

Experimentos Célula Solar 1 e 2 **dos Satélites SCD1 e SCD2 do INPE**

Nelson Veissid
Antonio Fernando Beloto
Nélia Ferreira Leite

Laboratório Associado de Sensores e Materiais – LAS/CTE/INPE
Av. dos Astronautas 1758, CP 515,
12201-970 - São José dos Campos-SP
Tel: (12) 345-6573 - Fax: (12) 345-6717
veissid@las.inpe.br
www.las.inpe.br



Sumário

RESUMO.....	173
1. INTRODUÇÃO	173
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	174
2.1. Célula Solar	174
2.2. Mecânica Orbital	175
2.3. Albedo	176
3. DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS	176
3.1. Experimento Célula Solar 1 (ECS1)	177
3.2. Experimento Célula Solar 2 (ECS2)	178
4. ALBEDO.....	179
5. MÉTODO DE ANÁLISE DOS DADOS	180
6. RESULTADOS.....	180
6.1. Experimento Célula Solar 1	180
6.2. Experimento Célula Solar 2	183
6.3. Albedo	184
7. CONCLUSÕES.....	187
AGRADECIMENTOS	188
8. REFERÊNCIAS.....	189

RESUMO

Os satélites de coletas de dados meteorológicos (SCD1 e SCD2) da Missão Espacial Completa Brasileira foram colocados em órbita nos dias 9 de fevereiro de 1993 e 23 de outubro de 1998, respectivamente. Eles levam a bordo os Experimentos Célula Solar 1 e 2 (ECS1 e ECS2), que tem como objetivo estudar a degradação de suas células solares pela radiação e, desta forma, confirmar sua confiabilidade para uso em satélite. Os experimentos são pequenos módulos compostos por um arranjo de seis células acomodadas em uma estrutura mecânica de alumínio e uma placa de circuito elétrico. O sinal do arranjo é enviado para o circuito elétrico e transmitido pela telemetria do satélite até a estação receptora de Cuiabá-MT. Os dois Experimentos usam métodos diferentes no processamento do sinal de suas células. O ECS1 tem um circuito elétrico passivo (pois não usa energia das baterias do satélite SCD1) detetor de pico e o sinal deste circuito em função da temperatura permite a extração dos parâmetros da curva de corrente *versus* tensão das células. O ECS2 tem um circuito amplificador que aumenta o sinal instantâneo da célula para adaptar-se na faixa de leitura da telemetria (0-5V). Uma mudança de variável adequada permite obter-se a curva de sinal em função do ângulo de rotação intrínseco do satélite. Esta técnica permite determinar o albedo planetário (refletividade do Planeta) pela análise dos dados telemetrizados do ECS2 através do emprego de um algoritmo específico de interpretação desses dados. Com isto, teve início uma nova metodologia nacional de estudos do sistema climático através da monitoração do albedo com emprego de subsistemas simples em satélites de baixo custo, baixo peso e tecnologia simples, associada a um complexo modelo numérico para interpretação dos dados.

1. INTRODUÇÃO

Os dois primeiros satélites brasileiros são partes de um sistema de coleta de dados meteorológicos. Eles são repetidores em tempo real de plataformas de coleta de dados ambientais terrestres (PCDs) espalhadas ao longo do território brasileiro. Essas PCDs transmitem remotamente informações coletadas por conjuntos de instrumentos que as compõem, tais como: termômetros, pluviômetros (volume de chuvas), anemômetros (velocidade e direção de ventos), entre outros.

As órbitas dos satélites são circulares com 750 Km de altitude e inclinação de 25°. Nestas condições, o satélite tem um período de rotação em torno da Terra de 100 minutos, sendo que 65 minutos iluminados pelo Sol e o restante do período sob 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 48 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. Os painéis solares do sistema de suprimento de energia dos satélites estão posicionados nas suas oito faces laterais.

O primeiro satélite 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). Nestas condições, 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 PCDs, 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 [1,2], 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 [2]. Atualmente, existe um esforço concentrado para a realização de um banco de testes de células a bordo da Estação Espacial Internacional (ISS) [3].

Os ECS1 e ECS2 foram projetados para recuperar a curva completa de corrente por tensão baseando-se:

- Para o ECS1 => no ajuste da curva do sinal em função da temperatura, e
- Para o ECS2 => 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.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Célula Solar

Uma célula solar pode ser representada pelo circuito equivalente dado na **Figura 1**, onde I_L é a corrente fotogerada, R_S e R_P são as resistências em série e em paralelo e V é a tensão para uma dada corrente I .

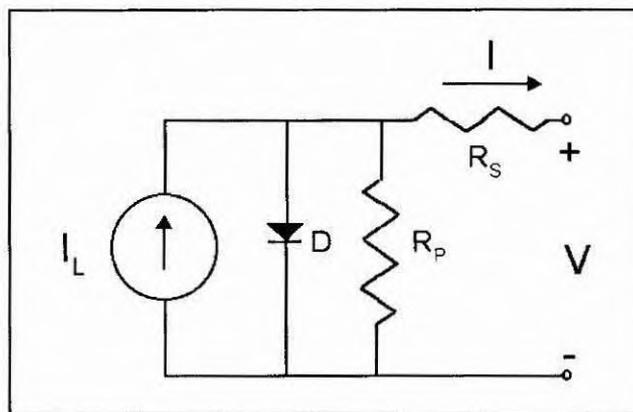


Figura 1 – Circuito elétrico equivalente de uma célula solar.

A **Figura 2** mostra uma curva característica típica de corrente por tensão ($I \times V$) de uma célula solar de silício iluminada pela irradiação solar encontrada fora da atmosfera terrestre. O ponto de trabalho situa-se ao longo desta curva. Na figura podem ser observados os seguintes parâmetros:

I_{sc} – corrente de curto circuito (*short circuit current*), corresponde ao ponto de operação da célula com uma resistência de carga nula ligada aos seus terminais.

V_{oc} – tensão de circuito aberto (*open circuit voltage*), corresponde ao ponto de operação da célula sem resistência de carga ligada aos seus terminais.

V_{mp} e I_{mp} – tensão e corrente de máxima potência, correspondentes ao ponto da curva onde pode ser extraída a maior potência elétrica da célula solar; isto é, o maior produto de corrente por tensão.

η – eficiência de conversão de energia solar em energia elétrica.

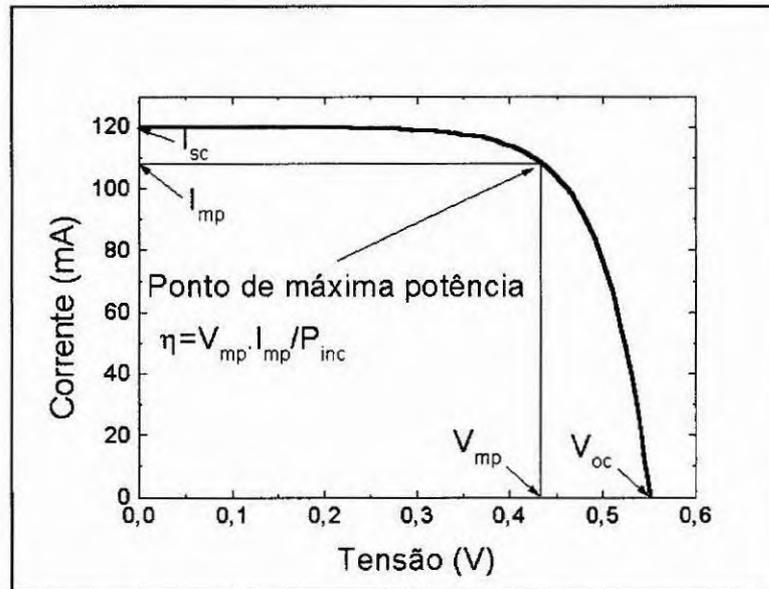


Figura 2 – Curva característica típica de uma célula solar de silício iluminada.

