

Revista Brasileira de Cartografia (2016), Nº 68/5: 1063-1077  
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto  
ISSN: 1808-0936

## PPP COM SOLUÇÃO INTEIRA DAS AMBIGUIDADES DA FASE DA ONDA PORTADORA: FUNDAMENTOS ENVOLVIDOS E ANÁLISE DE ACURÁCIA

*PPP with Integer Resolution of Carrier Phase Ambiguity:  
Fundamentals Involved and Accuracy Assessment*

**Chaenne Milene Dourado Alves Lima<sup>1</sup>, João Francisco Galera Monico<sup>2</sup>  
& Haroldo Antonio Marques<sup>3</sup>**

<sup>1,2</sup>**Universidade Estadual Paulista, FCT/UNESP**  
**Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas**  
Rua Roberto Simonsen, 305, Caixa Postal 467 - CEP: 19060-900, Presidente Prudente, SP, Brasil  
chaennedourado@gmail.com, galera@fct.unesp.br

<sup>3</sup>**Universidade Federal de Pernambuco-UFPE**  
**Programa de Pós Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**  
Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária, Recife, PE, Brasil  
haroldoh2o@gmail.com

*Recebido em 19 de Fevereiro, 2016/ Aceito em 29 de Março, 2016*  
*Received on February 19, 2016/ Accepted on March 29, 2016*

### RESUMO

A solução de ambiguidades inteiras é um assunto muito pesquisado e tem sido um grande desafio nos últimos anos, principalmente para aplicações GNSS na Geodésia e Geodinâmica que requeiram posicionamento de alta acurácia. Estudos em nível mundial têm sido realizados no contexto da solução das ambiguidades inteiras no PPP, com a finalidade de melhorar a acurácia em curtos períodos de observação, ou até mesmo de forma instantânea. As ambiguidades da fase da onda portadora podem ser solucionadas com o auxílio de uma rede de estações GNSS, cujos dados são utilizados para estimar os UPDs (*uncalibrated phase delays*), que são caracterizados como erros sistemáticos ou *bias* (atrasos de *hardware* e outros) do satélite e do receptor. Os UPDs geralmente são absorvidos pelos parâmetros de ambiguidades no processo de estimativa pelo método dos mínimos quadrados, o que proporciona à ambiguidade perda de sua característica de número inteiro. Esse artigo apresenta as metodologias envolvidas no processo de solução inteira de ambiguidades no PPP, bem como os experimentos realizados com análise de acurácia ao aplicar uma das metodologias apresentadas. O *software* denominado UPD\_NETWORK foi desenvolvido para estimativa dos UPDs e feitas adaptações no *software* RT\_PPP para que o mesmo passasse a realizar PPP com a estimativa de ambiguidades inteiras. Para tal, uma Rede GNSS foi composta por estações da RMBC e da Rede GNSS-SP. As coordenadas estimadas no PPP com solução fixa de ambiguidades foram comparadas com aquelas advindas de PPP com solução *float* e análises de acurácia em função do tempo foram realizadas. No caso do PPP estático verificaram-se melhorias de até 80% para períodos curtos de coleta (poucos minutos) e, no caso cinemático, melhoramentos de 60% até 90% foram alcançados ao se aplicar o método de solução inteira de ambiguidades no PPP.

**Palavras chaves:** Solução de Ambiguidades Inteiras, PPP, Redes GNSS, UPD (*uncalibrated phase delays*).

## ABSTRACT

The integer ambiguity resolution is a well-researched topic, but it remains a huge challenge in recent years mainly to GNSS applications into Geodynamic and Geodesy that requires high accuracy positioning. Worldwide researches have been carried out in the context of PPP integer ambiguity resolution aiming to improve the accuracy for short observation period, or even instantly. The carrier phase ambiguity can be resolved by using a GNSS network data. Those data are used to estimate UPDs (uncalibrated phase delays) that are characterized as bias (hardware delay and others) of the receptor and satellite. UPDs are generally absorbed by ambiguity parameters in the least squares adjustment, which causes the loss of the integer number characteristic in the ambiguity. This paper presents the involved methodologies in the PPP integer ambiguity resolution and experiments carried out in order to analyze the accuracy when applying one of those methodologies. The software called UPD\_NETWORK was developed to estimate the UPDs and adjustments made in RT\_PPP software intending that it become able to carry out PPP using estimated integer ambiguity. That way, a GNSS network was comprised of RMBC stations and of the GNSS-SP Network. Estimated coordinates with fixed ambiguity PPP were compared to that obtained from float PPP solution. Accuracy analysis in terms of time when applying the PPP integer ambiguity resolution method produced as results improvements of up to 80% to a short period (few minutes) to static PPP; and 60 to 90% in the kinematic case.

**Keywords:** Integer Ambiguity Resolution, PPP, GNSS Network, UPD (uncalibrated phase delays).

## 1. INTRODUÇÃO

Com a ampla utilização do GNSS, pesquisas têm se intensificado e, conseqüentemente, o desenvolvimento de vários métodos para a obtenção de posicionamento com melhor acurácia. A gama de aplicações vai muito além de fornecer posição instantânea e velocidade de um ponto em um referencial específico, proposta inicial dos sistemas GNSS. Elas se inserem também no contexto ambiental, meteorologia, dentre outras (MONICO, 2008).

O PPP (Posicionamento por Ponto Preciso - *Precise Point Positioning*) é o método de posicionamento GNSS realizado em uma única estação, com a fase da onda portadora como observável principal, fazendo uso das efemérides precisas, das correções para os relógios dos satélites e do adequado modelamento dos erros envolvidos nas observações do GNSS (ZUMBERGE *et al.*, 1997). Nesse método não existe a necessidade, por parte do usuário, de aquisição simultânea de dados de rastreamento a partir de uma estação de referência (base), característica do posicionamento relativo.

Para se realizar o PPP, com alta acurácia, de forma rápida ou até mesmo instantânea, é necessário que as ambiguidades sejam solucionadas como vetor composto por números inteiros (solução inteira ou fixa). Ambiguidade é o termo usado para representar o número inteiro de ciclos entre o satélite e o receptor no instante da primeira observação (BLEWITT, 1989). Nos últimos anos intensificaram-se as pesquisas a nível internacional relacionadas à solução das ambiguidades no PPP.

Diversos métodos foram propostos e dentre eles destaca-se aquele baseado na estimativa dos atrasos de fase não calibrados - UPD (*uncalibrated phase delays*) fazendo uso de dados dentro uma rede GNSS. Neste caso, aplicam-se as combinações lineares de WL (*wide-lane*) e NL (*narrow-lane*) e a SD (Simple Diferença) entre satélites (GE *et al.*, 2008; GENG *et al.*, 2009; GENG *et al.*, 2011). Outra forma de solução da ambiguidade no PPP é caracterizada pela dissociação dos relógios da pseudodistância e da fase da onda portadora. Neste caso, as ambiguidades da NL são fixadas para inteiro antes de estimar os erros do relógio dos satélites na rede GNSS. Para um receptor do usuário, os erros dos relógios estimados são usados para garantir as propriedades inteiras das ambiguidades da NL (COLLINS; BISNATH, 2010). De forma similar, foi desenvolvido um método onde, dentro de uma rede GNSS, as ambiguidades da NL são absorvidas pelos relógios dos satélites na fase da onda portadora e então produzida uma solução de relógios para solucionar as ambiguidades de um receptor usuário (LAURICHESSE *et al.*, 2008). O presente trabalho tem por objetivo contribuir com o melhor entendimento do tema solução das ambiguidades no PPP, realizando uma abordagem de forma teórica sobre os métodos de solução de ambiguidades, além de apresentar experimentos e análises de resultados com solução fixa.

