

Revista Brasileira de Cartografia (2014) N^o 66/6: 1331-1345
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

PPP EM TEMPO REAL: FUNDAMENTOS, IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL E ANÁLISES DE RESULTADOS NO MODO ESTÁTICO E CINEMÁTICO

Real Time PPP: Fundamentals, Computational Implementation and Results Analysis for Static and Kinematic Mode

Haroldo Antonio Marques¹, João Francisco Galera Monico², Milton Shimabukuro², Rogério Takeshi Oyama² & Jens Peter Wentz³

¹Universidade Federal de Pernambuco-UFPE

Centro de Tecnologia e Geociências / Departamento de Engenharia Cartográfica

Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n - 2^o andar - Cidade Universitária - Recife, PE - CEP: 50740-530, Brasil.
haroldoh2o@gmail.com

2 Universidade Estadual Paulista-UNESP

Faculdade de Ciências e Tecnologia / Departamento de Cartografia

Rua Roberto Simonsen, 305- Presidente Prudente, SP, CEP: 19060-900, Brasil
galera@fct.unesp.br; miltonhs@fct.unesp.br; rogeriooyama@yahoo.com.br

3 Embraer- Empresa Brasileira de Aeronáutica - SA

Estrada Municipal Euclides Martins, 2.170 – Gavião Peixoto, SP – CEP: 14813-000, Brasil
Jens.wentz@embraer.com.br

Recebido em 11 de Maio, 2014/ Aceito em 12 de Junho, 2014

Received on May 11, 2014/ Accepted on June 12, 2014

RESUMO

O posicionamento geodésico em tempo real utilizando GNSS pode ser realizado a partir dos métodos DGPS, RTK e/ou RTK em rede e mais recentemente do RTPPP, ou seja, Posicionamento por Ponto Preciso em Tempo Real. Este último método tem sido alvo de muita investigação pela comunidade científica nos últimos anos e culminou com um projeto piloto do IGS para PPP em Tempo Real, com início em meados do ano 2007 visando disponibilizar órbitas e correções precisas dos relógios dos satélites para aplicação no RTPPP. O método PPP em sua concepção requer o uso de observações GNSS em duas frequências, correções para diversos efeitos envolvidos e dados de órbitas e correções precisas dos relógios dos satélites. Para tempo real, têm-se disponível atualmente as efemérides preditas denominadas IGU, porém as correções preditas de relógios dos satélites contidas nestas efemérides apresentam atualmente acurácia de ordem métrica. Este nível de acurácia não é suficiente para os requisitos de acurácia centimétrica do PPP e requer o desenvolvimento de estratégias de estimativas das correções de relógios dos satélites para aplicação em tempo real. Diversas agências do IGS distribuídas ao longo do planeta disponibilizam atualmente as correções de relógios e órbitas em tempo real aos usuários via internet utilizando o protocolo NTRIP. Dentro deste contexto, este trabalho apresenta a metodologia envolvida no PPP em Tempo Real, com o desenvolvimento de um sistema computacional denominado 'RT_PPP' e experimentos realizados para dados coletados em estações localizadas no Brasil e também para ensaios em voos de aeronaves produzidas no Brasil. O sistema é desenvolvido em linguagem de programação C++ e a comunicação via internet em tempo real foi desenvolvida com base nos códigos disponibilizados pela agência europeia BKG. Para

aplicação do PPP, diversos efeitos sistemáticos envolvidos com a propagação dos sinais GNSS e com as estações são levados em consideração, como por exemplo: atrasos troposférico e ionosférico, efeitos relativistas, carga de marés oceânicas, marés terrestres, correção do centro de fases das antenas, entre diversos outros. Foram realizados experimentos no modo PPP pós-processado, simulando tempo real e em tempo real com dados GPS coletados em estações estáticas e em trajetórias cinemáticas de ensaios em voo para aeronaves fabricadas no Brasil.

Palavras-chave: GNSS, PPP em Tempo Real, Correções dos Relógios dos Satélites, Órbitas Precisas.

ABSTRACT

The geodetic positioning in real time by using GNSS can be accomplished through DGPS, RTK and/or network RTK methods and more recently through RTPPP method, i.e., Real Time Precise Point Positioning. This last method has been investigated by the scientific community in recent years culminating with a Pilot Project of IGS for Real Time PPP starting in mid-2007 and aiming to turn available satellite orbits and clock corrections to accomplish RTPPP. The PPP method in its conception requires the use of GNSS observables in two frequencies, corrections for several effects involved and satellite orbits and clock corrections. For real time one has currently available the predicted ephemeris denominated IGU, however the predicted satellite clocks contained in these ephemeris present currently accuracy of the order of meter. This clock accuracy level is not enough for requirements of PPP centimeter accuracy what requires strategies development to estimate satellite clock correction in order to apply in the RTPPP. Several IGS agencies around the world currently make available to the users orbits and clock corrections in real time via internet through NTRIP protocol. Within that context this paper present the methodology involved with Real Time PPP with development of a computational system denominated 'RT_PPP' and experiments accomplished by using data collected in Brazilian stations and also in flight test for aircraft manufactured in Brazil. The computational system was developed in C++ program language and the internet communication was developed based on source code available by BKG agency. Several systematic effects involved with GNSS signal propagation and also with ground stations must be accounted for RTPPP application, as for example: ionospheric and tropospheric delays, relativistic effects, ocean tide loading, earth body tide, antennas phase center corrections, among others. Experiments considering PPP post processed, simulating real time and real time mode were carried out involving GNSS data collected in static stations and in kinematic trajectories for flight test of aircrafts manufactured in Brazil.

Keywords: GNSS, Real Time PPP, Satellite Clock Corrections, Precise Orbits.

1. INTRODUÇÃO

O posicionamento geodésico a partir do 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*), bem como do RTPPP (*Real Time Precise Point Positioning* – Posicionamento Por Ponto Preciso em Tempo Real) (LEICK, 2004; MONICO, 2008, ALVES, 2008; HAUSCHILD, 2010, MARQUES, 2012).

O RTPPP, diferentemente do RTK e do DGPS, requer o uso de somente um receptor ao nível de usuário GNSS. Contudo, necessita de uma rede geodésica em nível global para a geração de produtos, tais como órbitas precisas, relógios dos satélites e outros. Além disso, para a estimativa de coordenadas geodésicas com boa qualidade todos os erros envolvidos com a propagação dos sinais GNSS e com as estações terrestres devem ser adequadamente modelados e tratados, dentre os quais se destacam os efeitos da

ionosfera, troposfera, carga de marés oceânicas (*Ocean Tide Loading*), marés de corpos terrestres (*Earth Body Tide*) ou simplesmente marés terrestres, efeitos de relatividade, variação do centro de fase das antenas dos satélites e receptor, fase *windup*, entre outros.

A aplicação do RTPPP requer a disponibilidade em tempo real das órbitas precisas e das correções ou erros dos relógios dos satélites (não sincronização do relógio do satélite com o sistema de tempo GNSS) (HAUSCHILD, 2010; MARQUES, 2012). Este método tem sido propício a muitas investigações da comunidade científica internacional. Há alguns anos, criou-se, por exemplo, o projeto piloto do IGS (*International GNSS Service*) para tempo real (IGS-RTPPP, 2014) 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 (EUREF, 2014). Para aplicações práticas, o usuário tem disponível, por exemplo, o

software de domínio livre “BKG/BNC” que permite aplicar as correções de relógios e órbitas disponibilizadas pelas agências IGS/BKG. Além deste, tem-se disponível também o *software* livre denominado BKG *Ntrip State Space Server* (BNS) responsável por gerar as correções de órbitas e relógios dos satélites para serem aplicadas nas órbitas transmitidas. A transmissão dos dados via internet utiliza o protocolo de transmissão NTRIP (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*) e as correções são disponibilizadas no formato RTCM 3.X para correções às órbitas transmitidas (RTCM, 2007; NTRIP, 2014; WEBER et al., 2007).

