

DEGRADAÇÃO EM ÓRBITA DOS PAINÉIS SOLARES DOS SATÉLITES BRASILEIROS SCD1 E SCD2

Mario Ferreira Baruel – baruel@dea.inpe.br

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Divisão de Eletrônica Aeroespacial

Nelson Veissid – veissid@las.inpe.br

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

Resumo. A Missão Espacial Completa Brasileira, estabelecida no ano de 1979 pelo governo brasileiro, começou com a série de satélites de coleta de dados meteorológicos. Os painéis solares destes satélites foram fabricados com células de silício e especificados para gerar até 76 W de potência elétrica no final de vida. O projeto correto dos painéis solares tem fundamental importância para definir o tempo de vida de um satélite. Durante a fase de projeto são realizadas as análises de fatores de degradação que definem a diminuição da geração de potência. Diversos sensores são instalados nos satélites para medir os parâmetros relacionados com a geração de energia. Os valores destes parâmetros são transmitidos em tempo real pelas telemetrias e armazenados no Centro de Controle e Rastreamento de Satélites do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Este trabalho recupera os dados e faz o tratamento necessário a fim de estudar o comportamento da geração elétrica de energia. Desta forma, é confirmada a validação do projeto do satélite por comparações com dados reais. O trabalho apresenta um breve histórico do uso de células solares em satélites, a descrição do projeto elétrico, o efeito da radiação e a análise da degradação da corrente elétrica dos painéis solares em órbita.

Palavras-chave. Energia solar, Satélite de coleta de dados, Célula solar

1. INTRODUÇÃO

Como parte da Missão Espacial Completa Brasileira (MECB), o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) lançou os dois primeiros satélites de coleta de dados (SCDs) brasileiros, o SCD1 e o SCD2, nos dias 9 de fevereiro de 1993 e no dia 22 de outubro de 1998, respectivamente. Eles são partes de um sistema de coleta de dados ambientais e de medidas das condições climáticas dos locais onde estão instaladas as plataformas de coleta de dados (PCDs). As informações coletadas nas PCDs são transmitidas aos satélites SCDs que retransmitem os dados às estações terrenas e posteriormente são distribuídos aos usuários. A Fig. 1 mostra o sistema de coleta de dados ambientais.

Os satélites SCDs tem massa de 115 kg, tem forma de prisma octogonal (Fig. 2), um metro de diâmetro e 1,25 m de altura, considerando as antenas. Valores médios de 70 W de potência elétrica são coletados dos painéis solares (VEISSID et al, 2010).

Lançados pelo foguete americano Pegasus a uma altitude de 750 km (ROZENFELD et al., 1996) na velocidade média de 27.000 km/h, eles realizam uma volta em torno da Terra em 100 minutos, portanto, percorrem aproximadamente 14 órbitas diárias, sendo visíveis pela estação terrena de Cuiabá apenas oito delas, devido à inclinação de 25° do plano orbital. Nestas condições, durante os 100 minutos da órbita, 65 minutos são iluminados pelo Sol, e no restante do período o satélite passa pelo cone de sombra da Terra.

Os satélites continuam operando em órbita com o tempo de vida superior ao projetado, considerando a previsão de vida útil de 01 ano para o SCD1 e de 02 anos para o SCD2. Em 09 de fevereiro de 2012, o SCD1 completou 19 anos em órbita, totalizando 100.274 órbitas.

As órbitas dos satélites SCD1 e SCD2 foram planejadas de forma a serem complementares, para minimizar o período diário em que fique sem passagens de um satélite sobre a estação terrena de Cuiabá.

De acordo com o Sistema Nacional de Dados Ambientais, as PCDs surgiram da necessidade de coletar informações de lugares remotos ou espalhados por uma região muito extensa (INPE, 2011). Como por exemplo, o controle de volume de água que chega numa barragem deve ser previamente conhecido para evitar desastres. O SINDA disponibiliza na internet a localização das PCDs no site <<http://sinda.crn2.inpe.br/PCD/>>.