## 2. SOLUÇÃO DE AMBIGUIDADES NO PPP

A determinação da posição e do erro do relógio do receptor, a partir do PPP, pode ser realizada utilizando as observações de pseudodistância e de fase com base na combinação

*ion-free* (MONICO, 2008). As equações de código e fase são apresentadas a seguir:

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

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

sendo que:  $\rho_r^s$  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;  $\bar{N}_{IF_r}^s$  é a ambiguidade da *ion-free*,  $\hat{\alpha}_{PDIF_r}^s$  e  $\varepsilon_{\varphi_{IF_r}^s}$  são os resíduos da pseudodistância e da fase da onda portadora contendo os erros aleatórios e não modelados.

Estudos mostraram que os UPDs, que são *bias* da fase do satélite e do receptor, são absorvidos pelas ambiguidades fazendo que estas percam sua característica de inteiro (BLEWITT, 1989). Portanto, o termo ambiguidade, presente na equação (2), contém os UPDs originados no receptor e no satélite.

Algumas combinações lineares das observáveis GNSS têm papel importante na solução das ambiguidades. Nesse processo, é conveniente utilizar combinações que possuem comprimentos de onda maiores e com ruído relativamente baixo. Nesse sentido, a combinação linear WL é bastante utilizada. A combinação linear denominada *Melbourne–Wübbena* (MELBOURNE, 1985; WÜBBENA, 1985) envolve o código e a fase, facilitando a solução das ambiguidades WL por meio da eliminação dos efeitos da ionosfera, erro do relógio, troposfera e da própria geometria. As ambiguidades *ion-free*, equação (2), podem ser expressas como combinação linear das ambiguidades WL e NL (GE *et al.*, 2008):

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

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

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 solução fixa das ambiguidades no PPP se torna possível se os UPDs forem conhecidos. Eles podem ser estimados com o apoio de uma rede de estações GNSS (BLEWITT, 2006; GENG *et al.*, 2011).

### 3. MÉTODOS DE SOLUÇÃO DE AMBIGUIDADES INTEIRAS NO PPP

No posicionamento relativo, a solução das ambiguidades, geralmente, é realizada no espaço das DD (duplas diferenças) das observáveis de fase, pois neste caso se tem um número inteiro de ciclos das ambiguidades, visto que todos os outros efeitos envolvidos são eliminados na combinação de DDs. No PPP, por se tratar de apenas um receptor, não ocorre à formação de DDs, dificultando a solução fixa das ambiguidades devido à presença dos UPDs originados no satélite e receptor (BLEWITT, 1989). Uma vez determinados os UPDs, tal solução se torna possível. A seguir são apresentados os fundamentos teóricos de alguns métodos envolvidos para a solução fixa de ambiguidades no PPP.

#### 3.1 Método Baseado na Estimativa dos UPDs

O método baseado na Estimativa dos UPDs, apresentado por Ge *et al.* (2008), tem como base a estimativa dos UPDs da SD entre ambiguidades dos satélites a partir de uma rede de estações GNSS e a utilização dos mesmos para posterior solução das ambiguidades no PPP do usuário. A SD (simples diferença) das ambiguidades entre satélites é utilizada para eliminar o UPD do receptor. Salienta-se que a SD entre satélites é realizada somente no espaço das ambiguidades, não para as observáveis, como é comumente realizada.

As formulações apresentadas nessa subseção foram adaptadas a partir do modelo original de Ge *et al.* (2008). Desta forma, a SD entre satélites é formada e define-se a *ion-free* das ambiguidades dessa combinação linear, considerando os UPDs.

$$\bar{N}_{IF_r}^{s,j} = f_1/(f_1 + f_2)\bar{N}_{n_r}^{s,j} + (f_1 f_2/(f_1^2 - f_2^2))\bar{N}_{w_r}^{s,j} \quad (5)$$

$$\bar{N}_{IFr}^{s,j} = \frac{f_1}{f_1 + f_2} (N_{nr}^{s,j} + \Delta\phi_n^{s,j}) + \frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} (N_{wr}^{s,j} + \Delta\phi_w^{s,j}) \quad (6)$$

Na Eq. (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* (MELBOURNE, 1985; WÜBBENA, 1985). Desta forma, considerando as ambiguidades reais WL ( $\bar{N}_{wr}^s$ ) obtidas em cada época ( $k$ ) com dados de observação, obtém-se a média da ambiguidade WL de todas as épocas:

$$\bar{N}_{wr}^s = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \bar{N}_{wr}^s(k) \quad (7)$$

com desvio padrão dado por:

$$\sigma_{\bar{N}_{wr}^s} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{N}_{wr}^s - \bar{N}_{wr}^s)^2}{n(n-1)}} \quad (8)$$

onde:  $n$  é o número de ambiguidades envolvidas.

A ambiguidade no espaço dos números reais, denominada *float*, da WL ( $\bar{N}_{wr}^s$ ) 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:

$$\bar{N}_{wr}^{s,j} = \bar{N}_{wr}^s - \bar{N}_{wr}^j \quad (9)$$

$$\sigma_{\bar{N}_{wr}^{s,j}} = \sqrt{\sigma_{\bar{N}_{wr}^s}^2 + \sigma_{\bar{N}_{wr}^j}^2} \quad (10)$$

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

$$\bar{N}_{wr}^{s,j} = N_{wr}^{s,j} + \Delta\phi_w^{s,j} \quad (11)$$

Com os UPDs\_WL ( $\Delta\phi_w^{s,j}$ ) estimados a partir da Rede GNSS, pode-se recuperar a característica de número inteiro da SD das ambiguidades WL:

$$\tilde{N}_{wr}^{s,j} = \bar{N}_{wr}^{s,j} - \Delta\phi_w^{s,j} \quad (12)$$

$$\sigma_{\tilde{N}_{wr}^{s,j}} = \sqrt{\sigma_{\bar{N}_{wr}^{s,j}}^2 + \sigma_{\Delta\phi_w^{s,j}}^2} \quad (13)$$

Por arredondamento para o inteiro mais próximo de  $\tilde{N}_{wr}^{s,j}$  pode-se obter o valor inteiro da SD das ambiguidades WL ( $\bar{N}_{wr}^{s,j}$ ). E a SD das ambiguidades NL pode ser obtida a partir da Eq.(6):

$$\bar{N}_{nr}^{s,j} = \frac{f_1 + f_2}{f_1} \bar{N}_{IFr}^{s,j} - \frac{f_2}{f_1 - f_2} \bar{N}_{wr}^{s,j} \quad (14)$$

com respectivo desvio padrão dado por:

$$\sigma_{\bar{N}_{nr}^{s,j}} = \frac{f_1 + f_2}{f_1} \sigma_{\bar{N}_{IFr}^{s,j}} \quad (15)$$

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

O UPD\_NL da SD das ambiguidades é dado por:

$$\overline{\Delta\phi_n^{s,j}} = \Delta\phi_n^{s,j} + \frac{f_2}{f_1 - f_2} (N_{wr}^{s,j} - \bar{N}_{wr}^{s,j} + \Delta\phi_w^{s,j}) \quad (16)$$

