

AVALIAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE DETECÇÃO E CORREÇÃO DE PERDAS DE CICLOS NA PORTADORA GPS

L1

*Assessment of strategies for detection and correction of cycle slips on
GPS L1 observables*

JOÃO FRANCISCO GALERA MONICO¹
ENIUCE MENEZES DE SOUZA¹
WAGNER CARRUPT MACHADO²

¹Universidade Estadual Paulista - UNESP
Faculdade de Ciências e Tecnologia - FCT
Departamento de Cartografia, Presidente Prudente - SP
galera@fct.unesp.br, eniuce@yahoo.com.br

²Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE
Unidade Estadual do IBGE em Santa Catarina/UE-SC
Gerência de Geodésia e Cartografia - GGC
wagner.machado@ibge.gov.br

RESUMO

Para evitar grandes erros no posicionamento com GPS, as perdas de ciclos que eventualmente ocorrerem devem ser detectadas e corrigidas. Trata-se de uma etapa não trivial do processamento de dados GPS, principalmente quando envolve dados de apenas uma frequência. Essa etapa, na maioria das vezes passa despercebido pelos usuários. Neste artigo discute-se sobre alguns métodos utilizados para detecção e correção de perdas de ciclos utilizando apenas observações de simples frequência. Na detecção, as triplas e tetras diferenças (TD) foram utilizadas. No que concerne a correção, em geral, cada perda é corrigida no pré-processamento dos dados. Caso contrário, alguma estratégia deve ser adotada durante o processamento. Neste trabalho optou-se pela segunda opção, testando duas estratégias. Numa delas, assim que a perda de ciclos é detectada, os elementos da matriz variância e covariância (MVC) das ambigüidades envolvidas na perda são alterados e uma nova estimativa se inicia, enquanto que na outra uma nova ambigüidade é introduzida

com incógnita. Essas possibilidades são discutidas e comparadas neste artigo, bem como os aspectos relacionados com praticidade, facilidade de implementação e viabilidade de cada uma delas. Foram realizados experimentos utilizando dados com perdas de ciclos simuladas em diferentes satélites e épocas envolvidas na coleta. Isso permitiu analisar e comparar os resultados das diferentes formas de correção de perdas de ciclos em diversas condições.

Palavras-chave: Perdas de ciclos; Duplas diferenças; Tetra diferenças; RTK.

ABSTRACT

To prevent large errors in the GPS positioning, cycle slips should be detected and corrected. Such procedure is not trivial, mainly for single frequency receivers, but normally it is not noticed by the users. Thus, it will be discussed some practical and more used methods for cycle slips detection and correction using just GPS single-frequency observations. In the detection, the triple (TD) and tetra differences were used. In relation to the correction, in general, each slip is corrected in the pre-processing. Otherwise, other strategies should be adopted during the processing. In this paper, the option was to the second option, and two strategies were tested. In one of them, the elements of the covariance matrix of the involved ambiguities are modified and new ambiguity estimation starts. In the one, a new ambiguity is introduced as additional unknown when a cycle slip is detected. These possibilities are discussed and compared in this paper, as well as the aspects related to the practicality, implementation and viability of each one. Some experiments were carried out using simulated data with cycle slips in different satellites and epochs of the data. This allowed assessing and comparing the results of different occurrence of cycle slip and correction in several conditions.

Keywords: Cycle slips; Double differences; Tetra differences; RTK

1. INTRODUÇÃO

O posicionamento com GPS está sujeito a várias fontes de erros com origens tanto nos satélites, quanto nos receptores, como também na propagação do sinal entre o satélite e o receptor. É um assunto amplamente discutido por vários autores e entre eles, cita-se, por exemplo: Monico (2008); Seeber (2003). Tais erros devem ser considerados no processo de ajustamento para se possa obter uma correta resolução das ambigüidades da fase, e conseqüentemente um posicionamento com alta acurácia, alcançando poucos milímetros.

Em linhas de base curtas, o posicionamento relativo com receptores de apenas uma frequência (portadora L1 e código C/A) tem sido uma estratégia muito utilizada para atenuar os erros comuns às estações envolvidas. Porém, o multicaminho e as perdas de ciclos não são reduzidos no posicionamento relativo, pois dependem de condições particulares de cada estação. Portanto, esses tipos de

erros devem receber tratamento específico. Neste artigo os esforços serão direcionados para o tratamento das perdas de ciclos.

A perda de ciclo contamina todas as observações subseqüentes ao satélite envolvido, e a sua ocorrência pode envolver de um a milhares de ciclos. Por isso, é imprescindível a eliminação desse tipo de erro dos dados para obtenção de coordenadas com boa qualidade.

O processo de eliminação das perdas de ciclo geralmente é dividido em duas partes: detecção e correção. Enquanto a primeira visa detectar a ocorrência de perdas de ciclo, bem como identificar a(s) observação(ões) afetada(s), a segunda tem como objetivo determinar seu valor e corrigir as observações contaminadas.