Dentro deste contexto, este trabalho apresenta a metodologia envolvida no PPP em Tempo Real com o desenvolvimento de software para realização do mesmo, além da apresentação de experimentos e análises no modo PPP estático e cinemático. O software desenvolvido em linguagem de programação C++, denominado ‘RT_PPP’, está inserido no contexto do desenvolvimento de uma tese de doutorado na Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT) da Universidade Estadual Paulista (UNESP), na qual foram realizadas pesquisas relacionadas à estimativa de correções dos relógios dos satélites a partir de redes GNSS e aplicação no PPP em tempo real (MARQUES, 2012).

O software RT_PPP permite obter a posição dos satélites a partir das efemérides preditas IGS para aplicação em tempo real, a qual apresenta acurácia atualmente da ordem de 5 cm e para corrigir os erros de relógios calculados a partir das efemérides transmitidas são utilizadas as correções disponibilizadas em tempo real pelo IGS/BKG.

Os experimentos foram realizados no modo PPP estático e cinemático, seja pós-processado ou em tempo real. Foram utilizadas observações coletadas em estações GNSS localizadas no Brasil, além de observações coletadas em ensaios em voos de aeronaves fabricadas no Brasil de maneira que será apresentada a avaliação da qualidade do método RTPPP estático e cinemático.

2. MODELOS MATEMÁTICOS ENVOLVIDOS NO PPP

O PPP refere-se à obtenção da posição de uma estação com acurácia de poucos centímetros, o que requer a utilização de observações coletadas em receptores de dupla frequência juntamente com correções precisas de órbitas e de relógios e também a modelagem de praticamente todos os efeitos envolvidos com a propagação dos sinais dos satélites.

Considerando o caso de dados observados em duas frequências, as equações de pseudodistância e fase da onda portadora parametrizada com a aplicação da combinação *ion-free* (IF) podem ser escritas da seguinte forma (LEICK, 2004; MONICO, 2008; MARQUES, 2012):

$$PD_{IF}^s = \rho_r^s + c(dt_r(t_r) - dt^s(t^t)) + m_f Zwd + \varepsilon_{PD}^s \quad (1)$$

$$\lambda_{IF} \phi_{IF}^s = \rho_r^s + c(dt_r(t_r) - dt^s(t^t)) + \lambda_{IF} N_{IF} + m_f Zwd + \varepsilon_{\phi_{IF}}^s \quad (2)$$

Nas Equações (1) e (2), PD_{IF}^s e $\lambda_{IF} \phi_{IF}^s$ representam a pseudodistância e fase da *ion-free* (metros), respectivamente; λ_{IF} é o comprimento de onda da combinação *ion-free* (geralmente adotado com valor de comprimento da frequência L1); ρ_r^s é a distância geométrica entre receptor r e o satélite s; $dt_r(t_r)$ e $dt^s(t^t)$ representam, respectivamente, o erro do relógio do receptor (instante de recepção t_r) e o erro do relógio do satélite (instante de transmissão t^t); c é a velocidade da luz no vácuo; N_{IF} é a ambiguidade *ion-free* da fase; Zwd (*Zenithal Wet Delay*) é atraso troposférico úmido na direção do zênite com respectiva função de mapeamento m_f para a direção receptor-satélite; os erros aleatórios e não modelados nas equações *ion-free* de pseudodistância e fase são representados, respectivamente por ε_{PD}^s e $\varepsilon_{\phi_{IF}}^s$. O modelo matemático do PPP, como apresentado nas Equações (1) e (2), é não linear e a equação linearizada considerando o receptor r e o satélite s_r , pode ser escrita como:

$$E \left\{ \begin{matrix} \Delta PD_{IFr}^{s_i} \\ \Delta \lambda_{IF} \phi_{IFr}^{s_i} \end{matrix} \right\} = \begin{matrix} \left[\begin{matrix} X^{s_i} - X_r^0 & Y^{s_i} - Y_r^0 & Z^{s_i} - Z_r^0 & 1 & m_f & 0 \\ \frac{(\rho_r^{s_i})^0}{c} & \frac{(\rho_r^{s_i})^0}{c} & \frac{(\rho_r^{s_i})^0}{c} & 1 & m_f & \lambda_{IF} \end{matrix} \right] \begin{matrix} \Delta X_r \\ \Delta Y_r \\ \Delta Z_r \\ c dt_r \\ Z_{wd} \\ N_{IF}^{s_i} \end{matrix} \end{matrix} \quad (3)$$

Na Equação 3, as três primeiras colunas da matriz jacobiana A contêm as derivadas parciais em relação aos parâmetros referentes as coordenadas da estação e representam os cossenos diretores para o vetor satélite-receptor de forma que todos os coeficientes destas colunas devem ter valores menores ou iguais a unidade. O coeficiente nulo sobrescrito nas coordenadas da estação X_r^0 , Y_r^0 e Z_r^0 representam os valores aproximados destes parâmetros, necessários para o caso do ajustamento de modelos não lineares. A distância geométrica $(\rho_r^{s_i})^0$ é calculada em função das coordenadas aproximadas, as quais são atualizadas em um processo iterativo (CAMARGO, 1992; TEUNISSEN, 2001, MARQUES, 2012). As correções às coordenadas geodésicas cartesianas da estação são representadas, respectivamente por ΔX_r , ΔY_r e ΔZ_r . Os fatores c (velocidade da luz no vácuo) e o parâmetro dt_r ficam juntos em um só produto por razões numéricas (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008; MONICO, 2008).

Caso estejam disponíveis dados de simples frequência, o efeito da ionosfera pode ser corrigido a partir do modelo de Klobuchar, de Mapas Globais da Ionosfera (GIM – *Global Ionosphere Maps*) ou da estimativa dos resíduos ionosféricos (KLOBUCHAR, 1996; MATSUOKA, 2007, MARQUES, 2008). 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; MONICO; AQUINO, 2011).

Para a correção do efeito da troposfera pode-se utilizar a estratégia de estimativa do parâmetro relacionado à componente úmida ou

ainda aplicar modelos matemáticos tais como o de Hopfield, Saastamoinen ou modelos baseados em dados de Previsão Numérica de Tempo (PNT) (SAPUCCI, 2005; SAPUCCI, et al., 2006; BOEHM et al., 2006).

No caso do PPP pós-processado, geralmente, a correção precisa do relógio do satélite no tempo de transmissão t_1 é obtida a partir de um arquivo no formato sp3, os quais são disponibilizados pelo IGS com taxas de dados de 5 minutos (solução rápida) e de 30 segundos (solução final do IGS). Para o caso do PPP em tempo real, essas correções precisam ser estimadas em tempo real e enviadas ao usuário. Estratégias de estimativa das correções dos relógios dos satélites podem ser encontradas em Han, Kwon e Jekeli (2001); Weber, Mervat e Dousa (2007), Hauschild (2010), Marques (2012).

O modelo estocástico do PPP, geralmente é representado pela MVC (Matriz de Variância e Covariância) das observações (Lb) em forma diagonal, visto que, geralmente, não se consideram correlações entre as medidas, quer seja no espaço e tempo. Desta forma, a MVC das observações no caso da combinação *ion-free* é composta pelas variâncias do código e da fase

$\sigma_{\rho_{IF}^{s_i}}^2$ e $\sigma_{\phi_{IF}^{s_i}}^2$ ($i = 1, 2, \dots, n$), respectivamente, onde pode-se levar em consideração estratégias de ponderação pelos ângulos de elevação dos satélites (WANG, 1999; SILVA, 2009).

