

# OITO ANOS DE ANÁLISE DOS DADOS DO EXPERIMENTO CÉLULA SOLAR DO SEGUNDO SATÉLITE BRASILEIRO

Nelson Veissid – veissid@las.inpe.br

Antonio Fernando Beloto – beloto@las.inpe.br

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

**Resumo.** O segundo satélite Brasileiro (SCD2) foi colocado em órbita em Outubro de 1998 e carrega a bordo um experimento de células solares de silício (ECS). O objetivo principal do ECS é o de qualificar em missão e confirmar a confiabilidade das células solares que foram projetadas e fabricadas no Brasil. O ECS é um pequeno módulo composto de um arranjo de três pares de células solares acondicionadas numa estrutura mecânica de alumínio. Os três sinais gerados pelos pares de células são amplificados por um circuito elétrico localizado dentro da estrutura mecânica e são repassados para a telemetria do satélite, que transmite em digital seu valor para a estação receptora em Cuiabá-MS. Cada par de células simula o funcionamento da célula solar em três diferentes situações: tensão de circuito aberto, corrente de curto circuito e tensão de máxima potência. Um termistor colocado sob a estrutura mecânica monitora a temperatura do ECS. Os quatro canais (três de sinal e um de temperatura) são recebidos em tempo real e eles permitem recuperar as curvas de corrente por tensão nas condições padrões de temperatura e intensidade solar (25 °C e AM0). Desta forma, pode-se calcular a degradação dos parâmetros elétricos da célula solar durante a vida do satélite. Este trabalho apresenta a análise dos dados recebidos pela telemetria durante os oito primeiros anos de vida do satélite SCD2. Neste período, podemos dizer que os danos de radiação sofridos pelas células solares provocaram uma diminuição de 2,6% na eficiência, de 1,0% na corrente de curto circuito e de 1,7% na tensão de circuito aberto, em relação aos seus valores de início de vida. Estes valores de degradação são menores do que os esperados, conforme dados apresentados na literatura. Por exemplo, para o período de oito anos e condições de órbita do satélite, era esperado uma degradação relativa de 7% na eficiência de conversão e os dados do experimento revelaram uma degradação menor do que a metade do valor esperado.

**Palavras-chave:** Célula Solar, Energia Solar, Satélite, Danos de Radiação, Efeito Fotovoltaico

## 1. INTRODUÇÃO

Os dois primeiros satélites Brasileiros são partes de um sistema de coleta de dados meteorológicos. O primeiro foi lançado no dia 9 de fevereiro de 1993 e o segundo no dia 23 de outubro de 1998, ambos foram colocados em órbita pelo sistema Pegasus da OSC (Orbital Science Corporation). Eles são repetidores em tempo real de dados recebidos de plataformas ambientais espalhadas ao longo do território brasileiro. Estas plataformas de coleta de dados abrigam conjuntos de instrumentos como termômetros, pluviômetros, anemômetros e outros. Elas transmitem para o satélite remotamente as informações coletadas. As órbitas dos satélites são circulares com 750 km de altitude e inclinação de 25°. Nestas condições os satélites têm um período de rotação em torno da Terra de 100 minutos, sendo que 65 minutos iluminados pelo Sol e o restante do período no cone de sombra da Terra. O SCD1 tinha uma rotação de spin de 120 rpm no início de sua vida e, atualmente, sua rotação é de 35 rpm. O SCD2 possui um sistema de correção de spin e mantém sua rotação em 34 rpm. Cada satélite tem massa de aproximadamente 115kg em forma de um cilindro com base octogonal, 1m de diâmetro e 1,25 m de altura, ver Fig. 1. Os painéis solares do sistema de suprimento de energia dos satélites estão posicionados nas suas oito faces laterais. Nestas condições de órbita os satélites experimentam ciclos de temperatura de -30°C até +40°C, em cada período de 100 minutos. Além de coletar os dados ambientais das plataformas terrestres (PCD), os satélites levam a bordo experimentos com células solares (ECS1 e ECS2), desenvolvidos e fabricados no Brasil. O objetivo dos experimentos é estudar a degradação dessas células pela radiação, pelos ciclos térmicos e por outros efeitos ambientais encontrados fora da atmosfera terrestre. Experimentos de células solares colocados a bordo de satélites mostram a importância do estudo destes efeitos de uma maneira simultânea, conforme reportado por Walker e Statler (1988), pois a realização de ensaios de todos os efeitos de uma maneira conjunta é extremamente difícil. A literatura relata experimentos de células solares em satélites, que operam somente na condição de curto circuito (Huang et al., 1985). Os experimentos ECS1 e ECS2 foram projetados para recuperar a curva completa de corrente por tensão com base no ajuste da curva do sinal em função da temperatura, para o caso do ECS1, e no ajuste das curvas de corrente de curto circuito, tensão de máxima potência e tensão de circuito aberto em função do ângulo de rotação do satélite, para o caso do ECS2. A análise dos dados do ECS1 atestou o bom desempenho das células solares Brasileiras para uso em satélite, conforme reportado em vários trabalhos já publicados por Veissid et al. (1990, 1997, 1998 e 1999) e por Nubile et al. (1994). A Fig. 1 no lado esquerdo mostra os autores deste trabalho fazendo inspeção visual no Experimento Célula Solar 2, o qual está colocado no centro do painel solar do satélite. No lado direito desta figura é mostrado a face frontal do Experimento.

