

ANÁLISE COMPARATIVA DOS TESTES DE VALIDAÇÃO DAS AMBIGUIDADES EM PERÍODOS DE CINTILAÇÃO IONOSFÉRICA

CRISLAINE MENEZES DA SILVA¹
DANIELE BARROCA MARRA ALVES¹
ENIUCE MENEZES DE SOUZA²
JOÃO FRANCISCO GALERA MONICO¹
VÍCTOR VINÍCIUS SILVA DE MORAES¹

Universidade Estadual Paulista - Unesp
Faculdade de Ciências e Tecnologia - FCT

¹ Departamento de Cartografia, Presidente Prudente – SP

² Universidade Estadual de Maringá – UEM

Departamento de Estatística, Maringá - PR

crismenezes_@live.com, danibarroca@fct.unesp.br, emsouza@uem.br, galera@fct.unesp.br,
victormoraes2208@gmail.com

RESUMO – Solução das ambiguidades inteiras é o processo de determinar o número desconhecido de ciclos inteiros de dupla diferença (DDs) da fase da onda portadora e é essencial para obtenção de alta precisão em aplicações que envolvem o GNSS. Este processo inclui a estimação inteira e a validação. Na estimação inteira o método LAMBDA é utilizado. A validação das ambiguidades é necessária pois informa se a estimativa inteira obtida pode ou não ser utilizada. Existem muitos testes de validação na literatura, neste trabalho os testes Ratio e *Fixed Failure - rate Ratio* são utilizados. Desta forma, o objetivo é comparar o desempenho dos métodos de validação das ambiguidades em períodos de alta cintilação ionosférica, visando melhorar o percentual de ambiguidades fixadas, com o objetivo de possibilitar uma maior acurácia no posicionamento.

Palavras chave: Solução das ambiguidades, Teste Ratio, Teste *Fixed Failure rate Ratio*, GNSS.

ABSTRACT – Integer ambiguity resolution is the process of determining the unknown number of the carrier – phase double differences (DDs), and is essential for high precision GNSS applications. This process includes both integer estimation and validation. For integer estimation, the LAMBDA method is used. The ambiguities validation is necessary because it informs if the whole estimate obtained can or cannot be used. There are many validation tests in the literature, in this work the Ratio and Fixed Failure - rate Ratio tests are used. Thus, the goal is to compare the performance of ambiguity validation methods in periods of high ionospheric scintillation, in order to improve the percentage of fixed ambiguities, aiming to achieve high accuracy in positioning.

Key words: Ambiguity Resolution, Ratio test, Fixed Failure rate Ratio test, GNSS.

1 INTRODUÇÃO

O posicionamento por GNSS (*Global Navigation Satellite System*) tem sido amplamente empregado, para fins científicos, civis e militares, como monitoramento atmosférico, monitoramento de estruturas, aviação, segurança, entre outros.

Para aplicações que exigem alta precisão é necessário utilizar a observável fase de batimento da onda portadora. O problema em utilizar esta observável é que ela é ambígua, isto é, não se sabe o número de ciclos inteiros na primeira época de coleta de dados. Este número de ciclos inteiros desconhecidos é denominado

ambiguidade. Desta forma, para a obtenção de alta acurácia no posicionamento num curto espaço de tempo é necessário a correta solução das ambiguidades.

Visando este objetivo, muitos métodos de solução das ambiguidades foram desenvolvidos nas últimas décadas. Um método, muito utilizado pela comunidade civil e científica internacional, é o método LAMBDA (*Least-squares AMBiguity Decorrelation Adjustment*) (TEUNISSEN, 1993). Após a estimativa inteira ser obtida, é necessário a utilização de testes de validação que vão informar sobre a qualidade da estimativa inteira. Existem muitos testes na literatura, dentre eles pode-se citar os testes Ratio e *Fixed Failure rate - Ratio Test* (FF

– RT) (EULER; SCHAFFRIN, 1991; VERHAGEN; TEUNISSEN, 2006).

Neste trabalho, o desempenho de dois testes de validação das ambiguidades é comparado, visando definir qual método apresenta um melhor desempenho em períodos de alta cintilação ionosférica.

2 CINTILAÇÃO IONOSFÉRICA

As cintilações ionosféricas são mudanças rápidas que ocorrem na fase e amplitude do sinal recebido, as quais são causadas por irregularidades na densidade de elétrons ao longo do caminho percorrido pelo sinal na ionosfera, podendo enfraquecer o sinal recebido pelos receptores GNSS, fazendo que ocorra em muitos casos a degradação ou até mesmo perda do sinal (CONKER, 2003).

