \lambda_{IF}N_{IF}^{s_j} \\
\phi_{IF}^{s_i}(t_2) &= \rho^{s_i}(t_2) + cdt_r(t_2) - cdt^{s_i}(t_2) + \lambda_{IF}N_{IF}^{s_i} \\
\phi_{IF}^{s_j}(t_2) &= \rho^{s_j}(t_2) + cdt_r(t_2) - cdt^{s_j}(t_2) + \lambda_{IF}N_{IF}^{s_j}
\end{aligned} \tag{6.1}$$

onde:

- ϕ_{IF} - combinação *ion-free* para a fase;
- ρ - distância geométrica entre o satélite e o receptor;
- dt_r - erro do relógio do receptor;
- dt^{s_i} e dt^{s_j} - erros dos relógios dos satélites s_i e s_j ;
- N_{IF} - ambiguidade da *ion-free*;
- c - velocidade da luz;
- λ_{IF} - comprimento de onda da combinação *ion-free*.

Aplicando a combinação de simples diferença entre os satélites s_i e s_j no tempo t_1 e no t_2 , obtém-se:

$$\begin{aligned}
\Delta\phi_{IF}^{s_i,s_j}(t_1) &= \underbrace{\rho^{s_i}(t_1) - \rho^{s_j}(t_1)}_{\rho^{s_i,s_j}(t_1)} - c(dt^{s_i}(t_1) - dt^{s_j}(t_1)) + \lambda_{IF}(N_{IF}^{s_i} - N_{IF}^{s_j}) \\
\Delta\phi_{IF}^{s_i,s_j}(t_2) &= \underbrace{\rho^{s_i}(t_2) - \rho^{s_j}(t_2)}_{\rho^{s_i,s_j}(t_2)} - c(dt^{s_i}(t_2) - dt^{s_j}(t_2)) + \lambda_{IF}(N_{IF}^{s_i} - N_{IF}^{s_j})
\end{aligned} \tag{6.2}$$

A partir da Equação 6.2, verifica-se que o erro do relógio do receptor é eliminado no processo de simples diferença. A ambiguidade para cada satélite é constante no tempo (caso não haja perdas de ciclos) como pode ser visto na Equação 6.1. Então, com base nessas propriedades, pode-se fazer uso da combinação DD entre os satélites e entre as épocas para eliminar os termos ambiguidade e erro do relógio do receptor. Dessa forma, fazendo a diferenças entre as combinações de simples diferença no tempo t_1 e t_2 , obtém-se:

$$\begin{aligned}
\Delta\phi_{IF}^{s_i,s_j}(t_1) - \Delta\phi_{IF}^{s_i,s_j}(t_2) &= \rho^{s_i,s_j}(t_1) - \rho^{s_i,s_j}(t_2) - \\
&\quad c\left[\left(dt^{s_i}(t_1) - dt^{s_j}(t_1)\right) - \left(dt^{s_i}(t_2) - dt^{s_j}(t_2)\right)\right]
\end{aligned} \tag{6.3}$$

Pode-se confirmar a partir da Equação 6.3, que os erros dos relógios dos receptores e as ambiguidades são eliminados pela combinação. As distâncias geométricas são conhecidas, pois as estações da rede possuem coordenadas conhecidas e as coordenadas dos satélites são interpoladas das efemérides preditas IGU no caso de tempo real. Dessa forma, resta a DD das correções dos relógios dos satélites, a qual pode ser expressa por:

$$(dt^{s_i} - dt^{s_j})_{t_k} - (dt^{s_i} - dt^{s_j})_{t_l} \quad (6.4)$$

onde:

dt^{s_i} e dt^{s_j} - correções dos erros dos relógios dos satélites s_i e s_j ;

t_k e t_l - representam as épocas.

A expressão 6.4 mostra que as correções dos relógios dos satélites são relativas no sentido da DD entre os satélites s_i e s_j e entre as épocas t_k e t_l . De acordo com Han, Kwon e Jekeli (2001), a estimativa da correção do relógio do satélite, obtida a partir da Equação 6.4, deve ser usada no processamento PPP que faz uso de algoritmos de simples diferença (entre satélites) para estimar as coordenadas da estação.

6.2 Correção do relógio do satélite a partir do método PPP em rede

O método de PPP em rede para a estimativa das correções dos relógios dos satélites em tempo real é apresentado por Hauschild (2010). No caso, utiliza-se o Filtro de Kalman para estimar o erro do relógio dos satélites, juntamente com as ambiguidades da fase, erro do relógio do receptor, troposfera e outros. As observações de fase e código são utilizadas sem diferenciação, como exemplificado na Figura 25, o que requer a modelagem matemática dos vários efeitos sistemáticos envolvidos no PPP (ver seção 3.2).

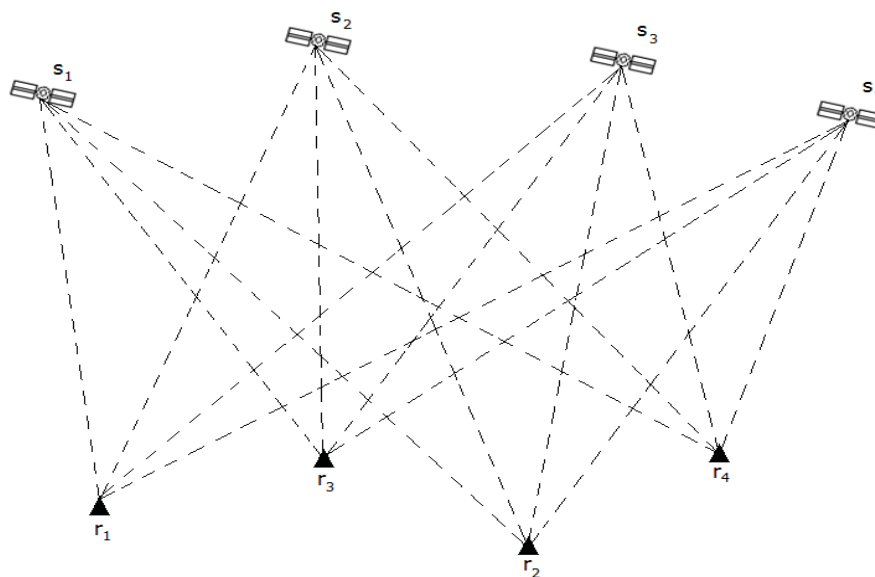


Figura 25 - Esquemática do PPP em rede para a estimativa do erro do relógio do satélite

O modelo matemático linearizado para o ajustamento no caso do PPP em rede é desenvolvido com base no modelo funcional do PPP (Equações 5.1 e 5.2). Nesse caso, pode-se considerar como parâmetros: os erros dos relógios dos receptores (dt_r), os efeitos de troposfera (T_{zw}), as ambiguidades (N) e as correções dos relógios dos satélites (dt^s). Estes últimos representam maior interesse para o caso do PPP em tempo real. As coordenadas dos satélites podem ser interpoladas a partir das efemérides previstas IGU para tempo real e as coordenadas das estações da rede devem ser conhecidas ou determinadas com muito boa acurácia.

A etapa de predição dos erros dos relógios dos satélites no Filtro de Kalman é um fator muito importante, uma vez que o relógio apresenta tendência da frequência (*frequency offset*) e deriva da frequência (*frequency drift*), além da influência dos efeitos estocásticos (seção 2.3). Nesse caso, a correção do relógio pode ser estimada considerando as duas componentes, *offset* e *drift*. O processo relacionado com modelos de predição das correções dos relógios será descrito na próxima seção. Por motivos de simplificação, a correção do relógio do satélite será considerada como apenas um parâmetro na equação linearizada em sua forma matricial, a qual é dada por:

$$E \left\{ \begin{bmatrix} \Delta PD_{IFr}^{s_i} \\ \Delta \lambda_{IF} \phi_{IFr}^{s_i} \end{bmatrix} \right\} = AX = \begin{bmatrix} -1 & 1 & m_f & 0 \\ -1 & 1 & m_f & \lambda_{IF} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} cdt^{s_i} \\ cdt_r \\ T_{zw} \\ N_{IF}^{s_i} \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

O modelo matemático como descrito pela Equação 6.5 apresenta deficiência de característica (deficiência de *rank*), o que requer estratégia adequada para sua solução. Considerando, por exemplo, uma rede com 4 receptores (r_i) observando simultaneamente 4 satélites (s_i), tem-se 32 observações (fase e código *ion-free*) e 28 parâmetros (4 dt^s , 4 dtr , 4 T_{zw} e 16 ambiguidades), cuja matriz *design* (A) é representada por:

Figura 26 - Matriz design para o PPP em rede

A partir da matriz N ($N = A^T A$), verifica-se que a característica $Car(N)$ é igual a 26, onde $Car(N) \leq u-1$, sendo u (igual a 28) o número de linhas de N ou o número de parâmetros, o que indica que há deficiência de característica. Neste caso, a matriz N é singular (determinante nulo) e, conseqüentemente, não admite inversa. A deficiência de característica da matriz N pode ser solucionada através da introdução de injunções mínimas, através do ajustamento livre, dentre outros.

Há várias possibilidades para introdução de injunção mínima. Uma delas pode ser realizada com base no valor médio dos erros dos relógios de todos os satélites disponíveis nas efemérides preditas IGU com uma determinada qualidade associada (injunção

relativa). Nesse caso, a média dos erros dos relógios é tratada como uma pseudo-observação e os erros dos relógios dos satélites estimados ficam vinculados ao erro médio dos relógios dos satélites advindos da IGU, o qual é conhecido como um relógio de referência virtual (HAUSCHILD; MONTENBRUCK, 2008). Outras estratégias de injunção podem ser utilizadas, como por exemplo, utilizar o erro do relógio de um receptor que esteja conectado com um relógio atômico, ou simplesmente adotar um valor para o erro do relógio de um satélite da constelação, o qual pode ser obtido das efemérides previstas IGU. Outra solução para o problema de deficiência de característica pode ser o tratamento do modelo a partir de ajustamento livre, com posterior injunção do sistema de tempo.

O erro do relógio de cada receptor da rede GNSS, geralmente, é modelado como *white noise*, de forma que se estima um parâmetro por época para cada receptor. No caso da troposfera estima-se a componente úmida T_{zw} como *random walk* e a componente hidrostática (T_{zh}) é calculada a partir de um modelo (seção 3.3.2). As ambiguidades são consideradas como constantes.

O modelo linearizado como apresentado na Equação 6.5 não levou em consideração a componente *drift* (deriva) do relógio do satélite por motivos de simplificação, porém essa componente pode ser estimada juntamente com os outros parâmetros do modelo ou estimada numa etapa posterior com base num modelo de polinômio conforme será descrito na seção 6.3. Mesmo com a modelagem adequada, ainda restam os efeitos aleatórios associados com os relógios dos satélites, os quais podem ser tratados como um processo *random walk* na etapa de estimativa com o Filtro de Kalman.

O método de PPP em rede permite obter as correções dos relógios dos satélites na forma absoluta, ou seja, sem diferenciações. Dessa maneira, é possível comparar a solução diretamente com a solução dos centros IGS, porém, é preciso levar em consideração a tendência (*bias*) presente na estimativa devido ao tipo de injunção adotada. Além disso, a solução absoluta para as correções dos relógios permite a aplicação no PPP comumente realizado sem diferenciações.

A desvantagem do método consiste no grande número de parâmetros a serem estimados e o gerenciamento dos mesmos em termos computacionais, principalmente quando as ambiguidades são estimadas. Considerando, por exemplo, uma solução utilizando uma rede GNSS com 50 estações rastreando em média 10 satélites por estação, o número de parâmetros seria de 592 para o caso da constelação GPS (32 dt^s , 30 dt_r , 30 T_{zw} e 500 ambiguidades). Contudo, a característica esparsa da matriz como pode ser vista na Figura 26 permite a otimização computacional dos processos que envolvem as matrizes do ajustamento.

6.3 Predição do erro do relógio do satélite utilizando polinômios

Como descrito na seção 2.3, os relógios atômicos podem ser modelados por componentes determinísticas e estocásticas. Considerando a parte determinística, o erro do relógio do satélite pode ser modelado a partir de:

$$dt^s = a_0 + a_1\Delta t_i + a_2\Delta t_i^2 = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t_i & \Delta t_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

onde, $\Delta t_i = t_i - t_0$, sendo t_i a época atual e t_0 a época de referência. Os coeficientes a_0 , a_1 e a_2 são, respectivamente as componentes *offset*, *drift* e *drift rate* e podem ser estimados juntamente com os outros parâmetros no Filtro de Kalman, ou seja, com as correções dos relógios dos receptores, troposfera, ambiguidades e correções dos relógios dos satélites no caso do PPP em rede.

Os valores dos coeficientes do polinômio na Equação 6.6, também podem ser obtidos com base na série temporal dos valores estimados para as correções dos relógios dos satélites. Nesse caso, obtida a solução inicial para o vetor estado, inicia-se um processo recursivo com o objetivo de estimar os coeficientes a_0 , a_1 e a_2 e realizar a predição para a época seguinte.

Considerando que o conjunto de observações ou valores estimados para as correções do relógio de um determinado satélite seja representado por:

$$\begin{aligned} dt_1^s &= a_0 + a_1\Delta t_1 + a_2\Delta t_1^2 \\ dt_2^s &= a_0 + a_1\Delta t_2 + a_2\Delta t_2^2 \\ &\vdots \\ dt_n^s &= a_0 + a_1\Delta t_n + a_2\Delta t_n^2 \end{aligned} \quad (6.7)$$

A matriz de coeficientes A do MMQ é dada por:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t_1 & \Delta t_1^2 \\ 1 & \Delta t_2 & \Delta t_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \Delta t_n & \Delta t_n^2 \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

Considerando a matriz dos pesos como identidade, tem-se que a matriz N é dada por:

$$N = A^t A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \Delta t_1 & \Delta t_2 & \dots & \Delta t_n \\ \Delta t_1^2 & \Delta t_2^2 & \dots & \Delta t_n^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \Delta t_1 & \Delta t_1^2 \\ 1 & \Delta t_2 & \Delta t_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \Delta t_n & \Delta t_n^2 \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

A partir da Equação 6.9, verifica-se facilmente que a matriz N pode ser calculada de forma recursiva a partir de:

$$N = \begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n \Delta t_i & \sum_{i=1}^n \Delta t_i^2 \\ \sum_{i=1}^n \Delta t_i & \sum_{i=1}^n \Delta t_i^2 & \sum_{i=1}^n \Delta t_i \Delta t_i^2 \\ \sum_{i=1}^n \Delta t_i^2 & \sum_{i=1}^n \Delta t_i \Delta t_i^2 & \sum_{i=1}^n \Delta t_i^4 \end{bmatrix} \quad (6.10)$$

O vetor U do MMQ é calculado da seguinte forma:

$$U = A^t L = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \Delta t_1 & \Delta t_2 & \dots & \Delta t_n \\ \Delta t_1^2 & \Delta t_2^2 & \dots & \Delta t_n^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dt_1^s \\ dt_2^s \\ \vdots \\ dt_n^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n dt_i^s \\ \sum_{i=1}^n \Delta t_i dt_i^s \\ \sum_{i=1}^n \Delta t_i^2 dt_i^s \end{bmatrix} \quad (6.11)$$

As Equações 6.10 e 6.11 permitem estimar os coeficientes relacionados com as correções dos relógios dos satélites de forma recursiva e com base na série temporal das correções estimadas. No caso, os efeitos aleatórios inerentes aos relógios dos satélites podem ser compensados em forma de adição de ruídos na etapa de predição da MVC do vetor estado no Filtro de Kalman. Uma forma eficiente de efetuar o cálculo recursivo de polinômio é apresentada por Teunissen (2001).

No caso deste trabalho, o método apresentado nesta seção é aplicado em cada época processada no Filtro de Kalman após a etapa de filtragem e utiliza como dados a série temporal dos erros dos relógios dos satélites estimados. Com base na série temporal

estimam-se os coeficientes (a_0 , a_1 e a_2) do polinômio, os quais serão utilizados na etapa de predição para a época seguinte.

Esse método apresenta vantagem relacionada ao caso em que se estimam os coeficientes do polinômio juntamente com os outros parâmetros no Filtro de Kalman, visto que o número de elementos do vetor estado é menor em cada época processada. No caso, para o início da estimativa dos coeficientes do polinômio, é necessário realizar o processamento de algumas épocas de dados para que se tenham disponíveis os valores estimados dos erros relógios dos satélites.

7 DESENVOLVIMENTO DOS SOFTWARES

A estimativa das correções dos relógios dos satélites GNSS foi desenvolvida com base no método de PPP em rede, tal como descrito na seção 6.2. Esse método permite estimar as correções no modo absoluto, ou seja, sem diferenciações, o que permite aplicar as correções no método PPP em sua forma tradicional. Essa estratégia é adotada atualmente pelos centros que contribuem ao IGS na estimativa de correções dos relógios dos satélites e das órbitas.

Para realizar a estimativa das correções dos relógios dos satélites foi desenvolvido o software denominado RT_SAT_CLOCK (*Real time Satellite Clock*). Uma vez estimado os erros dos relógios dos satélites, esses podem ser aplicados no processamento PPP a partir do outro *software* desenvolvido, o RT_PPP.

No RT_SAT_CLOCK a metodologia implementada primeiramente foi para a estimativa dos erros dos relógios dos satélites utilizando o código suavizado pela fase com injeção relativa para o relógio de um satélite, cujos valores advêm das efemérides IGS. A técnica conhecida como suavização da pseudodistância pela fase da onda portadora pode ser encontrada em Teunissen (1991); Jin (1996); Hofmann-Wellenhof et al. (2001) e Monaco (2008). No caso desse trabalho, foi seguida a formulação utilizada por Jin (1996).

A outra forma de estimar as correções dos relógios com o RT_SAT_CLOCK é fazendo uso da observável fase da onda portadora juntamente com o código (pseudodistância) sem diferenciações. Nesse caso, as ambiguidades da fase para cada satélite em cada estação da rede são estimadas juntamente com as correções de relógios dos receptores e dos satélites, além do atraso provocado pela troposfera.

O recebimento dos dados em tempo real a partir dos *softwares* RT_SAT_CLOCK e RT_PPP foi implementado com base nos códigos fonte dos aplicativos RTCM3ToRINEX e BNC disponíveis em igs.bkg.bund.de/ntrip/download (Acesso em: jan. 2012), a partir do qual foi desenvolvido um aplicativo para a comunicação em tempo real. O aplicativo desenvolvido utiliza o conceito de *threads* (SILBERSCHATZ, 2010), onde cada uma delas representa um processo independente no sistema operacional. No caso da estimativa utilizando dados de uma rede GNSS, cada *thread* fica vinculada a uma estação da rede via NtripCaster.

No caso do PPP em tempo real, utiliza-se uma *thread* para obter os dados GNSS (código e fase) de uma estação e outra para obter as correções dos relógios dos satélites.

No caso do RT_SAT_CLOCK, as correções para os relógios dos satélites são geradas com base em dados advindos de diversas estações da rede GNSS, onde para cada estação, utiliza-se uma *thread*. Posteriormente, essas correções podem ser codificadas e enviadas aos usuários, os quais poderão utilizar o *software* RT_PPP para realizar o PPP em tempo real.

As linguagens de programação envolvidas nesse projeto são basicamente Fortran e C++, as quais são integradas a partir do uso de DLLs ou outras formas disponíveis (SILVA; MONICO, 2004) e tanto o RT_SAT_CLOCK quanto o RT_PPP funcionam no sistema operacional Linux e Windows. A descrição detalhada dos modelos matemáticos implementados nos *softwares* desenvolvidos é apresentada a seguir

A introdução à transmissão dos dados via internet, a descrição do NTRIP e do formato RTCM são apresentadas no Apendice A.

7.1 RT_PPP

Para a realização do PPP foi desenvolvido o *software* RT_PPP em linguagem de programação C/C++. A partir deste *software*, os processamentos podem ser realizados no modo estático ou cinemático utilizando o Filtro de Kalman com aplicação do controle de qualidade a partir do método DIA (seção 4).

A verificação de perdas de ciclos é realizada com base nas equações apresentadas na seção 3.3.3. Caso sejam detectadas perdas de ciclos para determinado satélite, adotou-se a estratégia de reiniciar a estimativa da ambiguidade da fase para esse satélite. Sendo assim, um novo valor aproximado para a ambiguidade é calculado com base na diferença entre a pseudodistância e a fase. Nesse caso, o parâmetro da nova ambiguidade a ser estimado é tratado, em um primeiro momento, como um processo *white noise*, ou seja, adota-se um valor teoricamente infinito (valor alto) para a incerteza do parâmetro na época em que houve a perda de ciclos.

O *software* RT_PPP permite a utilização de arquivos de efemérides precisas do IGS (modo pós-processado) ou de efemérides preditas IGU. As correções precisas dos relógios dos satélites podem ser as finais do IGS ou em tempo real como será descrito posteriormente.

Com relação à interpolação dos produtos do IGS, existem diversas funções matemáticas que permitem realizar esta tarefa, dentre as quais se podem citar: polinômio de Chebyshev, polinômio de Lagrange, polinômio de Neville, polinômios trigonométricos,

interpolação por Splines Cúbicas, entre outras. No caso do RT_PPP, as funções de interpolação se baseiam no polinômio de Neville, cuja formulação matemática pode ser encontrada em PRESS et al. (1986). Foram utilizadas sub-rotinas disponibilizadas pelo NGS (<http://www.ngs.noaa.gov/gps-toolbox/exist.htm> - Acesso em: jan. 2012) em linguagem de programação C/C++, com as devidas adaptações para aplicar as interpolações às órbitas precisas e relógios dos satélites GPS.

O RT_PPP utiliza as medidas GPS P1, P2 e fases na L1 e na L2, porém, quando P1 ou P2 não estão disponíveis devido a configurações ou restrições dos receptores, o RT_PPP utiliza C1 ou L2C, aplicando as correções de DCBs (seção 3.2.4) para compatibilizar as medidas com P1 e P2.

As principais modelagens matemáticas para eliminar ou minimizar os efeitos sistemáticos nos sinais GPS são mostradas na Tabela 7:

Tabela 7 - Modelagem matemática dos efeitos sistemáticos implementada no *software* RT_PPP

| Efeito | Estratégia |
|---|---|
| Ionosfera – 1ª ordem | Combinação <i>ion-free</i> |
| | Estimativa da ionosfera como processo estocástico |
| Troposfera | Somente modelo de Hopfield + GPT |
| | GMF + TZD a partir de dados do CPTEC |
| | VMF1 + TZD a partir de dados ECMWF |
| | TZH fixo + TZW estimado (<i>random walk</i>) |
| Carga de marés oceânicas | Aplicadas conforme modelagem matemática de seção 3.4 |
| Marés de corpos terrestres | Modelos descritos pelo IERS 2003 (McCARTHY; PETIT, 2003) |
| PCV receptor e satélite | Varição absoluta do centro de fase das antenas (PCO e PCV) |
| Efemérides precisas | IGS ou IGU predita |
| Correção do erro do relógio do satélite | Pós-processado ou tempo real (a partir do <i>software</i> RT_SAT_CLOCK) |
| <i>Differential Code Bias</i> (DCB) | Valores mensais estimados pelo CODE |
| Ambiguidades | Solução <i>float</i> |
| Fase <i>wind-up</i> | Aplicado |
| Efeito de relatividade | Aplicado |

A correção dos efeitos da ionosfera pode ser feita através da combinação *ion-free* (seção 3.3.1) para o caso de dupla frequência ou da estimativa do efeito ionosférico na direção receptor-satélite (seção 5.3), modelo de Klobuchar ou mapas globais (GIM) para o caso de simples frequência. Ao se aplicar a estimativa da ionosfera, o valor a priori adotado advém do modelo de Klobuchar e a estimativa é realizada com base na introdução de uma pseudo-observação para cada satélite e respectivo desvio-padrão adotado pelo usuário. O parâmetro da ionosfera, nesse caso, é tratado como *white noise* (seção 4.3), de forma que no início de cada época reinicializa-se a MVC do vetor estado predito referente ao parâmetro da ionosfera.

Com relação aos efeitos da troposfera, é possível aplicar as correções através do modelo de Hopfield, a utilização do modelo de PNT do CPTEC, modelo de PNT Europeu (ECMWF) juntamente com função de mapeamento de Viena ou a estimativa da troposfera.

Para a correção da troposfera utilizando o modelo de Hopfield, adotam-se parâmetros de pressão e temperatura como entrada para o modelo, os quais são calculados a partir da função GPT, disponível em: <http://ggosatm.hg.tuwien.ac.at/DELAY/SOURCE/> (Acesso em: jan. 2012).

Com relação à estimativa da troposfera, estima-se a componente úmida da troposfera (T_{zw}) tratando-a como um processo estocástico *random walk*, sendo que a componente hidrostática é calculada com base em um modelo (Hopfield ou PNT) e é mantida fixa durante todo o processamento.

Quando se aplica o modelo de PNT, seja do CPTEC ou do modelo Europeu (ECMWF), o programa RT_PPP faz a leitura e armazenagem dos valores das componentes zenital úmida e hidrostática, os quais são posteriormente interpolados para a época a ser processada. Para o caso dos valores do modelo ECMWF, é necessário realizar interpolação espacial e temporal, uma vez que os dados, seja de atraso troposférico ou os coeficientes da VMF, são fornecidos na forma de *grids* com variação temporal e geográfica sobre o globo terrestre. O RT_PPP aplica interpolação bilinear no caso dos dados do modelo ECMWF e da VMF.

Para a modelagem estocástica é possível utilizar os modelos em função do ângulo de elevação do satélite conforme descritos na seção 5.2. As incertezas das órbitas e dos erros dos relógios dos satélites são adicionadas à incerteza das medidas fornecida pelo usuário.

A variação do centro de fase (PCV) da antena do receptor e do satélite é corrigida utilizando a correção com base em calibração absoluta (seção 3.2.5).

Outras correções se referem às da fase *windup* (seção 3.2.6), os modelos de marés de corpos terrestres e carga de marés oceânicas (seção 3.4), a correção devido aos efeitos de relatividade (seção 3.2.2 e seção 3.2.3), entre outros.

O RT_PP permite realizar o PPP no modo pós-processado e também em tempo real. No último caso, o *software* foi adaptado para obter as medidas GNSS via internet ou via porta serial. A comunicação em rede para realizar o PPP em tempo real foi desenvolvida com base nos aplicativos disponíveis pelo BKG. Dessa forma, o RT_PPP trabalha como um aplicativo “cliente”, o qual é capaz de receber as observações GNSS de

código e fase de uma determinada estação vinculada a um NTRIPCaster ou a uma porta serial de um computador, além de ser capaz de receber as correções das órbitas e relógios dos satélites a partir de outro NTRIPCaster diferente. Para tanto, é utilizado o recurso de “*threads*”, no qual, as informações transmitidas em cada *mountpoint* (denominação do NTRIP), sejam dados GNSS ou correções, ficam vinculadas a uma determinada “*thread*”. A Figura 27 mostra o fluxograma do RT_PPP relacionado com o uso das *threads* e a realização do PPP em tempo real.

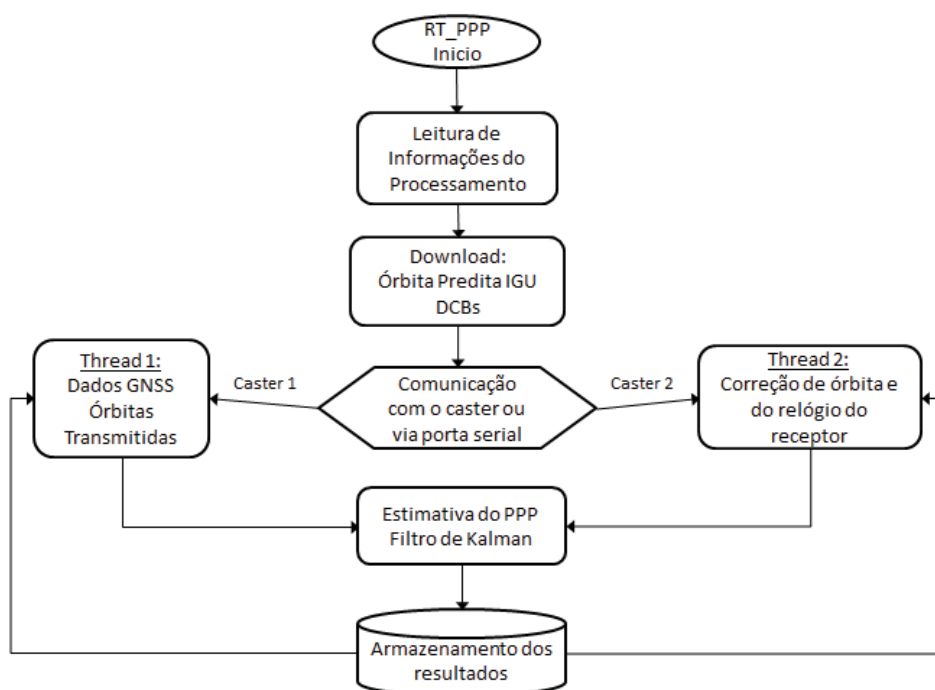


Figura 27 - Fluxograma do RT_PPP em tempo real

Existem, atualmente, várias localidades ao redor do mundo (*mountpoints*) transmitindo as correções de órbitas e relógios dos satélites para as efemérides transmitidas, as quais são geradas pelo *software* BKG/BNS. Esse *software* utiliza a estimativa dos relógios e órbitas dos satélites GNSS obtidas com o *software* chamado RTNET e as transforma em correções para as efemérides transmitidas (BKG, 2012). Essas correções são posteriormente codificadas na versão beta do formato RTCM 3.x e enviadas via NTRIP (ver APÊNDICE A).

O *software* RT_PPP permite obter as medidas GNSS de um determinado *mountpoint* e as correções de relógios dos satélites advindas de outro *mountpoint* e aplicar o processamento PPP em tempo real.

7.2 RT_SAT_CLOCK

A metodologia adotada para estimar as correções dos relógios dos satélites GPS a partir do *software* RT_SAT_CLOCK é realizada com base no PPP em rede conforme descrito na seção 6.2. Primeiramente, foi implementada a solução utilizando o código suavizado pela fase e depois a solução com código e fase estimando as ambiguidades junto com as correções de relógios e a troposfera. No primeiro caso, faz-se combinação entre épocas consecutivas e a ambiguidade é eliminada (caso não haja perda de ciclos), restando o código suavizado pela fase, o qual apresenta menor ruído que a medida original do código (JIN, 1996; TEUNISSEN, 1991; HOFMANN-WELLENHOF et al., 2001).

A etapa de cálculos matriciais para o ajustamento dos dados no RT_SAT_CLOCK é realizada de forma otimizada, onde todas as matrizes são armazenadas na forma vetorial. Considere o exemplo mostrado na Figura 26 (p. 140), cujo ajustamento é realizado com estimativa das correções dos relógios dos receptores, correções dos relógios dos satélites e dos efeitos da troposfera. Neste caso, cada linha da matriz *design* do ajustamento é composta com valores 1, -1 e os valores da função de mapeamento (mf), os quais são armazenados sequencialmente no vetor “A”, enquanto que as posições dos elementos da matriz A são armazenadas no vetor “Loca”, os quais podem ser representados da seguinte maneira:

$$A = [-1 \quad 1 \quad mf1 \quad -1 \quad 1 \quad mf2 \quad \dots]$$

$$Loca = [1 \quad 32 \quad 52 \quad 1 \quad 33 \quad 53 \quad \dots]$$

Além da matriz A todas as outras matrizes são armazenadas na forma vetorial. A aplicação das equações de ajustamento com base na forma vetorial é mais rápida e, no caso da implementação do RT_SAT_CLOCK, as sub-rotinas foram adaptadas do *software* Ajunivel para ajustamento de redes de nivelamento, desenvolvido na FCT/UNESP (SILVA; MONICO, 2004).

A Tabela 8 mostra a dimensão das matrizes do ajustamento em sua forma convencional e em sua forma vetorizada, sendo que n é o número de observações e u é o número de parâmetros:

Tabela 8 - Dimensões das matrizes no ajustamento

| Matrizes | Descrição | Dimensão na forma convencional | Dimensão na forma vetorizada |
|-----------------|-------------------|--------------------------------|--|
| A | <i>Design</i> | $n \times u$ | $(n^*2) \times 1$ |
| P | Peso | $n \times n$ | $n \times 1$ |
| $L = L_0 = L_b$ | Vetor L | $n \times 1$ | $n \times 1$ |
| Σx | MVC de parâmetros | $u \times u$ | Triang. sup. em forma de vetor $(u*(u+1)/2)$ |
| $V = U = X_a$ | Vetor de resíduos | $u \times 1$ | $u \times 1$ |

Fonte: Adaptada de Silva e Monico (2004).

Na Tabela 8, pode-se verificar a otimização na dimensão das matrizes envolvidas no ajustamento. Desta maneira, o programa utiliza uma quantidade menor de memória do sistema operacional e os cálculos são efetuados com maior rapidez.

Apesar da forma otimizada de armazenagem dos dados ainda há restrições, visto que os vetores são alocados estaticamente no sistema operacional. Logo, se considerarmos um caso de ajustamento de rede com 500 parâmetros, teríamos um vetor para a MVC (linha 5 da Tabela 8) com 125250 posições. Uma solução para este tipo de problema é o uso de listas lineares alocadas dinamicamente e aplicadas ao caso de matrizes esparsas. Contudo, o acesso aos dados neste tipo de estrutura é sequencial e mais lento que o caso do vetor alocado estaticamente.

A Figura 28 mostra o fluxograma de execução do *software* RT_SAT_CLOCK:

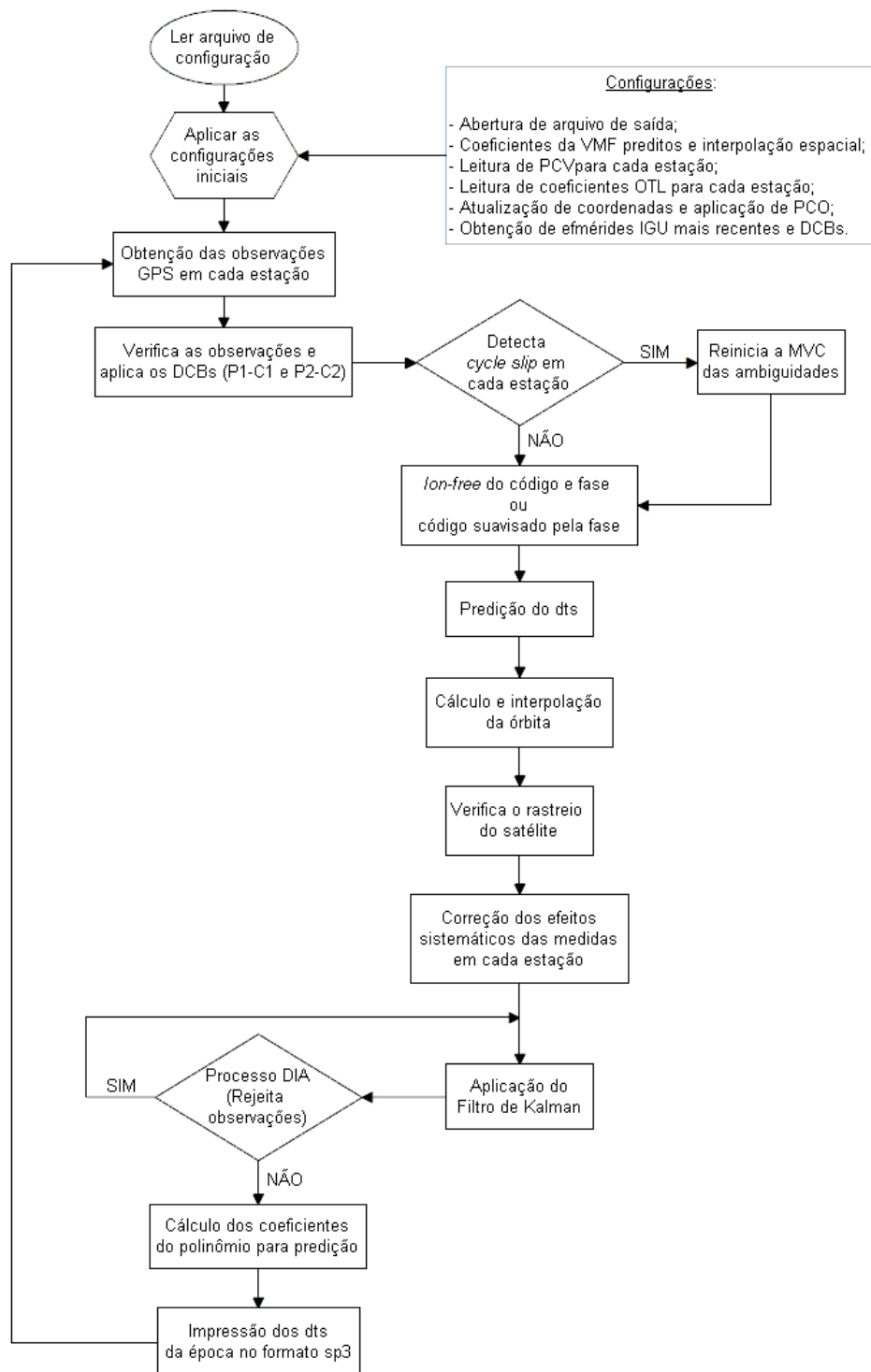


Figura 28 - Fluxograma do RT_SAT_CLOCK

O usuário pode escolher entre utilizar o código suavizado pela fase ou as medidas de código e fase aplicando a combinação *ion-free*. As perdas de ciclos são detectadas com base nas equações da seção 3.3.3 e caso exista, reinicia-se o processo de suavização do código pela fase ou começa-se a estimativa de uma nova ambiguidade caso estas estejam sendo estimadas.