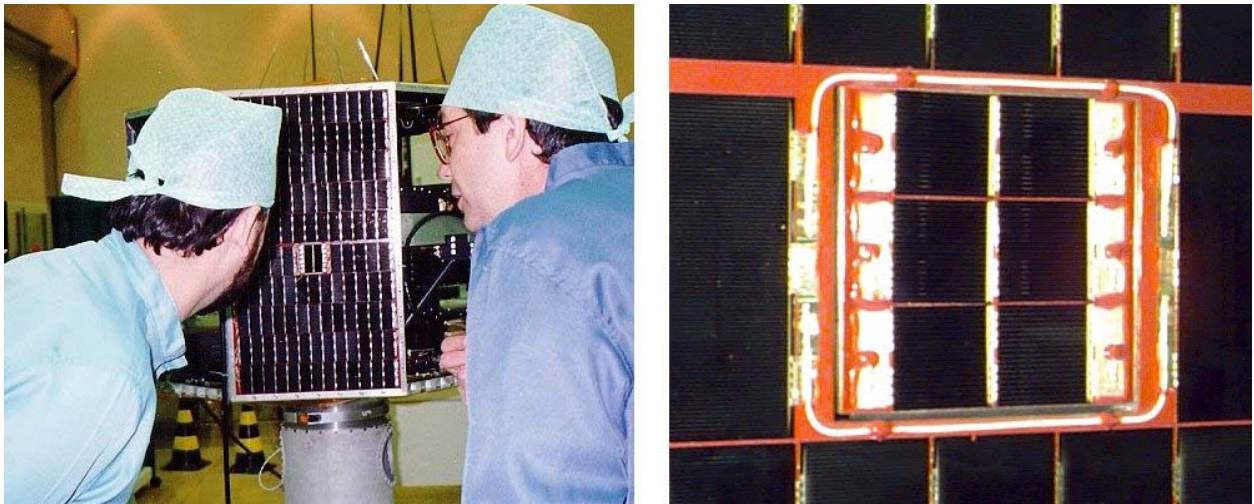


Figura 1 – Os autores deste trabalho fazendo inspeção visual no Experimento e face frontal do ECS2.

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Uma célula solar pode ser representada pelo circuito elétrico equivalente dado na Fig. 2A e, portanto, sua curva característica de tensão por corrente é representada na Eq. 1 (Wolf et al., 1977).

$$I = I_L - I_{S1} \left\{ \exp \left[ \frac{q(V + IR_S)}{kT} \right] - 1 \right\} - I_{S2} \left\{ \exp \left[ \frac{q(V + IR_S)}{2kT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_S}{R_p} \quad (1)$$

$I_L$  é a corrente fotogerada,  $I_{S1}$  e  $I_{S2}$  são as correntes de saturação,  $R_S$  e  $R_p$  são as resistências em série e em paralelo,  $T$  é a temperatura do dispositivo,  $k$  é a constante de Boltzman e  $V$  é a tensão para uma dada corrente  $I$ . A Eq. 1 é função explícita ( $T$ ) e implícita com a temperatura ( $I_L$ ,  $I_{S1}$ ,  $I_{S2}$ ,  $R_S$  e  $R_p$ ) (Veissid, 1991 e 1995).