Períodos de cintilação ionosférica estão associados à existência de regiões com pequena escala de irregularidades na densidade de elétrons na camada ionosférica. Estes padrões de irregularidades podem se mover através da ionosfera. A severidade dos efeitos da cintilação está relacionada à densidade de elétrons e ao tamanho dos padrões de irregularidades ionosféricas (RODRIGUES, 2003).

As bolhas ionosféricas ocorrem sempre após o pôr-do-sol e, sobretudo no período noturno até a meia-noite. Em algumas fases do ano aparecem durante a noite toda até o amanhecer (CONKER, 2003). Tais irregularidades de larga escala aumentam a ocorrência de cintilações ionosféricas, resultando em degradação nos sinais de comunicação transionosféricos e nos sinais de navegação, como os do GNSS. Devido estar localizado sob parte do equador geomagnético, o Brasil é muito afetado pela cintilação (CONKER, 2003).

O índice S4 mapeia a intensidade da cintilação ionosférica. Este pode ser classificado como forte, moderado e fraco, dependendo diretamente da quantidade de cintilação ocorrida no dia em análise. Esta classificação é apresentada na Tabela 1.

$S4 > 1,0$	Forte
$0,5 < S4 < 1$	Moderado
$0 < S4 < 0,5$	Fraco

Tabela 1 – Classificação do índice S4.
 Fonte: Adaptado de Tiwari et al (2011)

3 SOLUÇÃO DAS AMBIGUIDADES INTEIRAS

O modelo linearizado para as DDs é dado por (TEUNISSEN, 1995):

$$y = Aa + Bb + e \quad (1)$$

em que $a \in \mathbb{Z}^n$ e $b \in \mathbb{R}^n$ são os vetores das ambiguidades e dos parâmetros reais, respectivamente; $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$ e $B \in \mathbb{R}^{m \times p}$ são as matrizes design. $y \in \mathbb{R}^m$ é o vetor de DDs das observações e e é o vetor dos erros normalmente distribuídos com média zero e MVC (Matriz

de Variância e Covariância) Q_y . Este modelo é resolvido em quatro etapas, descritas a seguir, que compõem o processo de solução das ambiguidades inteiras.

3.1 Solução float

Na primeira etapa, a natureza inteira das ambiguidades é descartada e uma estimação com o MMQ é realizada. Como resultado, obtém-se a solução *float* e sua MVC (TEUNISSEN, 1995):

$$\begin{pmatrix} \hat{a} \\ \hat{b} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} Q_{\hat{a}} & Q_{\hat{a}\hat{b}} \\ Q_{\hat{b}\hat{a}} & Q_{\hat{b}} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

3.2 Solução inteira

Nesta segunda etapa as restrições inteiras para as ambiguidades são consideradas. Para isso, uma função de mapeamento é utilizada $F: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{Z}^n$, que mapeia as ambiguidades *float* para seus inteiros correspondentes (TEUNISSEN, 1995):

$$\tilde{a} = F(\hat{a}). \quad (3)$$

Existem muitas funções de mapeamento inteira. Dentre elas, destacam-se a de arredondamento inteiro e arredondamento condicional e a dos mínimos quadrados inteiros (MMI). Neste trabalho, o estimador inteiro utilizado foi o MMI, uma vez que o método LAMBDA pertence à esta classe de estimadores.

3.3 Teste de validação

Uma vez que a estimativa inteira das ambiguidades foi calculada, a terceira etapa consiste em informar se a estimativa obtida pode ou não ser utilizada. Muitos métodos foram propostos na literatura e tem sido usados na prática. A estimativa inteira \tilde{a} é aceita se (TEUNISSEN, 1995):

$$R(\tilde{a}) = \frac{\|\hat{a} - \tilde{a}\|_{Q_a}^2}{\|\hat{a} - \tilde{a}\|_{Q_a}^2} \geq c = \frac{1}{\mu} \quad (4)$$

em que R é a norma quadrática e c é o valor crítico para o teste Ratio. A estimativa inteira é aceita quando $R(\tilde{a})$ é menor do que μ , caso contrário a solução *float* é utilizada. Diferentes escolhas para μ podem ser realizadas, no teste Ratio, o valor 3 é o limiar mais adotado (VERHAGEN; TEUNISSEN, 2013). Já no *Fixed Failure-rate Ratio Test* (FF – RT) um valor crítico é obtido a partir de uma taxa de falha fixa (VERHAGEN; TEUNISSEN, 2013).