O esforço empregado no desenvolvimento dos satélites SCDs foi coroado pelo sucesso do programa, que têm contribuído de modo significativo para a utilização de informação espacial na gestão governamental e para o surgimento de novas oportunidades de negócio (AEB, 2005).



Figura 1 - O Sistema Nacional de Dados Ambientais – SINDA.
Fonte: (INPE, 2011).

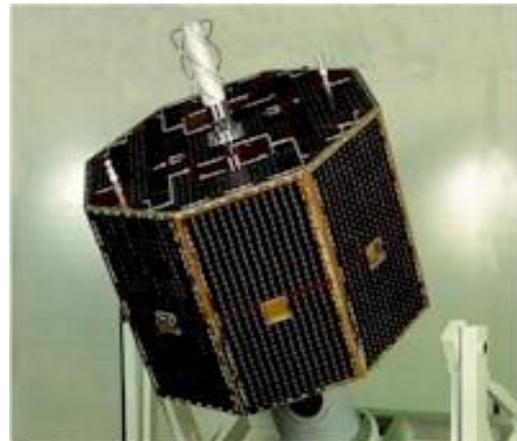


Figura 2 - O primeiro satélite brasileiro SCD1.
Fonte: (INPE, 2012a).

2. PAINÉIS SOLARES DE USO ESPACIAL

Na superfície da Terra, um painel solar suporta as intempéries da natureza (chuva, vento, variação de temperatura, granizo e outros fatores). Um painel solar colocado em um satélite, no entanto, sofre outro tipo de degradação ambiental. No espaço, as condições ambientais são diferentes, porque, fora da atmosfera da Terra, tem-se o fluxo de partículas ionizantes (elétrons e prótons de alta energia), ciclos térmicos mais severos, micrometeoritos, eletricidade estática e outros fatores. Todos esses efeitos combinados produzem degradação das células solares, ocasionando uma diminuição da sua eficiência de conversão (RAUSCHENBACH, 1980). Pesquisas com degradação de células solares em satélites artificiais em órbita da Terra são realizadas desde o ano de 1961 (FISCHELL et al., 1967).

O primeiro satélite alimentado a energia solar foi o norte-americano Vanguard I, lançado em 17 de março de 1958. O seu sistema fotovoltaico tinha seis células solares para alimentar os transmissores e funcionou até 1964 (NASA, 2012). Atualmente, a maioria dos satélites em órbita em torno da Terra têm painéis solares gerando vários milhares de Watts de potência.

Os painéis solares de uso espacial são compostos por células solares localizadas nas partes externas dos satélites. Os painéis podem estar juntos ao corpo do satélite (SCDs) ou abertos e orientados para o Sol como no caso dos três satélites da série CBERS (China-Brazil Earth Resources Satellite) lançados ao espaço em 1999, 2003 e 2007.

O projeto da parte de suprimento de energia elétrica de um satélite depende do gasto de energia dos componentes eletrônicos que formam os diversos subsistemas (telecomunicações, computador de bordo, controle de atitude e controle térmico). Cada célula solar gera uma pequena quantidade de energia elétrica. O projeto deve calcular a quantidade de células solares necessária para que o gerador solar forneça a energia requerida pelo satélite.

Células solares para uso em satélites são dispositivos de alta confiabilidade, garantidos por testes severos feitos em condições extremas de temperatura, ciclos térmicos, vácuo, aceleração, choques mecânicos e radiação por partículas. A exigência desse nível de confiabilidade se justifica pelo fato dos satélites em órbita não terem manutenção e não poderem ser consertados, em caso de avaria. Os dois primeiros satélites brasileiros SCD1 e SCD2, foram abastecidos com células solares de silício (BARUEL, VEISSID, 2010). Atualmente são utilizadas células solares de três junções em série (chamada de tripla junção) com base de germânio - este dispositivo atenua o problema da perda de energia quando um fóton de energia maior do que a energia do semicondutor é absorvida pela célula solar de uma junção. Nas células solares de uma junção, esse excesso é uma perda de energia convertida em calor e diminui a eficiência da célula solar. No entanto, nas células solares de tripla junção tem-se cada junção como uma “janela”, que absorve parte do espectro e deixa passar as restantes para as outras duas junções (Fig. 3). Dessa maneira, esse espectro é mais bem aproveitado, e a eficiência de conversão de energia é superior a 30%.