As ambiguidades da SD da NL também podem ter sua característica de número inteiro recuperada, se o UPD\_NL ( $\overline{\Delta\phi_n^{s,j}}$ ) for estimado, conforme seguem as expressões (17) a (19):

$$\bar{N}_{nr}^{s,j} = N_{nr}^{s,j} + \overline{\Delta\phi_n^{s,j}} \quad (17)$$

$$\tilde{N}_{nr}^{s,j} = \bar{N}_{nr}^{s,j} - \overline{\Delta\phi_n^{s,j}} \quad (18)$$

$$\sigma_{\tilde{N}_{nr}^{s,j}} = \sqrt{\sigma_{\bar{N}_{nr}^{s,j}}^2 + \sigma_{\overline{\Delta\phi_n^{s,j}}}^2} \quad (19)$$

O valor inteiro de  $\tilde{N}_{nr}^{s,j}$  pode ser obtido pelo arredondamento para o inteiro mais próximo. Em resumo, pode-se dizer que os UPDs estimados devem ser aplicados como correções para as SDs de ambiguidades da WL e NL, de forma que estas ambiguidades passem a ter características

de números inteiros. Em seguida o valor inteiro é obtido a partir de 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)).

O UPD\_WL 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. Desta forma, o UPD\_WL ( $\Delta\phi_w^{s,j}$ ) e seu desvio padrão ( $\sigma_{\Delta\phi_w^{s,j}}$ ) são determinados por:

$$\Delta\phi_w^{s,j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ \text{frac} \left( \hat{N}_{w_i}^s - \hat{N}_{w_i}^j \right) \right] \quad (20)$$

$$\sigma_{\Delta\phi_w^{s,j}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left\{ \left[ \text{frac} \left( \hat{N}_{w_i}^s - \hat{N}_{w_i}^j \right) \right] - \Delta\phi_w^{s,j} \right\}^2}{n(n-1)}} \quad (21)$$

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.

Somente depois de estimados os UPDs\_WL e tendo-se obtido  $\hat{N}_{w_r}^{s,j}$ , é que os UPDs\_NL podem ser estimados. Para o par de satélites (*s,j*) a partir de *n* estações, pode-se calcular o UPD\_NL ( $\Delta\phi_n^{s,j}$ ) e seu desvio padrão ( $\sigma_{\Delta\phi_n^{s,j}}$ ) da seguinte forma:

$$\Delta\phi_n^{s,j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ \text{frac} \left( \hat{N}_{n_i}^{s,j} \right) \right] \quad (22)$$

$$\sigma_{\Delta\phi_n^{s,j}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left\{ \left[ \text{frac} \left( \hat{N}_{n_i}^{s,j} \right) \right] - \Delta\phi_n^{s,j} \right\}^2}{n(n-1)}} \quad (23)$$

onde:  $\hat{N}_{n_i}^{s,j}$  é estimado conforme Eq. (14).

### 3.2 Método Baseado na Dissociação dos Relógios

O método baseado na dissociação dos relógios considera os erros dos relógios do satélite do código e da fase separadamente. Esse método foi proposto por Collins e Bisnath (2010) e é chamado de modelo dissociado do relógio (*decoupled clock model*). As

formulações apresentadas a seguir foram adaptadas a partir do modelo original. Desta forma, as equações da observável *ion-free*, em metros, da pseudodistância e da fase da onda portadora, apresentadas nas equações (1) e (2), passam a ser da seguinte forma:

$$PD_{rIF}^s = \rho_r^s + c \left[ dt_{r(PDIF)} - dt^s_{(PDIF)} \right] + T_r^s + \varepsilon_{PDIF_r}^s \quad (24)$$

$$\lambda_{IF} \phi_{IF_r}^s = \rho_r^s + c \left[ dt_{r(\phi IF)} - dt^s_{(\phi IF)} \right] + \lambda_{IF} N_{rIF}^s + T_r^s + \varepsilon_{\phi IF_r}^s \quad (25)$$

onde:  $N_{IF_r}^s$  é expressa em função das ambiguidades WL e NL de forma similar a Eq. (3);  $dt_{r(PDIF)}$  =  $dt_r + \Delta\phi_{r(PDIF)}$  é o erro do relógio do receptor acrescido do UPD do receptor da observável *ion-free* da pseudodistância;  $dt^s_{(PDIF)}$  =  $dt^s + \Delta\phi^s_{(PDIF)}$  é o erro do relógio do satélite acrescido do UPD do satélite da observável *ion-free* da pseudodistância;  $dt_{r(\phi IF)}$  =  $dt_r + \Delta\phi_{r(\phi IF)}$  é o erro do relógio do receptor acrescido do UPD do receptor da observável *ion-free* da fase;  $dt^s_{(\phi IF)}$  =  $dt^s + \Delta\phi^s_{(\phi IF)}$  é o erro do relógio do satélite acrescido do UPD do satélite da observável *ion-free* da fase.

Conforme mostra a Eq. (4), a ambiguidade WL acrescida dos UPDs\_WL referentes ao satélite e receptor é dada por:

$$\bar{N}_{w_r}^s = N_{w_r}^s + \Delta\phi_{w_r} - \Delta\phi_w^s \quad (26)$$

As equações (24), (25) e (26) compõem o modelo dissociado dos relógios. Os termos  $dt_{r(PDIF)}$ ,  $dt_{r(\phi IF)}$ ,  $\Delta\phi_{w_r}$ ,  $dt^s_{(PDIF)}$ ,  $dt^s_{(\phi IF)}$  e  $\Delta\phi_w^s$  são chamados de parâmetros dissociados dos relógios.

Se todos os parâmetros, ou seja, as coordenadas, os termos dissociados dos relógios, o atraso troposférico e as ambiguidades inteiras forem estimados utilizando as três equações do modelo (24,25 e 26), o número de parâmetros desconhecidos será maior do que o número de observações, resultando num sistema indeterminado. Além disso, não se teria como estimar ou eliminar os parâmetros dissociados dos relógios do receptor sem realizar a SD entre satélites. A solução desses problemas se dá através da fixação de um número mínimo de

parâmetros (chamado neste método de *datum* ou parâmetro de referência).

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

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

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

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

Ao realizar os procedimentos anteriores para definir o *datum* do relógio e da ambiguidade na rede, podem-se resolver os problemas referentes aos parâmetros dissociados do relógio do receptor e à singularidade nos sistema das equações (24) a (26). Para a solução em rede, são estimados as 3 coordenadas, o atraso troposférico e os 3 parâmetros dissociados dos relógios dos satélites. Para o usuário, é necessário dispor de uma rede GNSS que forneça os parâmetros dissociados dos relógios dos satélites  $dt^S(PDIF)$ ,  $dt^S(\phi IF)$  e  $\Delta\phi_w^S$ .

O *datum* do relógio definido para o receptor de referência pode ser mantido, o que significa que não se requer *datum* adicional do relógio para a solução do usuário. No entanto, um *datum* de ambiguidade deve ser definido pela escolha de um satélite de referência e as ambiguidades  $N_n$  e  $N_w$  desse satélite definidas para valores inteiros arbitrários. O satélite de referência da solução do usuário pode diferir daquele escolhido na solução de rede.

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

### 3.3 Método Baseado na Recuperação dos Relógios

O método baseado na Recuperação dos Relógios da Fase (*Integer phase clock model*) foi proposto por Laurichesse *et al.* (2008). Esse método é baseado nas equações da *ion-free* e WL conforme equações (24), (25) e (26).

