

## GERAÇÃO DE ESTAÇÕES VIRTUAIS DE REFERÊNCIA

OSVALDO DA CRUZ MORETT NETTO  
LEONARDO CASTRO DE OLIVEIRA

Instituto Militar de Engenharia - IME  
morettnet@yahoo.com.br  
leonardo@ime.eb.br

**RESUMO** – Este artigo descreve um modelo alternativo para a geração de Estações Virtuais de Referência (VRS). Os modelos utilizados nas técnicas VRS fundamentam-se na interpolação dos erros para reconstrução das observáveis GPS (*Global Positioning System*). O modelo desenvolvido baseia-se na construção de uma órbita virtual dos satélites, a partir de observáveis GPS obtidas em 04 (quatro) estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC). O Modelo Paramétrico é utilizado para re-estimar as coordenadas dos satélites através do ajustamento pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ). As coordenadas reais são calculadas através do arquivo de efemérides transmitidas ou extraídas diretamente do arquivo de efemérides precisas disponibilizados pelo IGS (*International GNSS Service*) e servem como valores aproximados dos parâmetros. Os testes iniciais realizados permitiram a reconstrução de pseudodistâncias e os resultados apresentaram uma média na discrepância entre as pseudodistâncias geradas e as pseudodistâncias reais variando entre 15,25 e 1,46 metros e RMS entre 25,11 e 9,22 metros.

**ABSTRACT** - This Paper describes an alternative model to generate a Virtual Reference Station (VRS). The models have used in the VRS techniques are based in the interpolation of error to reconstruct of the GPS (*Global Positioning System*) observables. The developed model was based in the construction of one virtual orbit of the satellites, from GPS observables obtained from 04 (four) station of Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC). The Parametric Model is used to estimate the coordinates of satellites by Minimum Square Method. The real coordinates are calculated from the broadcast ephemerides or extract from the precise ephemerides files provided by IGS (*International GNSS Service*) and they serve as approximation value of the parameters. The initial tests have allowed the reconstruction of pseudoranges and the results have shown on average in the discrepancy between calculated pseudoranges and real pseudoranges of 15,25 meters to 1,46 meters and RMS between 25,11 meters and 9,22 meters.

### 1 INTRODUÇÃO

De acordo com ALVES et al (2007) a técnica VRS consiste em gerar dados GPS (*Global Positioning System*) para uma posição previamente escolhida, sem que haja uma ocupação física do local. Os dados são obtidos através de modelos matemáticos que simulam as condições de observação que seriam encontradas no terreno, tomando por base os dados reais das estações de referência com coordenadas conhecidas.

Segundo SEEBER (2003), as observáveis ( $O_r^s$ ) básicas que permitem determinar posição, velocidade e tempo são a pseudodistância e a fase da portadora. Estas grandezas são caracterizadas por duas parcelas: uma corresponde à distância geométrica entre o satélite e o receptor ( $D_r^s$ ) e a outra é composta pelos erros sistemáticos ( $\varepsilon_r^s$ ) que afetam o GPS, conforme:

$$O_r^s = D_r^s + \varepsilon_r^s \quad (1)$$

Portanto, para que uma observável seja gerada, torna-se necessário obter as duas parcelas da equação (1), o que consiste, na realidade, em um processo de reconstrução da observável.

Esta técnica tem se mostrado cada vez mais viável com o crescente uso e o adensamento das redes ativas. Constituídas por estações de referência (ER) com coordenadas conhecidas e que são ocupadas por receptores GPS de dupla frequência, segundo SEJAS et al (2007), elas permitem a modelagem dos erros no interior da área das estações.

Conforme HU et al (2003), na concepção original de VRS as observáveis são reconstruídas através do cálculo do deslocamento geométrico e da estimativa dos erros para a posição em que se deseja gerar a VRS. Considerando uma das estações de referência (ER) como base e a posição da VRS, denomina-se correção geométrica ou deslocamento geométrico ( $\Delta D_{ER-VRS}$ ) a relação dada pela equação (2):

$$\Delta D_{ER-VRS} = D_{ER}^s - D_{VRS}^s \quad (2)$$

onde  $D_{ER}^s$  é a distância geométrica entre o satélite e a ER base e  $D_{VRS}^s$  é a distância geométrica entre o satélite e a VRS. Com base na equação (2), pode-se escrever a equação da observável para a ER e para a VRS tal que:

$$O_{ER}^s = D_{ER}^s + \varepsilon_{ER}^s \quad (3)$$

e

$$O_{VRS}^s = D_{VRS}^s + \varepsilon_{VRS}^s \quad (4)$$

Substituindo as equações acima na equação do deslocamento geométrico, tem-se:

$$D_{ER}^s - D_{VRS}^s = O_{ER}^s - O_{VRS}^s - (\varepsilon_{ER}^s + \varepsilon_{VRS}^s) \quad (5)$$