Vários métodos foram propostos para eliminar as perdas de ciclos: *wavelets* (COLLIN e WARNANT, 1995; KELLER, 2004), filtro de Kalman (LEICK, 1995; KELLER, 2004), sistema inercial (INS – *Inertial Navigation Systems*) em conjunto com filtro de Kalman (COLOMBO et al. 1999), filtro adaptativo em conjunto com acelerômetro (ROBERTS et al., 2002), tripla diferença (TD) da fase em conjunto com combinação linear entre as observáveis das duas portadoras (KIM e LANGLEY, 2001) e combinações lineares entre as duas portadoras (BISNATH, 2000). Embora esses últimos sejam os mais comuns, não é possível aplicá-los em conjunto de dados oriundos de receptor de apenas uma frequência.

Este trabalho apresenta uma comparação entre duas estratégias adotadas para eliminar a influência da perda de ciclo nos resultados advindos de dados GPS de simples frequência. Na primeira, a perda de ciclos é tratada através da modificação da MVC das ambigüidades das duplas diferenças (DDs) da fase envolvendo o satélite que sofreu a perda. Na segunda, ao se detectar a perda de ciclo, uma nova ambigüidade é introduzida como incógnita no processo de estimação, além de manter a antiga.

2. DUPLAS DIFERENÇAS E DESCRIÇÃO DAS PERDAS DE CICLOS NO POSICIONAMENTO

Diversos métodos de posicionamento relativo GPS têm sido propostos, sendo que o princípio de muitos deles podem ser encontrados em MONICO (2007) e HOFMANN et al. (2008). O método de posicionamento relativo permite determinar as coordenadas de um ponto ou de um conjunto de pontos desconhecidos, quer seja no modo estático ou cinemático (móvel), em relação a um ou mais pontos com coordenadas conhecidas.

O posicionamento relativo por satélite GPS com nível de precisão milimétrica está baseado na medida de alta precisão da fase de batimento da onda portadora, $\varphi_r^S(t)$. Essa medida é realizada a partir da diferença (t) entre a fase gerada pelo satélite (φ^S), no instante de transmissão do sinal, e sua réplica gerada pelo receptor (φ_r), no instante de recepção do sinal. Apenas uma medida fracionária é obtida, restando um número inteiro de ciclos no instante inicial do rastreo, denominado de ambigüidade

(N_r^s). Embora a medida de fase da onda portadora seja altamente precisa, ela está sujeita a diversos erros, tais como os atmosféricos, orbitais etc. Para redução desses erros no posicionamento relativo GPS envolvendo linhas de base curtas, é muito usual o emprego das DD de fase da onda portadora. Uma DD envolve dois receptores (i e j) e dois satélites (p e q) da seguinte forma (MONICO, 2008):

$$\Delta \nabla \varphi_{i,j}^{p,q} = (\varphi_i^p - \varphi_j^p) - (\varphi_i^q - \varphi_j^q) = (\Delta \nabla \rho_{i,j}^{p,q} + \Delta \nabla dm_{\varphi_{i,j}}^{p,q}) / \lambda + \Delta \nabla N_{i,j}^{p,q} + v_{\varphi_{DD}} \quad (1)$$

onde:

- $\Delta \nabla$ é o operador que representa as DD;
- ρ_r^s é a distância geométrica, em metros, entre o satélite s , no instante de transmissão do sinal, e o receptor r , no instante de recepção;
- λ é o comprimento de onda da portadora L_1 ;
- dm_{φ}^s é o erro de multicaminho da fase, em metros;
- ε_{φ}^s é o erro residual da fase da portadora, em ciclos.

A principal vantagem da DD é que a maioria dos erros comuns aos receptores e satélites é praticamente cancelada. No caso dos erros orbitais e atmosféricos, os mesmos são praticamente eliminados por serem altamente correlacionados em linhas de base curtas (HOFMANN-WELLENHOF et al. 2008; MONICO, 2007; SEEBER, 2003). Porém, o multicaminho (dm) é o único erro que não é eliminado, pois depende da geometria entre receptor, satélite e refletor.