A corrente de curto circuito (I_{SC}) é proporcional à intensidade luminosa solar e varia linearmente com a temperatura em torno da temperatura de referência ($T_0=25^\circ\text{C}$) [5,7].

2.2. Mecânica Orbital

Neste trabalho não se pretende expor os fundamentos de mecânica orbital por ser um assunto muito vasto. Somente os conceitos aplicados neste trabalho serão apresentados.

A força gravitacional é radial e define a órbita do satélite. Considerando que a órbita seja circular e que a Terra seja uma esfera homogênea com seu centro de massa posicionado no centro desta esfera, podemos dizer que a velocidade radial do satélite é definida pelo equilíbrio entre a força gravitacional e sua força centrífuga.

Para o caso dos satélites do INPE, a velocidade radial é de 27000 km/h e o período (tempo que o satélite demora para dar uma revolução em torno da Terra) é de 100 minutos. Os dados dos ECS1 e ECS2 recebidos pela telemetria estão na forma de um arquivo ASCII, composto pela hora universal (Greenwich), temperatura dos experimentos e o sinal do conjunto de seis células solares em série (ECS1) ou os sinais dos pares de células (ECS2).

Para relacionar os valores dos sinais com a posição orbital em latitude e longitude, é necessário uma rotina computacional que relaciona o tempo universal com a órbita do satélite. Para tal, podem ser utilizados os programas STSORBIT-PLUS e o TRAKSTAR-SGP4 encontrados no site da NASA. Estes dois programas usam parâmetros TLE (*Two-Line Elements*) dos satélites. Os valores dos TLE podem ser obtidos por correio eletrônico junto ao NORAD (North American Aerospace Defense Command, www.spacecom.af.mil/NORAD).

O NORAD é o órgão internacional para controle de tráfego aeroespacial. Sua missão é catalogar e identificar objetos que orbitam em torno da Terra. Estes objetos incluem satélites ativos e inativos, restos de foguetes e objetos desconhecidos de grande massa. Este órgão mantém o catálogo atualizado diariamente de aproximadamente 10000 objetos, sendo que apenas 7% deles são satélites operacionais. O controle destes é feito através dos parâmetros TLE. Por exemplo, para o SCD2 no dia 13 de maio de 1999 a partir das 3:52:47.353 horas, temos o seguinte TLE como sendo válido, até a divulgação do próximo TLE:

EXEMPLO DE TLE PARA O SATÉLITE SCD2

```
1 25504U 98060A 99133.16165918 +.00000518 +00000-0 +10341-3 0 00651
2 25504 024.9940 063.6691 0018201 282.5572 077.2905 14.40942530029193
```

O TLE mostra o número de catálogo NORAD do satélite (25504U), número internacional (98060A), época do ano (99133.16165918), inclinação da órbita (024.9940), excentricidade (0.0018201), movimento médio (14.40942530 revoluções/dia) e outros parâmetros.

2.3. Albedo

Cerca de 30% da energia radiante do Sol que incide sobre a Terra é refletida de volta ao espaço. Essa fração refletida é denominada de albedo planetário. A maior parcela do albedo é provocada pelas nuvens, e estas variam rapidamente com o tempo e com a posição. A reflexão devido à atmosfera varia primariamente com a variação na quantidade de aerossóis e com o ângulo de zênite do Sol, uma vez que sua composição é mais estável. A **Tabela 1** mostra de maneira resumida valores típicos de albedo encontrados na superfície da Terra.

Tabela 1. Valores típicos de albedo para a faixa de radiação de ondas curtas.

	Solo	Floresta	Neve	Cidade	Nuvem	Oceano
a(%)	15-30	5-20	40-90	15-20	40-60	2-10

A variação temporal do albedo planetário da Terra é importante no monitoramento das mudanças climáticas globais. A variação deste albedo é modulada principalmente pelas nuvens. No entanto, fatores secundários como os desmatamentos e desertificações constituem importantes parâmetros de estudo, principalmente para o caso do Brasil.

A determinação do albedo planetário tem sido obtida tanto com o emprego de satélites geoestacionários (GOES, METEOSAT) como por satélites de órbitas oblíquas e polares (séries NOAA e NIMBUS). O modelo utilizado neste trabalho se apresenta como uma alternativa de determinação do albedo.

Alguns dos parâmetros atmosféricos que controlam o clima e o ciclo da água podem ser observados e quantificados adequadamente através do uso de satélites [8]. Dentre esses, pode-se destacar o albedo planetário, cuja variação, como dissemos, é função primária da cobertura de nuvens. Em média, as nuvens cobrem diariamente cerca de 50% a 55% da superfície do Terra. As maiores porcentagens de ocorrência estão, naturalmente sobre os trópicos, onde também ocorrem os sistemas convectivos e de escala sinóptica mais intensa [9-13]. O Brasil tem a maior parte de sua área nessa região de influência climática.

As informações sobre o albedo são também de importância crucial no campo das aplicações, tais como: o uso da radiação solar na engenharia civil, arquitetura, agricultura e como forma de energia alternativa (solar-térmica e solar-fotovoltaica) [14-16]. Portanto, os dados de albedo devem estar disponíveis para as aplicações indicadas.

3. DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Os experimentos do SCD1 e do SCD2, tem o objetivo de estudar a degradação de células solares com a irradiação por partículas ionizantes (elétrons e prótons de alta energia) encontradas no espaço próximo ao planeta Terra. Estas partículas deterioram a cristalinidade dos substratos

semicondutores e diminuem o desempenho dos dispositivos em satélites. 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 4cm^2 , fabricadas sob lâminas de silício monocristalino com resistividade de $10\Omega\text{cm}$ (ECS1) e $1\Omega\text{cm}$ (ECS2). As descrições dos processos de fabricação encontram-se nas referências [17] e [18].

Os experimentos são compostos por um arranjo de seis células solares, o qual está acomodado na superfície externa de uma estrutura mecânica de alumínio. A **Figura 3** mostra o diagrama estrutural dos experimentos. No interior da estrutura mecânica está alojado um termistor para monitoração da temperatura da medida.

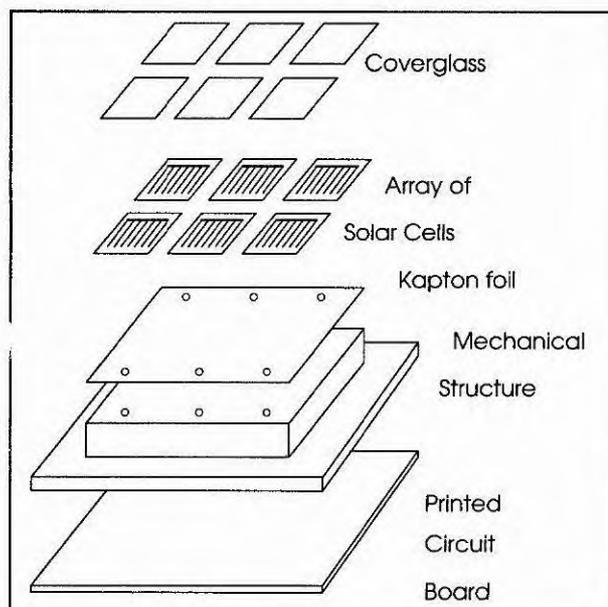


Figura 3 – Diagrama estrutural dos experimentos com células solares.