Todas as correções de efeitos sistemáticos envolvidos no PPP são aplicadas para os satélites observados em cada estação da rede GNSS. No caso da ionosfera, utiliza-se a combinação linear *ion-free* e no caso da troposfera, pode-se utilizar o modelo advindo do PNT com as funções de mapeamento VMF ou GMF ou aplicar a estimativa do atraso troposférico.

A posição do satélite é interpolada a partir das efemérides preditas IGU, as quais são atualizadas automaticamente a cada 6 horas pelo *software*, ou seja, a cada 6 horas de processamento, o *software* verifica se há um novo arquivo de efemérides preditas e em caso positivo, passa a utilizar o arquivo mais recente.

Na primeira época do processamento, os valores aproximados para as correções dos relógios dos satélites são interpolados das efemérides IGU. Estas correções são utilizadas para corrigir o modelo matemático do ajustamento e também para obter o tempo GPS de transmissão necessário para o cálculo da órbita. Os valores iniciais do vetor estado e respectiva MVC para o Filtro de Kalman são obtidos a partir do MMQ inicial da primeira época.

Para realizar a predição do erro do relógio do satélite, se utiliza um modelo polinomial conforme descrito na seção 6.3. Na etapa de predição do Filtro de Kalman, os erros dos relógios dos satélites são tratados como *random walk*, enquanto que os erros dos relógios dos receptores são tratados como *white noise*.

Para solucionar o problema da deficiência de característica, conforme descrito na seção 6.2, introduz-se a injeção relativa para a correção do relógio de um satélite, cujo valor é interpolado a partir das efemérides IGU ou para a correção do relógio de um receptor da rede que esteja conectado com relógio atômico.

O RT_SAT_CLOCK verifica quando os dados de um determinado satélite ou de uma estação não estão disponíveis e caso isso ocorra, as ambiguidades dos satélites deixam de fazer parte da estimativa. A MVC do vetor estado é adaptada para continuar o processo no Filtro de Kalman sem os parâmetros para os satélites que deixaram de ser observados. Quando os dados do satélite voltam a ser observados ou quando um novo satélite

começa ser observado na estação, uma nova coluna na MVC do vetor estado é aberta para o início da estimativa da ambiguidade.

Após o ajustamento dos dados, o processo DIA é executado e caso seja detectado possível erro grosseiro, retira-se a observação do satélite adaptando as matrizes sem esta medida e o processo de ajustamento é realizado novamente.

Em cada época processada os resultados são armazenados em arquivo com formato SP3 (arquivo de relógio preciso disponibilizado pelo IGS), o qual pode ser utilizado posteriormente no modo PPP pós-processado.

A próxima seção apresenta os resultados e experimentos realizados como os *softwares* RT_SAT_CLOCK e RT_PPP.

8 EXPERIMENTOS REALIZADOS, RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo são apresentados os experimentos realizados visando avaliar o sistema desenvolvido, o qual é composto por dois *softwares*, o RT_PPP e o RT_SAT_CLOCK descritos na seção 7.

Para a análise dos resultados do PPP utilizando o RT_PPP, foram processados dados de estações GNSS distribuídas ao redor do mundo. Os resultados do PPP, num primeiro momento, foram gerados no modo pós-processado utilizando órbitas e correções precisas dos relógios do IGS, além de várias outras opções. Os resultados foram gerados no modo pós-processado objetivando avaliar a modelagem matemática implementada no *software* e verificar a acurácia dos resultados obtidos com o processamento no RT_PPP. Desta forma, diversos processamentos foram realizados, seja no modo estático ou cinemático, envolvendo o uso de dados de simples ou de dupla frequência, utilizando as opções de estimativa da troposfera ou da ionosfera, entre outros.

Após a avaliação dos resultados do PPP no modo pós-processado são apresentados os resultados da estimativa das correções dos relógios dos satélites com o *software* RT_SAT_CLOCK utilizando dados de uma rede GNSS. As análises foram primeiramente realizadas para verificar o uso dos modelos de predição, além da estabilidade dos relógios atômicos dos satélites com base na equação de variância de Allan (seção 2.3). Em seguida foram gerados resultados com o RT_SAT_CLOCK utilizando a observável pseudodistância suavizada pela fase, onde foi realizada a análise da estrutura da rede GNSS para fins de estimativa das correções dos relógios dos satélites em tempo real. Após esta etapa, a estimativa das correções relógios foi gerada com as opções de código suavizado pela fase e utilizando as observáveis pseudodistância e fase sem diferenciações com estimativa das ambiguidades. Os resultados foram avaliados em termos de acurácia utilizando como valores de referência as correções finais do IGS.

As correções estimadas pelo RT_SAT_CLOCK foram aplicadas em processamentos com o *software* RT_PPP com o objetivo de avaliar o impacto das correções estimadas para tempo real na obtenção de coordenadas no modo PPP. Neste caso, foram processados dados GPS de estações de referência no modo estático e cinemático. Foi realizado também o PPP no modo cinemático utilizando dados GPS de um voo realizado por uma aeronave regional no dia 01 de setembro de 2009, cujo objetivo foi avaliar a estimativa da posição do avião em trajetória com o RT_PPP utilizando as correções de relógios estimadas pelo RT_SAT_CLOCK.

O PPP com o software RT_PPP também foi avaliado no modo tempo real utilizando as correções às efemérides transmitidas estimadas e enviadas pelo BKG e com recepção dos dados GNSS via internet (caster) ou via porta serial.

As coordenadas geodésicas cartesianas estimadas em cada processamento realizado pelo RT_PPP foram comparadas com as coordenadas de referência das estações no sistema ITRF2005 ou ITRF2008 no caso de utilização de órbitas precisas. Dessa forma, foram obtidas as discrepâncias entre as referidas coordenadas, o que se denominou de “erro”. Na maioria dos casos, essas discrepâncias ou “erros” foram transformados para o Sistema Geodésico Local (SGL) com respectiva propagação das incertezas para fins de análises. No caso de processamentos para estações da RBMC, os valores oficiais das coordenadas fornecidos pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) em SIRGAS 2000 (época 2000,4) foram convertidos para o ITRF em questão e atualizados para a época da coleta dos dados. A transformação das coordenadas foi realizada a partir da transformação generalizada de Helmert cuja formulação pode ser encontrada em Soler (1998). As velocidades das estações foram obtidas a partir do aplicativo “Vemos” disponibilizado pelo IBGE dentro do contexto do SIRGAS 2000.

No geral, os processamentos dos dados foram realizados utilizando as medidas GPS dos códigos P1 e P2 e das fases na L1 e L2. Muitos receptores não coletam a observável P1 e nesse caso, o RT_PPP e RT_SAT_CLOCK utilizam as medidas C1 aplicando as correções de DCBs P1-C1. No caso da falta da observável P2, os dois *softwares* tentam utilizar as medidas de C2 (L2C) aplicando as correções de DCBs P2-C2.

O uso das observações P1 e P2 ou a aplicação dos DCBs nos casos de C1 e L2C ocorre com o objetivo de tornar os processamentos PPP compatíveis com as soluções de correções dos relógios geradas pelo IGS, o qual atualmente utiliza a combinação *ion-free* das observações P1 e P2. A próxima seção apresenta os resultados do RT_PPP no modo pós-processado.

8.1 Avaliação do PPP no modo pós-processado

Nesta seção é apresentada a avaliação do PPP para dados de simples e de dupla frequência. No primeiro caso foi realizado PPP utilizando somente a pseudodistância ou a pseudodistância e a fase na L1 e, no segundo caso procurou-se mostrar a acurácia alcançada no processamento PPP para dados de dupla frequência aplicando toda a modelagem programada no *software* RT_PPP e utilizando os produtos finais do IGS.

No caso do uso da pseudodistância, procurou-se analisar o impacto da consideração dos modelos de troposfera, ionosfera, órbitas e relógios dos satélites no PPP com solução época por época.

Em relação aos experimentos utilizando dados de pseudodistância e fase na portadora L1, o objetivo foi analisar o uso dos modelos de ionosfera, principalmente com a opção de estimativa da ionosfera, onde este parâmetro é tratado como pseudo-observação conforme descrito na seção 5.3.

Para o PPP com dados de dupla frequência, a análise foi realizada para o caso estático e cinemático com processamento de dados para diversas estações. A próxima seção apresenta os resultados obtidos no PPP utilizando a observável pseudodistância na frequência L1.

8.1.1 PPP para dados de simples frequência utilizando o código

Nesta seção são apresentados os resultados no modo pós-processado utilizando somente a pseudodistância na frequência L1. O objetivo é avaliar o impacto nos resultados do PPP em função da implementação dos modelos de troposfera, ionosfera, órbitas e relógios dos satélites. Os processamentos no *software* RT_PPP foram realizados considerando o caso época por época.

Foram realizados experimentos utilizando os dados (escolhidos aleatoriamente) da estação BRAZ (Lat:-15°; Lon: -47°) no dia 01 de setembro de 2009 (dia 244 de 2009), onde quatro tipos de processamentos foram feitos utilizando a observável C/A. No primeiro processamento utilizou-se o código C/A com órbitas transmitidas e sem correções para a troposfera e ionosfera (somente C/A). No segundo processamento, foi adicionada a correção da troposfera pelo modelo de Hopfield (C/A + Hop). Em seguida, no terceiro processamento, adicionou-se a correção da ionosfera pelo modelo de Klobuchar (C/A + Hop + Klob) e, por fim, no quarto processamento adicionaram-se as órbitas precisas e as correções de relógios dos satélites GPS (C/A + Hop + Klob + sp3 + clk).

Os quatro processamentos foram realizados com máscara de elevação de 10°, aplicação dos DCBs P1-C1, efeito de marés terrestres e carga dos oceanos, entre outros. A precisão adotada para o código C/A foi igual a 0,8 m. A Figura 29 mostra a série temporal diária dos “erros” em altitude geométrica (componente mais afetada) para cada um dos processamentos realizados:

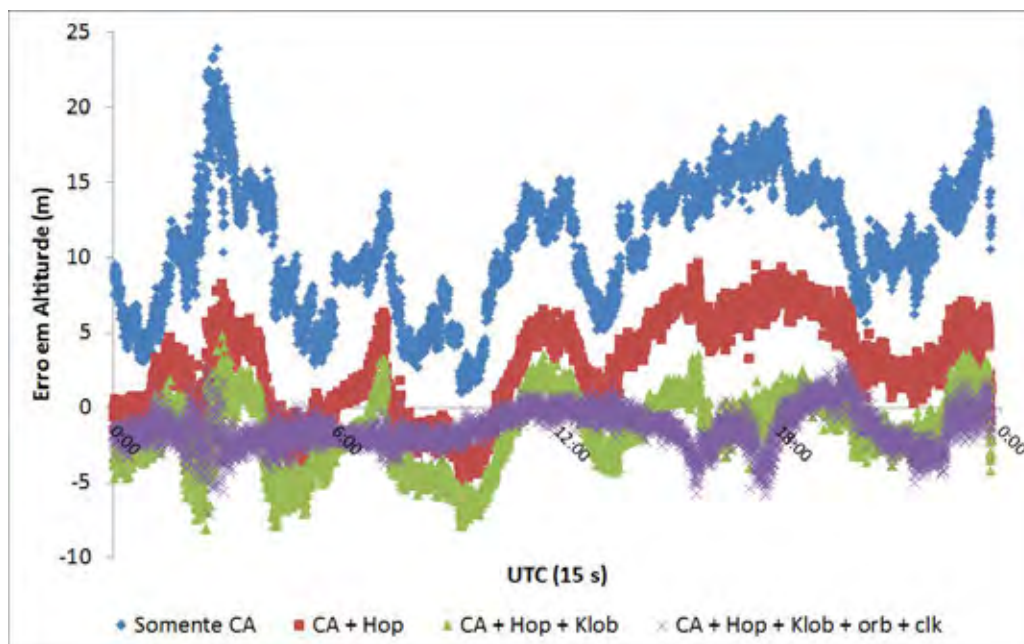


Figura 29 - Série temporal dos “erros” em altitude nos processamentos com código C/A

A média diária e desvio-padrão dos “erros” em altitude são mostrados na Tabela 9, juntamente com o EMQ. O valor de EMQ foi obtido através da resultante do erro médio (tendência) e do desvio-padrão (incerteza), o que representa uma medida de acurácia.

Tabela 9 - Estatísticas dos “erros” em altitude - PPP utilizando somente código (unidades de metros)

| | Somente C/A | C/A + Hop | C/A + Hop + Klob | C/A + Hop + Klob + sp3 + clk |
|----------------------|-------------|-----------|------------------|------------------------------|
| Erro médio | 10,890 | 2,638 | -1,484 | -1,417 |
| Desvio-padrão | 4,232 | 3,184 | 2,347 | 1,248 |
| EMQ | 11,683 | 4,135 | 2,777 | 1,888 |

Os valores EMQ em altitude como mostrados na Tabela 9 são da ordem do metro. É necessário considerar que o processamento foi realizado utilizando somente a observável C/A e modelagem da ionosfera e troposfera a partir de modelos matemáticos.

A partir da Figura 29 e da Tabela 9 nota-se os melhoramentos devido à aplicação das correções dos efeitos atmosféricos, de órbitas precisas e das correções precisas dos relógios dos satélites. Quando as correções não foram aplicadas (Somente C/A), o EMQ diário foi de 11,683 m, enquanto que com todas as correções, o EMQ diminuiu para 1,888 m.

8.1.2 PPP para dados de simples frequência utilizando código e fase

Considerando que estejam disponíveis dados de receptores de simples frequência com observações de código (C/A) e fase (L1), a ionosfera pode ser corrigida a partir do modelo de Klobuchar, de um mapa global da ionosfera (GIM) ou estimando a ionosfera conforme a modelagem descrita na seção 5.3. Assim, foram realizados processamentos PPP com o RT_PPP utilizando código e fase da L1 no modo estático levando em consideração as opções disponíveis para a correção da ionosfera. Neste caso, os dados processados foram os mesmos utilizados na seção anterior e se referem à estação BRAZ no dia 244 de 2009.

Os processamentos PPP foram realizados com máscara de elevação de 10° e aplicando todas as correções dos efeitos sistemáticos implementadas no RT_PPP (seção 7.1). As precisões adotadas para as observáveis foram de 0,6 m e 0,006 m, respectivamente, para o código C/A e fase na L1. Para o caso da estimativa da ionosfera, adotou-se a precisão de 100 m para a pseudo-observação ionosfera, o que quer dizer que pouca informação estocástica da pseudo-observação é conhecida. Os valores aproximados para estimar a ionosfera foram adotados a partir do modelo de Klobuchar em cada época. Os efeitos da troposfera foram estimados juntamente com os outros parâmetros.

A Figura 30 mostra a série temporal dos “erros” 3D (resultante dos “erros”) para cada um dos processamentos PPP com dados de simples frequência da estação BRAZ, no qual foram aplicadas as diferentes opções de correção da ionosfera:

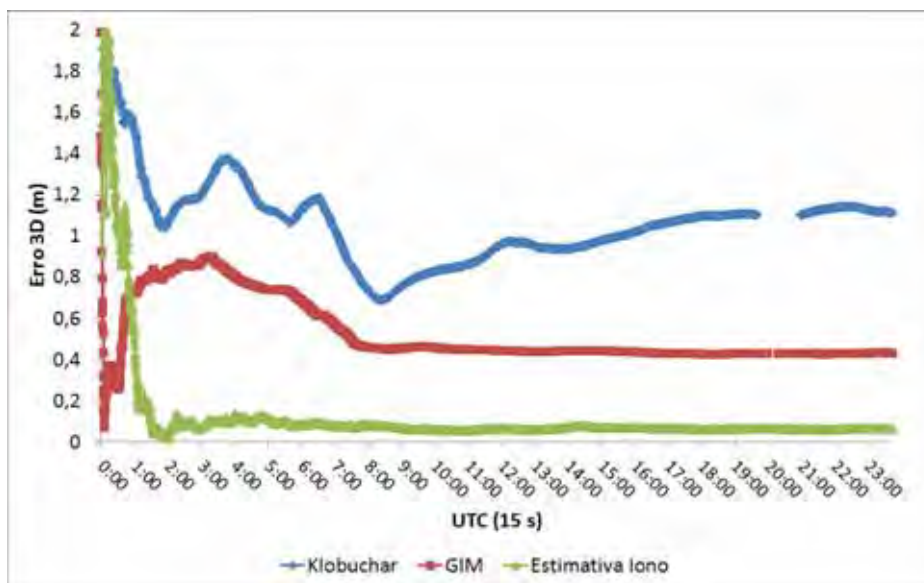


Figura 30 - Série temporal do erro 3D no PPP estático utilizando simples frequência (estação BRAZ - 2009)

Os “erros” 3D ao longo do dia utilizando o modelo de Klobuchar foram da ordem de 1 m (Figura 30). No caso do uso do GIM, os “erros” 3D alcançaram valores da ordem de 0,4 m após a estabilização dos resultados (convergência) no ajustamento, a qual foi de aproximadamente 6 horas. No caso da estimativa da ionosfera com adoção da pseudo-observação, a estabilização dos resultados foi de aproximadamente 2 horas e o erro 3D ao final do processamento foi da ordem de aproximadamente 0,06 m. A Tabela 10 mostra os “erros” no SGL, além dos “erros” 2D e 3D ao final do dia para o caso do PPP estático com dados de simples frequência:

Tabela 10 - Erros ao final do processamento estático PPP utilizando simples frequência

| | DE(m) | σ_{de} (m) | DN(m) | σ_{dn} (m) | DU(m) | σ_{du} (m) | Erro 2D(m) | Erro 3D(m) |
|--------------------|-------|-------------------|-------|-------------------|--------|-------------------|------------|------------|
| Klobuchar | 0,314 | 0,006 | 0,033 | 0,010 | -1,062 | 0,023 | 0,316 | 1,108 |
| GIM | 0,117 | 0,003 | 0,056 | 0,007 | 0,410 | 0,007 | 0,130 | 0,430 |
| Estima Iono | 0,046 | 0,006 | 0,022 | 0,018 | 0,038 | 0,034 | 0,051 | 0,064 |

As precisões das componentes no SGL ao usar a estimativa da ionosfera ficam pouco mais degradadas em relação ao uso do modelo de Klobuchar e do GIM, o que ocorre devido ao valor adotado da precisão da pseudo-observação que influencia o modelo estocástico. Porém, ao aplicar a estimativa da ionosfera, os “erros” 2D e 3D diminuem drasticamente em relação ao uso do modelo de Klobuchar e do GIM como pode ser visto na Tabela 10.

Os efeitos ionosféricos, estimados na direção receptor-satélites (inclinados), são apresentados na Figura 31:

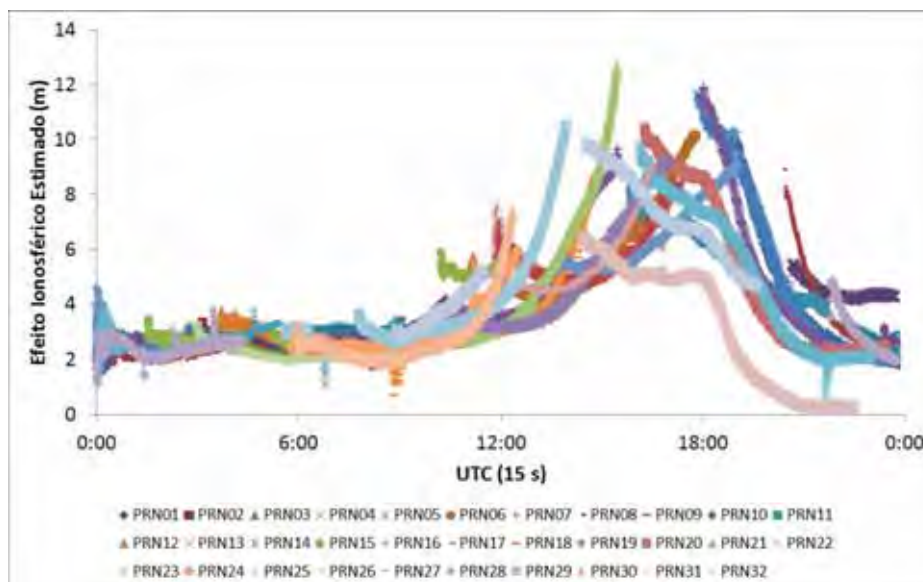


Figura 31 - Efeito ionosférico estimado no caso PPP utilizando simples frequência

No caso do PPP, quando não se aplica a correção dos atrasos de *hardware* do receptor ou dos satélites, esses são estimados juntamente com o parâmetro da correção do relógio do receptor. A estimativa da ionosfera também pode absorver esses atrasos, além de apresentar saltos na série temporal quando uma nova ambiguidade é inicializada (Figura 31). Dessa forma, pode-se dizer que na estratégia de estimativa da ionosfera no PPP estima-se o efeito residual da ionosfera, o qual é composto por outros efeitos não modelados.

O processamento PPP para a estação BRAZ com estimativa da ionosfera foi realizado para dados do ano de 2009, no qual a ionosfera está em período de baixa atividade. No caso, o índice Kp máximo durante o dia 244 de 2009 foi igual a 2. O índice Kp é um dos índices geomagnéticos que visam descrever em escala planetária a atividade geomagnética ou alguns de seus componentes (MATSUOKA, 2007).

Desta forma, foi realizado processamento PPP no modo estático com estimativa da ionosfera para dados coletados em período com maior atividade da ionosfera. Nesse caso, foram processados os dados da estação UEPP da RBMC no dia 08 de junho de 2003 (dia 159 de 2003), cuja distribuição do índice Kp ao longo do dia é mostrada na Figura 32:

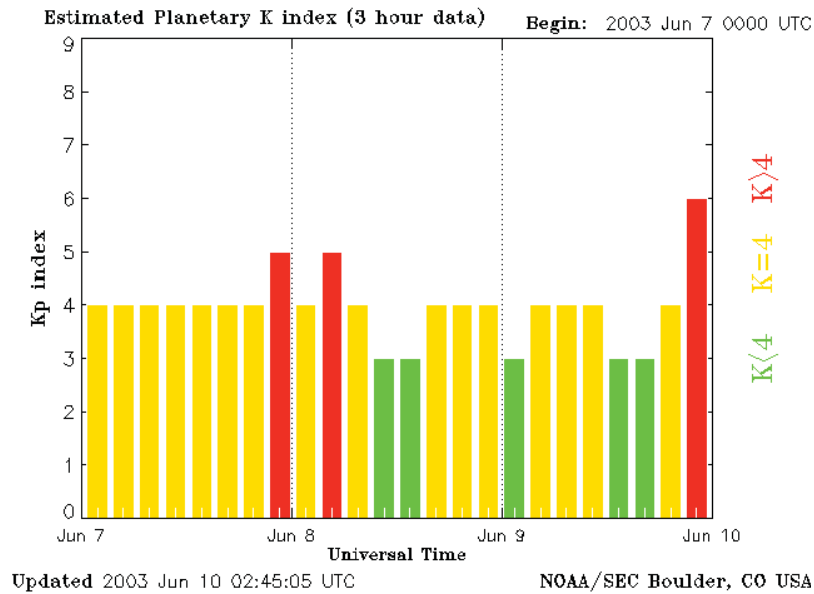


Figura 32 - Índices Kp e K para o dia 08/06/2003

No dia 159 de 2003 o índice Kp apresentou um pico máximo com valor igual a 5, o que indica forte atividade da ionosfera e, no geral, os valores ao longo do dia foram iguais a 4, de forma que a ionosfera pode ser classificada como ativa neste dia (MATSUOKA, 2007).

O PPP para os dados da estação UEPP foi realizado com as mesmas configurações que para os dados da estação BRAZ, ou seja, máscara de elevação de 10 graus e precisões de 0,6 m e 0,006 m adotadas, respectivamente, para as observáveis do código C/A e fase na L1.

A Figura 33 mostra a série temporal dos “erros” no SGL para o PPP no modo estático com estimativa da ionosfera para a estação UEPP no dia 159 de 2003. A série temporal do número de satélites envolvidos no processamento também é apresentada na Figura 33.

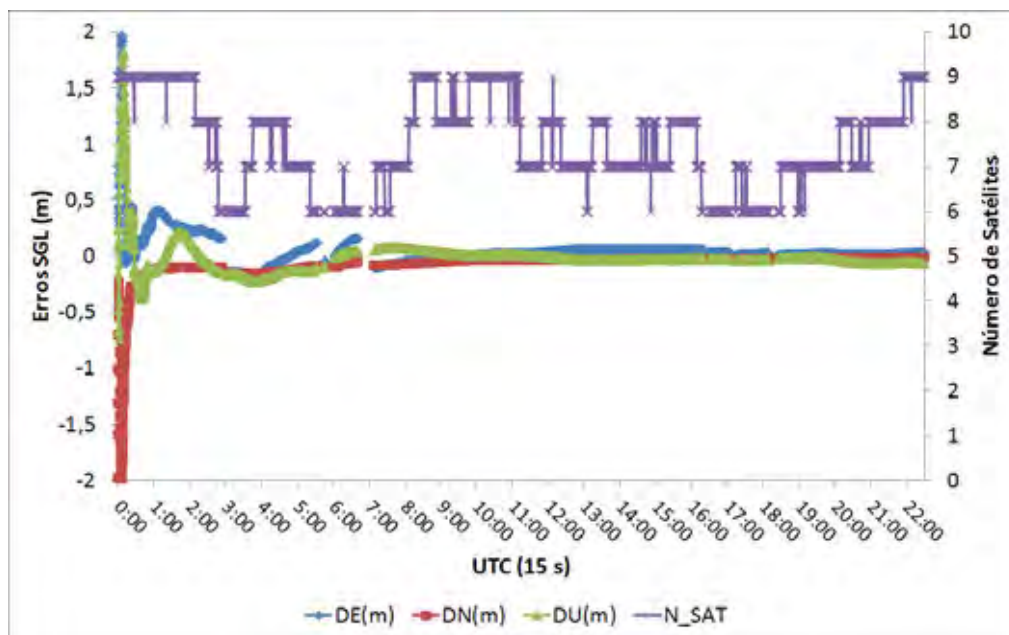


Figura 33 - Série temporal dos “erros” SGL no PPP estático utilizando simples frequência (estação UEPP 2003)

A convergência do PPP foi de aproximadamente duas horas de dados processados e no período das 3 às 7 horas do dia, a série temporal apresentou saltos, o que provavelmente ocorreu devido a problemas com a geometria, algo que pode ser confirmado pelo número disponível de satélites no processamento (Figura 33).

A Figura 34 mostra a série temporal das precisões das coordenadas estimadas, as quais foram propagadas para o SGL:

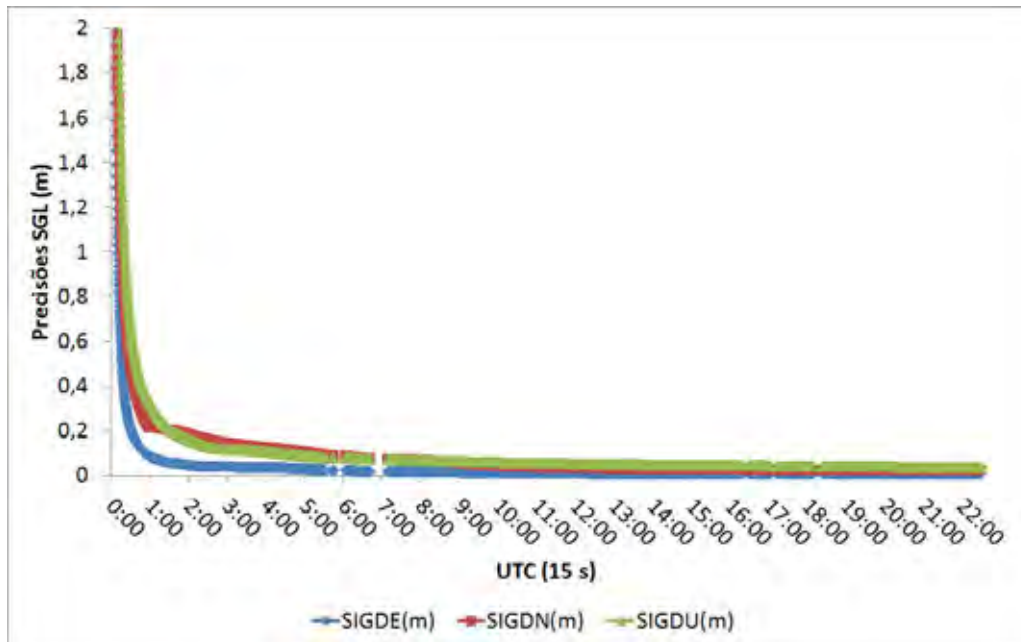


Figura 34 - Série temporal das precisões no SGL do PPP estático utilizando simples frequência (estação UEPP 2003)

As precisões no SGL atingiram a ordem de 0,20 m após aproximadamente 2 horas, porém, os valores ficaram estáveis após 7 horas de dados processados chegando ao final de 24 horas de processamento com valor de aproximadamente 0,03 m para a componente altimétrica (Figura 34).

A Tabela 11 apresenta os valores do EMQ ao final do processamento PPP para a estação UEPP. O EMQ nesse caso foi calculado em função do erro no SGL (tendência) e das incertezas propagadas para o SGL.

Tabela 11 - EMQ ao final do processamento PPP para a estação UEPP (2003)

| | DE (m) | DN (m) | DU (m) | Erro 2D (m) | Erro 3D (m) |
|------------|--------|--------|--------|-------------|-------------|
| EMQ | 0,035 | 0,032 | 0,073 | 0,047 | 0,086 |

O maior valor do EMQ nas componentes do SGL foi para a componente altimétrica com valor de 0,073 m e o EMQ resultante 2D e 3D foram, respectivamente de 0,047 e 0,086 m.

8.1.3 PPP para dados de dupla frequência

No caso de receptores de dupla frequência, uma opção para a correção ou eliminação dos efeitos ionosféricos é a utilização da combinação *ion-free* (3.3.1), contudo, a ionosfera também pode ser estimada com base em observações de duas ou mais frequências. O PPP em sua forma mais comumente aplicada consiste no uso da *ion-free* para dados de dupla frequência, além da estimativa da troposfera tratando-a como *random walk* e do tratamento de todos os outros efeitos sistemáticos como descritos na seção 3. Nas próximas seções serão apresentados os resultados obtidos com o RT_PPP no modo PPP estático e cinemático para dados de dupla frequência.

8.1.3.1 Modo estático

Antes da avaliação dos resultados em termos de coordenadas com o RT_PPP, foi realizada a análise dos modelos de troposfera disponíveis para aplicação no PPP. Nesse caso, o RT_PPP possui as seguintes opções de processamento: modelo de Hopfield com entrada da pressão e temperatura pela subrotina GPT (ZTD_Hopfield); modelo de PNT do CPTEC (ZTD_CPTEC) utilizando a função de mapeamento GMF; modelo de PNT europeu juntamente com a função de mapeamento VMF (ZTD_VMF_ECMWF) e estimativa da troposfera como *random walk* (ZTD_RTPPP).

Sendo assim, foi realizado o PPP no modo estático para a estação PPTE no dia 10 de fevereiro de 2008 utilizando as opções de correção da troposfera disponíveis no *software* RT_PPP. Além disto, os dados desta estação também foram processados no *software* de PPP do NRCAN (GPSPPP) e no *software* de PPP GIPSY (disponíveis na FCT/UNESP) objetivando verificar a compatibilidade dos valores do ZTD advindos de diferentes fontes para aplicações no PPP.

A Figura 35 mostra os valores do ZTD para a estação PPTE advindos do modelo de PNT do CPTEC ou do modelo europeu ou advindo das estimativas nos *softwares* GPSPPP, GIPSY e RT_PPP no PPP modo estático. Para o caso da estimativa da troposfera, adotou-se o valor de 0,005 m vezes a raiz da hora para a incerteza do ruído da troposfera, a qual é tratada como *random walk*. Além disto, o processamento foi realizado utilizando a combinação *ion-free*, com máscara de elevação de 10 graus e todas as correções necessárias para a realização do PPP.

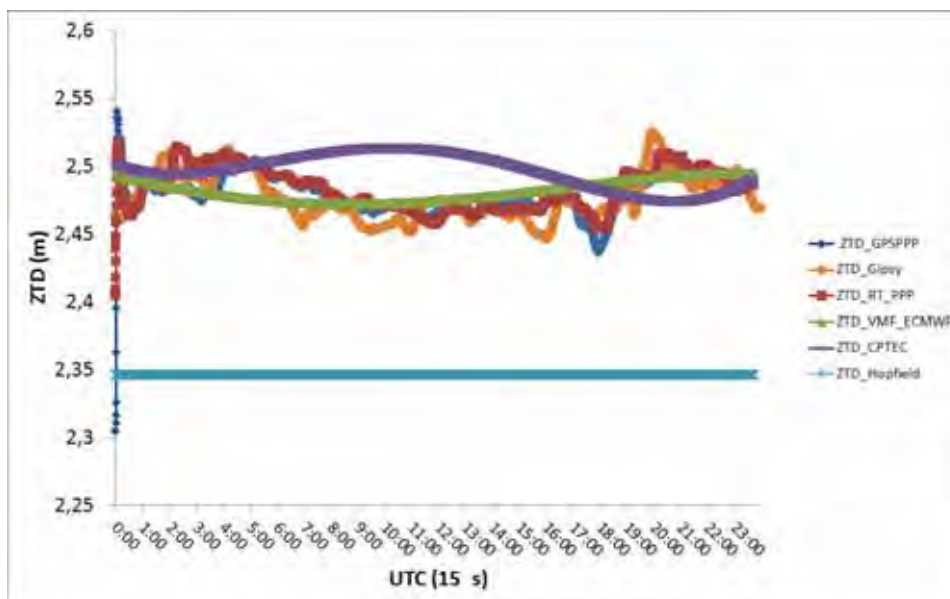


Figura 35 - ZTD advindos de modelos de PNT e estimados no PPP no modo estático (PPTE - 2008)

Na Figura 35, verifica-se que os valores do ZTD estimados pelos diferentes *softwares* (GPSPPP, GIPSY e RT_PPP) são muito semelhantes, sendo da ordem de 2,5 m, o que mostra que a estimativa do ZTD com o RT_PPP apresentou valores semelhantes aos *softwares* científicos GPSPPP e GIPSY de processamento PPP.

A série temporal dos valores de ZTD interpolados do modelo europeu (ECMWF) apresenta comportamento muito semelhante aos valores estimados.

A série temporal dos valores de ZTD do modelo do CPTEC apresentou comportamento semelhante aos valores estimados até próximo das 6 horas e se afastou alguns centímetros no período das 12 horas até próximo das 18 horas, se assemelhando novamente aos valores estimados ao final do processamento dos dados.

No caso do modelo de Hopfield os valores do ZTD variam muito pouco ao utilizar como entrada no modelo a pressão e temperatura do modelo GPT e a série temporal do ZTD fica distante da ordem de 0,20 m dos valores de ZTD estimados pelos *softwares*, o que é reflexo da variabilidade da componente úmida, cuja umidade relativa do ar que serve como entrada para o modelo de Hopfield é adotada como valor padrão de 50% e mantida como valor fixo durante todo o processamento (Figura 35).

Para avaliação dos resultados em termos de posicionamento, foram realizados processamentos PPP no modo estático para diversas estações distribuídas ao redor do mundo no dia 244 de 2009. A princípio analisaram-se os resultados para a estação BRAZ, sendo que as coordenadas estimadas foram comparadas com as coordenadas de referência da

estação fornecidas pelo IBGE. As coordenadas de referência disponibilizadas no sistema SIRGAS 2000 (época 2000,4) foram convertidas para o sistema ITRF 2005 (válido na época dos dados processados) e atualizadas para a época dos dados.

As precisões adotadas para as observáveis coletadas na estação BRAZ foram de 0,8; 1,0; 0,008 e 0,01 m, respectivamente para P1, P2, fase L1 e fase L2, considerando que estes valores são inseridos na equação de propagação das incertezas da combinação *ion-free* (seção 3.3.1). Na modelagem estocástica foi utilizada a função inversa do seno do ângulo de elevação do satélite e o processamento foi realizado considerando máscara de elevação de 10 graus. O processamento foi realizado considerando a combinação *ion-free* para eliminação da ionosfera. A incerteza do ruído para a estimativa da troposfera foi de 0,005 m vezes a raiz quadrada da hora.

