

# ANÁLISE DA CORRENTE FOTOGERADA NOS PAINÉIS SOLARES DO SATÉLITE SCD2 DO INPE COMPENSADA PELO ALBEDO PLANETÁRIO

Nelson Veissid – veissid@las.inpe.br

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Laboratório Associado de Sensores e Materiais

Mario Ferreira Baruel – baruel@dea.inpe.br

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Divisão de Eletrônica Aeroespacial

**Resumo.** O segundo satélite da Missão Espacial Completa Brasileira do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (SCD2/MECB-INPE) foi colocado em órbita em outubro de 1998. Ele tem a forma de um prisma octogonal com 1 m de diâmetro e 1,45 m de altura. Os painéis solares ocupam as oito faces laterais do satélite e geram 70 W de potência elétrica. O estudo da degradação da corrente fotogerada das células solares em função da vida do satélite é muito complexo em função da influência do albedo planetário. Pois, durante a órbita do satélite os painéis recebem a soma da energia solar direta e indireta, que é a luz solar refletida pelo planeta Terra para o espaço exterior (conhecido como albedo planetário). Esta radiação solar indireta é fortemente afetada pelas condições climáticas atmosféricas e seu efeito é compensado através de um algoritmo que considera os dados do experimento de células solares que está a bordo do satélite SCD2. Portanto, desta maneira a variação sinuosa da corrente fotogerada se transforma numa curva linear bem comportada em função do tempo da órbita do satélite. O trabalho apresenta o algoritmo matemático de compensação do albedo planetário e os resultados da variação da corrente fotogerada dos painéis solares em distintas situações, tais como: diferentes épocas do ano, temperatura e inclinação de iluminação.

**Palavras-chave:** Energia Solar, Satélite, Célula Solar

## 1. INTRODUÇÃO

O segundo satélite da Missão Espacial Completa Brasileira do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (SCD2/MECB-INPE) foi colocado em órbita em outubro de 1998 e faz parte de um sistema de coleta de dados ambientais. Os satélites de coleta de dados (SCD1 e SCD2) trabalham em conjunto com plataformas terrestres de coleta de dados (PCD) espalhadas ao longo da superfície do Brasil. As mais de mil PCDs instaladas medem de maneira remota características da atmosfera (umidade, insolação, temperatura e outras), do solo (umidade e temperatura) e, quando instalada próximo de rio e represa, mede nível e fluxo de água. O satélite, também, leva a bordo um experimento de células solares de qualificação espacial, que foram produzidas no Brasil. O objetivo do experimento ECS é o de qualificar em missão estes dispositivos, através da degradação do desempenho elétrico das células solares durante a vida do satélite. Este objetivo principal já foi cumprido e, confirmado pelos dados, as células solares tiveram menos do que 7% de degradação relativa no período de treze anos de vida do satélite. Na literatura consta que nas condições de órbita do satélite é esperado uma degradação relativa de 15%. Portanto, estes valores estabelecem o mérito das células solares Brasileiras que estão no experimento e, também, o mérito do próprio ECS que conseguiu nestes anos fazer a medida.

Além do objetivo principal, o ECS atua como um sensor de radiação eletromagnética (350-1100 nm) e permite medir a radiação solar direta incidente na Terra e a radiação que é refletida para o espaço exterior (Rauschenbach, 1980). A razão entre a intensidade destas duas radiações é o albedo planetário global (Veissid *et al.*, 1999). Os dados de albedo correspondem a vários arquivos diários armazenados e processados desde a data do lançamento do satélite. Estes dados podem ser agrupados em períodos de tempo (anual ou sazonal) ou serem estudados por regiões em latitude e longitude (Veissid & Pereira, 2000). Os dados são transmitidos em tempo real pela telemetria do satélite e recebidos na estação receptora de Cuiabá, MT-Brasil (16°S, 56°W). Por exemplo, a Fig. 1 mostra as órbitas do satélite SCD2 dentro da visada desta estação no mês de novembro de 1998. A Fig. 1, também, mostra a forma octogonal do satélite SCD2 e a posição do ECS, juntamente com os parâmetros geométricos de interesse para este trabalho. Vários trabalhos foram publicados e apresentados em congressos (Veissid *et al.*, 2010; Veissid, 2010) mostrando a importância da medida do albedo planetário pelo ECS nas áreas de meteorologia, sensoriamento remoto, mudanças climáticas e outras.

As células de silício, que compõem os painéis do satélite, foram fabricadas pela empresa Spectrolab e sofrem a mesma taxa de degradação dos dispositivos do ECS, pois foram feitas do mesmo material silício. Trabalho de mestrado de um dos autores trata exatamente deste estudo (Baruel, 2012), que é a análise dos dados de corrente fotogerada dos painéis dos satélites SCD1 e SCD2 visando o estudo da diminuição dos valores destes dados com a vida do satélite. No entanto, a análise dos dados de corrente fotogerada necessita da compensação do efeito do albedo planetário. Este artigo descreve o método matemático usado nesta compensação e alguns resultados interessantes da variação da corrente fotogerada total e líquida, com a parcela do albedo planetário descontado.