A placa de circuito impresso possui os componentes eletrônicos para o condicionamento de sinal. O material de cobertura da célula solar é da marca Pilkington (CMX cover glass) tem espessura de $150\ \mu\text{m}$ e sua composição química é um borossilicato com 5% de dióxido de cério. A folha de Kapton tem a função de isolar eletricamente as células solares da estrutura mecânica de alumínio. Todo este conjunto é colado no painel lateral do satélite.

3.1. Experimento Célula Solar 1 (ECS1)

O projeto do ECS1 teve que obedecer determinadas limitações impostas pela gerência da missão espacial, expostas resumidamente a seguir:

- não teria nenhuma energia disponível do sistema de potência do satélite,
- superfície total do experimento inferior a $6\text{cm} \times 6\text{cm}$,
- massa inferior a 300g e
- somente três canais de telemetria alocados para monitoração do experimento.

Cada canal de telemetria trabalha no intervalo de 0-5V. Tendo em vista estas condições, optou-se por colocar as seis células solares em série alimentando um resistor de carga de 30Ω nos seus terminais e, também, foi projetado um circuito elétrico passivo detetor de pico, que é mostrado na **Figura 4**. Este circuito transforma o sinal de meia senóide do arranjo de células solares em um sinal contínuo lido pela telemetria a cada 1 minuto. O conjunto de sinais em cada

órbita é armazenado no computador de bordo do satélite e descarregado durante a passagem pela estação receptora.

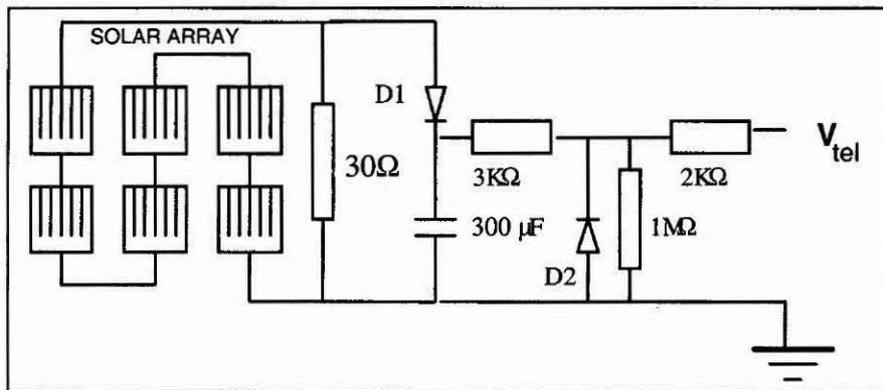


Figura 4 - Circuito elétrico condicionador do sinal do ECS1.

Desta forma, regularmente são recebidos arquivos do sinal do ECS1 para serem analisados. A **Figura 5** mostra um destes arquivos, onde o sinal é visto em função do tempo de órbita do satélite. Esta figura refere-se ao sinal recebido no dia 20 de setembro de 1994, que corresponde a órbita das 13h47m GMT.

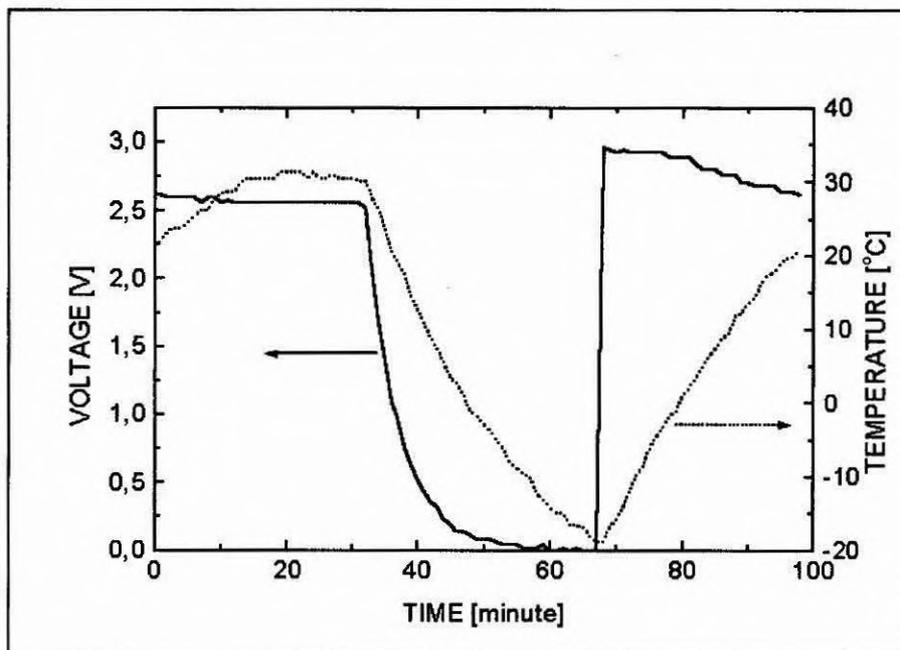


Figura 5 - Sinal e temperatura do ECS1 em função do tempo de órbita.

3.2. Experimento Célula Solar 2 (ECS2)

Devido ao sucesso do ECS1, o gerenciamento da Missão Espacial melhorou as condições para o projeto do ECS2, com a inclusão da disponibilidade de usar energia das baterias do satélite e o aumento do número de telemetrias para o ECS2.

Desta forma, procurando aperfeiçoar o sistema de medição dos principais parâmetros que determinam o rendimento de uma célula solar, foi projetado um circuito amplificador que converte o sinal das células para a faixa de 0-5V. 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 1Ω 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 8Ω 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 estes sinais digitalizados para estações terrenas numa taxa de amostragem de 0,5 segundos, para cada par de célula solar. A **Figura 6** 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.

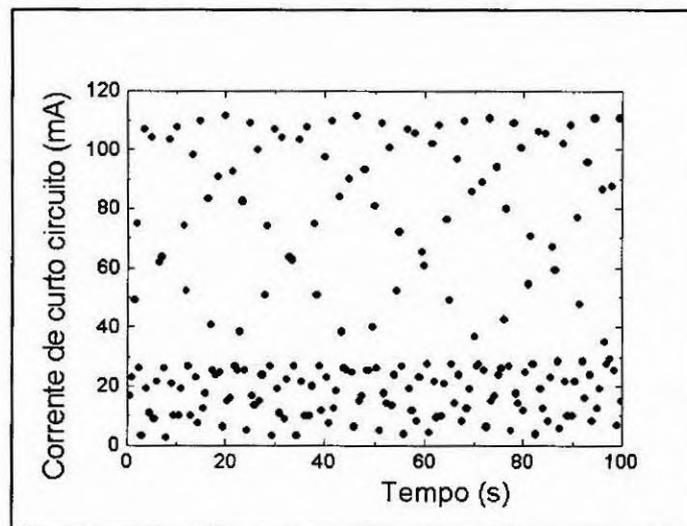


Figura 6 - Sinal do ECS2 para o par de células que simula a condição de curto circuito.

4. ALBEDO

No ECS1, o efeito da radiação albedo é um fator perturbador na análise dos dados. Para compensar seu efeito, considera-se a Terra como um refletor difuso com um albedo de aproximadamente 35% e a geometria simplificada dada pela **Figura 7**. Nesta geometria foi calculada a intensidade de luz que incide no ECS1 em função do tempo de saída do cone de sombra da Terra.

A **Tabela 2** mostra os valores obtidos neste cálculo, onde P é a fração de intensidade AM0 que chega no ECS1. O ângulo θ indica a direção do ECS1 em relação a direção dos raios solares. Vemos na **Tabela 2** que a influência do albedo na curva de tensão por temperatura desaparece após 10 minutos da saída do cone de sombra da Terra.