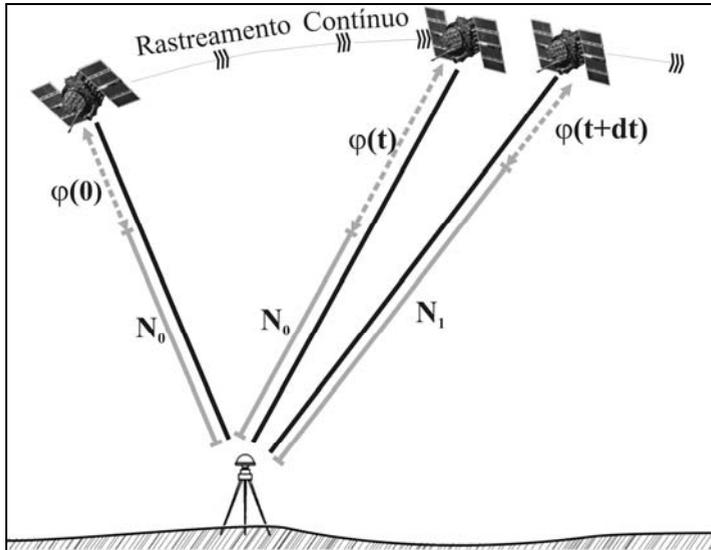
A equação de DD é normalmente a observável preferida no processamento de dados GPS envolvendo a fase da onda portadora. Ela parece proporcionar a melhor relação entre o ruído resultante e a eliminação de erros sistemáticos envolvidos nas observáveis originais. Como resultado, se os erros residuais são pequenos, a DD das ambigüidades pode ser solucionada como um valor inteiro (RAY, 2000). Entretanto, essa solução pode ser incorreta se o receptor perder a sintonia com o sinal do satélite. Esse problema é chamado de perda de ciclos e pode ocorrer devido a (HOFMANN-WELLENHOF et al. 2008; SEEBER, 2003):

- Obstruções causadas por árvores, prédios, montanhas etc, especialmente em aplicações cinemáticas (RTK - *Real Time Kinematic*);
- Ruído do sinal, causado por multicaminho ou cintilação ionosférica, por exemplo;
- Sinais fracos, causados por interferência do sinal ou ângulo de elevação baixo;
- Falha no *software* do receptor, o que conduz a um processamento incorreto do sinal.

A perda de ciclos causa um salto equivalente a um número inteiro de ciclos nas observações de fase da onda portadora, que pode ser desde um até milhares de

ciclos. A parte fracionária da fase não é afetada, apenas o número inteiro de ciclos conforme ilustrado na Figura 1. Observe que enquanto o rastreamento é contínuo, a ambigüidade N_0 é a mesma. Após uma perda esse número inteiro de ciclos é alterado (N_1). (KELLER, 2004).

Figura 1 – Perda de ciclos ocorrida na época $t+dt$.



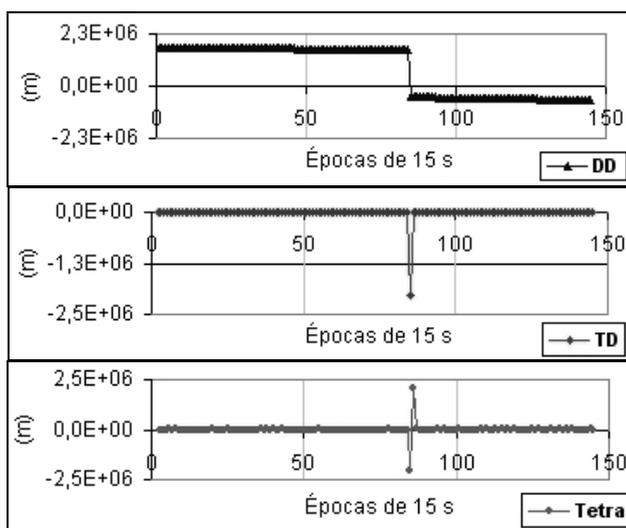
Para evitar erros grandes na determinação das coordenadas dos pontos de interesse, a perda de ciclos deve ser detectada e corrigida, principalmente no RTK, devido à alta dinâmica do receptor e as freqüentes obstruções do sinal. Dessa forma, pretende-se discutir alguns métodos práticos e mais utilizados para detecção e correção de perdas de ciclos utilizando apenas dados de simples freqüência. Alguns métodos, tais como as triplas (TD) e tetras diferenças, são discutidos na seção 3 para detecção de perdas de ciclos. Em relação à correção, cada perda deve ser removida no pré-processamento ou alguma estratégia deve ser adotada durante o processamento. Essas possibilidades são apresentadas na seção 3.

3. ESTRATÉGIAS DE DETECÇÃO E CORREÇÃO DE PERDAS DE CICLOS NO POSICIONAMENTO RELATIVO

Na ausência de perda de ciclos, o comportamento da série temporal das medidas da fase de batimento da onda portadora, e suas diferenciações, deve ser contínuo. Um salto súbito na curva é um forte indício de ocorrência de perda de ciclos.

Se uma perda ocorre na observação de fase na estação i e satélite j em uma época t , todas as DD desse conjunto são afetadas a partir da época t . Por outro lado, apenas a TD que envolve o satélite j na época t é corrompida. Esse procedimento é ilustrado na Figura 2. Nesta ilustração, uma perda de ciclos ocorre na época 84. Todas as DD são afetadas a partir da época 84, enquanto apenas uma TD é corrompida nessa época.

Figura 2 – Dupla, tripla e tetra diferenças das observações de fase.



Desta forma, um salto na série temporal da TD indica a ocorrência de perdas de ciclos. Existem vários métodos factíveis de serem utilizados para identificar tais saltos, os quais foram citados da seção 1. Outra possibilidade é utilizar um esquema de quatro (tetra) diferenças, também ilustrada na Figura 2. As discontinuidades ficam mais acentuadas em séries de diferenças de ordem mais alta. Um salto na tetra diferença, além do indicativo da detecção da perda de ciclo, ele proporciona um valor aproximado dessa perda.