Também são realizados em células solares, testes de resistência à umidade (pois podem sofrer degradação por longos períodos de estocagem), compatibilidade eletromagnética, inspeção visual, medidas da característica corrente por tensão e ensaios de aderência da metalização e da camada anti-refletora. Painéis solares destinados a satélites podem ser testados no Laboratório de Integração e Testes (LIT) do INPE, em São José dos Campos/SP (Fig. 4), que está preparado para executar os ensaios ambientais e funcionais necessários para qualificar equipamentos para uso em satélite.

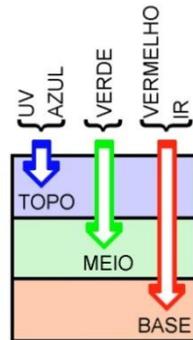


Figura 3 - Absorção da luz na célula de tripla junção.
 Fonte: (BARUEL, 2012).



Figura 4 – Laboratório de Integração e Testes (LIT) do INPE em São José dos Campos.
 Fonte: (INPE, 2012b).

3. OS PAINÉIS SOLARES DOS SATÉLITES SCD1 E SCD2

Os satélites SCDs são compostos de diversos subsistemas para realizar as funções requeridas, como o de telecomunicações, de estrutura, controle de atitude, suprimento de energia e térmico. O subsistema de suprimento de energia ou “Power Supply Subsystem” (PSS) é o responsável pela geração, armazenamento e distribuição da energia elétrica no satélite.

O subsistema de suprimento de energia é composto por diversos equipamentos, sendo eles, os painéis solares, as baterias, a Unidade Condicionadora de Potência (PCU), a Unidade Distribuidora de Potência (PDU), os conversores DC/DC e o Shunt. As principais funções do subsistema de suprimento de energia são o condicionamento da energia primária gerada pelos painéis solares, seu armazenamento e distribuição aos diversos subsistemas nos níveis exigidos por eles. A Fig. 5 ilustra o diagrama elétrico em blocos do PSS. O gerador solar possui uma derivação para o circuito do Shunt, aproximadamente no meio do “string”, que permite a dissipação do excesso de potência gerada nos painéis solares.

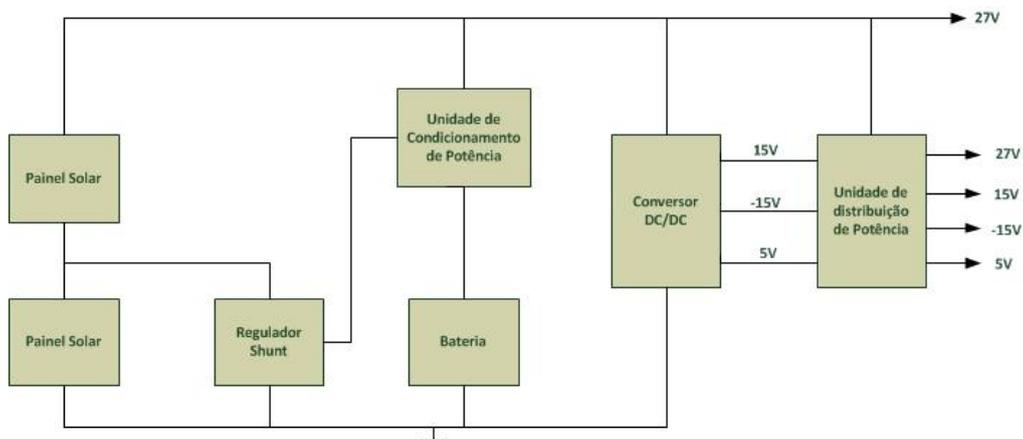


Figura 5 – O subsistema de suprimento de energia dos SCDs.
 Fonte: (BARUEL, 2012).