De maneira análoga, vemos que 10 minutos antes da entrada do satélite no cone de sombra da Terra, o ECS1 sofre a influência da radiação albedo. Devido a isto, na análise dos dados do ECS1 são desprezados os dados referentes a este intervalo de 20 minutos (10 minutos depois da saída mais 10 minutos antes da entrada no cone de sombra da Terra) [18].

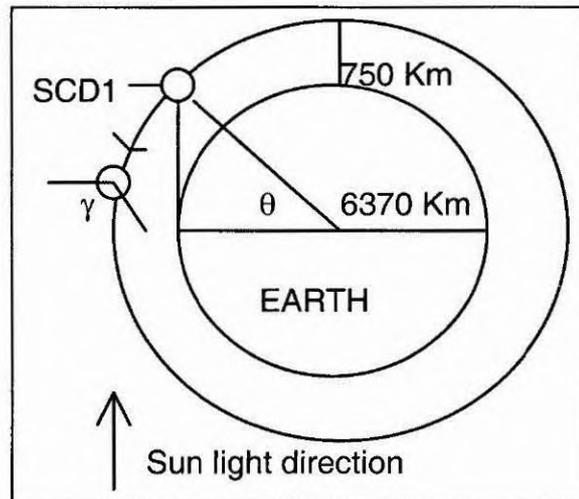


Figura 7 – Esquema da órbita do SCD1, altitude de 750 Km, mostrando o ponto de saída do cone de sombra da Terra.

Tabela 2. Intensidade da luz sobre o ECS1 em função do tempo de saída do cone de sombra da Terra.

$\theta(^{\circ})$	26.5	19.3	12.1	4.9	-2.3	-9.5
T(min)	0	2	4	6	8	10
P(AM0)	1.198	1.163	1.126	1.087	1.046	1.003

No ECS1 a parte da curva afetada pela radiação albedo deve ser desprezada, mas no ECS2 a informação do albedo medido apresentou uma finalidade adicional para os dados deste experimento. Com vermos mais adiante, o albedo visto pelo ECS2 fornece informações importantes para as áreas de geofísica espacial, meteorologia e sensoriamento remoto.

5. MÉTODO DE ANÁLISE DOS DADOS

Não faz parte do escopo deste livro a descrição do método de análise dos dados obtidos no ECS1 e ECS2, por envolver elementos de matemática avançados.

Para maiores informações sobre o método de análise dos dados, devem ser consultados os próprios autores, citados no início deste tópico.

6. RESULTADOS

6.1. Experimento Célula Solar 1

As medidas em laboratório das curvas características do lote de células solares fabricadas para o ECS1 encontram-se na Ref. [18]. Estas medidas foram feitas no acelerador Dynamitron do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/USP). A **Tabela 3** mostra os valores dos parâmetros para a célula representativa do lote de células solares do ECS1 na temperatura de 25°C, antes e após a irradiação. A fluência citada acima é equivalente a um período de 62,5 anos para a órbita do SCD1. A terceira coluna desta tabela mostra os valores calculados dos parâmetros para 750 dias de vida do SCD1.

Tabela 3 - Valores dos parâmetros de saída da célula representativa do ECS1

Parâmetro	Antes da irradiação	Depois da irradiação	Calculado para 750 dias em órbita
I_{SC} (mA)	150.09	129.68	149.42
V_{OC} (mV)	554.52	508.60	551.06
I_{MAX} (mA)	139.52	120.66	138.96
V_{MAX} (mA)	465.53	422.33	462.53
Fator de Forma	0.780	0.773	0.781
Eficiência (%)	12.18	9.56	12.06

Vários arquivos de dados telemetrizados do ECS1 foram recebidos desde o lançamento do SCD1 em fevereiro de 1993. A análise dos dados permite determinar os parâmetros de saída das células solares do ECS1, usando o método desenvolvido pelos autores.

As Figuras 10, 11 e 12 mostram os resultados de cálculo para a corrente de curto circuito, tensão de circuito aberto e eficiência de conversão de energia, respectivamente. Os pontos destes gráficos correspondem à média mensal dos valores, calculados para as condições padrão de iluminação (AM0) e temperatura de 25°C. Nestas figuras são mostradas as curvas experimentais simulada em laboratório dos parâmetros de saída na célula solar representativa do ECS1 e, também, as curvas de uma célula solar de uso espacial encontrada numa publicação da NASA [21]. A variação dos valores dos parâmetros da curva $I \times V$ com o tempo de vida do satélite é mostrada na Ref. [22].

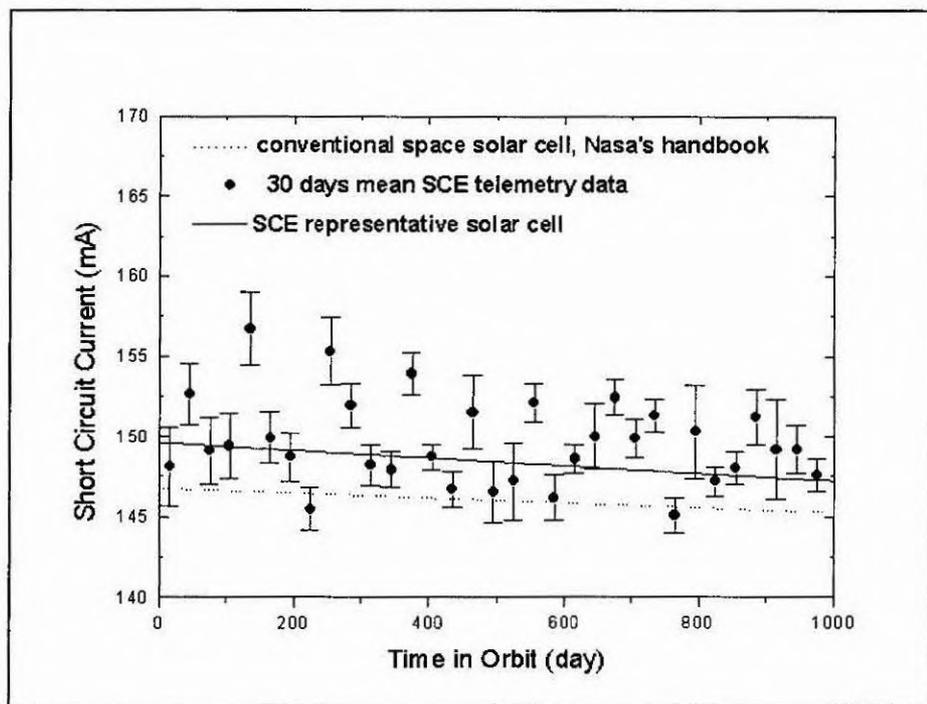


Figura 10 - Variação da corrente de curto circuito do ECS1 em função do tempo de vida do SCD1.