Uma vez detectada que uma (ou mais) perda ocorreu, uma estratégia adotada para correção envolveu a alteração dos elementos da MVC dos parâmetros

envolvidos com a ocorrência da perda de ciclos. Nesse caso, na prática, deve-se atribuir um valor grande à variância da DD da ambigüidade que envolve o satélite em que ocorreu a perda de ciclos na MVC. Nesse procedimento adotou-se como valor para o desvio padrão, após vários experimentos, o valor aproximado da perda de ciclos obtido na tetra diferença escalonado por três. As correlações com os outros parâmetros foram negligenciadas, o que significa zerá-las.

Numa outra estratégia utilizada, uma nova DD de ambigüidades na mesma época em que a perda de ciclos for detectada é introduzida como incógnita no processamento dos dados.

Cabe ressaltar que a primeira alternativa é mais simples de ser implementada, visto que apenas a MVC dos parâmetros é alterada. A segunda opção, embora também simples, requer mais “cuidados” na implementação, principalmente em relação à dimensão de vetores e matrizes, no caso em que ocorrem muitas perdas em várias épocas da coleta de dados.

Essas duas possibilidades foram implementadas no *software* GPSeq, em desenvolvimento na UNESP, Presidente Prudente (MONICO et al., 2006; SOUZA et al., 2006). Nesse *software*, os dados são processados em um ajustamento recursivo, permitindo a determinação de coordenadas com a utilização de posicionamento cinemático ou estático.

4. EXPERIMENTOS REALIZADOS

Para verificar e comparar o desempenho das estratégias de detecção e correção de perdas de ciclos apresentadas, um experimento foi realizado envolvendo diversos cenários com possíveis perdas de ciclos, as quais foram simuladas. É muito importante que sejam utilizados dados simulados neste procedimento para que nenhum outro tipo de erro possa prejudicar as análises. O simulador de dados GPS desenvolvido por Mohino et al. (2005) foi adaptado para gerar perdas de ciclos.

A estação PPTE, pertencente à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), foi utilizada como estação base. Uma linha de base de aproximadamente 2 km foi formada com dados simulados de uma estação em Presidente Prudente, denotada por TAK, cujas coordenadas eram conhecidas de campanhas anteriores.

As perdas de ciclos foram simuladas em um intervalo de 50 épocas com taxa de observação de 15s. As perdas de ciclos foram introduzidas em diferentes épocas dos dados envolvidos no processamento das 50 épocas. Esse procedimento é importante porque certas perdas de ciclos podem afetar os resultados de diferentes formas, dependendo do momento em que esta ocorreu durante o processamento. Assim, foram analisados os casos em que a perda ocorreu no início (época 5), no meio (época 25) e no fim do processamento (época 45), conforme apresentado na Tabela 1. Além disso, os resultados serão apresentados em duas etapas. Na primeira delas, as perdas de ciclos foram simuladas em apenas um satélite (PRN). Entretanto, podem ocorrer perdas em mais de um satélite por época. Logo, na etapa 2 foram simuladas diferentes perdas para três satélites em uma mesma época (Tabela 1).

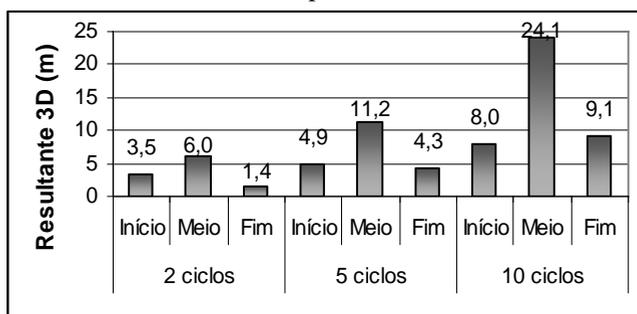
Tabela 1 – Perdas de Ciclos Simuladas.

	PRN	Ciclos	Época	Período
Etapa 1: Perda em apenas um PRN na mesma época	1	2	5	Início
			25	Meio
			45	Fim
		5	5	Início
			25	Meio
			45	Fim
		10	5	Início
			25	Meio
			45	Fim
Etapa 2: Perda em 3 PRNs na mesma época	1	3	15	Início
	3	1		
	14	2		

4.1 Etapa 1: Perdas apenas em um PRN

Com o intuito de verificar a magnitude dos erros nas coordenadas quando perdas de ciclos não são corrigidas, as coordenadas obtidas no processamento dos dados foram comparadas com as conhecidas da estação TAK. Na Figura 3 são apresentadas as resultantes 3D das discrepâncias entre as coordenadas para o caso de perdas apenas em um satélite.

Figura 3 – Resultante 3D das coordenadas sem correção das perdas de ciclos simuladas para o PRN 1.