Os pontos de telemetria amostrados a cada meio segundo, ver Fig. 2A, são submetidos a uma mudança de variável de tempo para ângulo de rotação. O pico da radiação solar ou amplitude solar é obtido pelo método dos mínimos quadrados no ajuste de uma parábola em torno do seu máximo. Usando este algoritmo, os pontos telemetrizados do ECS mostrados na Fig. 2A se transformam na curva da Fig. 2B. O albedo planetário é a razão entre a altura dos dois picos da Fig. 2B após correções esféricas angulares.

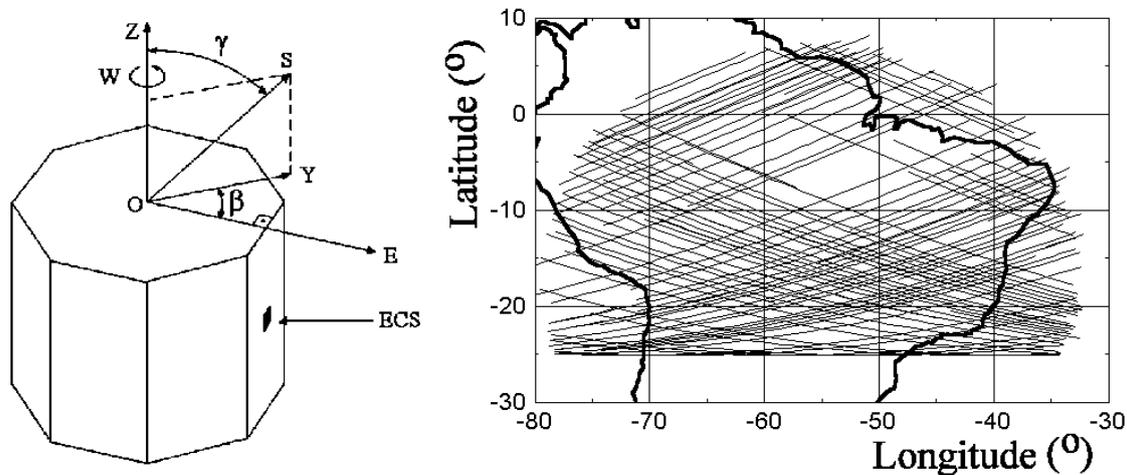


Figura 1 – Lado direito, órbitas do satélite SCD2 dentro da visada da estação receptora de Cuiabá (16° S, 56° W), em novembro de 1998, e desenho da forma octogonal do satélite SCD2 com o Experimento de Células Solares (ECS).

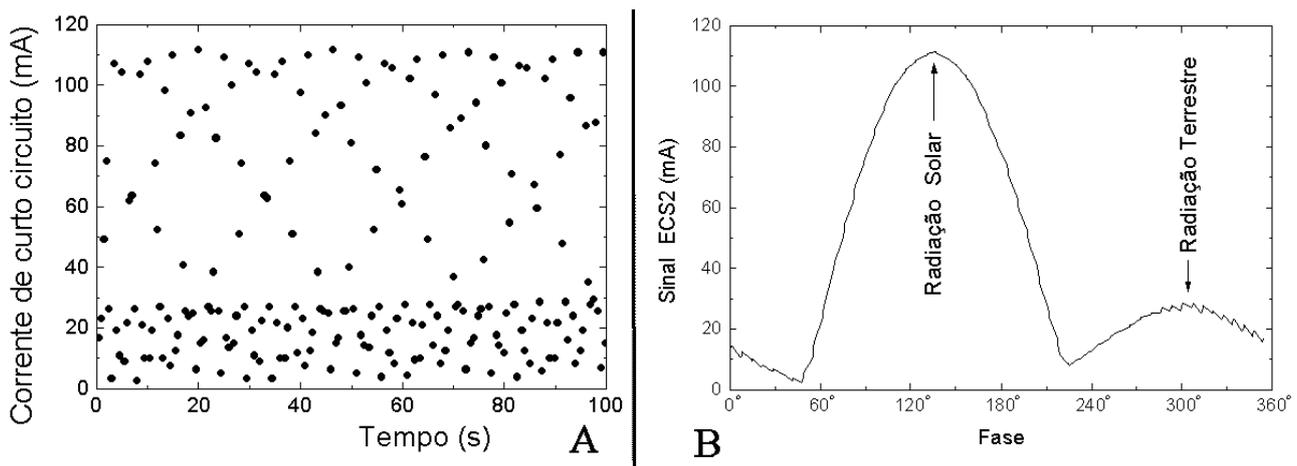


Figura 2 – Exemplo de sinal da telemetria do ECS em função do tempo (A) e a curva destes sinais em função do ângulo de rotação do satélite (B), medida feita em 21 de novembro de 1998 as 16:02 h GMT.