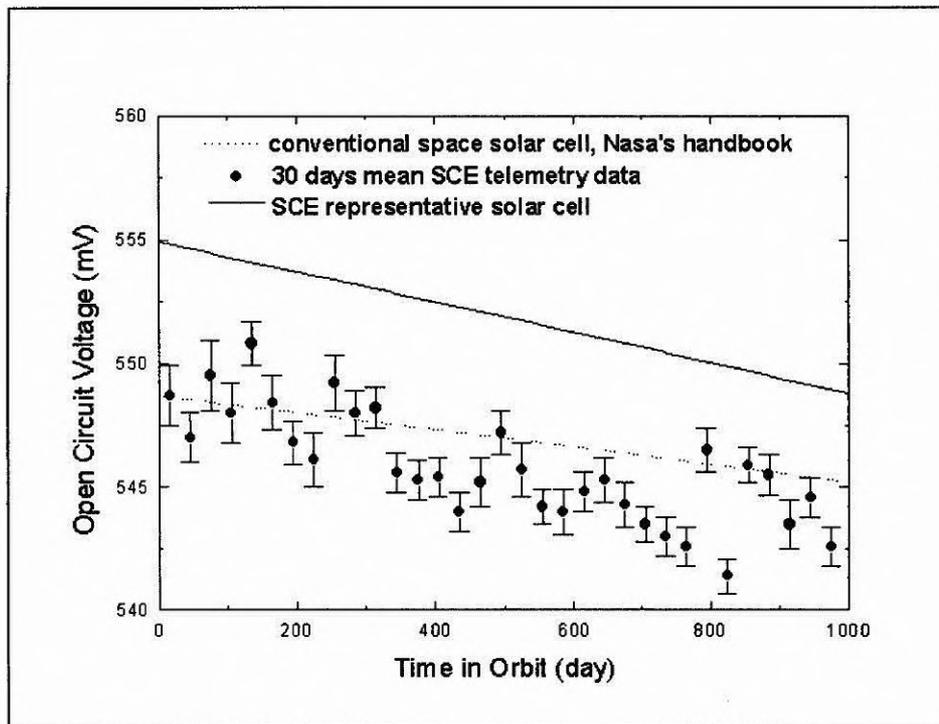


Figura 11 – Variação da tensão de circuito aberto do ECS1 em função do tempo de vida do SCD1.

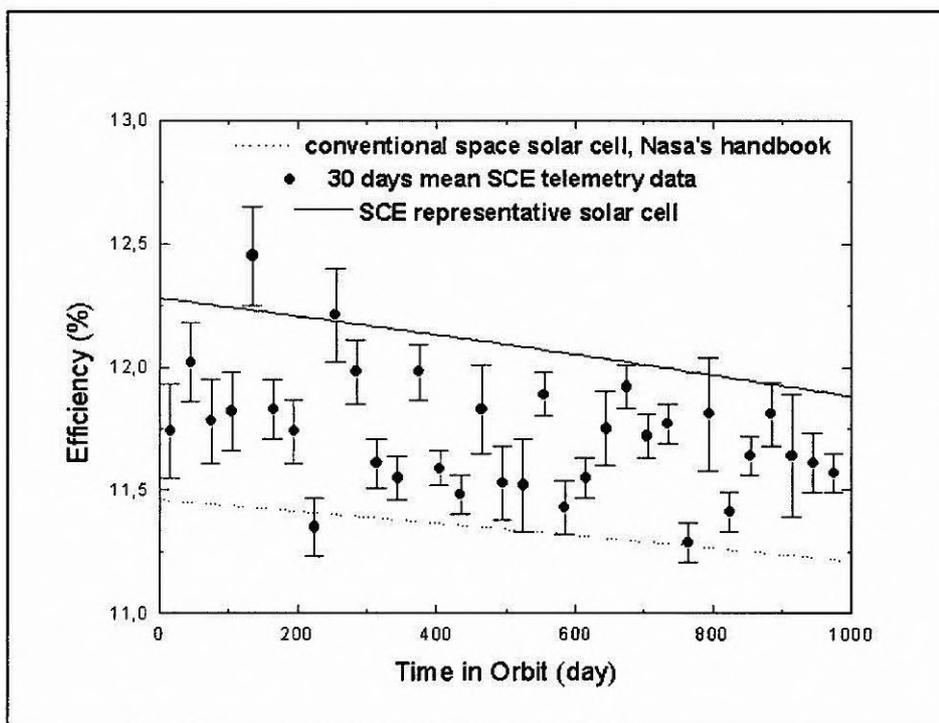


Figura 12 – Variação da eficiência de conversão do ECS1 em função do tempo de vida do SCD1.

Estes resultados mostram que as características das células solares não mudaram significativamente, após três anos de órbita. Por exemplo, a eficiência degradou $0,25\% \pm 0,13\%$ neste período, conforme esperado pela simulação em laboratório e pelos dados da publicação da NASA.

Os dados telemetrizados do ECS1 estão sendo atualmente recebidos normalmente, após quase oito anos de funcionamento. Embora os dados dos últimos quatro anos ainda não tenham

vido analisados, podemos adiantar que a degradação segue de maneira coerente e de acordo com o comportamento visto pelas Figuras 10 até 12. Esta conclusão é baseada na comparação das curvas de tensão por temperatura do ECS1. Por exemplo, a Figura 13 mostra estas curvas obtidas nos dias 25/08/1993, 29/07/1996 e 11/06/2000, onde a atitude do satélite era $\alpha=86,3^\circ$, $\alpha=84,1^\circ$ e $\alpha=84,5^\circ$, respectivamente. Pode-se ver que a curva de tensão por temperatura sofreu mais degradação no período de 1993 a 1996 do que no período de 1996 a 2000.

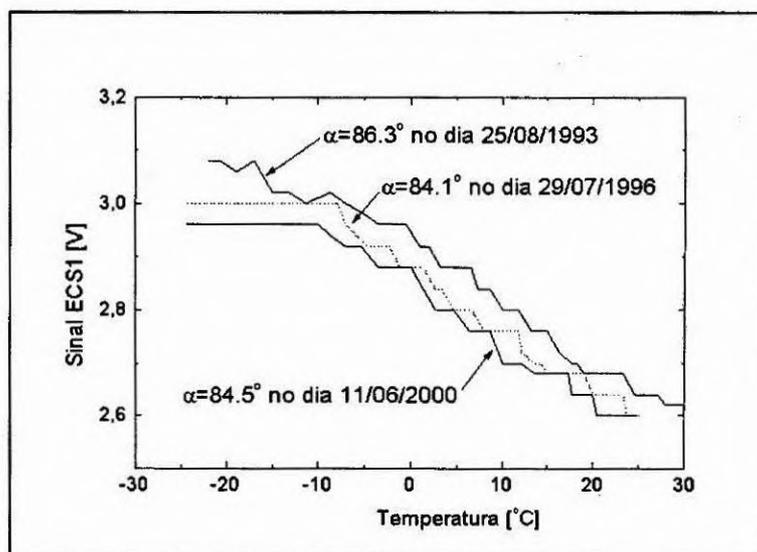


Figura 13 - Variação da curva do sinal do ECS1 em dois períodos diferentes da vida do SCD1.

6.2. Experimento Célula Solar 2

Vários arquivos de dados telemetrizados do ECS2 foram recebidos desde o lançamento do SCD2 em outubro de 1998. A análise dos dados permite determinar os parâmetros de saída das células solares do ECS2, usando o método desenvolvido pelos autores.

As Figuras 14 e 15 mostram os resultados deste cálculo para a corrente de curto circuito e tensão de circuito aberto. Os pontos destes gráficos correspondem à média semanal dos valores, calculados para as condições padrão de iluminação (AM0) e temperatura de 25°C.