As ambiguidades  $N_w$  da equação (26) são estimadas por meio da combinação linear *Melbourne–Wübbena*. Similar ao método de dissociação dos relógios, um receptor é selecionado como de referência e seu UPD\_WL ( $\Delta\phi_{wr}$ ) é definido como sendo, por exemplo, nulo. O valor inteiro da ambiguidade  $N_w$  é calculado por arredondamento para o inteiro mais próximo para cada satélite e a parte fracionária restante é atribuída ao UPD\_WL do satélite ( $\Delta\phi_w^S$ ). Os UPDs\_WL dos satélites são usados para calcular os UPD\_WL do receptor ( $\Delta\phi_{wr}$ ) na solução de rede. Um conjunto de UPD\_WL dos satélites é determinado e enviado para o usuário. Tendo-se as ambiguidades WL fixadas para cada receptor, as ambiguidades NL são fixadas para a rede e os relógios com propriedade inteira são gerados, conforme apresentado a seguir (LAURICHESSE *et al.*, 2008):

1º) o mesmo receptor de referência selecionado na etapa de estimativa da WL é utilizado e o erro relógio deste receptor ( $cdt_{r(\phi F)}$ ) é fixado como zero, por exemplo;

2º) o *datum* de ambiguidade do receptor de referência é definido determinando-se todas as ambiguidades NL dos satélites observados para valores arbitrários inteiros. Salienta-se que  $N_{IF}$ , na Eq.(25), é expressa em função das ambiguidades  $N_n$  e  $N_w$ ;

3º) as estimativas iniciais de relógios inteiros dos satélites observados  $cdt^S(\phi F)$  podem ser derivadas como parte fracional da diferença entre  $N_n$  e todos os outros temos já estimados na Eq.(25);

4º) um novo receptor é adicionado e tendo-se as estimativas iniciais dos relógios dos satélites obtidas no terceiro passo, pode ser calculada para

esse receptor a diferença entre essas estimativas  $cdt^s_{(\phi F)}$  e os outros parâmetros estimados na Eq.(25). Aplicando arredondamento para o inteiro mais próximo, a parte inteira dessa diferença é atribuída às ambiguidades e a parte fracional para o erro relógio do receptor  $cdt_{r(\phi F)}$ . Além disso, os  $cdt^s_{(\phi F)}$  para os satélites que não foram observados na terceira etapa podem ser obtidos uma vez que o inteiro das ambiguidades  $N_n$  e o  $cdt_{r(\phi F)}$  são conhecidos;

5º) outro receptor é adicionado e a quarta etapa repetida até que o conjunto completo de  $cdt^s_{(\phi F)}$ , com característica inteira, seja obtido e possam ser disseminados para o usuário (LAURICHESSE *et al.*, 2008).

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

#### 4. METODOLOGIA UTILIZADA

Após um estudo das metodologias descritas na seção 3, a metodologia que se refere à estimativa de UPDs (subseção 3.1) foi selecionada para ser implementada e testada com a realização de experimentos. Essa seleção foi baseada na análise do que se tem desenvolvido, para posicionamento geodésico, no Grupo de Estudos em Geodésia Espacial (GEGE) da FCT/ UNESP, campus de Presidente Prudente (Faculdade de Ciências e Tecnologia/Universidade Estadual Paulista). Desta forma, o *software* RT\_PPP (MARQUES, *et al.*, 2014), que realiza PPP em modo convencional, com ambiguidades *float*, teve rotinas acrescidas e modificadas para que se pudesse realizar o PPP com solução de ambiguidades inteiras.

A metodologia de estimativa de UPDs foi a que se mostrou mais compatível com a estrutura do RT-PPP, principalmente com relação

à utilização do erro do relógio do satélite estimado a partir do código, tanto para as observações da fase quanto para o código. Esse modelo de PPP consiste de duas etapas: um módulo do servidor fornecendo produtos UPDs e um módulo do usuário capaz de proporcionar soluções fixas.

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

Para o Módulo Usuário, o *software* RT\_PPP, desenvolvido em linguagem de programação C/C++, foi modificado e essa nova versão foi denominada RT\_PPP\_AR (*Real Time PPP Ambiguity Resolution*). Nessa versão do *software*, os processamentos podem ser realizados no modo estático ou cinemático. O RT\_PPP\_AR está em fase de testes. Estudos estão sendo realizados com a finalidade de se verificar qual a melhor forma de sua disponibilização e acesso por parte do usuário.

#### 5. EXPERIMENTOS REALIZADOS

Com a finalidade de avaliar a influência das ambiguidades inteiras no PPP foram realizados alguns experimentos, simulando uma estação de usuário utilizando o sistema desenvolvido. Para tal, uma Rede GNSS foi composta por estações da RMBC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) e da Rede GNSS-SP (Rede GNSS ativa do Estado de São Paulo), totalizando aproximadamente 100 estações. Os UPDs WL e NL foram gerados por meio do *software* UPD\_NETWORK com a utilização das observações das estações da rede GNSS, nos dias 012 a 018 do ano de 2014.

Os processamentos dos dados para as estações da rede GNSS foram realizados com máscara de elevação de 10 graus para as estimativas do UPD\_NL. Para as estimativas do UPD\_WL foi utilizada a máscara de elevação de 30 graus, pois são estimados a partir da combinação linear *Melbourne-Wübbena*, na qual utiliza medidas de pseudodistâncias, influenciadas por efeitos de multicaminho. Os UPDs\_WL foram estimados com 24 horas de dados, pois após alguns experimentos, mostrou estabilidade de aproximadamente 0,05 ciclos, suficiente para a solução das ambiguidades (GABOR; NEREM,



1999). As estimativas de UPD\_NL foram realizadas com dados horários, pois até duas horas os UPDs\_NL de uma forma geral concordam entre si algo em torno de 0,1 ciclos, suficiente para a fixação das ambiguidades (GABOR; NEREM, 1999).

O intervalo de coleta de dados em todos os arquivos foi de 15 segundos. Num primeiro momento, os *softwares* foram testados com produtos de órbitas e relógios finais do IGS.

A fixação para inteiros das SD de ambiguidades WL foi realizada com arredondamento para o inteiro mais próximo. As SD de ambiguidades NL foram fixadas com a utilização do método LAMBDA (*Least-squares AMBiguity Decorrelation Adjustment*), desenvolvido por Teunissen (1993) e a validação realizada por meio do Teste *Ratio* (VERHAGEN; TEUNISSEN, 2013), onde o valor crítico adotado foi 3.

Cinco estações foram selecionadas aleatoriamente como estações de teste, simulando um usuário, sendo uma estação para cada região do Brasil: NAUS, localizada na região norte; RECF, localizada na região nordeste; BRAZ, localizada no centro-oeste do país; PPTE, localizada na região sudeste; e UFPR, localizada na região sul. Essas estações não fizeram parte da rede GNSS utilizada para estimativa dos UPD\_WL e UPD\_NL. A Figura 1 destaca a localização aproximada das estações de teste, juntamente com as demais estações utilizadas.



Fig. 1 – Localização das estações. Fonte: Google Earth.

## 5.1 Solução de Ambiguidades no Modo Estático

Com a finalidade de verificar a influência das ambiguidades fixas em curtos períodos de observação, foram realizados dois experimentos no modo estático, com dados coletados por um período de oito horas, das 8 às 16h, durante sete dias. O primeiro experimento envolveu dados com 15 minutos de coleta, totalizando 32 amostras por dia. O segundo, com 30 minutos e um total de 16 amostras por dia. O intervalo de coleta de dados em todos os arquivos foi de 15 segundos.