A Figura 36 mostra a série temporal dos “erros” no SGL para o PPP no modo estático da estação BRAZ no dia 244 de 2009 e a Figura 37 mostra a série temporal das precisões propagadas para o SGL:

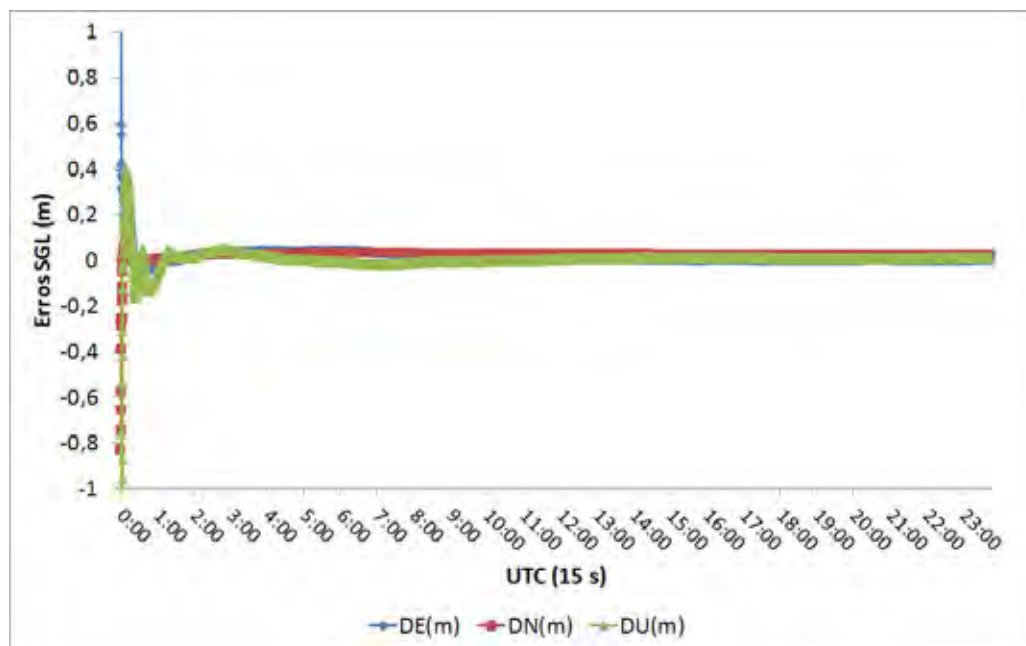


Figura 36 - Série temporal dos “erros” no SGL para o PPP no modo estático utilizando dupla frequência - (estação BRAZ - 2009)

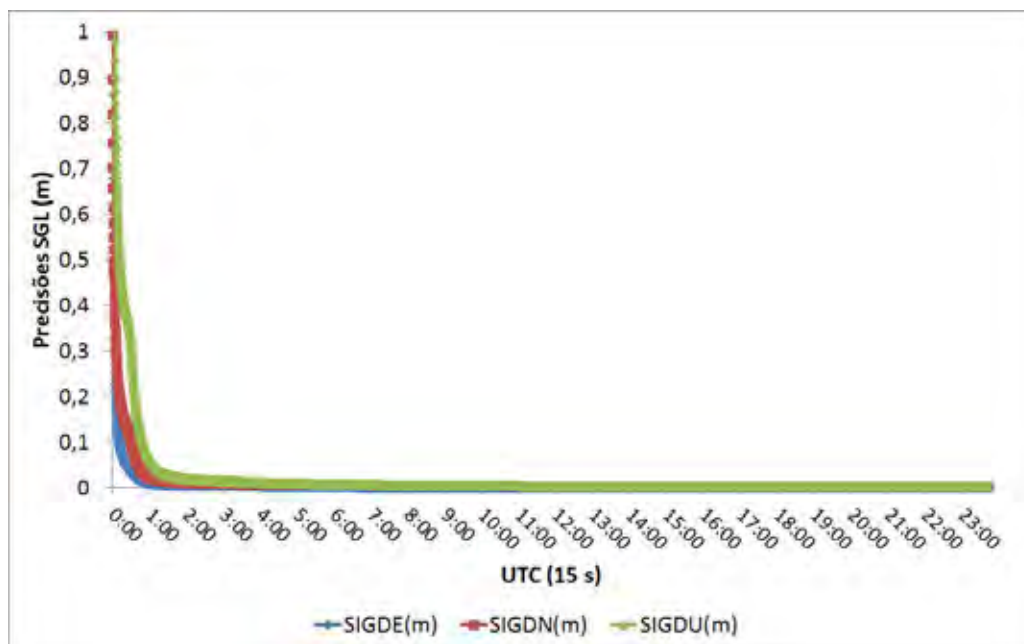


Figura 37 - Precisão da estimativa do PPP no modo estático utilizando dupla frequência (estação BRAZ - 2009)

Os “erros” no SGL para o PPP com dados de dupla frequência na estação BRAZ convergiram para valores da ordem de 10 cm e apresentaram estabilidade a partir de aproximadamente 1 hora (Figura 36). O tempo de convergência pode ser confirmado no gráfico da série temporal das precisões (Figura 37). A Tabela 12 mostra os “erros” no SGL e respectivas incertezas ao final do processamento PPP no modo estático para dados de dupla frequência:

Tabela 12 - Erros e incertezas ao final do processamento PPP no modo estático - BRAZ (dupla frequência)

| | DE(m) | σ DE(m) | DN(m) | σ DN(m) | DU(m) | σ DU(m) | Erro 2D(m) | Erro 3D(m) |
|-------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|------------|------------|
| BRAZ | 0,005 | 0,001 | 0,024 | 0,001 | 0,010 | 0,002 | 0,025 | 0,026 |

A convergência e estabilização da estimativa das coordenadas no PPP estão relacionadas com a solução das ambiguidades da fase. Considerando uma solução de PPP com poucas épocas, cuja precisão das ambiguidades solucionadas ainda não é de boa qualidade, a estimativa dos parâmetros é determinada principalmente pelo código. À medida que a solução das ambiguidades vai se estabilizando com a introdução de novas observações, a solução dos parâmetros passa a ser dominada pela fase cuja incerteza da medida é algo em torno de cem vezes melhor que a incerteza do código. Desta forma, a Figura 38 mostra os resíduos do código e da fase no PPP no modo estático. Note que a magnitude dos resíduos da fase é da ordem de cem vezes menor que a dos resíduos do código.

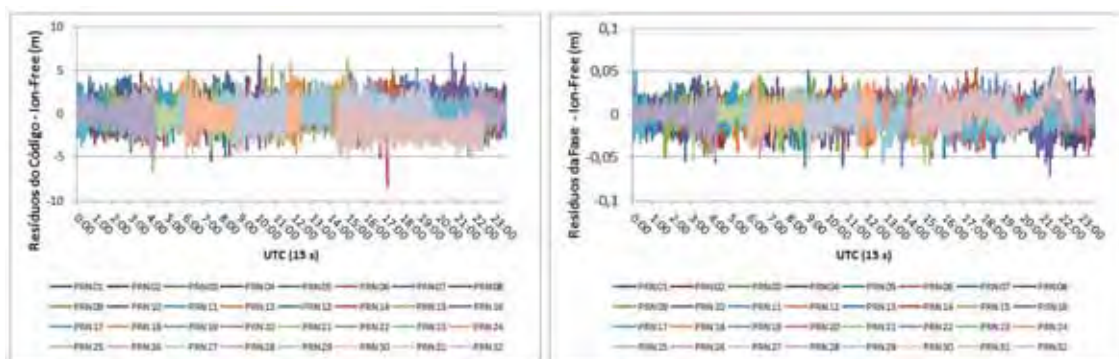


Figura 38 - Resíduos do código e da fase na solução PPP no modo estático utilizando dupla frequência

Uma forma de melhorar o tempo de convergência do processamento dos dados no PPP é a aplicação de métodos para a solução das ambiguidades com valores inteiros no PPP, o que é alvo de muitas investigações atualmente, seja no modo pós-processado ou em tempo real (LAURICHESSE, 2011; GENG et al., 2011).

O processamento de dados no PPP no modo estático utilizando a mesma configuração para a estação BRAZ também foi realizado para as estações PPTE, TOW2, POVE, ALGO, RECF e USUD. A localização aproximada destas estações é mostrada na Figura 39:

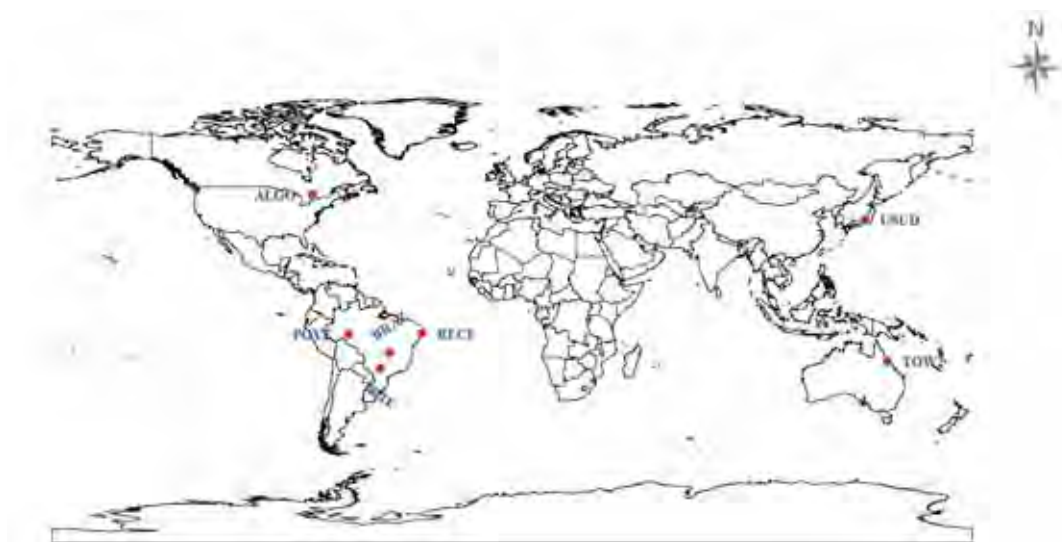


Figura 39 - Localização das estações com dados processados no PPP

Os “erros” 2D e 3D ao final do processamento dos dados no PPP modo estático são apresentados na Figura 40 para cada uma das estações:

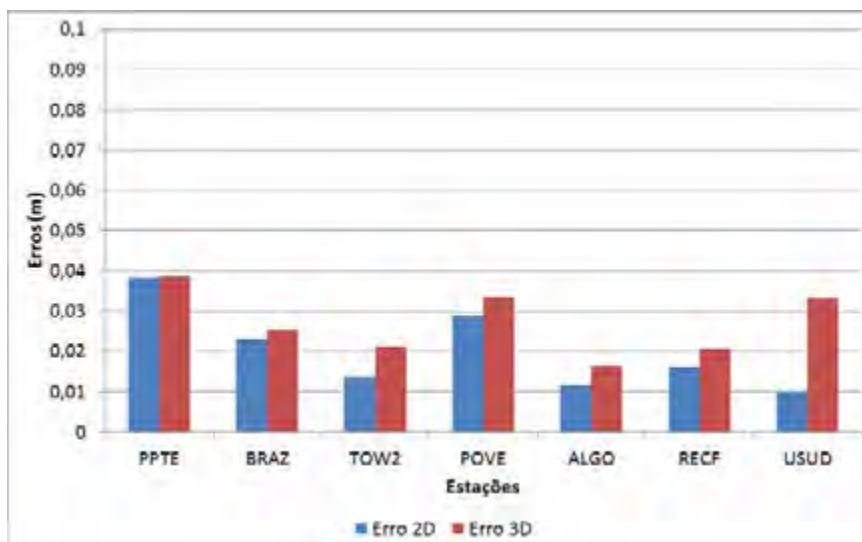


Figura 40 - Erros 2D e 3D ao final do processamento dos dados no modo PPP estático para diversas estações

Todos os “erros” ao final do processamento no modo PPP estático ficaram abaixo 0,04 m como mostrado na Figura 40.

8.1.3.2 Modo cinemático

Foram realizados processamentos PPP no modo cinemático considerando os dados das mesmas estações utilizadas na seção anterior. A estratégia de processamento no modo cinemático foi idêntica ao do caso estático (seção 8.1.3.1), ou seja, utilizando combinação *ion-free*, estimativa da troposfera, correção dos vários efeitos envolvidos com o sinal GPS, entre outros.

O caso cinemático envolve a estimativa de posições de um determinado objeto em movimento. No caso do PPP para estações da rede GNSS, supõe-se que estas estejam em movimento e se aplica a modelagem do Filtro de Kalman para o caso cinemático, o que permite obter os erros na estimativa do PPP cinemático. A Figura 41 mostra os “erros” no SGL para alguns dos processamentos gerados:

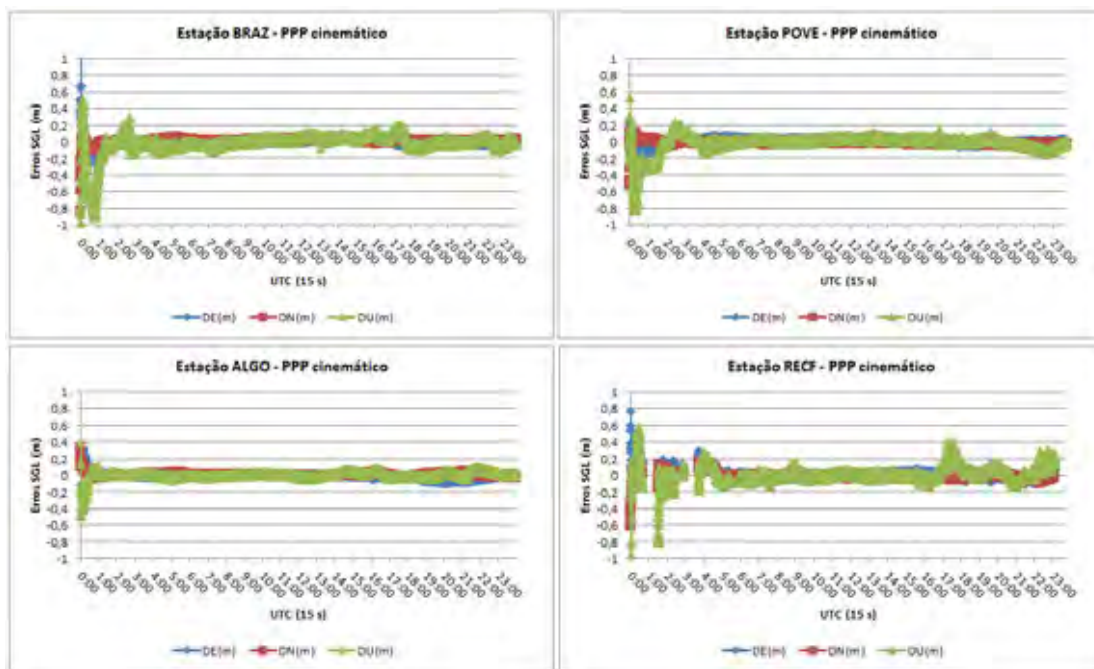


Figura 41 - Séries temporais dos “erros” no SGL para o PPP no modo cinemático

Como podem ser visualizados nas séries temporais mostradas na Figura 41, os “erros” no SGL, no geral, ficam abaixo de 0,20 m para cada uma das componentes (DE, DN e DU). A série da estação RECF apresentou alguns saltos devido a problemas de geometria em algumas épocas. A Tabela 13 apresenta o EMQ diário para cada uma das estações processadas no PPP no modo cinemático com o RT_PPP.

Tabela 13 - EMQ diário dos “erros” no SGL para o PPP cinemático

| | DE (m) | DN (m) | DU (m) |
|------|--------|--------|--------|
| PPTE | 0,043 | 0,044 | 0,106 |
| BRAZ | 0,051 | 0,036 | 0,127 |
| TOW2 | 0,029 | 0,021 | 0,097 |
| POVE | 0,041 | 0,026 | 0,109 |
| ALGO | 0,041 | 0,022 | 0,046 |
| RECF | 0,058 | 0,046 | 0,122 |
| USUD | 0,055 | 0,046 | 0,099 |

A componente mais afetada é a altimétrica com maior valor para a estação BRAZ, sendo de 0,127 m. No geral, o EMQ diário em altimetria para cada estação foi da ordem de 10 cm.

8.2 Análise da estimativa das correções dos relógios dos satélites

Nesta seção são apresentadas análises quantitativas e qualitativas da estimativa das correções dos relógios dos satélites GPS pelo *software* RT_SAT_CLOCK. Primeiramente, foi realizada a análise da estabilidade das correções dos relógios atômicos com base na equação de variância de Allan, a qual foi descrita na seção 2.3. Esta análise é útil nos experimentos para configuração dos valores dos ruídos a serem aplicados na etapa de predição do Filtro de Kalman para a estimativa das correções dos relógios dos satélites.

Após as análises de estabilidade dos relógios experimentos foram realizados com o *software* RT_SAT_CLOCK para estimar as correções dos relógios dos satélites GPS. Os dados da rede GNSS foram processados utilizando a pseudodistância suavizada pela fase estimando correções para os relógios dos receptores, dos satélites e a troposfera. Em seguida, os processamentos foram realizados com o código e fase (combinação *ion-free*) estimando além das correções de relógios, o atraso troposférico e as ambiguidades.

A próxima seção apresenta a análise do modelo de predição e da estabilidade das correções de relógios dos satélites a partir do método da variância de Allan.

8.2.1 Análise da estabilidade e do modelo de predição para as correções dos relógios dos satélites GPS

Nesta seção são apresentadas análises da estabilidade das correções dos relógios dos satélites utilizando a equação de variância de Allan, além da avaliação do modelo de predição a ser utilizado no Filtro de Kalman. Para a realização dos experimentos foi utilizado o aplicativo AllaVar (versão 5.0) disponível em http://www.alamath.com/index.php?option=com_content&task=view&id=12&Itemid=9 (Acesso em: fev. 2012). As correções dos relógios dos satélites analisadas foram obtidas a partir da solução final do IGS com taxa de dados de 30 segundos no dia 28 de setembro de 2011 (escolhido aleatoriamente). Também foram analisadas as correções de relógios atômicos vinculados a alguns receptores da rede IGS.

A partir do aplicativo AlaVar foi calculada a Potência de Densidade Espectral (PSD) para as correções dos relógios dos satélites GPS. A Figura 42 apresenta a série temporal da PSD para o satélite PRN03:

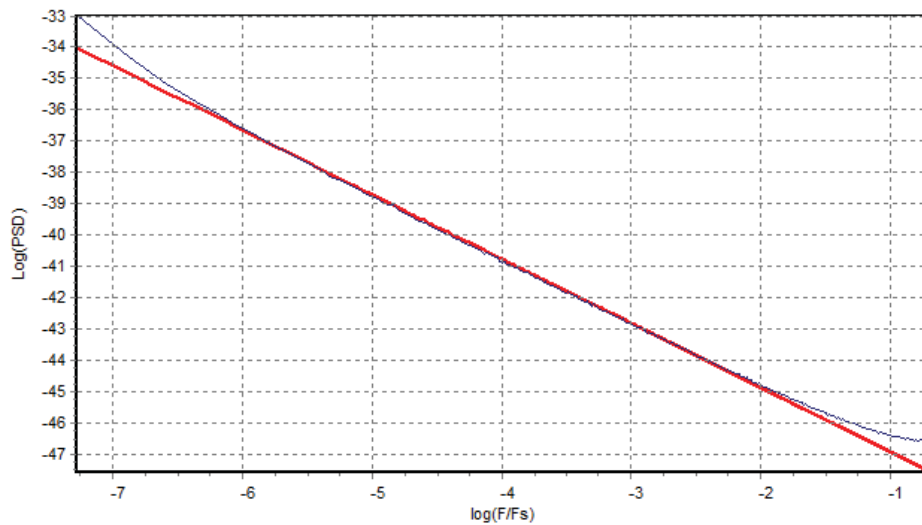


Figura 42 - Potência de Densidade Espectral da correção do relógio do satélite PRN03
Fonte: AlaVar 5.0

A PSD foi ajustada a um coeficiente α igual a -2,1. Esse coeficiente é o ângulo de inclinação do gráfico de log-log da PSD (ver Tabela 5, p. 59). Com base nos dados da Tabela 5, verifica-se que o espectro é muito próximo de *random walk*. O mesmo tipo de análise foi realizado para os outros satélites da constelação e todos apresentaram o mesmo comportamento.

A Variância de Allan Modificada foi calculada para os satélites da constelação GPS e também para os relógios das estações ALGO e YELL localizadas no Canadá e acopladas com relógios atômicos de maser de hidrogênio. A Figura 43 apresenta o gráfico na escala log-log com os satélites denominados por Blocos e por tipo de relógio:

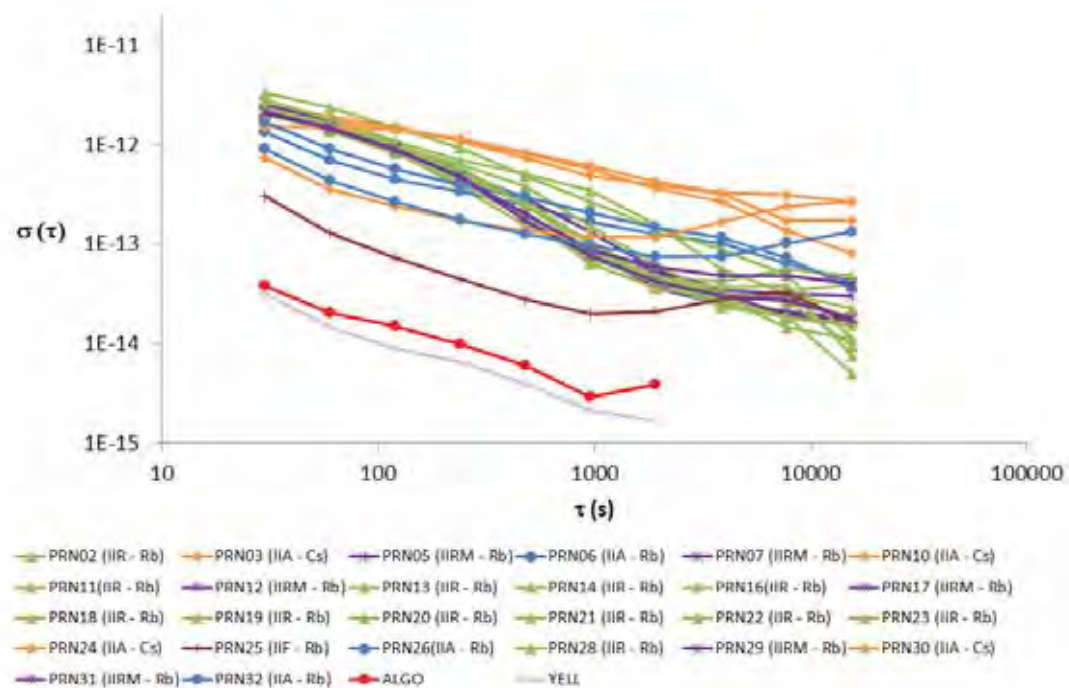


Figura 43 - Variância de Allan para os satélites da constelação GPS e para as estações ALGO e YELL.

Nota-se a partir da Figura 43 que, no geral, os relógios dos satélites apresentam comportamentos típicos para cada bloco. Até a faixa de 100 segundos, os valores da variância de Allan se mantêm estáveis e em seguida começam a decrescer. No caso dos satélites, o PRN25 do Bloco IIF apresenta os menores valores de Variância de Allan Modificada. No caso das estações (ALGO e YELL), verifica-se que os valores de Variância de Allan Modificada são menores que para os valores dos satélites e isto ocorre, provavelmente, devido aos relógios atômicos destas estações que são baseados em osciladores de maser de hidrogênio, enquanto que os relógios dos satélites são de césio e de rubídio.

Uma maneira de quantificar a estabilidade dos relógios é ajustar uma reta sobre a série dos valores de variância de Allan e obter o valor em que a reta cruza o eixo das ordenadas (valor de $\sigma(\tau)$ em $\tau = 1$). A Figura 44 apresenta a reta ajustada sobre os valores da variância de Allan para o satélite PRN02:

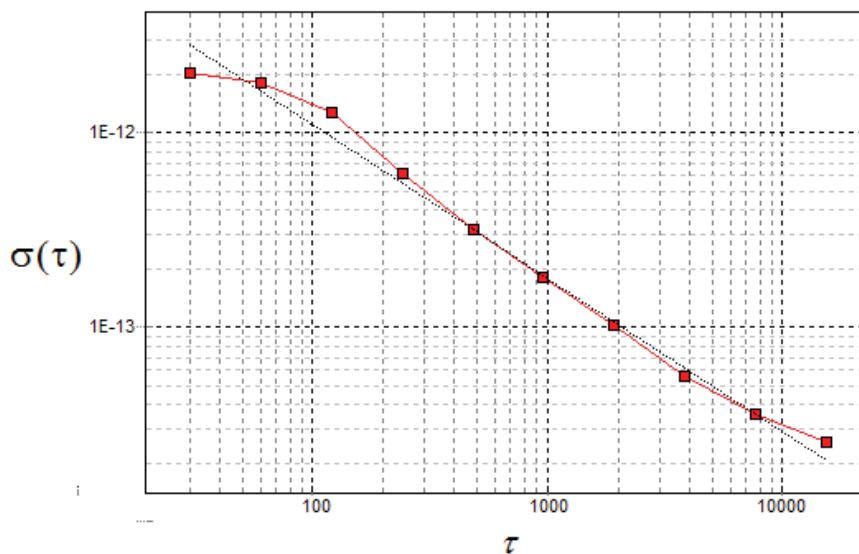


Figura 44 - Variância de Allan com a reta ajustada
Fonte: AlaVar 5.0

No caso do PRN02 o valor da estabilidade encontrada foi de $4,183 \cdot 10^{-11}$ s. Comportamento típico foi notado para os outros satélites da constelação mostrando que os relógios dos satélites GPS estimados pelo IGS apresentaram estabilidade da ordem $1 \cdot 10^{-11}$ s. A estabilidade do relógio do satélite PRN25 do Bloco IIF foi de $5,924 \cdot 10^{-12}$ s.

Análises foram realizadas com relação ao polinômio adequado a ser utilizado na etapa de predição do Filtro de Kalman. A Figura 45 mostra a série temporal dos “erros” dos relógios dos satélites do Bloco IIA, juntamente com a série temporal do polinômio ajustado como descrito na seção 6.3.

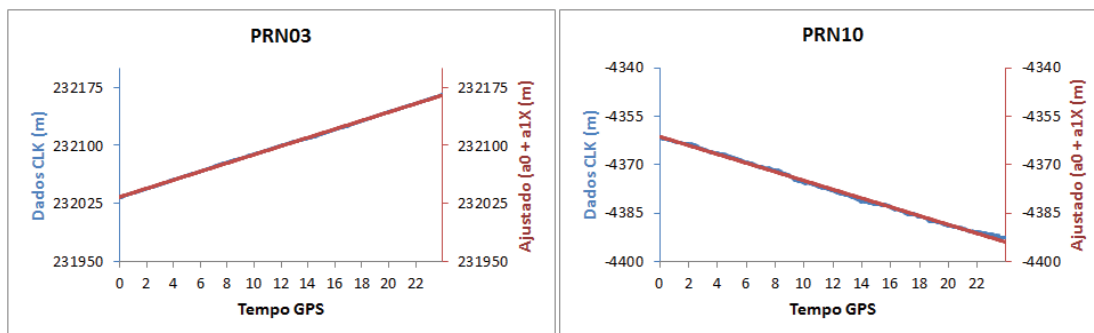


Figura 45 - Séries temporais dos “erros” dos relógios dos satélites PRN03 e PRN10 (Bloco IIA)

As séries temporais das correções dos relógios dos satélites PRN03 e PRN10 mostram que os valores ao longo do dia são muito próximos de uma reta como pode ser visualizado na Figura 45. As séries temporais das correções destes satélites foram

ajustadas a uma reta (modelo de regressão linear) e também a um polinômio de segunda ordem e os resíduos são apresentados na Figura 46:

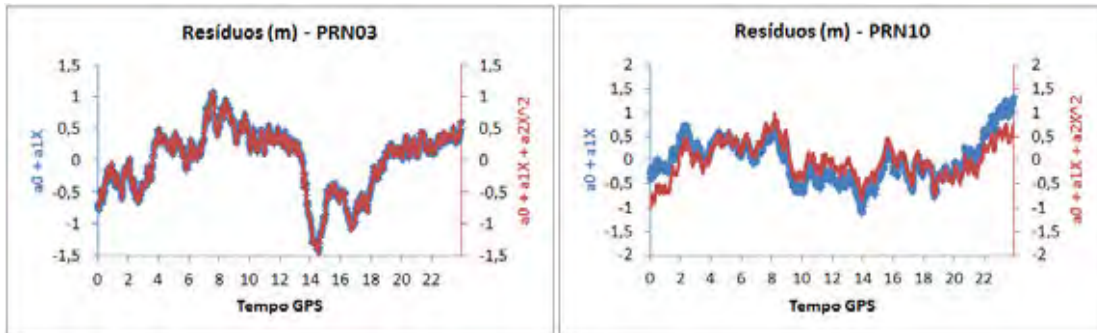


Figura 46 - Resíduos do ajustamento do polinômio à correção do relógio do satélite (Bloco IIA)

Para o caso do PRN03 os resíduos da reta (azul) e do polinômio (vermelho) apresentaram praticamente os mesmos valores. Para o PRN10, algumas diferenças podem ser notadas no caso dos resíduos das duas formas de ajuste, principalmente no início e no final do dia.

O mesmo procedimento foi realizado para os demais satélites da constelação GPS. A Figura 47 apresenta a série temporal das correções dos relógios dos satélites PRN11 e PRN12, respectivamente, pertencentes aos Blocos IIR e IIRM. Em seguida, na Figura 48, são apresentados os resíduos do ajuste polinomial.

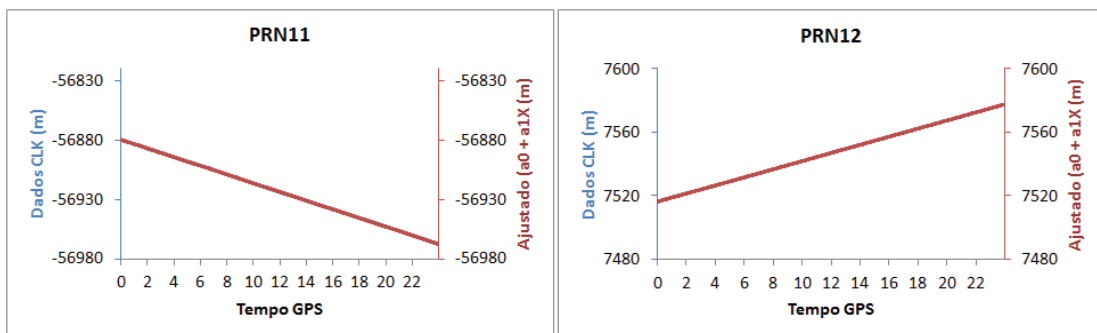


Figura 47 - Séries temporais dos “erros” dos relógios dos satélites PRN 11 e PRN12 (Blocos IIR e IIRM)

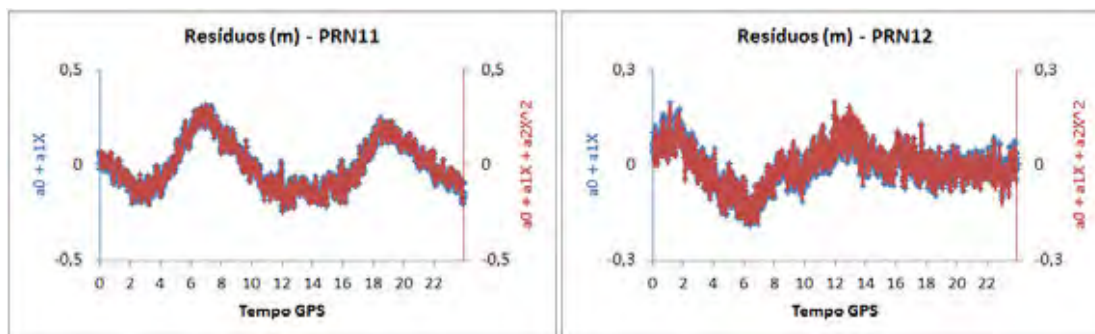


Figura 48 - Resíduos do ajustamento do polinômio à correção do relógio do satélite (Blocos IIR e IIRM)

Da mesma forma que para os satélites do Bloco IIA (Figura 45), as séries temporais das correções dos relógios dos satélites do Bloco IIR e IIRM (Figura 47) são muito semelhantes a uma reta. Os resíduos para os satélites PRN11 e PRN12 são semelhantes ao usar a reta ou o polinômio de segunda ordem.

Para cada satélite da constelação GPS, o coeficiente de correlação linear calculado apresentou valores acima 99%. Esse coeficiente mede o grau de relacionamento entre as variáveis, no caso, as correções dos relógios e a reta ajustada. Dessa forma, para o caso da previsão dos relógios atômicos dos satélites GPS, pode-se utilizar o modelo de uma reta. É necessário nesse caso, realizar a aplicação de incertezas dos ruídos na etapa de previsão do Filtro de Kalman para compensar os efeitos estocásticos e não modelados dos “erros” dos relógios dos satélites (ver seção 2.3).

8.2.2 Estimativa da correção do relógio do satélite com código suavizado pela fase

Nesta seção serão apresentados os resultados da estimativa das correções dos relógios dos satélites utilizando o *software* RT_SAT_CLOCK com base no uso da observável pseudodistância suavizada pela fase. Nesse caso, é possível estimar as correções dos relógios dos satélites e dos receptores, além dos efeitos de troposfera para cada estação. Este efeito também pode ser corrigido com base nos modelos disponíveis como apresentados na seção 3.3.2.

A suavização do código pela fase é realizada utilizando as medidas de dupla frequência e com base na combinação *ion-free*. A ambiguidade da fase é eliminada no processo de diferenciação entre consecutivas épocas. Ao ser detectado uma perda de ciclo, o processo de suavização é reiniciado, porém, a medida relacionada com o satélite que apresentou perda de ciclo fica fora do processamento por um período de aproximadamente 10

épocas até que o filtro de suavização apresente estabilidade na precisão. Este procedimento evita saltos na série temporal dos relógios, uma vez que o processo de filtragem do código pela fase inicialmente resulta no próprio código.

Foram realizados diversos experimentos empíricos (tentativa e erro) com o objetivo de verificar os valores adequados para o ruído do processo na etapa de predição do Filtro de Kalman considerando que o modelo de predição é calculado com base em um polinômio (seção 6.3). A correção do relógio apresenta comportamento típico de um processo *random walk* conforme descrito na seção 8.2.1. A precisão do processo é calculada como o produto da precisão (σ_0) pela raiz quadrada do tempo de correlação (τ) adotado. Desta forma, o Filtro de Kalman no RT_SAT_CLOCK foi aplicado para a estimativa das correções dos relógios utilizando as seguintes configurações (Tabela 14 e Tabela 15):

Tabela 14 - Ruído do processo

| Parâmetros | σ_0 | Tempo de correlação τ (s) |
|-------------------------------|-------------|--------------------------------|
| Offset do relógio do receptor | $1,10^{18}$ | |
| Offset do relógio do satélite | 0,03 | 600 |
| Troposfera | 0,005 | 3600 |
| Ambiguidade | 0 | |

Tabela 15 - Precisão das medidas

| Observável | σ (m) |
|---|--------------|
| P1 (Código) | 0,8 |
| P2 (Código) | 1,0 |
| PH1 (fase L1) | 0,008 |
| PH2 (fase L2) | 0,01 |
| Injunção da correção do relógio do satélite | 0,10 |

As precisões das medidas na Tabela 15 são utilizadas na forma de propagação para a combinação *ion-free* (seção 3.3.1). O tempo de correlação τ para o *offset* do relógio do satélite foi adotado com base no trabalho desenvolvido por Hauschild (2010). Os valores do vetor estado inicial são obtidos a partir da realização do MMQ inicial. Todos os processamentos foram realizados considerando máscara de elevação de 10 graus.

Devido ao grande número de parâmetros e a característica esparsa das matrizes envolvidas na estimativa das correções dos relógios dos satélites, o RT_SAT_CLOCK realiza o ajustamento utilizando matrizes de forma otimizada (seção 7.2). De qualquer maneira, o número de estações envolvidas no processo de estimativa das correções dos relógios é muito importante para o caso de solução em tempo real. É necessário atingir a precisão requerida e levar em consideração o tempo de processamento, uma vez que

depois de estimadas, as correções devem ser enviadas ao usuário que as utilizará no PPP em tempo real. A próxima seção apresenta uma análise da estrutura da rede GNSS para a estimativa das correções dos relógios dos satélites levando em consideração o tempo e a precisão em função do número de estações envolvidas no ajustamento.

