

---

## PPP COM SOLUÇÃO FIXA DAS AMBIGUIDADES GPS

CHAENNE MILENE DOURADO ALVES LIMA 1

JOÃO FRANCISCO GALERA MONICO 2

HAROLDO ANTONIO MARQUES 3

1 Universidade Estadual Paulista – UNESP  
Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas  
FCT/UNESP Presidente Prudente, SP  
chaennedourado@gmail.com

2 Universidade Estadual Paulista – UNESP  
Departamento de Cartografia  
Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas  
FCT/UNESP Presidente Prudente, SP

3 Universidade Federal de Pernambuco - UFPE  
Centro de Tecnologia e Geociências - CTG  
Departamento de Engenharia Cartográfica, Recife, PE

---

**RESUMO** – Ao longo dos anos, vários métodos têm sido desenvolvidos para a obtenção do posicionamento GNSS com melhor acurácia. No contexto do PPP, estudos em nível mundial estão sendo realizados com a finalidade de melhorar a acurácia em curtos períodos de observação, ou até mesmo de forma instantânea. Este artigo apresenta uma abordagem teórica e prática do método de solução de ambiguidades fixas no PPP baseado na estimativa dos UPDs (*uncalibrated phase delays*). Algumas estações GNSS foram selecionadas para simular uma estação de usuário e tiveram as coordenadas estimadas no PPP com solução fixa de ambiguidades. As coordenadas com solução fixa foram comparadas com aquelas advindas do PPP com solução *float* e análises de acurácia e melhoramentos foram realizados. Para realização dos experimentos, os UPDs foram estimados com dados de estações de uma rede GNSS com a utilização das combinações lineares da SD (Simple Diferença) entre satélites da WL (*wide-lane*) e NL (*narrow-lane*) e aplicados para solução de ambiguidades em nível de usuário. A rede GNSS foi composta pelas estações da RBMC e da Rede GNSS-SP. De uma forma geral, as ambiguidades foram fixadas por volta de 9 minutos com melhorias por volta de 85% na componente horizontal e 45% na vertical. Em alguns casos observou-se degradação ao se aplicar o método de solução fixa de ambiguidades, o que mostra que os resultados são promissores, mas ainda há muito a se explorar e aperfeiçoar.

**ABSTRACT** – Over the last years, several methods have been developed to obtain GNSS positioning with better accuracy. In the context of PPP, global studies are being conducted in order to improve the accuracy in short periods of time, or even instantly. This paper presents a theoretical and practical approach of the fixed ambiguity resolution method in PPP based on estimates of UPDs (*uncalibrated phase delays*). Some GNSS stations were selected to simulate a user station and have had the coordinates estimated in PPP with fixed ambiguity resolution. The coordinates with fixed ambiguity resolution were compared to those one which were obtained from float PPP resolution. Accuracy analysis and improvements in terms of time have been done too. About the experiments performance, the UPDs were estimated with data from a GNSS network stations by using linear combinations of SD (single difference) between satellites WL (*wide-lane*) and NL (*narrow-lane*) and applied user-level ambiguity resolution. The GNSS network was composed by stations of the RBMC and GNSS-SP Network. In general, the ambiguities were fixed at about 9 minutes with improvements to around 85% in the horizontal component and 45% in the up component. In some cases there was degradation when applying the fixed ambiguity resolution method, which shows that the results are promising, but they can be still much more explored and improved.

---

## 1 INTRODUÇÃO

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

As medições da fase da onda portadora têm de ser exploradas se o interesse for de realizar o posicionamento com nível de acurácia centimétrica. Para que seja utilizada com alta precisão, torna-se necessário conhecer o número de ciclos inteiros da onda portadora entre o satélite e o receptor no instante da primeira observação. Esse número de ciclos inteiros é o termo denominado ambiguidade (SEEBER, 2003).

A solução de ambiguidades é um processo que envolve a estimativa de valores reais de ambiguidades, devendo os mesmos ser convertidos para valores inteiros e serem então injuncionados no ajustamento, proporcionando parâmetros estimados com melhor acurácia. Considerando que o PPP é um método altamente em evidência e que o intervalo de tempo e a acurácia na obtenção dos parâmetros estão diretamente ligados com a solução das ambiguidades, pode-se dizer que a solução de ambiguidade no PPP representa o estado da arte no contexto das investigações no posicionamento GNSS.

