

ANÁLISE COMPARATIVA DOS MODELOS DE PRESSÃO DE RADIÇÃO SOLAR NOS SATÉLITES GPS

Marques, H. A.¹, Monico, J. F. G.¹ e Kuga, H. K.²

1- FCT, Faculdade de Ciências e Tecnologia - Unesp, www.prudente.unesp.br -
(Haroldomarques@estudante.prudente.unesp.br, galera@prudente.unesp.br)

2- Divisão de Mecânica Espacial e Controle, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, hkk@dem.inpe.br

RESUMO - A determinação das órbitas dos satélites artificiais é fundamental para a Geodésia. Para a realização deste processo é necessário, primeiramente, fazer uma modelagem precisa das várias forças ou perturbações que atuam nos satélites. Estas forças incluem as gravitacionais e as não-gravitacionais, que reunidas num vetor aceleração total, deve ser integrado numericamente em um sistema de referência inercial, uma vez para obter a velocidade e duas, para obter a posição dos satélites. No caso das forças gravitacionais têm-se as perturbações causadas pela atração gravitacional da Terra, Lua e Sol, além das marés oceânicas e terrestres, enquanto que nas não-gravitacionais estão incluídas as forças de superfície (atrito do ar, pressão de radiação solar e radiação infravermelha), além de outras forças perturbadoras. Na Faculdade de Ciências e Tecnologia - FCT/UNESP, está disponível o GAS (*GPS Analysis Software*) (Monico, 1995 e Stewart et al., 1994), o qual dispõe do aplicativo GPSORBIT para integração de órbitas. Este aplicativo está em fase de atualizações, sendo uma delas a implementação de modelos de pressão de radiação solar e, neste trabalho foi analisada a influência dessa perturbação na integração das órbitas dos satélites GPS, além de uma análise comparativa do modelo conhecido como Bola de Canhão (*Cannon Ball*) com o modelo ROCK 42.

ABSTRACT - The artificial satellites orbit determination is fundamental to Geodesy. For realization of this process it is needed, first, a precise modeling of the many forces and perturbations acting on the satellite. These forces include the gravitational and non-gravitational ones that considered in the resulting acceleration vector, must be integrated by a numerical process in the inertial reference system, once to obtain the velocity and twice for the satellite positions. In the cases of the gravitational force the perturbations are had caused by the gravitational attraction of the Earth, Moon and Sun, besides the oceanic and terrestrial tides, while in the non-gravitational ones the surface force are included (attrition of the air, solar radiation pressure and infrared radiation), besides other perturbation forces. In the Faculdade de Ciências e Tecnologia - FCT/UNESP, is available the GAS (*GPS Analysis Software*) (Monico, 1995 and Stewart et al., 1994), that has the GPSORBIT application module for orbit integration. This module is being updated with the radiation pressure models implementation and in this paper it was analyzed the influence of such perturbation in the GPS satellites orbits integration, besides a comparative analysis of the model known by "Cannon Ball" with the ROCK 42 model.

PALAVRAS CHAVE: GPS, Órbitas dos satélites, Pressão de Radiação Solar, IGS (*International GPS Service*).

1 INTRODUÇÃO

A qualidade dos resultados obtidos com o GPS (*Global Positioning System*) depende, diretamente, da acuracidade das órbitas dos satélites GPS. Para alcançar uma precisão de 1 cm no posicionamento terrestre, é necessário determinar estas órbitas com uma precisão de poucos metros (Mog, 1995). Para esta determinação é necessário fazer uma modelagem precisa das várias forças ou perturbações que atuam nos satélites. Estas forças incluem as gravitacionais e as não-gravitacionais. No caso das

gravitacionais, têm-se as perturbações causadas pela atração gravitacional da Terra, Lua, Sol e outros planetas, além das marés oceânicas e terrestres, enquanto que no segundo caso figuram as forças de superfície (atrito do ar, pressão de radiação solar e radiação infravermelha), além de outras forças perturbadoras. Para realizar o processo de integração, é necessário ter conhecimento provisório da posição dos satélites e do vetor velocidade em uma determinada época t_0 , o então chamado vetor estado inicial. O aplicativo GPSORBIT é um módulo do GAS (*GPS Analysis Software*) (Monico, 1995 e Stewart et al.,

1994) que permite fazer a integração numérica. Neste software, os modelos de forças implementados consistem de:

- Modelagem do Geopotencial a partir do WGS84-EGM96;
- Perturbações planetárias para Vênus, Sol, Marte, Júpiter, Saturno e Lua;
- Marés Terrestres (Luni-Solar) e Marés Oceânicas;
- Efeito da frequência dependente do número de Love (*Love Number*) e
- Pressão de radiação solar.