Os SCDs utilizam a tecnologia de painéis solares integrados ao corpo do satélite como mostrado na Fig. 2. Eles estão posicionados nas suas oito faces laterais e também um na face octogonal superior do satélite. O SCD2 não possui células solares na face octogonal, ou seja, possui células somente nas faces laterais. Neste tipo de configuração à minimização das perdas por reflexão é fundamental uma vez que o ângulo de incidência varia de 0° a 180°, devido à rotação do satélite. Cada um dos painéis solares é um sistema composto por diversas camadas de materiais. Nos SCDs as células solares de silício receberam uma cobertura de vidro de boro silicato, dopado com 5% de dióxido de Cério (CMX-200), de 200 µm de espessura, para proteção contra a radiação solar do ambiente espacial. Este vidro de proteção recebeu ainda uma camada de material anti-refletor que melhora a transmitância da luz. Entre as células solares e a estrutura de alumínio é colocada uma fina camada de filme de Kapton® para prover o isolamento elétrico do gerador solar para a estrutura de alumínio dos painéis.

A conexão elétrica entre as células e os circuitos é realizada através de um interconector de prata formando assim o conjunto denominado “Solar Cell Assembly” (SCA). Os SCAs dos satélites SCDs são remanescentes do programa de satélites geoestacionário Intelsat e por causa disso o vidro de proteção tem espessura superior a especificada no programa MECB.

4. O EFEITO DA RADIAÇÃO ESPACIAL NAS CÉLULAS SOLARES

A radiação é a maior responsável pela degradação da corrente fotogerada nos painéis solares de uso espacial. A radiação espacial próxima da Terra é definida pela interação entre o vento solar e o campo magnético terrestre. A degradação dos parâmetros elétricos em células solares pode ser causada principalmente pela irradiação de elétrons e prótons, devido à produção de defeitos pontuais na estrutura cristalina do semicondutor, que diminuem o comprimento de difusão dos portadores minoritários da célula, responsável pela eficiência da célula solar. Designa-se por comprimento de difusão dos portadores minoritários a distância percorrida por estes, para a qual a sua concentração cai para 36,8 % do seu valor inicial.

Para as células solares mais comuns, do tipo n sobre p, a maior parte da carga é gerada na zona p (base), onde os portadores minoritários considerados são os elétrons. O rendimento de conversão de uma célula solar é determinado pela sua eficiência em coletar os portadores nela gerados. A probabilidade de isso acontecer é tanto maior quanto maior for o comprimento de difusão dos portadores minoritários, sendo este um parâmetro indicativo da qualidade do material (TADA et al., 1982).

A maioria dos defeitos causados pela radiação são a ionização e o deslocamento atômico: a ionização ocorre quando elétrons orbitais são removidos do átomo ou da molécula. A medida da dose absorvida é usualmente definida em termos de energia absorvida por unidade de massa. A redução da transmitância no vidro de proteção de células solares é um importante efeito da radiação ionizante, pois o escurecimento aparece devido à formação de centros de cores quando a radiação ionizante excita um elétron orbital na banda de condução. Estes elétrons são atraídos por átomos impuros no óxido e formam este tipo de defeitos.

A perda de energia causada pelos processos de colisão em elétrons e prótons é responsável por uma fração considerável da dissipação energética. Não obstante, um tipo diferente de colisão causa dano permanente em células solares no ambiente espacial, que é o deslocamento de átomos de silício causado pelo bombardeio de partículas. Este deslocamento de átomos e sua vacância causam outras reações que formam defeitos permanentes; eles produzem significativas mudanças no equilíbrio da concentração de portadores e no tempo de vida dos portadores minoritários. Os danos causados pelo deslocamento de prótons no silício são significativamente diferentes dos causados pelos elétrons porque a região de deslocamento é muitas vezes maior e varia rapidamente com a energia do próton.