8.2.2.1 Análise da estrutura da rede GNSS para a estimativa das correções dos relógios dos satélites

A modelagem matemática para a estimativa das correções dos relógios dos satélites GNSS foi apresentada na seção 6 e, no caso, é necessário a utilização de dados rastreados por uma rede de estações GNSS. O modelo matemático funcional é isento de geometria, uma vez que as coordenadas da rede devem ser conhecidas e o ajustamento envolve somente a estimativa das correções dos relógios dos satélites e receptores e de outros parâmetros.

Para a estimativa das correções pode-se fazer uso de uma rede de caráter local, como por exemplo, a rede GNSS do estado de São Paulo ou a rede disponibilizada pelo IBGE, ou pode-se utilizar uma rede global como a rede do IGS. A utilização de uma rede global apresenta cobertura abrangente para os satélites da constelação, permitindo a estimativa das correções dos relógios para todos os satélites em cada época. No caso do uso de uma rede local, a estimativa pode ser realizada para um número menor de satélites, dependendo da cobertura de satélites sobre essa rede. Logo, ao utilizar uma rede local, somente usuários pertencentes às localidades da rede poderão fazer uso da estimativa das correções dos relógios dos satélites em tempo real.

Cada receptor da rede rastreia em torno de 10 satélites GPS como pode ser visto na Figura 49, a qual mostra a visibilidade dos satélites na estação PPTE (Lat: -22°; Lon: -51°).

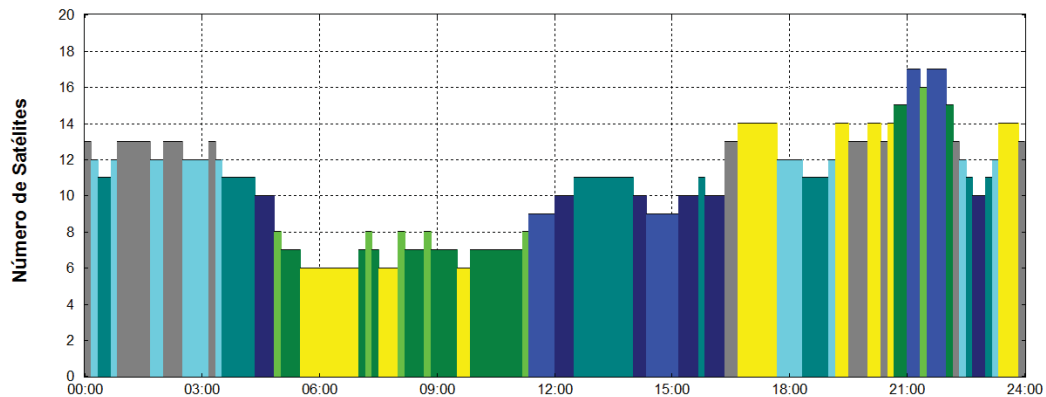


Figura 49 - Visibilidade dos satélites GPS na estação PPTE
 Fonte: Aplicativo Planning do *software* TGO (*Trimble Geomatics Office*)

A Figura 50 mostra o ângulo de elevação de cada satélite durante o dia 02 de dezembro de 2011. No caso, foram utilizados dados observados pelo receptor da estação PPTE disponíveis no arquivo RINEX do dia e os cálculos foram realizados com o *software* RT_PPP.

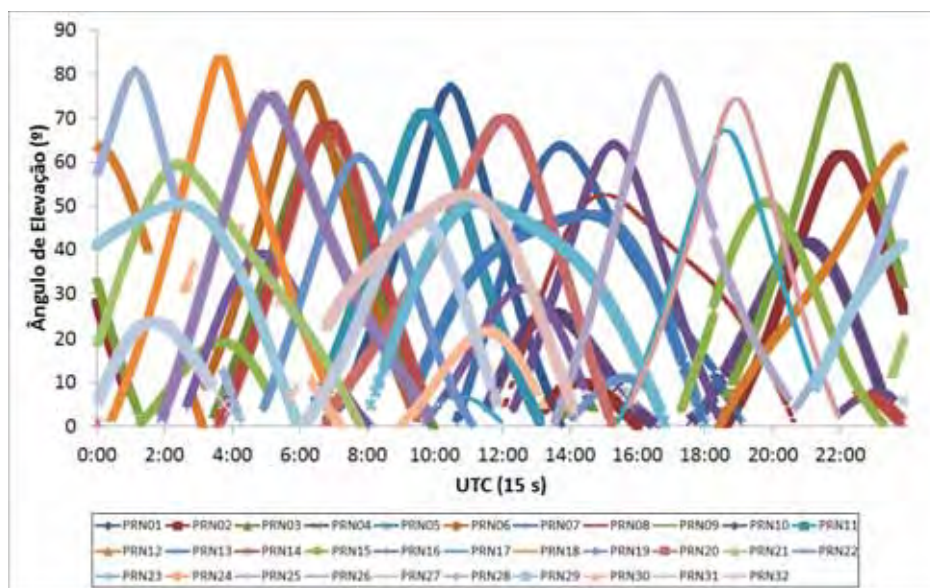


Figura 50 - Ângulo de elevação dos satélites na estação PPTE (02/12/2011)

Ao utilizar uma máscara de elevação de 10 graus na etapa de processamento dos dados, nota-se a partir da Figura 50 que estarão disponíveis dados de aproximadamente 8 a 10 satélites na estação PPTE. No caso, considerou-se somente a constelação GPS, porém, o uso de outras constelações, tais como a do GLONASS e GALILEO, pode fornecer um

número maior de satélites e, conseqüentemente, proporcionar melhorias na redundância de dados.

No trabalho desenvolvido nesta tese, a modelagem matemática utilizada é a do PPP em rede (seção 6.2) com maior enfoque na estimativa das correções dos relógios dos satélites utilizando uma rede global. Nesse caso, o número de estações envolvidas na etapa de estimativa é muito importante para o caso de tempo real, visto que no caso do PPP em rede utilizando o código e a fase e estimando as ambigüidades, uma grande quantidade de parâmetros está envolvida no processo. Os projetos atualmente envolvidos com o projeto piloto do IGS para tempo real utilizam em torno de 50 estações para estimativa das correções dos relógios dos satélites. No caso da solução final do IGS são utilizadas, atualmente, em torno de 120 estações com dados de uma a duas semanas.

Foram realizados experimentos para verificar a incerteza das correções dos relógios e o tempo de processamento em função do número de estações envolvidas. No primeiro experimento, escolheu-se um conjunto global de 20 estações e, em seguida, foram introduzidas novas estações formando um conjunto, respectivamente, de 30 e 40 estações. Os dados utilizados são do dia 60 de 2011 (escolhido aleatoriamente). A configuração considerando os conjuntos de estações utilizadas é apresentada na Figura 51:

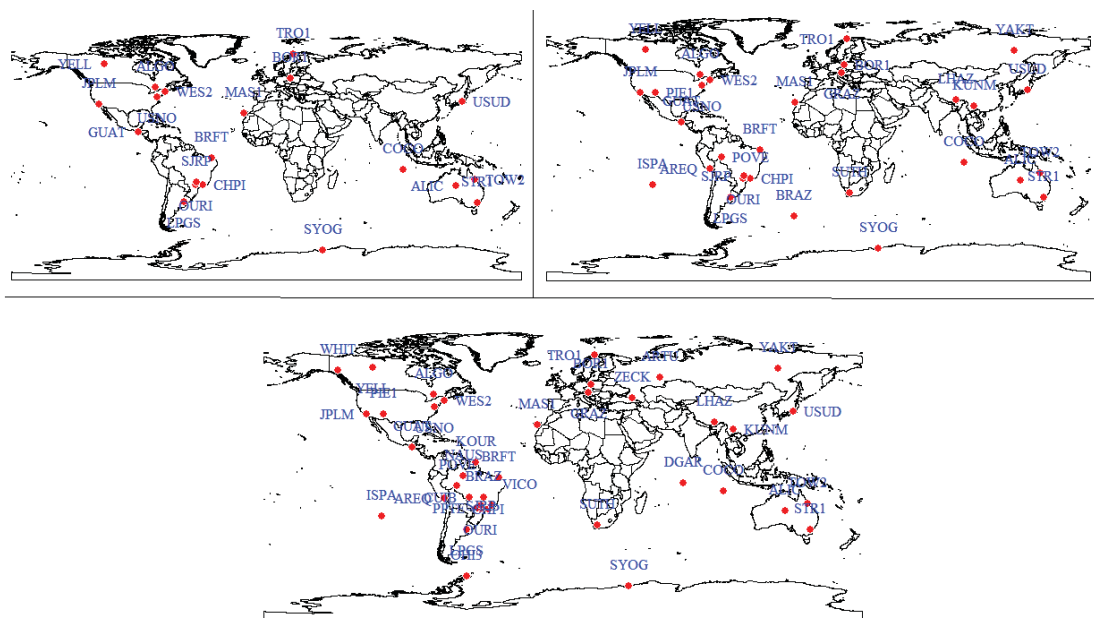


Figura 51- Configuração considerando 20, 30 e 40 estações ao redor do mundo

A estimativa das correções dos relógios dos receptores e dos satélites foi realizada com base na observável pseudodistância suavizada pela fase. O efeito da troposfera foi estimado juntamente com as correções de relógios. A injeção para a correção do relógio do satélite foi aplicada para o satélite PRN 31 (escolhido aleatoriamente).

Ao final dos processamentos, foi calculada a média diária da precisão das correções estimadas (precisão formal do ajustamento) para cada satélite considerando as soluções com 20, 30 e 40 estações, respectivamente. A precisão média diária para os diferentes tipos de soluções é apresentada na Figura 52:

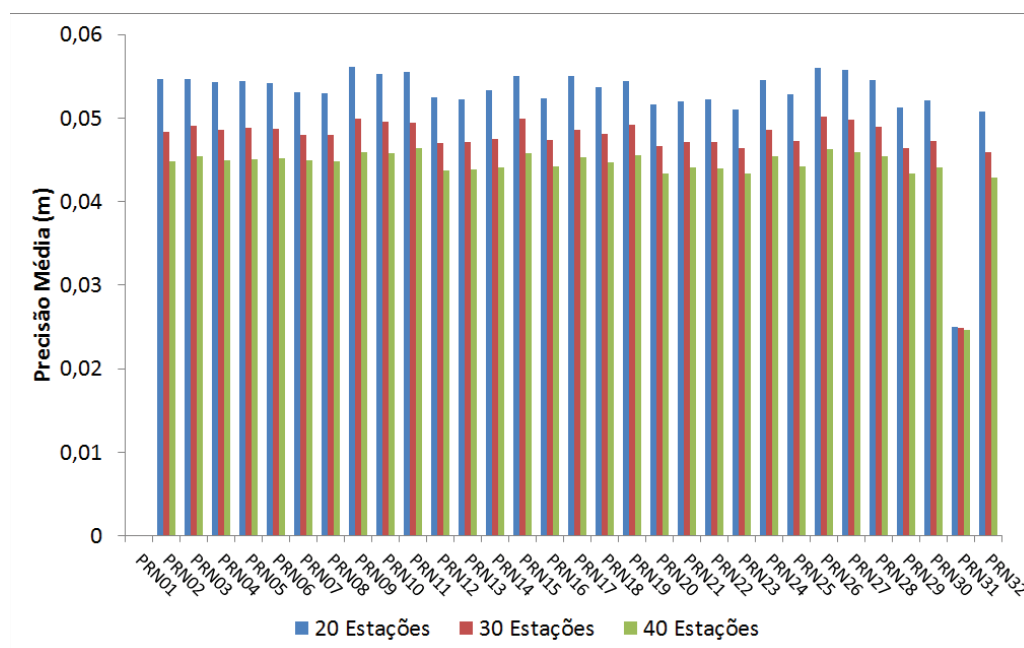


Figura 52 - Precisão média diária da correção do relógio para cada satélite (20, 30 e 40 estações)

A precisão média diária para cada satélite foi da ordem de 0,05 m considerando todos os processamentos (20, 30 e 40 estações) como pode ser visto na Figura 52. A Tabela 16 apresenta na primeira coluna o número de estações e na segunda coluna a média diária das precisões das correções dos relógios para toda a constelação de satélites. Na terceira coluna, tem-se a melhoria em termos percentuais ao utilizar 30 estações com relação ao uso de 20 estações e ao utilizar 40 estações com relação ao uso de 30 estações. Na última coluna pode ser visualizado o tempo (segundos) aproximado de processamento para cada época. Para o processamento dos dados foi utilizado um notebook com processador Intel Celeron 2,13 GHz (*Core 2 Duo*) e 2GB de memória RAM (*Random Access Memory*).

Tabela 16 - Informações relativas ao uso de diferentes configurações para a rede GNSS

| Número de estações | Precisão diária (Constelação) | Melhoria (%) | Tempo (s) de processamento (por Época) |
|--------------------|-------------------------------|--------------|--|
| 20 | 0,053 | - | 0,058 |
| 30 | 0,047 | 10,016 | 0,125 |
| 40 | 0,044 | 6,990 | 0,185 |

Na Tabela 16, verifica-se que ao inserir mais 10 estações formando um conjunto de 30 estações, a melhoria em termos de precisão foi de 10,016%. Ao formar um conjunto de 40 estações, o nível de melhoria em termos de precisão foi de 6,990% em relação ao uso de 30 estações. O tempo de processamento apresentou crescimento aproximadamente linear em função do número de estações.

É importante destacar que nesta seção os processamentos foram realizados utilizando a observável pseudodistância suavizada pela fase, a qual não envolve a estimativa das ambiguidades da fase. Ao considerar estimativa considerando as observáveis pseudodistância e fase, as ambiguidades são estimadas juntamente com os parâmetros de relógios dos receptores e dos satélites, o que apresenta um tempo maior de processamento por época.

8.2.2.2 Avaliação da estimativa das correções dos relógios

A estimativa das correções dos relógios dos satélites utilizando o código suavizado pela fase foi realizada para o dia 01 de setembro de 2009 (dia 244 de 2009). Foram utilizados dados de 40 estações distribuídas globalmente e adotou-se a estratégia de injuncionar a correção do relógio de um satélite, a qual foi inserida como uma pseudo-observação em cada época com precisão de 0,1 m. No caso, a injeção se deu para o satélite PRN 31, cujas correções são interpoladas em cada época a partir das efemérides IGU. O atraso troposférico foi estimado juntamente com as correções dos relógios dos receptores e dos satélites.

O processamento foi realizado simulando tempo real, sendo a troca de efemérides IGU realizada a cada 6 horas. A Figura 53 mostra a série temporal das correções estimadas, além da série das correções advindas da IGU e as finais do IGS para o satélite PRN 30:

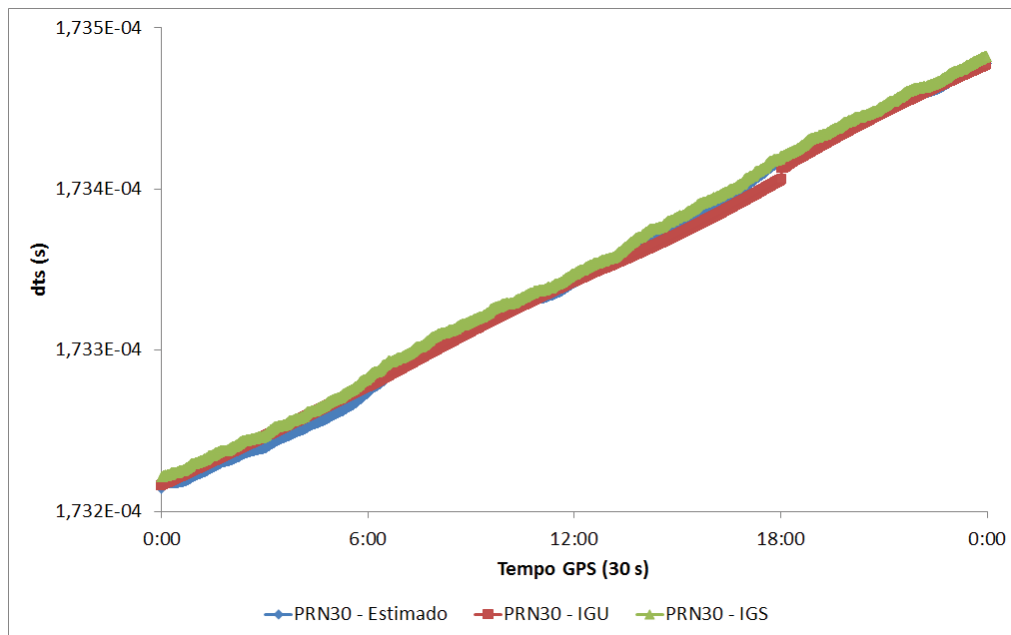


Figura 53 - Série temporal das correções estimadas dos relógios, das IGU e do IGS (PRN 30)

A série temporal da correção do relógio estimada (azul) apresenta comportamento semelhante à série da correção do relógio do IGS (verde). Pode-se observar na Figura 53 que descontinuidades ocorrem na série das correções advindas da IGU devido à troca de efemérides a cada 6 horas.

As correções estimadas apresentam uma tendência sistemática ao longo do dia em função da injeção adotada, no caso, as correções do satélite PRN 31 advindas da IGU. Então, se as correções estimadas forem comparadas diretamente com a solução final do IGS, tomando esta última como correções de referência, os valores dos “erros” das correções estimadas apresentarão o comportamento sistemático como mostrado na Figura 54:

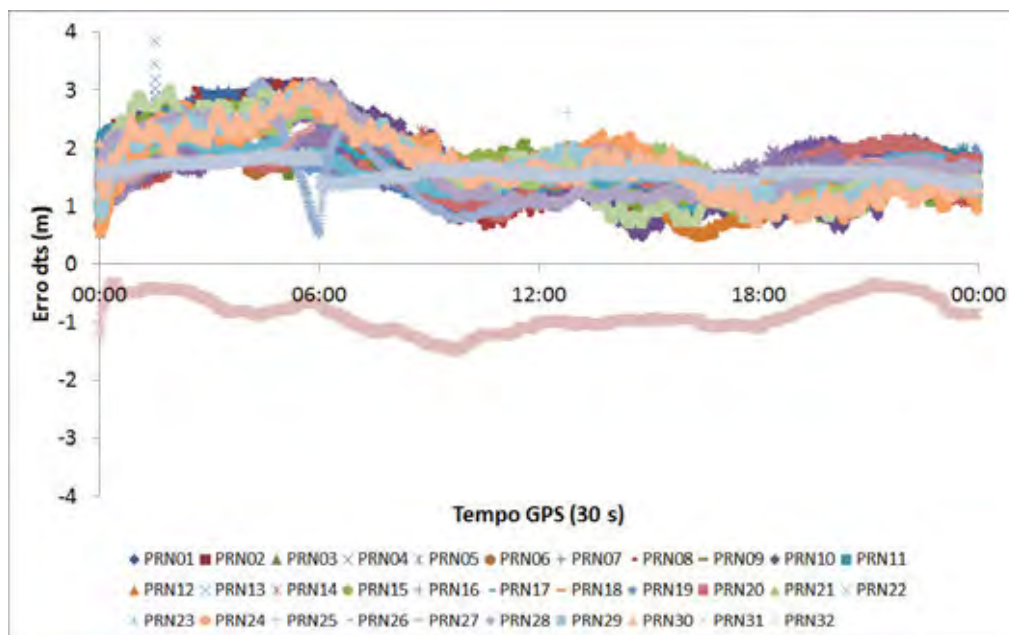


Figura 54 - Erros das correções estimadas sem remoção da tendência

Na Figura 54, é possível notar que, no geral, os valores dos “erros” na estimativa das correções dos relógios dos satélites ficam em torno dos valores dos “erros” do satélite PRN 31 que é de aproximadamente 1 m. Exceção ocorre para o satélite PRN 32 que apresentou comportamento oposto, com valores dos “erros” em torno de -1 m. O satélite PRN 32 pertence ao Bloco IIA e, atualmente, é o mais antigo da constelação com lançamento em 26 de novembro de 1990.

Ocorreu descontinuidade (salto) na série temporal do “erro” da correção estimada para o satélite PRN 25. Este satélite pertence atualmente ao Bloco IIF com lançamento em 28 de maio 2010, mas para os dados envolvidos no processamento em setembro de 2009 o satélite PRN 25 era um dos mais antigos da constelação, tendo sido lançado em 1992. Este satélite foi desativado em dezembro de 2009 (<ftp://tycho.usno.navy.mil/pub/gps/gpsb2.txt> - Acesso em: fev. de 2012). A descontinuidade começou em torno das 4 h e terminou às 6 h quando houve a troca de efemérides IGU.

Ocorreram também saltos na série temporal para o PRN 13 próximo à 1 hora, porém, rapidamente os valores das correções deste satélite se estabilizaram. Esse tipo de descontinuidade ou saltos pode ocorrer, uma vez que as correções dos relógios dos satélites apresentam forte correlação com as correções dos relógios dos receptores e também com a troposfera. De qualquer forma, a descontinuidade não afeta a estimativa de coordenadas no PPP porque os efeitos serão absorvidos, principalmente, pela correção do relógio do receptor

estimada juntamente com as coordenadas no processamento dos dados no modo PPP. Uma forma de remover esse tipo de descontinuidade é apresentada por Hauschild (2010). A série temporal da correção estimada para o satélite PRN 25 é apresentada na Figura 55 juntamente com a correção final do IGS:

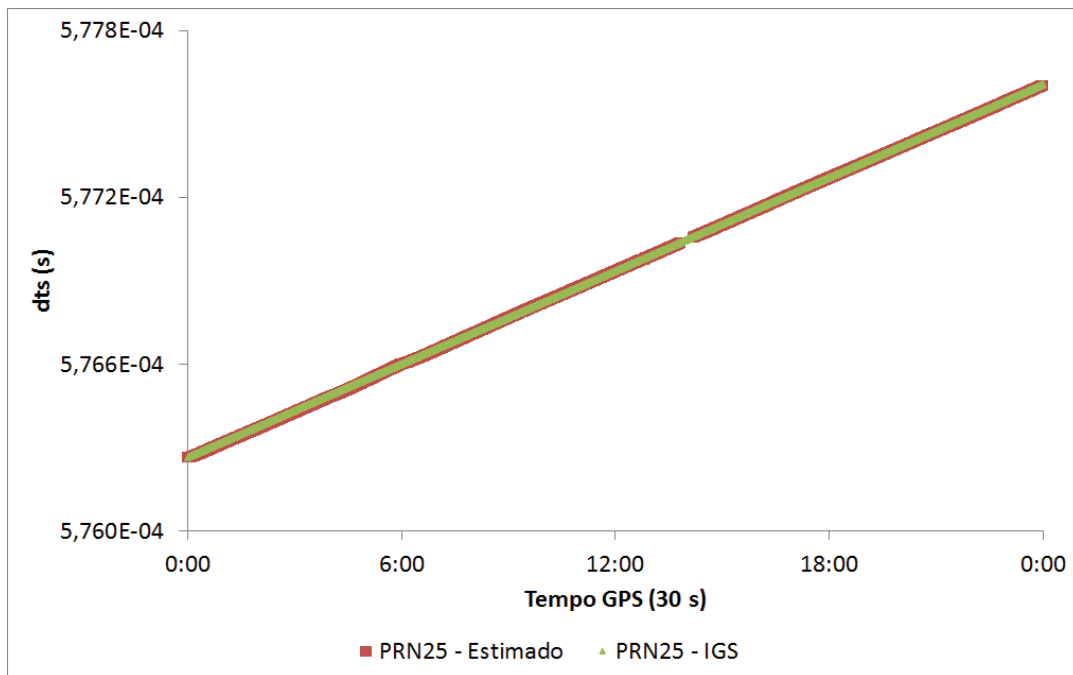
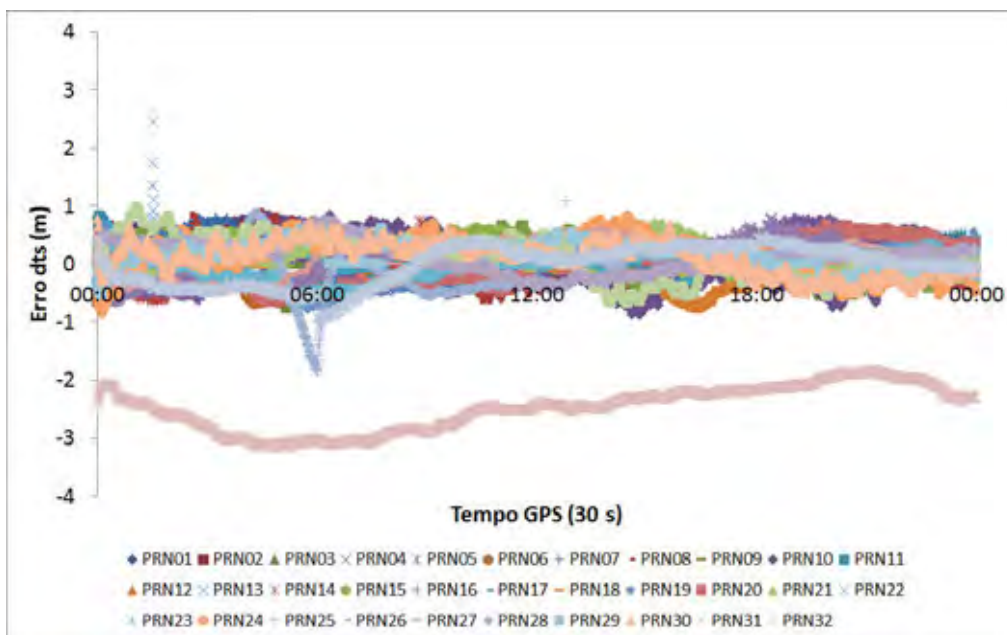
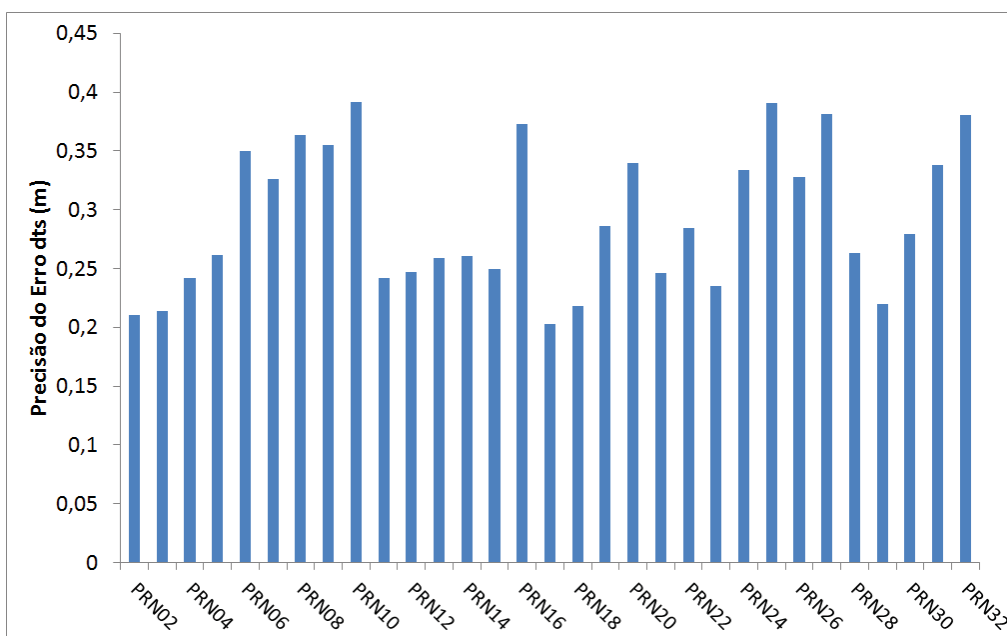


Figura 55 - Série temporal das correções estimadas dos relógios e do IGS (PRN 25)

O comportamento sistemático em função da introdução da injunção como mostrado na Figura 54 pode ser removido fazendo remoção de tendência da série temporal. Essa remoção da tendência é realizada subtraindo a média dos “erros” das correções de toda a constelação em cada época, ou seja, para cada época calcula-se a média dos “erros” das correções de todos os satélites e subtrai-se dos “erros” da correção estimada para cada satélite. A Figura 56 apresenta os “erros” das correções estimadas em relação às correções do IGS com a tendência em função da introdução da injunção removida:



Com base nos valores dos “erros” com a tendência removida foi calculado o desvio-padrão amostral diário do “erro” do dts estimado para cada satélite, os quais podem ser vistos na Figura 57:



O máximo valor do desvio-padrão diário do “erro” dts estimado em relação à correção do IGS foi para o satélite PRN 14 com valor de 0,391 m. Este satélite pertence ao Bloco IIA, transporta relógio atômico de césio e foi lançado em 16 de julho de 1996 (ver Tabela 2, p. 49). O satélite que apresentou o mínimo desvio-padrão foi o PRN 17(Bloco IIR) com valor de 0,203 m. No geral, o valor de desvio-padrão é da ordem de aproximadamente 0,25 m, o que representa aproximadamente 0,8 ns e, comparando com a acurácia divulgada do erro do relógio da IGS (3 ns), verifica-se uma melhoria de aproximadamente 27%.

A injunção relativa na estimativa das correções dos relógios dos satélites foi para a correção do satélite PRN 31. Porém, a injunção pode ser realizada de outras formas, como por exemplo, a injunção para a correção do relógio de um receptor da rede. Neste caso, pode-se escolher um receptor que esteja conectado com um relógio atômico. Considerando este caso, foi realizado o processamento considerando as 40 estações GNSS com injunção para a estação ALGO localizada no Canadá.

O valor inicial da correção do relógio do receptor (dt_r) foi obtido a partir das medidas de pseudodistância observadas pelo receptor na estação ALGO. Para isto, dt_r é isolado na equação de pseudodistância e calculado como uma média de todas as pseudodistâncias observadas, as quais podem ser corrigidas de diversos efeitos sistemáticos, tais como troposfera, efeitos de relatividade entre outros. O dt_r da estação ALGO foi então injuncionado na forma de pseudo-observação com uma precisão de 0,5 m, a qual foi obtida após diversos experimentos empíricos. A predição para o relógio do receptor foi realizada com base na equação da reta. Na etapa de atualização da MVC do vetor estado o dt_r é tratado como *white noise*. A Figura 58 mostra os valores estimados para a correção do relógio do receptor na estação ALGO:

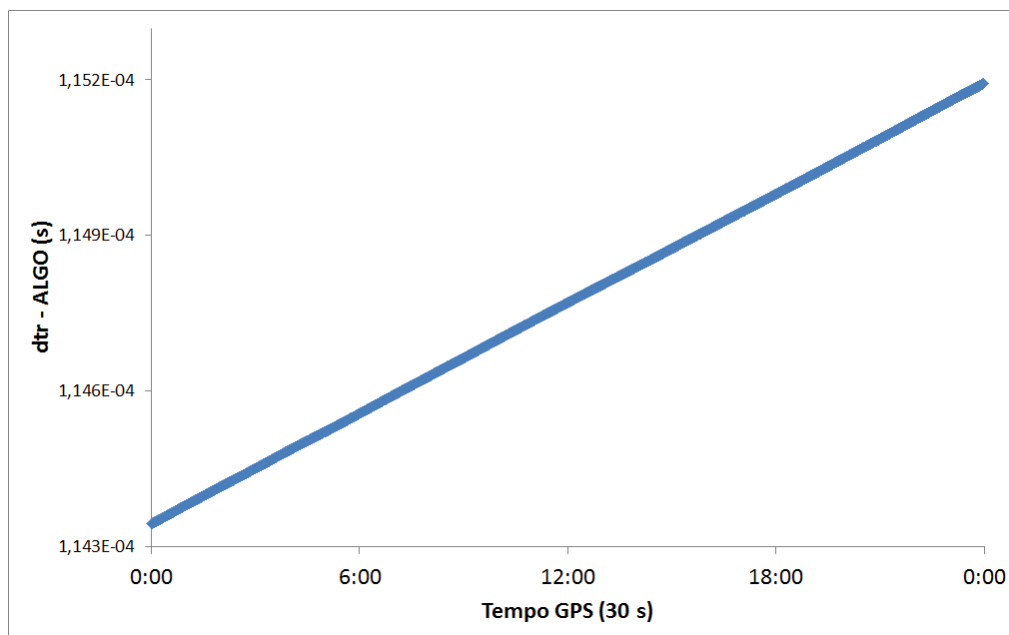


Figura 58 - Correção estimada do relógio do receptor da estação ALGO

As correções estimadas para os satélites GPS foram comparadas diretamente com a solução final do IGS sem remover a tendência. A Figura 59 mostra a série temporal dos “erros” relacionados com a estimativa das correções dos satélites:

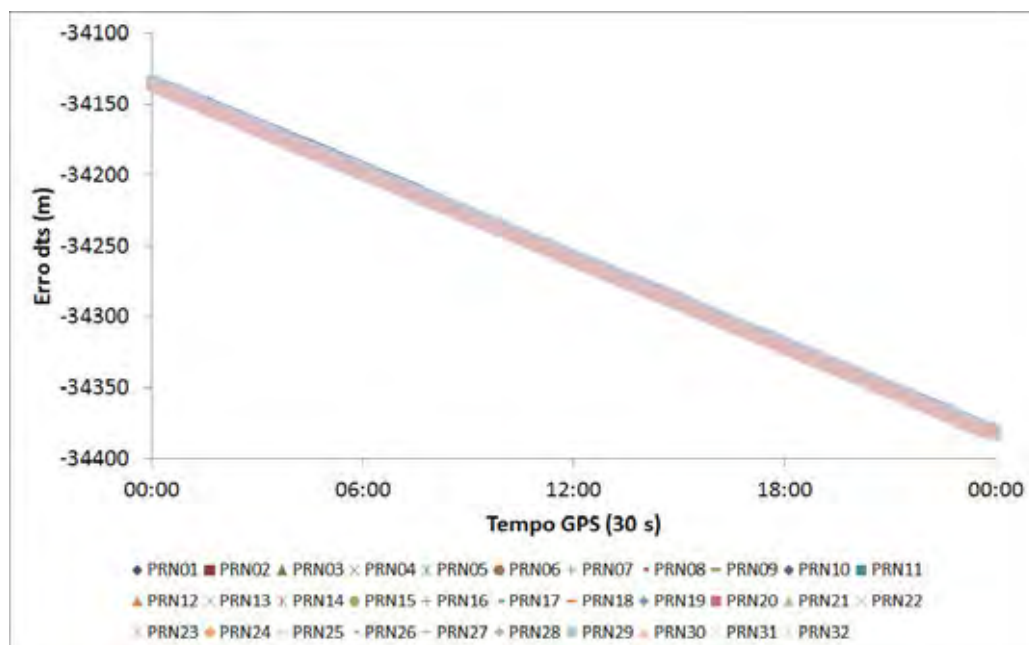


Figura 59 - “Erros” das correções estimadas sem remoção da tendência (injunção: ALGO)

A remoção da tendência foi realizada subtraindo em cada época a média dos “erros” da correção para todos os satélites da constelação. A Figura 60 mostra os “erros” das correções dos relógios dos satélites com a tendência em função da injeção do relógio da estação ALGO removida:

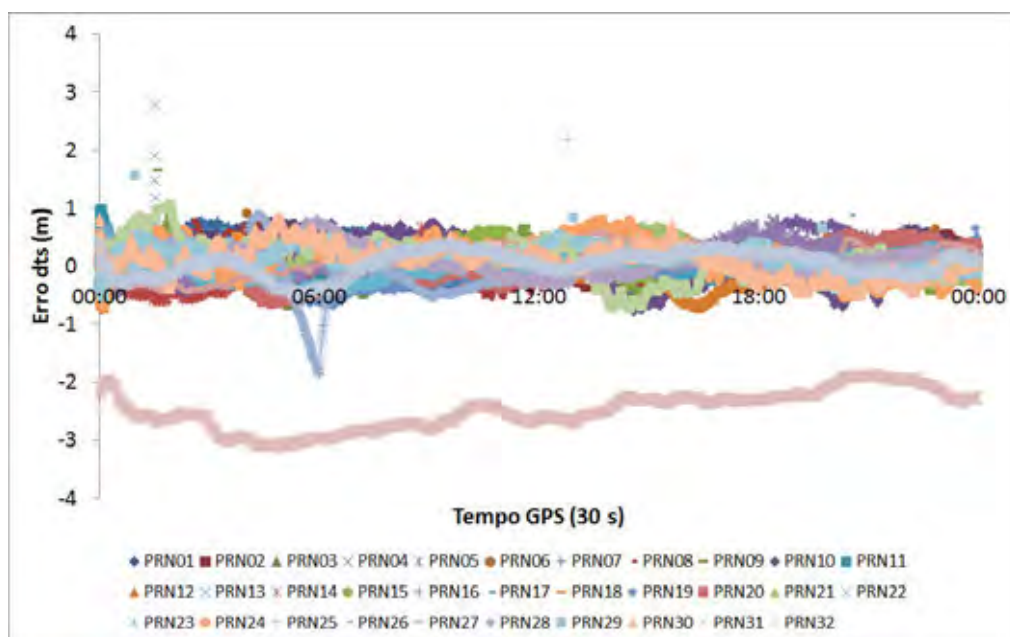


Figura 60 - Erros das correções estimadas com a tendência removida (injeção: ALGO)

Os “erros” apresentados na Figura 60, gerados com base na solução com injeção do erro do relógio da estação ALGO, são semelhantes aos apresentados na Figura 56 com injeção para o PRN 31. O desvio-padrão diário do “erro” dts em relação à correção do IGS é muito semelhante sendo o máximo para o PRN 25 com valor de 0,37 e o mínimo para o PRN 17 com valor 0,178 m.