3.4 Solução Fixa

Na quarta etapa, se a estimativa inteira \tilde{a} é aceita, ela é utilizada para corrigir os parâmetros reais:

$$\tilde{b} = \hat{b} - Q_{\hat{b}\hat{a}} Q_{\hat{a}}^{-1} (\hat{a} - \tilde{a}). \quad (5)$$

Esta solução é referida como solução fixa e tem uma melhor qualidade, pois utiliza a alta precisão dos dados da fase da onda portadora.

4 RATIO E FF – RT

No teste Ratio um valor crítico μ é selecionado a priori, o problema em utilizar este valor fixo é que a taxa de falha pode ser muito alta, e a estimativa inteira incorreta pode ter um grave impacto sobre a solução fixa, assim é essencial ter um controle sobre a taxa de falha. Por isso o FF – RT foi introduzido por Verhagen and Teunissen (2006). Para este teste, um modelo é utilizado de tal forma que garanta que a taxa de falha não exceda um limite definido pelo usuário.

A vantagem do FF – RT é que o usuário pode agora controlar a taxa de falha. A desvantagem em utilizar o FF – RT é que não existe uma expressão analítica para calcular o valor de crítico apropriado para uma determinada taxa de falha. Esse valor é encontrado através de simulações. Visando atenuar esta desvantagem, uma tabela com simulações para diversos modelos GNSS foi desenvolvida para possibilitar o uso prático do FF – RT. A Figura 1 apresenta a relação entre o valor crítico do FF – RT e a taxa de falha do MMI.

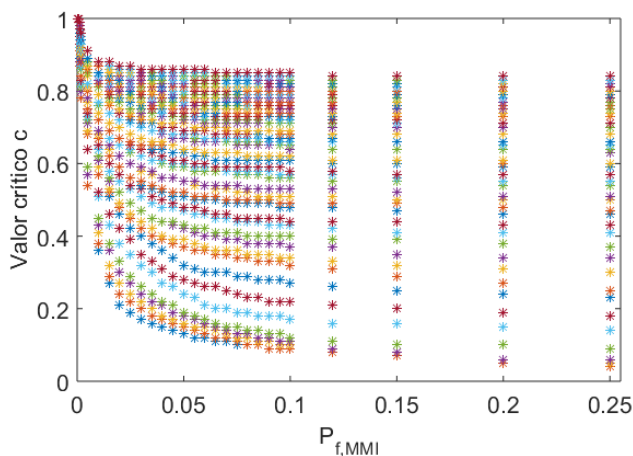


Figura 1 – Relação entre o valor crítico e a taxa de falha do MMI, com a taxa de falha tolerável de 0,001. Fonte: Adaptado de Verhagen e Teunissen (2006).

Na Figura 1, nota-se que quanto menor a probabilidade de falha, maior é o valor crítico, aumentando a chance de passar no teste de validação.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

As estações utilizadas nesse experimento são PPTE, pertencente à RBMC, e escolhida como estação base, e PRU2 que pertence a rede CIGALA/CALIBRA sigla e site, ambas localizadas no campus da Unesp – Presidente Prudente, com uma linha de base de aproximadamente 280 metros.

O dia selecionado para a realização deste experimento foi 03 de março de 2014, visto que apresenta a ocorrência de cintilação ionosférica alta, média e baixa, para a estação PPTE, como ilustrado na Figura 2. Destacado em vermelho na Figura 2 encontra-se um intervalo de três horas com alta cintilação (0-3 UTC). Já o destaque em verde representa um intervalo de três horas com baixa cintilação (7-10 UTC).

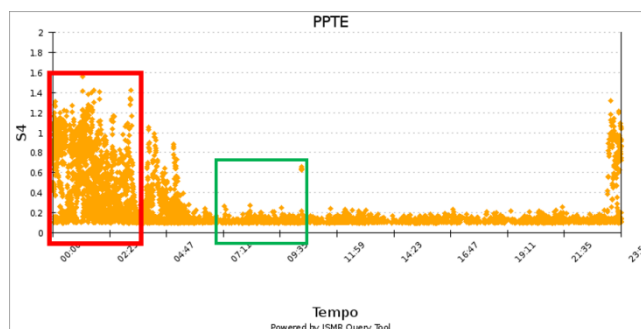


Figura 2 – Índice S4 para o dia 03 de março de 2014, destacando o período de alta cintilação em vermelho e o período de baixa cintilação em verde.