O principal fator afetado pelos defeitos de deslocamentos, provocado pela irradiação em células de silício, é o tempo de vida dos portadores minoritários. O tempo de vida é inversamente proporcional a taxa de recombinação.

5. PROJETO DO GERADOR SOLAR: A ANÁLISE PRELIMINAR DAS POTÊNCIAS

Para que o gerador solar de um satélite atenda aos objetivos do satélite, vários requisitos técnicos são estabelecidos para garantir que as especificações no nível de componentes e de equipamento sejam atendidas. A norma ECSS-E-ST-08C (ECSS, 2008) define os requisitos de testes ambientais e medidas aplicáveis à qualificação de células solares: inspeção visual, dimensão e massa, desempenho elétrico, coeficientes de temperatura, resposta espectral, dados termo-ópticos, ciclagem térmica, umidade e temperatura, camada anti-refletora e aderência de contatos, aderência do interconector, uniformidade de contato, irradiação de elétrons e prótons (desempenho no final de vida). Entre os principais requisitos para geradores solares está a potência gerada no final de vida do satélite. Durante a fase de projeto preliminar o documento “Relatório de Análise de Potência” é elaborado com objetivo de estimar quais seriam as potências geradas no estado iluminado. Esta análise pode ser atualizada na fase de projeto detalhado e ou após a fabricação do modelo de voo. Nesta análise são consideradas várias condições de órbita, tais como a de pior caso de geração de potência, e a de melhor caso, condição em que o gerador solar gera a maior potência. Também é analisada a condição AM0 em laboratório, na qual o gerador solar está apontado normal ao simulador solar. Esta análise na condição AM0 em solo é realizada para efeito de comparação e aceitação após a fabricação e os testes do modelo de voo. Portanto, o resultado da análise de potência possibilita estimar as correntes no início e no final de vida do satélite.

Os principais itens considerados na elaboração do “Relatório de Análise de Potência” são:

- as potências no início de vida BOL, no final de vida EOL e em condições de laboratório;
- os casos de falhas;
- o nível de radiação;
- as temperaturas mínima e máxima;
- os dados orbitais: o tipo e a altura da órbita, o tipo de controle de atitude e o tempo de vida do satélite;

- o tipo de células solares;
- os fatores de perda de potência: descasamento, raios UV e micrometeoritos, randômicas, calibração;
- a rotação do satélite;
- a variação da intensidade solar devido ao: ângulo de aspecto solar, a irradiância solar e a distância Terra- Sol.

6. ANÁLISE DAS CORRENTES ELÉTRICAS DOS PAINÉIS SOLARES EM ÓRBITA

A análise dos dados das correntes dos painéis solares em órbita é realizada através das telemetrias de bordo recebidas no Centro de Controle e Rastreamento de Satélites (CCS) do INPE. Estes dados devem ser tratados a fim de corrigir as variações da intensidade solar, da temperatura e do ângulo de aspecto solar (BARUEL, 2012).

Os dados dos satélites SCD1 e SCD2 estão armazenados em computadores não ligados a rede do INPE e se faz necessário solicitar auxílio aos operadores do CCS, isto porque devido à grande quantidade de dados armazenadas, eles fazem uma filtragem, extraindo somente o que é de interesse do usuário. Após o lançamento do satélite os dados de corrente são transmitidos para as estações de recepção de dados. Inicialmente os dados eram armazenados em fita magnética. Com o passar dos anos diversas fitas foram ficando velhas e os dados foram perdidos. Todo esforço do pessoal encarregado foi feito na recuperação e agora existe uma preocupação em armazenar os dados de forma mais segura.

No CCS estão disponíveis os dados dos SCDs dos meses de janeiro a abril de 1994 e a partir de janeiro de 2003 até a data presente. Os dados de maio de 1994 a dezembro de 2002 foram perdidos. Os dados são recebidos pelos usuários em ASCII, e mesmo após a filtragem do CCS, nova filtragem deve ser realizada para remover os dados de ruídos espúrios e informações que não são de interesse. Outro fator a ser considerado é a alteração ou perda de dados causada pelas colisões das partículas de alta energia com o satélite, os chamados "single event upset" (SEU), durante as tempestades solares.