Este software está passando por atualizações onde, primeiramente, foi inserida a transformação entre sistema terrestre e celeste de acordo com as recomendações da IAU 2000 (*International Astronomical Union - 2000*) que passaram a ter validade a partir de 2003 (McCarthy, 2003), além da implantação do modelo recente do geopotencial WGS84-EGM96. Outras atualizações se referem aos modelos de marés terrestres e oceânicas, além do modelo de pressão de radiação solar. Esta última perturbação merece atenção especial, devido à complexidade da estrutura dos satélites GPS, pois ela afeta-os, principalmente, na direção do movimento orbital (*along-track*) e pode alcançar 10 metros ou mais após poucas horas de integração (Seeber, 2003). O modelo que estava implementado é satisfatório para satélites esféricos e por isso é conhecido como modelo Bola de Canhão (*Cannon Ball*), porém os satélites GPS possuem uma forma complexa com dois grandes painéis solares girantes fixados em cada lado. Então, o modelo deve levar em consideração a forma reflexiva da superfície do satélite, além de outros parâmetros. O modelo recomendado, neste caso, é o Rock 42 e o T30, desenvolvido por Fliegel e Gallini, para os satélites do bloco II/IIA e IIR, respectivamente (McCarthy, 1996).

2 MODELOS DE PRESSÃO DE RADIAÇÃO SOLAR

A alta altitude dos satélites GPS faz com que eles fiquem expostos a um bombardeamento de radiações emitidas pelo Sol e a força resultante é uma das mais difíceis de se modelar, devido à grande flutuação das atividades solares e da variação da área do satélite exposta ao Sol durante sua órbita.

2.1 Modelo Bola de Canhão

A aceleração do satélite no sistema inercial causada pela pressão de radiação solar (\ddot{r}_{PR}) pode ser dada por (Monico, 1995):

$$\ddot{r}_{PR} = \eta \left[C_R \left(\frac{I_0}{c} \right) \left[\frac{A}{|r_s - r_j|} \right]^2 \left(\frac{a}{m} \right) \vec{e}_{ss} + C_y \vec{e}_y \right], \quad (1)$$

onde,

- C_R é o coeficiente de reflexão de radiação;
- I_0 é a intensidade de radiação a uma distância, nominalmente igual a $1367,2 \text{ wats/m}^2$;
- c é velocidade da luz;
- A é a unidade astronômica ($1,4959787 \cdot 10^{11} \text{ m}$);
- r_s e r_j são a posição do satélite e do Sol, respectivamente, em um sistema inercial;
- a/m é a razão entre a área e a massa do satélite;
- \vec{e}_{ss} é o vetor unitário na direção do Sol ao satélite;
- C_y é a aceleração residual y-bias na direção y;
- η é o fator de sombra que varia entre 1,0 (totalmente ensolarado) e 0,0 (totalmente sombra), cobrindo a fase de penumbra e
- \vec{e}_y é um vetor unitário no sistema de coordenadas do satélite, apontando ao longo do eixo y positivo.

2.2 Modelo ROCK 42 e T30

Os modelos ROCK 4 e ROCK 42 foram desenvolvidos por Fliegel e Gallini em 1989 e são aplicáveis para os satélites GPS do bloco I e II, respectivamente. Uma versão mais atual desses modelos foi desenvolvida (Fliegel et al., 1992 e 1996) e incluem a radiação térmica, as características óticas das várias superfícies do satélite, etc. Estes modelos são denominados de T10, T20 e T30, sendo aplicados para os satélites do bloco I, II/IIA e IIR, respectivamente (atualmente não se têm mais satélites do bloco I). Eles fornecem as componentes Fx e Fz da força de pressão solar nominal total, em função do ângulo φ (em radianos) entre o eixo +Z do satélite e o Sol. As fórmulas para estes modelos, no qual as unidades são de 10^{-5} N , são mostradas a seguir (McCarthy, 1996):