O objetivo é determinar a observável da VRS, sendo possível isolar esta incógnita conforme a seguinte relação:

$$O_{VRS}^s = O_{ER}^s - (D_{ER}^s - D_{VRS}^s) + (\varepsilon_{VRS}^s - \varepsilon_{ER}^s) \quad (6)$$

ou

$$O_{VRS}^s = O_{ER}^s - \Delta D_{ER-VRS} + \Delta \varepsilon_{ER-VRS} \quad (7)$$

A observável da ER base é obtida pelo receptor que ocupa esta posição. As distâncias geométricas são conhecidas uma vez que as coordenadas do satélite, a posição da VRS e da ER também são definidas. Os erros sistemáticos também podem ser estimados na ER base comparando as observações esperadas com as observações medidas. Resta apenas determinar os erros para a VRS.

Diferentes alternativas são usadas para estimar os erros na posição da VRS ou a relação destes erros com a EB. DAÍ et al (2003) apresenta o desenvolvimento de várias técnicas tais como: Modelo de Combinação Linear; Método de Interpolação Linear Baseado na Distância; Método de Interpolação Linear; Modelos de Superfície; Colocação por Mínimos Quadrados.

ALVES et al (2007) desenvolveu basicamente duas formas de se obter os erros através de dados de redes ativas: a primeira considera o uso de modelos para determinar as correções atmosféricas na posição de interesse. Outra solução consiste em determinar o resíduo de cada estação da rede e interpolar estes resíduos para posição desejada, utilizando um plano ou a média ponderada pela distância. Os resultados obtidos com VRS geradas pela interpolação ponderada mostraram-se

melhores do que o baseado em modelos atmosféricos e melhores também que a interpolação com planos.

## 2 MODELO ALTERNATIVO PARA VRS

A proposta central deste trabalho é investigar uma solução para geração de VRS, desenvolvendo um modelo alternativo a ser testado com dados da RBMC.

A modelagem proposta considera as coordenadas  $(X_i, Y_i, Z_i)$  e as observáveis  $(O_i^s)$  das estações de referência conhecidas, bem como as coordenadas da VRS  $(X_{VRS}, Y_{VRS}, Z_{VRS})$ . O problema consiste em determinar coordenadas hipotéticas para o satélite  $(\hat{X}^s, \hat{Y}^s, \hat{Z}^s)$ , a partir das observáveis e das coordenadas das ER, tal que a distância da nova posição do satélite à posição da VRS represente a observável GPS.

Considera-se que a distância geométrica entre o satélite e as estações  $(D_r^s)$  é a observável GPS  $(O_r^s)$ . Desta forma, com base nas ER e nas observáveis, tem-se que as coordenadas do satélite são dadas implicitamente pela expressão (8):

$$\sqrt{(\hat{X}^s - X_i)^2 + (\hat{Y}^s - Y_i)^2 + (\hat{Z}^s - Z_i)^2} = O_i^s \quad (8)$$

A equação de observação (8) satisfaz o modelo matemático que caracteriza o Modelo Paramétrico (GEMAEL, 1994) e pode ser linearizada segundo a fórmula de TAYLOR. As coordenadas reais são calculadas através do arquivo de efemérides transmitidas ou extraídas diretamente do arquivo de efemérides precisas disponibilizados pelo IGS (*International GNSS Service*) e servem como valores aproximados dos parâmetros. Os valores observados são as observáveis GPS.

Um algoritmo foi desenvolvido com o objetivo de testar o modelo proposto. Os dados de entrada do programa são extraídos dos arquivos de observação de cada uma das estações de referência da RBMC da área de teste. As coordenadas das estações, bem como as coordenadas da VRS são informadas. Todo o processo de cálculo é feito para cada satélite época a época. Através de um processo iterativo, as coordenadas iniciais dos satélites são re-calculadas. Coordenadas virtuais são obtidas para os satélites, tal que a distância entre a posição a nova estimada e a posição da VRS resulta no valor da observável.