## 2 MÉTODO DE SOLUÇÃO DE AMBIGUIDADES NO PPP

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

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

$$PD_{IF}^s = \rho_r^s + c[dt_r - dt^s] + T_r^s + \varepsilon_{PDIF_r}^s \quad (1)$$

$$\lambda_{IF} \varphi_{IF_r}^s = \rho_r^s + c[dt_r - dt^s] + \lambda_{IF} \bar{N}_{IF_r}^s + T_r^s + \varepsilon_{\varphi_{IF_r}^s} \quad (2)$$

onde:  $\rho_r^s$  é a distância geométrica entre o centro de fase da antena do receptor  $r$ , no instante de recepção do sinal, e do centro de fase da antena do satélite  $s$ , no instante de transmissão do sinal;  $c$  é a velocidade da luz no vácuo;  $dt_r$  é o erro do relógio do receptor;  $dt^s$  é o erro do relógio do satélite;  $T_r^s$  é o erro causado pela refração troposférica;  $\varepsilon_{PDIF_r}^s$  e  $\varepsilon_{\varphi_{IF_r}^s}$  são os resíduos da pseudodistância e da fase da onda portadora contendo os erros aleatórios e não modelados;  $\bar{N}_{IF_r}^s$  é a ambiguidade da *ion-free* e é composto pela ambiguidade da fase e pelos UPDs (*uncalibrated phase delays*) originados no receptor e no satélite. Estudos mostraram que os UPDs, *bias* da fase do satélite e do receptor, são absorvidos pelas ambiguidades fazendo que estas percam sua característica de inteiro (BLEWITT, 1989).

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

No processo de solução de ambiguidades, a menos que seja aplicada uma estratégia da natureza que recupere o número inteiro de comprimentos de onda (segunda etapa), as soluções dos parâmetros geodésicos são consideravelmente enfraquecidas por sua correlação com a ambiguidade envolvida na medida fase. O problema de solucionar essas ambiguidades é conhecido como solução de ambiguidades (*ambiguity resolution*) ou fixação das ambiguidades (*ambiguity fixing*) (BLEWITT, 1989). A solução fixa das ambiguidades no PPP se torna possível se os UPDs forem conhecidos (BLEWITT, 2006).

No ano de 2008 foi desenvolvido um método de solução de ambiguidades no PPP baseado na estimação dos UPDs dos satélites, dentro de uma rede de estações, para posterior solução de ambiguidades (GE et al., 2008). Nesse

método as ambiguidades da combinação *ion-free* são decompostas em WL (*wide-lane*) e NL (*narrow-lane*) e aplica-se a SD (Simples Diferença) entre satélites para remover os UPDs dependentes do receptor. Utilizando uma rede de estações de referência, os UPDs da WL (UPD\_WL) são determinados por meio da combinação *Melbourne-Wübbena* (MELBOURNE, 1985; WÜBBENA, 1985). A partir das ambiguidades WL fixas, os UPDs da NL (UPD\_NL) e seu respectivo desvio padrão são calculados com base na solução real da *ion-free* e o número inteiro de ambiguidades WL (GENG; BOCK, 2013). Esse método é apresentado a seguir.

## 2.1 Método da Estimativa dos UPDs

O método baseado na Estimativa dos UPDs, apresentado por Ge et al. (2008), tem como base a estimativa precisa dos UPDs e a aplicação dos mesmos para posterior solução das ambiguidades de uma única estação. Essa estimativa é realizada por meio da SD de ambiguidades entre satélites, a partir de uma rede de referência GNSS. O método consiste em dois módulos, o Módulo da Rede contém a estimativa dos UPDs da WL e estimativa dos UPDs da NL. No outro módulo, do Receptor ou Usuário, os UPDs estimados são usados para recuperar a propriedade de inteiro das ambiguidades da *Wide-Lane* e *Narrow-Lane*. As formulações apresentadas a seguir foram adaptadas a partir do modelo original apresentado por Ge et al. (2008) onde ambiguidades *ion-free*, equação (2), podem ser expressas como combinação linear das ambiguidades WL e NL (*narrow-lane*):

$$\bar{N}_{IF_r}^s = (f_1/(f_1 + f_2))\bar{N}_{n_r}^s + (f_1f_2/(f_1^2 - f_2^2))\bar{N}_{w_r}^s \quad (3)$$

$$\bar{N}_{n_r}^s = N_{n_r}^s + \Delta\phi_{n_r} - \Delta\phi_n^s \quad e \quad \bar{N}_{w_r}^s = N_{w_r}^s + \Delta\phi_{w_r} - \Delta\phi_w^s \quad (4)$$

onde:  $N_{n_r}^s$  é a ambiguidade inteira da combinação linear NL;  $N_{w_r}^s$  é a ambiguidade inteira da combinação linear WL;  $\Delta\phi_{n_r}$  e  $\Delta\phi_{w_r}$  são os UPDs originados no receptor, respectivamente para as combinações *narrow-lane* e *wide-lane*;  $\Delta\phi_n^s$  e  $\Delta\phi_w^s$  são os UPDs originados no satélite, respectivamente para as combinações *narrow-lane* e *wide-lane*.

A partir da equação (3) a SD de ambiguidades entre satélites é formada e define-se a *ion-free* das ambiguidades da SD, considerando os UPDs.

$$\bar{N}_{IF_r}^{s,j} = (f_1/(f_1 + f_2))\bar{N}_{n_r}^{s,j} + (f_1f_2/(f_1^2 - f_2^2))\bar{N}_{w_r}^{s,j} \quad (1)$$

$$\bar{N}_{IF_r}^{s,j} = \frac{f_1}{f_1+f_2} (N_{n_r}^{s,j} + \Delta\phi_n^{s,j}) + \frac{f_1f_2}{f_1^2-f_2^2} (N_{w_r}^{s,j} + \Delta\phi_w^{s,j}) \quad (2)$$

Na Equação (6),  $\Delta\phi_w^{s,j}$  é o UPD\_WL da SD das ambiguidades (UPD\_WL\_SD) e  $\Delta\phi_n^{s,j}$  é o UPD\_NL da SD das ambiguidades (UPD\_NL\_SD).