As fórmulas para o modelo T20 são:

$$F_X = -8,96 \sin(\varphi) + 0,16 \sin(3\varphi) + 0,10 \sin(5\varphi) - 0,07 \sin(7\varphi), \quad (2)$$

$$F_Z = -8,43 \cos(\varphi). \quad (3)$$

As fórmulas para o modelo T30 são (Fliegel, 1996):

$$F_X = -11,0 \sin(\varphi) - 0,20 \sin(3\varphi) + 0,20 \sin(5\varphi), \quad (4)$$

$$F_Z = -11,3 \cos(\varphi) + 0,10 \cos(3\varphi) + 0,20 \cos(5\varphi). \quad (5)$$

Uma característica importante destes modelos é a que considera os satélites orientados para o Sol, mantendo os painéis solares normais ao plano que contém o Sol, a Terra e o próprio satélite. A forma geral

para a pressão de radiação é dada por (Ferreira e Kuga, 1997):

$$\ddot{\mathbf{r}}_{PR} = \nu \left[\frac{\gamma}{m} (G_X F_X \hat{\mathbf{X}} + G_Z F_Z \hat{\mathbf{Z}}) + Y_b \hat{\mathbf{Y}} \right], \quad (6)$$

onde,

- ν é o fator de sombra;
- $\hat{\mathbf{X}}$, $\hat{\mathbf{Y}}$ e $\hat{\mathbf{Z}}$ são os vetores unitários no sistema de eixos fixos no satélite;
- γ , G_X e G_Z são os fatores de escala com valores nominais próximo de 1;
- Y_b e m é o y-bias da aceleração e a massa do satélite, respectivamente;
- F_X e F_Z são as componentes da força de pressão de radiação em relação aos eixos X e Z, respectivamente.

Os fatores de escala e o y-bias podem ser estimados juntos com outros parâmetros na determinação de órbitas dos satélites GPS. O modelo ROCK 42 é expresso em relação a um sistema de referência fixo no satélite, sendo o eixo Z orientado positivamente na direção da Terra, o eixo X positivo no sentido do plano que contém o Sol, plano este formado pelos eixos X e Z. O eixo Y torna o sistema dextrogiro, localizado sobre o eixo de sustentação dos painéis solares. A definição matemática dos eixos é dada por (Ferreira e Kuga, 1997):

$$\hat{\mathbf{Z}} = -\frac{\vec{r}}{r}, \quad (7)$$

$$\hat{\mathbf{Y}} = \frac{\hat{\mathbf{Z}} \times \hat{\mathbf{S}}}{|\hat{\mathbf{Z}} \times \hat{\mathbf{S}}|}, \quad (8)$$

$$\hat{\mathbf{X}} = \hat{\mathbf{Y}} \times \hat{\mathbf{Z}}, \quad (9)$$

onde \vec{r} e $\hat{\mathbf{S}}$ são o raio vetor do satélite e o vetor unitário do Sol, respectivamente, no sistema inercial.

Nas expressões para o modelo T20 o ângulo ϕ é dado pelo arco-coseno do produto interno entre o eixo Z do satélite e o vetor unitário do Sol:

$$\phi = \cos^{-1}(\hat{\mathbf{Z}} \cdot \hat{\mathbf{S}}). \quad (10)$$

O ângulo ϕ varia entre 0 e 180 graus para satélites do bloco II/IIA, porém para satélites do bloco IIR este ângulo pode variar entre 0 e 360 graus (Fliegel e Gallini, 1996). Parece haver algumas contradições na literatura sobre o comportamento do ângulo ϕ para os satélites do bloco IIR, como pode ser visto em Ziebart et al. (2003), Marquis e Krier (2000) e Fliegel (1996). Marquis e Fliegel assumem, para efeitos de estudo, que os satélites do bloco IIR não fazem o giro do meio dia e da meia noite “*noon and midnight turns*”, porém Ziebart, et al

(2003) realizaram a determinação de órbita para esses satélites considerando esses efeitos e, os resultados ficaram degradados, o que não ocorreu quando a determinação foi feita utilizando a mesma metodologia dos satélites do bloco II/IIA. Desta maneira não foram utilizados satélites do bloco IIR neste trabalho, mas somente do bloco II/IIA, para efeito de análises comparativas.