O algoritmo implementado obedece ao fluxograma da figura 1:

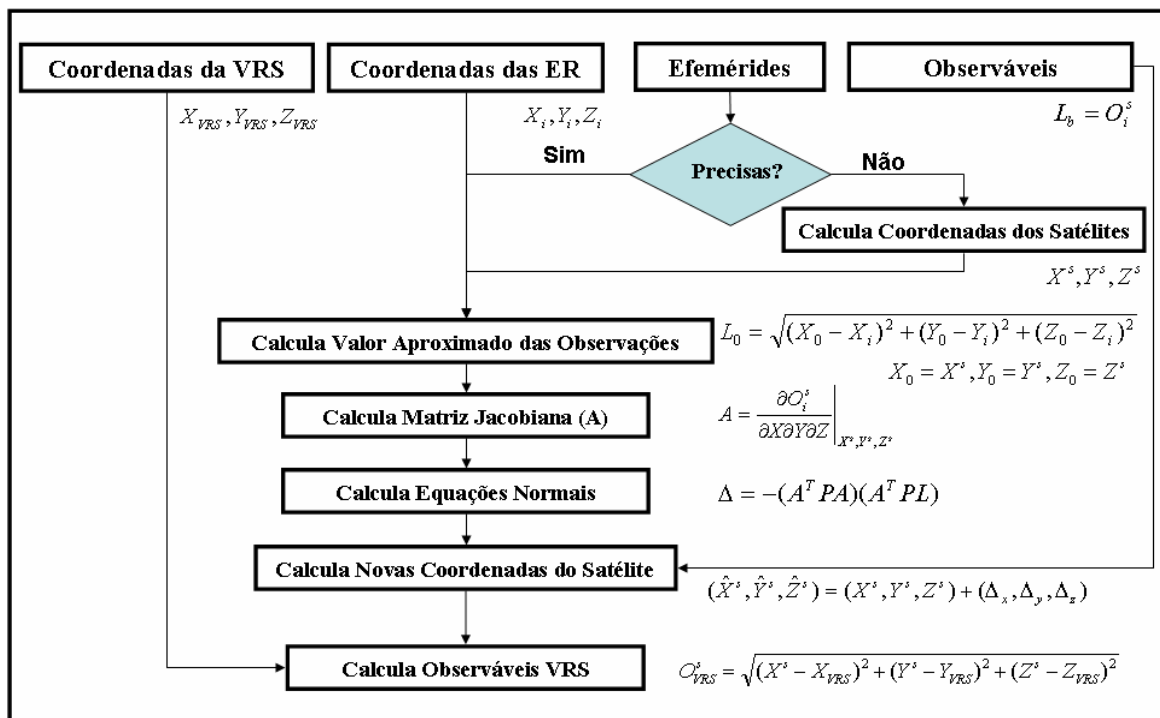


Figura 1 – Fluxograma do algoritmo

Considerando um conjunto de 04 (quatro) estações, são montadas 04 (quatro) equações em que as incógnitas são as 03 (três) coordenadas do satélite. Estima-se as coordenadas virtuais para o satélite, que reproduzem os erros envolvidos no processo. Uma vez determinadas as coordenadas, elas entram no cálculo que reconstrói a observável para a posição da VRS. A distância entre as novas coordenadas do satélite e a VRS corresponde na realidade a observável GPS. Isto ocorre porque as coordenadas virtuais do satélite contêm implicitamente os erros sistemáticos não eliminados.

### 3 EXPERIMENTOS E ANÁLISES

Para testar o modelo desenvolvido, foram selecionados conjuntos de 05 (cinco) estações da RBMC. Os dados de 04 (quatro) estações foram utilizados nos cálculos das coordenadas dos satélites e a posição escolhida para a VRS foi sempre coincidente com uma estação da RBMC situada no interior da área abrangida pelas outras estações. Desta forma as pseudodistâncias geradas e as reais foram comparadas.

A estação da RBMC situada no interior das 04 (quatro) estações não teve os dados incluídos nos cálculos, serviu apenas para controle de qualidade. Os

dados utilizados correspondem ao dia 03 de março de 2008 e o processamento foi realizado para intervalos de 01 (uma) hora, obtendo-se as pseudodistâncias para todos os satélites visíveis nas 05 (cinco) estações da área de teste.

A primeira área de teste compreende as estações de Varginha – MG, Viçosa – MG, Rio de Janeiro – RJ e São Paulo – SP, com espaçamento médio de 282 km. As pseudodistâncias foram geradas para a posição coincidente com a estação de Cachoeira Paulista – SP. A média das discrepâncias foi de 11,14 metros e o RMS de 11,56 metros.

A segunda área de teste corresponde às estações de Varginha – MG, Governador Valadares – MG, Vitória – ES e Rio de Janeiro – RJ. A estação utilizada como base de comparação foi a estação de Viçosa – MG. A distância média entre elas foi de 346 km. A média das discrepâncias entre as observáveis geradas e as reais foi 15,25 metros e o RMS de 15,5 metros.