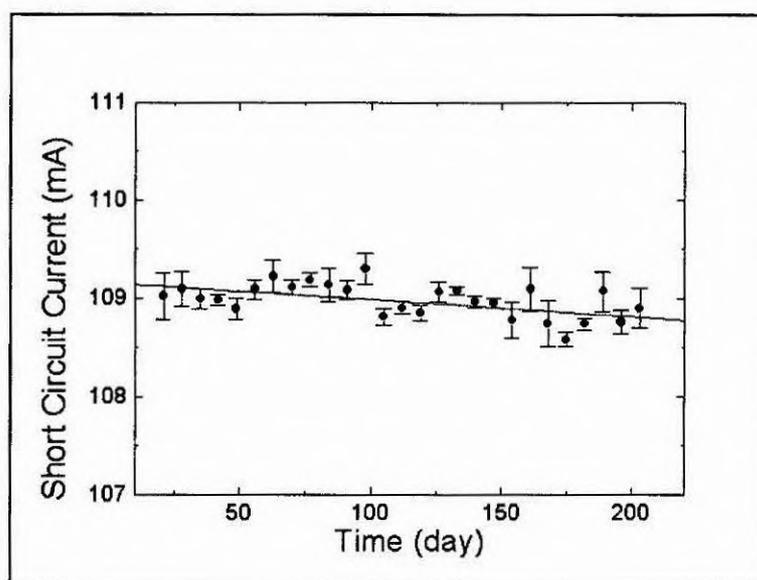


Figura 14 - Variação da corrente de curto circuito do ECS2 em função do tempo de vida do SCD2.

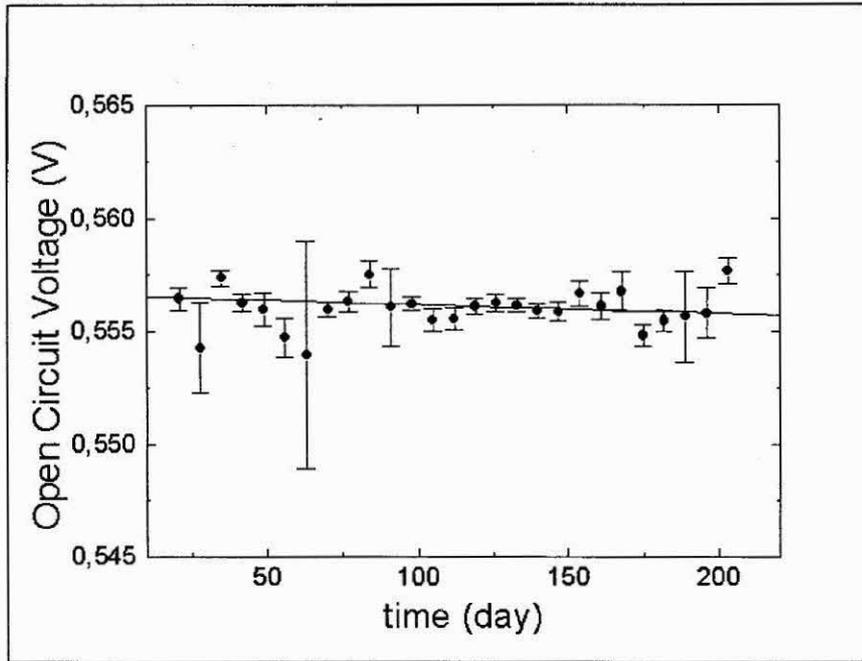


Figura 15 – Variação da tensão circuito aberto do ECS2 em função do tempo de vida do SCD2.

Estes resultados mostram que as características das células solares mudaram significativamente após quase um ano de órbita. Por exemplo, a eficiência degradou 0,05% neste período e o valor esperado era de 0,03%, conforme dados da publicação da NASA. Isto se deve ao substrato utilizado e a problemas encontrados no processo de fabricação do lote de células solares usados para o ECS2. Estes fatos refletiram no pequeno aumento na tensão de circuito aberto do ECS1 para o ECS2, que foi de 548mV para 555mV, e em um grande aumento na taxa de degradação do dispositivo pelo tempo de vida em órbita.

6.3. Albedo

Através da observação dos dados do ECS2 enviados pela telemetria observou-se que o experimento pode ser utilizado como um importante instrumento para realizar a varredura do albedo planetário. Por exemplo, uma análise qualitativa do albedo visto pelo ECS2 (**Figura 17**), com a imagem do satélite GOES-8 no canal VIS, do dia 24 de janeiro de 1999 às 14:45 GNT (**Figura 16**), mostra que existe coerência no sinal medido pelo ECS2. Na **Figura 16**, a órbita do SCD2 na visada da estação receptora de Cuiabá corresponde a aproximadamente 5000 km e está marcada com os indicadores 1 e 2. O deslocamento do satélite é de oeste para leste, esquerda para direita na figura. O ponto 0Km na **Figura 17** corresponde ao início da visada de Cuiabá e está localizado em cima do Oceano Pacífico. A comparação da curva de albedo com a imagem GOES mostra que tivemos maior valor de albedo durante a passagem sobre as nuvens e que na passagem do satélite sobre a cordilheira dos Andes o albedo ficou menor e, ainda, que quando o satélite estava se dirigindo para oceano esta refletividade diminuiu acentuadamente. Vários exemplos deste tipo mostram o potencial deste método para a varredura da refletividade terrestre.

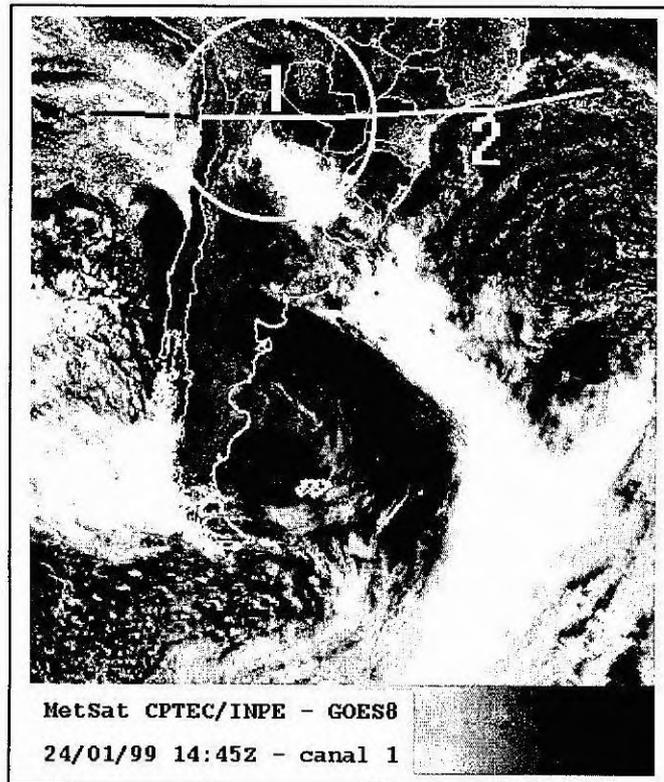


Figura 16 – Imagem do satélite GOES do visível do dia 24/01/1999 as 14:45 horas GNT.

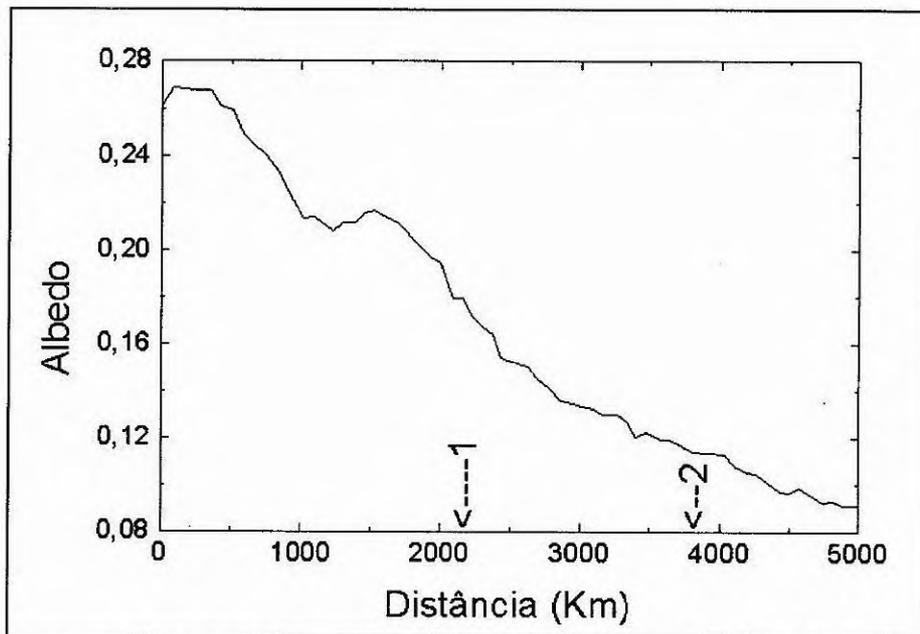


Figura 17 - Variação do albedo visto pelo ECS2 durante trajetória marcada na Fig. 16.