Foram adotados dois satélites de cada um dos cinco planos orbitais (A, B, C, D e F) do sistema GPS, com exceção do plano E, o qual contém somente o satélite PRN 10, pertencente ao bloco IIA. Este critério foi seguido esperando que efeito da pressão de radiação solar tenha o mesmo comportamento para os satélites do mesmo plano. O status e situação de cada satélite da constelação GPS pode ser obtido a partir do endereço <http://tycho.usno.navy.mil/ftp-gps/gpsb2.txt> e a massa de cada satélite pode ser encontrada em <http://www.aiub.unibe.ch/download/BSWUSER50/GEN/SATELLIT> ou em http://www.ngs.noaa.gov/GPS/noaa_acn.html e adotou-se como sendo de 972,9 kg a massa para todos os satélites (bloco II/IIA) envolvidos na integração, com exceção do PRN 15 que pertence ao bloco II e tem 885,9 Kg de massa.

3 RESULTADOS

A integração de órbita foi realizada para a época do dia 10 de Fevereiro de 2005 e foram gerados três tipos de resultados com o GPSORBIT: sem o modelo de pressão de radiação solar, com o modelo Bola de Canhão e com o modelo ROCK. O vetor estado inicial (coordenadas e velocidades) foi obtido a partir dos arquivos de efemérides precisas encontrados no endereço <http://earth-info.nga.mil/GandG/sathtml/PEexe.html>.

Após a integração, o GPSORBIT fornece um arquivo no formato SP3 que pode ser facilmente comparado com as efemérides precisas a partir do programa GPSATORB (Marques e Monico, 2003). Os resultados (em metros) são mostrados a seguir.

3.1 Resultados sem o Modelo de Pressão de Radiação Solar

A Figura 1 mostra o erro posição para todos os satélites no caso em que não foi considerado o efeito da pressão de radiação solar.

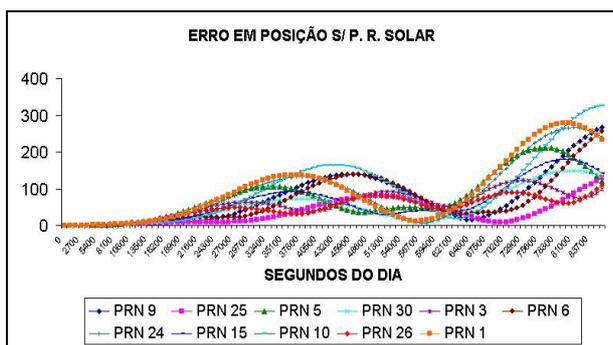


Figura 1. Erro em posição s/ Pressão de Radiação Solar.

3.2 Resultados com o Modelo de Pressão de Radiação Solar Bola de Canhão

No caso deste modelo, o valor do coeficiente de reflexão de radiação C_R adotado foi de 1,5, a razão área sobre a massa a/m foi de 0,0124 e a aceleração em y-bias é nulo, já que são parâmetros a serem estimados no ajustamento de redes GPS ou a partir de dados de rastreamento. As figuras 2, 3 e 4 mostram os erros na normal, na tangencial e na radial e a figura 5 o erro em posição para todos os satélites.

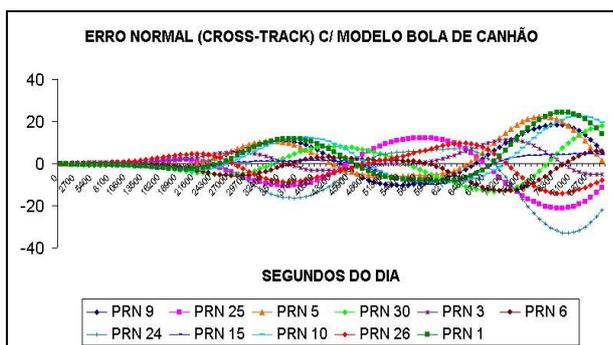


Figura 2. Erro na normal c/ modelo Bola de Canhão.