A estimativa das ambiguidades WL é realizada utilizando a combinação linear *Melbourne-Wübbena*. Desta forma, considerando as ambiguidades reais WL ( $\bar{N}_{w_r}^s$ ) obtidas em cada época com dados de observação, obtém-se a média da ambiguidade WL de todas as épocas ( $\hat{N}_{w_r}^s$ ). Essa é a ambiguidade da WL no espaço dos números reais, denominada *float*, e é composta pelas ambiguidades WL e UPDs do satélite  $s$  e receptor  $r$ . A SD das ambiguidades WL e respectivo desvio padrão, considerando os satélites  $s$  e  $j$ , podem ser calculados da seguinte forma:

$$\hat{N}_{w_r}^{s,j} = \hat{N}_{w_r}^s - \hat{N}_{w_r}^j \quad (7)$$

$$\sigma_{\hat{N}_{w_r}^{s,j}} = \sqrt{\sigma_{\hat{N}_{w_r}^s}^2 + \sigma_{\hat{N}_{w_r}^j}^2} \quad (8)$$

Na SD das ambiguidades da WL, o UPD do receptor é eliminado, permanecendo o UPD correspondente aos satélites. Com os UPDs\_WL ( $\Delta\phi_w^{s,j}$ ) e seus desvios padrão ( $\sigma_{\Delta\phi_w^{s,j}}$ ) estimados a partir da Rede GNSS, pode-se recuperar a característica de número inteiro da SD das ambiguidades WL, conforme as expressões (9) a (11):

$$\widehat{N}_{w_r}^{s,j} = N_{w_r}^{s,j} + \Delta\phi_w^{s,j} \quad (3)$$

$$\widetilde{N}_{w_r}^{s,j} = \widehat{N}_{w_r}^{s,j} - \Delta\phi_w^{s,j} \quad (10)$$

$$\sigma_{\widetilde{N}_{w_r}^{s,j}} = \sqrt{\sigma_{\widehat{N}_{w_r}^{s,j}}^2 + \sigma_{\Delta\phi_w^{s,j}}^2} \quad (11)$$

Por arredondamento para o inteiro mais próximo de  $\widetilde{N}_{w_r}^{s,j}$  pode-se obter o valor inteiro da SD das ambiguidades WL ( $\widetilde{N}_{w_r}^{s,j}$ ). E a SD das ambiguidades NL pode ser obtida a partir da Equação (6), com respectivo desvio padrão.

$$\widehat{N}_{n_r}^{s,j} = \frac{f_1+f_2}{f_1} \widehat{N}_{IF_r}^{s,j} - \frac{f_2}{f_1-f_2} \widetilde{N}_{w_r}^{s,j} \quad (12)$$

$$\sigma_{\widehat{N}_{n_r}^{s,j}} = \frac{f_1+f_2}{f_1} \sigma_{\widehat{N}_{IF_r}^{s,j}} \quad (13)$$

onde:  $\widehat{N}_{IF_r}^{s,j}$  é o valor *float* da ambiguidade da observável *ion-free* com o respectivo desvio padrão ( $\sigma_{\widehat{N}_{IF_r}^{s,j}}$ ).

Se os UPDs\_NL( $\Delta\phi_n^{s,j}$ ) e seus desvios padrão ( $\sigma_{\Delta\phi_n^{s,j}}$ ) forem estimados, as ambiguidades da SD da NL também podem ter sua característica de número inteiro recuperada, conforme as expressões (14) a (16):

$$\widehat{N}_{n_r}^{s,j} = N_{n_r}^{s,j} + \Delta\phi_n^{s,j} \quad (14)$$

$$\widetilde{N}_{n_r}^{s,j} = \widehat{N}_{n_r}^{s,j} - \Delta\phi_n^{s,j} \quad (15)$$

$$\sigma_{\widetilde{N}_{n_r}^{s,j}} = \sqrt{\sigma_{\widehat{N}_{n_r}^{s,j}}^2 + \sigma_{\Delta\phi_n^{s,j}}^2} \quad (16)$$

O valor inteiro de  $\widetilde{N}_{n_r}^{s,j}$  pode ser obtido pelo arredondamento para o inteiro mais próximo. Após a determinação das ambiguidades WL e NL como números inteiros, elas podem ser inseridas como injunção no posicionamento fazendo uso da equação das ambiguidades *ion-free* (Eq. (6)).