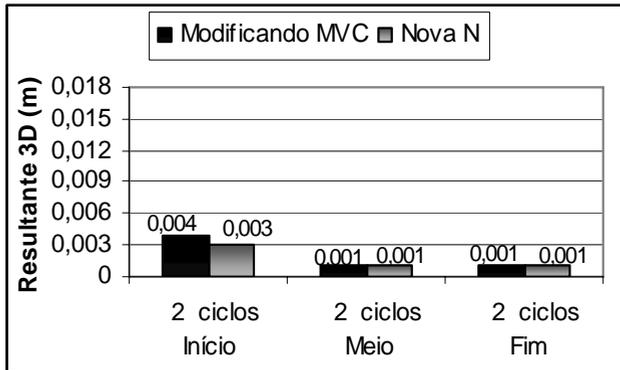


Observa-se na Figura 3 que se as perdas de ciclos forem negligenciadas no processamento, pode-se obter até 24 m de erro na resultante das coordenadas. Nota-se, de acordo com a Figura 3, que quando a perda de ciclo ocorre no meio do

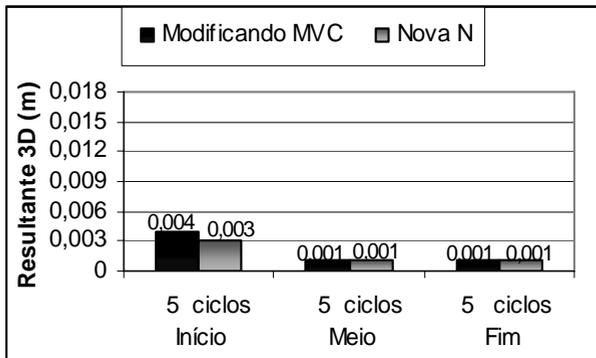
processamento, os resultados são mais prejudicados. Em geral, quando uma perda de ciclos ocorre no final, a ambigüidade já está bem determinada, não afetando os resultados de forma acentuada.

Após aplicar as duas estratégias descritas na seção 3 para correção das perdas de ciclos, os resultados obtidos foram comparados novamente com os de referência (Figura 4). Nova N trata-se da estratégia dois, ou seja, nova ambigüidade é introduzida como incógnita.

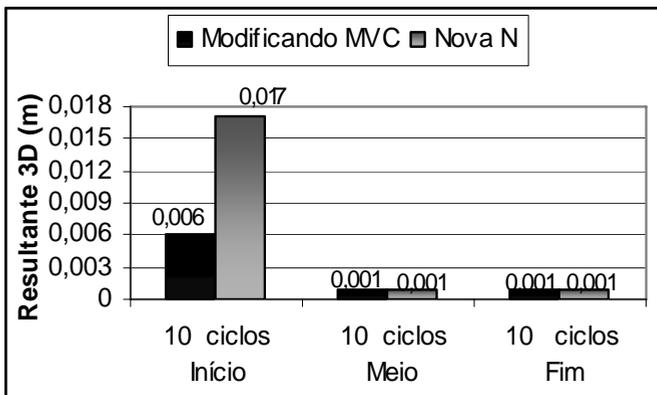
Figura 4 – Resultante 3D das coordenadas com correção das perdas de ciclos simuladas para o PRN 1.



(a)



(b)

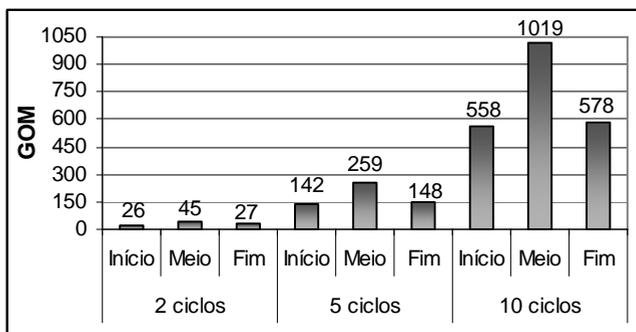


(c)

A partir da Figura 4 pode-se observar que as duas estratégias aplicadas reduziram bastante os erros devido às perdas de ciclos. No caso dos 10 ciclos perdidos, reduziu-se de 24 m (Figura 3) de erros para apenas 0,001m (Figura 4c). Por outro lado, com a estratégia de modificar a MVC dos parâmetros, as discrepâncias não ultrapassaram 0,006m. Já introduzindo uma nova ambigüidade no processamento, obteve-se até 0,017m na resultante das discrepâncias das coordenadas.

Para comparar a qualidade das observações, antes e após a correção das perdas de ciclos, utilizou-se o teste estatístico *Global Overall Model (GOM)*, também conhecido como teste Qui-quadrado (TEUNISSEN, 1998a), muito utilizado em ajustamento de observações. Os valores obtidos com essa análise para os casos sem a correção das perdas de ciclos podem ser vistos na Figura 5.