O método de posicionamento adotado neste trabalho será o posicionamento relativo, para isto foi utilizado um sistema desenvolvido por pesquisadores da FCT/UNESP denominado GPSeq (http://fct.unesp.br/Home/Pesquisa/GEGE/SoftwareGPSeq/v1.1_13_02_08.rar). Este sistema científico realiza o posicionamento relativo de dados GPS para linhas de base curtas, para dados de simples frequência. Em relação à cintilação ionosférica, foi utilizado o banco de dados do projeto CIGALA/CALIBRA, além da ferramenta ISMR Query Tool (VANI; SHIMABUKURO; MONICO, 2016), criada com a finalidade de realizar consultas gráficas aos dados de S4, das estações pertencentes à rede.

O valor crítico adotado para o teste Ratio foi 3, e a taxa de falha adotada para o FF – RT foi de 0,1%. Assim, o desempenho do FF – RT será analisado e comparado com os resultados do teste Ratio.

6 RESULTADOS E ANÁLISES

6.1 Período de baixa cintilação ionosférica

A Figura 3 apresenta o índice de cintilação s4 para o período de baixa cintilação ionosférica. A linha em verde na Figura 3 marca o valor limiar do S4 para a classificação de baixa cintilação ($S4 = 0,5$ conforme Tabela 1). Já a linha em vermelho simboliza o valor limiar do S4 para o período de alta cintilação ($S4 = 1,0$ conforme Tabela 1).

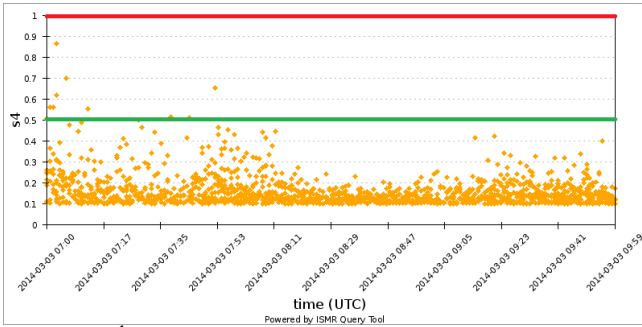


Figura 3: Índice s4 para o período de baixa cintilação ionosférica.

A Figura 4 apresenta o número de satélites rastreados para o período de baixa cintilação. Observe que o horário 7 – 8 UTC foi aquele que apresentou o maior número de satélites rastreados.

Na figura 5 são apresentados os valores obtidos para a norma quadrática $R(\vec{a})$. Analisando a Figura 5 nota-se que os valores obtidos para a norma quadrática ultrapassam, em alguns períodos, o valor crítico 3 adotado para o teste Ratio.

Para ilustrar o percentual de fixação das ambiguidades, nos métodos FF – RT e Ratio, as Figuras 6, 7 e 8 são apresentadas. Nelas, se as ambiguidades foram fixadas a decisão é igual a um, caso contrário, a decisão é zero. O percentual de solução das ambiguidades é obtido a partir da razão entre o número de épocas em que a estimativa inteira é aceita pelo método de validação e o número total de épocas processadas.

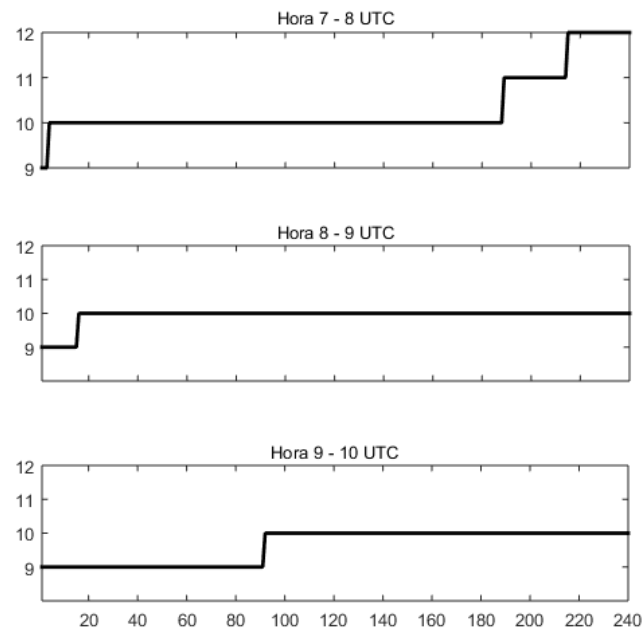


Figura 4 – Número de satélites rastreados para o período de baixa cintilação ionosférica.