Cada processamento foi realizado duas vezes, uma com ambiguidades reais e outra com ambiguidades fixas, para os dias 012 a 018 de 2014. Os processamentos dos dados foram realizados utilizando as medidas GPS dos códigos P1 e P2 e das fases na L1 e L2. Para os casos em que os receptores não coletam a observável P1, foram utilizadas as medidas C1 aplicando as correções de DCBs (*Differential Code Biases*) P1-C1.

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

Para análise dos resultados foram obtidas as discrepâncias entre as coordenadas de referência e as coordenadas produzidas a partir dos 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 para as estações de teste foram realizados com máscara de elevação de 10°. Foram utilizadas as órbitas e correções precisas dos relógios do IGS, além de vários outros modelos para correção e/ou modelagem dos erros e efeitos que afetam as observáveis implementadas no RT\_PPP (MARQUES, et al., 2014).



## 5.2 Solução de Ambiguidades no Modo Cinemático

Algumas estações de teste foram selecionadas aleatoriamente para a realização do experimento simulando modo cinemático. Para esse experimento (intervalo de coleta de dados de 15 segundos), supõe-se que o receptor esteja em movimento. Neste caso, a variância das coordenadas da estação é relaxada (expandida) a cada época (com ruído branco de  $1 \times 10^{18} \text{m}$ ), de modo que a mesma apresente uma posição praticamente independente da anterior. As coordenadas das estações de teste foram consideradas como fixas, ou seja, como conhecidas, considerando-se suas respectivas incertezas até que as ambiguidades fossem solucionadas. Após a fixação das ambiguidades, a variância das coordenadas foi relaxada a cada época, o que simulava um levantamento cinemático. As análises dos resultados foram realizadas na época de fixação das ambiguidades e nas épocas seguintes.

## 6. ANÁLISES DOS RESULTADOS

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

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 (MONICO *et al.*, 2009). Com relação às análises das componentes no SGL, a resultante horizontal (2D) foi calculada pela resultante das discrepâncias. A componente vertical foi analisada individualmente. O valor crítico do *Ratio* adotado na solução das ambiguidades NL foi 3.

### 6.1 Solução de Ambiguidades no PPP no modo estático

Nesta seção são apresentados os resultados PPP para os dados coletados no modo estático, com solução das ambiguidades reais (gerados pelo *software* RT\_PPP) e inteiras (gerados pelo *software* RT\_PPP\_AR), onde as soluções foram comparadas e calculadas as melhorias obtidas com a aplicação da metodologia implementada.

Os resultados referentes aos processamentos considerando 30 minutos de dados, com soluções de ambiguidades reais e inteiras, para os dias 012 a 018 de 2014 são apresentados para as cinco estações de teste na Tabela 1 e Figura 2.

A Tabela 1 apresenta, além dos valores contidos na figura 2, os valores referentes às porcentagens de fixação e valores de *Ratio*. A partir dos valores contidos nela é possível verificar que a componente  $e$  teve a maior porcentagem de melhoria comparada com as outras componentes, para todas as estações. Na estação UFPR, para a componente vertical não houve melhoria significativa e a resultante horizontal obteve a maior porcentagem de melhoria dentre todas as estações, o que pode justificar o alto valor da porcentagem de fixação de 97% das ambiguidades.

Tabela 1: EMQ para as componentes  $e$ ,  $n$ ,  $u$ , resultante horizontal, porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras, *ratio* e porcentagem de ambiguidades fixas – 30 minutos de dados.

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

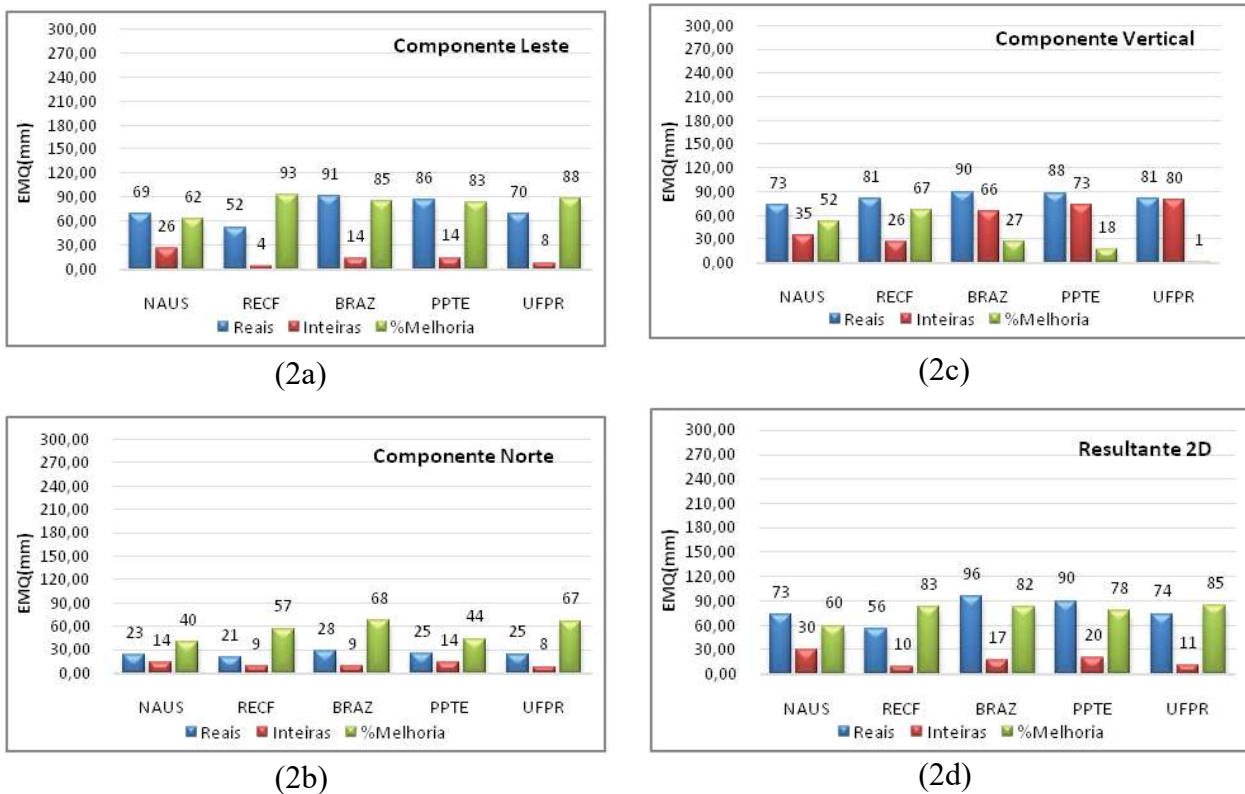


Fig. 2 – EMQ das soluções estimadas com ambiguidades reais e inteiras, com relação às componentes  $e, n, u$  e  $2D$  – 30 minutos de dados.

A partir da tabela 2 pode-se observar que a porcentagem de melhoria dos desvios padrão para a componente leste se manteve por volta de 90%, para a componente norte 80% e para a vertical, de 54 a 73%. O desvio padrão em  $e$  da estação PPTE passou de 74,2 mm para 2,9 mm após a solução das ambiguidades, representando 96% de melhoria.