A corrente fotogerada de um dispositivo fotovoltaico é proporcional a intensidade luminosa, sempre considerando que a temperatura e o espectro luminoso sejam constantes. Nas medidas experimentais da corrente de curto circuito de células e painéis solares, estes dois parâmetros são os maiores responsáveis pelos erros. Uma medida experimental feita fora de uma determinada condição pode ser extrapolada para outra condição. Para tal, as duas condições devem ser parecidas. Por exemplo, a temperatura de condição padrão de medida é 25°C, medidas feitas em torno desta temperatura devem ser extrapoladas usando coeficientes de temperatura para corrente e tensão. Outro exemplo, a condição padrão espectral de iluminação é AM0 (1367 W/m<sup>2</sup>) ou AM1,5G (1000 W/m<sup>2</sup>), medidas feitas com iluminação em torno destes espectros, também, devem ser extrapoladas usando simulação da integral da curva de resposta espectral do dispositivo fotovoltaico.

## 2. SIMULAÇÃO MATEMÁTICA DA ILUMINAÇÃO DO SATÉLITE

O satélite SCD2 tem órbita estável devido ao seu “spin”, que é a rotação em volta de seu eixo principal orientado perpendicularmente ao plano da órbita da Terra em torno do Sol. O SCD2 mantém a rotação entre 33 e 35 rpm de modo ativo através do seu acoplamento com o campo magnético da Terra. Sua órbita equatorial, com uma inclinação de 25° e altitude de 750 km, define uma iluminação solar homogênea de um lado do satélite. O lado oposto recebe iluminação

homogênea da luz solar refletida pela Terra (albedo planetário), na situação que o satélite está entre o Sol e a Terra. A Fig. 3 mostra esta geometria de iluminação do satélite.

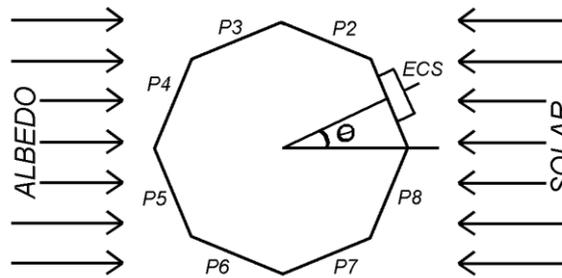


Figura 3 – Esquema de iluminação do satélite SCD2 que tem forma geométrica octogonal..

Para o ângulo de fase  $\theta$  entre  $0^\circ$  e  $45^\circ$ , temos as seguintes potências de iluminação solar dos oito painéis laterais:

$$P_{1S} = P_{solar} \cdot \cos(\theta), \quad P_{2S} = P_{solar} \cdot \cos(\theta + 45^\circ), \quad P_{3S} = 0, \quad P_{4S} = 0, \quad P_{5S} = 0, \quad P_{6S} = 0, \quad P_{7S} = P_{solar} \cdot \cos(\theta + 270^\circ) \text{ e } P_{8S} = P_{solar} \cdot \cos(\theta + 315^\circ).$$

Os oito painéis laterais, também, são iluminados pelo albedo terrestre na forma:

$$P_{1A} = 0, \quad P_{2A} = 0, \quad P_{3A} = P_{albedo} \cdot \cos(180^\circ - \theta - 90^\circ), \quad P_{4A} = P_{albedo} \cdot \cos(180^\circ - \theta - 135^\circ), \\ P_{5A} = P_{albedo} \cdot \cos(180^\circ - \theta - 180^\circ), \quad P_{6A} = P_{albedo} \cdot \cos(180^\circ - \theta - 225^\circ), \quad P_{7A} = 0 \text{ e } P_{8A} = 0.$$

Para os ângulos de fase entre  $45^\circ$  e  $360^\circ$  as equações são similares. O sistema gerador do satélite soma as correntes fotogeradas de todos os painéis. A Fig. 4 mostra as curvas das potências individuais de cada painel e a curva da potência total, em função do ângulo de rotação do satélite. Esta figura mostra o ciclo de uma rotação com albedo constante de 33%. A passagem do satélite pela visada da estação receptora de Cuiabá demora da ordem de 15 min (ver Fig. 5-10) e, neste intervalo, a telemetria transmite aproximadamente 1500 sinais. Nesta passagem, o satélite faz da ordem de 400 voltas em torno do seu eixo, isto é o SCD2 neste tempo de 15 min faz 400 gráficos iguais ao da Fig. 4. Nestes gráficos o sinal somado dos painéis solares sofre alteração devido a temperatura e, também, devido a variação do albedo planetário ao longo do sistema atmosfera-nuvens-superfície. Para esta simulação foi considerado que cada painel lateral do satélite quando iluminado com AM0 fornece uma corrente fotogerada de 1 A e, também, que todos os painéis laterais são idênticos (ver Fig. 1).