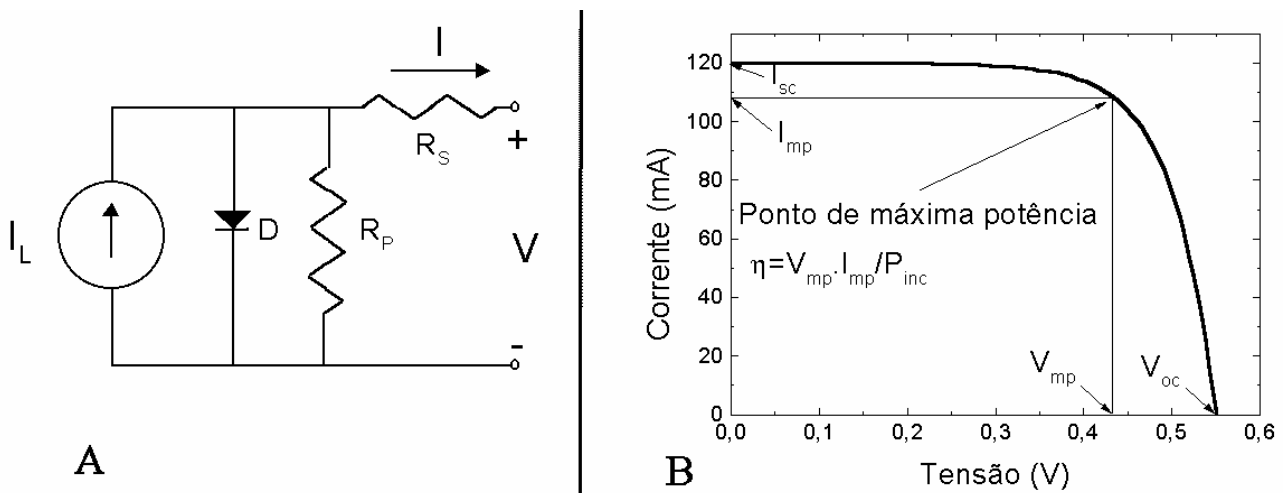


Figura 2 – Circuito elétrico equivalente de uma célula solar (A) e uma típica curva característica IxV (B).

A Fig. 2B mostra uma curva característica típica de corrente por tensão (IxV) de uma célula solar onde o ponto de trabalho situa-se ao longo desta curva. Na figura podem ser observados os seguintes parâmetros de saída:  $I_{sc}$  (corrente de curto circuito),  $V_{oc}$  (tensão de circuito aberto),  $V_{mp}$  e  $I_{mp}$  (tensão e corrente de máxima potência) e  $\eta$  (eficiência de conversão de energia solar em energia elétrica). A corrente de curto circuito ( $I_{sc}$ ) é proporcional a intensidade luminosa solar e varia linearmente com a temperatura em torno da temperatura de referência ( $T_0=25^\circ\text{C}$ ) (Rauschenbach, 1980), ver Eq. (2):

$$I_{SC} = I_{SC} (AM0) \text{sen}(\alpha) (1 + \beta I_{SC} (T - T_0)) \quad (2)$$

$I_{SC}$  (AMO) é a corrente de curto circuito na condição de iluminação AMO (Air Mass Null),  $\alpha$  é o ângulo de atitude do satélite (orientação do satélite em relação à direção dos raios solares) e  $\beta_{SC}$  é o coeficiente de proporcionalidade térmico da corrente de curto circuito. A tensão de circuito aberto, também, é proporcional com a temperatura e apresenta uma equação análoga a Eq.2. No entanto, o coeficiente de proporcionalidade térmico para  $V_{OC}$  ( $\beta V_{OC}$ ) é negativo, pois a tensão de circuito aberto diminui com o aumento da temperatura.