Diversos efeitos sistemáticos devem ser considerados para a estimativa precisa de coordenadas no PPP. 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, efeitos de carga de marés oceânicas, marés terrestres, efeitos relativistas, efeitos de fase *windup*, entre outros. Além destes, tem-se problemas relacionados às perdas de ciclos e/ou sinais que devem ser adequadamente tratadas para o caso de posicionamento em tempo real. A descrição detalhada e formulação matemática de cada um dos efeitos envolvidos no PPP podem ser encontradas, por exemplo, em Marques (2012).

3. DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE PARA REALIZAÇÃO DE PPP EM TEMPO REAL

Para a realização do PPP em Tempo Real foi desenvolvido o software denominado RT_PPP. O processamento dos dados GNSS é realizado com base no Filtro de Kalman e controle de qualidade a partir do método DIA (Detecção Identificação e Adaptação) (GELB et al., 1974; CAMARGO, 1992; TEUNISSEN, 1998; TEUNISSEN, 2001). Os principais modelos matemáticos implementados no *software* RT_PPP para eliminar e/ou minimizar os efeitos sistemático no método PPP são apresentados na Tabela 1:

O RT_PPP é capaz de processar medidas GPS de pseudodistâncias derivadas dos códigos P1, P2 e medidas de fases nas portadoras L1 e L2. Na ausência de medidas P1 e P2, o que ocorre geralmente devido a algum tipo de configuração ou restrição do receptor, o software é capaz de detectar a observação C1 e/ou L2C (C2) se disponível. Neste caso, as correções de DCBs (*Differential Code Bias*) são aplicadas para tornar C1 e C2 compatíveis com P1 e P2, respectivamente, algo que se faz necessário em função do IGS utilizar as pseudodistâncias derivadas de P1 e P2 na determinação de órbitas e correções de relógios dos satélites.

As ambiguidades da fase são estimadas como solução *float* e tratadas com variação constante (*random constant*) no Filtro de Kalman. A detecção de perdas de ciclos é realizada com base no algoritmo conhecido por “*Turbo Edit*” como apresentado por Blewitt (1990), o qual se baseia na combinação *wide-lane* entre código e fase. Caso uma perda de ciclo seja detectada para algum satélite específico, um novo parâmetro de ambiguidade é inicializado no Filtro de Kalman. Neste caso, o valor aproximado para a ambiguidade é calculado com base na diferença entre pseudodistância e fase e assim a variância do parâmetro ambiguidade é reinicializada.

O erro do relógio do satélite é tratado como um parâmetro estocástico *white noise* (ruído branco), ou seja, sem levar em consideração a correlação de uma época para a outra de forma que o parâmetro é estimado numa solução época por época.

A correção dos efeitos da ionosfera pode

ser feita através da combinação *ion-free* para o caso de dupla frequência ou da estimativa do efeito ionosférico na direção receptor-satélite, modelo de Klobuchar ou mapas globais (GIM) para o caso de simples frequência.

Com relação à estimativa da troposfera, somente a componente úmida do atraso troposférico é estimada (ver Equações 1 e 2). Neste caso, a componente hidrostática (Zhd) deve ser obtida a partir de algum modelo matemático ou informações advindas de modelos de Previsão Numérica de Tempo, como por exemplo, o modelo disponível no CPTEC/INPE (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos / Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) ou dados do modelo Europeu (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts - ECMWF*) disponíveis junto com os coeficientes da Função de Mapeamento de Viena (VMF - *Vienna Mapping Function*). A estimativa da troposfera é

Tabela 1 - Modelos matemáticos implementados no RT_PPP

Efeito	Estratégia
Ionosfera	Combinação <i>ion-free</i>
	Estimativa (parâmetro estocástico)
Troposfera	Somente Hopfield + GPT
	GMF + ZTD (dados PNT do CPTEC)
	VMF1 + ZTD (dados PNT do ECMWF)
	ZHD fixo + ZWD estimado (<i>random walk</i>)
Carga de marés oceânicas	Aplicadas conforme modelagem matemática em (McCARTHY; PETIT, 2003)
Marés 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 ou via <i>mountpoint</i> do IGS/BKG
DCB	Valores mensais estimados pelo CODE
Ambiguidades	Solução <i>float</i>
Fase <i>wind-up</i>	Aplicado
Efeito de relatividade	Aplicado

realizada considerando Z_{wd} como um parâmetro estocástico com modelo de correlação *random walk* (passo aleatório), onde se aplica a função de mapeamento GMF (*Global Mapping Function*) além de parâmetros de pressão e temperatura advindos da função GPT (*Global Pressure and Temperature*) para o cálculo da componente hidrostática (SAPUCCI, 2005; SAPUCCI, et al., 2006; BOEHM; SCHUH, 2004; BOEHM, et al., 2006).

O software RT_PPP permite processar os dados GPS no modo PPP estático ou cinemático, seja em tempo real ou pós-processado. Para o caso de tempo real, as observáveis GNSS no formato RTCM são obtidas via internet utilizando o protocolo NTRIP ou ainda via porta serial de um computador conectado com o receptor. A Figura 1 mostra o fluxograma de execução do software RT_PPP:

A comunicação em rede (internet) para realizar o PPP em Tempo Real foi desenvolvida com base nos aplicativos disponíveis pelo BKG. Dessa forma, o software RT_PPP funciona 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 independente. Para tanto, é utilizado o recurso de “threads”, no qual, as informações transmitidas em cada *mountpoint*, sejam dados GNSS ou correções, ficam vinculadas a uma determinada “thread” (KUROSE; ROSS, 2006). As correções de relógios podem ser obtidas via algum *mountpoint*

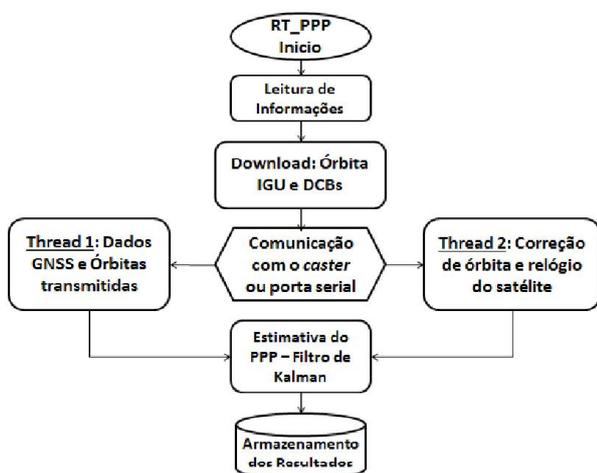


Fig. 1 - Fluxograma do software RT_PPP

(denominação do NTRIP) do BKG. O tipos de mensagens no formato RTCM 3.X relacionadas as correções são descritos na Tabela 2 (BKG, 2014).

As correções de órbita do satélite são fornecidas no sistema de referência local centrado no satélite e disponibilizadas em forma de componentes: radial (eixo Z), *along-track* (tangencial-Y) e *cross-track* (eixo X) e são aplicadas nas coordenadas dos satélites advindas das órbitas transmitidas. No caso dos relógios dos satélites, as correções são disponibilizadas em forma de coeficientes de um polinômio de segunda ordem e devem ser aplicadas para corrigir os erros de relógios advindos das efemérides transmitidas (BKG, 2014).

No caso dos experimentos realizados neste trabalho, os quais são mostrados na próxima seção, a posição do satélite foi interpolada a partir das efemérides preditas IGU e as correções de relógios obtidas a partir do IGS/BKG.