Na Tabela 3 e Figura 3 são apresentados os resultados referentes ao experimento realizado com 15 minutos de dados, da mesma forma como apresentados nos experimentos 30 minutos.

Por meio da tabela 3 observa-se que,

na estação BRAZ, para a componente leste o EMQ para a solução real teve valor máximo de 265,6 mm, passando a ser de 13,9 mm com ambiguidades fixas, o que representa uma melhoria de aproximadamente 95%. Para as outras estações a porcentagem de melhoria desta componente foi semelhante, com exceção da estação NAUS, que apresentou melhoria de 52,4%. Para a componente norte, os valores de EMQ das soluções com ambiguidades reais tiveram valores por volta de 70 mm, com porcentagem de melhoria mínima de 66,3% para a estação NAUS e máxima de 83,1% para a estação PPTE.

Tabela 2: Desvios padrão para as componentes  $e, n, u$ , resultante horizontal e porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras – 30 minutos de dados

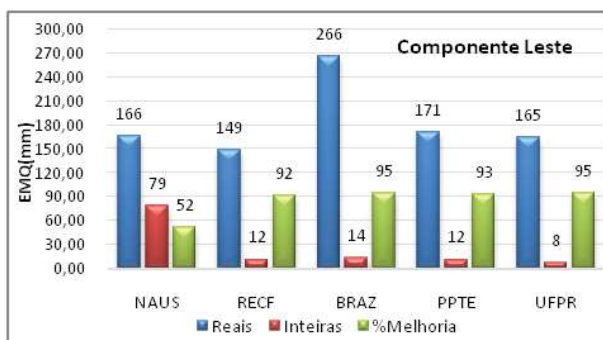
DesPad	Soluções reais (mm)			Soluções Inteiras (mm)			%melhoria		
	$\sigma e$	$\sigma n$	$\sigma u$	$\sigma e$	$\sigma n$	$\sigma u$	$\sigma e$	$\sigma n$	$\sigma u$
NAUS	60,5	21,2	72,0	5,8	3,7	33,5	90,4	82,4	53,5
RECF	51,6	20,7	77,7	3,3	2,9	24,1	93,5	86,1	69,0
BRAZ	62,7	22,3	81,6	3,3	2,9	23,6	94,8	87,2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

A partir da Tabela 3 e a Figura 3 também é possível verificar que, para a estação BRAZ, a componente vertical obteve menor porcentagem de melhoria com relação às outras estações, 21,4%. Para essa estação, o valor de EMQ da resultante 2D de ambiguidades reais foi de 273,2 mm, valor

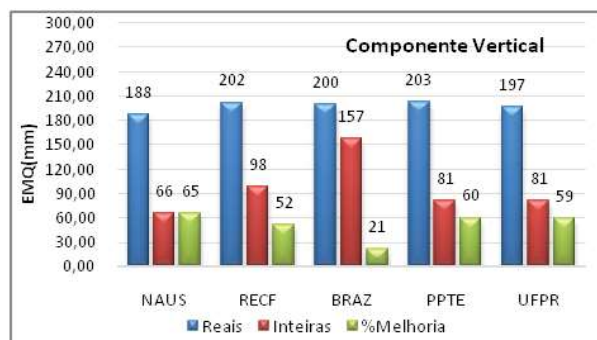
superior ao referente a todas as outras estações. Em consequência disso, a porcentagem de melhoria para a resultante desta estação também foi maior do que para as outras estações, por volta de 93%. As porcentagens de melhoria da resultante 2D para todas as estações foram acima de 50%.

Tabela 3: EMQ para as componentes *e*, *n*, *u*, resultante horizontal, porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras, *ratio* e porcentagem de ambiguidades fixas – 15 minutos de dados.

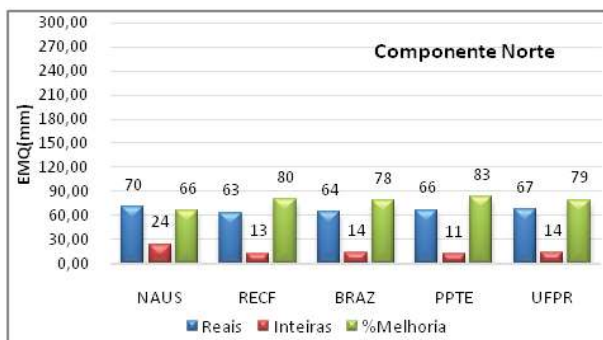
EQM	Soluções reais (mm)				Soluções Inteiras (mm)				%melhoria				Ratio	%Fix
	Est	<i>e</i>	<i>n</i>	<i>u</i>	2D	<i>e</i>	<i>n</i>	<i>u</i>	2D	<i>e</i>	<i>n</i>	<i>u</i>		
NAUS	166,2	70,3	187,8	180,4	79,0	23,7	65,5	82,5	52,4	66,3	65,1	54,3	6,7	25
RECF	149,4	63,3	202,2	162,2	11,7	12,7	97,9	17,2	92,2	79,9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



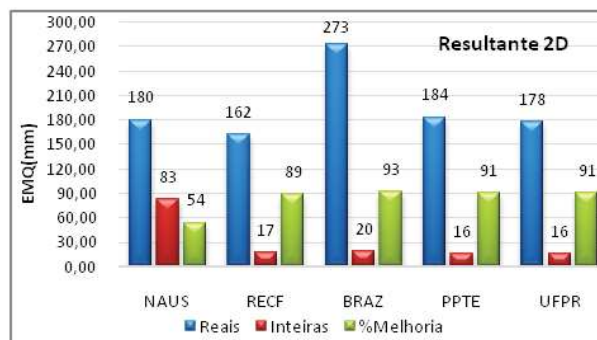
(3a)



(3c)



(3b)



(3d)

Fig. 3 - EMQ das soluções estimadas com ambiguidades reais e inteiras, com relação às componentes *e*, *n*, *u* e 2D – 15 minutos de dados.

Na tabela 3 também se pode observar que os valores obtidos de *Ratio* foram todos acima de 5. A porcentagem de fixação da estação NAUS foi de 25% e da estação BRAZ igual a 37%, valores mais baixos do que para as demais estações, que tiveram valores acima de 60%, sendo que a estação UFPR alcançou porcentagem de fixação de 98%. A baixa porcentagem de

fixação da estação NAUS justifica os valores mais baixos nas porcentagens de melhoria para as componentes do SGL nessa estação.

A Figura 4 apresenta os valores correspondentes aos desvios padrão para *e*, *n*, *u* e a resultante horizontal, para os processamentos realizados com ambiguidades reais (4a) e com ambiguidades inteiras (4b).