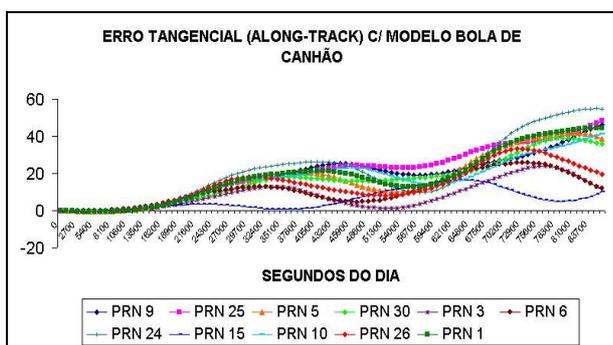


Figura 3. Erro na tangencial c/ modelo Bola de Canhão.

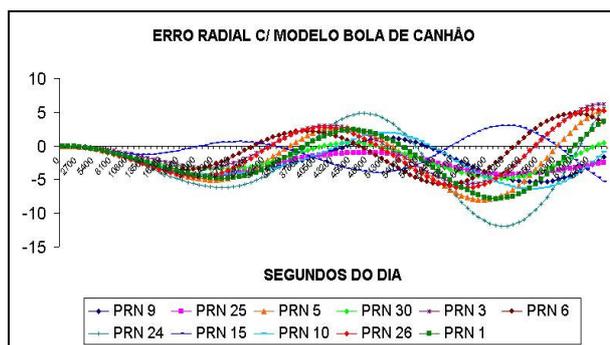


Figura 4. Erro na radial c/ modelo Bola de Canhão.

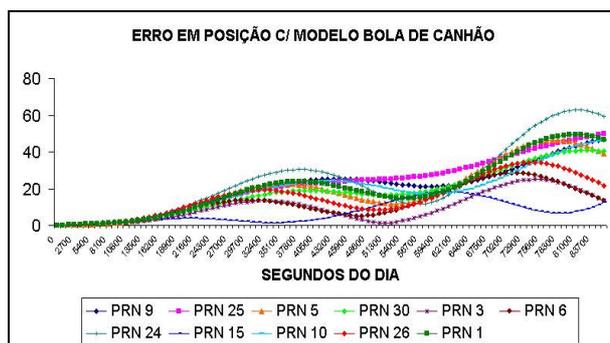


Figura 5. Erro em posição c/ modelo Bola de Canhão.

3.3 Resultados com o Modelo de Pressão de Radiação Solar Rock 42

Para o modelo Rock 42, os valores para fatores de escala G_x , G_z e γ foram adotados com o valor nominal 1 (seção 3.2) e o "bias" sendo nulo, pois assim como no modelo Bola de Canhão são parâmetros a serem estimados na determinação da órbita. As figuras 6, 7 e 8 mostram os erros na normal, na tangencial e na radial e a figura 9 mostra o erro em posição para todos os satélites.

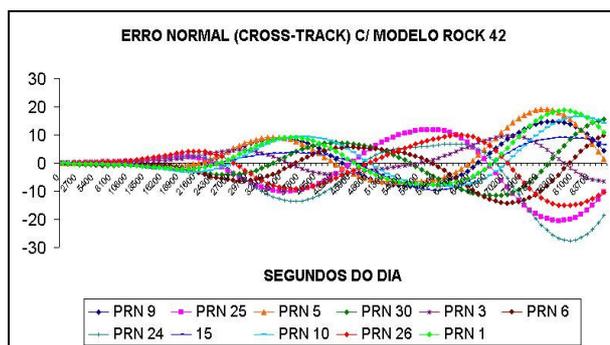


Figura 6. Erro na normal c/ Modelo Rock 42.

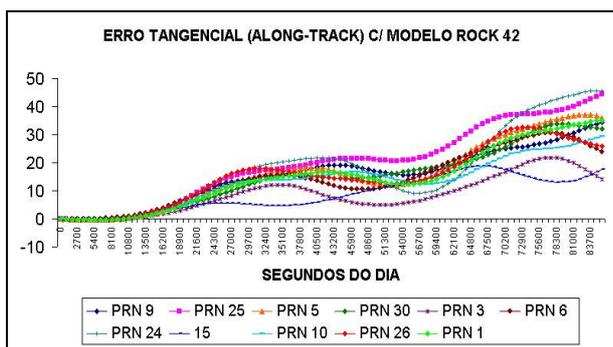


Figura 7. Erro na tangencial c/ Modelo Rock 42.