4. EXPERIMENTOS E ANÁLISES

Os experimentos foram realizados no modo

Tabela 2- Correções formato RTCM 3.x

Tipo de Mensagem	Correções
1057	Correções de órbita GPS para as Efemérides Transmitidas
1058	Correções de relógios dos satélites para as Efemérides Transmitidas
1059	Bias do código para o GPS
1060	Correções combinadas de órbita e relógios dos satélites GPS para as Efemérides Transmitidas
1061	GPS <i>User Range Accuracy</i> (URA)
1062	Correções de relógios GPS de alta taxa (High-rate) para as Efemérides Transmitidas
1063	Correções de órbita GLONASS para as Efemérides Transmitidas
1064	Correções de relógios GLONASS para as Efemérides Transmitidas s
1065	Bias do código para o GLONASS
1066	Correções combinadas de órbita e relógios dos satélites GLONASS para as Efemérides Transmitidas
1067	GLONASS <i>User Range Accuracy</i> (URA)
1068	Correções de relógios GLONASS de alta taxa (High-rate) para as Efemérides Transmitidas

PPP estático e cinemático, considerando o caso tempo real e também no modo pós-processado.

As coordenadas estimadas pelo RT_PPP são fornecidas no sistema de referência das órbitas precisas, sendo atualmente o ITRF2008 (*International Reference Frame* 2008). A análise foi realizada comparando as coordenadas geodésicas cartesianas estimadas com soluções multianuais ou semanais do SIRGAS-CON (Sistema Referencia Geocêntrico para as Américas – Rede Contínua) com atualização de coordenadas quando necessário. Em seguida, as discrepâncias em coordenadas cartesianas foram convertidas para o SGL (Sistema Geodésico Local) sendo que DE, DN e DU representam, respectivamente, as componentes no sentido Leste, Norte e Altitude do SGL, denominados doravante de “Erros no SGL”. Como forma de avaliar o software RT_PPP no modo pós-processado foram realizados processamentos de dados de estações da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo), os quais são apresentados na seção 4.1, enquanto que a seção 4.2 apresenta resultados do PPP realizados em tempo real com correções de relógios advindas do IGS/BKG e a seção 4.3 apresenta os resultados do PPP cinemático simulando tempo real para ensaios em voos de aeronaves.

4.1 PPP no modo pós-processado

Os dados GPS da estação RECF (localizada em Recife-PE) da RBMC foram processados no software RT_PPP no modo estático pós-processado com soluções diárias considerando o período de agosto de 2012 até novembro de 2013. O início deste período coincide com a instalação do receptor Trimble NETR8 na estação RECF. Neste caso, os dados GPS foram processados com a utilização de efemérides precisas finais do IGS e correções finais de relógios dos satélites com taxa de 30 segundos, além de todas as outras correções necessárias ao método PPP (seções 2 e 3). A série temporal de cada componente no SGL para a estação RECF pode ser vista nas Figuras 2, 3 e 4.

Ao analisar as Figuras 2, 3 e 4 nota-se um comportamento sazonal e uma tendência nas séries temporais das coordenadas representadas no SGL. Um estudo mais detalhado sobre a análise de série temporal de coordenadas GNSS pode ser encontrado em Marques (2013). As

estatísticas relacionadas ao PPP estático pós-processado da estação RECF com o software RT_PPP são apresentadas na Tabela 3.

Os valores mínimos e máximos, bem como erro médio, desvio padrão e EMQ (Erro Médio Quadrático) para as componentes DE, DN e DU podem ser vistos na Tabela 3. Os valores mínimo e máximo para a componente DE foram de -3,6 cm e 3,8 cm, respectivamente. Para a componente DN, o valor mínimo foi de -2,2 cm e o máximo de 1,4 cm. Por fim, a componente DU apresentou máximo e mínimo de -5,3 cm e 3,3 cm, respectivamente. O EMQ considerando todo o período foi de 1,3 cm, 0,6 cm e 1,8 cm, respectivamente para DE, DN e DU.

Com o objetivo de avaliar o tempo de convergência do ajustamento no modo PPP estático com o RT_PPP, a série temporal diária para a estação RECF é apresentada na Figura 5 considerando dados do dia 270 de 2013.

A partir da Figura 5, verifica-se que os valores de DE, DN e DU atingem a ordem de aproximadamente 10 cm com uma hora de dados processados e a ordem de aproximadamente 3 cm após 2 a 3 horas de dados. A série temporal de precisões (1 sigma) das coordenadas estimadas propagadas para o SGL pode ser vista na Figura 6.

Confirma-se a partir da Figura 6 que a convergência do processamento PPP estático para o caso em questão levou em torno de 2 horas aproximadamente. A Figura 7 mostra a série temporal para o processamento de uma semana de dados (dias 270 a 276) com soluções diárias no PPP estático.

Verifica-se que os erros no SGL atingem a ordem de poucos centímetros depois de aproximadamente 1 a 2 horas de dados processados no modo PPP estático.

O processamento também foi realizado no modo cinemático com o software RT_PPP para algumas estações da RBMC. Trata-se das estações BELE, POAL e CUIB, cujos dados foram processados para o dia 10 de 2013, escolhido de forma aleatória. Apesar das estações serem estáticas, o processamento PPP modo cinemático permite avaliar a acurácia da estimativa para casos cinemáticos. As séries temporais dos erros no SGL para o caso do PPP cinemático em cada estação são apresentadas nas Figuras 8, 9 e 10.

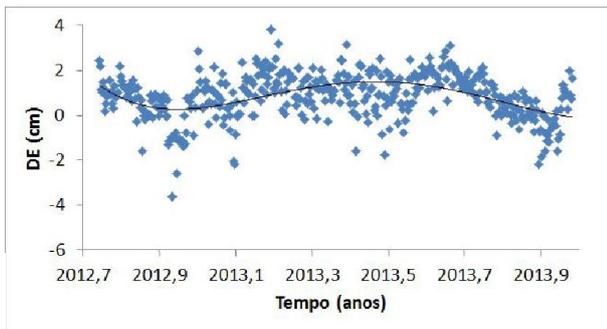


Fig. 2 - Série temporal (DE) 2012-2013, RECF pós-processado.

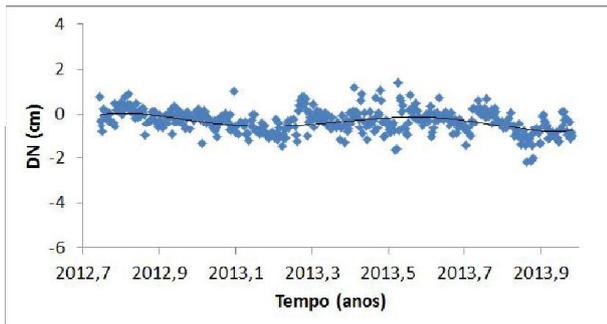


Fig. 3 - Série temporal (DN) 2012-2013, RECF pós-processado.

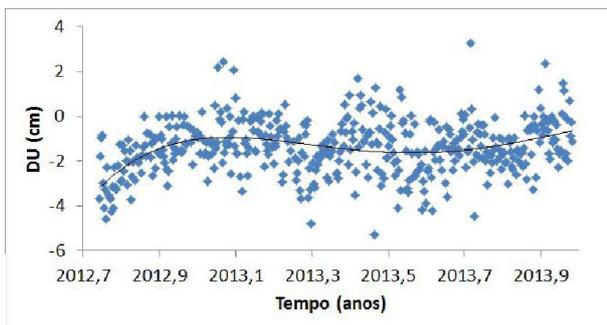


Fig. 4 - Série temporal (DU) 2012-2013, RECF pós-processado

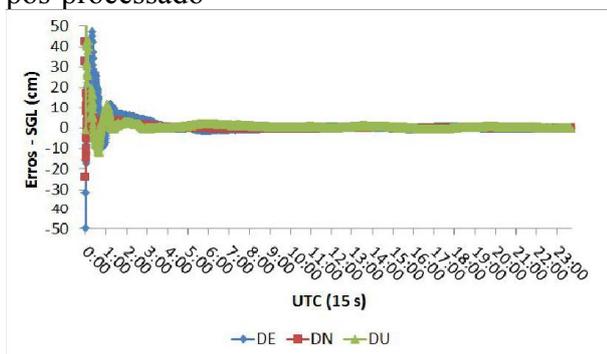


Fig. 5 - Erros no SGL para solução diária - RECF

O EMQ diário para cada uma das estações com dados processados no PPP cinemático pode ser visto na Tabela 4. Neste caso, o EMQ é calculado considerando todas as épocas envolvidas no processamento com 24 horas de dados.