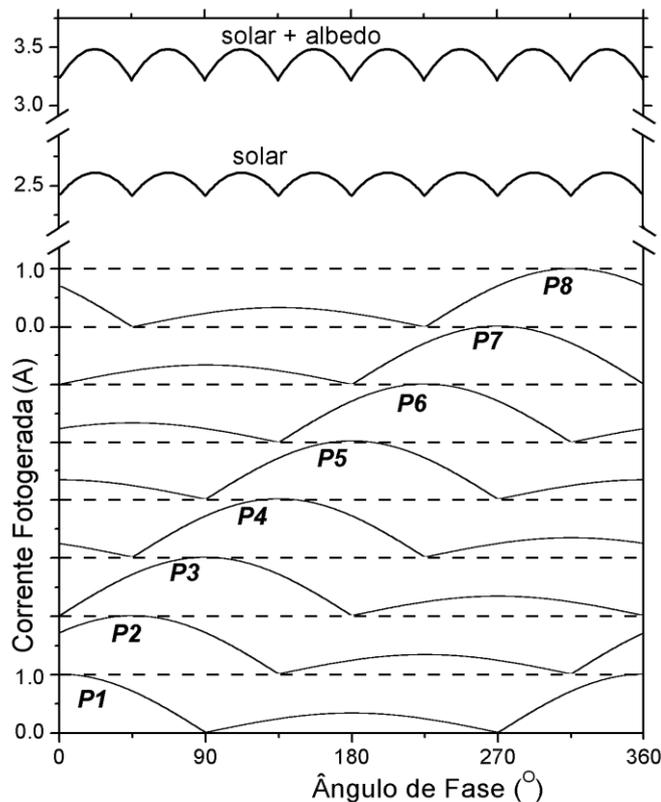


Figura 4 – Curvas P1 até P8 mostrando separadamente as correntes fotogerada dos oito painéis laterais em função do ângulo de fase do spin do satélite. As curvas solar e solar+albedo são as composições dos painéis.

A Fig. 4 mostra a contribuição de cada um dos painéis laterais do satélite (curvas P1 até P8), onde o pico menor é relativo ao albedo planetário e o pico maior é a iluminação direta solar. Esta figura, também, mostra as curvas independentes da parte solar isolada e da combinação solar mais albedo. A parte solar oscila entre 2,41 A e 2,61 A e, a parte integrada solar mais albedo, entre 3,22 A e 3,48 A. Estas oscilações são devidas unicamente ao formato geométrico octogonal do satélite, pois num instante um painel é iluminado de maneira “chapada” e, noutro instante, dois painéis são iluminados de “bico”. A Fig. 3 mostra uma iluminação de “bico”. A oscilação da Fig. 4 tem um valor mínimo 7,7% menor do que o máximo para iluminação solar e, a parte solar mais albedo, a variação é de 7,5%. Estes valores (7,7% e 7,5%) obtidos nesta simulação tendem a ser maiores numa medida real, pois os painéis solares são compostos por células solares levemente diferente entre elas.

### 3. RESULTADOS

Todos os dias são tomados de três a cinco arquivos de dados de medidas do Experimento Célula Solar com nível bom de iluminação solar e albedo. Devido ao alcance da estação receptora em Cuiabá, existem períodos que o satélite não cruza a área do círculo da Fig. 1, lado direito, durante o dia em condições boas de iluminação. Estes períodos, também, conhecidos como “janelas” duram alguns dias a cada quarenta dias. Os arquivos são processados para se obter a degradação das células solares e, também, para se obter o albedo planetário nas latitudes e longitudes da órbita do satélite. O albedo é calculado conforme algoritmo mostrado em trabalhos anteriores (Veissid, 2000).

As medidas da corrente de curto circuito do gerador do satélite são amostradas a cada meio segundo, exatamente como os dados do ECS. Para este trabalho, foram escolhidos aleatoriamente seis órbitas e os pontos lidos pela telemetria são os círculos cheio de antes da correção do albedo mostrados no lado direito das Fig. 5 até 10. Estas figuras, também, mostram os valores de corrente fotogerada corrigido pelo albedo, variação da temperatura ao longo da órbita (curva vermelha no quadro do lado direito), trajetória da órbita em latitude e longitude (curva azul) e o albedo planetário em função da longitude desta órbita (curva vermelha no quadro do lado esquerdo).