### 3. DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

As células solares foram fabricadas por especialistas do LAS-INPE usando infraestrutura do LME-USP (Laboratório de Microeletrônica da Escola Politécnica da USP). Estes dispositivos são estruturas semicondutoras tipo  $n^+/p/p^+$  de junção rasa com área de  $4\text{cm}^2$ , fabricadas sob lâminas de silício monocristalino e resistividade de  $10\Omega\text{cm}$ , nas células do ECS1, e de  $1\Omega\text{cm}$ , para o ECS2. As descrições dos processos de fabricação encontram-se nas referências de Veissid et al. (1990 e 1997). O lote de 100 células solares feitas para o ECS1 foi aprovada por ensaios de qualificação ao vôo (inspeção visual, dimensão, peso, choques térmicos, umidade e outros) e resultou em dispositivos com eficiência média de 12% no espectro AM0. Desta forma, estes ensaios e o próprio sucesso do ECS em missão aprovaram as células solares Brasileiras para uso em satélite. A fabricação de um segundo lote de células solares, para abastecer o ECS2, teve vários tipos de problemas e resultou em um lote com não conformidades nos ensaios citados acima. Devido a estes problemas, um terceiro lote foi fabricado e, desta vez, foi aprovado pelos ensaios de qualificação ao vôo, no entanto, sua eficiência de conversão de energia (10% no espectro AM0) ficou abaixo do esperado (13%) para uma célula solar de silício tipo convencional feito com substrato de  $1\Omega\text{cm}$ , conforme Veissid (2005). Devido a problemas de cronograma com o gerenciamento do satélite, optou-se por colocar estas células solares de baixa eficiência para realizar o Experimento Célula Solar 2.

O ECS2 possui três pares de células, os quais são usados para operar em três condições distintas. O primeiro par ( $I_{sc}$ ) simula a condição de trabalho próximo de curto circuito, isto é, os terminais de uma resistência de carga de  $1\Omega$  estão ligados a um amplificador que aumenta o seu sinal para o valor na faixa de 0-5V. O segundo par tem uma resistência de carga de  $8\Omega$  e está ligado a um segundo amplificador, para simular a situação de potência máxima ( $V_{mp}$ ). O terceiro par simula a condição de circuito aberto ( $V_{oc}$ ).

A telemetria do satélite transmite os sinais digitais para estações terrenas numa frequência de 2 Hz. A Fig. 3A mostra um exemplo de como os sinais são recebidos para o par da corrente de curto circuito. Nesta figura é mostrado o valor da telemetria na unidade de mA, pois a resistência de carga permite a conversão da tensão em corrente.

#### 3.1 Método de análise dos dados

Os pontos de telemetria amostrados a cada meio segundo, ver Fig. 3A, são submetidos a uma mudança de variável de tempo para ângulo de rotação, dada pela Eq. 3. O pico da radiação solar ou amplitude solar  $A_s$ , é obtido pelo método dos mínimos quadrados no ajuste de uma parábola em torno do seu máximo. Neste ajuste o único parâmetro ajustável é a rotação do satélite em rpm (rotação por minuto), que é determinado usando um algoritmo que estabelece o menor valor de  $\chi^2$  dado pela Eq. 4.

$$\theta = \omega ( t - \text{int}((t/T)xT) ) \quad (3)$$

$\omega$  é a rotação angular do satélite,  $T$  é o período e  $r$  é a sua rotação de spin (rpm).

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{(V_{tel})_i - at^2 - bt - c}{\sigma_V} \right]^2 \quad (4)$$

Usando este algoritmo, os pontos telemetrizados do ECS2 dados pela Fig. 3A se transformam na curva da Fig. 3B. Para o caso desta curva, o valor ajustado de spin foi de 36,2295rpm.