A estimativa com o código suavizado foi realizada em princípio estimando os valores da troposfera juntamente com os valores das correções de relógios dos receptores e dos satélites. Dessa forma, a Figura 61 mostra os valores estimados do atraso troposférico zenital (ZTD) para cada estação:

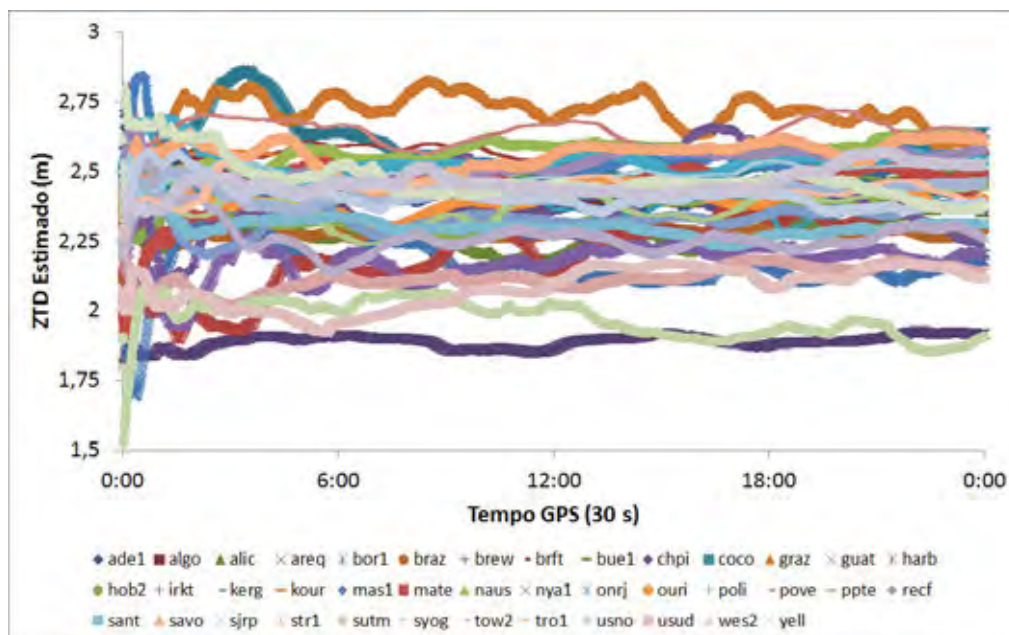


Figura 61 - Valores estimados do ZTD para cada estação (solução com código suavizado pela fase)

A estimativa das correções dos relógios dos satélites também pode ser realizada utilizando os valores de ZTD advindos de modelos, tal como o modelo europeu (ECMWF), o qual é disponibilizado juntamente com os valores da função de mapeamento VMF (ver seção 3.3.2.2). Desta forma, o processamento foi realizado considerando esta estratégia. A Figura 62 mostra os valores do ZTD interpolados do modelo ECMWF no processamento para a estimativa das correções dos relógios dos satélites pelo *software* RT_SAT_CLOCK:

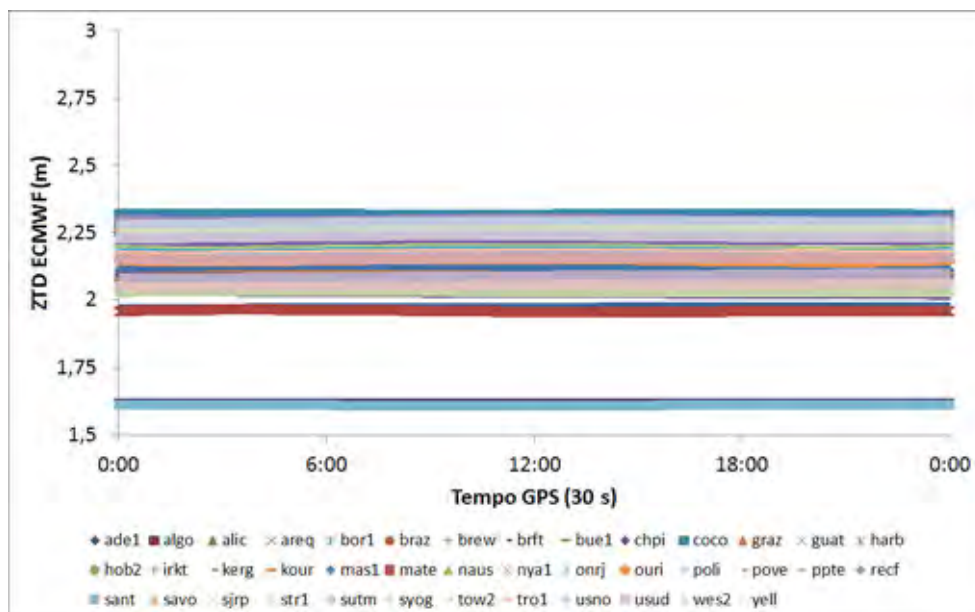


Figura 62 - Valores do ZTD advindos do modelo europeu (solução com código suavizado pela fase)

Os valores de ZTD advindo do modelo europeu (Figura 62) se apresentam estáveis durante o dia se comparados com os valores estimados de ZTD (Figura 61). Uma explicação é a forte correlação que existe entre os valores do erro do relógio do receptor (tratado como *white noise*) e a troposfera no caso da estimativa deste parâmetro.

Em termos de resultados para as correções dos relógios dos satélites, não se nota grandes diferenças ao estimar a troposfera ou utilizar o ZTD advindo do modelo de PNT. Ao utilizar a correção de troposfera do modelo ECMWF juntamente com a VMF, o máximo desvio-padrão do “erro” dts com relação à correção do IGS foi para o satélite PRN 25 com valor de 0,378 m e o mínimo para o satélite PRN 03 com valor de 0,175 m.

É importante ressaltar que a utilização do modelo de troposfera ao invés da estimativa desta componente permite a diminuição do número de parâmetros incógnitos, sendo estimadas somente as correções dos relógios dos receptores e dos satélites, no caso do uso da observável código suavizado pela fase. No caso do processamento em questão, têm-se a diminuição do número de 40 parâmetros, sendo um ZTD para cada estação. Essa diminuição permite que a solução seja processada de forma consideravelmente mais rápida, o que é bom para o caso da estimativa das correções dos relógios dos satélites em tempo real.

8.2.3 Estimativa da correção do relógio do satélite com código e fase

Nesta seção são apresentados os resultados da estimativa das correções dos relógios dos satélites utilizando o código e fase. Neste caso, o RT_SAT_CLOCK permite estimar as correções dos relógios dos satélites, correções dos relógios receptores, troposfera e as ambiguidades para cada satélite. Assim como na solução fazendo uso da observável pseudodistância suavizada pela fase, também é possível aplicar a correção da troposfera advinda de modelos de PNT.

O primeiro processamento foi realizado utilizando os dados do dia 244 de 2009, assim como no processamento da seção 8.2.2.2, porém com um número reduzido de estações devido ao grande número de parâmetros envolvidos e, conseqüentemente, limitações computacionais. A solução apresentada foi gerada com dados de 30 estações estimando as correções dos relógios, a troposfera e as ambiguidades.

Tomando uma época qualquer do processamento, o número médio de satélites GPS por estação foi de 8,19. Nesse caso teve-se então, 237 observações de código e 237 de fase com a combinação *ion-free*, além da pseudo-observação injuncionada para a correção de relógio de um satélite gerando um total de 475 observações. Os parâmetros são: 29 dtr (relógio do receptor), 29 tzw (troposfera), 32 dts (relógios dos satélites) e 237 ambiguidades. Assim, têm-se um total de 327 parâmetros, com grau de liberdade na respectiva época igual a 238. A forma de gerenciamento dos parâmetros de ambiguidades e otimizações do ajustamento foram apresentados na seção 7.2.

A Figura 63 mostra a série temporal da correção do relógio estimada para alguns satélites juntamente com a série temporal das correções finais do IGS:

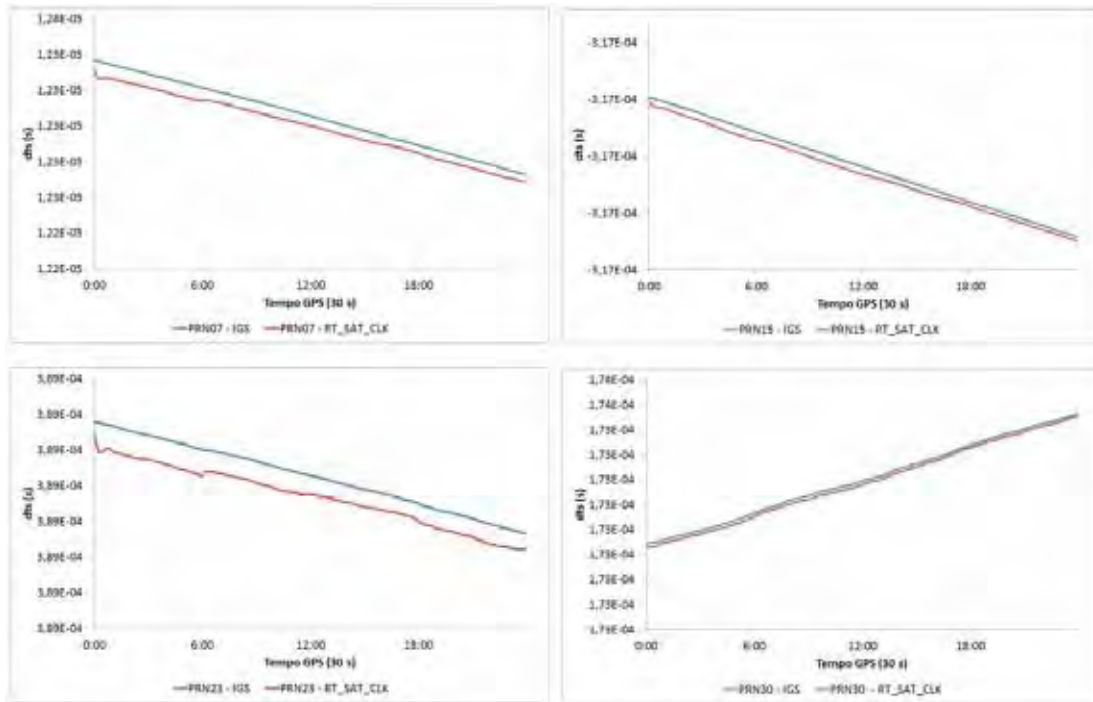


Figura 63 - Série temporal das correções estimadas e das correções finais do IGS para os satélites PRN 07, 15, 23 e 30 (dia 244 de 2009)

As correções estimadas apresentam comportamento semelhante às correções finais do IGS, porém com uma diferença ou separação (*offset*) aparentemente sistemática, o que se deve, principalmente, ao fato do tipo de injeção adotada, que no caso foi a correção do relógio do satélite PRN31. Na Figura 63 verifica-se que um salto na série temporal é apresentado nas proximidades da troca de efemérides a cada 6 horas.

A Figura 64 apresenta a série temporal das precisões estimadas, ou seja, a precisão formal advinda da MVC do vetor estado ajustado:

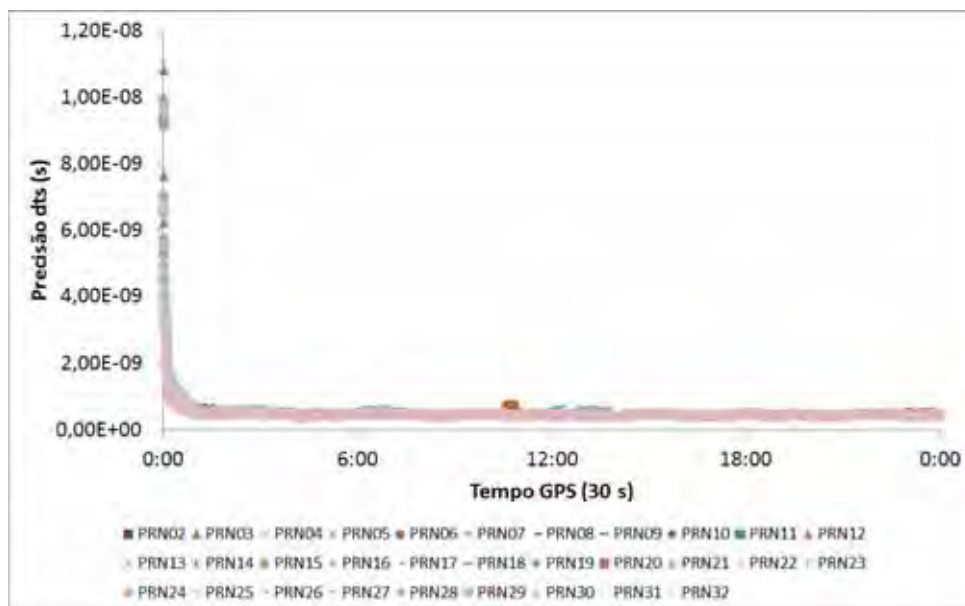


Figura 64 - Série temporal das precisões das correções dos relógios dos satélites - solução com código e fase (dia 244 de 2009)

As precisões atingem estabilidade após aproximadamente uma hora de dados processados e após esse período, os valores são da ordem 0,5 ns. A precisão média diária para cada satélite é apresentada na Figura 65:

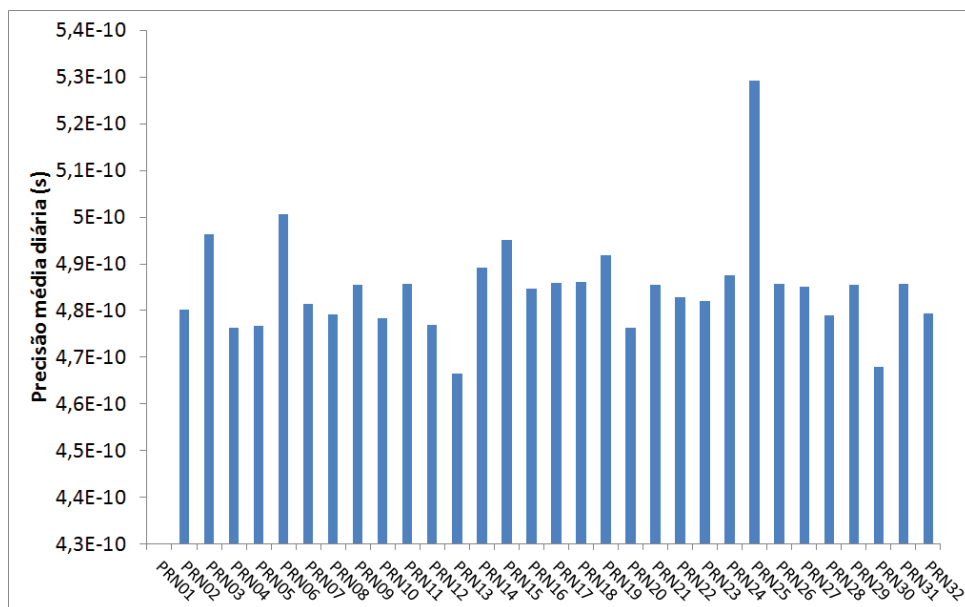


Figura 65 - Precisão formal média diária das correções dos relógios - solução com código e fase (dia 244 de 2009)

O valor máximo da precisão média diária foi para o satélite PRN 25 com valor de 0,53 ns e o mínimo foi para o satélite PRN 13 (Bloco IIR) com valor de 0,467 ns. O satélite PRN 25 era um dos mais antigos da constelação na época dos dados processados (dia 244 de 2009) e da mesma forma que na solução com o código suavizado pela fase também apresentou descontinuidades na série temporal das correções estimadas com código e fase. No geral a precisão média diária é da ordem de 0,5 ns ou aproximadamente 0,15 m.

A comparação diretamente sem remoção de tendência com a solução do IGS é apresentada na Figura 66 a partir da qual se pode observar a descontinuidade para o satélite PRN 25:

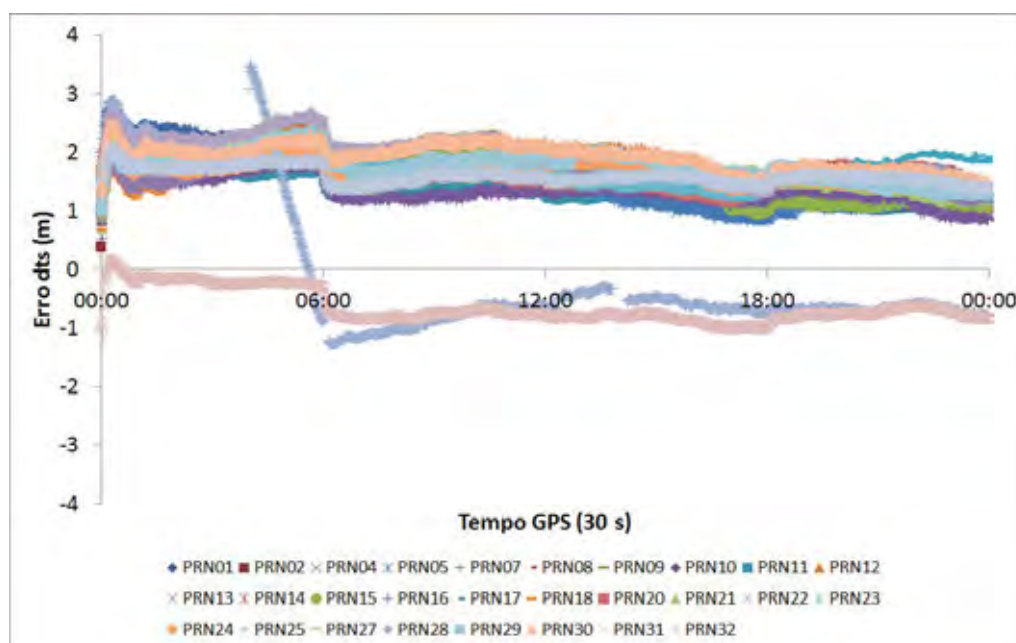


Figura 66 - Erros do dts estimado em relação ao IGS sem remoção da tendência - solução com código e fase (dia 244 de 2009)

A Figura 67 apresenta a série temporal dos “erros” das correções estimadas em relação às correções dos relógios do IGS com a tendência (média das correções da constelação) removida. Neste caso, os “erros” dos satélites PRN 25 e PRN 32 foram omitidos para facilitar a visualização.

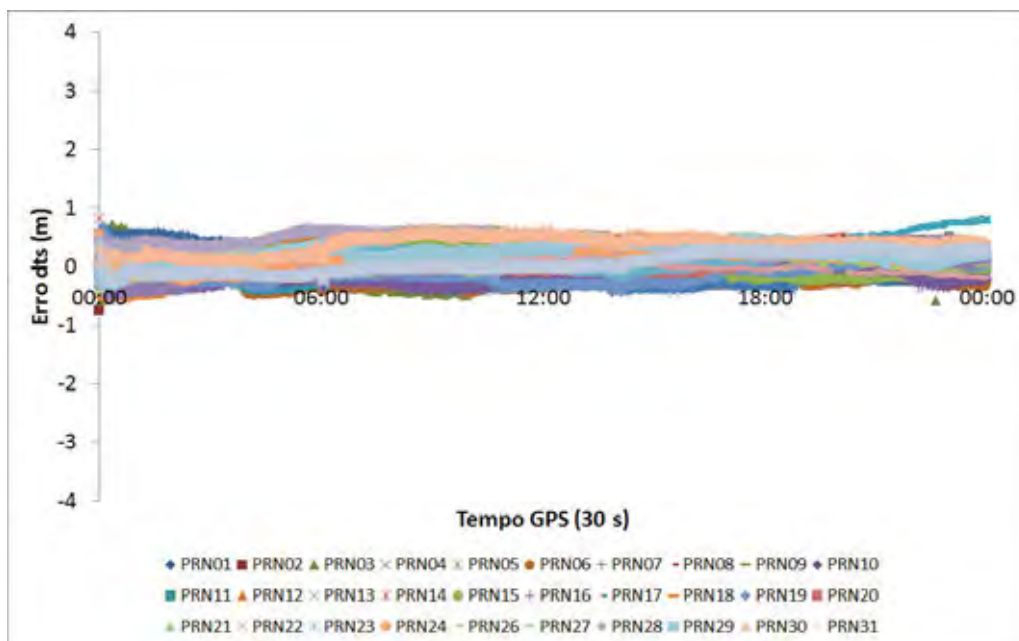


Figura 67 - Erros em relação às correções finais do IGS com tendência removida - código e fase (dia 244 de 2009)

A Figura 68 mostra o desvio-padrão diário do “erro” do dtfs estimado para cada satélite:

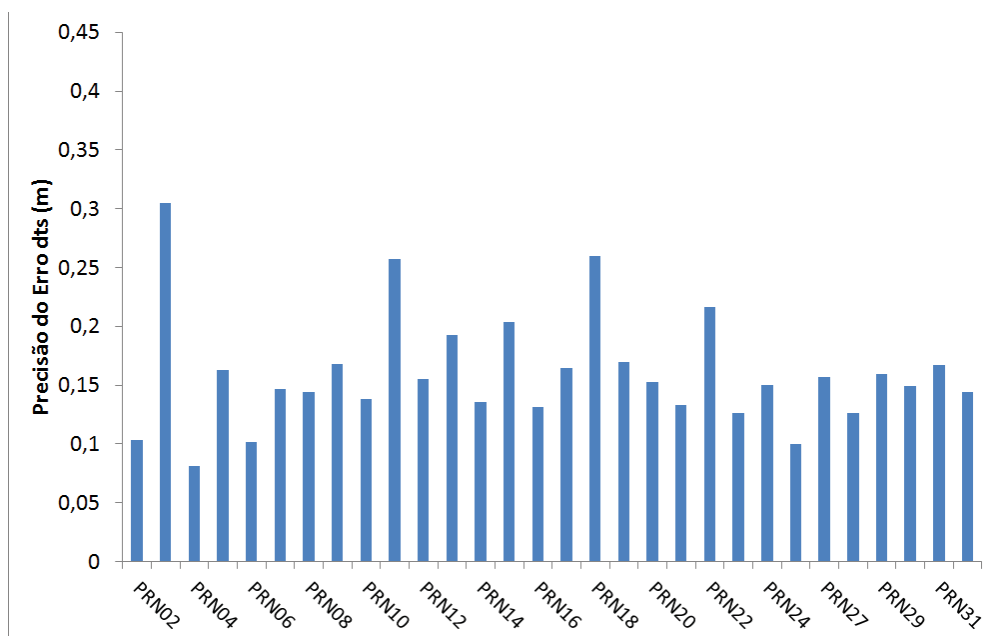


Figura 68 - Precisão do erro dtfs em relação à correção do IGS - solução com código e fase (dia 244 de 2009)

A partir da Figura 68 pode-se verificar que no geral, os valores do desvio-padrão do “erro” do dts estimado em relação ao IGS é da ordem de 0,15 m, correspondendo à aproximadamente 0,5 ns. O máximo desvio-padrão foi para o satélite PRN 03 com valor de 0,305 m e o mínimo para o satélite PRN04 com valor de 0,082 m.

A estimativa das correções dos relógios dos satélites GPS também foi realizada utilizando dados mais recentes, mais especificamente para o dia 10 de janeiro de 2012 (dia 10 de 2012). No caso foram utilizados dados de 30 estações com solução utilizando o código e a fase estimando as correções dos relógios dos receptores e dos satélites, a troposfera e as ambiguidades.

A precisão formal do ajustamento advinda da MVC dos parâmetros ajustados é mostrada na Figura 69 para cada satélite.

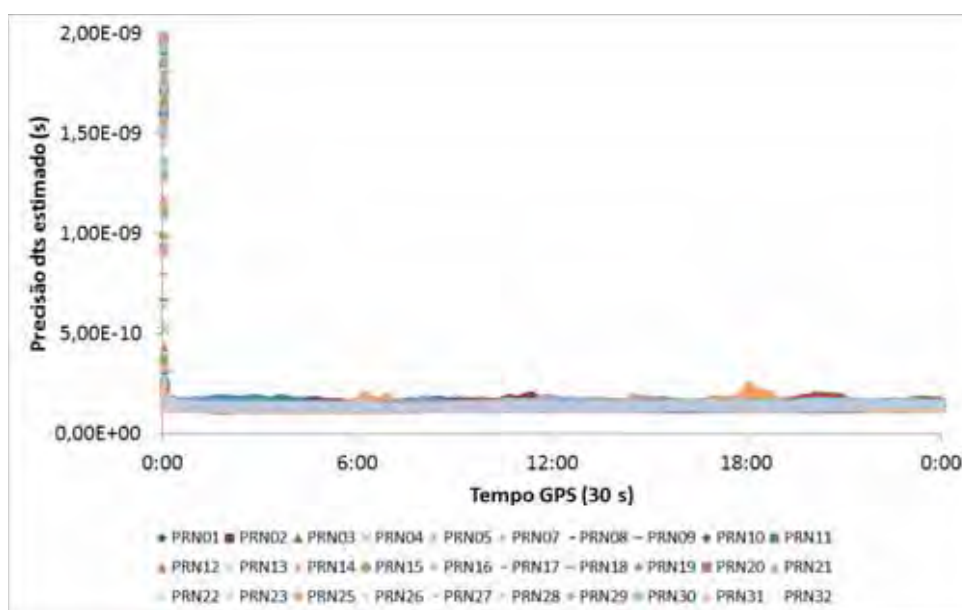


Figura 69 - Precisão formal do ajustamento par o dts estimado no dia 10 de 2012

No geral, a precisão formal da correção estimada para o relógio dos satélites foi da ordem de 0,15 ns após a convergência do processamento dos dados. A Figura 70 mostra a série temporal dos “erros” do dts estimado (tendência removida) em relação à correção final do IGS durante o dia 10 de 2012. As correções do PRN 32 foram omitidas por motivos de visualização, assim como na solução para o dia 244 de 2009.

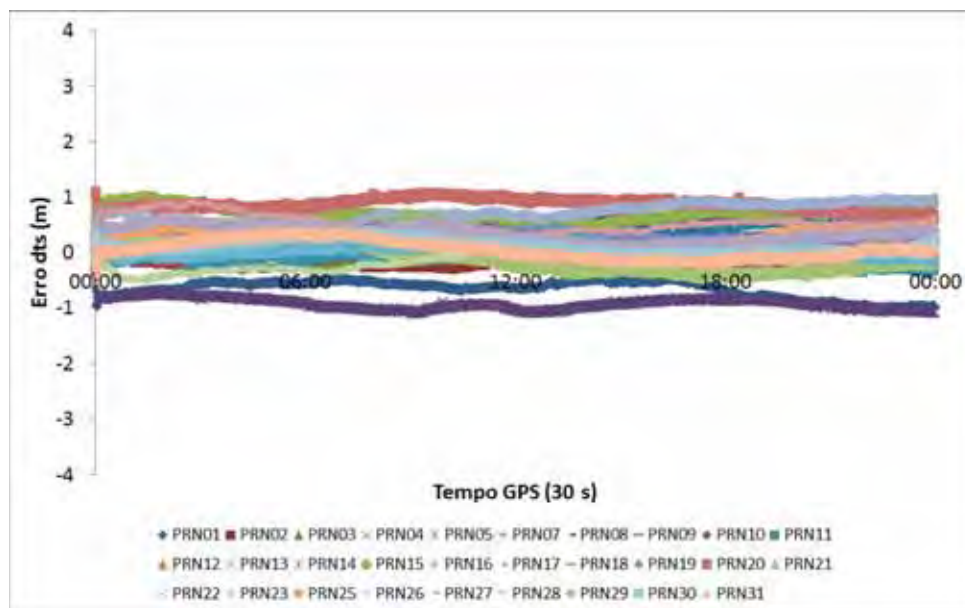


Figura 70 - Erros em relação às correções finais do IGS com tendência removida - código e fase (dia 10 de 2012)

Foram calculados os valores do desvio-padrão dos “erros” da correção estimada em relação à correção do IGS, os quais são apresentados na Figura 71:

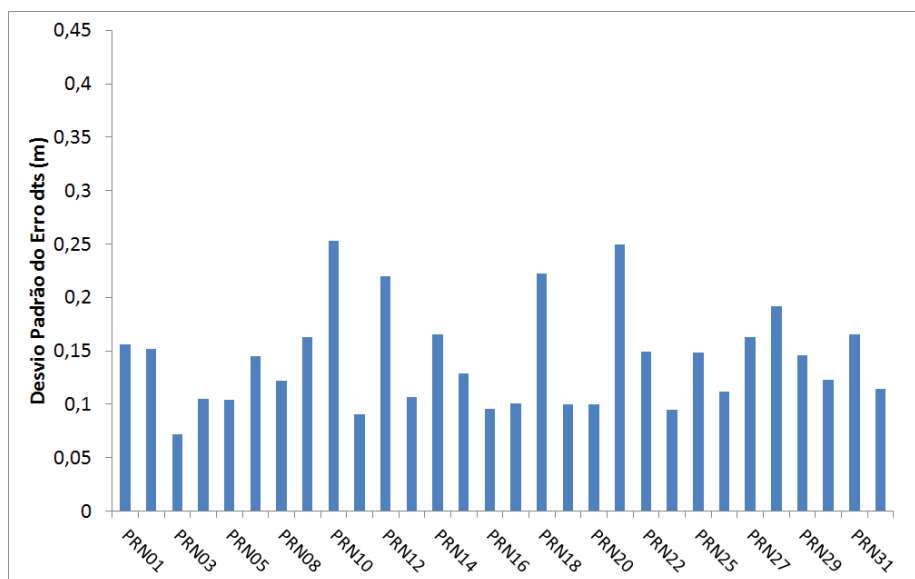


Figura 71 - Precisão do erro dts em relação à correção do IGS - solução com código e fase (dia 10 de 2012)

No geral, o desvio padrão do “erro” dts estimado em relação à solução final do IGS foi da ordem de 0,15 m (0,5 ns). O máximo desvio-padrão foi para o satélite PRN 10

com valor de 0,253 m (0,84 ns) e o mínimo para o satélite PRN03 com valor de 0,072 m (0,24 ns).

Ao comparar a solução do dia 244 de 2009 com a solução do dia 10 de 2012, verifica-se que apresentaram resultados semelhantes em termos de desvio padrão do “erro” dts estimado em relação à solução final do IGS, o qual foi da ordem de 0,15 m (0,5 ns) para as soluções diárias.

8.3 RT_PPP utilizando as correções de relógios estimadas para tempo real

Nesta seção, são apresentados os resultados de processamento no modo PPP com o *software* RT_PPP. Os resultados foram gerados em tempo real ou simulando tempo real. No primeiro caso, o PPP em tempo real foi realizado com órbitas interpoladas das efemérides preditas IGU e correções dos relógios dos satélites disseminadas pelo BKG para aplicação nas correções das efemérides transmitidas. No segundo caso, o PPP foi realizado aplicando as correções estimadas pelo *software* RT_SAT_CLOCK. As análises relacionadas com a estimativa das correções dos relógios dos satélites pelo RT_SAT_CLOCK foram apresentadas na seção 8.2, seja para a solução com código suavizado pela fase como para a solução utilizando o código e fase com estimativa das ambiguidades.

Os resultados do PPP simulando tempo real foram gerados utilizando as órbitas preditas IGU com a solução dos relógios pelo RT_SAT_CLOCK. Os processamentos também foram realizados utilizando órbitas finais do IGS e correção precisa dos relógios dos satélites do IGS. As coordenadas estimadas nas duas estratégias de processamento, ou seja, simulando tempo real com IGU ou utilizando a solução final do IGS, foram comparadas com as coordenadas “oficiais” divulgadas, as quais foram devidamente atualizadas para época do processamento. Todos os resultados são apresentados no sistema ITRF2005 ou no ITRF2008.

8.3.1 PPP em tempo real

O *software* RT_PPP versão para tempo real foi descrito na seção 7.1. A partir do *software* é possível obter as medidas GNSS e as correções de relógios dos satélites advindas de um dos *mountpoints* e aplicar no processamento PPP em tempo real.

Os resultados em tempo real foram gerados para a estação PPTE da RBMC e para a estação LGE2 do Laboratório de Geodésia Espacial da FCT/UNESP. Para a estação PPTE, os dados foram recebidos em tempo real a partir da conexão da *thread* com o *caster* e

para o caso da estação LGE2, foi utilizado um receptor NETR8 da Trimble conectado na porta serial de um computador. Em ambos os casos, utilizaram-se efemérides preditas IGU com atualização de efemérides assim que uma nova estivesse disponível. As correções dos relógios do BKG são obtidas por uma *thread* independente no formato da mensagem 1060 do RTCM 3.x (Tabela 24, p. 244).

A correção do relógio do satélite é enviada na mensagem 1060 na forma de um polinômio e deve ser aplicada na correção do relógio calculada a partir das efemérides transmitidas pelos satélites. Desta forma, uma *thread* independente é criada para receber informações de efemérides transmitidas (mensagem 1019 para o GPS) de um *mountpoint*. Essa estratégia é aplicada, porque o receptor ligado ao *caster* ou à porta serial pode estar configurado para não enviar as mensagens transmitidas.

Diversos experimentos foram realizados com o RT_PPP em tempo real, seja no modo PPP cinemático ou no estático, porém somente alguns são apresentados. Os processamentos foram realizados utilizando a combinação *ion-free* com máscara de elevação de 10 graus e precisões adotadas de: 0,8; 1,0; 0,008 e 0,01 m para as observações P1, P2, fase L1 e fase L2, respectivamente. A troposfera foi estimada e as diversas correções necessárias para a realização do PPP foram aplicadas. Os resultados obtidos em cada experimento são apresentados a seguir.

8.3.1.1 PPP cinemático para a estação PPTE (conexão via *caster*)

Nesta seção apresentam-se experimentos realizados no PPP no modo cinemático em tempo real para a estação PPTE. Neste caso, as observações GPS foram recebidas do *caster* do LGE à taxa de 1 segundo e as correções dos relógios dos satélites foram recebidas do *mountpoint* do BKG denominado *clk11* à taxa de 5 s.

A Figura 72 apresenta os “erros” no SGL para o PPP cinemático em tempo real na estação PPTE no dia 10 de abril de 2011 e a Figura 73 mostra a precisão das coordenadas propagadas para o SGL.