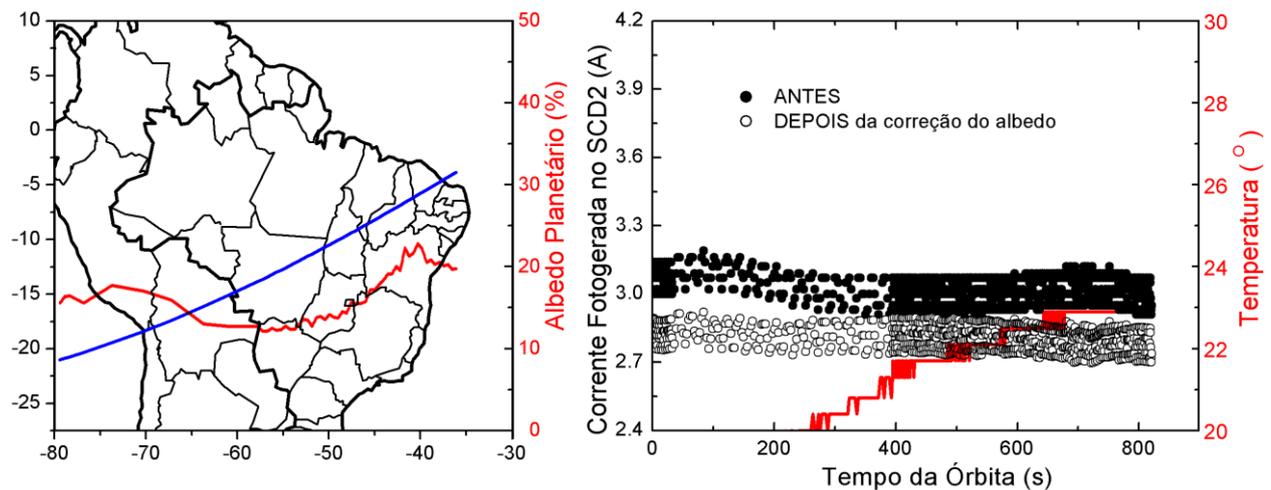


Figura 5- Curvas da órbita, do albedo, da temperatura e dados de correntes fotogeradas tomados em 01/07/2003.

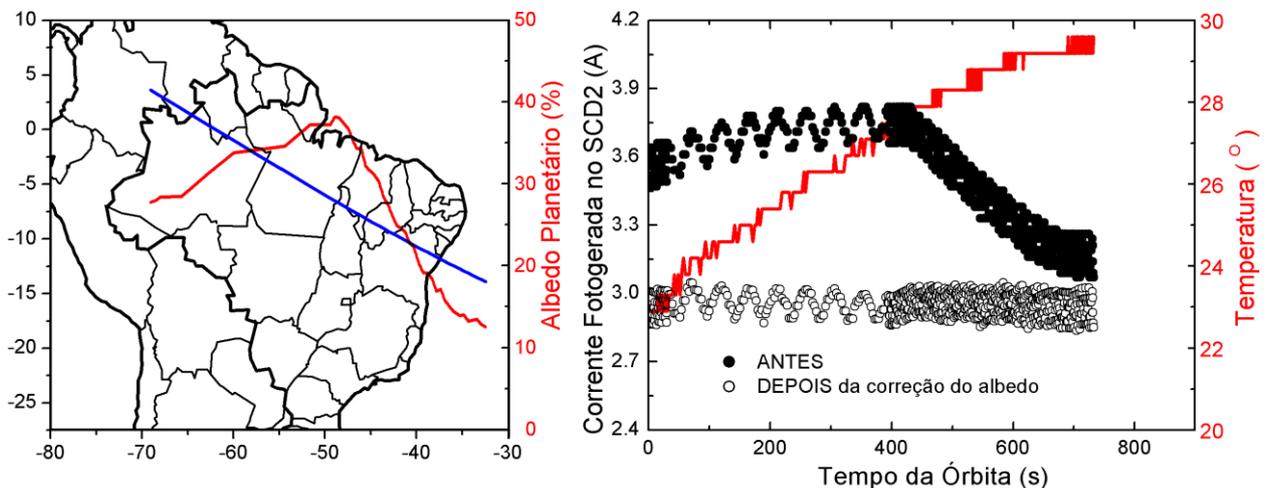


Figura 6- Curvas da órbita, do albedo, da temperatura e dados de correntes fotogeradas tomados em 01/01/2004.

O algoritmo de correção do albedo das curvas de corrente fotogerada está fundamentado na informação mostrada na Fig. 2B. Sendo as alturas do pico solar e do pico de refletividade terrestre dadas por  $H_S$  e  $H_T$ , respectivamente, temos que o fator multiplicativo  $F(t)$  que compensa os valores de corrente fotogerada do gerador solar, como se eles estivessem sendo iluminados somente pela luz solar direta, é dado pela Eq. (1) mostrada abaixo.

$$F(t) = H_S(t) / ( H_S(t) + H_T(t) ) \quad (1)$$

Os valores de  $H_S$  e  $H_T$  são funções do tempo porque as condições de iluminação solar direta e refletida variam com a latitude e longitude da órbita. O valor do albedo planetário é calculado usando a Eq. (1), juntamente com correções esféricas geométricas (Veissid & Pereira, 2000). Os dados usados para fazer a correção usando a Eq. (1) são extraídos dos dados históricos do experimento de células solares do Satélite SCD2.