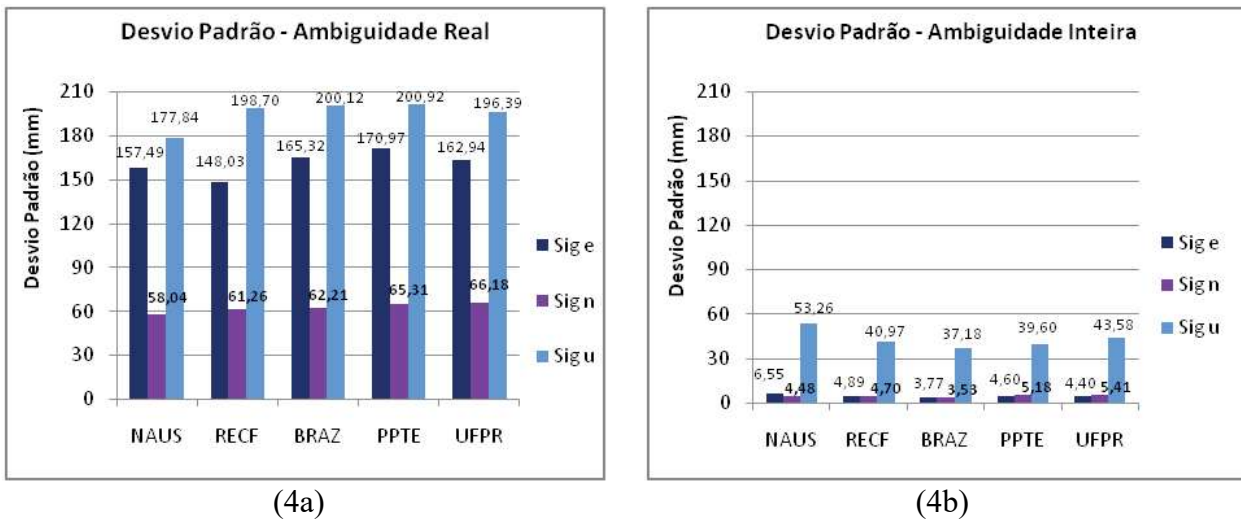


Fig. 4 - Desvios Padrão das soluções estimadas com ambiguidades reais e inteiras, para as cinco estações – 15 minutos de dados.

Para os valores de desvio padrão ilustrados na figura 4, os resultados com ambiguidades reais apresentaram maiores valores para as componentes  $e$  e  $u$ , passando de 200 mm, como é o caso da componente  $u$  nas estações PPTE e BRAZ. Após a solução das ambiguidades, os valores de desvio padrão melhoraram acima de 90% para as componentes horizontais e de 70 a 81% para a vertical. Na estação BRAZ o desvio padrão da componente leste passou de 165,32 mm para 3,77 mm, com 98% de melhoria.

Nos experimentos apresentados, a porcentagem de melhoria do EMQ foi significativamente superior para a componente leste. De acordo com Blewitt (1989), a componente leste possui uma forte correlação com as ambiguidades, sendo que

a fixação das ambiguidades como inteiras pode melhorar significativamente essa componente.

## 6.2 Solução de Ambiguidades no Modo Cinemático

Apresentam-se a seguir os processamentos no modo cinemático para as estações RECF, UFPR e PPTE. Para as três estações de teste desse experimento, as ambiguidades foram fixadas com 45 segundos, ou seja, 3 épocas de dados de observação, com valor do *Ratio* de 5,34, 4,03 e 3,20 para RECF, UFPR e PPTE, respectivamente.

A Tabela 4 apresenta o erro para as soluções com ambiguidades reais e inteiras, além da porcentagem de melhoria obtida para as estações RECF, UFPR e PPTE, no instante de solução das ambiguidades.

Tabela 4: Erro para as componentes  $e$ ,  $n$ ,  $u$ , resultante horizontal, porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras – instante de solução

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

A Figura 5 apresenta o erro para as soluções com ambiguidades reais e inteiras, no que diz respeito à resultante horizontal, para a estação PPTE.

Por meio da figura 5 e tabela 4 verifica-se que para PPTE no instante de fixação das ambiguidades o erro da resultante horizontal com ambiguidades reais e inteiras foi de 3,74 e 2,77

cm, respectivamente. Essa diferença de 0,97 cm é devida ao fato de ambas as soluções iniciarem com coordenadas conhecidas. Observa-se por meio da figura 5 que, com o passar do tempo, a solução de ambiguidades inteiras permaneceu com erro horizontal constante e que a solução de ambiguidades reais teve maior erro durante todo o tempo.



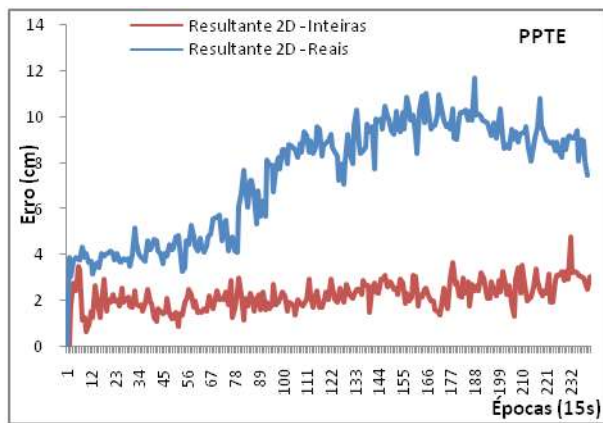


Fig. 5 – Erro das soluções estimadas no PPP modo cinemático com ambiguidades reais e inteiras, para a resultante horizontal – PPTE, dia 015 de 2014.

Conforme pode ser visto na tabela 4, o erro da componente vertical na estação PPTE passou de 72,55 cm para 13,37 cm, representando 82% de melhoria e permaneceu estável até o final do processamento.

Na estação RECF, conforme mostra a tabela 4, a porcentagem de melhoria do erro para a resultante horizontal e para a vertical foi de 89% e 95%, respectivamente. Para a estação UFPR a melhoria foi de 78% para a vertical, passando o erro de 56,9 cm nas soluções de ambiguidades reais para 12,62 cm nas inteiras. A porcentagem de melhoria da resultante horizontal foi de 10%. Na estação PPTE, a porcentagem de melhoria foi de 82% e 26% para a vertical e resultante 2D, respectivamente.

As tabelas 5 e 6 apresentam o erro para as soluções com ambiguidades reais e inteiras, além

da porcentagem de melhoria obtida, com 100 e 240 épocas de 15 segundos, respectivamente.

Conforme as tabelas 5 e 6, com 100 e 240 épocas (1 hora), a porcentagem de melhoria para as componentes verticais foi de 19 a 87%. A componente *e* melhorou 98% na estação RECF na época 240. A componente *n*, com 240 épocas, degradou mais de 100%, ainda assim, para a resultante horizontal, a melhoria foi de 22% a 65%. Esses resultados são importantes no sentido de se verificar que a solução de ambiguidades inteiras se manteve constante, com baixo erro para a maioria das componentes, com o passar do tempo.

As figuras 6 e 7 apresentam o comportamento dos desvios padrão para *e*, *n* e *u* para as soluções de ambiguidades reais e para as de ambiguidades fixas para as estações RECF e UFPR.

Pode-se observar pelas figuras 6 e 7 que o comportamento dos desvios padrão é semelhante para ambas às estações. O mesmo aconteceu para a estação PPTE, embora, para evitar repetições, seu gráfico não tenha sido apresentado. Na época de fixação, o desvio padrão da componente vertical apresentou comportamento diferente do que para as outras componentes, com um pico máximo de 26 cm na estação UFPR, com ambiguidades inteiras. Observa-se também que a convergência é rápida e mesmo com o passar do tempo apresenta menores valores para as soluções fixas. Outro fato importante a se considerar é que, conforme pode ser visto na tabela 4, o erro na componente vertical melhorou cerca de 78% a 95% para todas as estações no instante de solução das ambiguidades.