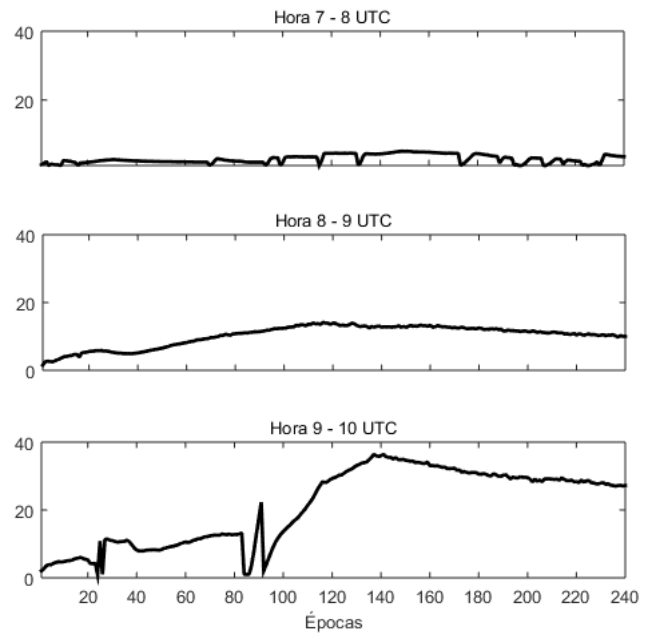


Figura 5 – Valores obtidos para a norma quadrática $R(\vec{a})$ para os três horários de processamento do período de baixa cintilação ionosférica.

Analisando a Figura 6, constata-se que o FF – RT apresentou um desempenho superior do que o teste Ratio, uma vez que obteve um percentual de fixação das ambiguidades maior, 92,08% contra 42,50%. Isso significa dizer que com a utilização do FF – RT as ambiguidades seriam fixadas primeiro. Além disso, fazendo a análise juntamente com a Figura 4, pode se observar que no período que um novo satélite é rastreado o tempo de convergência do FF – RT é menor do que o do Ratio, ou seja, quando um novo satélite é rastreado, o tempo para que a ambiguidade deste novo satélite seja fixa é menor do que o apresentado pelo Ratio.

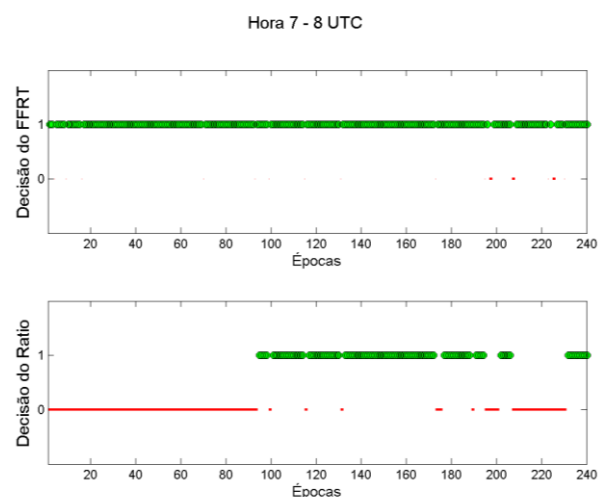


Figura 6 – Decisão dos testes FF – RT (superior) e Ratio (inferior) , para o intervalo de processamento de 7 – 8 UTC.

Com a análise da Figura 7 observa-se que o FF – RT teve um melhor desempenho do que o Ratio. Enquanto o primeiro validou as ambiguidades em 100% das épocas, o segundo validou as ambiguidades em 97,5%. O tempo de convergência para a fixação das ambiguidades foi de apenas uma época no FF – RT , enquanto no Ratio foi de 6 épocas.

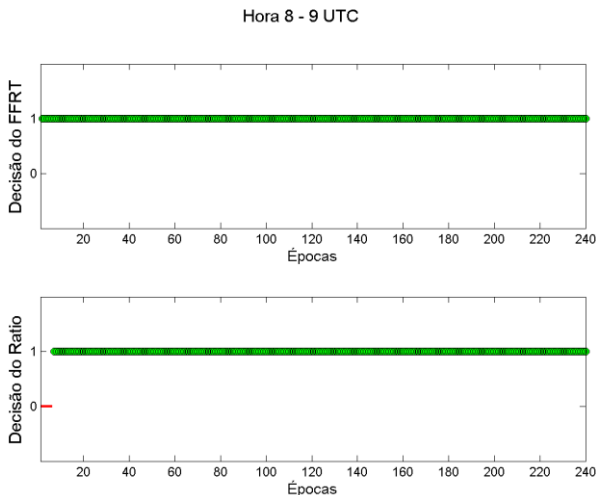


Figura 7 – Decisão dos testes FF – RT (superior) e Ratio (inferior) , para o intervalo de processamento de 8 – 9 UTC.