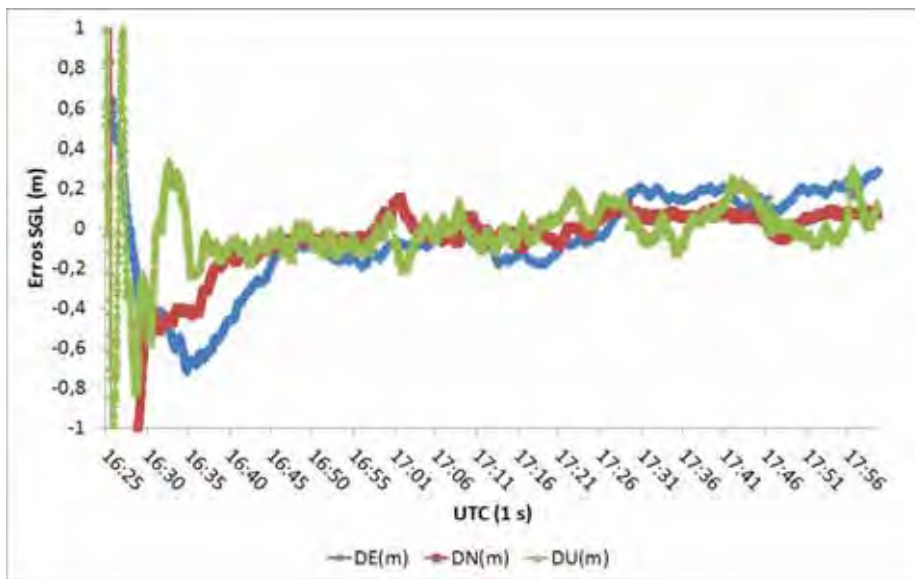


Figura 72 - “Erros” no SGL no modo PPP cinemático em tempo real para a estação PPTE (10/04/2011)

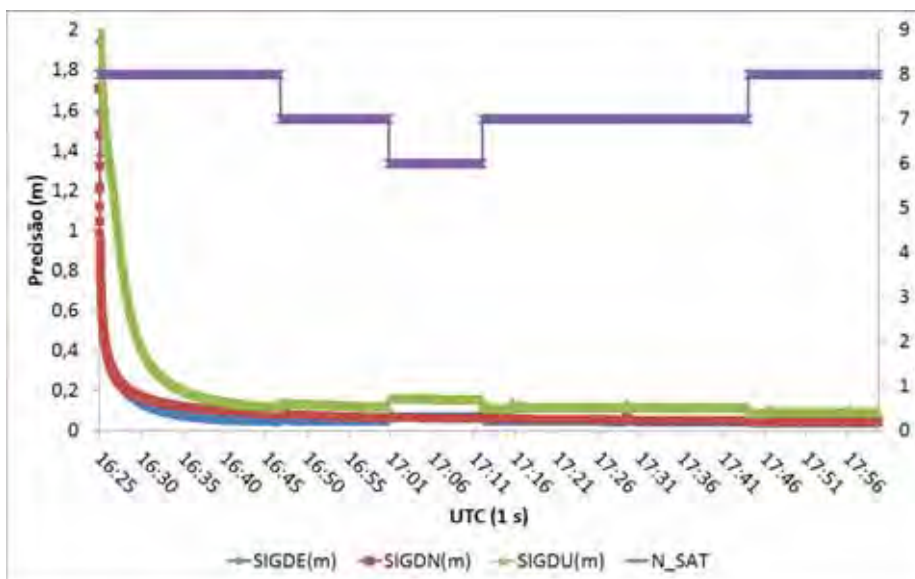


Figura 73 - Precisões no SGL para o PPP modo cinemático em tempo real na estação PPTE (10/04/2011)

As precisões das coordenadas no SGL foram da ordem de 0,10 m, principalmente para a componente altimétrica (Figura 73). O PPP cinemático atingiu convergência no processamento dos dados após aproximadamente 25 minutos e os “erros” no SGL foram da ordem 0,20 m para cada componente (Figura 72).

A Figura 74 mostra o EMQ resultante 2D e 3D, os quais foram calculados em função do erro médio no SGL (tendência) e da precisão dos “erros”.

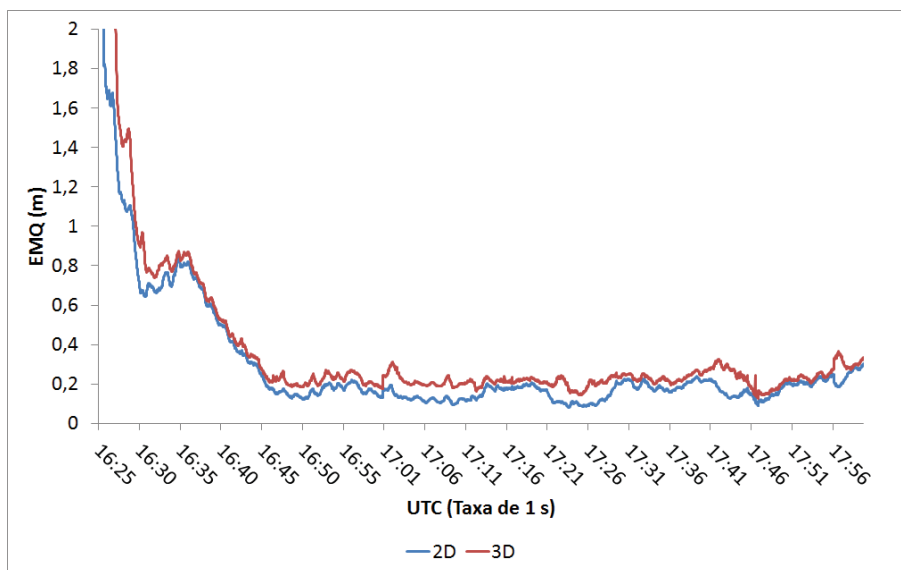


Figura 74 - EMQ resultante (2D e 3D) para o PPP cinemático em tempo real na estação PPTE (10/04/2011)

Na Figura 74 pode-se verificar que o EMQ resultante das coordenadas (2D e 3D) atingiu valores da ordem de aproximadamente 20 cm após a convergência do processamento dos dados.

A Figura 75 apresenta os valores das ambiguidades (unidade de ciclos) da combinação *ion-free* da fase para alguns satélites, as quais foram estimadas no PPP cinemático em tempo real na estação PPTE.

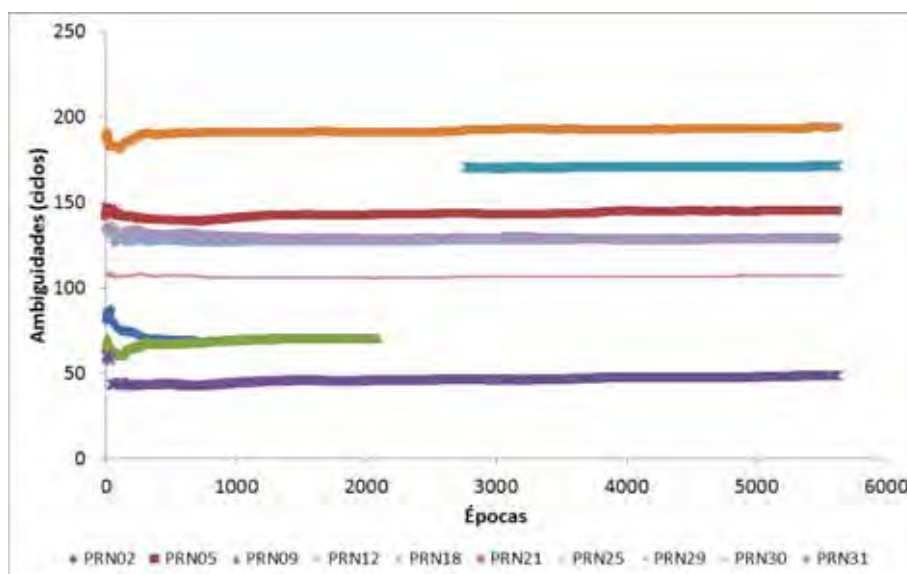


Figura 75 - Ambiguidades estimadas no PPP cinemático em tempo real (10/04/2011)

As precisões das ambiguidades (unidade de ciclos) estimadas no PPP cinemático em tempo real para a estação PPTE são apresentadas na Figura 76:

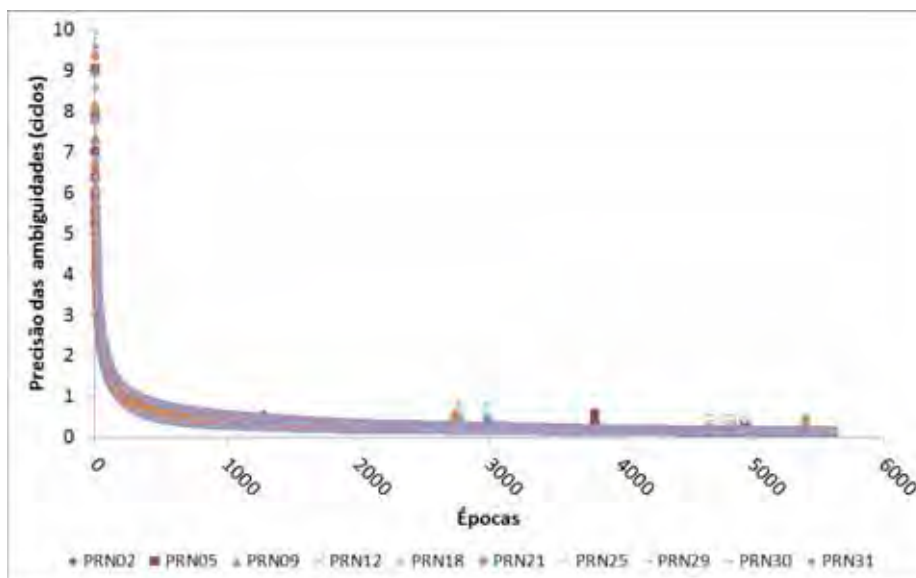


Figura 76 - Precisões das ambiguidades estimadas no PPP cinemático em tempo real (10/04/2011)

Na Figura 75 e na Figura 76, verifica-se que após o período de convergência do PPP que foi de aproximadamente 25 minutos de processamento de dados, as ambiguidades se mantiveram estáveis atingindo precisão da ordem de 0,15 ciclos (aproximadamente 3 cm).

8.3.1.2 PPP estático para a estação LGE2 (conexão via porta serial)

Nesta seção apresenta-se o PPP estático em tempo real realizado entre os dias 19 e 20 de janeiro de 2012. Foram utilizados os dados coletados pelo receptor NETR8 conectado na antena da estação LGE2 na FCT/UNESP. Os dados GPS foram obtidos pelo *software* RT_PPP via conexão da *thread* com a porta serial do computador, enquanto as correções dos relógios dos satélites foram obtidas pela *thread* conectada num dos *mountpoints* do BKG. O processamento PPP foi realizado no modo estático em tempo real no período de aproximadamente 14 horas do dia 19 de janeiro até aproximadamente 12 horas do dia 20 de janeiro de 2012, englobando um conjunto de dados de aproximadamente 22 horas com taxa de um segundo para o recebimento dos dados, o que corresponde a aproximadamente 77000 épocas de dados. A Figura 77 mostra as precisões das coordenadas estimadas (precisão formal) pelo *software* RT_PPP em tempo real no PPP no modo estático:

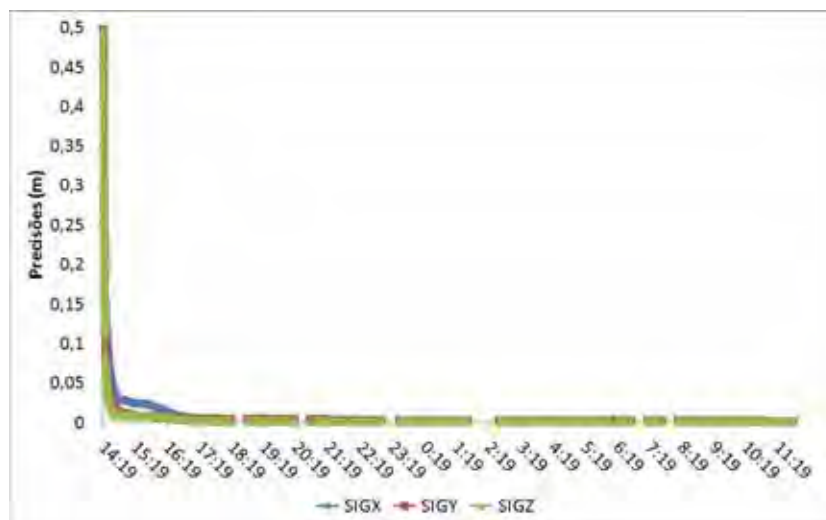


Figura 77 - Precisões das coordenadas no modo PPP estático em tempo real (19 e 20 de janeiro de 2012)

Após o período de convergência do processamento, os valores das precisões atingiram a casa de milímetros. A estratégia de PPP em tempo real no modo estático pode ter diversas aplicações, podendo-se citar, por exemplo, a estimativa do atraso zenital troposférico. Desta forma, a Figura 78 mostra o ZTD estimado no modo PPP estático em tempo real com o *software* RT_PPP para os dias 19 e 20 de janeiro de 2012.

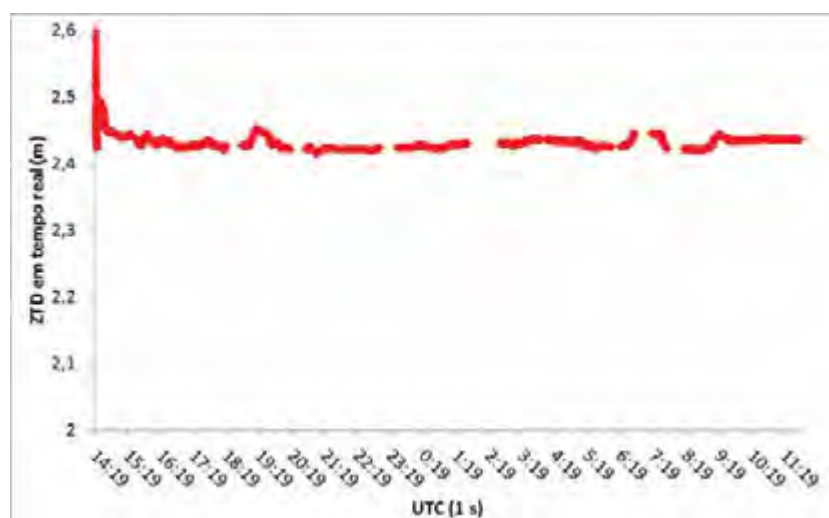


Figura 78 - ZTD estimado em tempo real pelo *software* RT_PPP no modo PPP estático (19 e 20 de janeiro de 2012)

Os valores estimados em tempo real para o ZTD foram da ordem de 2,4 m durante o período de processamento dos dados no modo PPP estático em tempo real. As precisões dos valores de ZTD estimados são apresentadas na Figura 79.

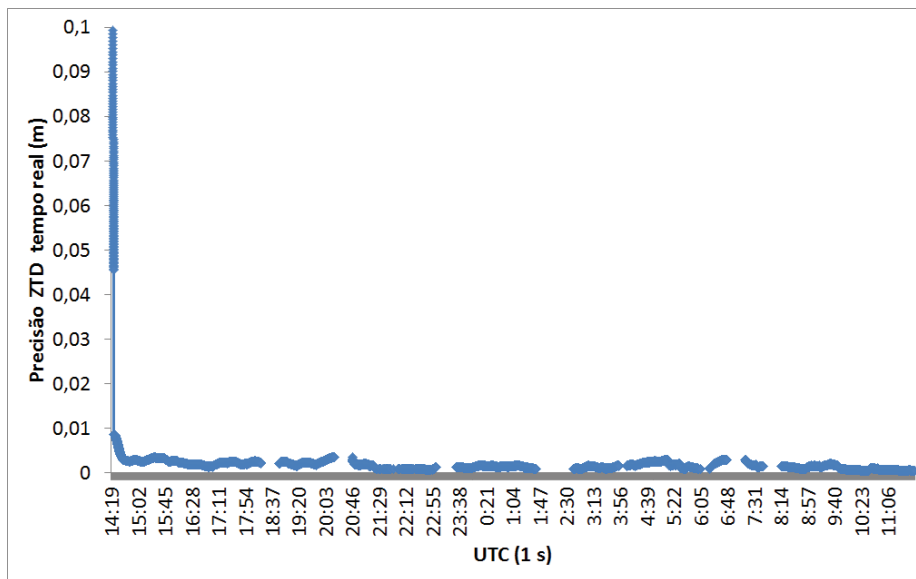


Figura 79 - Precisão do ZTD no PPP estático em tempo real (19 e 20 de jan. de 2012)

A partir da Figura 79, verifica-se que a convergência da estimativa do ZTD foi de aproximadamente 5 minutos e após este período o valor da precisão do ZTD estimado em tempo real foi da ordem de um a dois milímetros.

8.3.1.3 Problemas que ocorrem nas aplicações de PPP em tempo real

À medida que os experimentos foram sendo realizados procurou-se detectar problemas no *software* e realizar melhorias. Para coleta e processamento dos dados em tempo real, diversos problemas ocorrem e entre eles, pode-se citar o caso em que os dados GNSS deixam de ser recebidos do *caster* ou da porta serial por algum motivo ou o caso quando cai a conexão com a *thread* ligada ao *caster* fornecendo as correções dos relógios dos satélites. Quando não se tem as correções dos relógios dos satélites, o RT_PPP foi configurado para não aplicar as outras correções disponíveis, tais como as advindas das efemérides transmitidas e da IGU.

Quando o RT_PPP deixa de receber as correções dos relógios devido à problemas com a conexão, procedimentos são realizados para tentar reconectar assim que possível. Desta forma, foi realizado um experimento no dia 14 de fevereiro de 2012 no modo cinemático em tempo real com dados da estação LGE2 recebidos via porta serial. A conexão com a internet foi interrompida propositalmente diversas vezes e o *software* RT_PPP reconectou após alguns instantes.

O processamento PPP no modo cinemático foi realizado no período de aproximadamente 14:30h do dia 14 de fevereiro até 2:44 h do dia 15 de fevereiro de 2012, contabilizando um número de aproximadamente 45000 épocas processadas em tempo real. A Figura 80 mostra os “erros” do PPP cinemático no SGL:

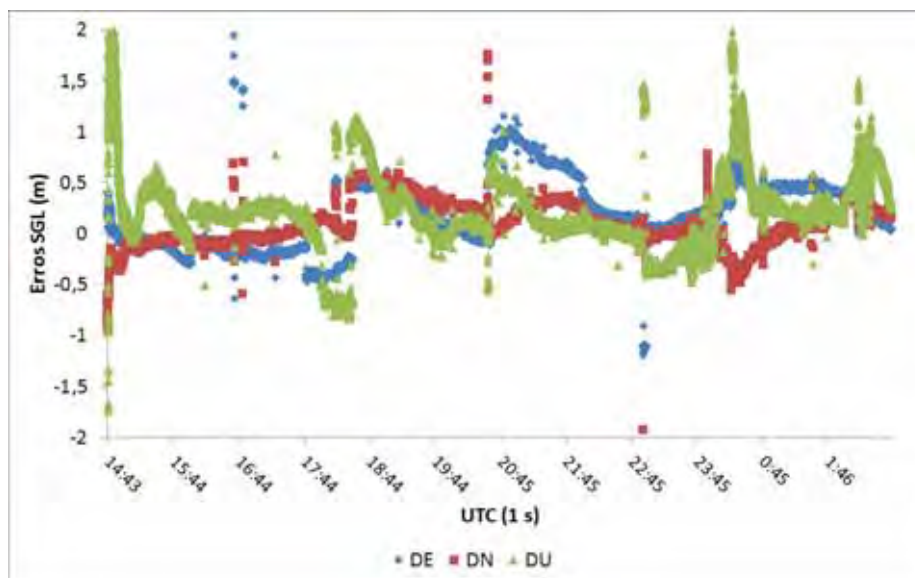


Figura 80 - Erros no PPP cinemático em tempo real para a estação LGE2 (14 e 15 de fevereiro de 2012)

Ocorreram problemas com a conexão do *caster* transmitindo as mensagens de correções dos relógios dos satélites. O *software* RT_PPP conseguiu reconectar, porém compareceram diversos saltos na série temporal dos erros 2D e 3D como pode ser visto na Figura 80. Quando ocorre a perda de conexão e, conseqüentemente, o interrompimento da coleta de dados, o Filtro de Kalman utiliza as informações do vetor estado predito para a época em que retorna o recebimento dos dados, considerando que as ambiguidades são consideradas como constantes (*Random Constant*) no tempo. As precisões das coordenadas estimadas são apresentadas na Figura 81:

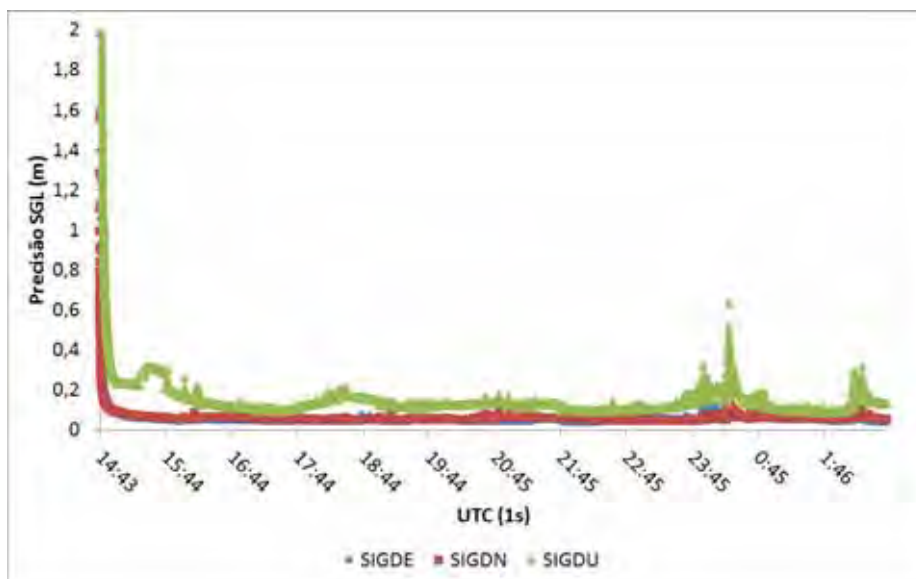


Figura 81 - Precisão das coordenadas estimadas no PPP cinemático da estação LGE2 (14 e 15 de fevereiro de 2012)

A partir da série temporal das precisões, verifica-se que a solução ficou degradada quando ocorreram os problemas de conexão. De qualquer forma, houve a reconexão rapidamente e a solução do PPP em tempo real convergiu em seguida para a maioria dos casos. Após o período de convergência do processamento dos dados, os “erros” no SGL atingiram a ordem de 0,20 a 0,30 m.

8.3.2 PPP simulando tempo real com solução gerada pelo RT_SAT_CLOCK

Supondo que o usuário GNSS não tenha à disposição um serviço de estimativa das órbitas e correções dos relógios dos satélites em tempo real, a solução de PPP em tempo real pode ser realizada com base no uso das efemérides previstas IGU, as quais contêm dados previstos para as coordenadas e também para as correções dos relógios dos satélites. A acurácia das efemérides IGU, atualmente, é da ordem de 10 cm para a posição dos satélites e de aproximadamente 1 m para as correções dos relógios (ver Tabela 1 p. 42).

Os dados disponíveis na IGU são, geralmente, distribuídos em intervalos de 15 minutos, o que requer um processo de interpolação para aplicação no PPP, cujos dados são observados a taxas de intervalos menores. As efemérides IGU do dia 244 de 2009 foram interpoladas para taxa de 30 s e posteriormente comparadas com a solução final do IGS, a qual é dada em intervalos de 30 s. A Figura 82 mostra os “erros” ou discrepâncias das correções previstas dos relógios dos satélites advindas das efemérides IGU e interpoladas para

uma taxa de 30 s. No caso, os arquivos de efemérides IGU foram atualizados a cada 6 horas e a comparação com as correções do IGS foram realizadas somente para os dados preditos da IGU.

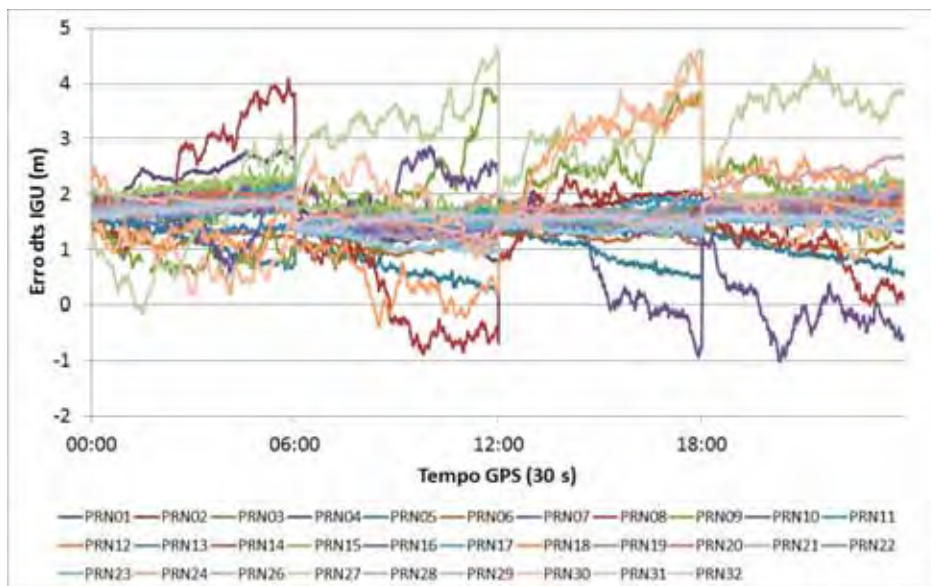


Figura 82 - Correção do relógio do satélite interpolada da IGU para taxa de 30 s

Verifica-se a partir da Figura 82 que a predição fica degradada com o passar do tempo e ocorrem saltos na série temporal a cada troca de efemérides. Os piores resultados são, geralmente, para os satélites PRN 08, PRN 27 e PRN30 pertencentes ao Bloco IIA com relógios atômicos de césio e lançados em meados de 1990 (Tabela 2, p 49).

A Figura 83 mostra a série temporal da correção do relógio predito da IGU para o satélite PRN 25 juntamente com a correção final do IGS. A discrepância da correção do relógio deste satélite em relação ao IGS não foi apresentada na Figura 82 para facilitar a visualização das discrepâncias das correções dos outros satélites da constelação GPS.

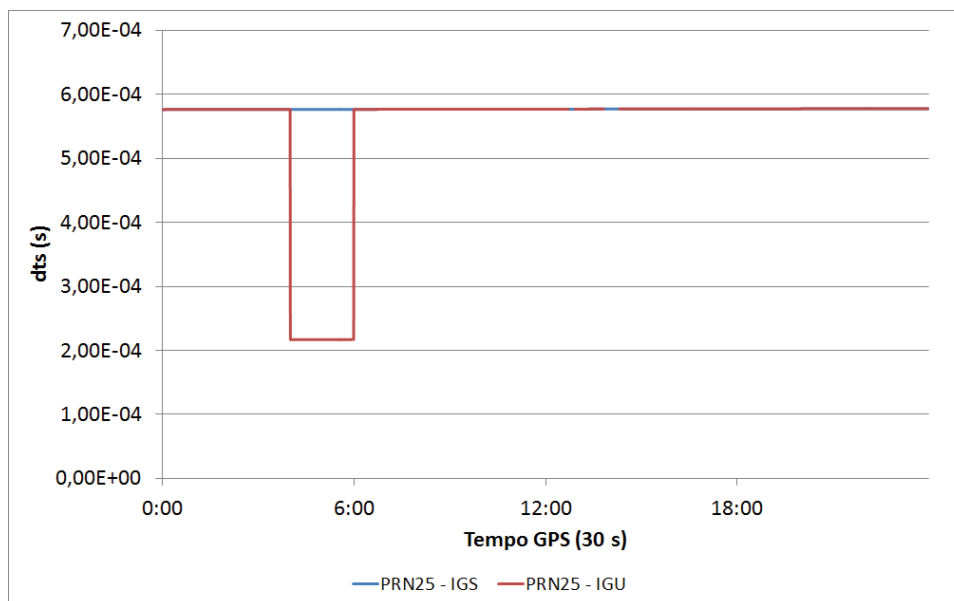


Figura 83 - Correção do relógio do satélite PRN 25 interpolado da IGU para taxa de 30 s

Como pode ser visto na Figura 83, ocorreu uma descontinuidade na correção do relógio do satélite PRN25 advindo da efeméride IGU, da mesma forma que ocorreu para a estimativa das correções deste satélite pelo RT_SAT_CLOCK (seções 8.2.2 e 8.2.3). Porém, para o caso da IGU, a descontinuidade foi de magnitude bem maior. A solução do IGS não apresenta descontinuidade para este satélite, mas para o caso da estimativa em tempo real e para a predição houve a descontinuidade, mostrando que ocorreu algum problema com o relógio deste satélite no período das 4 às 6 horas.

A análise para a posição do satélite advinda da IGU foi apresentada na seção 3.2.1, cujo erro 3D para a predição de até 6 horas é da ordem de aproximadamente 10 cm.

8.3.2.1 PPP cinemático utilizando as correções do RT_SAT_CLOCK

O PPP simulando tempo real foi realizado com o *software* RT_PPP com base na estratégia de utilizar a posição dos satélites interpolada das efemérides IGU e utilizando as correções estimadas pelo *software* RT_SAT_CLOCK. As configurações adotadas no processamento PPP foram com máscara de elevação de 10 graus, utilização das medidas de código e fase de dupla frequência com combinação *ion-free*, estimativa da troposfera como *random walk* e aplicação das correções necessárias à realização do PPP conforme descritas na seção 3.2. A precisão adotada para as observáveis GPS foram de 0,8; 1,0; 0,008 e 1,0 m, respectivamente para P1, P2, fase L1 e fase L2.

Primeiramente, foi realizado o PPP no modo cinemático para a estação ALGO utilizando somente as efemérides IGU, ou seja, com as posições e as correções dos relógios dos satélites interpoladas destas efemérides. A Figura 84 mostra os “erros” em planimetria e erro 3D no caso do PPP cinemático utilizando somente efemérides IGU:

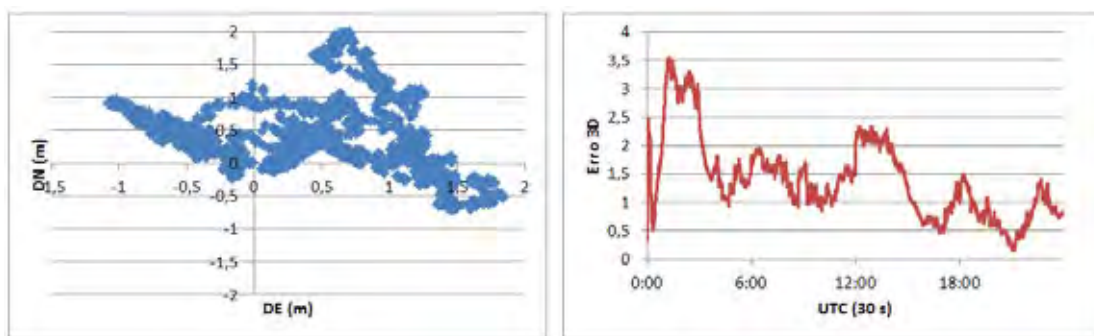


Figura 84 - Erros no PPP cinemático utilizando posição dos satélites e relógios da IGU

A Tabela 17 mostra as estatísticas diárias do PPP cinemático para a estação ALGO utilizando efemérides previstas IGU:

Tabela 17 - Estatísticas diárias do PPP cinemático utilizando somente IGU

| | DE (m) | DN (m) | DU (m) |
|----------------------|--------|--------|--------|
| Erro médio | 0,262 | 0,425 | -0,103 |
| Desvio Padrão | 0,715 | 0,473 | 1,213 |
| EMQ | 0,761 | 0,635 | 1,217 |

Na Tabela 17 verifica-se que o maior valor de EMQ no PPP cinemático com efemérides previstas para a estação ALGO é na componente altimétrica com valor de 1,217 m.

O processamento PPP para a estação ALGO foi realizado utilizando a posição dos satélites da IGU e as correções de relógios dos satélites estimadas pelo *software* RT_SAT_CLOCK, seja no modo usando a observável pseudodistância suavizada pela fase ou no modo usando o código e a fase. A Figura 85 apresenta os “erros” do PPP cinemático utilizando órbitas IGU e correções dos relógios dos satélites estimadas pelo *software* RT_SAT_CLOCK com base na pseudodistância suavizada pela fase (IGU + clk PD suavizada). A Figura 86 mostra os “erros” no PPP cinemático utilizando as órbitas IGU e as correções dos relógios dos satélites estimadas com base no código e na fase (IGU + clk PD e Fase). Por fim, o processamento PPP cinemático com o *software* RT_PPP foi realizado utilizando as órbitas finais do IGS juntamente com as correções finais dos relógios dos satélites (IGS + clk final), cujos “erros” são apresentados na Figura 87.

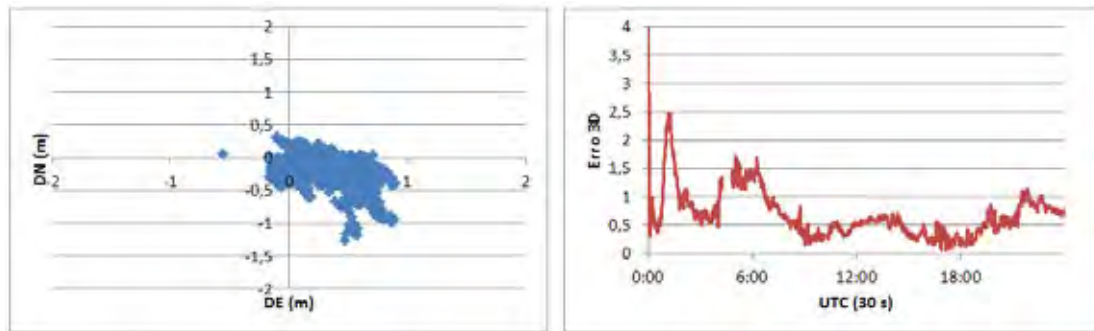


Figura 85 - Erros no PPP cinemático utilizando posição dos satélites da IGU e correção do relógio pelo RT_SATCLOCK no modo PD suavizada pela fase

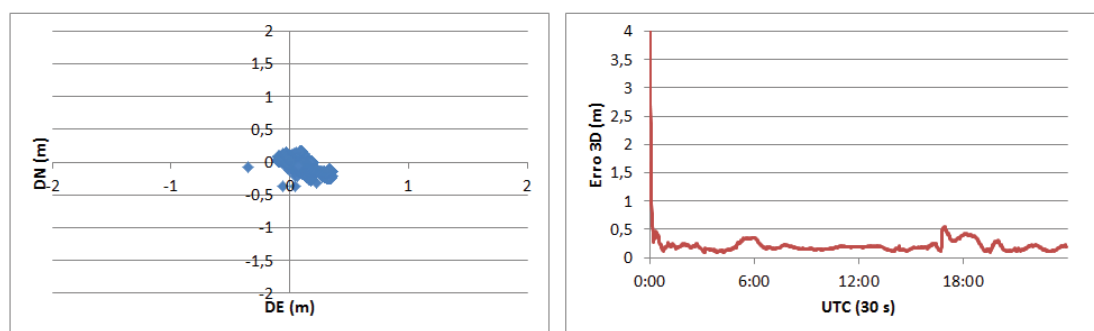


Figura 86 - Erros no PPP cinemático utilizando posição dos satélites da IGU e correção do relógio pelo RT_SATCLOCK no modo código e fase

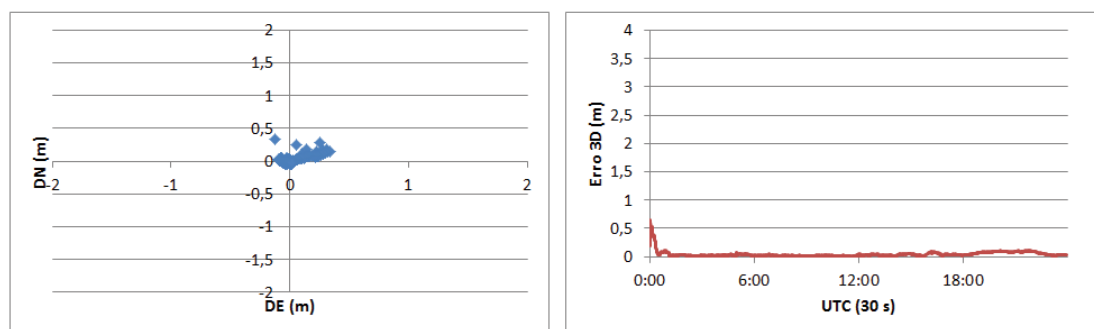


Figura 87 - Erros no PPP cinemático com órbitas e correções finais dos relógios dos satélites do IGS

O PPP utilizando as correções dos relógios dos satélites, as quais foram estimadas com base no código suavizado pela fase apresentou valores dos erros 2D e 3D da ordem de 0,50 m após a convergência do processamento PPP cinemático (Figura 85).

Para o caso do PPP cinemático utilizando correções dos relógios dos satélites estimadas com base no uso de código e fase, os valores dos erros 2D e 3D são da ordem de 0,20 m após a convergência do processamento PPP cinemático (Figura 86).

No caso da solução final do IGS, os valores dos “erros” 2D e 3D ficam abaixo de 0,10 m (Figura 87). A Tabela 18 mostra as estatísticas diárias das soluções de PPP

cinemático simulando tempo real com correções geradas pelo RT_SAT_CLOCK e também mostra as estatísticas do PPP usando a solução final de órbita e relógio do IGS

Tabela 18 - Estatísticas diárias do PPP cinemático simulando tempo real

| PPP (IGU + clk PD suavizada) | | | |
|------------------------------|--------|--------|-------|
| | DE | DN | DU |
| Erro médio | 0,345 | -0,176 | 0,256 |
| Desvio-padrão | 0,243 | 0,215 | 0,559 |
| EMQ | 0,422 | 0,278 | 0,615 |
| PPP (IGU + clk PD e Fase) | | | |
| | DE | DN | DU |
| Erro médio | 0,103 | -0,031 | 0,022 |
| Desvio-padrão | 0,092 | 0,079 | 0,254 |
| EMQ | 0,139 | 0,085 | 0,255 |
| PPP (IGS + clk final) | | | |
| | DE | DN | DU |
| Erro médio | -0,015 | 0,002 | 0,001 |
| Desvio-padrão | 0,038 | 0,022 | 0,048 |
| EMQ | 0,041 | 0,022 | 0,048 |

O EMQ diário para o caso do PPP cinemático com as correções dos relógios estimadas pelo *software* RT_SAT_CLOCK usando PD suavizada (IGU + clk PD suavizada) foi de 0,422; 0,278 e 0,615 m, respectivamente, para as componentes DE, DN e DU.