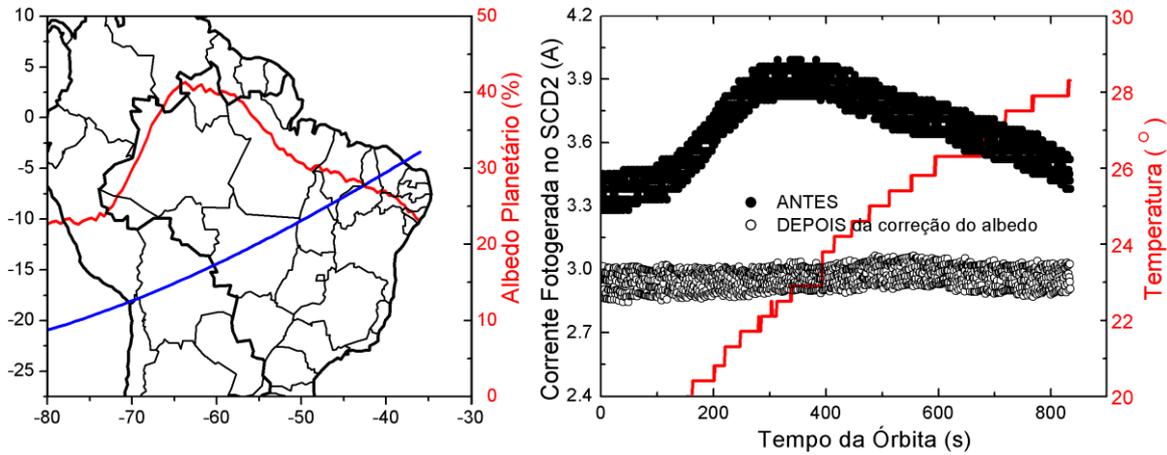


Figura 7- Curvas da órbita, do albedo, da temperatura e dados de correntes fotogeradas tomados em 01/01/2006.

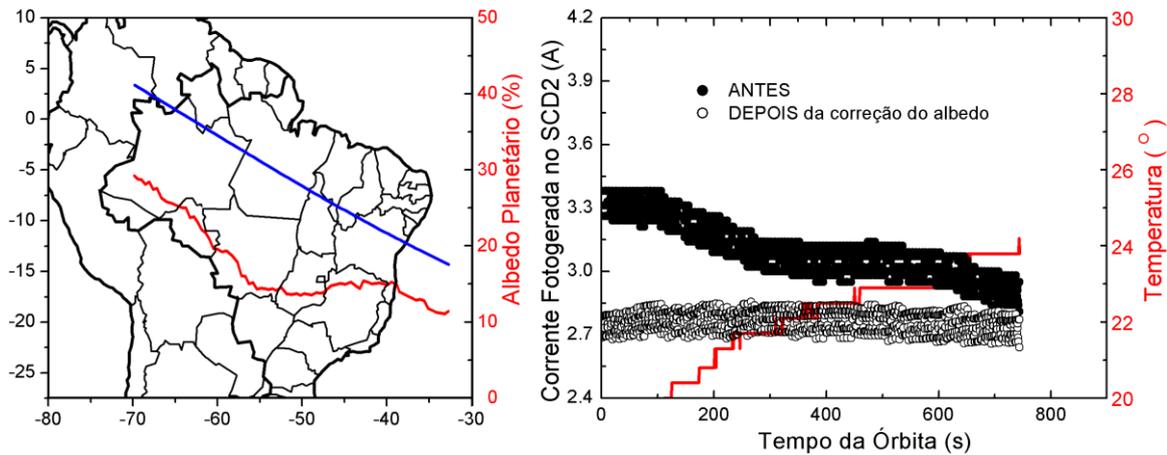


Figura 8- Curvas da órbita, do albedo, da temperatura e dados de correntes fotogeradas tomados em 02/07/2006.

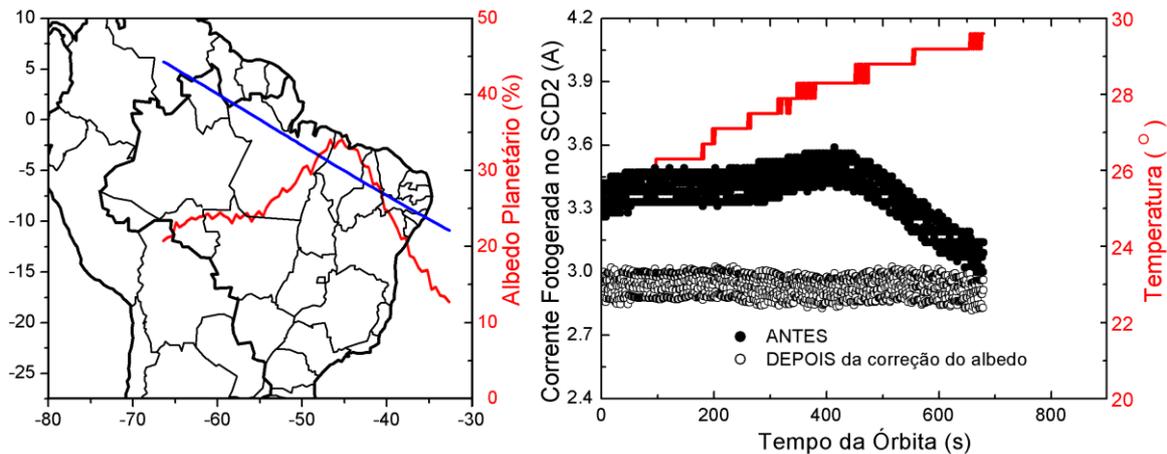


Figura 9- Curvas da órbita, do albedo, da temperatura e dados de correntes fotogeradas tomados em 02/01/2008.