A partir da Figura 7, observa-se que os testes tiveram um desempenho parecido, enquanto o FF – RT fixou as ambiguidades em 97,5% das épocas o Ratio fixou em 96,67% das épocas. Note que, em ambos os métodos, a validação não foi aceita após um novo satélite ter sido rastreado. Com isso, a diferença entre os dois compareceu no início do processamento, já que o FF – RT teve uma convergência mais rápida do que o Ratio, o FF – RT demorou 1 época para começar a validar enquanto o Ratio demorou 2 épocas.

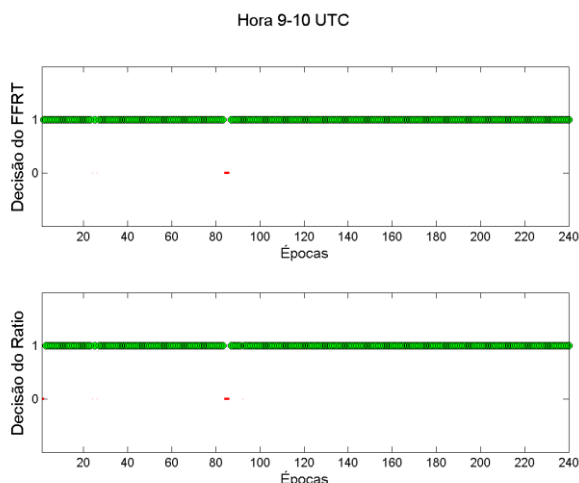


Figura 8 – Decisão dos testes FF – RT (superior) e Ratio (inferior), para o intervalo de processamento de 9 – 10 UTC.

6.2 Período de alta cintilação ionosférica

Na Figura 9 são apresentados os gráficos referentes ao índice S4 no período de alta cintilação.

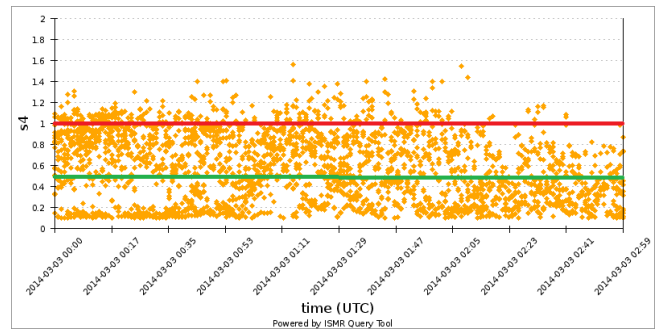


Figura 9 : Índice s4 para o período de alta cintilação.

A Figura 10 apresenta o número de satélites rastreados para o período de alta cintilação. Nota-se que o número de satélites rastreados para este período variou entre 8 e 12 satélites.

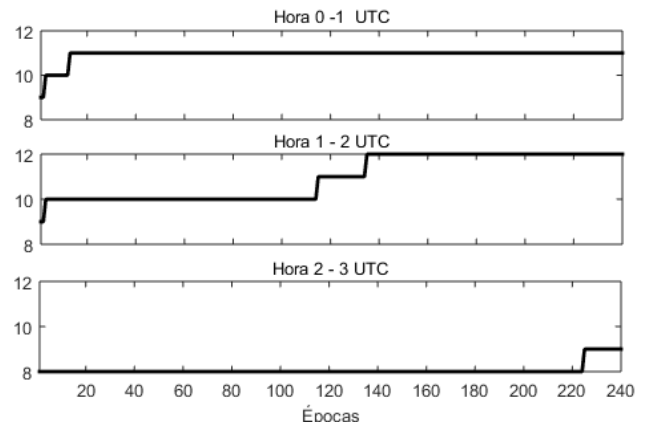


Figura 10 – Número de satélites rastreados para o período de alta cintilação ionosférica.

Na figura 11 são apresentados os valores obtidos para a norma quadrática $R(\vec{a})$ para o período de alta cintilação ionosférica. Analisando a Figura 11 observa-se que o valor crítico do teste Ratio, 3, não foi atingido em nenhum dos três intervalos de processamento. Sendo assim, o percentual de fixação das ambiguidades pelo teste Ratio foi nulo. Por isto, diferentemente do período de baixa cintilação, apenas o percentual de fixação das ambiguidades para o método FF – RT é apresentado nas Figuras 12, 13 e 14 .