Tabela 3 - Estatísticas do PPP estático (2012-2013)

Estatísticas	DE (cm)	DN (cm)	DU (cm)
Mínimo	-3,6	-2,2	-5,3
Máximo	3,8	1,4	3,3
Erro Médio	0,8	-0,3	-1,4
Desvio Padrão	1,0	0,5	1,2
EMQ	1,3	0,6	1,8

O maior valor de EMQ encontrado foi para a componente DU na estação BELE com valor de 13,6 cm e o menor foi para a componente DE na estação BELE com valor de 3,3 cm. O EMQ 3D diário para cada estação apresentaram valores de 14,8 cm, 11,9 cm e 11,5 cm, respectivamente para as estações BELE, POAL e CUIB.

Para o caso de PPP cinemático pós-processado tal como realizado para as estações BELE, POAL e CUIB é interessante analisar a acurácia considerando somente resultados após o período de convergência do PPP. Neste caso, o EMQ diário foi calculado para cada uma destas estações considerando como período de convergência as duas primeiras horas de dados, as quais ficaram fora do cálculo do EMQ. Os valores de EMQ desconsiderando as duas primeiras horas do período de convergência podem ser vistos na Tabela 5.

A partir da Tabela 5 verifica-se que o EMQ diário sem considerar o período de convergência do PPP, diminui consideravelmente em relação aos valores apresentados na Tabela 4, a qual considerou todo o período. Os valores de EMQ para a componente 3D foi de 7,8 cm, 10 cm e 6,9 cm, respectivamente, para as estações BELE, POAL, e CUIB.

4.2 PPP em tempo Real com correções do IGS/BKG

Experimentos no modo PPP em tempo real foram realizados com o software RT_PPP utilizando as correções de relógios disponibilizadas pelo IGS/BKG em tempo real. Foram utilizadas as mensagens de número 1060 (ver Tabela 2) do *mountpoint* CLK11. O PPP no modo estático em tempo real foi realizado com dados coletados pelo receptor de dupla frequência FlexPack 6 da Novatel o qual foi instalado na estação GPX01 localizada na torre de controle da empresa Embraer em Gavião

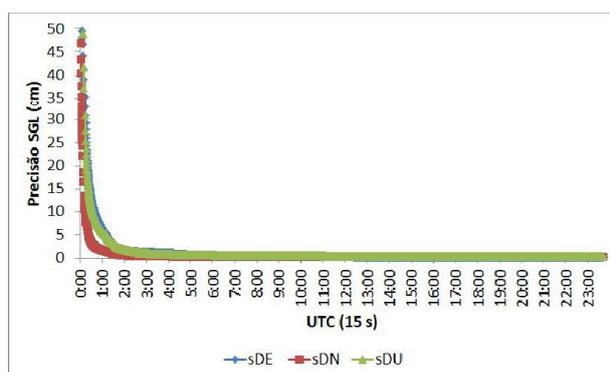


Fig. 6 - Precisões no SGL para solução diária.

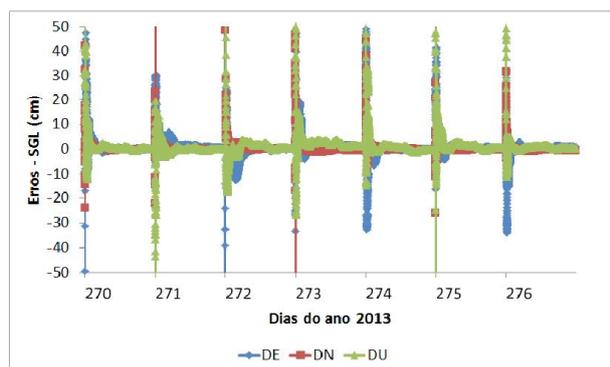


Fig. 7 - Série temporal SGL para os dias 270 a 276 de 2013

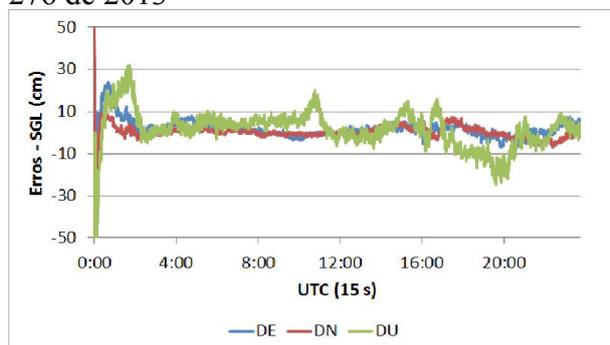


Fig. 8 - PPP cinemático para a estação BELE

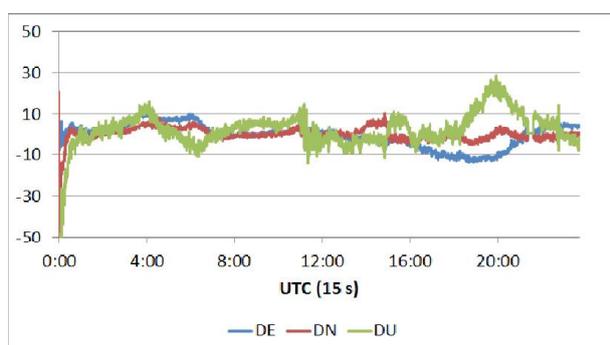


Fig. 9 - PPP cinemático para a estação POAL Peixoto – SP.

As coordenadas estimadas em tempo real foram avaliadas em relação às coordenadas de referência da estação, cujos valores advêm do processamento de dados no modo relativo e

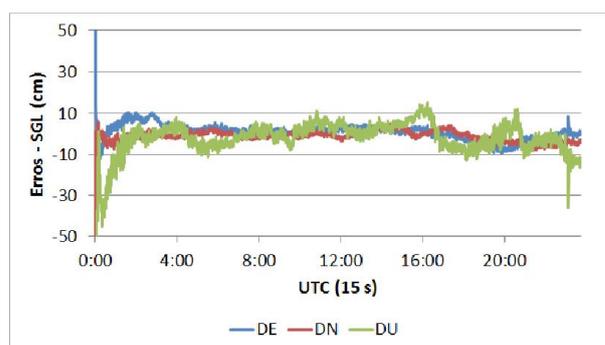


Fig. 10 - PPP cinemático para a estação CUIB

Tabela 4 - EMQ diário do PPP cinemático

Estação	DE (cm)	DN (cm)	DU (cm)	3D (cm)
BELE	4,8	3,3	13,6	14,8
POAL	5,8	3,4	9,7	11,9
CUIB	4,4	3,9	9,9	11,5

Tabela 5 - EMQ diário do PPP cinemático após o período de convergência

Estação	DE (cm)	DN (cm)	DU (cm)	3D (cm)
BELE	2,9	2,3	6,9	7,8
POAL	6,0	2,6	7,6	10,0
CUIB	3,5	2,6	5,4	6,9

ajustamento de rede geodésica como ilustrado na Figura 11. As estações utilizadas para o processamento dos dados e ajustamento da rede estão localizadas nas cidades de Ourinhos (OURI), Campinas (SPCA), São Carlos (EESC) e São José do Rio Preto (SJRP).

O processamento no modo relativo e ajustamento da rede para obtenção das coordenadas de referência da estação GPS foi realizado com o software Topcon-Tools da Topcon e as precisões horizontal e vertical foram de aproximadamente 1 e 2 cm, respectivamente.

O receptor FlexPack foi conectado a um notebook via cabo serial, com taxa de coleta de um segundo. As mensagens RTCM 1004 (dados GPS) e 1019 (Efemérides Transmitidas) foram recebidas pelo software RT_PPP em tempo real e o processamento dos dados se deu com a utilização de órbitas previstas do IGS e recebimento em tempo real das correções de relógios dos satélites via *caster* do BKG.