Tabela 5: Erro para as componentes *e*, *n*, *u*, resultante horizontal, porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras – 100 épocas

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

Tabela 6: Erro para as componentes *e*, *n*, *u*, resultante horizontal, porcentagem de melhoria para soluções de ambiguidades reais e inteiras – 240 épocas

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

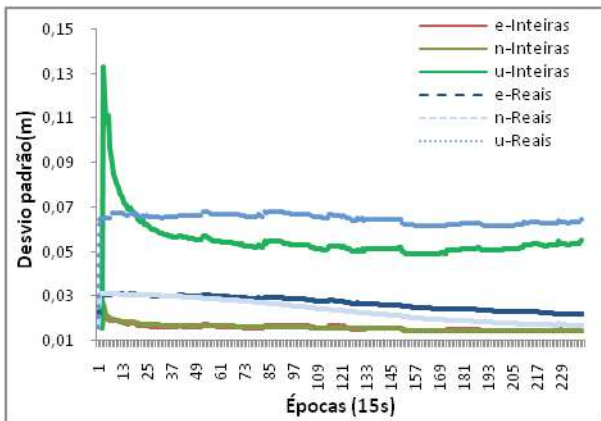


Fig. 6 – Desvios padrão das soluções estimadas no PPP modo cinemático com ambiguidades reais e inteiras, para as componentes  $e$ ,  $n$  e  $u$ -RECF, dia 017 de 2014.

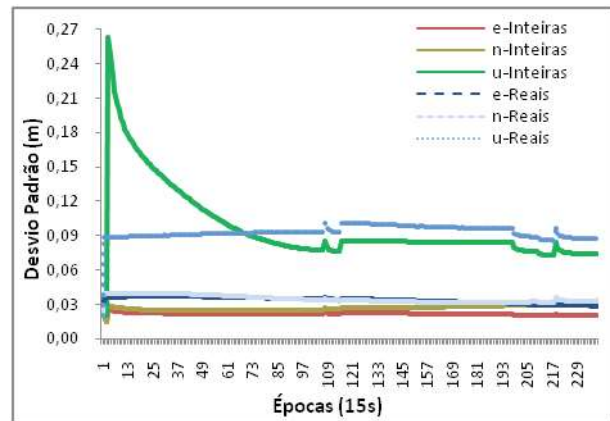


Fig. 7 – Desvios padrão das soluções estimadas no PPP modo cinemático com ambiguidades reais e inteiras, para as componentes  $e$ ,  $n$  e  $u$ -UFRP, dia 017 de 2014.

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi apresentada uma abordagem geral dos métodos de solução de ambiguidades no PPP. Abordou-se também a programação de uma metodologia com a finalidade de avaliar a influência das ambiguidades inteiras com relação às reais e foram apresentados alguns experimentos.

Os experimentos de PPP com a aplicação dos UPDs foram realizados em modo estático e cinemático, com a utilização de órbitas e correções precisas dos relógios do IGS. Em modo estático, foram realizados experimentos com solução de ambiguidades reais e inteiras, com dados de 15 e 30 minutos. Nos experimentos com 30 minutos a melhoria do EMQ após a solução das ambiguidades como inteiras foi de 60% a 85% e com 15 minutos de dados a porcentagem foi de 54% a 93%. Os valores mais baixos de porcentagem de melhoria, para todos os experimentos, foram para a estação NAUS. A porcentagem de melhoria do EMQ foi significativamente superior para a componente leste em relação às demais, o que já era esperado, considerando a forte correlação dessa componente com as ambiguidades (BLEWITT, 1989).

Nos experimentos realizados simulando o modo cinemático, as ambiguidades foram fixadas em poucas épocas (3 épocas), como era esperado, uma vez que as coordenadas da estação foram fixadas até que as ambiguidades fossem solucionadas. Isso mostra a eficácia do método e a correta implementação. Nesse caso, é importante salientar que o EMQ permaneceu

relativamente constante até a época final de dados, mesmo considerando a estação como se estivesse em movimento. Na estação RECF, a componente  $n$  degradou com 100 e 240 épocas. Esse comportamento não era esperado e será investigado em trabalhos futuros.

De uma forma geral, os resultados comprovam a eficiência do sistema de solução de ambiguidades no PPP, no modo estático, com altas porcentagens de melhoria das soluções de ambiguidades inteiras com relação às de ambiguidades reais. Para o modo cinemático, além das porcentagens de melhoria no instante de fixação, a solução se manteve de certa forma constante até o final. Os resultados são promissores, mas há o que se melhorar ainda, uma vez que a porcentagem de ambiguidades fixadas como inteira não atingiu o patamar acima de 90%.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

COLLINS, P.; BISNATH, S. Undifferenced GPS Ambiguity Resolution using the Decoupled Clock Model and Ambiguity Datum Fixing. **Journal of the Institute of Navigation**, v.57,

n.2, p. 123-135, 2010.

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: p.657-664, 2012.

GABOR, M. J; NEREM, R. S. **GPS carrier phase ambiguity resolution using satellite-satellite single differences**. In: 12th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1999), Nashville, TN, Proceedings..., p. 1569-1578, 1999.

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.; TEFERLE, F.; SHI, C.; MENG, X.; DODSON, A.; LIU, J. Ambiguity resolution in precise point positioning with hourly data. **GPS solutions**, v.13,4, doi 10.1007/s10291-009-0119-2, p.263-270, 2009.

GENG, J.; TEFERLE, F. N.; MENG, X.; DODSON, A. H. Towards PPP-RTK: Ambiguity resolution in real-time precise point positioning. **Advances in Space Research**, v.47,10, doi: 10.1016/j.asr.2010.03.030, p. 0273-1177, 2011.

LAURICHESSE, D.; MERCIER, F.; BERTHIAS, J. P. **Real time zero-difference ambiguities fixing and absolute RTK**. In: 2008 National Technical Meeting of The Institute of Navigation, San Diego, California, Proceedings..., P. 747 – 755, 2008.

MARQUES, H. A.; MONICO, J. F. GALERA; 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.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS – Descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: Editora UNESP, 2008. 480 p.

MONICO, J. F. G; PÓZ, A. P. D.; GALO, M.; SANTOS, M. C. D; OLIVEIRA, L. C. Acurácia e precisão: revendo os conceitos de forma acurada. **Boletim de Ciências Geodésicas**. v.15,n.3, p.469-483, 2009.

MELBOURNE, W.G. **The case for ranging in GPS-based geodetic systems**. In: First international symposium on precise positioning with the global positioning system, Rockville, Proceedings..., p. 373-386, 1985.

TEUNISSEN, P. J. G. **Least-Squares Estimation of the Integer GPS Ambiguities**. General Meeting of the International Association of Geodesy (IV Theory and Methodology), Beijing, China, 1993. 16 p. Disponível em: <[http://www.citg.tudelft.nl/fileadmin/Faculteit/CiTG/Over\\_de\\_faculteit/Afdelingen/Afdeling\\_Geoscience\\_and\\_Remote\\_Sensing/pubs/PT\\_BEIJING93.PDF](http://www.citg.tudelft.nl/fileadmin/Faculteit/CiTG/Over_de_faculteit/Afdelingen/Afdeling_Geoscience_and_Remote_Sensing/pubs/PT_BEIJING93.PDF)>. Acesso em: 11 fev. 2016.

VERHAGEN, S.; TEUNISSEN, P.J.G. The ratio test for future GNSS ambiguity resolution. **GPS Solutions**, v.17, 4, doi: 10.1007/s10291-012-0299-z, p. 535-548, 2013.

WÜBBENA G. **Software developments for geodetic positioning with GPS using TI-4100 code and carrier measurements**. In: First international symposium on precise positioning with the global positioning system, Rockville, Proceedings...,p. 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.