No caso do PPP cinemático com as correções dos relógios estimadas pelo *software* RT_SAT_CLOCK usando código fasee (IGU + clk PD e Fase), o EMQ diário foi de 0,139; 0,085 e 0,255 m, respectivamente, para as componentes DE, DN e DU.

Para o PPP cinemático com solução final do IGS, o EMQ diário foi de 0,041; 0,022 e 0,048 m, respectivamente para as componentes DE, DN e DU.

A Figura 88 mostra as precisões das coordenadas estimadas pelo *software* RT_PPP para o caso usando órbita IGU e correções estimadas pelo *software* RT_SAT_CLOCK com código e fase (IGU + clk PD e Fase) e também para o caso usando órbita e correções dos relógios finais do IGS (IGS +clk final).

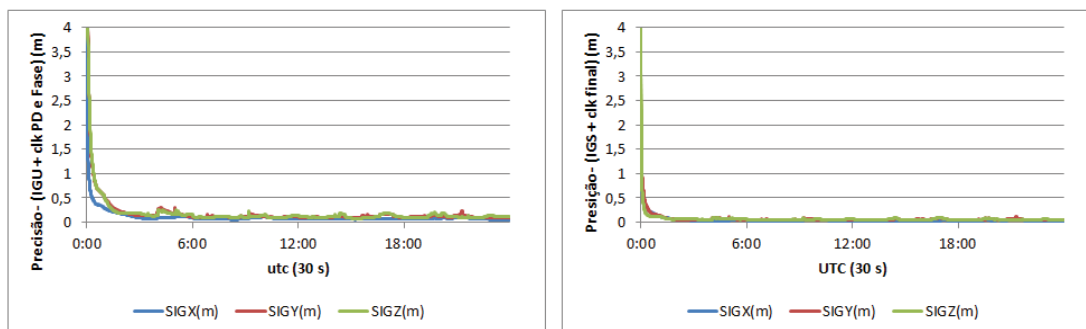


Figura 88 - Precisões estimadas pelo RT_PPP - “IGU + clk PD e Fase” e “IGS + clk final”

As precisões das coordenadas são da ordem de 0,10 m e abaixo de 0,10 m, respectivamente para as soluções PPP cinemático “IGU+clk PD e fase” e “IGS + clk final”. A aplicação da correção do relógio do satélite do IGS ou a correção estimada pelo RT_SAT_CLOCK no PPP, teoricamente, deveriam produzir a mesma incerteza para as coordenadas estimadas, visto que, a correção afeta apenas o modelo funcional do ajustamento. A modelagem estocástica aplicada foi idêntica para os dois modos de processamentos. As diferenças nas precisões como apresentadas na Figura 88, apesar de pequenas, se devem ao fato do RT_PPP adicionar as incertezas das correções dos relógios estimadas no modelo estocástico para o processamento PPP.

O PPP também foi realizado no modo cinemático (solução com código e fase) para a estação POVE da RBMC utilizando as estratégias de aplicar as órbitas IGS e as correções finais (IGS + clk final) e as órbitas IGS com solução do relógio estimada pelo RT_SAT_CLOCK (IGS + clk RT_SAT_CLOCK).

A diferença com relação ao processamento anterior para a estação ALGO está no fato de usar a órbita final IGS para os dois tipos de processamentos, o que visa avaliar a estimativa da correção estimada contra a correção final do IGS em termos de posicionamento PPP cinemático. A Figura 89 mostra os “erros” no SGL para os dois tipos de processamentos e os “erros” 2D e 3D podem ser vistos na Figura 90.

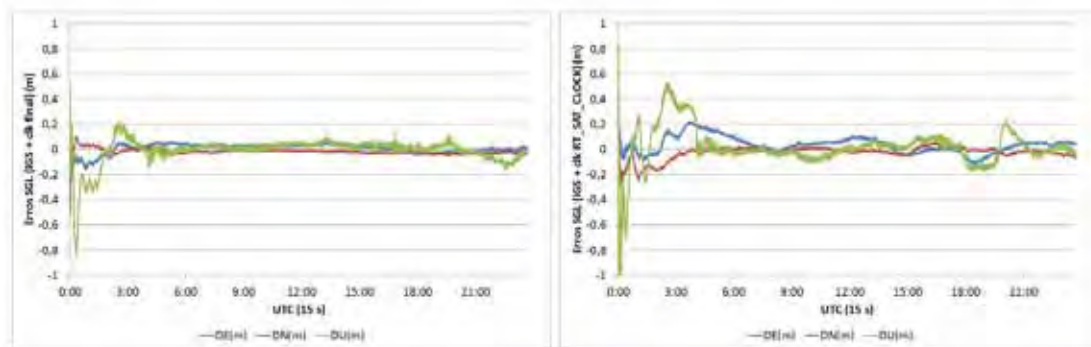


Figura 89 - Erros no SGL para o PPP cinemático “IGS + clk final” e “IGS + clk RT_SAT_CLOCK”

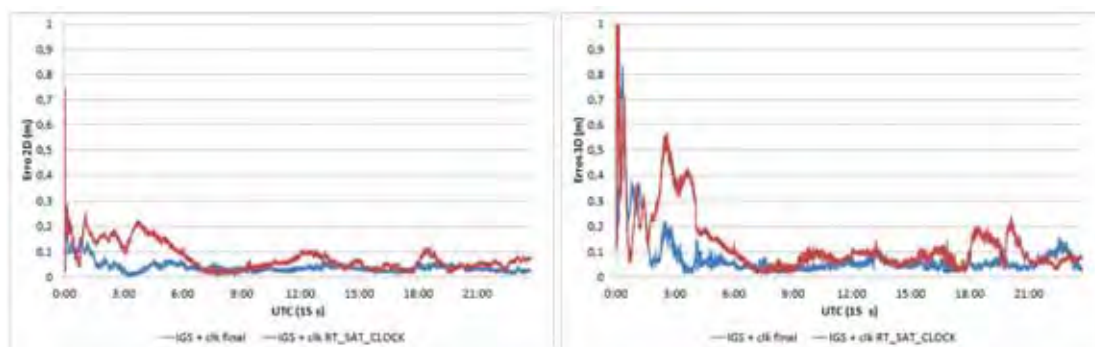


Figura 90 - Erros 2D e 3D para o PPP cinemático “IGS + clk final” e “IGS + clk RT_SAT_CLOCK”

Após a convergência do processamento, o PPP cinemático com correções geradas pelo RT_SAT_CLOCK apresentou valores no SGL abaixo de 0,20 m. As estatísticas diárias podem ser vistas na Tabela 19:

Tabela 19 - Estatística do PPP cinemático “IGS + clk final” e “IGS + clk RT_SAT_CLOCK”

| | | DE | DN | DU |
|-------------------------------|----------------------|-----------|-----------|-----------|
| IGS + clk final | Erro médio | 0,007 | -0,015 | -0,009 |
| | Desvio-padrão | 0,040 | 0,021 | 0,109 |
| | EMQ | 0,041 | 0,026 | 0,109 |
| IGS + clk RT_SAT_CLOCK | Erro médio | 0,037 | -0,023 | 0,017 |
| | Desvio-padrão | 0,067 | 0,052 | 0,172 |
| | EMQ | 0,077 | 0,057 | 0,173 |

O EMQ diário é maior na componente altimétrica e foi de 0,109 m e 0,173 m, respectivamente, para o PPP com IGS+clk final e para o PPP com IGS + clk RT_SAT_CLOCK.

O EMQ diário para a componente DE foi de 0,041 e de 0,077 m, respectivamente, para as soluções de PPP cinemático com IGS+clk final e IGS + clk RT_SAT_CLOCK. No caso da componente DN, os valores foram respectivamente de 0,026 e 0,057 m para os dois tipos de solução de PPP cinemático.

8.3.2.2 PPP para vôo de aeronaves utilizando as correções do RT_SAT_CLOCK

As correções geradas pelo *software* RT_SAT_CLOCK com base na solução de código e fase foram aplicadas no processamento PPP cinemático com o *software* RT_PPP para os dados GPS de um vôo teste realizado por uma aeronave regional no dia 244 de 2009. Os dados foram cedidos pela empresa brasileira Embraer e a trajetória aproximada percorrida pelo avião (situação sem escala) pode ser vista na Figura 91:

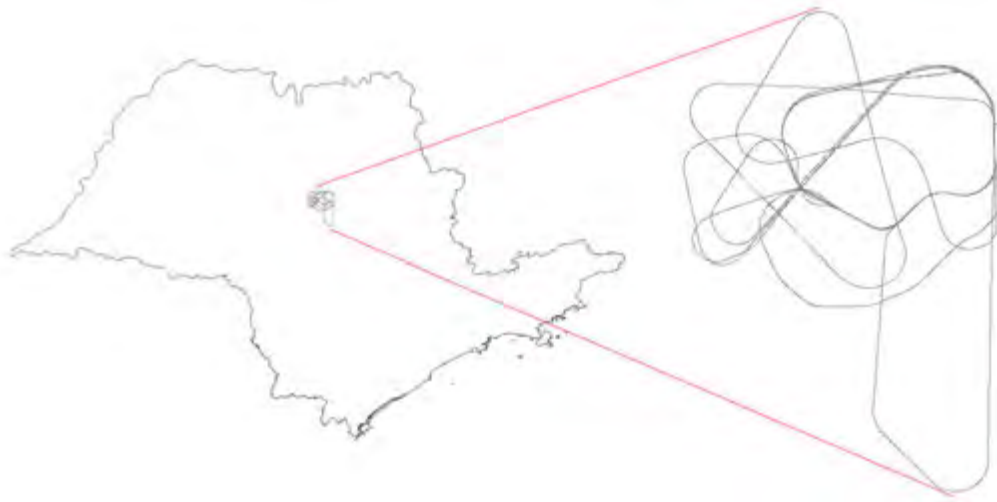


Figura 91 - Trajetória percorrida pelo avião no vôo do dia 244 de 2009

Os dados foram coletados a taxa de 0,5 segundos pelo receptor embarcado na aeronave. Para obter os valores das coordenadas de referência, os dados foram processados no *software* GPSPPP do NRCan disponível na FCT/UNESP, onde foram utilizadas órbitas precisas e correções finais do IGS para os relógios dos satélites na solução *ion-free* com estimativa da troposfera. A Figura 92 mostra as precisões das coordenadas estimadas pelo *software* GPSPPP:

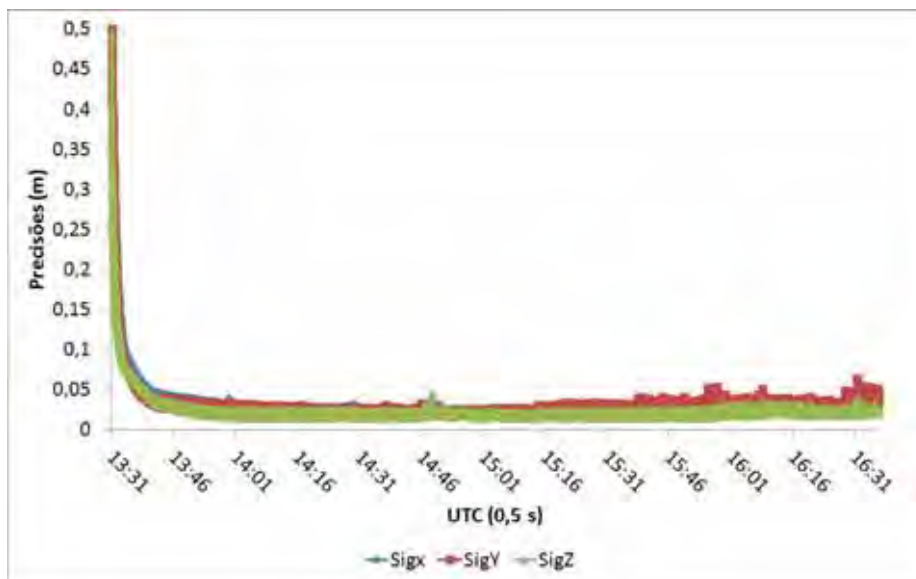


Figura 92 - Precisões das coordenadas do avião (vôo da Embraer) estimadas pelo *software* GPSPPP

As precisões das coordenadas do avião estimadas pelo GPSPPP foram da ordem de 0,05 m.

Os dados foram processados pelo *software* RT_PPP utilizando órbitas finais e correções dos relógios estimadas pelo RT_SAT_CLOCK e posteriormente, as coordenadas obtidas foram comparadas com a solução de referência gerada pelo GPSPPP, obtendo assim as discrepâncias entre as duas soluções.

As coordenadas foram geradas no ITRF2005, visto que a órbita precisa é dada neste sistema para a época dos dados em questão. A altitude geométrica da trajetória do avião estimada pelo *software* RT_PPP pode ser vista na Figura 93:

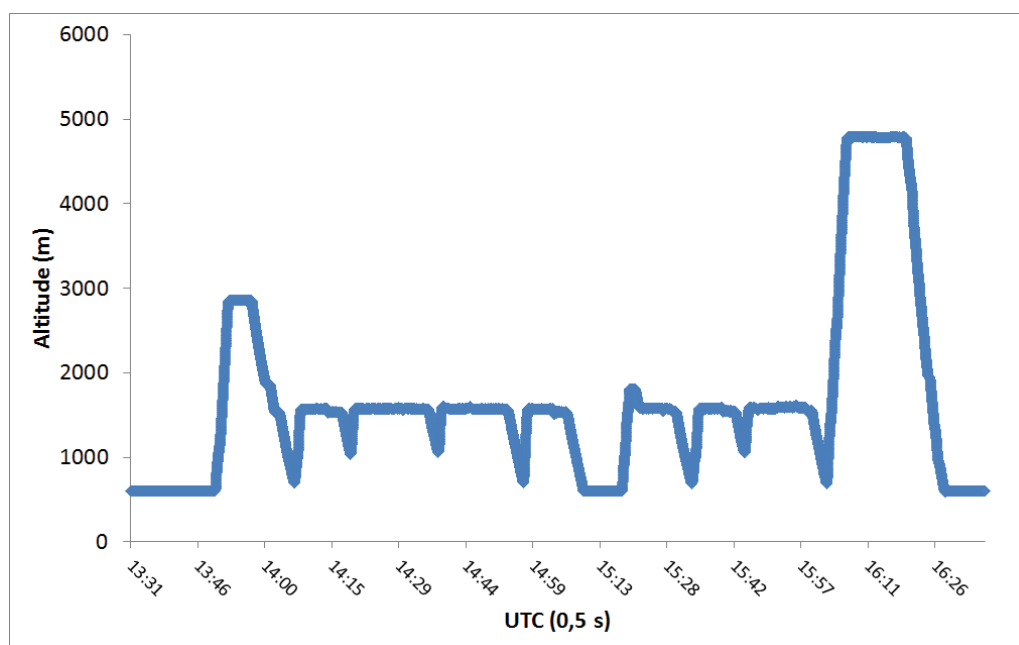


Figura 93 - Altitude geométrica do avião em trajetória estimada pelo *software* RT_PPP

A partir da Figura 93, nota-se que o avião realiza manobras bruscas subindo e descendo para realizar os testes de vôo. Essas mudanças afetam a estimativa do efeito da troposfera devido à mudança de pressão. Os valores estimados do atraso troposférico ZTD pelos *softwares* GPSPPP e pelo RT_PPP (com solução de relógio pelo RT_SAT_CLOCK) são mostrados na Figura 94:

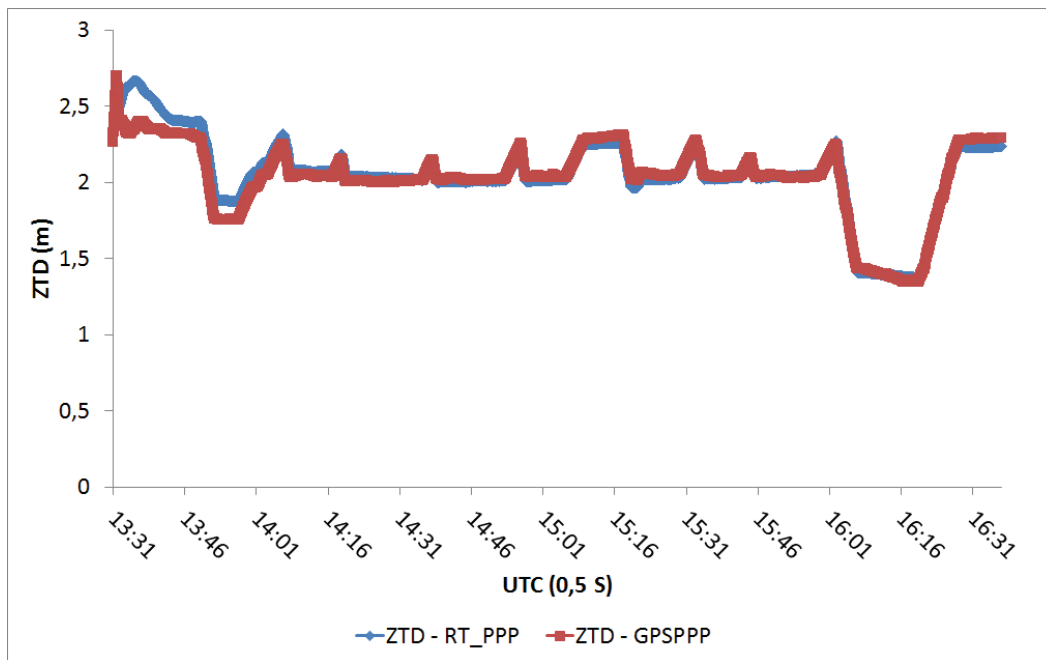


Figura 94 - ZTD estimado pelos softwares GPSPPP e RT_PPP para o voo da aeronave

As séries temporais das discrepâncias em 2D e 3D são apresentadas na Figura 95:

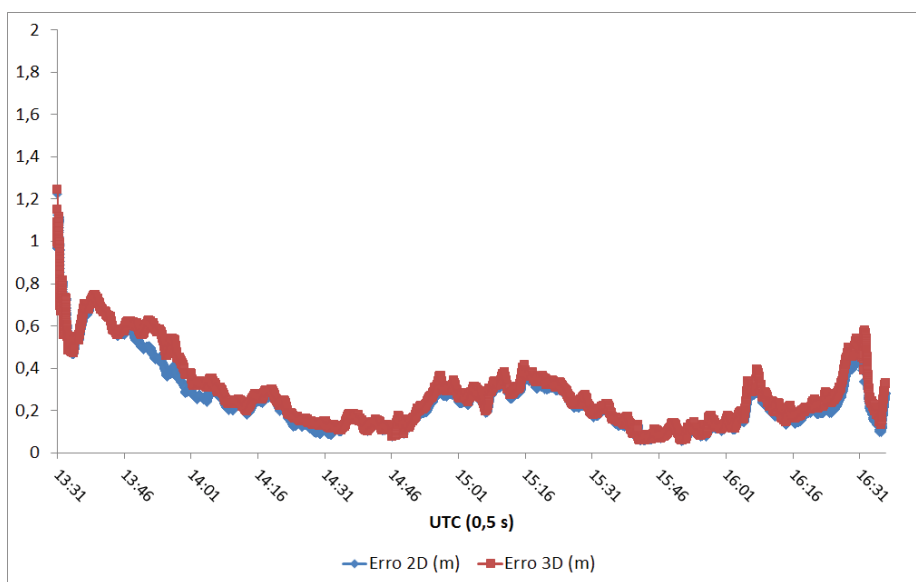


Figura 95 - Discrepância 2D e 3D das coordenadas do avião no PPP utilizando correção do relógio estimada pelo RT_SAT_CLOCK

A Tabela 20 mostra as estatísticas diárias das discrepâncias nas coordenadas estimadas pelo *software* RT_PPP no modo PPP cinemático para o voo da aeronave no dia 244 de 2009.

Tabela 20 - Estatísticas do PPP para o voo da aeronave

| | DX | DY | DZ |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|
| Erro médio | -0,010 | 0,095 | 0,013 |
| Desvio-padrão | 0,274 | 0,090 | 0,130 |
| EMQ | 0,274 | 0,131 | 0,131 |

O EMQ diário foi de 0,274; 0,131 e 0,131 m, respectivamente para as componentes DX, DY e DZ.

A convergência do PPP realizado pelo *software* RT_PPP foi alcançada após aproximadamente 10 minutos de dados processados, o que pode ser confirmado pela série temporal das precisões das coordenadas estimadas apresentada na Figura 96:

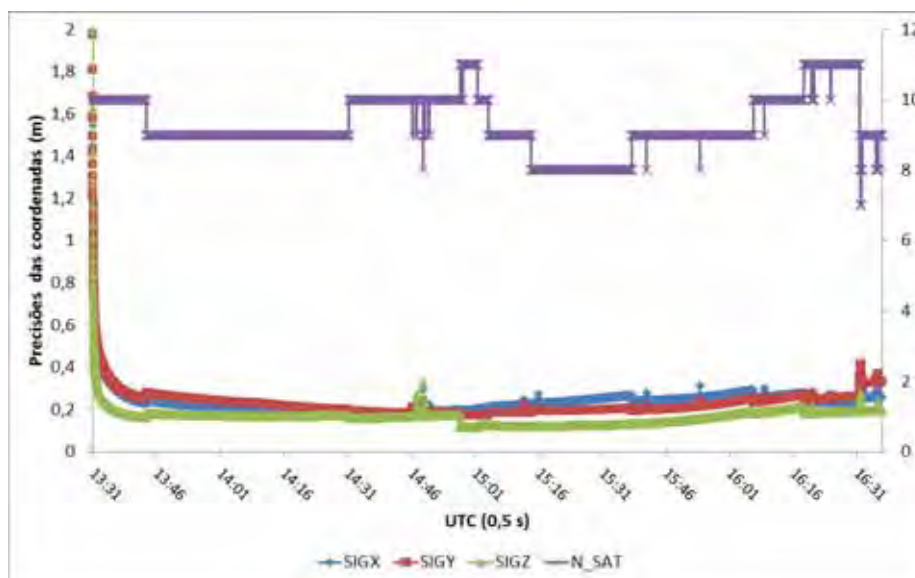


Figura 96 - Precisões das coordenadas do avião estimadas pelo RT_PPP

Ao final do processamento aparecem alguns saltos na série temporal das coordenadas, o que pode ter ocorrido devido à diminuição no número de satélites para o processamento (Figura 96), visto que a geometria dos satélites é crítica para o PPP cinemático.

É importante destacar que nas aplicações de PPP em tempo real na prática, o usuário poderá observar somente as precisões das coordenadas estimadas para avaliar o nível

de qualidade do processamento. No caso do vôo da aeronave, as precisões estimadas pelo *software* RT_PPP usando as correções do RT_SAT_CLOCK são da ordem de 0,20 m após o período de convergência do PPP cinemático.

9 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A realização do PPP em tempo real requer a disponibilidade de órbitas e a estimativa das correções dos relógios dos satélites em tempo real. Nesse trabalho foram propostas a investigação e a implementação de metodologia para estimativa das correções dos relógios dos satélites, além da aplicação dessas correções no PPP em tempo real.

A aplicação da metodologia envolveu o desenvolvimento de um sistema composto por dois *softwares*, sendo um para estimar as correções dos relógios dos satélites em tempo real, denominado RT_SAT_CLOCK, e o outro para processar os dados GNSS no modo PPP em tempo real, denominado RT_PPP. A comunicação em rede e decodificação das medidas GNSS no formato RTCM foram desenvolvidas com base nos aplicativos disponibilizados pelo BKG.

Para a estimativa das correções dos relógios dos satélites com o RT_SAT_CLOCK adotou-se o método de PPP em rede, o qual é o mais utilizado atualmente pelos centros operacionais que contribuem com o IGS. A partir deste método, é possível estimar as correções dos relógios dos satélites utilizando as observáveis pseudodistância suavizadas pela fase da onda portadora ou a pseudodistância e a fase sem diferenciações.

Ao utilizar a pseudodistância suavizada pela fase no método de PPP em rede, estimam-se as correções dos relógios dos receptores e dos relógios dos satélites, podendo estimar também o atraso troposférico ou corrigir este efeito com base em modelos de PNT. As ambiguidades da fase são eliminadas no processo de diferenciação entre épocas quando se realiza o processo de suavização da pseudodistância.

Para a aplicação do método PPP em rede com as pseudodistâncias e fase sem diferenciações, se faz necessário a estimativa das ambiguidades (solução *float*) da fase juntamente com as correções de relógios dos receptores, correções dos relógios dos satélites, além do atraso troposférico, sendo que este último parâmetro pode ser corrigido com base nos dados do modelo de PNT.

A utilização das pseudodistâncias e fase no método PPP em rede traz o inconveniente relacionado ao número de parâmetros e o gerenciamento dos mesmos em nível de implementação em *software*. Contudo, obtêm-se resultados mais acurados do que a utilização das pseudodistâncias suavizadas pela fase.

Os experimentos realizados envolveram primeiramente o processamento PPP com o *software* RT_PPP no modo pós-processado. Estes experimentos objetivaram avaliar o nível de acurácia das coordenadas estimadas. O PPP para dados de simples

frequência utilizando somente o código (pseudodistância) mostrou a importância das implementações adequadas dos modelos para obtenção de coordenadas com boa qualidade no PPP.

Ao realizar o PPP para dados de simples frequência envolvendo o código e a fase, procurou-se destacar as opções disponíveis para correção da ionosfera ou a técnica de estimativa deste parâmetro tratando-o como uma pseudo-observação no ajustamento dos dados no PPP estático. O processamento PPP no modo estático com estimativa da ionosfera foi realizado para dados GPS do ano de 2003 e de 2009 correspondendo à períodos de alta e baixa atividade ionosférica, respectivamente. Em ambos os casos, os “erros” das coordenadas estimadas ficaram abaixo de 10 cm ao final do processamento PPP estático. A pseudo-observação do efeito ionosférico foi tratada como um processo *white noise* no Filtro de Kalman e, neste caso, geralmente, os parâmetros estimados absorvem outros efeitos ou apresentam saltos quando uma nova ambiguidade é inicializada. Porém é importante ressaltar que no caso do PPP com estimativa da ionosfera, o interesse maior foi na estimativa das coordenadas incógnitas da estação.

O processamento PPP para dados de dupla frequência no modo pós-processado mostrou que é possível estimar as coordenadas com acurácia melhor que 10 cm para o caso estático e da ordem de 15 cm para o caso cinemático. Foram realizados experimentos para diversas estações ao redor do planeta para confirmar o nível de acurácia alcançado com a realização do PPP utilizando o *software* RT_PPP.

Após as análises do PPP no modo pós-processado, foram realizados experimentos para analisar a qualidade da estimativa das correções dos relógios dos satélites com o *software* RT_SAT_CLOCK.

Primeiramente foram analisados os modelos de predição com base no ajustamento do polinômio de segunda ordem ou num modelo de regressão linear (equação da reta) à série de dados das correções dos relógios dos satélites estimados. Para cada satélite da constelação GPS, o coeficiente de correlação linear calculado apresentou valores acima de 99%. Esse coeficiente mede o grau de relacionamento entre as variáveis, no caso, as correções dos relógios e a reta ajustada. Dessa forma, para o caso da predição dos relógios atômicos dos satélites GPS, pode-se utilizar o modelo de uma reta. Porém, é necessário adotar os valores adequados para o ruído na etapa de predição do Filtro de Kalman com o objetivo de compensar os efeitos estocásticos inerentes aos relógios atômicos dos satélites.

Análises com base na equação de variância de Allan mostraram que os relógios dos satélites apresentam, no geral, estabilidade da ordem 1.10^{-11} s. A estabilidade do

relógio do satélite PRN 25 do Bloco IIF foi de $5,924.10^{-12}$ s. Verificou-se também que as correções dos relógios possuem comportamento tipicamente de um processo *random walk*, permitindo definir estratégias para a composição dos ruídos da MVC na etapa de predição do Filtro de Kalman.

A estimativa das correções dos relógios dos satélites foi realizada a princípio com base na utilização das observáveis de pseudodistâncias suavizadas pela fase, onde foram utilizados dados de 40 estações distribuídas globalmente no dia 244 de 2009. A comparação da estimativa das correções dos relógios dos satélites com a correção fornecida pelo IGS requer que seja removida a tendência dos valores estimados, o que é feito removendo-se o valor médio das correções de toda a constelação em cada época. No caso do uso da pseudodistância, a acurácia da estimativa tomando como referencia a solução final do IGS foi de aproximadamente 0,8 ns (25 cm). No processo de estimativa das correções dos relógios dos satélites, a utilização do modelo de troposfera europeu ECMWF juntamente com a VMF forneceu resultados semelhantes à estimativa da troposfera.

No caso da estimativa das correções dos relógios dos satélites utilizando as observáveis pseudodistância e fase, o processamento foi realizado primeiramente utilizando os dados do dia 244 de 2009 e utilizando dados GPS de 30 estações com estimativa das correções dos relógios, da troposfera e das ambiguidades. A precisão formal das correções estimadas foi da ordem de 0,5 ns. A estimativa também foi realizada para dados GPS do ano de 2012 e as precisões formais neste caso, foram da ordem de 0,15 ns.

Foram realizadas análises com o *software* RT_PPP na versão para tempo real utilizando as correções dos relógios dos satélites estimadas pelo BKG juntamente com o uso das órbitas preditas IGU. No caso do PPP cinemático em tempo real utilizando os dados GPS da estação PPTE recebidas do caster do LGE, a acurácia das coordenadas estimadas foi da ordem de 20 cm. O PPP em tempo real no modo estático foi realizado para a estação LGE2 com os dados GPS recebidos via porta serial. A precisão das coordenadas estimadas no caso estático foi da ordem de milímetros.

As correções dos relógios dos satélites estimadas pelo *software* RT_SAT_CLOCK foram aplicadas em processamentos PPP no modo cinemático simulando tempo real. Ao utilizar a correção estimada com base na pseudodistância suavizada pela fase, a acurácia das coordenadas no modo PPP cinemático foi da ordem de 50 cm. Já ao utilizar as correções dos relógios dos satélites estimadas com base na pseudodistância e fase, a acurácia das coordenadas foi da ordem de 20 cm semelhantes ao PPP utilizando as correções do BKG. As correções dos relógios dos satélites estimadas com base na pseudodistância e fase foram

aplicadas para dados coletados pelo receptor embarcado numa aeronave regional no vôo do dia 244 de 2009, cujos dados foram cedidos pela empresa brasileira Embraer. Os valores de referência das coordenadas do avião foram obtidas via processamento PPP (pós-processado) com o *software* de PPP do NRCan (GPSPPP) e a comparação forneceu discrepâncias da ordem de aproximadamente 20 cm.

Para a realização dos experimentos neste trabalho foram desenvolvidos dois *softwares*, sendo um para a realização do PPP e outro para a estimativa das correções dos relógios dos satélites. Desta forma, espera-se ter um sistema completo para realizar a tarefa de PPP em tempo real, sendo que esse desenvolvimento é pioneiro no Brasil, caracterizando assim uma tese inserida num processo de inovação tecnológica.

As implementações para a estimativa das correções dos relógios dos satélites foram realizadas a partir do uso das medidas de pseudodistância e fase nas frequências L1 e L2 da constelação de satélites GPS. Dessa forma, recomenda-se para trabalhos futuros, a utilização dos novos sinais dos satélites GPS. Pode-se utilizar, por exemplo, as observáveis tradicionais nas frequências L1 e L2 juntamente com as observáveis na frequência L5 aplicando técnicas de processamento, tal com a estimativa da ionosfera.

Todas as observações relacionadas aos atuais e novos sinais do GPS podem ser aplicadas no PPP em tempo real sem considerar o processo de combinação *ion-free* para eliminar o efeito da ionosfera. Desta forma, o modelo deverá estimar a ionosfera, ou utilizar a correção deste efeito advinda de uma fonte externa, a qual pode ser enviada via o protocolo NTRIP juntamente com as correções dos relógios dos satélites.

Além do sistema GPS, as observações dos sistemas GLONASS e GALILEO podem ser utilizadas, seja para a estimativa das correções dos relógios dos satélites destas constelações como para aplicação no PPP em tempo real. Para o caso do PPP em tempo real, o número de observações dos três sistemas, GPS, GLONASS e GALILEO fornecerá boa redundância, o que é bom para a solução de PPP, principalmente no método PPP cinemático em tempo real, onde o problema de geometria dos satélites afeta significativamente a estimativa das coordenadas.

Para o caso deste trabalho, as órbitas utilizadas foram as previstas do IGS (órbita IGU), porém, é possível utilizar as órbitas estimadas em tempo real pelo BKG ou outros centros. Como trabalhos futuros, é possível também estimar as órbitas dos satélites, considerando o aplicativo desenvolvido, o qual utiliza dados de uma rede GNSS. Além disso, outros parâmetros podem ser estimados, tais como a ionosfera, os quais poderão ser enviados aos usuários em tempo real via o protocolo NTRIP.

Além disso, como trabalhos futuros, recomenda-se implementações relacionadas com a solução das ambiguidades como valores inteiros no PPP em tempo real e a integração de métodos de estimativa das correções dos relógios dos satélites em tempo real, tais como o uso de DDs no tempo e o método de PPP em rede.

REFERÊNCIAS

ALLAN, D. W.; BARNES, J. A modified “Allan variance” with increased oscillator characterization ability. **Proceedings** of the 35th Ann. Freq. Control Symposium, 1981. p. 470-475.

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

ASHBY, N. The Sagnac Effect in the Global Positioning System. In RIZZI, G; RUGGIERO, M. L. **Relativity in Rotating Frames: Relativistic Physics in Rotating Reference Frames**, Dordrecht, Holanda: Kluwer Academic Publishers, 2004. Cap. 1, p. 11-28.

ASHBY, N.; SPILKER JR, J.J. Introduction to Relativistic Effects on the Global Positioning System. In PARKINSON, B.W.; SPILKER JR, J.J. **Global Positioning System: Theory and Applications**, Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996. vol. 1, Cap. 18, p. 623–697.

BAR-SEVER, Y.; YOUNG, L.; STOCKLIN, F.; HEFFERNAN, P.; RUSH J. The NASA Global Differential GPS System (GDGPS) and The TDRSS Augmentation Service for Satellites (TASS). In: **Proceeding** of ESA’s 2nd Workshop on navigation equipment, Noordwijk, The Netherlands, 2004

BASSIRI, S.; HAJJ, G. A. Higher-order ionospheric effects on the global positioning systems observables and means of modeling them, **Manuscr.Geod.**, 18, 280– 289, 1993.

BERTIGER, W. I.; BAR-SEVER, Y. E.; HAINES, B. J.; LIJIMA, B. A.; LICHTEN, S. M.; LINDQWISTER, U. J.; MANNUCCI, A. J.; MUELLERSCHOEN, R. J.; MUNSON, T. N.; MOORE, A. W.; ROMANS, L. J.; WILSON, B. D.; WU, S. C.; YUNCK, T. P. A Prototype Real-Time Wide Area Differential GPS System. In: **National Technical Meeting of The Institute of Navigation**, Santa Monica, CA, jan. 1997

BKG, Federal Agency for Cartography and Geodesy .Disponível em: <<http://software.rtcntrip.org/export/HEAD/ntrip/trunk/BNS/bnshelp.html#rtcm3>>. Acesso em jan. 2012.

BLEWITT, G. An automated editing algorithm for GPS data. **Geophys. Res. Lett.**, v. 17, n. 3, p. 199-202, mar. 1990.

BLUNT, P. **Advanced Global Navigation Satellite System Receiver Design**. 2007. 223 f. PhD. Thesis, University of Surrey, England, UK, 2007.

BOEHM, J.; SCHUH, H. Vienna Mapping Functions in VLBI Analyses. **Geophys. Res. Lett.** 2004. 31, L01603, doi:10.1029/2003GL018984.

BOEHM, J.; NIELL, A.; TREGONING, P.; SCHUH, H. Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data, **Geophysical Research Letters**. 2006. Vol. 33, L07304, doi: 10.1029/2005GL025546.

BOEHM, J.; WERL, B.; SCHUH, H. Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data, **J. Geophys. Res.** 2006. 111, B02406, doi: 10.1029/2005JB003629.

BORRE, K.; AKOS, D. M; BERTELSEN, N.; RINDER, P.; JENSEN, S. H. **A software-defined GPS and Galileo receiver**. 1.ed. Boston: Birkhäuser, 2007. 176p.

BROWN, R. G.; HWANG, P. Y. C. **Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering**: With Matlab exercises and solutions. 3. ed. Canada: John Wiley & Sons, Inc., 1997. v.3.