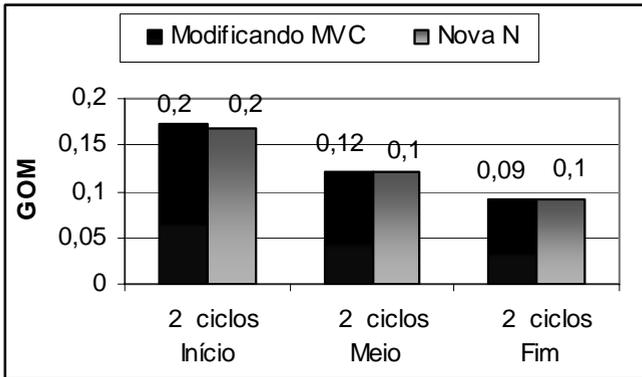
Figura 5 – Teste Estatístico GOM sem correção das perdas de ciclos simuladas para o PRN 1.



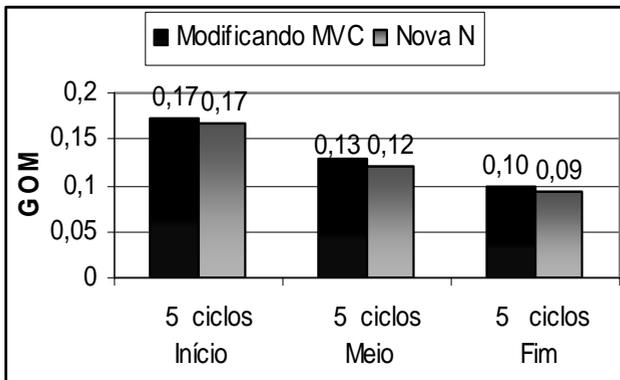
Quanto maior o valor do GOM, maiores os indicativos de presença de erros nas observações. A partir da Figura 5, observa-se que quanto maior a perda, maior o valor do teste GOM, conforme esperado.

Após aplicar as duas estratégias descritas para correção das perdas, os valores do teste GOM são comparados na Figura 6.

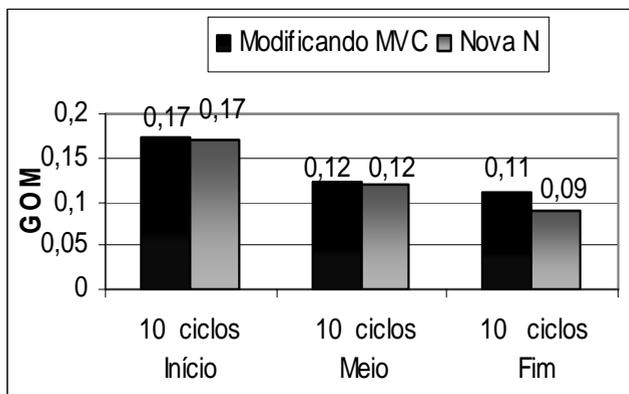
Figura 6 – Teste Estatístico GOM com correção das perdas de ciclos simuladas para o PRN 1.



(a)



(b)



(c)

Os valores dos testes estatísticos GOM (Figura 6) para as estratégias de modificar a MVC e abrir uma nova ambigüidade na mesma época em que ocorreu a perda de ciclos mostraram-se totalmente adequados. Em geral, esses valores não deveriam ser tão pequenos, mas isso ocorreu devido ao fato dos dados terem sido simulados sem outras influências, além das perdas de ciclos, que prejudicam as observações.

Com o intuito de verificar a confiabilidade da solução das ambigüidades, as Figuras 7 e 8 apresentam os valores do teste estatístico *Ratio* (TEUNISSEN, 1998b) sem e com correção das perdas de ciclos, respectivamente. Esse teste, apesar de suas limitações, proporciona um bom indicativo da qualidade da solução das ambigüidades (MONICO, 2008).

Figura 7 – Teste *Ratio* sem correção das perdas de ciclos simuladas para o PRN 1.