A Fig. 6 mostra um exemplo dos dados de telemetria (TM075) da corrente total dos painéis solares do SCD1, durante os dias 01 a 05 de novembro de 2010. O satélite consegue ser visto pela estação de rastreamento 7 a 8 vezes por dia. Em algumas passagens ocorre o decréscimo abrupto da corrente do gerador solar no final do dia, mostrando que o satélite entrou na região de eclipse solar. Na Fig. 6 cada barra vertical representa uma passagem pela visada da estação receptora. As correntes variam de um valor mínimo de 3 A e um máximo de 5 A. Esta variação de valor entre as diversas barras verticais está associada à posição do satélite, isto é, quanto mais próximo do Equador, maior o valor da intensidade solar devido a distância Terra- Sol e ao albedo terrestre.

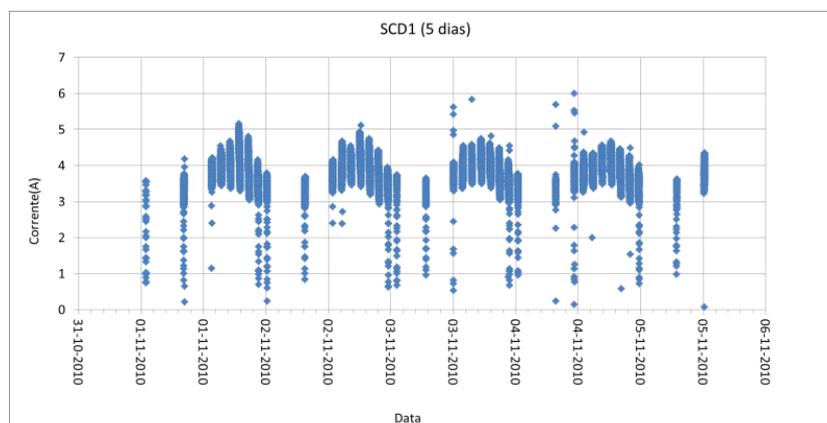


Figura 6 - Curvas da telemetria da corrente do SCD1 entre 01 e 05 de novembro de 2010.

Para a execução da análise de degradação da corrente fotogerada do SCD1 foram utilizados os dados da telemetria de corrente total do gerador solar dos primeiros meses do ano de 1994 e dos anos de 2003 a 2011. Para o SCD2 foram utilizados os dados de 2003 a 2010.

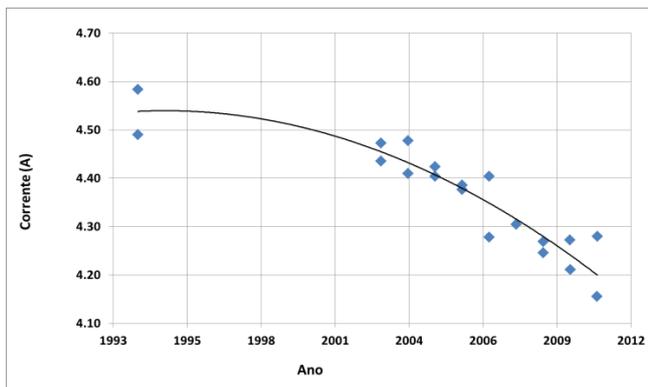


Figura 7 - Corrente fotografada no SCD1 de 1994 a 2011.