### 2.1.1 Estimativa dos UPDs

O UPD\_WL ( $\Delta\phi_w^{s,j}$ ) e seu desvio padrão ( $\sigma_{\Delta\phi_w^{s,j}}$ ) para um par de satélites (*s,j*) a partir de *m* estações, é calculado através da média das partes fracionárias de todas as SD das ambiguidades WL envolvidas na rede:

$$\Delta\phi_w^{s,j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ \text{frac} \left( \widehat{N}_{w_i}^s - \widehat{N}_{w_i}^j \right) \right] \quad (17)$$

$$\sigma_{\Delta\phi_w^{s,j}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \{ [\text{frac}(\widehat{N}_{w_i}^s - \widehat{N}_{w_i}^j)] - \Delta\phi_w^{s,j} \}^2}{n(n-1)}} \quad (18)$$

onde: *n* é o número de ambiguidades para a estimativa do UPD\_WL para o par de satélites (*s,j*) com relação a todas as estações envolvidas; *frac*( ) é uma função que retorna a parte fracionária positiva das variáveis de entrada.

Após estimados os UPDs\_WL e se obtido as ambiguidades WL fixas  $\widetilde{N}_{w_r}^{s,j}$ , os UPDs\_NL e seus desvios padrão podem ser estimados:

$$\Delta\phi_n^{s,j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ \text{frac} \left( \widehat{N}_{n_i}^{s,j} \right) \right] \quad (19)$$

$$\sigma_{\Delta\phi_n^{s,j}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \{ [\text{frac}(\widehat{N}_{n_i}^{s,j})] - \Delta\phi_n^{s,j} \}^2}{n(n-1)}} \quad (20)$$

### 3 METODOLOGIA

Experimentos foram realizados aplicando-se o método da estimativa dos UPDs para solução das ambiguidades de uma estação de usuário. Os UPDs WL e NL foram gerados por meio do software UPD\_NETWORK (LIMA, 2015) com a utilização das observações das estações da rede GNSS, nos dias 012 a 018 do ano de 2014. A Rede GNSS foi composta por estações da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) e da Rede GNSS-SP (Rede GNSS ativa do Estado de São Paulo), totalizando aproximadamente 100 estações.

Para o Módulo Usuário, o software RT\_PPP (MARQUES, *et al.*, 2014), desenvolvido em linguagem de programação C/C++, foi modificado com a implementação da metodologia de solução por meio das estimativas dos UPDs e passou a realizar PPP com solução de ambiguidades fixas. Essa nova versão foi denominada RT\_PPP\_AR (*Real Time PPP Ambiguity Resolution*) (LIMA, 2015).

Dois estações foram selecionadas aleatoriamente como estações de teste, simulando um usuário: BRAZ (Brasília - DF) e PPTTE (Presidente Prudente - SP). Essas estações não fizeram parte da rede GNSS utilizada para estimativa dos UPD\_WL e UPD\_NL. No experimento realizado não se determinou tempo mínimo para que as ambiguidades fossem solucionadas como inteiro. Desta forma, foi possível analisar os resultados se observando o tempo mínimo necessário para fixação das ambiguidades em modo estático. Os dados foram coletados por um período de oito horas, das 8 às 16h, durante os sete dias. Cada processamento PPP foi realizado duas vezes, um com ambiguidades reais e outro com ambiguidades fixas. Os processamentos dos dados foram realizados utilizando as medidas GPS (*Global Positioning System*) dos códigos P1 e P2 e das fases na L1 e L2, com precisões adotadas de, respectivamente, 0,8; 1,0; 0,008 e 0,01 m, considerando que estes valores são inseridos na equação de propagação das incertezas da combinação *ion-free*. Para os casos em que os receptores não coletam a observável P1, foram utilizadas as medidas C1 aplicando as correções de DCBs P1-C1. O intervalo de coleta dos dados foi de 15s.

As coordenadas de referência das estações de teste para avaliação dos resultados foram obtidas no sistema SIRGAS 2005 (época 2005,0), (*Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas*) convertidas para o sistema ITRF 2008 (*International Terrestrial Reference Frame*) e atualizadas para a época dos dados. As velocidades das estações foram obtidas a partir do aplicativo "VEMOS2009", Modelo de velocidades para América do Sul e Caribe, dentro do contexto SIRGAS (DREWES e HEIDBACH, 2012). Para análise dos resultados foram obtidas as discrepâncias entre as coordenadas de referência e as coordenadas obtidas nos processamentos, e essas discrepâncias foram transformadas para o SGL (Sistema Geodésico Local) com respectiva propagação das incertezas para fins de análises (MONICO, 2008).

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

As estimativas de UPDs geradas pelos dados da Rede GNSS por meio do software UPD\_NETWORK foram aplicadas nos processamentos realizados pelo software RT\_PPP\_AR. Desta forma, as SD de ambiguidades WL e NL *float* foram corrigidas por meio dos UPD\_WL e UPD\_NL, a fim de se obter as ambiguidades fixas. A fixação para inteiros das ambiguidades WL foi realizada com arredondamento para o inteiro mais próximo. As ambiguidades NL foram fixadas com a utilização do método LAMBDA (*Least-squares AMBIGUITY Decorrelation Adjustment*) e a validação realizada por meio do Teste *Ratio*, onde o valor crítico adotado foi 3.