A Figura 12 mostra a série temporal dos erros no SGL para o período de coleta,

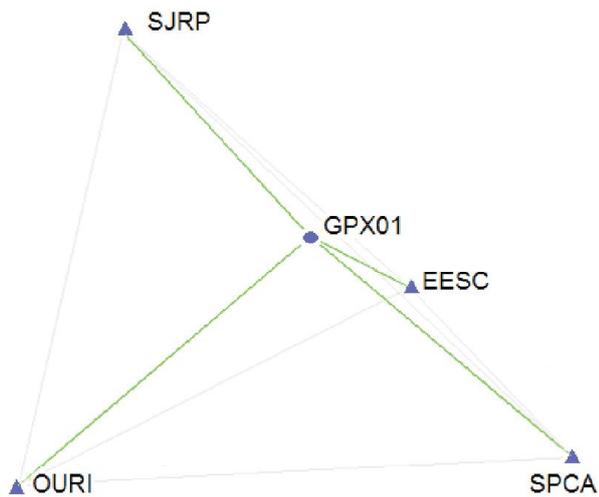


Fig. 11 - Rede GNSS para obtenção das coordenadas de referência da estação GPX01. Situação: sem escala

que foi das 18:51 h UTC (*Universal Time Coordinate* – Tempo Universal Coordenado) do dia 25/09/2013 até aproximadamente 11:48 h (UTC) do dia 26/09/2013.

A Tabela 6 mostra os erros no SGL ao final do processamento ao realizar PPP estático na estação GPX01 utilizando as correções de relógios do IGS/BKG.

A série temporal do PPP estático em tempo real com correções do IGS/BKG apresentou tempo de convergência de aproximadamente uma hora, como pode ser verificado na Figura 12. O erro 3D ao final do processamento foi de aproximadamente 5 cm e em termos de componentes do SGL, o maior erro encontrado foi para a componente DE com valor de -4,9 cm. Em geral, espera-se que os maiores erros se concentrem na componente altimétrica, contudo os erros na componente leste podem estar relacionados com o fato da solução de ambiguidades da fase ser do tipo *float*

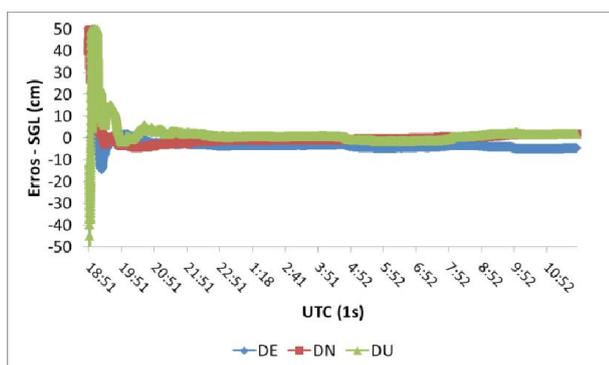


Fig. 12 - PPP estático em tempo real na estação GPX01

Tabela 6 – Erros ao final do processamento

DE (cm)	DN (cm)	DU (cm)	3D (cm)
-4,9	1,7	1,7	5,4

(BERTIGER et al., 2010; GENG et al., 2011; ALVES, et al., 2011).

Para aplicação do PPP em tempo real no modo cinemático para estações estáticas utilizaram-se dados da estação RECF da RBMC. Neste caso, o software RT_PPP obteve as observações GNSS da estação RECF via *caster* do IGS através do *mountpoint* denominado RECF0, enquanto as correções de relógios foram obtidas do *mountpoint* CLK11. Os dados foram processados no modo cinemático com taxa de coleta de 1 s para o período de 3 h até às 10 h do dia 105 de 2013 e, a série temporal dos erros no SGL ao comparar com as coordenadas oficiais da estação é apresentada na Figura 13.

Verifica-se que após a convergência dos resultados, os erros no SGL alcançaram no máximo a ordem de aproximadamente 10 cm. As estatísticas diárias do PPP cinemático em tempo real na estação RECF são apresentadas na Tabela 7. Neste caso, as estatísticas foram geradas desconsiderando as duas primeiras horas que se referem ao período de convergência do

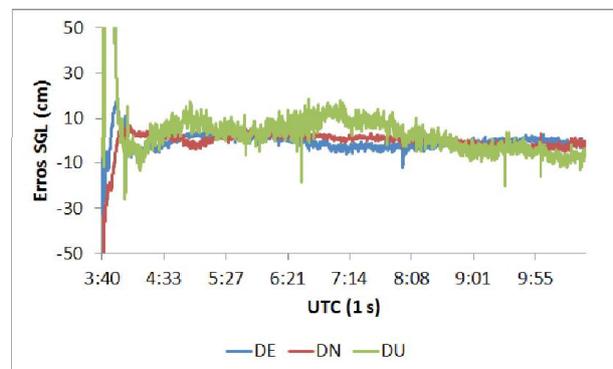


Fig. 13 - PPP cinemático em tempo real

Tabela 7 - Estatísticas diárias do PPP cinemático em tempo real (RECF)

Estatísticas	DE (cm)	DN (cm)	DU (cm)	3D (cm)
Erro	-0,6	-0,03	2,5	2,6
Médio				
Desvio	2,2	2,1	6,5	7,1
Padrão				
EMQ	2,3	2,1	6,9	7,6

ajustamento.

O EMQ 3D para o PPP cinemático em tempo real foi de 2,3 cm 2,1 cm e 6,9 cm, respectivamente para as componentes DE, DN e DU sendo que o EMQ 3D foi de 7,6 cm.

O Erro Médio como apresentado na Tabela 7 é calculado como a média dos erros obtidos em cada época considerando todo o período dos dados envolvidos no ajustamento. Desta forma, o valor médio obtido para o erro pode ser tomado como uma medida de tendência das coordenadas estimadas. O desvio padrão em torno do erro médio representa a dispersão de maneira que o EMQ pode ser calculado como a soma quadrática da tendência e da dispersão (MONICO, et al, 2009)

Para o caso da aplicação das correções na estação RECF, tem-se uma estação estática com processamento dos dados na forma cinemática. Logo, é possível calcular os ‘erros’ no PPP cinemático em tempo real, visto que as coordenadas da estação são conhecidas com alta acurácia.

4.3 Avaliação do PPP Cinemático Simulando Tempo Real para Ensaio em Voos de Aeronaves

O PPP foi aplicado para um ensaio em voo de aeronave realizado pela empresa Embraer (Empresa Brasileira de Aeronáutica). Neste caso, tem-se realmente uma trajetória cinemática. Este tipo de voo ocorre após a construção da aeronave, a qual deve passar por uma bateria de testes e um dos tópicos a ser avaliado é a trajetória obtida via posicionamento GNSS.

Para realização do PPP na aeronave, as correções de relógios dos satélites estimadas em tempo real pelo BKG foram armazenadas em um computador em solo e posteriormente aplicadas no processamento PPP dos dados GPS coletados no receptor a bordo da aeronave. Neste caso, tem-se o PPP cinemático simulando tempo real.

Os dados GPS foram coletados a bordo da aeronave por um receptor marca ‘Novatel’ de dupla frequência e a uma taxa de coleta 0,5 segundos. O tempo de voo durou pouco mais de três horas, o que forneceu aproximadamente 23500 épocas de dados. O trajeto da aeronave pode ser visto na Figura 14.

A Figura 15 mostra a altitude atingida pela aeronave além da velocidade durante o trajeto,

cujos valores foram estimados pelo software RT_PPP.

A aeronave atinge aproximadamente 14000 m e velocidade de 700 Km/h durante sua trajetória, como pode ser visto na Figura 15.