CAMARGO P. O. **Controle de qualidade aplicado ao Filtro de Kalman**, Curitiba, 1992. 94 p. Dissertação (Mestrado) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

_____. **Modelo regional da ionosfera para uso em receptores de uma frequência**. 1999. 191 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

CANTÚ, E. **Redes de computadores e internet**. CEFET/SC, São José. 2003. Disponível em: <<http://www.das.ufsc.br/~montez/Disciplinas/materialRedes/ApostilaCantu.pdf>>. Acesso em: jan. 2012.

CERRETTO, G. TAVELLA, P. Statistical Constraints on Station Clock Parameters in the NRCAN PPP Estimation Process, In: **40th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting**- 2008

CHONG, C. Status of COMPASS/BeiDou Development, In: **Stanford's 2009 PNT Challenges and Opportunities Symposium** - 2009.

CIRAOLO, L.; AZPILICUETA, F.; BRUNINI, C.; MEZA, A.; RADICELLA, S. M. Calibration errors on experimental slant total electron content (TEC) determined with GPS. **Journal of Geodesy**. v. 81, n. 2, p. 111-120, fev. 2007.

COMER, D.E. - **Interligação em redes com TCP/IP: princípios, protocolos e arquitetura**. Rio de Janeiro: Elsevier/Campus, 1998.v. 1.

COSTA, S. M. A.; LIMA M. A. A.; MOURA JR., N. J.; ABREU, M. A.; FORTES, L. P. S. RBMC em tempo real, via NTRIP, e seus benefícios nos levantamentos RTK e DGPS. In: II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 2008. Recife - PE. **Anais...** Recife-PE: UFPE, 2008.

DACH, R. et al. (Ed.). **Bernese GPS software version 5.0: user manual**. Astronomical Institute, University of Bern, 2007.

DAVIES, K. **Ionospheric radio**. London: Peter Peregrinus Ltd., 1990. 580p.

DSA-**Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais** .INPE/CPTEC. Disponível em: <<http://pindara.cptec.inpe.br/zenital/previsao.jsp>>. Acesso em: set. 2009.

DUCHESNE, P. L., FLEURY, R. Correction of Cycle Slips in Stand-Alone GPS Receiver data for Phase Scintillation Index Evaluation. In: **Proceedings** of URSI General Assembly, New Delhi, 2005

ESA (2012).**European Space Agency: In-Orbit Validation**. Disponível em <http://www.esa.int/SPECIALS/Galileo_IOV/>. Acesso em: jan. 2012.

FAUSTINO, R. C. **Posicionamento Por Ponto Preciso estático e cinemático**. 2006. 105 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2006.

FORTES, L. P. S., **Optmising the Use of GPS Multi-Reference Stations for Kinematic Positioning**, PhD. Thesis, University of Calgary, 2002

GDGPS (2012).**System Description - Network**. Disponível em: <<http://www.gdgps.net/system-desc/network.html>>. Acesso em: jan. de 2012.

GELB, A.; KASPER JR., J. F.; NASH JR., R. A.; PRICE, C. F.; SUTHERLAND JR., A. A. **Applied optimal estimation**. Cambridge, Massachusetts: The M.I.T. Press, 1974. 374p.

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

GENG, J.; TEFERLE, F N; MENG, X.; DODSON, A H. Towards PPP-RTK: Ambiguity resolution in real-time precise point positioning. **Advances in Space Research**, 2011.v.47, p. 1664-1673.

GOAD, C. Surveying with the Global Positioning System. In PARKINSON, B. W.; SPILKER JR., J. J. **Global Positioning System: Theory and applications.** Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996. v. 2, Cap. 18, p.501-517.

GREGORIUS THIERRY. **How it works...GIPSY OASIS II.** Department of Geomatics University of Newcastle upon Tyne, 1996.

HAN, S. C.; KWON, J. H.; JEKELI, C. Accurate absolute GPS positioning through satellite clock error estimation. **Journal of Geodesy**. v. 75, p. 33-43, 2001.

HAUSCHILD, A.; MONTENBRUCK, O. Kalman-filter-based GPS clock estimation for near real time positioning. **GPS Solut.** v. 13, p. 173-182, nov. 2008.

HAUSCHILD, A. **Precise GNSS Clock-Estimation for Real-Time Navigation and Precise Point Positioning.** 2010. PhD Thesis - Technical University of Munich. Munich, Alemanha. 2010.

HECKERT, N. A.; FILLIBEN, JAMES J. NIST Handbook 148: **DATAPLOT Reference Manual**, Volume I: Commands. National Institute of Standards and Technology Handbook Series, June 2003.

HERNÁNDEZ-PAJARES, M.; JUAN, J. M; SANZ, J., ORÚS, R.; SALAZAR, D. **Impact and implementation of the second order ionospheric term in GPS positioning (Summary).** Barcelona, Spain. Research group of Astronomy and Geomatics - Technical University of Catalonia, 23pp, 2005.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. **Global Positioning System: theory and practice.** 5.ed. New York: Springer-Verlag, 2001. 382p.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. **GNSS-Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, GALILEO & more.** New York: Springer-Verlag, 2008. 516p.

HOQUE, M. M.; JAKOWSKI, N. Higher order ionospheric effects in precise GNSS positioning. **J. Geodesy**, DOI 10.1007/s00190-006-0106-0, set. 2006.

IBGE - Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc/ntrip/>>. Acesso em: jan. 2012.
INCRA. **Norma técnica para georreferenciamento de imóveis rurais**. 2. ed. Brasília. ago. 2010.

IGS - **International GNSS Service**. Disponível em: <<http://igsb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>>. Acesso em: Jan. 2011.

IGS Mail # 5078 (2004). **P1C1**. Disponível em: <<http://igsb.jpl.nasa.gov/mail/igsmail/2005/msg00001.htm>>. Acesso em: set. 2009.

JIN. X. X. **Theory of carrier adjusted DGPS positioning approach and some experimental results**. 1996. PhD Thesis - Delft University of Technology, Delft, Holanda. 1996.

KALMAN, R. E. A new approach to linear filtering and prediction problems. **Transactions of the ASME –Journal of Basic Engineering**, v.82, p.35-45, 1960.

KAPLAN, E. D. **Understanding GPS: principles and applications**. 2 ed. Boston: Artech House, Inc., 1996. 554p.

KEDAR, S.; HAJJ, A.; WILSON, B. D.; HEFLIN, M. B. The effect of the second order GPS ionospheric correction on receiver positions, **Geophys. Res. Lett.**, v. 30, n. 16, 2003.

KING, R. W.; BOCK, Y. **Documentation for the GAMIT GPS analysis software**. Mass. Inst. of Technol., Cambridge Mass, 1999.

KIM, B. C.; TININ, M. V. Contribution of ionospheric irregularities to the error of dual-frequency GNSS positioning. **J. Geodesy**, DOI: 10.1007/s00190-006-0099-8, set. 2006.

KLOBUCHAR, J. A. Ionospheric effects on GPS. In: PARKINSON, B. W.; SPILKER JUNIOR, J. J. **Global Positioning System: theory and applications**. Washington, Dc: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, 1996. Cap. 12, p. 485-515.

KOUBA, J. **A guide to using International GNSS Service (IGS) products**. Geodetic Survey Division; Natural Resources Canada, 2009. Disponível em: <acc.igs.org/UsingIGSProductsVer21.pdf>. Acesso em: out. 2009.

KUROSE, J.F.; ROSS, K.W. **Redes de computadores e a internet: uma abordagem top-down**. 3. ed. São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2006. 656p.

LANGLEY, R.B. Propagation of the GPS signals. In: TEUNISSEN, P. J. G.; KLEUSBERG, A. **GPS for Geodesy**. 2. ed. Berlin: Springer-Verlag, 1998. cap.3, p.111-149.

LAURICHESSE, D. MERCIER, F.; BERTHIAS, J.P. Real-time PPP with undifferenced integer ambiguity resolution, experimental results. In: **Proceedings of ION GNSS 2010**, Portland, EUA. 2010.

LAURICHESSE, D., The CNES Real-time PPP with Undifferenced Integer Ambiguity Resolution Demonstrator. In: **Proceedings of ION GNSS 2011**, Portland, EUA. 2011.

LANGLEY, R. B. Second GPS IIF Satellite Finally Set Healthy. In: **GPS World 2011**. Disponível em: < <http://www.gpsworld.com/gnss-system/news/second-gps-iif-satellite-finally-set-healthy-12190> >. Acesso em: jan. 2012

LEANDRO, R. F. **Precise Point Positioning With GPS: A New Approach for Positioning, Atmospheric Studies and Signal Analysis**. 2009. PhD Thesis - University of New Brunswick, Canadá. 2009.

LEICK, A. **GPS satellite surveying**. New York: John Wiley & Sons, 1995. 560p.

_____. **GPS satellite surveying**. 3rd. ed.: New York: John Wiley & Sons, 2004. 435p.

LIU, G. C. **Ionosphere weighted global positioning system carrier phase ambiguity resolution**. 2001 157 f. M.Sc. dissertation. Department of Geomatics Engineering - The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.

MACHADO, W. C. **Solução rápida das ambigüidades GPS para aplicações no posicionamento relativo de linhas de base curtas**. 2001. 121 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2002.

MARQUES, H. A.; MONICO, J. F. G. Avaliação da qualidade das efemérides transmitidas dos satélites GPS. In: III Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, 2003, Curitiba. **Anais...** Curitiba: UFPR, 2003.

MARQUES, H. A.; MONICO, J. F. G.; KUGA, H. K. Análise comparativa dos modelos de pressão de radiação solar nos satélites GPS. In: **Série em Ciências Geodésicas**. 5.ed. Curitiba: UFPR. 2005, v. 5, p. 69-85.

MARQUES, H. A. **Influência da ionosfera no posicionamento GPS**: estimativa dos resíduos no contexto de duplas diferenças e eliminação dos efeitos de 2ª e 3ª ordem. 2008. 151 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2008.

MARQUES, H. A.; MONICO, J. F. G.; AQUINO, M. RINEX_HO: second- and third-order ionospheric corrections for RINEX observation files. In: **GPS Solutions**. Springer-Verlag, V. 15 p. 305–314, DOI: 10.1007/s10291-011-0220-1, 2011.

MATSUOKA, M. T. **Influência de diferentes condições da ionosfera no posicionamento por ponto com GPS**: Avaliação na região Brasileira. 2007. 263 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2007.

McCARTHY D. D.; PETIT G. IERS Conventions (2003), **IERS Technical Note 32**, Central Bureau of IERS- Observatoire de Paris.

MCNAMARA, L. F. **The ionosphere**: Communications, surveillance, and direction finding. Florida: Krieger Publishing Company, 1991. 237p.

MONICO, J F G ; CAMARGO, P O ; ALVES, D B M ; ROSA, G P S ; MARQUES, H. A. ; SILVA, H. A. Products and services of Sao Paulo State Active GNSS network. In: **Proceedings of The Meeting of the Americas, 2010**, Foz do Iguaçu – PR. 2010.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS**: descrição, fundamentos e aplicações. 2. ed São Paulo: Unesp, 2008. 476p.

MONICO, J. F. G.; CAMARGO, P. O.; SAPUCCI, L. F.; ALVES, D. B. M.; SOUZA, E. M.; FAUSTINO, R. C.; DALBELLO, L. F.; POLEZEL, W. C. **Rede GPS ativa do Estado de São Paulo**: suporte ao posicionamento geodésico. Relatório Científico N° 01. FAPESP – Auxílio à Pesquisa, Processo 04/03384-5. 2006.

MONTENBRUCK, O.; GILL, E. **Satellite orbits**: Models, Methods and Applications. Berlin, New York: Springer, 2005. 369p.

NIEVINSKI, F. G. **Ray-tracing Options to Mitigate the Neutral Atmosphere Delay in GPS**. 2009. M.Sc.E. thesis, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No. 262, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada. 2009. 232 pp.

NTRIP – **Networked Transport of RTCM via internet protocol**. Disponível em: <http://igs.bkg.bund.de/index_ntrip.htm>. Acesso em: 26 out. 2007.

ODIJK, D. **Fast precise GPS positioning in the presence of ionospheric delays**. 2002. 242 f. PhD dissertation, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Delft. 2002.

OLEYNIK, E. GLONASS: Status and Modernization. In: United Nations International Meeting on the Applications of Global Navigation Satellite Systems, 2011, Vienna, Austria **Proceedings**...dez. 2011. Disponível em:<<http://www.oosa.unvienna.org/pdf/sap/2011/un-gnss/02.pdf>>. Acesso em: jan. 2012.

PARKINSON, B. W.; ENGE, P. K. Differential GPS and integrity monitoring. In: PARKINSON, B. W.; SPILKER JR., J. J. **Global Positioning System: theory and applications**. Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996. v. 2, cap. 1.

PRESS, H. W.; FLANNERY, B. P.; TEULOSKY, S. A.; VETTERLING, T. W. **Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing**. New York: Cambridge University Press. 1986. 818p.

PETIT G.; LUZUM, B. IERS Conventions (2010), IERS Technical Note 36, Central Bureau of IERS- Frankfurt, Alemanha.

RAY, J. GRIFFITHS, J. Status of IGS Ultra-Rapid Products for Real-Time Applications. In: **Proceedings** of AGU Fall Meeting 2008. San Francisco, EUA, Dez. 2008.

REMONDI, B. W. Computing satellite velocity using the broadcast ephemeris. **GPS Solutions**. Springer-Verlag . V. 8 p. 181–183, DOI: 10.1007/s10291-004-0094-6, ago. de 2004.

RIZOS, C. **Principles of Satellite Positioning: Clock Behavior**. 1999. Disponível em:<http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/gps/gps_survey/chap1/chap1.htm>. Acesso em: Jan. de 2012.

ROPER, E. GPS Status and Modernization. In: **Munich Satellite Navigation Summit**, 2010. Munique, Alemanha, 2010.

RTCM. **RTCM recommended standards for differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems Service)**. Version 2.3. Radio technical commission for maritime services, Virginia. 2001.

RTCM. **RTCM recommended standards for differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems Service)**. Version 3.0. Radio technical commission for maritime services, Virginia. 2004.

RTCM. **RTCM recommended standards for differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems Service)**. Version 3.1. Radio technical commission for maritime services, Virginia. 2007.

RTPPP - **IGS Real Time Pilot Project**. Disponível em: <<http://www.rtigs.net>>. Acesso em: jan. 2012.

SAATKAMP, E. D. Compactação da mensagem RTCM tipo 1 para transmissão por meios de baixa capacidade: desenvolvimento de formato e testes práticos preliminares com DGPS. **Bol. Ciênc. Geod.**, Curitiba, v. 10, n. 2, p.241-252, jul.-dez. 2004.

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

_____. **Estimativas do IWV utilizando receptores GPS em bases terrestres no Brasil: sinergia entre Geodésia e Meteorologia**. 2005. 200 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2005.

SCHMID, R.; STEIGENBERGER, P.; GENDT, G. GE, M. ROTACHER, M. Generation of a consistent absolute phase center correction model for GPS receiver and satellite antennas. **Journal of Geodesy**. v. 81, p. 781-798, 2007.

SEEBER, G. **Satellite geodesy: foundations, methods, and applications**. 2. ed. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 2003. 589p.

SILBERSCHATZ, A. **Fundamento de sistemas operacionais**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010. 515p.

SILVA, H. A. **Avaliação de modelos estocásticos no posicionamento GNSS**. 2009. 108 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2009.

SILVA, H. A.; MONICO, J. F. G. **Integração de Linguagens de Programação**. Estágio não-obrigatório, - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2004.

SOLER, T..A compendium of transformation formulas useful in GPS work, **Journal of Geodesy**, 72(7-8), 482-490, (1998).

SPIPKER JR., J. J. **Global Positioning System: Theory and applications**. Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996. v. 1, Cap. 18.

STRANG, G.; BORRE, K. **Linear algebra, geodesy and GPS**. Wellesley-Cambridge Press, 1997, 624p.

TEUNISSEN, P. J. The GPS phase-adjusted pseudorange. In: **Proceedings of the Second International Workshop on High Precision Navigation**, Stuttgart, Freudenstadt, nov. 1991, p. 115-125.

_____. Quality control and GPS. In: TEUNISSEN, P. J. G.; KLEUSBER, A. **GPS for Geodesy**, 2. ed. Berlin: Springer-Verlag, 1998. p.271-318.

_____. **Dynamic data processing: Recursive least-squares**. Delft University Press, 2001.

THAYER, G. D. **An Improved Equation for Radio Refractive Index of Air**. Radio Science, n. 9, v. 10, p. 803-807, 1974.

USNO. **Cesium Atoms at Work**. 2012. Disponível em:<<http://tycho.usno.navy.mil/cesium.html>>. Acesso em: jan. de 2012.

VANNICOLA, F.; BEARD, R.; WHITE, J.; SENIOR, K. GPS Block IIF Atomic Frequency Standard Analysis. In: **Proceeding of 42nd Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting**, 2010. Reston, Virginia, EUA, 2010.

WANG, J. **Modelling and quality control for precise GPS and GLONASS satellite positioning**. 1999. 171 p. PhD Thesis - School of Spatial Sciences, Curtin University of Technology.

WEBER, G.; GONZÁLEZ-MATESANZ, J. F. **EUREF-IP for wireless GNSS/DGNSS: example implementation in Madrid, 2008**.

WEBER, G.; MERVAT, L.; DOUSA, J. Real-Time Clock and Orbit Corrections for Improved Point Positioning via NTRIP In: **Proceedings ... GNSS 2007**. Fort Worth. USA.

WILSON, B.; YINGER, C.; FEESSE, W. SHANK, C.; New and Improved: The Broadcast Interfrequency Biases, In: **GPS World**, USA, v.10 n.9, p. 56-66, set., 1999.

WITCHAYANGKOON, B. **Elements of GPS precise point positioning**. 2000. 265f. PhD Thesis in Spatial Information Science and Engineering. University of Maine, USA. 2000.

WMO. **Guide to Meteorological Instrument and Observing Practices**. World Meteorological Organization. Ed. 2, n. 8. 1961.

YAN, T. S. Test results from the next generation of NTRIP. In: IGNSS Symposium 2007, Sydney, Austrália. **Proceedings...** 2007.

ZEIMETZ, P.; KUHLMANN, H. On the Accuracy of Absolute GNSS Antenna Calibration and the Conception of a New Anechoic Chamber. In: FIG Working Week 2008, Stockholm, Suécia. **Proceedings...** 2008.

APÊNDICE A

1 Introdução à transmissão de dados GNSS via internet

A realização do PPP em tempo real requer que o usuário tenha a disposição as correções dos relógios dos satélites. Atualmente, uma das formas de envio utiliza o protocolo NTRIP e os formatos definidos pela RTCM. Esta seção visa dar uma breve introdução sobre a transmissão dos dados GNSS e correções utilizando o protocolo NTRIP e o formato RTCM.

2 NTRIP

Devido ao grande crescimento da capacidade da internet, aplicações que transmitem continuamente dados utilizando protocolos de internet, como por exemplo, rádio via internet, têm-se tornado serviços bem estabelecidos. Comparando com esse tipo de aplicação, a transferência de dados GNSS em tempo real via internet requer largura de banda (*bandwidth*) relativamente pequena (WEBER; GONZÁLEZ-MATESANZ, 2008).

A agência BKG da Alemanha, em cooperação com a Universidade de Dortmund, desenvolveu a técnica de disseminação de dados (*streaming data*) GNSS para usuários móveis. Essa técnica estabelece o protocolo aberto não proprietário denominado NTRIP, o qual utiliza o formato RTCM para a transmissão dos dados (NTRIP, 2007).

O NTRIP é um protocolo no nível de aplicação que suporta a transmissão de dados GNSS pela internet. Ele é um protocolo sem estado (*stateless*) baseado no HTTP/1.1 (*Hypertext Transfer Protocol/1.1*) e é designado para disseminar correções diferenciais (DGPS – *Differential GPS*) ou outros tipos de dados GNSS para usuários móveis ou estáticos, permitindo conexões simultâneas de computadores ou receptores a um hospedeiro que transmite os dados.

A unidade básica da comunicação HTTP, a qual consiste de uma sequência estruturada de octetos, é definida no protocolo e transmitida via conexão TCP/IP (*Transmission Control Protocol / Internet Protocol*). Clientes e servidores devem entender as mensagens de requisição HTTP e devem responder com mensagens de resposta HTTP adequadas (KUROSE; ROSS, 2006).

O NTRIP, com base no HTTP, consiste basicamente de três *softwares* componentes: NtripClient, NtripServer e NtripCaster. O NtripCaster é o programa servidor

HTTP, enquanto o NtripClient e o NtripServer atuam como clientes HTTP. A Figura 97 esquematiza a comunicação entre esses *softwares*.

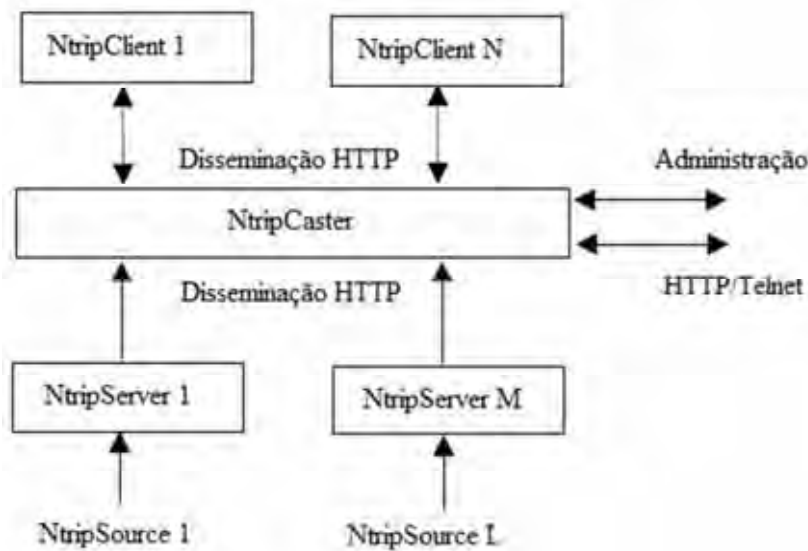


Figura 97 - Sistema NTRIP

Cada um dos *softwares* componentes será brevemente descrito a seguir (WEBER; GONZÁLEZ-MATESANZ, 2008):

- NtripServer - é usado para transferir dados GNSS de um NtripSource (coleta dados GNSS continuamente) para o NtripCaster. Antes de transmitir os dados usando uma conexão TCP/IP, o NtripServer envia requisição para o *mountpoint* (identificador ID do NtripSource) que é alocado para a transmissão específica dos dados. O *mountpoint* e as senhas são definidas pelo administrador do NtripCaster. Dessa forma, o NtripServer é simplesmente um *software* que envia dados recebidos (por exemplo a partir da porta serial de um receptor) para o NtripCaster;
- NtripCaster - é basicamente um servidor HTTP gerenciando um subconjunto de mensagens de requisições/respostas HTTP. Nesse caso, o NtripClient e o NtripServer agem como clientes HTTP. O NtripCaster aceita mensagens de requisição tanto do NtripServer como do NtripClient. Com base nas mensagens recebidas, o NtripCaster decide se há dados para serem recebidos ou para serem enviados;
- NtripClient - recebe dados de um NtripCaster depois de enviar uma mensagem de requisição. Relacionados com os formatos de mensagens e códigos de status,

a comunicação NtripClient-NtripCaster é totalmente compatível com HTTP 1.1. Uma requisição de cliente é designada como uma mensagem HTTP similar a mensagem do servidor NTRIP. O cliente precisa conhecer o *mountpoint* dos dados a serem recebidos. Um exemplo de mensagem para requisição dos dados é apresentado a seguir:

```
GET <mountpoint> HTTP/1.0 <CR><LF>
User-Agent: NTRIP<product|comment><CR><LF>
Authorization: Basic <user:password><CR><LF>
<CR><LF>
```

onde:

<mountpoint> se refere ao *mountpoint* da fonte requisitada;

<product|comment> é informação sobre o usuário agente originando a requisição;

<user:password> é a autenticação e autorização do usuário.

Em junho de 2002, a sub-comissão da IAG (*International Association of Geodesy*) para a Europa (EUREF) adotou a resolução para disseminar correções diferenciais no formato RTCM via internet para posicionamento DGPS e propósitos de navegação. Com base na Rede Permanente da EUREF (EPN - EUREF's *Permanet Network*), a qual contém aproximadamente 160 estações GNSS coletando dados em tempo real, encontra-se o projeto denominado *EUREF-IP Real-Time Pilot Project*. A partir desse projeto os *softwares* NTRIP foram desenvolvidos para vários sistemas operacionais (YAN, 2007).

Atualmente, muitos *softwares* e *hardwares* GNSS são produzidos com suporte ao NTRIP. Os receptores designados para Estações de Referência Operando Continuamente (CORS - *Continuously Operating Reference Station*), geralmente, já possuem a capacidade de um NtripServer, enquanto que os receptores designados como *rover* possuem a capacidade de um NtripClient, além de várias outras funcionalidades. Os *softwares* Leica Spider e Trimble GPSNet possuem suporte para o sistema completo, com capacidade de funcionar como Client, Server e Caster e, de uma forma geral, isso tem acelerado a aceitação e o uso do NTRIP (YAN, 2007).

3 Padrão RTCM

A RTCM é uma comissão que tem por objetivo desenvolver padrões e recomendações para sistemas e equipamentos eletrônicos e de comunicação da marinha dos EUA. Como eles são utilizados também pela comunidade técnica e científica, acabam se tornando padrões mundiais. O comitê especial número 104 (SC104 -*Special Committee*) da RTCM desenvolveu um padrão recomendado para os serviços relacionados ao GNSS que fazem uso do método diferencial (SAATKAMP, 2004).

O padrão estabelecido pela RTCM, atualmente, é aceito internacionalmente e praticamente todos os receptores tem suporte a esse padrão. A versão preliminar RTCM 1.0 foi estabelecida em 1985 sendo substituída pelo RTCM 2.0 em 1990 (SEEBER, 2003). A partir de então, novas versões desse padrão foram publicadas (versões 2.1, 2.2, 2.3) (RTCM, 2001). Atualmente, encontra-se disponível o RTCM 3.0 com a versão *release* 3.1 (RTCM 3.1), publicada em 31 de agosto de 2007 (RTCM, 2007), além da versão 3.x em fase de desenvolvimento para dar suporte ao PPP em tempo real. A próxima seção descreve os formatos RTCM na versão 3.0. A descrição dos formatos anteriores pode ser encontrada em Seeber (2003) e Saatkamp (2004).

3.1 RTCM 3.0

A versão 3.0 do formato RTCM foi desenvolvida como uma alternativa mais eficiente que as versões 2.x. Empresas relacionadas ao setor civil do GNSS requisitaram um novo padrão que seria mais eficiente, fácil de usar e mais facilmente adaptável a novas situações. A principal limitação era que o esquema de paridade da versão 2.x, que usa palavras com 24 bits de dados seguida por 6 bits de paridade, usava muita largura de banda. Outras limitações podem ser citadas, tais como, a paridade não era independente de palavra para palavra e mesmo com tantas palavras dedicadas à paridade, a integridade das mensagens não era tão garantida como deveria ser, além disto, palavras de 30 bits eram difíceis de manusear. Dessa forma, a nova versão 3.0 veio com o objetivo de resolver esses problemas (RTCM, 2004).

A versão inicial do padrão RTCM 3.0, consiste primeiramente de mensagens designadas para dar suporte ao RTK (GPS e GLONASS) e a razão para essa escolha é que o RTK envolve a transmissão de muitas informações, o que faz que a maioria

dos formatos de dados seja beneficiada. A versão 3.0 permite o envio das observáveis de código e fase, parâmetros de antena e dados auxiliares.

A versão do RTCM 3.1, descreve mensagens e técnicas para suportar operações GPS e GLONASS, seja em uma única estação ou em uma rede de estações. Entretanto, o formato é especificamente designado para tornar fácil a acomodação de novos sistemas que estão em desenvolvimento, em particular o GALILEO, bem como a modernização dos sistemas atuais como, por exemplo, os novos sinais L2C e L5. Essa versão também pode dar suporte aos sistemas de augmentação (*augmentation systems*) que utilizam satélites geostacionários (RTCM, 2007).

O propósito da versão 3.1 é fornecer integridade e a capacidade para integração de futuras aplicações de uma maneira eficiente. Na verdade para promover essas qualidades do padrão foi definido o uso de camada adaptadas do modelo OSI (*Open Systems Interconnection*) composto por diversas camadas, as quais envolvem: camada de aplicação; camada de apresentação; camada de transporte; camada de *link* de dados e camada física (CANTÚ, 2003; KUROSE; ROSS, 2006).

A camada de aplicação define como as mensagens no formato RTCM podem ser utilizadas para diferentes aplicações de posicionamento e navegação. A camada de apresentação define os diferentes tipos de mensagens e as definições dos dados a serem enviados. A camada de transporte inclui as definições dos quadros de mensagens, os métodos de implementação e a Checagem de Redundância Cíclica (CRC) que fornece integridade das mensagens. A camada de *link* de dados é muito próxima da camada física, a qual define como os dados são enviados no nível elétrico e mecânico (RTCM, 2007).

Os tipos de mensagens contidas na versão 3 foram estruturadas em diferentes grupos como mostrados na Tabela 21. Então para determinadas aplicações o provedor dos dados pode transmitir mensagens de cada um dos vários grupos. Em particular, o provedor deve transmitir no mínimo mensagens do tipo de cada um dos seguintes grupos: Observação, Coordenadas da Estação, e Descrição da Antena.

Tabela 21 - Mensagens do grupo RTK

| Nome do grupo | Nome do sub-grupo | Tipo da mensagem |
|-------------------------------------|--|--|
| Observações | GPS L1 | 1001 |
| | | 1002 |
| | GPS L1/L2 | 1003 |
| | | 1004 |
| | GLONASS L1 | 1009 |
| | | 1010 |
| | GLONASS L1/L2 | 1011 |
| 1012 | | |
| Coordenadas da estação | | 1005 |
| | | 1006 |
| Descrição da antena | | 1007 |
| | | 1008 |
| Correções RTK em rede | Dados auxiliares das estações da rede | 1014 |
| | Diferenças de correções ionosféricas | 1015 |
| | Diferenças de correções geométricas | 1016 |
| | Diferenças das correções ionosféricas e geométricas combinadas | 1017 |
| Informações de operações auxiliares | Parâmetros do sistema | 1013 |
| | Dados de efemérides dos satélites | 1019 |
| | | 1020 |
| | String de texto | 1029 |
| Informações proprietárias | | Atualmente designadas de mensagens de número 4088 a 4095 |

Fonte: RTCM (2007).

Os tipos básicos de serviço RTK disponíveis nessa versão do RTCM são: GPS; GLONASS; e combinação GPS/GLONASS, considerando que no momento da divulgação do documento RTCM de 2007 a constelação completa do GLONASS ainda estava sendo estabelecida.

Cada mensagem (Tabela 21) contém um conjunto específico de campos de dados, algumas vezes repetidas, onde informações de muitos satélites são fornecidas. A partir desses dados, os arquivos RINEX podem ser construídos. Quando o Módulo de Ambiguidade da Pseudodistância não é fornecido, informações de relógios e efemérides serão requeridas para fazer a conversão. O Módulo de Ambiguidade da Pseudodistância GPS (L1) representa o número inteiro de módulos de divisão da pseudodistância (299792,458 m) observada na L1. Os campos de dados são transmitidos em lista ordenada. A Tabela 22 apresenta o conteúdo dos cabeçalhos das mensagens 1001 a 1004 (Mensagens GPS):

Tabela 22 - Conteúdo do cabeçalho das mensagens tipo 1001, 1002, 1003, e 1004

| Campo de dados | Número DF | Tipo de dados | Número de bits |
|--|-----------|---------------|----------------|
| Número da mensagem (ex: "1001"= 0011 1110 1001) | DF002 | uint12 | 12 |
| ID da estação de referência | DF003 | uint12 | 12 |
| Tempo da época GPS (ToW) | DF004 | uint30 | 30 |
| Flag de sincronismo GNSS | DF005 | bit (1) | 1 |
| Nº de sinais de satélites GPS processados | DF006 | uint5 | 5 |
| Indicador de Suavização livre de divergência GPS | DF007 | bit (1) | 1 |
| Intervalo de suavização GPS | DF008 | bit (3) | 3 |
| Total | | | 64 |

Fonte: RTCM (2007).

Na Tabela 22, o número da mensagem é um nome auto-explicativo; a identificação da estação de referência é definida pelo provedor do serviço; o tempo da época GPS (ToW - *Time of Week*) é o número de segundos contados desde o início da semana GPS até o instante da observação GPS. Na mensagem de sincronismo GNSS se o *flag* for 0 (zero), significa que não há observável GNSS adicional referenciada a mesma época para ser transmitida, o que significa que o receptor dos dados pode iniciar o processamento dos dados imediatamente após a decodificação.

O tipo de mensagem 1004 acomoda dados de dupla frequência e inclui um indicador CNR (*Carrier-to-Noise*) para cada satélite com medidas na estação de referência. Desde que o CNR, geralmente, não muda de medida para medida, esta mensagem pode ser misturada com o tipo de mensagem 1003 e usada somente quando o CNR do satélite muda. O conteúdo da mensagem 1004 é mostrado na Tabela 23:

Tabela 23 - Conteúdo de uma porção da mensagem tipo 1004 para cada satélite

| Campo de Dados | Número DF | Tipo de Dados | Número de Bits |
|---|-----------|---------------|----------------|
| ID do satellite GPS | DF009 | uint6 | 6 |
| Indicador do código L1 GPS | DF010 | bit(1) | 1 |
| Pseudodistância L1 GPS | DF011 | uint24 | 24 |
| Phase Range L1 GPS – pseudodistância L1 | DF012 | int20 | 20 |
| Indicador de <i>lock time</i> GPS L1 | DF013 | uint7 | 7 |
| Módulo de ambiguidade de pseudodistância inteira L1 GPS | DF014 | uint8 | 8 |
| CNR L1 GPS | DF015 | uint8 | 8 |
| Indicador do código L2 GPS | DF016 | bit(2) | 2 |
| Diferenças de pseudodistância GPS L2-L1 | DF017 | int14 | 14 |
| Phase Range L2 GPS -pseudodistância L1 | DF018 | int20 | 20 |
| Indicador de <i>lock time</i> GPS L2 | DF019 | uint7 | 7 |
| CNR L2 GPS | DF020 | uint8 | 8 |
| Total | | | 125 |

Fonte: RTCM (2007).

É necessário informar que nessa seção foi realizada uma descrição somente sobre os grupos de mensagens e mais especificamente sobre o grupo de mensagens 1004. Para as aplicações de posicionamento GNSS, os outros grupos também são muito importantes. Uma descrição detalhada de cada um desses grupos pode ser encontrada na documentação do RTCM (2007).

Existe atualmente a versão 3.X do RTCM que se encontra em fase de estudo e implementação. Essa versão está em desenvolvimento para servir como suporte ao PPP em tempo real e faz parte do projeto piloto do IGS. As correções de relógios e órbitas dos satélites estimados em tempo real podem ser enviadas em campos específicos do padrão RTCM (BKG, 2011). Então, tem-se as seguintes mensagens preliminares (Tabela 24) adicionadas na versão RTCM 3 (BKG, 2011):

Tabela 24 - Tipos de mensagens adicionadas a versão do RTCM 3.x

| Tipo de Mensagem | Correções |
|-------------------------|---|
| 1057 | Correções de órbitas GPS para as efemérides transmitidas |
| 1058 | Correções dos relógios GPS para as efemérides transmitidas |
| 1059 | <i>Bias</i> dos códigos GPS |
| 1060 | Correções de relógios e órbitas GPS para as efemérides transmitidas |
| 1061 | GPS <i>User Range Accuracy</i> (URA) |
| 1062 | Correções dos relógios GPS alta taxa (<i>high-rate</i>) para as efemérides transmitidas |
| 1063 | Correções de órbitas GLONASS para as efemérides transmitidas |
| 1064 | Correções de relógios GLONASS para as efemérides transmitidas |
| 1065 | <i>Bias</i> dos códigos GLONASS |
| 1066 | Correções de relógios e órbitas GLONASS para as efemérides transmitidas |
| 1067 | GLONASS <i>User Range Accuracy</i> (URA) |
| 1068 | Correções dos relógios GLONASS alta taxa (<i>high-rate</i>) para as efemérides transmitidas |

As correções de órbitas e relógios GPS (exemplo: mensagem 1060) são fornecidas para serem aplicadas às órbitas transmitidas pelos satélites GPS. As correções das órbitas são dadas no sistema orbital centrado no satélite e as correções dos relógios são disponibilizadas em forma de coeficientes representando um polinômio de segunda ordem. As *bias* do código (mensagem 1057) referem-se às correções de atrasos de *hardware* estimadas em tempo real, o que pode auxiliar na solução das ambiguidades inteiras no PPP em tempo real.