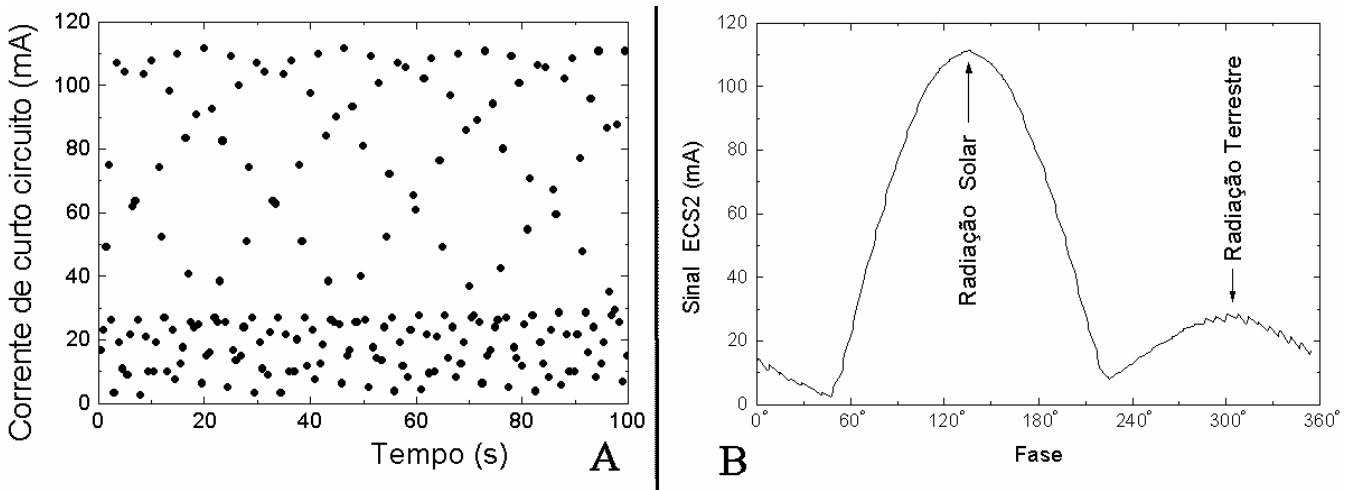


Figura 3 – Curva do sinal do ECS2 recebido pela telemetria (lado A) e curva em função da fase (lado B).

### 3. RESULTADOS

Vários arquivos de dados telemetrizados do ECS2 foram recebidos desde o lançamento do satélite SCD2. A análise dos dados permite determinar os parâmetros de saída das células solares do ECS2, usando o método apresentado neste trabalho. As Fig. 4A e 5A mostram os resultados deste cálculo para a corrente de curto circuito e tensão de circuito aberto, respectivamente. Os pontos destes gráficos correspondem a média mensal dos valores, calculados para as condições padrão de iluminação (AM0) e temperatura de 25°C. As Fig. 4B e 5B mostram a variação dos coeficientes de temperatura de  $I_{sc}$  e  $V_{oc}$  em função do tempo de vida do satélite.

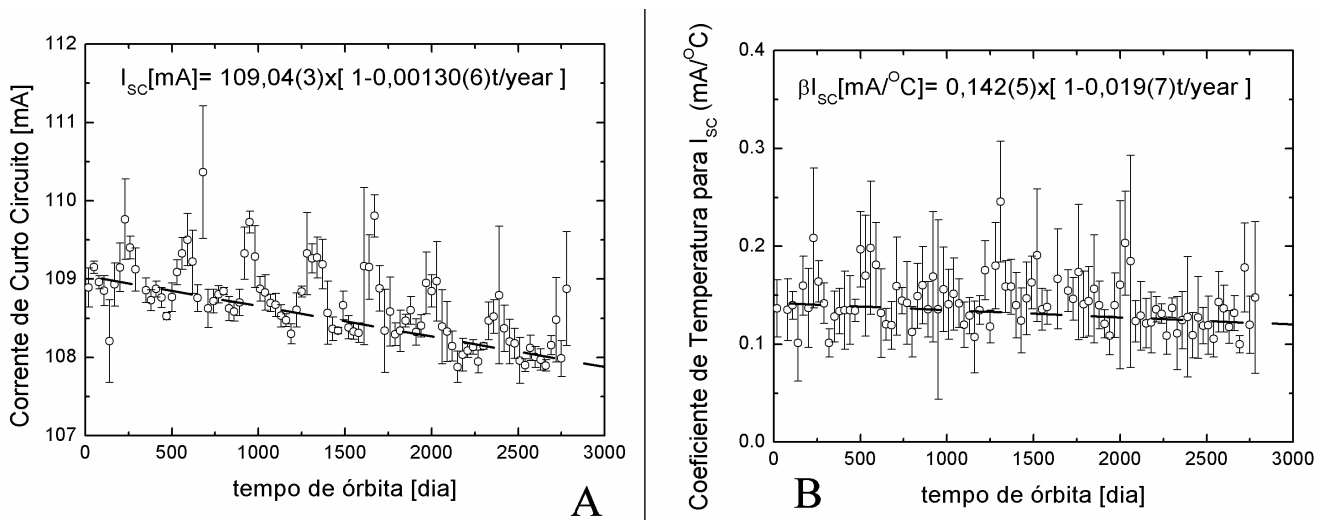


Figura 4 – Variação da corrente de curto circuito e do coeficiente térmico em função do tempo de vida do SCD2.