Os valores de EMQ (Erro Médio Quadrático) das componentes leste (*e*), norte (*n*), vertical (*u*) no SGL, desvio padrão e os valores do *Ratio* são apresentados adiante. A porcentagem de melhoria para as componentes do SGL (%Melhoria) foi calculada para avaliar de forma mais clara os resultados obtidos com ambiguidades fixas com relação aos de ambiguidades reais. Essa porcentagem aparece em alguns resultados como negativa, que para fins deste trabalho é uma forma representativa de que não houve melhoria, mas sim que a solução degradou. Os valores de EMQ foram obtidos através da resultante do erro médio (tendência) e do desvio padrão (incerteza), o que representa uma medida de acurácia. Com relação às análises das componentes no SGL, a resultante horizontal (2D) foi calculada pela resultante das discrepâncias ( $\sqrt{e^2 + n^2}$ ). A componente vertical foi analisada individualmente.

### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados a seguir são referentes ao PPP gerado pelo software RT\_PPP\_AR para dados coletados no modo estático, com solução das ambiguidades reais e fixas. Apesar de processados dados referentes aos dias 12 a 18 de 2014, para evitar repetições, somente alguns resultados são apresentados, pois eles representam a

maioria das situações que ocorreram com a fixação das ambiguidades nesse experimento. As análises com relação aos valores de EMQ e desvio padrão das componentes leste, norte, vertical e resultante horizontal foram feitas na mesma época em que aconteceu a fixação das ambiguidades. As figuras 1 e 2 apresentam o erro para a resultante horizontal dos processamentos de PPP, para as estações BRAZ e PPTE.

Para a estação BRAZ (figura 1), as ambiguidades foram fixadas com 9 minutos de dados (36 épocas), com valor do *Ratio* para fixação das ambiguidades NL de 3,02. Na estação PPTE (figura 2), as ambiguidades alcançaram a solução fixa com 9 minutos e 45s (39 épocas), com *Ratio* de 3,18.

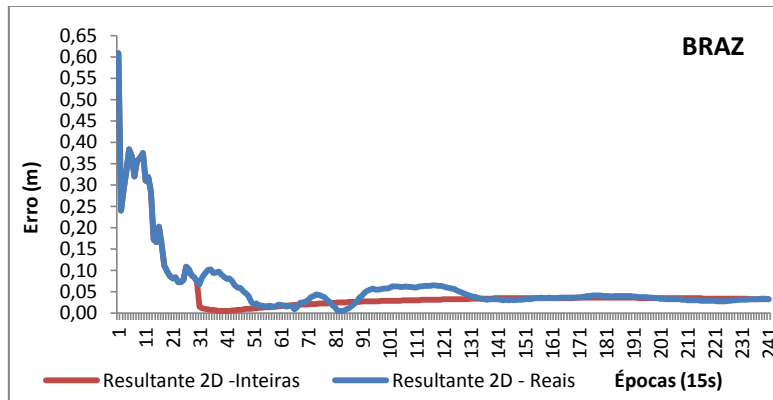


Figura 1 – Erro das soluções estimadas com ambiguidades reais e inteiras, para a resultante horizontal – BRAZ, dia 015 de 2014.

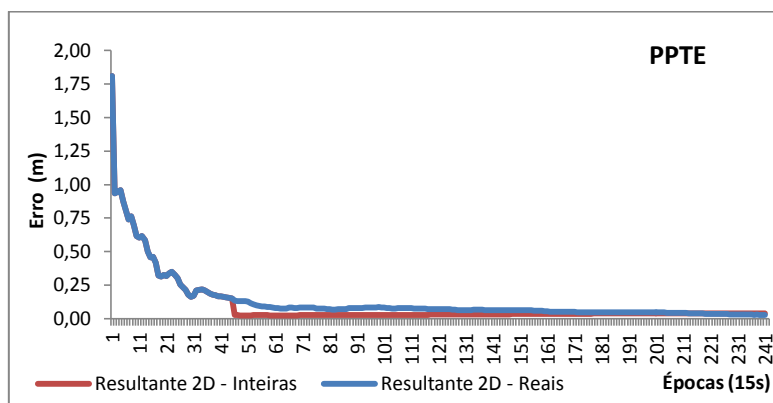


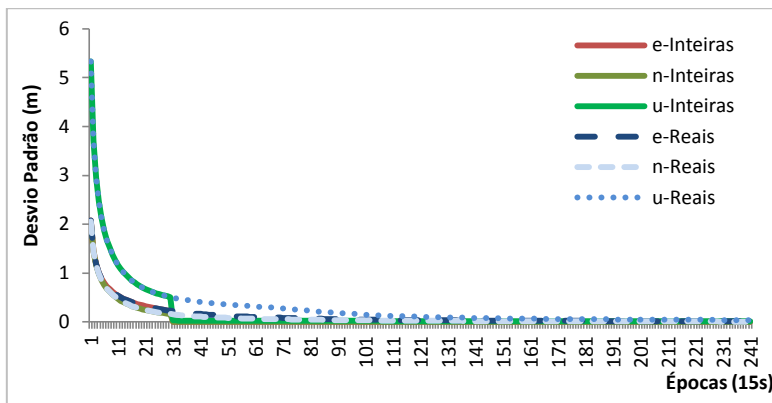
Figura 2 – Erro das soluções estimadas com ambiguidades reais e inteiras, para a resultante horizontal – PPTE, dia 015 de 2014.