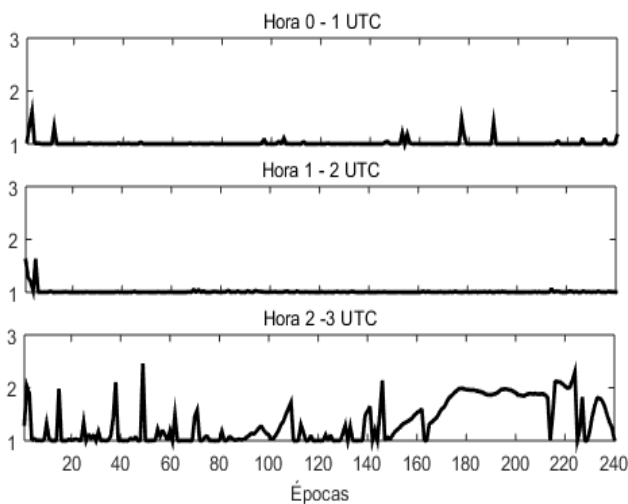


Figura 11 – Valores obtidos para a norma quadrática $R(\vec{a})$ para os três horários de processamento do período de alta cintilação ionosférica.

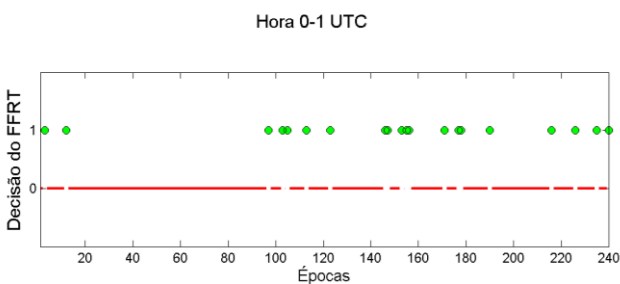


Figura 12 – Decisão do teste FF – RT , para o intervalo de processamento de 0 – 1 UTC.

A partir da Figura 12 observa-se que pelo teste FF – RT, em 20 das 240 épocas processadas a estimativa inteira da ambiguidade foi aceita, o que poderia trazer uma melhoria para a estimativa das coordenadas encontradas. Apesar de ter sido aceito em algumas das épocas, o percentual de rejeição pelo FF – RT foi muito alta (91,67%), isso pode ser explicado pelo fato da probabilidade de sucesso ser baixa, devido a grande ocorrência de perdas de ciclos neste período, por conta da cintilação ionosférica, que ocasiona a deterioração dos dados da MVC.

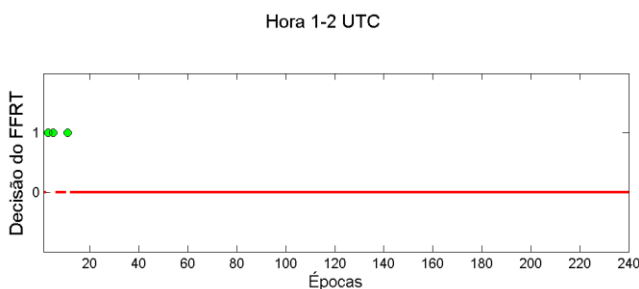


Figura 13 – Decisão do teste FF – RT , para o intervalo de processamento de 1 – 2 UTC.

Com a análise da Figura 13, apenas em 3 das 240 épocas as ambiguidades foram fixadas. Com isso, nota-se que a ocorrência de perdas de ciclos, faz com que a probabilidade de sucesso das ambiguidades diminua, fazendo com que em nenhum dos testes de validação a estimativa das ambiguidades obtida seja fixada. O percentual de rejeição do FF – RT foi de 98,75%.

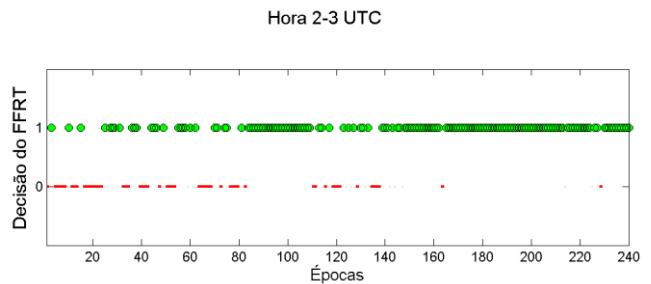


Figura 14 – Decisão do teste FF – RT , para o intervalo de processamento de 2 – 3 UTC.