As coordenadas estimadas do voo simulando tempo real foram comparadas com outra solução de PPP utilizando as correções de relógios finais do IGS.

A série temporal da precisão das coordenadas cartesianas propagadas para o SGL pode ser vista Figura 16.

As precisões nas componentes do SGL atingem valores melhores que 10 cm após o período de convergência do ajustamento.

A Figura 17 mostra os erros no SGL ao longo do trajeto da aeronave ao comparar a solução simulando tempo real com a solução final do IGS.

A Figura 18 apresenta o erro planimétrico (2D) e resultante (3D) ao longo do trajeto da aeronave.

O número de satélites disponíveis na coleta de dados com a aeronave pode ser visualizado na Figura 19.

Verifica-se na Figura 15 que a aeronave permaneceu em solo até aproximadamente 18:30 h e a partir deste momento decolou. Na Figura 17, pode-se ver que o PPP apresentou erro 3D da ordem de 10 cm até a decolagem, apresentando um salto próximo deste momento, porém com rápida convergência, permanecendo com erro 3D de aproximadamente 20 cm durante o restante do trajeto. O salto apresentado em torno de 18:30 h está relacionado com problemas de mudança de geometria dos satélites, o que ocorreu provavelmente devido aos movimentos da aeronave. O número de satélites disponíveis para o processamento pode ser visto na Figura 19, na qual comparada com a Figura 18 e Figura 17 pode-se observar a correlação entre número de satélites e erros obtidos.

A Tabela 8 apresenta as estatísticas do PPP cinemático para a aeronave ao comparar a solução de relógios em tempo real com a solução final do IGS no processamento dos dados PPP.

Como pode ser observado na Tabela 8, o EMQ considerando todo o período do voo da aeronave foi de aproximadamente 6,6 cm, 3,5 cm e 14,5 cm nas componentes DE, DN e DU, respectivamente. O EMQ de todo o

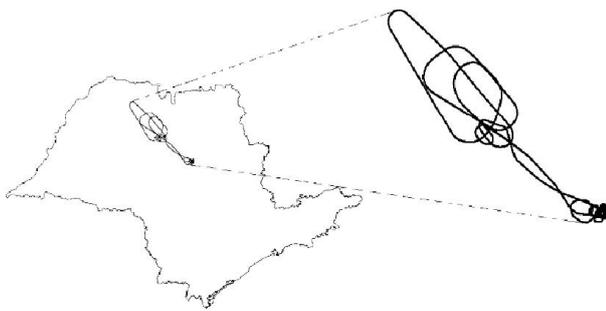


Fig. 14 - Trajetória do voo teste realizado pela Embraer. Situação sem escala.

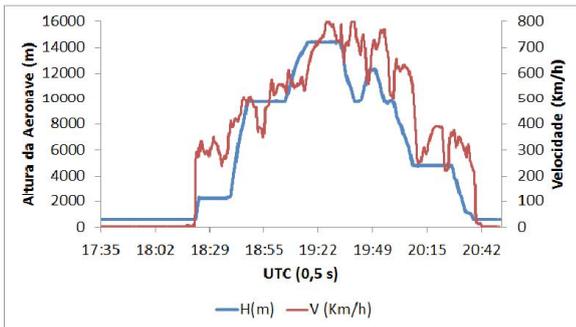


Fig. 15 - Altitude e velocidade atingida pela aeronave no voo teste

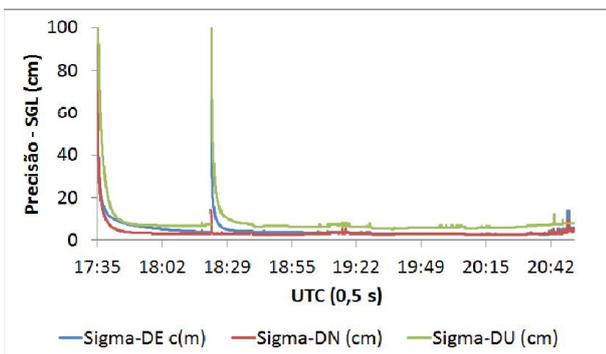


Figura 16 – Precisão das coordenadas do voo no SGL

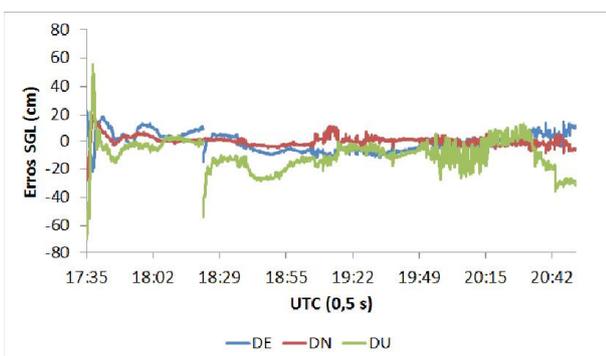


Fig. 17 - Erros no SGL do ensaio em voo da aeronave (simulando tempo real)

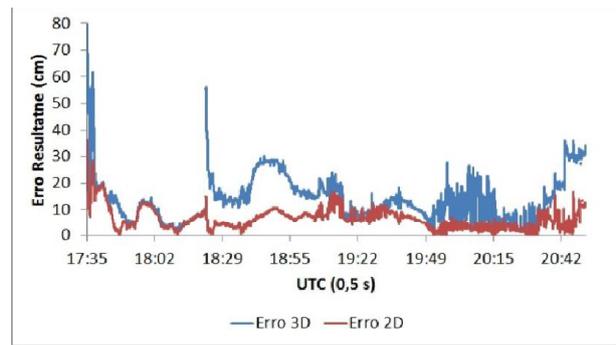


Fig. 18 - Erro 2D e 3D do ensaio em voo da aeronave

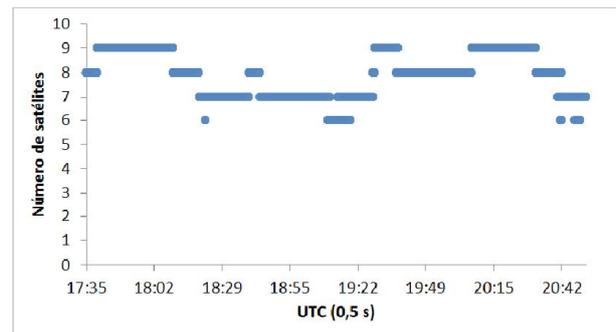


Fig. 19 - Número de satélites no processamento dos dados do voo

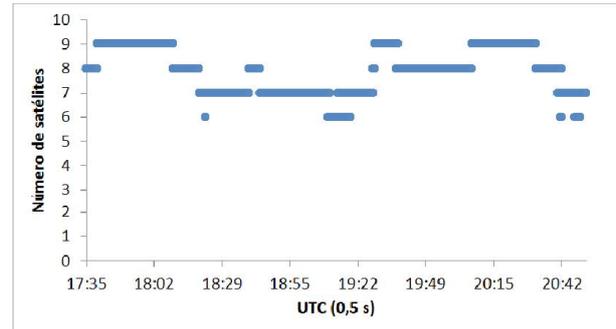


Fig. 19 - Número de satélites no processamento dos dados do voo

período nas componentes planimétrica (2D) e resultante (3D) foi de aproximadamente 7 cm e 16 cm, respectivamente. Esse erro está aproximadamente na mesma magnitude esperada para o PPP em Tempo Real, tal como ocorreu para a estação estática RECF, bem como para o PPP no modo pós-processado como apresentado na seção 4.1.