A tabela 1 apresenta os valores de erro para as soluções de ambiguidades reais e fixas, porcentagem de melhoria e valor do *Ratio*, para as estações BRAZ e PPTE. A resultante horizontal, para ambas as estações, obteve melhoria acima de 80% após a fixação das ambiguidades. A porcentagem de melhoria do erro para a componente *e* foi de 98% para a estação BRAZ e 88% para PPTE. Em *n*, as porcentagens de melhoria foram de 79 e 92%, respectivamente para BRAZ e PPTE. Já para a componente vertical, na estação BRAZ, os resultados com ambiguidades reais foram degradados 29% após a solução de ambiguidades inteiras. Para a estação PPTE, as soluções de ambiguidades inteiras proporcionaram resultados com melhorias de 47%.

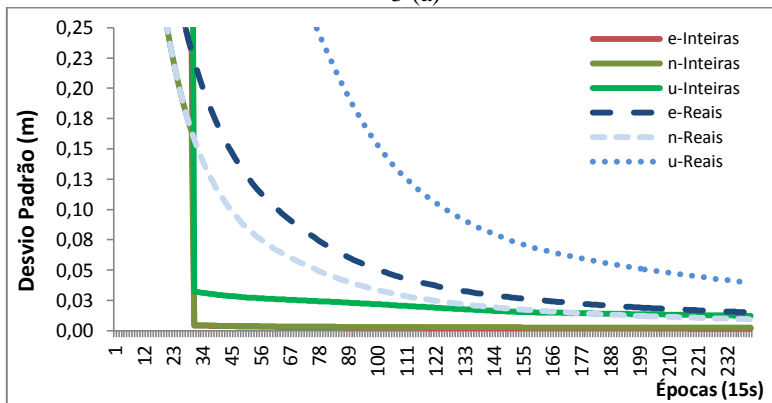
Tabela 1 – Erro para as componentes *e*, *n*, *u*, resultante horizontal, porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras e valores de *Ratio*.

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

As figuras 3 e 4 apresentam os valores de desvio padrão referentes às componentes  $e$ ,  $n$  e  $u$ , das soluções de ambiguidades reais e fixas, para as estações BRAZ e PPTE. Para mostrar com maior clareza a diferença de valores, a ampliação das figuras 3(a) e 4(a) é apresentada nas figuras 3(b) e 4(b).

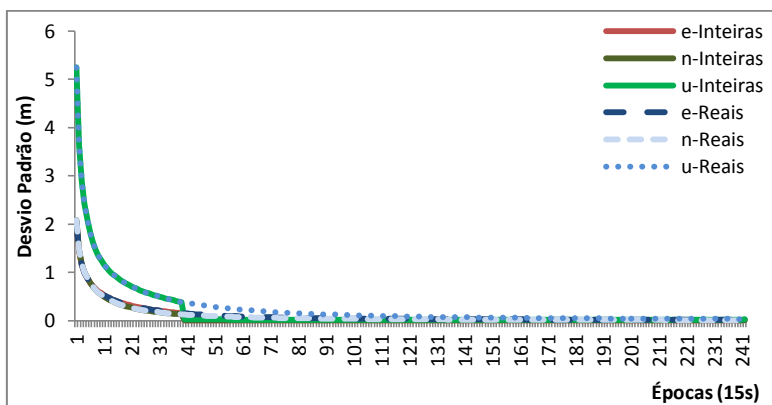


3 (a)

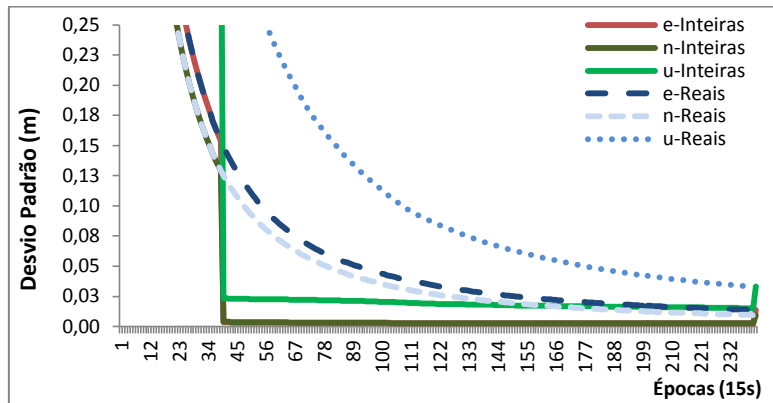


3 (b)

Figura 3 – Desvio padrão das soluções estimadas com ambiguidades reais e inteiras, para as componentes  $e$ ,  $n$  e  $u$  – BRAZ



4(a)



4(b)

Figura 4 – Desvio padrão das soluções estimadas com ambiguidades reais e inteiras, para as componentes e, n e u - PPTE

A tabela 2 contém a porcentagem de melhoria do desvio padrão, onde é possível verificar que o mesmo melhorou para as duas estações acima de 90%, para todas as componentes, a partir da época em que as ambiguidades foram fixadas.