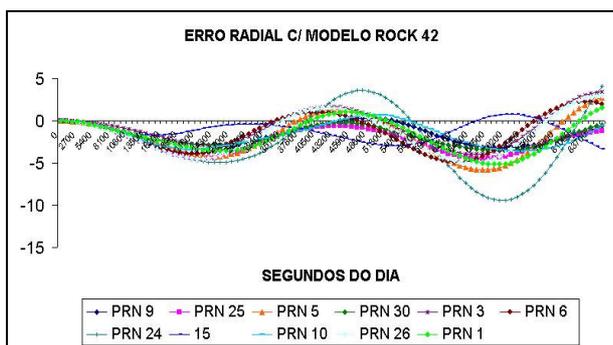


Figura 8. Erro na radial c/ Modelo Rock 42.

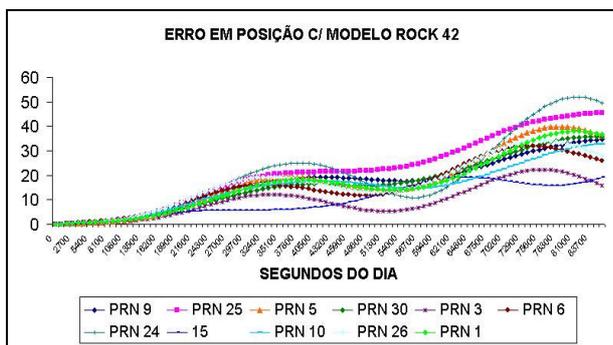


Figura 9. Erro em posição c/ Modelo Rock 42.

3.4 Comparação entre os modelos

Após a integração, foi obtida a maior magnitude do erro ao final do dia para cada satélite e em seguida realizou-se uma análise comparativa, em termos de porcentagens com relação à integração sem o modelo de pressão de radiação. Os valores podem ser observados na tabela 1, bem como na figura 10.

PRN	S/M.	B. C.	B. C. %	ROCK	ROCK %
9	122,603	25,051	79,567	22,288	81,821
25	326,767	45,849	85,969	32,695	89,994
5	212,294	46,400	78,144	39,82	81,243
30	277,703	49,509	82,172	37,987	86,321
3	129,798	49,809	61,626	45,651	64,829
6	149,243	40,766	72,685	35,686	76,089

24	179,126	18,251	89,811	19,314	89,218
15	266,457	62,808	76,428	31,249	88,272
10	255,58	28,463	88,863	31,946	87,501
26	110,406	34,254	68,975	34,234	68,993
1	266,479	46,735	82,462	34,609	87,012
MÉDIA	208,769	40,718	78,791	35,116	81,226

Tabela 1. Valor do maior erro ao final do dia e melhoria dos modelos em termos percentuais.

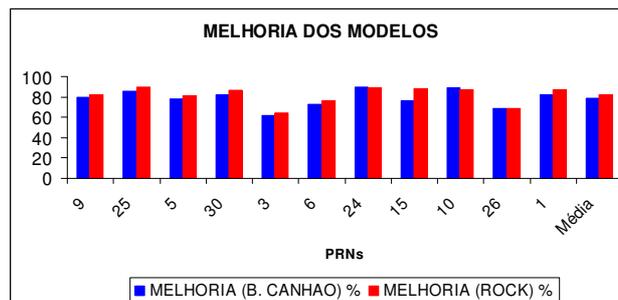


Figura 10. Melhoria dos modelos Bola de Canhão e rock.