O Laboratório de Sensores e Materiais (LAS/INPE) recebe entre 1 e 3 arquivos diários de valores das telemetrias do ECS2. Todos estes dados juntos formam uma grande quantidade de informações sobre a variação temporal da radiação albedo, em diferentes latitudes e longitudes dentro da visada de Cuiabá. Em função dos dados do ECS2 serem transmitidos em tempo real para a estação receptora de Cuiabá, temos estas informações apenas na visada desta estação. A **Figura 18** mostra várias trajetórias do SCD2 no período de novembro de 1998.

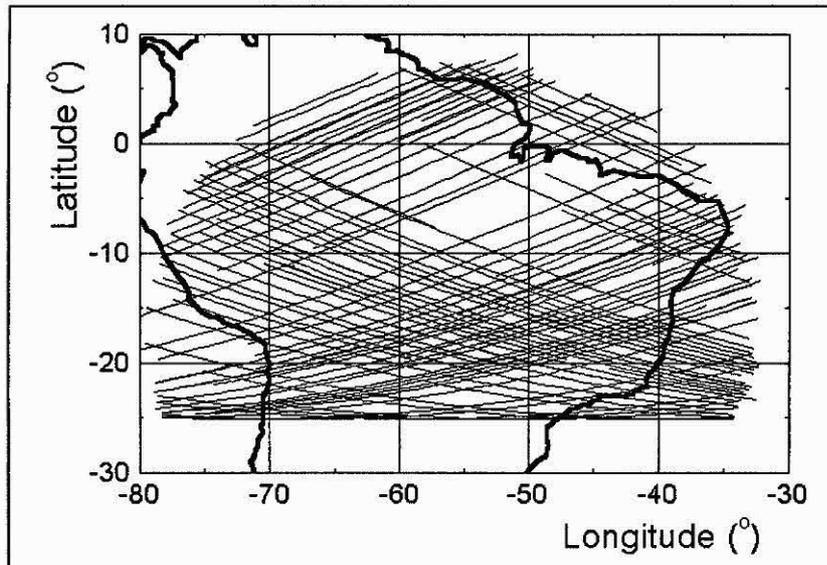


Figura 18 - Várias órbitas do SCD2 no período de novembro de 1998 na visada de Cuiabá.

Para ilustrar o potencial do método no estudo da variabilidade inter-anual do albedo planetário da região coberta pela visada de Cuiabá, foram calculados os valores mínimos, máximos, médios e desvios da média para diferentes períodos de 1998 e 1999 empregando a metodologia desenvolvida pelos autores. Estes períodos correspondem às estações do ano, ao próprio ano (1999, 2000 e outros) e aos meses do ano. Com a tabela dos valores calculados é possível construir imagens do albedo, e a comparação entre estas imagens permite que se obtenham várias conclusões relacionadas com modificações globais da crosta terrestre e da atmosfera.

As **Figuras 19 e 20** ilustram os valores de albedo planetário mínimo (mínima nebulosidade) estimados para a primavera de 1998 e verão de 1999. Nestas figuras o valor de refletividade está mostrado na barra de cinza e varia de 5% até 23%. Comparando-se estas duas imagens podemos concluir que, devido ao efeito El Niño, a nebulosidade persistente do Oceano Pacífico diminuiu e que, na passagem da primavera de 1998 para o verão de 1999, a refletividade na Floresta Amazônica aumentou. Várias outras conclusões deste tipo podem ser obtidas pela comparação entre estas imagens. Estes resultados são muito importantes nas áreas de meteorologia, sensoriamento remoto, geofísica espacial e ecologia, visto que estão relacionados com mudanças globais do Planeta.

Um trabalho detalhado sobre o albedo planetário obtido pela análise dos dados do ECS2 já foi submetido para publicação na Revista Brasileira de Geofísica [23].

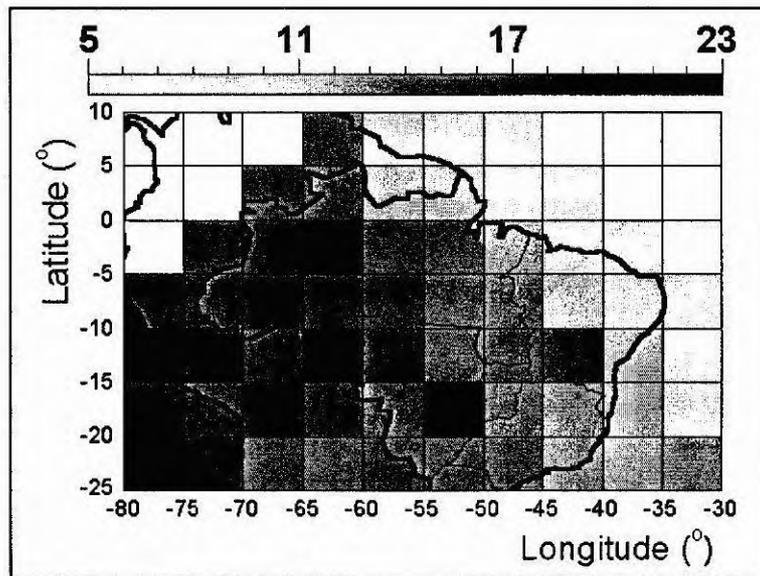


Figura 19 – Imagem do albedo planetário, valores mínimos, para o período da primavera de 1998.

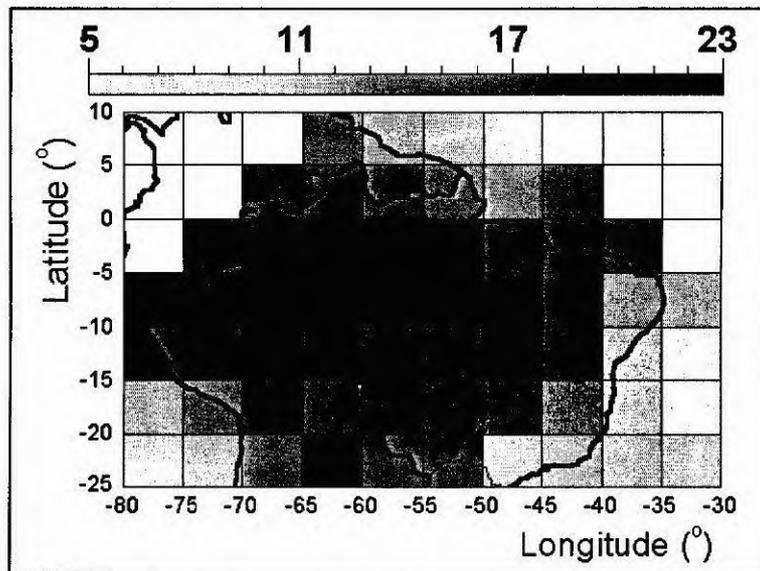


Figura 20 – Imagem do albedo planetário, valores mínimos, para o período do verão de 1999.