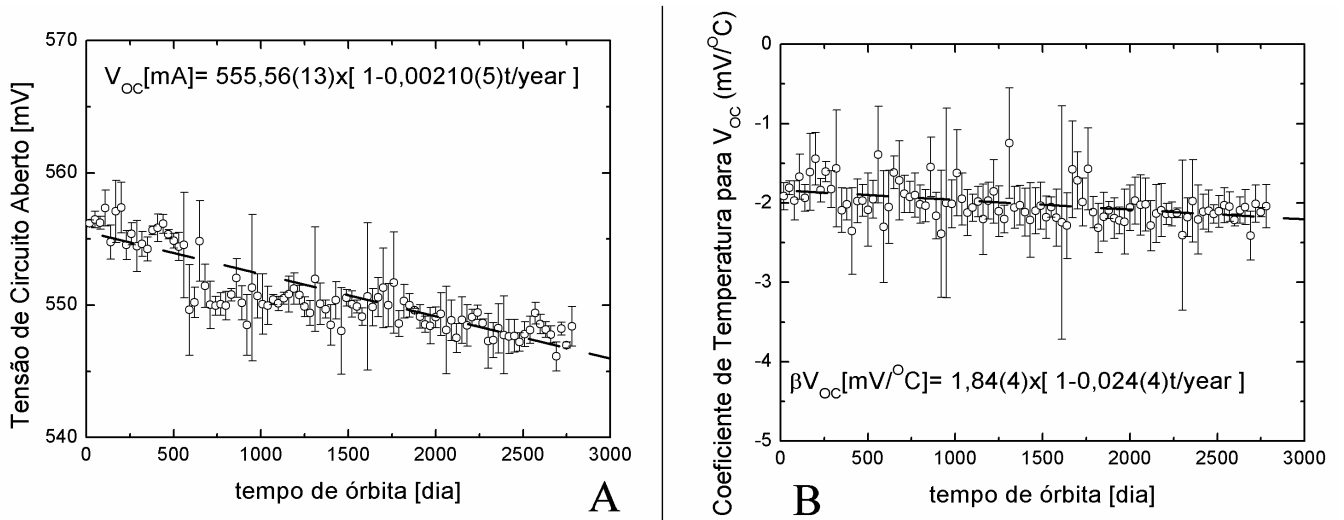


Figura 5 – Variação da tensão circuito aberto e do coeficiente térmico em função do tempo de vida do SCD2.

Tendo-se todos os parâmetros da curva I-V da Eq. 1, consegue-se calcular a eficiência de conversão ( $\eta$ ) da célula solar ao longo da vida do satélite. A Fig. 6 mostra os pontos de valor médio com respectivo desvio padrão.

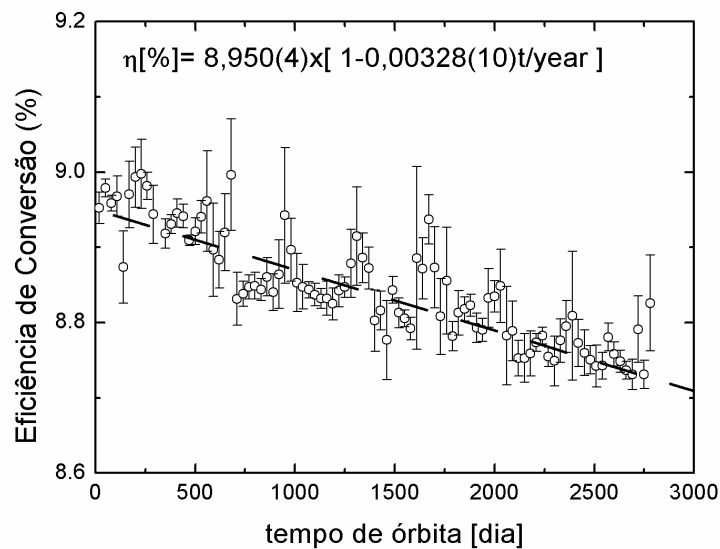


Figura 6 – Variação da eficiência de conversão das células solares em função do tempo de vida do SCD2.