A terceira área de teste foi constituída pelas estações de Macapá – AP, São Luis – MA, Imperatriz – MA e Marabá – PA. Comparando com os dados da estação Belém – PA, a média foi de 1,44 metros e o RMS foi de 9,22 metros.

A quarta área com distância média entre estações de 853 km, compreendeu as estações de Cuiabá - MT, Brasília – DF, Viçosa – MG e Presidente

Prudente – SP. A média das discrepâncias foi de 9,8 metros e o RMS de 25,11 metros.

A tabela 1 a seguir contém o comportamento da média das discrepâncias e do RMS em função da distância média entre as estações utilizadas:

Tabela 1 – Influência da distância entre as estações

Área	Distância (km)	Média (m)	RMS(m)
I	282	11,14	11,66
II	346	15,25	15,50
III	525	1,46	9,22
IV	853	9,75	25,11

Com base nos resultados apresentados tabela 1, percebe-se que as estatísticas são influenciadas não apenas pela distância entre as estações. A menor média e o menor RMS das discrepâncias ocorreram na terceira maior distância média entre as estações. Conforme era de se esperar, a configuração das estações deve ser analisada.

O maior espaçamento entre as estações oferece uma maior estabilidade geométrica ao método. Isto pode ser verificado com o comportamento da média das discrepâncias. Porém, cabe ressaltar que a maior distância entre as estações implica em uma menor correlação dos erros, resultando na menor precisão dos resultados, verificado com o aumento do RMS, à medida que a distância entre as estações cresce.

#### 4 PRÓXIMAS ETAPAS DA PESQUISA

Nas próximas etapas serão adotados critérios não subjetivos para a escolha das estações que compõem as áreas de teste. Estuda-se a possibilidade do uso da Triangulação de Delaunay como critério de seleção, permitindo a adoção de um padrão geométrico não subjetivo. A fixação do critério de configuração das estações permitirá identificar o impacto da distância nos resultados.

Resta também a avaliação do impacto das discrepâncias das observáveis sobre a coordenada final, no posicionamento por ponto e no posicionamento relativo. Esta avaliação será feita utilizando as observáveis geradas no lugar das observáveis reais.

#### 5 CONCLUSÕES

O conjunto de testes e análise ainda é insuficiente para fundamentar conclusões. No entanto, indicam que as investigações sobre a metodologia devem continuar.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores deste artigo agradecem ao Exército Brasileiro por ter autorizado o desenvolvimento deste trabalho, através da Seção de Cartografia (SE/6) do Instituto Militar de Engenharia (IME).

#### REFERÊNCIAS

ALVES, D. B. M.; MONICO, J. F. G.; DALBELO, L. F. A. **Geração de VRS a partir de Modelos Atmosféricos: Conceito, Implementação e Resultados**. Boletim de Ciências Geodésicas, 2007. Disponível em: <http://ueppgps.prudente.unesp.br/english/index.php?p=69>. Acesso: 25 de fevereiro de 2008.

DAÍ, L. HAN S., WANG, J. L., RIZOS, C. **A Study on GPS/GLONASS Multiple Reference Station Techniques for Precise Real – Time Carrier Phase – Based Positioning**. The University of New South Wales, Sydney, Australia, 2003. Disponível em: <[http://citeseer.ist.psu.edu/cache/papers/cs/28006/http://zSzzSzwwww.gmat.unsw.edu.auzSzsnapzSzaboutzSz..zSzpublicationszSzdai\\_etal2001j.pdf/dai01study.pdf](http://citeseer.ist.psu.edu/cache/papers/cs/28006/http://zSzzSzwwww.gmat.unsw.edu.auzSzsnapzSzaboutzSz..zSzpublicationszSzdai_etal2001j.pdf/dai01study.pdf)>. Acesso: 25 fevereiro 2008.

GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas**. Curitiba: Editora da UFPR, 319p. 1994.

HU, G. R; KHOO. H. S.; GOB, P. C., LAW, C. L. **Development and Assessment of GPS Virtual Reference Stations for RTK Positioning**. Journal of Geodesy. V.77. p. 292-302. 2003.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy**. Walter de Gruyter & Co. Berlim, 2003.

SEJAS, M. I, KRUEGER, C. P. **Modelagem de Erros a Partir de Redes GPS Utilizando o Conceito de Parâmetros de Correção de Área – Aplicações para o Posicionamento por Ponto**. Anais do XXIII Congresso Brasileiro de Cartografia, Rio de Janeiro, 2007.

NETTO, O. C. M. **Geração de Estações Virtuais de Referência**. Dissertação de Mestrado, em desenvolvimento na Seção de Cartografia (SE/6) do Instituto Militar de Engenharia (IME), com previsão de defesa para Dezembro de 2008.