4 CONCLUSÃO

A partir das figuras que apresentam os erros orbitais nas direções normal, tangencial e radial pode-se observar que ambos possuem, aproximadamente, o mesmo comportamento ao longo do dia com exceção de sua magnitude e, como já foi dito (seção 1), os maiores erros se encontram na componente tangencial. Os erros ao final do dia (tabela 1) mostram que realmente é imprescindível a modelagem da pressão de radiação solar, pois sem a consideração deste efeito os valores dos erros atingiram de 100 a 300 metros, enquanto que com os modelos Bola de Canhão e Rock 42 esse intervalo diminuiu drasticamente para 20 a 50 metros. A melhoria de cada modelo também é apresentada na tabela 1 e na figura 10 e, para os satélites de PRN 9, 25, 5, 30, 3, 6, 15 e 1 o modelo ROCK foi melhor atingindo em média 80,508% contra 76,447% do modelo Bola de Canhão, porém para os satélites de PRN 24 e 10 o modelo Bola de Canhão foi melhor e atingiu em média 89,337% contra 88,360% do modelo ROCK. Uma explicação para a aparente melhoria desse modelo com relação ao ROCK 42, em alguns satélites, pode ser devido ao coeficiente de reflexão adotado com valor de 1,5 que melhor se aproximou do valor real, porém é necessária uma análise mais detalhada para a confirmação dessa hipótese. No geral o modelo ROCK 42 apresentou uma melhoria em média de 81,226% contra 79,791% do modelo Bola de Canhão ao final do dia.

Deve-se notar que esse trabalho analisou quantitativamente a influência da pressão de radiação solar nos satélites GPS, mostrando a importância de se incluí-lo no modelo de forças. Para efetiva utilização dos modelos em trabalhos de precisão é necessário introduzir os valores dos parâmetros dinâmicos ajustados através

do processo de determinação de órbita. No caso do modelo bola de canhão deve-se utilizar os valores ajustados de C_r (entre 1 e 2) e C_y (equação 1) de cada satélite. No caso do modelo ROCK deve-se utilizar γ , G_x , G_z (aproximadamente unitários), e Y_b (equação 6), estimados para cada satélite. Acredita-se que o modelo ROCK, por ser customizado, produza acurácia superior, proporcionando também um maior grau de liberdade nos ajustes dos parâmetros dinâmicos.

Para trabalhos futuros propõe-se incluir o modelo T30, após a devida eliminação da contradição existente entre os vários autores, sobre o movimento de atitude dos satélites do bloco IIR.

5 REFERÊNCIAS

Ferreira, L. D. D. e Kuga, H. K., Avaliação dos efeitos da pressão de radiação solar para satélites GPS. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1997.

Fliegel, H. F. e Gallini, T. E. Solar Force Modelling of Block IIR Global Positioning System Satellites. **Journal of Spacecraft and Rockets**, 33(6): 863-866, Dezembro de 1996.

Fliegel, H. F., Gallini, T. E. e Swift, E. R. Global Positioning System Radiation Force Model for Geodetic Applications. **Journal of Geophysical Research**, 97(B1): 559-568, Janeiro de 1992.

Marques, H. A. e Monico, J. F. G., 2003. Avaliação da Qualidade das Efemérides Transmitidas dos Satélites GPS, **IV Fórum de Ciências da FCT - UNESP**, Resumos, Presidente Prudente.

Marquis, W. e Krier, C., Setembro de 2000. Examination of the GPS Block IIR Solar Pressure Model. **Proceedings of ION GPS 2000**, Salt Lake City, UT, 19-22.

McCarthy, D. D. e Petit G. **IERS Conventions (2003)**. IERS Technical Note 32, Central Bureau of IERS-Observatoire de Paris, 2003.

McCarthy, D. D. **IERS Conventions (1996)**. IERS Technical Note 21, Central Bureau of IERS-Observatoire de Paris, 1996.

Mog, D. E. **Determinação de órbita dos satélites NAVSTAR-GPS**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1995.

Monico, J. F. G., **High Precision Inter-Continental GPS Network**, PhD. Thesis, University of Nottingham, 1985.

Seeber, G., **Satellite Geodesy: foundations, methods and applications**, Berlin, New York: Walter de Gruyter, 2003.

Ziebart, M., Adhyo, S., Sibthorpe, A. e Cross, P. GPS Block IIR Non-Conservative Force Modelling Computation and Implications. **Proceedings of ION GPS 2003**, 2671-2678, Setembro de 2003.

6 AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com o apoio do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), através de bolsa PIBIC.