5. CONCLUSÃO

O método de PPP em Tempo Real (RTPPP) apresenta a vantagens em relação aos outros métodos de posicionamento GNSS em tempo real, tais como DGPS e RTK, visto que requer a utilização de somente um receptor ao nível de usuário. Contudo, requer a modelagem precisa

Tabela 8 - Estatísticas para o PPP da aeronave

Estatísticas	DE (cm)	DN (cm)	DU (cm)
Erro Médio	-1,1	0,1	-9,7
Desvio Padrão	6,5	3,4	10,8
EMQ	6,6	3,5	14,5

de praticamente todos os efeitos sistemáticos envolvidos com a propagação dos sinais GNSS e efeitos geodinâmicos relacionados com as estações, além da disponibilidade de órbitas precisas e correções de relógios em tempo real. Neste caso, uma rede geodésica GNSS a nível global ou regional se faz necessário para a estimativa de tais informações e disponibilização aos usuários. Neste sentido, o projeto piloto do IGS foi criado para atender tal demanda.

Este trabalho apresentou o método de PPP em Tempo Real envolvendo a revisão bibliográfica e o desenvolvimento de um sistema computacional para realização do mesmo utilizando correções de relógios e órbitas dos satélites em tempo real disponibilizadas pelo IGS/BKG. Os experimentos foram realizados com dados GPS coletados no Brasil envolvendo PPP estático e cinemático no modo pós-processado e em tempo real.

A série temporal de coordenadas GPS estimadas no PPP para a estação RECF foi gerada com o software RT_PPP considerando dados para os anos de 2012 e 2013. Ao comparar a solução diária estimada com a solução semanal do SIRGAS-CON, a variação máxima durante todo o período não ultrapassou o valor de 4 cm e 6 cm, respectivamente para as componentes planimétrica e altimétrica, conforme pode ser visto nas Figuras 2, 3 e 4 e na Tabela 3.

O período de convergência do ajustamento dos dados no modo PPP, seja estático ou cinemático, foi de aproximadamente duas horas de dados, conforme pode ser visto nas Figuras 5, 6 e 7. O PPP cinemático aplicado para estações estáticas apresentou EMQ 3D diário variando de aproximadamente 7 a 10 cm após o período de convergência (ver Tabela 5).

Para o caso de PPP em tempo real estático utilizando as correções de relógios do IGS/

BKG e posição dos satélites advindas das órbitas previstas, a discrepância em relação ao posicionamento relativo em rede foi de aproximadamente 5 cm (Figura 12 e Tabela 6).

No caso do PPP em trajetória cinemática de aeronaves, utilizaram-se as correções de relógios geradas em tempo real e armazenadas para posterior realização do PPP simulando tempo real. Os dados GPS foram coletados em ensaios em voo por aeronaves produzidas no Brasil. Os resultados do PPP utilizando correções de relógios com solução para tempo real foram comparados com resultados usando solução final de relógios do IGS. Neste caso, o PPP em tempo real apresentou resultados da ordem de 10 a 20 cm após período de convergência com EMQ considerando todo o período do voo de aproximadamente 7 cm e 15 cm, respectivamente para as componentes planimétricas (DE e DN) e altimétrica (DU) (ver Tabela 8). Estes resultados mostraram que o PPP cinemático em tempo real pode ser realizado com acurácia esperada na mesma magnitude que o PPP cinemático para estações estáticas.

É importante ressaltar que o método RTPPP se encontra atualmente em fase de desenvolvimento sendo motivos de investigações científicas podendo-se citar, por exemplo, melhoramento no tempo de convergência a partir da solução de ambiguidades como inteiras no PPP, algo que sempre foi factível de solução no posicionamento relativo. Uma vez que o método RTPPP se torne totalmente operacional favorecerá os usuários com uma enorme aplicabilidade, seja para fins práticos ou de pesquisas científicas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às agências FAPESP (Processo nº 2007/08687-4) e CNPq pelo apoio financeiro em forma de bolsa e projeto Universal (Processo: 475775/2013-9), além da empresa EMBRAER.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, C. M. D.; MONICO, J. F. G.; ROMÃO, V. M. C. Análise da acurácia no PPP a partir da solução de ambiguidades GPS em curtos períodos de ocupação. **Revista Brasileira de Cartografia**, Nº 63/5, p. 585-600, 2011.

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.
- BKG, Federal Agency for Cartography and Geodesy. Disponível em: <<http://igs.bkg.bund.de/index/index>>. Acesso em Fev. 2014.
- BERTIGER, W.; DESAI, S. D.; HAINES, B.; HARVEY, N.; MOORE, A. W.; OWEN, S.; WEISS, J. P. Single receiver phase ambiguity resolution with GPS data. **Journal of Geodesy**, v.84, doi 10.1007/s00190-010-0371-9, p.327–337. 2010.
- BLEWITT, G. An automated editing algorithm for GPS data. **Geophysical Research Letters**, v. 17, n. 3, p. 199-202, mar. 1990.
- BOEHM, J.; SCHUH, H. Vienna Mapping Functions in VLBI Analyses. **Geophysical Research Letters**, 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.
- 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.
- EUREF. Euref Permanent Network. Disponível em <www.epncb.oma.be/euref_IP/>. Acesso em: mai 2014.
- 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.
- GENG, J.; TEFERLE, F. N.; MENG, X.; DODSON, A. H. Towards PPP-RTK: Ambiguity resolution in real-time precise point positioning. **Advances in Space Research**, v.47,10, doi: 10.1016/j.asr.2010.03.030, p. 0273-1177. 2011.
- 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. **Precise GNSS Clock-Estimation for Real-Time Navigation and Precise Point Positioning**. 2010. PhD Thesis - Technical University of Munich. Munique, Alemanha. 2010. 131p.
- HOFMANN - WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. GNSS-Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, GALILEO & more. New York: Springer-Verlag, 2008. 516p.
- KLOBUCHAR, J. A. Ionospheric effects on GPS. In: PARKINSON, B. W.; SPILKER JUNIOR, J. J. Global Positioning System: theory and applications. Wahington, Dc: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, 1996. Cap. 12, p. 485-515.
- 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.
- LEICK, A. GPS satellite surveying. 3rd. ed.: New York: John Wiley & Sons, 2004. 435p.
- McCARTHY D. D.; PETIT G. IERS Conventions (2003), **IERS Technical Note 32**, Central Bureau of IERS- Observatoire de Paris.
- MARQUES, H. A. SILVA. **Modelo estocástico para dados GNSS e séries temporais de coordenadas GNSS**. 2013. 205 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2013.
- 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.
- _____. PPP em Tempo Real com Estimativa das Correções dos Relógios dos Satélites no Contexto de Rede GNSS. 2012. 244 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista,

Presidente Prudente. 2012.

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.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS**: descrição, fundamentos e aplicações. 2. Ed São Paulo: Unesp, 2008. 476p.

MONICO, J. F. G.; DAL PÓZ, A. P.; GALO, M.; DOS SANTOS, M. C. DE OLIVEIRA, L. C. Acurácia e Precisão: Revendo os Conceitos de Forma Acurada. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 15, n 3, p.469-483, 2009.

RTCM. **RTCM recommended standards for differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems Service)**. Version 3.1. Radio technical commission for maritime services, Virginia. 2007.

IGS-RTPPP - **IGS Real Time Pilot Project**. Disponível em: <<http://www.rtigs.net>>. Acesso em: mai. 2014.

SAPUCCI, L. F. **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.

SAPUCCI, L. F.; MACHADO, L. A. T.; MONICO, J. F. G. Previsões do atraso zenital troposférico para a América do Sul: Variabilidade sazonal e avaliação da qualidade. **Revista Brasileira de Cartografia**, Nº 58/03, p. 279-292, 2006.

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.

NTRIP – **Networked Transport of RTCM via internet protocol**. Disponível em: <http://igs.bkg.bund.de/index_ntrip.htm>. Acesso em: 08 mai. 2014.

TEUNISSEN, P. J. 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.

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.; MERVAT, L.; DOUSA, J. Real-Time Clock and Orbit Corrections for Improved Point Positioning via NTRIP In: **Proceedings ... GNSS 2007**. Fort Worth. USA.