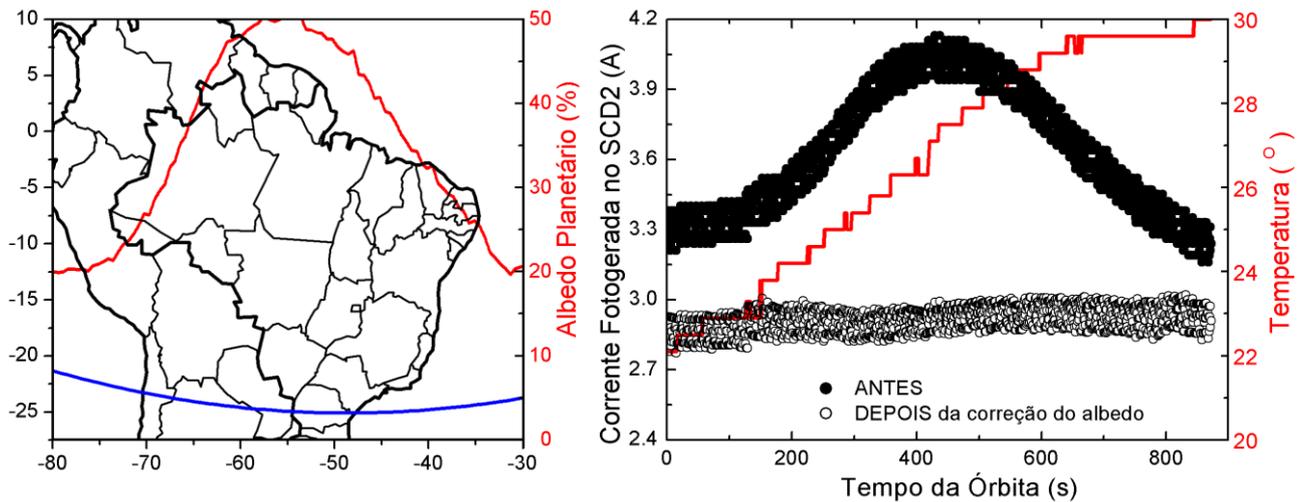


Figura 10- Curvas da órbita, do albedo, da temperatura e dados de correntes fotogeradas tomados em 02/01/2009.

Os valores dos parâmetros de corrente fotogerada corrigidos pelo albedo planetário podem ser extrapolados para condição de iluminação padrão AM0 ( $1367 \text{ W/m}^2$ ). Para tanto, é necessário conhecer o fator de correção devido distância Terra-Sol (FdTS) (Rauschenbah, 1980) e o ângulo de atitude ( $\gamma$ ) mostrado na Fig. 1. A Tabela 1 mostra estes valores e o valor da corrente fotogerada extrapolado para condição padrão AM0. Pode-se observar que os valores de corrente fotogerada extrapolados da última coluna seguem uma tendência de diminuição com o tempo de vida do satélite.

Tabela 1. Valores característicos tomados dos dados mostrados nas Fig. 5 até 10. O valor de corrente fotogerada da última coluna foi calculado por extrapolação para condição de iluminação AM0 ( $1367 \text{ W/m}^2$ ).

FIGURA	DATA MEDIDA	$I_{\text{CORRIGIDO}} \text{ (A)}$	FdTS	$1/\text{sen}(\gamma)$	$I_{\text{EXTRAPOLADO}} \text{ (A)}$
5	01/julho/2003 início as 18:03:28 hrs GMT	$2,855 \pm 0,006$	0,968	1,0003	$2,950 \pm 0,007$
6	01/janeiro/2004 início as 16:58:47 hrs GMT	$3,006 \pm 0,015$	1,034	1,0191	$2,963 \pm 0,014$
7	01/janeiro/2006 início as 15:22:29 hrs GMT	$3,038 \pm 0,011$	1,034	1,0019	$2,943 \pm 0,011$
8	02/julho/2006 início as 15:24:54 hrs GMT	$2,801 \pm 0,014$	0,968	1,0125	$2,930 \pm 0,015$
9	02/janeiro/2008 início as 17:45:06 hrs GMT	$3,002 \pm 0,006$	1,034	1,0045	$2,916 \pm 0,006$
10	02/janeiro/2009 início as 17:21:11 hrs GMT	$2,969 \pm 0,007$	1,034	1,0007	$2,873 \pm 0,006$

#### 4. CONCLUSÃO

Todo projeto de um gerador solar de satélite é fundamentado nas necessidades de potência elétrica de fim de vida. Esta condição é conhecida como EOL, do inglês “End of Life”, e ela é estimada através de vários parâmetros independentes de degradação do gerador solar. Podemos citar alguns exemplos: degradação por incidência de micrometeoritos e degradação por bombardeamento de partículas ionizantes de alta energia (elétrons e prótons). O EOL do satélite SCD2 era de uma potência de 70 W e a estimativa de vida era de dois anos. A potência inicial do gerador solar do satélite era de 90 W e, após mais de 13 anos depois, o artefato espacial mostra uma potência gerada de 85 W. Pela taxa de degradação mostrada na corrente fotogerada extrapolada da última coluna da Tabela 1, podemos afirmar com certeza que a vida do satélite vai se estender por mais 30 anos no mínimo. Naturalmente, existem outros fatores, correção da órbita, por exemplo, que definem a vida do satélite e, também, um aumento brusco da atividade solar pode aumentar a taxa de degradação anual por fator de uma ou até de duas grandezas. Os satélites brasileiros SCD1 e SCD2 foram colocados em órbita em fevereiro de 1993 e outubro de 1998, com vidas estimadas de um e dois anos respectivamente. Estas expectativas de vida foram ultrapassadas muito além do qualquer previsão otimista poderia imaginar, pois eles ainda estão operacionais.