Tabela 1–Desvio Padrão para as componentes e, n, u, resultante horizontal e porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras.

DesPad	Soluções reais (mm)			Soluções Inteiras (mm)			%melhoria		
	$\sigma e$	$\sigma n$	$\sigma u$	$\sigma e$	$\sigma n$	$\sigma u$	$\sigma e$	$\sigma n$	$\sigma u$
BRAZ	183,8	126,7	441,9	4,4	4,4	32,5	98	97	93
PPTE	124,7	104,6	319,5	3,4	3,9	23,5	97	96	93

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

Em alguns casos, a fixação das ambiguidades ocorreu com intervalo de tempo menor do que cinco minutos. Para ilustrar essa situação, as figuras 5 e 6 apresentam o erro para a estação BRAZ, para o dia 016 e 012 de 2014, onde as ambiguidades tiveram solução fixa com 14 e 3 épocas de dados, respectivamente.

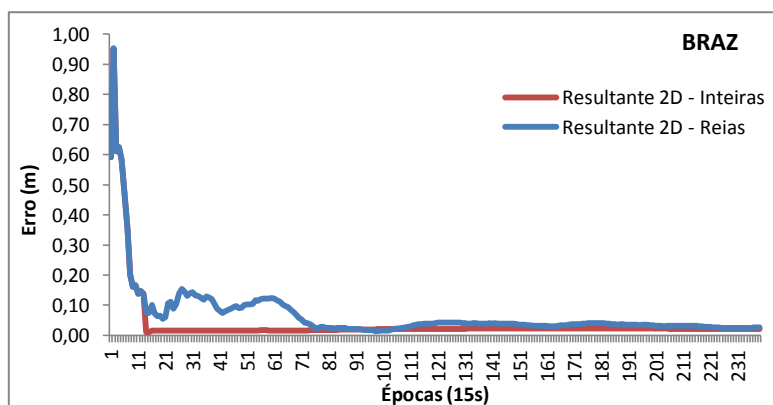


Figura 5 – Erro das soluções estimadas com ambiguidades reais e inteiras, para a resultante horizontal – BRAZ, dia 016 de 2014



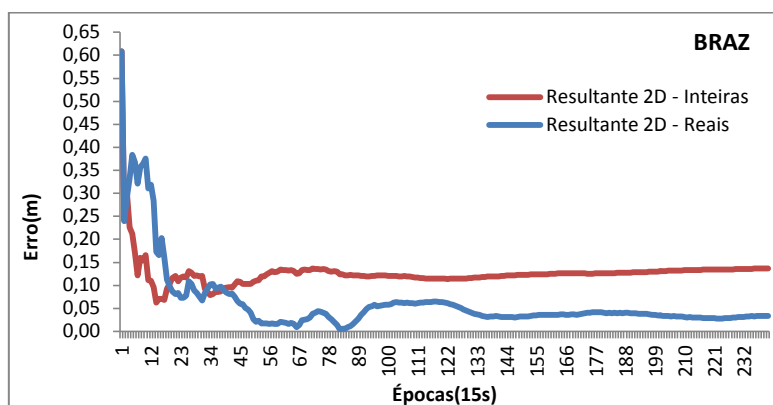


Figura 6 – Erro das soluções estimadas com ambiguidades reais e inteiras, para a resultante horizontal – BRAZ, dia 012 de 2014

Para os resultados apresentados na figura 5, onde as ambiguidades foram fixadas com 14 épocas (3 minutos e 30 segundos), o erro na resultante horizontal passou de 8 cm para 1 cm após a solução inteira das ambiguidades. Na componente  $e$ , o erro passou de 7 cm com ambiguidades reais para 0,09 cm com ambiguidades inteiras. Em  $n$ , o erro foi de 4 cm para 1 cm e em  $u$ , o erro passou de 47 cm para 26 cm, após fixação das ambiguidades. Em resumo, a porcentagem de melhoria foi de 87% para a resultante horizontal e de 45% para a componente vertical. O desvio padrão melhorou acima de 90% pra todas as componentes, passando de 44, 37 e 94 cm, para 0,86, 0,91 e 7,82 cm, em  $e$ ,  $n$  e  $u$ , respectivamente, após a solução fixa das ambiguidades.

Para os resultados apresentados na figura 6, cuja fixação ocorreu na 3ª época (45 segundos), o erro na componente  $e$  com ambiguidades reais foi de 29 cm e com ambiguidades fixas de 30 cm. Em  $n$ , o erro foi de 1 cm para ambiguidades reais e 0,8 para fixas e em  $u$ , 55 cm e 64 cm para ambiguidades reais e fixas, respectivamente. Isso significa que, na prática, os resultados não foram satisfatórios, ficando a solução degradada com cerca de 3% para a resultante horizontal e 17% para a componente vertical após a fixação das ambiguidades.