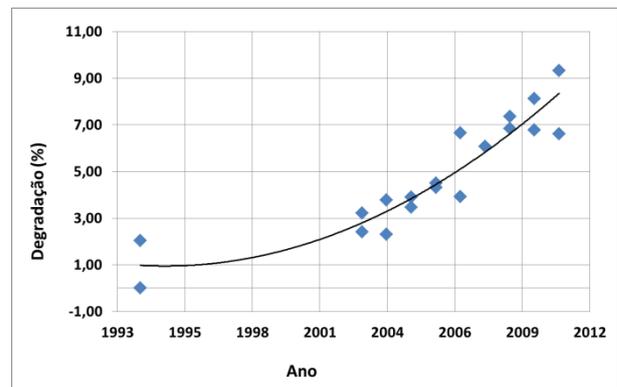


Figura 8 - Degradação da corrente fotografada no SCD1 em 17 anos.

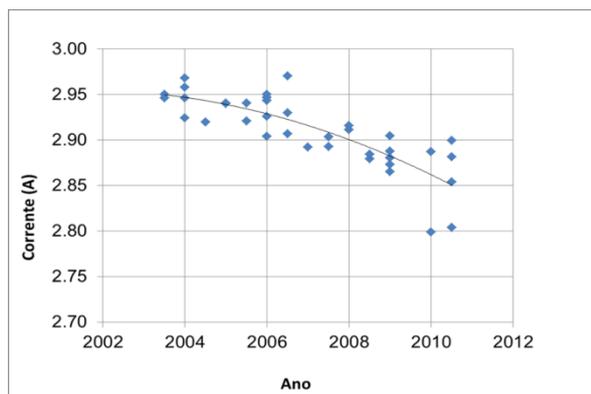


Figura 9 - Corrente fotografada no SCD2 de 2003 a 2010.

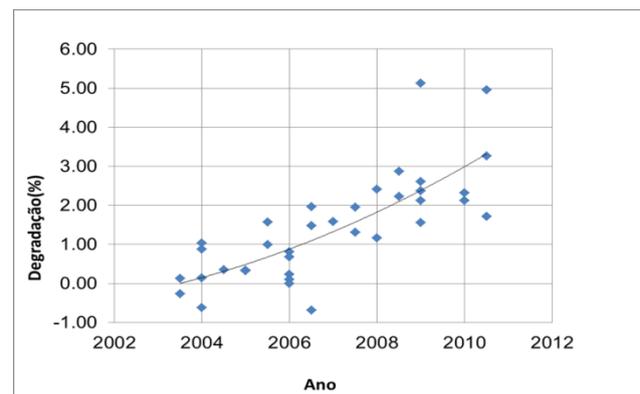


Figura 10 - Degradação da corrente fotografada no SCD2 em 07 anos.

7. 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. Pode-se 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 72 W e a estimativa de vida era de dois anos. A potência inicial do gerador solar do satélite era de 90 W e, após 13 anos, ele mostra uma potência gerada de 85 W. Pela taxa de degradação mostrada na corrente fotografada (Fig. 9 e Fig.10), pode-se afirmar que a vida do satélite vai se estender por mais vários anos. Naturalmente, existem outros fatores, como por exemplo, a correção da órbita, que definem a vida do satélite. 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 especificação de tempo de vida de um e dois anos respectivamente. Estas expectativas de vida foram ultrapassadas muito além do que qualquer previsão otimista poderia imaginar, pois eles ainda estão operacionais.

O trabalho apresentado neste documento contribui para preencher uma lacuna existente na MECB, que é o pós-tratamento dos dados de monitoramento da operação de satélites em voo, visando identificar problemas nas fases de projeto. Este trabalho contribui para a análise pós-lançamento dos dados de telemetrias dos satélites brasileiros. O trabalho é focado nos dados de voo e nos projetos dos geradores solares dos satélites SCD1 e SCD2, através da comparação dos parâmetros dos projetos com dados reais durante a vida destes satélites. Por exemplo, a degradação real do desempenho dos painéis solares confrontada com dados especificados na documentação de projeto. 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.

No texto deste trabalho é apresentado um histórico do uso de células solares em ambiente espacial, a descrição do subsistema de suprimento de energia, parâmetros de projeto do gerador solar e os resultados das análises das correntes elétricas dos painéis solares dos SCDs em órbita.