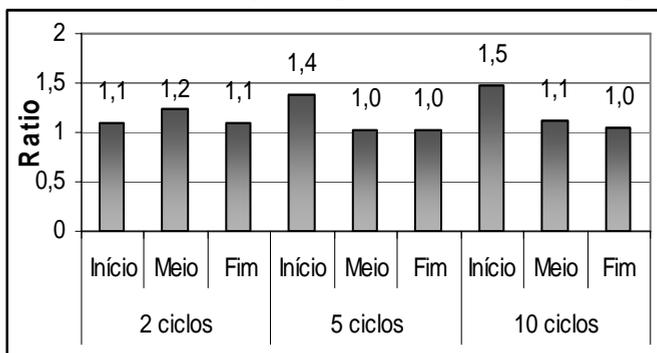
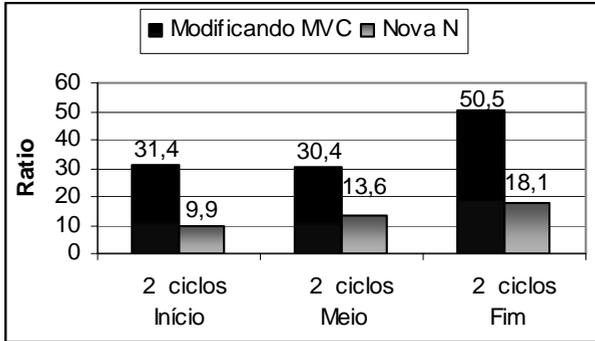
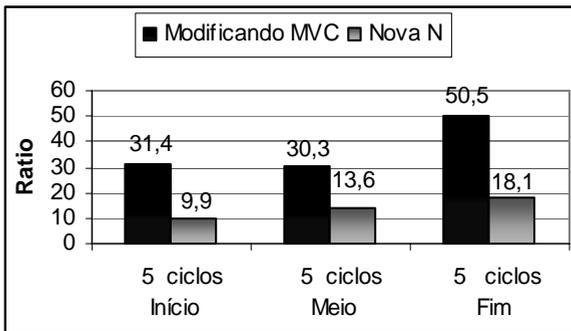
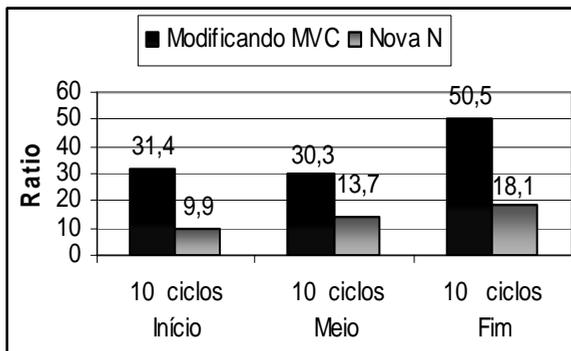


Figura 8 – Teste *Ratio* com correção das perdas de ciclos simuladas para o PRN 1.

(a)



(b)



(c)

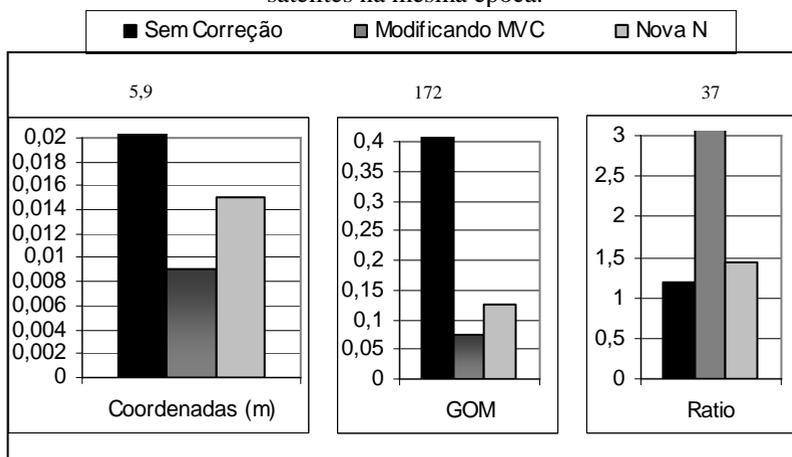
Um indicativo importante é que quanto maior o valor do teste *Ratio*, maior a probabilidade do vetor das ambigüidades terem sido solucionados corretamente (TEUNISSEN, 1998b). Pode-se verificar na Figura 7 que a solução das ambigüidades sem a correção da perda de ciclos não está confiável, pois os valores estão muito próximos de 1.

Na Figura 8 verifica-se que os valores do teste *Ratio* melhoraram consideravelmente, indicando que a solução das ambigüidades está muito mais confiável após a correção das perdas de ciclos. Comparando as duas estratégias adotadas, têm-se resultados melhores para o caso em que a MVC dos parâmetros foi modificada.

4.2 Etapa 2: Perdas em 3 satélites na mesma época

Sabe-se que, em geral, podem ocorrer diversas perdas em uma mesma época. Neste sentido, foram simuladas 3 perdas de ciclos em satélites diferentes, conforme apresentado na Tabela 1, para verificar e comparar o desempenho das estratégias adotadas na correção das perdas de ciclo. Os resultados são apresentados na Figura 9.

Figura 9 – Comparação dos resultados com e sem a correção das perdas em três satélites na mesma época.



Conforme ilustrado na Figura 9, pode-se verificar que os erros nas coordenadas foram drasticamente reduzidos após a correção das perdas de ciclo. Os testes estatísticos GOM e *Ratio* também indicaram a eficiência dessas estratégias na correção das perdas de ciclo. Mas comparando as duas estratégias, novamente a estratégia de modificar a MVC dos parâmetros proporcionou os melhores resultados.

5. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

Neste artigo foi discutido o problema das perdas de ciclos no posicionamento GPS com receptores de uma frequência, bem como a importância da detecção e correção das mesmas. Os experimentos foram realizados com dados simulados, o que é muito importante para comparar os resultados de situações diversas e controladas.