Este trabalho faz parte da dissertação de mestrado de um dos seus autores (MFB) e apresenta pela primeira vez uma análise pós-lançamento dos dados telemetrizados dos satélites brasileiros. Este tipo de análise é útil como realimentação de projetos de satélites futuros e, também, para explicar determinadas características do seu funcionamento, como por exemplo, a longevidade dos satélites brasileiros.

## Agradecimentos

Os autores desejam agradecer aos técnicos do Centro de Controle e Rastreamento de satélite do INPE pelo trabalho de recuperação e descompactação dos dados telemetrizados que estavam armazenados em mídias magnéticas.

## REFERÊNCIAS

- Baruel, M. F., 2012. Estudo da Variação da Corrente Fotogerada nos Painéis Solares dos Satélites do INPE, Dissertação de Mestrado, DEA/INPE, São José dos Campos-SP.
- Rauschenbach, H. S., 1980. Solar Cell Array Design Handbook. Van Nostrand Reinhold Company, New York.
- Veissid, N., Beloto, A. F., Ferreira Leite, N., 1999. Experimentos Célula Solar 1 e 2 dos Satélites SCD1 e SCD2 do INPE. Seminários de Fontes Não-Convencionais de Energia – As Tecnologias Solar, Eólica e de Biomassa, Florianópolis-SC, Trabalho completo publicado nos Anais, pg. 171 a 190.
- Veissid, N., Pereira, E. B., 2000. Um Modelo Simples de Levantamento do Albedo Planetário Empregando Dados do Experimento Célula Solar do Satélite Brasileiro SCD2, Brazilian Journal of Geophysics, Vol. 18(1), p. 25.
- Veissid, N., 2002. Variabilidade Climática Caracterizada pelo Desvio Padrão do Albedo Planetário. XII Congresso Brasileiro de Meteorologia: A Meteorologia e a Gestão de Energia, Foz do Iguaçu-PR, Trabalho completo publicado nos Anais (CD-ROM), trabalho 2142-1.
- Veissid, N., 2003. New Developments in Using Solar Cells as Remote Sensors to Gauge Climate Change, Environmental Geosciences, Vol. 10(2), p. 47-57.
- Veissid, N., 2003. New Satellite Sensor and Method for the Direct Measurement of the Planetary Albedo, Results for the 1999, 2000 and 2001 in South America, Atmospheric Research, Vol. 66, p. 65-82.
- Veissid, N., 2009. Logarithmic Distribution of Planetary Albedo on South America: A New Tool for Monitoring Climate Changing, Capítulo do livro: Public Policy, mitigation and adaptation to climate change in South America. Autores: Pedro Leite da Silva Dias, Wagner Costa Ribeiro, João Lima Sant'Anna Neto e Jurandir Zullo Jr., Editora Instituto de Estudos Avançados - IEA/USP, ISBN 978-85-63007-00-1, Downloading em <http://www.iea.usp.br/cienciasambientais/>, p. 249-265.
- Veissid, N., Escobedo, J. F., Galdino, M. A., 2010. Taxa de Absorção Atmosférica sobre as Cidades de Botucatu-SP e Rio de Janeiro-RJ, Revista Brasileira de Meteorologia, v. 25, n. 4, p. 455-468.
- Veissid, N., 2010. Análise das Médias Mensais do Albedo Planetário Medido pelo Experimento Célula Solar do Satélite Brasileiro SCD2. III Congresso Brasileiro de Energia Solar, Belém-PA, Trabalho completo publicado nos Anais (CD-ROM), trabalho 69570.

## PHOTOGENERATED CURRENT ANALYSIS OF SOLAR PANELS FOR SCD2 INPE SATELLITE COMPENSATED BY THE PLANETARY ALBEDO

**Abstract.** *The second satellite of the Brazilian Complete Space Mission of the National Institute for Space Research (SCD2/MECB-INPE) was put into orbit in October 1998. It has the form of an octagonal prism with 1 m in diameter and 1.45 m in height. Solar panels occupy the eight sides of the satellite and generate 70 W of electrical power. The study of degradation of the photogenerated current of the solar cells according to the life satellite is very complex because of planetary albedo influence. During the orbit of the satellite, the panels receive the sum of direct and indirect solar energy, which is the sunlight reflected from Earth to outer space (known as planetary albedo). This indirect solar radiation is affected strongly by weather conditions and its effect is compensated by an algorithm that considers the data of solar cells experiment that is onboard of the SCD2 satellite. Therefore, in this way the variation of photogenerated current becomes a linear curve well behaved as a function of time of the satellite orbit. The paper presents the mathematical algorithm for compensating the planetary albedo and the results of the variation of the photogenerated current of the solar panels in different situations, such as different times of year, temperature and illumination slope.*

**Key words:** Solar Energy, Satellite, Solar Cell