#### 4. CONCLUSÕES

Desde 1980, o LAS/INPE desenvolve tecnologia para a fabricação de células solares para uso em satélites. Os maiores passos neste sentido foram o desenvolvimento dos Experimentos Célula Solar 1 e 2. A conclusão principal deste trabalho é que a degradação do desempenho das células solares, pela radiação ionizante encontrada no espaço exterior, está conforme o previsto para o tipo de células estudado. Esta degradação é de 0,029% por ano e é menor do que a degradação esperada, conforme dados de Handbook (Tada et al., 1982), que é de 0,08% por ano para a órbita do satélite.

Do ponto de vista tecnológico, o sucesso dos experimentos atesta a confiabilidade dos processos usados na sua montagem, pois os ciclos térmicos impostos pelas órbitas dos satélites causam danos em várias partes, tais como: soldagem dos interconectores elétricos, aderência da metalização dos dedos coletores das células solares, colagem do material de cobertura e outros. Os resultados indicam que os processos utilizados na fabricação das células estão aprovados experimentalmente pelo próprio funcionamento dos experimentos em missão.

Através da interpretação dos dados telemetrizados do ECS2, foi descoberto a possibilidade de varredura do albedo planetário, pois curvas do tipo da Fig. 3B mostram os picos da radiação solar incidente diretamente no experimento e o da radiação refletida pelo planeta Terra. O albedo planetário é simplesmente a razão entre a altura destes dois picos, após correções esféricas. Estudos relacionados ao albedo planetário visto pelo Experimento Célula Solar do satélite SCD2 permitiram a publicação de artigos em revistas de Geofísica por Veissid (2003) e por Veissid e Pereira (2000).

Também, permitiram apresentação em congressos de trabalhos nas áreas de Meteorologia (Veissid, 2002), Sensoriamento Remoto (Veissid, 2005) e Mudanças Climáticas Globais por Veissid (2004 e 2007).