Foram propostas duas estratégias práticas de correção das perdas de ciclos para o caso em que se tem apenas observações de simples frequência, o que torna a correção das perdas mais difícil. Essas estratégias, as quais envolvem modificar os elementos da MVC que envolve os parâmetros afetados ou introduzir uma nova DD de ambigüidades quando a perda é detectada foram analisadas e comparadas.

Verificou-se que ambas as estratégias, modificar a MVC dos parâmetros e introduzir uma nova DD de ambigüidades, foram eficientes para corrigir os erros provenientes das perdas de ciclos. Entretanto, quando a MVC dos parâmetros é modificada, os resultados ficaram evidentemente melhores em termos de acurácia de coordenadas, solução das ambigüidades (Ratio) e indicativos de qualidade dos resultados (GOM).

Esse resultado é importante do ponto de vista prático, visto que a estratégia de modificar a MVC é muito fácil de ser implementada. Quando uma nova DD de ambigüidades é introduzida no processamento, e muitas perdas de ciclo estiverem presentes no conjunto de dados, problemas com dimensão de vetores e matrizes podem ocorrer.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho teve apoio da FAPESP (Processo 03/12770-3) mediante atribuição de bolsa de doutorado ao segundo autor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BISNATH, S. B. Efficient, Automated Cycle-Slip Correction of Dual-Frequency Kinematic GPS Data. In: ION GPS 2000, 13, Salt Lake City, EUA, *Proceedings of...*, 2000, p. 145-154. Disponível em: <http://gauss.gge.unb.ca/papers.pdf/iongps2000.bisnath.pdf> Acesso em 29/03/2007.
- COLOMBO, O.L.; BHAPKAR, U.V.; EVANS, A.G. Inertial-Aided Cycle-Slip Detection/Correction for Precise, Long-Baseline Kinematic In: **ION GPS**, 12, Nashville, Tennessee, *Proceedings of...*, p. 1915-1921, 1999.
- COLLIN, F.; WARNANT, R. Application of the wavelet transform for GPS cycle slip correction and comparison with Kalman Filter, *Manuscripta Geodaetica* - V. 20, p.161-172, 1995.
- HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. **GNSS: Global Navigation Satellite Systems**. 4.ed. Wien: Springer-Verlag, 2008. 516p.
- KELLER, W. *Wavelets in Geodesy and Geodynamics*, Walter de Gruyter, 2004, 279 p.

- KIM, D.; LANGLEY, R. B. Instantaneous Real-time Cycle-slip Correction of Dual frequency GPS Data. In: KIS 2001, Banff, Canada, *Proceedings of...* Disponível em:<http://gge.unb.ca/Personnel/Kim/documents/KIS.2001.KIM.pdf>. Acesso em 29/03/2007.
- LEICK, A. *GPS satellite surveying*. 3ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2004. 464p.
- MOHINO, E.; GENDE, M; BRUNINI, C.; HERAIZ M. . SIGOG: Simulated GPS Observation Generator. *GPSolutions*, V.9, n.3, 2005.
- MONICO, J.F.G. *Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações*. 2.ed. São Paulo: UNESP, 2008. 476p.
- MONICO, J.F.G., SOUZA, E.M., POLEZEL, W.G.C., MACHADO, W.C. *GPSeq Manual*, 2006. Disponível em: <http://gege.prudente.unesp.br>. Acesso em 16/04/2007.
- RAY, J.K. *Mitigation of GPS Code and Carrier Phase Multipath Effects Using a Multi-Antenna System*. 2000. 260f. PhD Thesis - University of Calgary, Calgary.
- ROBERTS, G. W.; MENG, X.; DODSON, A. H. Using Adaptive Filtering to Detect Multipath and Cycle Slips in GPS/Accelerometer Bridge Deflection Monitoring Data. In: XXII INTERNATIONAL CONGRESS OF THE FIG, Washington DC, USA, *Proceedings of...*, 2002. Disponível em: https://www.fig.net/pub/fig_2002/TS6-2/TS6_2_roberts_meng_dodson.pdf. Acesso em 16/04/2007.
- SEEBER, G. *Satellite geodesy: foundations, methods and applications*. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 2003. 586p.
- SOUZA, E. M., POLEZEL, W.G.C., MONICO, J.F.G., MACHADO, W.C. GPSEQ: *Software* Gratuito para Posicionamento Relativo GPS Envolvendo Linhas de base curtas. INFO GPS/GNSS, 2006.
- TEUNISSEN, P. J. G. Quality Control and GPS. In: TEUNISSEN, P. J. G.; KLEUSBERG, A. *GPS for Geodesy*. 2 ed. Berlin: Springer Verlage, 1998a, p. 271-318.
- TEUNISSEN, P. J. G. GPS Carrier Phase Ambiguity fixing concepts. In: TEUNISSEN, P. J. G.; KLEUSBERG, A. *GPS for Geodesy*. 2 ed. Berlin: Springer Verlage, 1998b, p. 319-388.

(Recebido em novembro/08. Aceito em março/2009)