7. 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 0,08% por ano em valores absolutos ou de 0,7% por ano em relação ao seu valor inicial de eficiência de conversão.

Do ponto de vista tecnológico, o sucesso dos experimentos atesta a praticabilidade 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 usados estão experimentalmente aprovados pelo próprio funcionamento dos experimentos em missão.

Os dois diferentes métodos, usados para interpretar os sinais da telemetria dos ECS1 e ECS2, mostraram-se bastante eficientes para recuperar os parâmetros de saída das curvas características de corrente por tensão. Para o ECS1 vários trabalhos já foram publicados sobre este assunto [17, 18 e 22] e para o ECS2 os resultados serão publicados em breve. Pela primeira vez estes experimentos mostraram que é possível recuperar a curva completa da característica corrente *versus* tensão de células solares a partir do ajuste numérico de curvas secundárias.

Através da interpretação dos dados telemetrizados do ECS2, foi descoberto quase que por acaso a possibilidade de varredura do albedo planetário, pois o emprego de uma tecnologia simples e de baixo custo, em conjunto com um algoritmo adequado de tratamento de dados, permite obter valores de albedo planetário no território brasileiro, devido a visada da estação receptora de Cuiabá.

Este método apresenta-se como uma alternativa de baixo custo tecnológico, com possibilidade de emprego em satélites científicos de pequeno porte (até 150 Kg) e lançamento aproveitando a capacidade ociosa dos veículos lançadores de satélites maiores, promovendo o avanço da ciência e tecnologia espacial nacional a custo moderado e baixo risco.

Visto que o sinal do SCD2/ECS2 deverá se manter provavelmente pelos próximos 10 anos ou mais, espera-se que esta nova metodologia permita gerar maiores conhecimentos no desenvolvimento de métodos para monitoração de longo período do albedo terrestre, dada a sua importância na climatologia e suas mudanças globais.

Resultados da simulação do albedo obtido pelo ECS2 mostraram que os mosaicos de valores de albedo, embora tenham uma resolução baixa na superfície (500Km × 500Km), podem ser empregados para gerar cartas de variabilidade inter-ânua e inter-sazonais com o objetivo de monitorar forçantes climáticas de médio e longo prazo, como o El-Niño e as variações da “Alta da Bolívia”, por exemplo. O fato de que a metodologia empregada independe da degradação natural das células, pois o processo tem auto-calibração devido a rotação do satélite, representa um ponto importante quando se trata de investigar variações do albedo que podem ser muito pequenas mas representativas de tendências climáticas importantes. O experimento ECS2 e a metodologia usada podem ser adaptados para operar em janelas espectrais diferentes possibilitando um estudo ainda mais detalhado, principalmente sob o ponto de vista do balanço radiativo da atmosfera. Estuda-se o emprego de sistemas análogos ao apresentado neste trabalho para operar em satélites de pesquisa.

AGRADECIMENTOS

Os autores desejam expressar seus agradecimentos ao Laboratório de Microeletrônica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LME/USP) pelo uso de suas instalações para a fabricação das células solares e ao IPEN/CNEN pelo uso do acelerador de elétrons Dynamitron nas irradiações das células solares. Agradecemos, também, aos Srs. Rogério Ramos Bastos Míguez e Roberto Luiz Galski pelos relatórios de telemetria dos Experimentos.

8. REFERÊNCIAS

- [1] D. H. Walker e R. L. Statler, A Satellite Experiment to Study the Effects of Space Radiation on Solar Cell Power Generation. *Solar Cells*, 23(1988), p. 245.
- [2] C. Huang, Q. Wang e Q. Jiang, Solar Cell Calibration Experiment on Chinese Scientific Satellite. *Proc. of the Eighteenth IEEE Phot. Spec. Conf.*, Las Vegas-USA, 1985, p.634.
- [3] G. A. Landis e S. G. Bailey, Photovoltaic Engineering Testbed on the International Space Station, *Proc. of the Second World Conf. and Exh. on Phot. Solar Energy Conf.*, Viena-Austria, 1998, p.3564.
- [4] H. J. Hovel, *Solar Cells* in: R. K. Willardson and A. C. Beer, *Semiconductors and Semimetals*, Academic Press Inc., New York, Vol. 11, 1976.
- [5] H. S. Rauschenbach, *Solar Cell Array Design Handbook*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1980.
- [6] M. Wolf, G. T. Noel and R. J. Stirn, 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.
- [7] N. Veissid e A. M. Andrade, 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.
- [8] E. Raschaschke, Energy and Water Cycles in the Climate System: What Can We Measure from Space. In: *Radiation and Water in the Climate System* (Ehrhard Raschcke, ed.), Series I: Global Environmental Change, Springer, Berlin, vol. 45 (1996), p. 3.
- [9] A. Arking, The Radiative Effects of Clouds and their Impact on Climate, *Bull Am. Meteorol. Soc.* 71 (1990), p. 795.
- [10] W. B. Rossow, Properties of Clouds and Cloud Systems. In: *Radiation and Water in the Climate System* (Ehrhard Raschcke, eds.), Series I: Global Environmental Change, Springer, Berlin, vol. 45 (1996), p. 193.
- [11] S. Scheneider, Cloudiness as a Global Feedback Mechanism. The Effects of the Radiation Balance and Surface Temperature on Variation in Cloudiness. *J. Atmos. Sci.* (1972), p. 1413.
- [12] K. N. Liou, Influence of Cirrus Clouds in Weather and Climate Processes: A Global Perspective. *Review, Mon. Wea. Ver* 114 (1986), p. 1167.
- [13] R. T. Weatherald e S. Manabe, Cloud Feedback Processes in a General Circulation Model. *J. Atmos. Sci.* 45 (1998), p. 1397.
- [14] E. B. Pereira, S. L. Abreu, R. Stuhlmann, M. Rieland e S. Colle, Survey of the Incident Solar Radiation in Brazil by use of METEOSAT Satellite Data, *Solar Energy*, 57(2) (1996), p. 125.
- [15] E. B. Pereira e S. Colle, A Energia que vem do Sol, *Ciência Hoje*, 22(130) (1997), p. 4.

- [16] S. Colle e E. B. Pereira, *Atlas de Irradiação Solar do Brasil*, Instituto Nacional de Meteorologia INMET (1998), 57 pp.
- [17] N. Veissid, P. Nubile e A. F. Beloto, Results of the Solar Cell Experiment of the First Brazilian Satellite, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 46(1) (1997), p. 1.
- [18] N. Veissid, P. Nubile, A. F. Beloto and A. M. de Andrade, The Solar Cell Experiment of the First Brazilian Complete Space Mission Satellite. *Twenty-First Specialists Photovoltaic Conference*, Kissimmee, Florida-USA (1990), p. 1184.
- [19] N. Veissid, D. Bonnet e H. Richter, 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.
- [20] R.B. Lee, *Solar Geophysical Data Comprehensive Reports*, 607 (Part. II) (1995), p.32
- [21] H.Y. Tada, J. R. Carter Jr., B. E. Anspaugh e R. G. Downing, *Solar Cell Radiation Handbook*, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, JPL Publication 82-69 (1982).
- [22] N. Veissid, P. Nubile e A. F. Beloto, The Solar Cell Experiment of the First Brazilian Satellite: 1000 Days of Data Analysis. Proc. do *Second World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion*, Vienna-Austria (1998), p. 3582.
- [23] N. Veissid e E. B. Pereira, Um Modelo Simples de Levantamento do Albedo Planetário Empregando Dados do Experimento Célula Solar do Satélite Brasileiro SCD2, submetido para publicação na *Revista Brasileira de Geofísica* (2000).