## REFERÊNCIAS

- Huang, C., Wang, Q. e Jiang, Q., Solar Cell Calibration Experiment on Chinese Scientific Satellite. *Proc. of the Eighteenth IEEE Phot. Spec. Conf.*, Las Vegas-USA, 1985, p.634.
- Nubile, P., Veissid, N. e Beloto, A. F., The Solar Cell Experiment of the First Brazilian Satellite: 500 Days of Data Analysis. First World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Hawaii-USA (1994), p. 2232.
- Rauschenbach, H. S., *Solar Cell Array Design Handbook*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1980.
- Tada, H. Y., Carter Jr., J. R., Anspaugh, B. E. e Downing, R. G., *Solar Cell Radiation Handbook*, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, JPL Publication 82-69 (1982).
- Veissid, N., Nubile, P., Beloto, A. F. e Andrade, A. M., The Solar Cell Experiment of the First Brazilian Complete Space Mission Satellite. *Twenty-First Specialists Photovoltaic Conference*, Kissimmee, Florida-USA (1990), p. 1184.
- Veissid, N. e Andrade, A. M., The IxV Silicon Solar Cell Characteristic Parameters Temperature Dependence: an Experimental Study using the Standard Deviation Method. *Tenth E. C. Photovoltaic Solar Energy Conference*, Lisboa-Portugal (1991), p. 43.
- Veissid, N., Bonnet, D. e Richter, H., Experimental Investigation of the Double Exponential Model of a Solar Cell under Illuminated Conditions: Considering the Instrumental Uncertainties in the Current, Voltage and Temperature Values, *Solid-State Electronics* 38(11) (1995), p. 1937.
- Veissid, N., Nubile, P. e Beloto, A. F., Results of the Solar Cell Experiment of the First Brazilian Satellite, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 46(1) (1997), p. 1.
- Veissid, N., Nubile, P. e Beloto, A. F., The Solar Cell Experiment of the First Brazilian Satellite: 1000 Days of Data Analysis. *Second World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion*, Vienna-Austria (1998), p. 3582.
- Veissid, N., Beloto, A. F. e Ferreira Leite, N., Experimentos Célula Solar 1 e 2 dos Satélites SCD1 e SCD2 do INPE. Seminários de Fontes Não-Convençionais de Energia – As Tecnologias Solar, Eólica e de Biomassa, Florianópolis-SC, 6 a 8 de Dezembro de 1999, Trabalho completo publicado nos Anais, pg. 171 a 190.
- Veissid, N. e Pereira, E. B., 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) (2000), p. 25.
- Veissid, N., 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, 4 a 9 de Agosto de 2002, Trabalho completo publicado nos Anais (CD-ROM), trabalho 2142-1.
- Veissid, N., New Developments in Using Solar Cells as Remote Sensors to Gauge Climate Change, *Environmental Geosciences*, Vol. 10(2) (2003), p. 47-57.
- Veissid, N., 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 (2003), p. 65-82.
- Veissid, N., Células Solares para Aplicações Espaciais. II Simpósio Nacional de Energia Solar Fotovoltaica, CEPTEL, Rio de Janeiro - RJ, 17-20 de maio de 2005. Trabalho completo publicado nos Anais (CD-ROM).
- Veissid, N., Experimento Célula Solar do Satélite SCD2/INPE, Sensor não Colimado que Permite Fazer Imageamento do Albedo Planetário sobre a América do Sul. XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia - GO, 16-21 de abril de 2005. Trabalho completo publicado nos Anais (CD-ROM, 4531.pdf), <http://www.ltid.inpe.br/sbsr2005/index.htm>. ISBN 85-17-00018-8.
- Veissid, N., Experimento Célula Solar do Satélite SCD2/INPE, Potencial dos seus Dados para Monitoramento de Mudanças Climáticas. Congresso 2004 SAE BRASIL, São Paulo - SP, 16-18 de Novembro de 2004, p. 44.
- Veissid, N., Distribuição Logarítmica Temporal do Albedo Planetário sobre a América do Sul no Monitoramento de Mudanças Climáticas Globais. III Conferência Regional sobre Mudanças Globais: América do Sul, São Paulo - SP, 04-08 de Novembro de 2007, CD do Congresso trabalho 13.pdf.
- Walker, D. H. e Statler, R. L., A Satellite Experiment to Study the Effects of Space Radiation on Solar Cell Power Generation. *Solar Cells*, 23(1988), p. 245.
- Wolf, M., Noel, G. T. e Stirn, R. J., Investigation of the Double Exponential Model in the Current-Voltage Characteristics of Silicon Solar Cell, *IEEE Trans. on Elec. Devices*, ED-24(4) (1977), p. 419.

## **EIGHT YEARS DATA ANALYSIS OF SOLAR CELL EXPERIMENT AT BRAZILIAN SECOND SATELLITE**

**Abstract.** The second Brazilian satellite (SCD2) was launched on October 23th, 1998 and hosts an experiment of silicon solar cells (ECS2). The main objective of this Experiment is to study the radiation damage on the silicon solar cells developed and manufactured in Brazil and, consequently, verify its feasibility as a space device. The ECS2 is a small solar modules composed by a single array of three pairs of silicon solar cells laid down on an aluminum mechanical structure. The three generated signal by the solar cells pairs are amplified by an electrical circuit located inside of the mechanical structure and transmitted by the telemetry of satellite to earth station in the city of Cuiabá-MS, Brazil. Each pair of solar cell works in three different situations, which are open circuit voltage, short circuit current and maximum electric power. A thermistor on the mechanical structure monitors the temperature of ECS. The four channels (three of signal and one of temperature) are received in real time and they allow recover the current curves for tension in the conditions standard of temperature and solar intensity (25°C and AM0). Therefore, the degradation of the electric parameters of the solar cell can be calculated during the life of the satellite. This work presents the analysis of the data received by the telemetry during the first eight years of SCD2 life. In this period, we can say that the suffered radiation damages for the solar cells provoked a decrease of 2.6% in the efficiency, 1.0% in the short circuit current and 1.7% in the open circuit voltage, relative to their begin of life values. These degradation values are smaller than the expected ones, as data presented in the literature. For instance, for the period of eight years and conditions of orbit of the satellite, a relative degradation of 7% was expected in the conversion efficiency and the data of the experiment revealed a smaller degradation than the half of the expected value (2.6%).

**Key words:** Solar Cell, Solar Energy, Satellite, Radiation Damage, Photovoltaic Effect