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

Nos resultados apresentados na figura 6 referentes ao processamento realizado no dia 012 de 2014 para a estação BRAZ, a solução foi considerada fixa com as ambiguidades de dois satélites. Nessa estação, com ângulo de elevação acima de 10 graus, para o dia 012 de 2014 havia mais de seis satélites visíveis durante todo o dia. Deste modo, como forma de minimizar as possibilidades de solução de ambiguidades fixas que degradam a estimativa dos parâmetros, parece razoável que a solução seja considerada fixa numa determinada época, quando as ambiguidades forem fixadas para o mínimo de seis satélites, mantendo o valor crítico do *Ratio* como maior ou igual a 3.

## 5 CONCLUSÕES

Em modo estático, foram realizados experimentos de PPP com solução de ambiguidades reais e fixas, sem determinação de tempo mínimo para que as ambiguidades fossem solucionadas. Dentre os processamentos realizados em modo estático, observou-se que, na grande maioria, as ambiguidades foram fixadas a partir de 9 minutos de dados, com melhorias por volta de 85% na componente horizontal e 45% na vertical. Em alguns casos, a fixação das ambiguidades ocorreu com intervalo de tempo menor do que cinco minutos. Essa variação de tempo pode ser principalmente devida à influência dos ruídos das medições de PD, efeitos de multicaminho e efeitos atmosféricos.

Outro aspecto a se considerar diz respeito às soluções fixas de ambiguidades que degradam o posicionamento. Em algumas situações observou-se uma degradação por volta de 3% na horizontal e 45% na vertical. Para reduzir tal ocorrência, recomenda-se por agora que a solução seja considerada fixa numa determinada época somente quando as ambiguidades forem fixadas para o mínimo de seis satélites, mantendo o valor crítico do *Ratio* como sendo maior ou igual a 3.

De uma forma geral, as porcentagens de melhoria das soluções de ambiguidades fixas com relação às de ambiguidades reais demonstram a importância e eficiência do método de solução de ambiguidades com estimativa dos UPDs. Os resultados são promissores, mas há o que se melhorar ainda, uma vez que em alguns casos ocorreu degradação da solução após aplicação do método de fixação das ambiguidades.

## REFERÊNCIAS

BLEWITT, G. **Carrier phase ambiguity resolution for the global positioning system applied to geodetic baselines up to 2000 km.** Journal Geophys Research v.94, B8, p.10187-10203. 1989.

\_\_\_\_\_. **The fixed point theorem of ambiguity resolution for precise point positioning of GPS networks: Theory and applications.** Eos Trans. AGU, 87(52), Fall Meet. Suppl., Abstract G43A-0977., 2006.

DE JONGE, P.; TIBERIUS, C. C. J. M. **The LAMBDA method for integer ambiguity estimation: implementation aspects.** T.U. Delft-internal report, Delft, 1996.

DREWES, H., O. HEIDBACH. **The 2009 Horizontal Velocity Field for South America and the Caribbean.** In: Kenyon S., M.C. Pacino, U. Marti (Eds.), "Geodesy for Planet Earth", IAG Symposia, 136: 657-664. 2012.

GE, M.; GENDT, G.; ROTHACHER, M.; SHI, C.; LIU, J. **Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in precise point positioning (PPP) with daily observations.** Journal of Geodesy, v.82,7, doi 10.1007/s00190-007-0187-4, p.389–399. 2008.

GENG, J.; BOCK, Y. **Triple-frequency GPS precise point positioning with rapid ambiguity resolution.** DOI 10.1007/s00190-013-0619-2. p. 449-460, 2013.

LIMA, C. M. D. A. **Posicionamento por ponto preciso com solução de ambiguidades inteiras no contexto de rede GPS.** (Tese - Doutorado em Ciências Cartográficas). Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2015.

MARQUES, H. A. **Influência da Ionosfera no Posicionamento GPS: Estimativa dos Resíduos no Contexto de Duplas Diferenças e Eliminação dos Efeitos de 2ª e 3ª Ordem.** (Dissertação - Mestrado em Ciências Cartográficas). Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2008.

MARQUES, H. A. ; MONICO, J. F. G. ; SHIMABUKURO, M. H. ; OYAMA, ROGÉRIO TAKESHI ; WENTZ, J. P. T. G. . **PPP em Tempo Real: fundamentos, implementação computacional e análises de resultados no modo estático e cinemático.** RBC. Revista Brasileira de Cartografia, v. 66, p. 1331-1345, 2014.

MELBORNE,W.G. **The case for ranging in GPS-based geodetic systems.** In: Proceedings first international symposium on precise positioning with the global positioning system, Rockville, 15–19 April pp 373–386, 1985.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: foundations, methods, and applications.** 2nd.ed. Berlin: New-York:Walter de Gruyter, 2003.

WÜBBENA G. **Software developments for geodetic positioning with GPS using TI-4100 code and carrier measurements.** In: Pro- ceedings of first international symposium on precise positioning with the global positioning system, Rockville, 15–19 April pp 403–412, 1985.

ZUMBERGE, J. F.; HEFLIN, M. B.; JEFFERSON, D. C.; WATKINS, M. M.; WEBB, F. H. **Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks.** Journal of Geophys Research, v.102(B3), doi:10.1029/96JB03860, p.5005–5017. 1997.