Analisando a Figura 14, observa-se que a fixação pelo FF – RT ocorreu na maioria das épocas. O percentual de rejeição do FF – RT ficou em 35,83%, e essa rejeição deve ter ocorrido devido as perdas de ciclos. Ressalta-se que neste terceiro horário de processamento, a cintilação ionosférica ficou classificada como moderada com alguns picos de alta, o que explica o desempenho superior aos outros horários de alta cintilação. Desta forma, a utilização do FF – RT poderia melhorar a estimativa das coordenadas, visto que, por ele ambiguidades fixadas foram obtidas.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizada a análise comparativa entre dois testes de validação das ambiguidades, os testes FF – RT e Ratio, em períodos de alta e baixa cintilação.

Os resultados evidenciaram que em períodos de baixa cintilação ionosférica, apesar do teste Ratio ter apresentado um bom desempenho com um valor crítico escolhido a priori (3), o teste FF – RT mostrou um melhor desempenho, o que pode trazer melhorias quanto a solução final do processamento, uma vez que as estimativas inteiras das ambiguidades serão utilizadas, ao invés da solução *float*.

Em períodos de alta cintilação ionosférica, o uso do teste FF – RT ao invés do Ratio, não garante que a estimativa das ambiguidades vai ser sempre fixada, mas a utilização de um valor crítico adequado aos dados previne que ambiguidades fixas sejam erroneamente descartadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES por financiar a pesquisa da primeira autora. À FAPESP e ao CNPq pelo fomento ao projeto regular (Processo 2012/19906-7) e ao Projeto Universal (Processo 470112/2012-3),

respectivamente. Aos projetos CIGALA/CALIBRA financiados pelo *European Commission* (EC) no contexto do FP7-GALILEO-2009-GSA e FP7-GALILEO-2011-GSA-1a, respectivamente, e pela FAPESP (processo 06/04008-2) pelos dados disponibilizados.

Guidance, Control, and Dynamics, v. 29, n. 4, p. 981–991, 2006.

VERHAGEN, S.; TEUNISSEN, P. J. **The ratio test for future GNSS ambiguity resolution.** *GPS Solutions*, Springer, v. 17, n. 4, p. 535–548, 2013.

REFERÊNCIAS

CONKER, R. S. et al. **Modeling the effects of ionospheric scintillation on GPS/satellite-based augmentation system availability.** *Radio Science*, Wiley Online Library, v. 38, n. 1, 2003.

EULER, H. J.; SCHAFFRIN, B. **On a measure for the discernibility between different ambiguity solutions in the static-kinematic GPS-mode.** In: SCHWARZ, K.-P.; LACHAPPELLE, G. (Ed.). *Kinematic Systems in Geodesy, Surveying, and Remote Sensing.* Springer New York, v. 107, p. 285–295, 1991. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4612-3102-8_26>. Acesso em: 21 abr. 2017.

RODRIGUES, F. S. R. **Estudo das irregularidades ionosféricas equatoriais utilizando sinais GPS.** Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003. 151p

TEUNISSEN, P. J. G. **Least-squares estimation of the integer GPS ambiguities.** In: Invited lecture, section IV theory and methodology, IAG general meeting, Beijing, China. 1993. Disponível em: <http://pages.citg.tudelft.nl/fileadmin/Faculteit/CiTG/Over_de_faculteit/Afdelingen/Afdeling_Geoscience_and_Remote_Sensing/pubs/PT_BEIJING93.PDF>. Acesso em: 22 abr. 2017.

TEUNISSEN, P. J. **The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: a method for fast GPS ambiguity resolution.** *Journal of Geodesy*, v.70, p. 65–82, 1995.

TIWARI, R. et al. **Wbmod assisted PLL GPS software receiver for mitigating scintillation affect in high latitude region.** In: IEEE. General Assembly and Scientific Symposium, 2011 XXXth URSI. 2011. p. 1–4. Disponível em: <<http://www.ursi.org/proceedings/procGA11/ursi/FG-4.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2017.

VANI, B. C.; SHIMABUKURO, M. H.; MONICO, J. F. G. **Visual exploration and analysis of ionospheric scintillation monitoring data: The ISMR query tool.** *Computers & Geosciences*, 2016.

VERHAGEN, S.; TEUNISSEN, P. J. **New global navigation satellite system ambiguity resolution method compared to existing approaches.** *Journal of*