Os resultados de degradação das correntes elétricas dos painéis dos satélites SCD1 e SCD2, considerando uma degradação com variação linear da vida do satélite, foram de 0,42% e 0,47% ao ano, respectivamente. Os valores dessas taxas de degradação são próximos porque as células solares são de silício com estrutura similar e também devido ao fato dos dois satélites, nos seus respectivos períodos de vida, enfrentarem condições espaciais semelhantes, em função de terem a mesma órbita. O vidro de proteção utilizado nos SCDs, remanescente do programa de satélites geoestacionário Intelsat, de espessura superior a especificada para a órbita dos SCDs, contribuiu para a redução da degradação por radiação das células solares.

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 de telemetria que estavam armazenados em mídias magnéticas.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA (AEB). Programa Nacional de Atividades Espaciais - PNAE. Brasília: AEB. 2005, 114p.
- BARUEL, M. F.; VEISSID, N. Albedo planetário medido pelo experimento célula solar do satélite brasileiro SCD2. In: WORKSHOP EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA ESPACIAIS, 1. (WETE), 2010, São José dos Campos. Anais... São José dos Campos: INPE, 2010. V. WETE2010-1041. CD-ROM. ISSN 2177-3114. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/399KHQH>>. Acesso em: 23 jan. 2012.
- BARUEL, M. F. Estudo da variação da corrente fotogerada nos painéis solares dos satélites do INPE. 2012. 124 p. (sid.inpe.br/mtc-m19/2012/01.31.13.30-TDI). Dissertação (Mestrado em Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3B9TDP2>>. Acesso em: 29 mar. 2012.
- EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION (ECSS). Space engineering – photovoltaic assemblies and components. Noordwijk: ESA Publications Division, 2008c. (ECSS-E-ST-20-08C).
- FISCHELL R. E.; MARTIN J. H.; RADFORD W.E.; ALENN W.E. Radiation damage to orbiting solar cells and transistors. Applied Physics Laboratory . The Johns Hopkins University, Mar. 1967.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Sistema brasileiro de coleta de dados. São José dos Campos, 2011. Disponível em: <<http://sinda.crn2.inpe.br/PCD/sistema.jsp>>. Acesso em: 02 fev. 2012.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). 1o Satélite de coleta de dados. SCD-1. São José dos Campos, 2012a. Disponível em: <http://www.inpe.br/scd1/site_scd/fotos.htm>. Acesso em: 02 fev. 2012.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE b). INPE- 1987. São José dos Campos, 2012b. Disponível em: <http://www.inpe.br/50anos/linha_tempo/87.html>. Acesso em: 29 mar. 2012.
- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). National Space Science Data Center – Vanguard I. [S.l.], 2012a. Disponível em: <<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1958-002B>>. Acesso em: 14 jan. 2012.
- RAUSCHENBACH, H. S. Solar cell array design handbook: the principles and technology of photovoltaic energy conversion. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1980. 549 p. ISBN (0-442-26842-4).
- ROZENFELD P.; ORLANDO V.; MIGUEZ R.R.B. SCD1 Three years in orbit operation. In: SPACE MISSION OPERATIONS AND GROUND DATA SYSTEMS INTERNATIONAL SYMPOSIUM. 4, 1996, Munich, Germany. Proceedings... Munich: DLR/ESA, 1996. p.1442.
- TADA, H. Y.; CARTER J. R.; ANSPAUGH B. E.; DOWNING R. G. Solar cell radiation handbook. Pasadena: Editora JPL, 1982.
- VEISSID, N.; BELOTO, A. F.; BARUEL, M. F. Oito anos de análise dos dados do experimento célula solar do segundo satélite brasileiro. Revista Brasileira de Energia Solar, v.1, n. 2, p. 172-178, 2010.
- VEISSID, N.; BARUEL M. F.; Análise da corrente fotogerada nos painéis solares do satélite SCD2 do INPE compensada pelo albedo planetário. In: IV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR E V CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DA ISES, 2012 – São Paulo, 18 a 21 de setembro de 2012.